ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ DH36 ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ GMAW ΚΑΙ FCAW

ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β. Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2010

Στην οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4
1. ΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΚΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΕΡΙΟΥ (GAS METAL ARC WELDING, GMAW) ΚΑΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ (FLUX CORED ARC WELDING, FCAW) 5
1.1 Γενικά 5
1.1.1 Ταξινόμηση συγκολλήσεων με τήξη 5
1.1.2 Ο ρόλος της πηγής θερμότητας στη συγκόλληση 6
1.1.3. Υλικά και μέθοδοι συγκόλλησης 7
1.2 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW) . 11
1.2.1 Διαδικασία συγκόλλησης 11
1.2.2. Αέρια προστασίας 12
1.2.3. Μηχανισμοί μεταφοράς μετάλλου 13
1.2.4. Πιστόλι συγκόλλησης 14
1.2.5. Χαρακτηριστική μηχανής συγκόλλησης 14
1.2.6. Παράμετροι της μεθόδου 15
1.2.7. Πλεονεκτήματα 18
1.2.8. Περιορισμοί 19
1.3. Συγκόλληση με χρήση σωληνωτών ηλεκτροδίων (Flux-Core Arc Welding, FCAW) 20
1.3.1. Η διαδικασία της μεθόδου 20
1.3.2. Πλεονεκτήματα 22
1.3.3. Μειονεκτήματα 22
1.3.4. Εφαρμογές 23
1.3.5. Ιδιότητες και παράμετροι της συγκόλλησης FCAW 23
1.3.6. Τυποποίηση των σωληνωτών ηλεκτροδίων (συρμάτων) της συγκόλλησης FCAW 24
1.4. Σύγκριση της συγκόλλησης FCAW με τη συγκόλληση GMAW 28
1.5. Οι χρησιμοποιούμενες μορφές ηλεκτρικού ρεύματος στις συγκολλήσεις τόξου 29
1.6. Οι μηχανές των συγκολλήσεων τόξου 31
1.6.1. Ταξινόμηση μηχανών συγκόλλησης τόξου 31
1.6.2. Η σύνδεση με τη μηχανή συγκόλλησης 32
1.7. Ο Αυτοματισμός και η ρομποτική στις συγκολλήσεις 33

2. ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ 36
2.1. Χάλυβες - Γενικά 36
2.1.1. Είδη χαλύβων με χρήση στη ναυπηγική 36
2.1.2. Μικροδομή 37
2.2. Μέθοδοι Παραγωγής 38
2.2.1. Μέθοδοι παρασκευής 38
2.2.2. Θερμικές κατεργασίες ναυπηγικών χαλύβων 39
2.2.3. Μέθοδος εξέλασης με θερμομηχανική διαδικασία (TMCP) 42
2.3. Προδιαγραφές ναυπηγικών χαλύβων 46
2.3.1. Οι ναυπηγικοί χάλυβες κατά το πρότυπο A131 της ASTM 46
2.3.2. Προδιαγραφές νηογνωμώνων για χάλυβες υψηλής αντοχής 47
2.4. Τελευταίες εξελίξεις στη ναυπηγική: Χρήση ελασμάτων χάλυβα μικρού πάχους 50
2.4.1. Γενικά 50
2.4.2. Παραμόρφωση λυγισμού ελασμάτων μικρού πάχους 51
2.4.3. Τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος 54
3. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ 58
3.1. Γενικά 58
3.2. Παραγωγή και διάχυση της θερμότητας συγκόλλησης 58
3.2.1. Παραγωγή θερμότητας συγκόλλησης 58
3.2.2. Ο συντελεστής απόδοσης τόξου 59
3.3. Προσομοίωση της διαδικασίας συγκόλλησης και βασικές υποθέσεις 61
3.4. Θερμική ιστορία της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) – Θερμικοί κύκλοι ΘΕΖ 62
3.4.1. Προσδιορισμός της θερμικής ιστορίας της ΘΕΖ 62
3.4.2. Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό ψύξης της ΘΕΖ 62
3.4.3. Έλεγχος της προσδιδόμενης θερμότητας 63
4. Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ Η ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ 65
4.1. Γενικά 65
4.2. Ναυπηγικός χάλυβας DH36 65
4.3. Προετοιμασία δοκιμίων 67
4.4. Ηλεκτρόδια συγκόλλησης 70
4.5. Πειραματική διάταξη- Διαδικασία Συγκόλλησης 71
5. ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ 75
5.1. Γενικά 75

5.2. Προετοιμασία δοκιμίων 75
5.3. Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο 76
5.4. Έλεγχος μικροσκληρότητας 84
6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ 88
6.1. Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης 88
6.2. Θερμοστοιχεία τύπου Κ 89
6.3. Τα αποτελέσματα της μετρητικής διάταξης των θερμοστοιχείων 90
7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΩΝΙΑΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ 93
7.1. Παραμορφώσεις κατά τη συγκόλληση 93
7.2. Γραμμικός αισθητήρας μετατόπισης (LVDT) 95
7.3. Αποτελέσματα μετρήσεων LVDTs 98
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ 104

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010 υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Β. Παπάζογλου. Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο Παπάζογλου για την ανάθεση και τη βοήθειά του καθώς επίσης και στον Υ.Δ. κ. Α. Κυριακόγγονα για την πολύτιμη συνεισφορά του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και για τη συμβουλευτική υποστήριξη χωρίς τα οποία δύσκολα θα ερχόταν σε πέρας η προσπάθεια αυτή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέλη του προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την τεχνική υποστήριξη που παρείχε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η διερεύνηση των μετωπικών συγκολλήσεων, με τις μεθόδους συγκόλλησης με χρήση σωληωτών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding, FCAW) και συγκόλλησης με τηκόμενα ηλεκτρόδια και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW), μεταξύ ελασμάτων ναυπηγικού χάλυβα DH36. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με πλήρως αυτοματοποιημένη ρομποτική διάταξη, ενώ αέριο προστασίας ήταν το 82% Ar - 18% CO_2. Κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των θερμικών κύκλων της, καθώς και μετρήσεις των κατακόρυφων μετατοπίσεων στο ελεύθερο άκρο του ενός ελάσματος μέχρι το τέλος του κύκλου απόψυξης. Σε τομές συγκολλημένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε πλήρης μεταλλογραφική μελέτη (μικροσκληρομετρήσεις και οπτική μικροσκοπία). Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, όπως επίσης και για την εξέταση της ποιότητας και των ιδιοτήτων του σχηματιζόμενου μετάλλου συγκόλλησης.

1. ΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΚΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΕΡΙΟΥ (GAS METAL ARC WELDING, GMAW) ΚΑΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ (FLUX CORED ARC WELDING, FCAW)

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύντομη περιγραφή σε δύο από τις μεθόδους της συγκόλλησης με τήξη. Συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά στις μεθόδους:

- Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding , GMAW).
- Συγκόλληση με χρήση σωληνωτών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding, FCAW).

Γενικά, η κατηγορία των συγκολλήσεων με τήξη περιλαμβάνει τις εξής υποκατηγορίες:

- Συγκολλήσεις με αέριο,
- Συγκολλήσεις με τόξο,
- Συγκολλήσεις με δέσμη υψηλής ενέργειας, και
- Άλλες μέθοδοι συγκολλήσεων (με τριβή, με έκρηξη, με υπερήχους, κασσιτεροκόλληση κ.λπλ).

Οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι συγκολλήσεων ανήκουν στην ομάδα συγκολλήσεων με τήξη και είναι ευρέως διαδεδομένες στη χρήση τους στη ναυπηγική και γενικότερα σε βιομηχανικές εφαρμογές. Επίσης, θα γίνει αναφορά των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου.

1.1 Γενικά [6]

1.1.1 Ταξινόμηση συγκολλήσεων με τήξη

Οι συγκολλήσεις με τήξη αποτελούν μια διαδικασία ένωσης των μετάλλων χρησιμοποιώντας θερμότητα χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Οι τρεις κατηγορίες τέτοιων συγκολλήσεων είναι:

1. **Συγκόλληση με αέριο:**
   Συγκόλληση με οξυγόνο-ακετυλένιο (Oxyacetylene Welding, OAW)
2. **Συγκολλήσεις με τόξο:**

Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding)

Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas-tungsten Arc Welding, GTAW)

Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas-Metal Arc Welding, GMAW)

Συγκόλληση με σωληνωτά ηλεκτρόδια (Flux Cored Arc Welding, FCAW)

Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Submerged Arc Welding, SAW)

Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (Plasma Arc Welding, PAW)

Συγκόλληση electroslag (Electroslag Welding, ESW)

3. **Συγκολλήσεις με δέσμη υψηλής ενέργειας:**

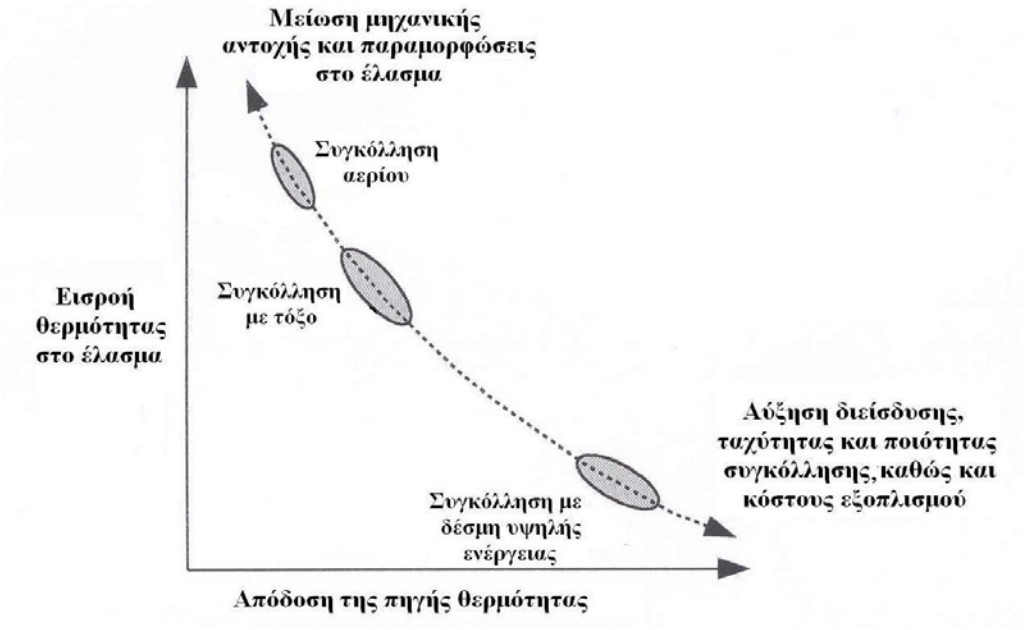
Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Welding, EBW)

Συγκόλληση με ακτίνες Laser (Laser Beam Welding, LBW)

1.1.2 Ο ρόλος της πηγής θερμότητας στη συγκόλληση

Ο τρόπος μετάδοσης της απαραίτητης θερμότητας για την τήξη, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για μια συγκόλληση. Για παράδειγμα, στη μέθοδο GTAW με μια πηγή 1,5 kW, το τόξο συγκεντρώνεται σε μια μικρή περιοχή διαμέτρου 6 mm και μπορεί εύκολα να παράγει λουτρό (τηγμένο μέταλλο). Αντίθετα, ένα «πιστολάκι» μαλλιών ίδιας ισχύος (1,5 kW) μπορεί απλά να θερμάνει ένα έλασμα (π.χ. έλασμα πάχους 1,6 mm), χωρίς να προκαλέσει τήξη.

Οι πηγές θερμότητας για τις συγκολλήσεις με αέριο, με τόξο και με δέσμη υψηλής ενέργειας είναι η φλόγα, το ηλεκτρικό τόξο και η δέσμη, αντίστοιχα. Η απόδοση αυτών αυξάνεται από τη φλόγα προς τη δέσμη. Όσο αυξάνεται η απόδοση της πηγής τόσο μειώνεται η απαιτούμενη θερμότητα για τη συγκόλληση ενός ελάσματος (**Error! Reference source not found.**). Η περιοχή που έρχεται σε επαφή με τη φλόγα του αερίου θερμαίνεται αργά και πριν προκληθεί η τήξη, χάνεται μεγάλο ποσό της θερμότητας προς το υπόλοιπο «σώμα» του ελάσματος. Η υπερβολική θέρμανση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο έλασμα, όπως μείωση της μηχανικής του αντοχής και παραμορφώσεις. Στο ίδιο υλικό όταν επενεργήσει μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων (ή laser), τότε προκαλείται τήξη σε μια μικρή βαθιά οπή (keyhole) σχεδόν αμέσως, χωρίς να χαθεί θερμότητα προς το υπόλοιπο έλασμα.



Σχήμα 1.1. Μεταβολή της θερμότητας που εισάγεται στο έλασμα σε σχέση με την απόδοση της πηγής.

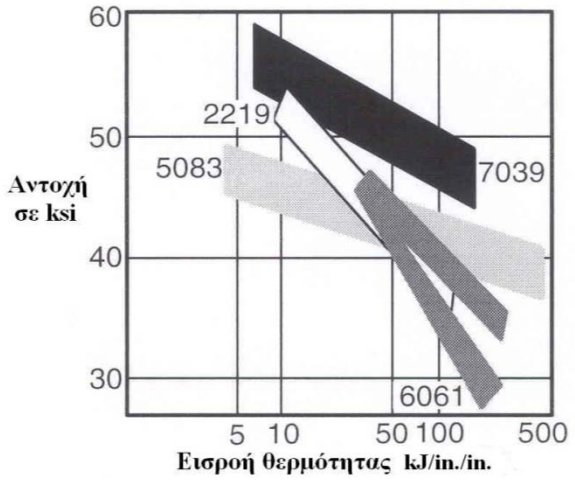
Τα πλεονεκτήματα από την αύξηση της απόδοσης της πηγής θερμότητας είναι το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης, οι μεγαλύτερες ταχύτητες και οι καλύτερης ποιότητας συγκολλήσεις δημιουργώντας τα λιγότερα προβλήματα στο έλασμα. Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει την αύξηση της αντοχής της συγκόλλησης (των κραμάτων νικελίου) σε σχέση με τη μείωση της εισροής θερμότητας ανά μονάδα μήκους της συγκόλλησης και ανά μονάδα πάχους του ελάσματος. Στο Σχήμα 1.3α φαίνεται ότι η γωνιακή παραμόρφωση είναι πολύ μικρότερη στη συγκόλληση EBW από ότι στη GTAW. Όμως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3β, το κόστος των μηχανών συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων ή laser είναι αρκετά υψηλό.

1.1.3. Υλικά και μέθοδοι συγκόλλησης

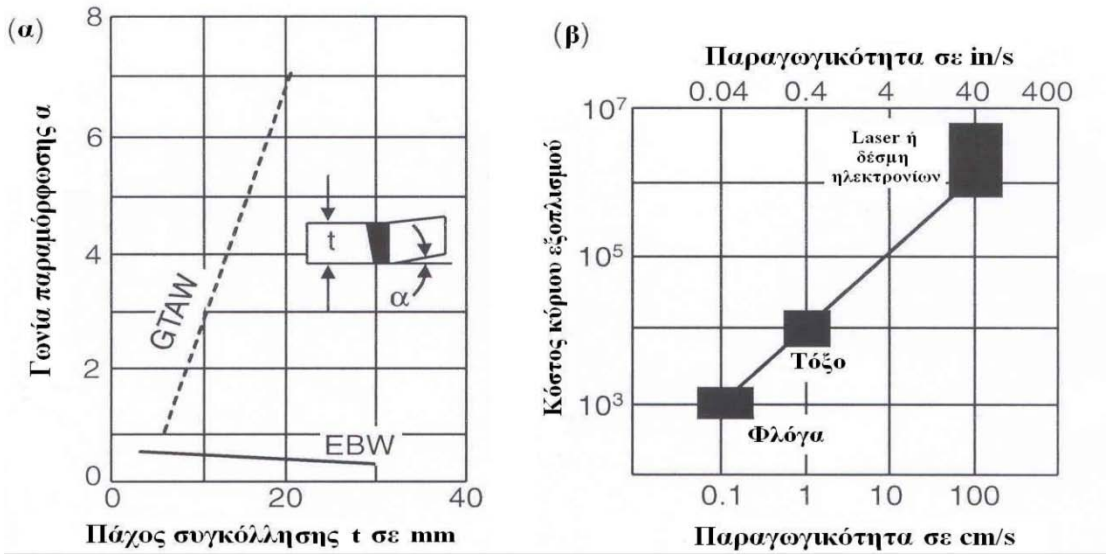
Στον Πίνακα 1-1 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες συγκολλήσεις για τους ανθρακούχους, τους ελαφρά κραματωμένους και τους ανοξείδωτους χάλυβες, καθώς επίσης και για το χυτοσίδηρο και τα κράματα αλουμινίου και νικελίου. Για παράδειγμα, η μέθοδος GMAW μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα πάχη, αλλά κυρίως για λεπτά ελάσματα, ενώ η μέθοδος FCAW δεν προτείνεται για μικρά πάχη. Επιπλέον, όλες οι συγκολλήσεις που χρησιμοποιούν

ηλεκτρόδια με επένδυση ή σκόνη συλλιπάσματος (flux), όπως οι SMAW, SAW, FCAW και ESW δεν είναι κατάλληλες για συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου.

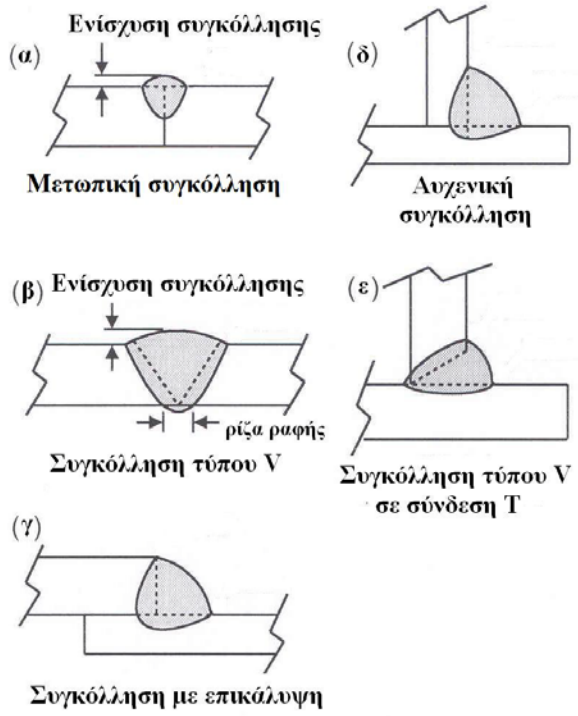
Το Σχήμα 1.4. δείχνει όλους τους πιθανούς τύπους σύνδεσης μεταξύ ελασμάτων. Τέλος, το Σχήμα 1.5. δείχνει τις 4 πιθανές θέσεις συγκόλλησης.



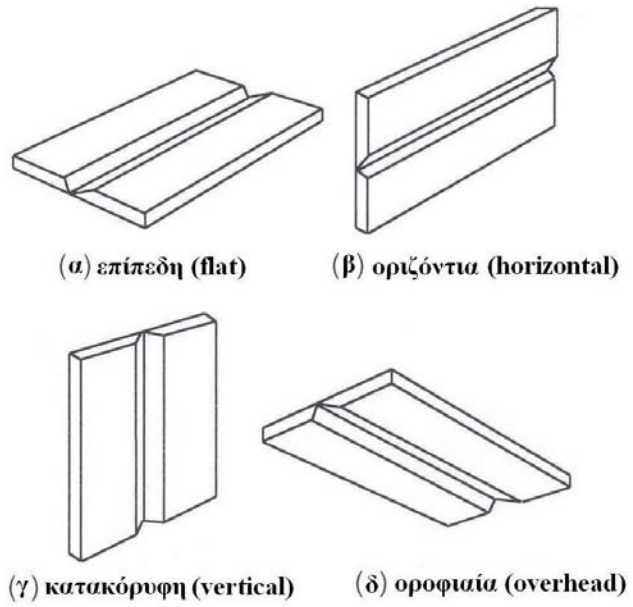
Σχήμα 1.2. Μεταβολή της αντοχής σε σχέση με την εισροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους της συγκόλλησης και ανά μονάδα πάχους του ελάσματος.



Σχήμα 1.3. Σύγκριση μεταξύ των μεθόδων συγκόλλησης: α) γωνιακή παραμόρφωση και β) κόστος κύριου εξοπλισμού



Σχήμα 1.4. Τύποι σύνδεσης μεταξύ ελασμάτων



Σχήμα 1.5. Οι τέσσερις θέσεις συγκόλλησης

Πίνακας 1-1

Υλικό	Πάχος	SMAW	SAW	GMAW	FCAW	GTAW	PAW	ESW	OFW	EBW	LBW
Ανθρακούχοι χάλυβες	S	X	X	X		X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X			X	X	X
	M	X	X	X	X				X	X	X
	T	X	X	X	X			X	X	X	
Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες	S	X	X	X		X			X	X	X
	I	X	X	X	X	X				X	X
	M	X	X	X	X					X	X
	T	X	X	X	X			X		X	
Ανοξείδωτοι χάλυβες	S	X	X	X		X	X		X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X			X	X
	M	X	X	X	X		X			X	X
	T	X	X	X	X			X		X	
Χυτοσίδηρος	I	X							X		
	M	X	X	X	X				X		
	T	X	X	X	X				X		
Κράματα νικελίου	S	X		X		X	X		X	X	X
	I	X	X	X		X	X			X	X
	M	X	X	X			X			X	X
	T	X		X				X		X	
Κράματα αλουμινίου	S			X		X	X		X	X	X
	I			X		X				X	X
	M			X		X				X	
	T			X						X	

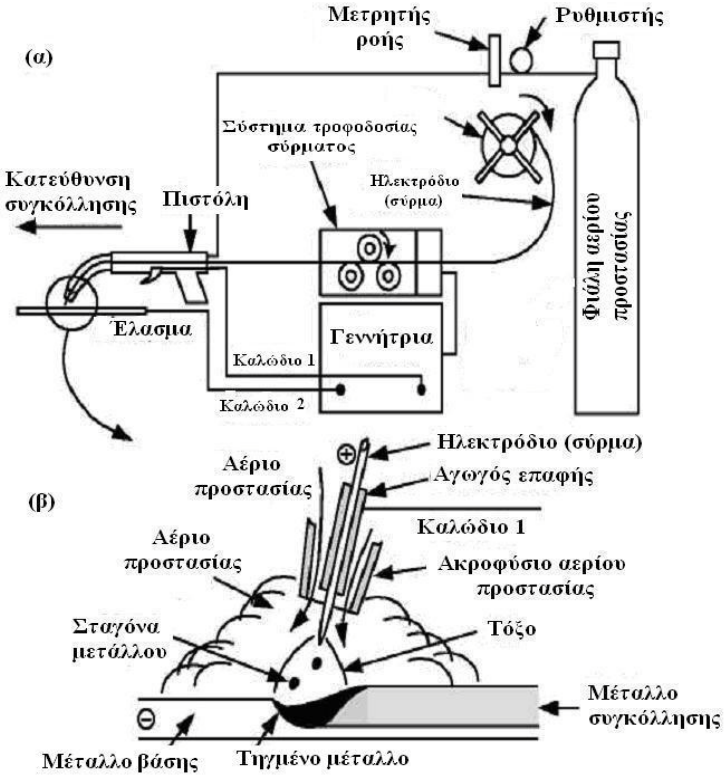
Επεξήγηση αρχικών: SMAW: Shielded metal arc welding, SAW: Submerged arc welding, GMAW: Gas-metal arc welding, FCAW: Flux-cored arc welding, GTAW: Gas-tungsten arc welding, PAW: Plasma arc welding, ESW: Electroslag welding, OFW: Oxyfuel gas welding, EBW: Electro beam welding, LBW: Laser beam welding.

Επεξήγηση συμβόλων: S: sheet (φύλλο) πάχους έως 3 mm, I: intermediate (μικρού πάχους) 3-6 mm, M: medium (μεσαίου πάχους) 6-19 mm, T: thick (μεγάλου πάχους) 19 mm και άνω, X: προτεινόμενη μέθοδος

1.2 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW) [1], [2], [6], [8], [10], [12]

1.2.1 Διαδικασία συγκόλλησης

Η συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW), είναι μια μέθοδος όπου η απαιτούμενη θερμότητα προέρχεται από ένα τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός συνεχώς τηκόμενου ηλεκτροδίου (σύρμα χωρίς επένδυση) και του προς συγκόλληση μετάλλου (Σχήμα 1.6). Η προστασία (του τόξου και του τηγμένου μετάλλου της συγκόλλησης) επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρησιμοποίηση αδρανών αερίων όπως το αργό και το ήλιο, γι' αυτό η μέθοδος GMAW ονομάζεται και MIG (Metal-Inert Gas). Όμως, επειδή χρησιμοποιούνται και μη αδρανή αέρια, ιδιαίτερα το CO_2, το όνομα GMAW φαίνεται να είναι το πιο κατάλληλο.



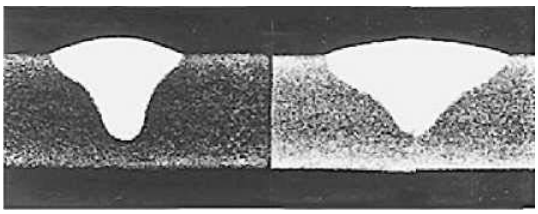
Σχήμα 1.6. Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου: (α) συνολική διαδικασία, (β) μεγέθυνση της περιοχής συγκόλλησης.

Η μέθοδος GMAW χρησιμοποιείται ευρύτατα στη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Η ανάστροφη πολικότητα, σε αντίθεση με τη GTAW, χρησιμοποιείται για την επίτευξη σταθερού τόξου, ομαλής μεταφοράς μετάλλου χωρίς απώλειες ή εκτινάξεις (spatter) και καλής διείσδυσης της συγκόλλησης. Με ορθή πολικότητα ή με εναλλασσόμενο ρεύμα η μεταφορά μετάλλου είναι ασταθής.

1.2.2. Αέρια προστασίας

Το αργό, το ήλιο και τα μίγματά τους χρησιμοποιούνται ως αέρια προστασίας για τα μη σιδηρούχα μέταλλα, καθώς επίσης και για τους ανοξείδωτους και κραματωμένους χάλυβες. Η ενέργεια σε ένα τόξο του αργού διαδίδεται λιγότερο ομοιόμορφα σε σχέση με το τόξο του ηλίου, λόγω της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του Ar. Όμως, το τόξο πλάσματος του Ar διαθέτει έναν πυρήνα υψηλής ενέργειας με έναν εξωτερικό μανδύα μικρότερης θερμικής ενέργειας. Αυτή η μορφή του πλάσματος, βοηθά στη σταθερή μεταφορά σταγόνων μετάλλου κατά τον άξονα του τόξου. Η εγκάρσια διατομή μιας συγκόλλησης με τόξο πλάσματος Ar, έχει μια στενότερη παραβολική μορφή σε σχέση με την αντίστοιχη του He (Σχήμα 1.7).

Στα σιδηρούχα μέταλλα, το He ως αέριο προστασίας μπορεί να παράγει εκτινάξεις (spatter), ενώ το Ar μπορεί να προκαλέσει αβαθή διείσδυση. Η προσθήκη του O_2 (περίπου 3%) ή του CO_2 (περίπου 9%) στο Ar περιορίζει τα προβλήματα. Οι ανθρακούχοι και οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ενώνονται συνήθως με το CO_2 ως αέριο προστασίας, με αποτέλεσμα την υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης, τη μεγαλύτερη διείσδυση και το χαμηλότερο κόστος. Όμως, το CO_2 προκαλεί αρκετές εκτινάξεις, γι' αυτό και χρησιμοποιείται μια σχετικά χαμηλή τάση ώστε να διατηρήσει ένα μικρού μήκους τόξο, στο οποίο η άκρη του ηλεκτροδίου είναι σχεδόν κάτω από την επιφάνεια των κομματιών προς κατεργασία.

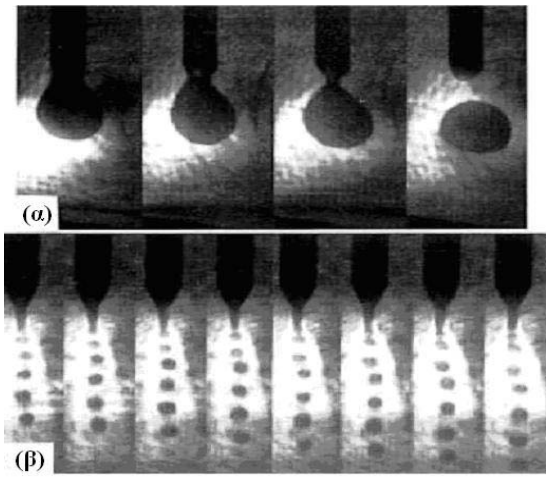


Σχήμα 1.7. Συγκολλήσεις GMAW σε αλουμίνιο 5083 με πάχος 6,4 mm, οι οποίες έγιναν με Ar (αριστερά) και με 75% Ar-25% He (δεξιά)

1.2.3. Μηχανισμοί μεταφοράς μετάλλου

Το τηγμένο μέταλλο στην άκρη του ηλεκτροδίου μπορεί να μεταφερθεί στο λουτρό της συγκόλλησης με τρεις διαφορετικούς τρόπους

Α. Με χοντρές σταγόνες. Οι σταγόνες μετάλλου, με διάμετρο ίδια ή και μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτροδίου, μεταφέρονται μέσα στο τόξο με την επιρροή της βαρύτητας. Στο Σχήμα 1.8α παρουσιάζεται η μεταφορά με χοντρές σταγόνες κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης GMAW ενός χάλυβα στα 180 Α με προστατευτικό αέριο Ar-2%O_2. Η μεταφορά αυτή δεν είναι συχνά ομαλή και παράγει εκτινάξεις (spatter). Σε σχετικά χαμηλά ρεύματα συγκόλλησης, η μεταφορά μετάλλου γίνεται με χοντρές σταγόνες, ανεξάρτητα από τον τύπο του αερίου προστασίας. Όμως για το CO_2 και το He, αυτός ο μηχανισμός μεταφοράς εμφανίζεται για όλα τα ρεύματα συγκόλλησης.



Σχήμα 1.8. Μεταφορά μετάλλου στη συγκόλληση GMAW ενός χάλυβα με προστατευτικό αέριο Ar-2%O2: (α) με χονδρές σταγόνες στα 180Α και 29V, (β) με ψεκασμό λεπτών σταγόνων στα 320Α και 29V

Β. Με ψεκασμό λεπτών σταγόνων. Πάνω από μία κρίσιμη τιμή του ρεύματος συγκόλλησης, μικρές σταγόνες μετάλλου μεταφέρονται μέσα στο τόξο με την επιρροή ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, με μεγαλύτερη ταχύτητα και συχνότητα απ' ό,τι στο μηχανισμό χοντρών σταγόνων. Στο Σχήμα 1.8β παρουσιάζεται η μεταφορά μετάλλου με ψεκασμό λεπτών σταγόνων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου ενός χάλυβα στα 320 Α με Ar-2%O_2. Ο μηχανισμός αυτός είναι σταθερότερος και χωρίς εκτινάξεις. Η κρίσιμη τιμή

του ρεύματος (ή ρεύμα μετάβασης), εξαρτάται από το προς συγκόλληση υλικό, από το μέγεθος του ηλεκτροδίου και τέλος από τη σύνθεση του αερίου προστασίας. Στην περίπτωση του Σχήματος 1.8. το κρίσιμο ρεύμα βρέθηκε να είναι μεταξύ των 280 και 320 A.

Γ. Με περιοδικές βραχυκυκλώσεις του τόξου. Το τηγμένο μέταλλο στην άκρη του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο λουτρό της συγκόλλησης όταν το ηλεκτρόδιο αγγίξει την επιφάνεια του λουτρού, δηλαδή προκαλώντας βραχυκύκλωμα του τόξου. Η μεταφορά με περιοδικές βραχυκυκλώσεις εφαρμόζεται σε μικρής κλίμακας ρεύματα και σε λίγες διαμέτρους ηλεκτροδίων. Ο μηχανισμός αυτός παράγει ένα μικρό και με γρήγορη απόψυξη λουτρό συγκόλλησης, που είναι επιθυμητό για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, για τις οροφιαίες συγκολλήσεις και για τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων στη ρίζα των προς συγκόλληση ελασμάτων.

1.2.4. Πιστόλι συγκόλλησης

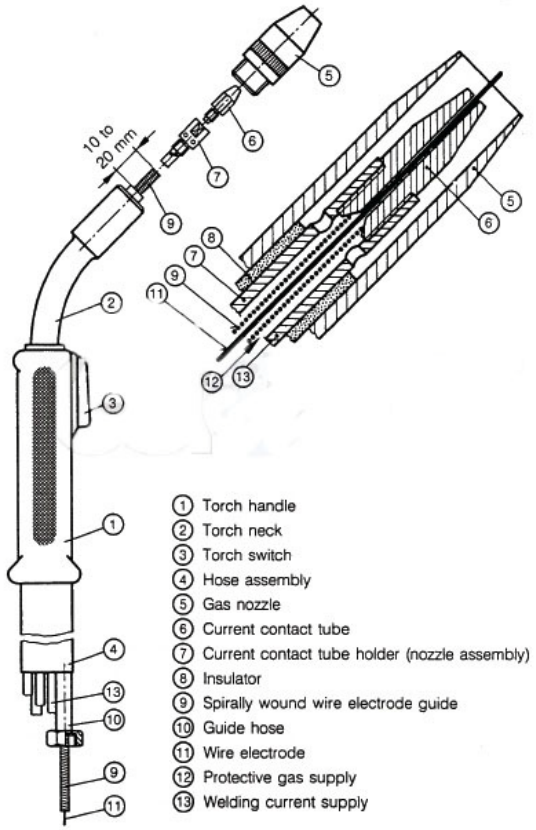
Υπάρχουν πιστόλια για χειροκίνητη και ημιαυτόματη συγκόλληση GMAW. Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το πιστόλι πρέπει απαραίτητα να διαθέτει μία ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνα επαφής) για τη διοχέτευση ρεύματος. Πρέπει, επίσης, να διαθέτει ακροφύσιο για την παροχή αερίου προστασίας ή με κλειστό κύκλωμα νερού ή και με τα δύο. Στο Σχήμα 1. φαίνεται ένα τυπικό αεριόψυκτο πιστόλι συγκόλλησης GMAW.

1.2.5. Χαρακτηριστική μηχανής συγκόλλησης

Η GMAW είναι μέθοδος συγκόλλησης με πολύ υψηλή πυκνότητα έντασης ρεύματος ($i = 50 \times 10^3 \div 300 \times 10^3\ A/in^2$). Για το λόγο αυτό απαιτείται μηχανή συγκόλλησης σταθερής ή ελαφρά ανερχόμενης τάσης.

Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών συγκόλλησης GMAW είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος. Οι μηχανές αυτές παρέχουν δύο επίπεδα έντασης ρεύματος: ένα σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης, που δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηκόμενου υλικού σε σταγονίδια, και ένα ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπό μορφή παλμών, που υπερτίθεται στο πρώτο. Η μέγιστη τιμή του συνολικού ρεύματος είναι υψηλότερη της τιμής

μετάβασης (κρίσιμη τιμή ρεύματος), οπότε η μεταφορά γίνεται με τη ψεκασμό. Το πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι η επιθυμητή μεταφορά με ψεκασμό γίνεται με αποδοτικότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.9. Πιστόλι συγκόλλησης GMAW

1.2.6. Παράμετροι της μεθόδου

Οι σημαντικές παράμετροι της GMAW που επηρεάζουν τη διείσδυση, τη γεωμετρία και γενικότερα την ποιότητα της συγκόλλησης είναι:

- Το ρεύμα συγκόλλησης (πρακτικά ο ρυθμός τροφοδοσίας ηλεκτροδίου)
- Η τάση του τόξου (στην πράξη το μήκος τόξου)
- Η ταχύτητα
- Η προέκταση του ηλεκτροδίου

- Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου (γωνία πιστολιού)
- Η διάμετρος του ηλεκτροδίου

Ο έλεγχος των παραπάνω παραμέτρων είναι πολύ μεγάλης σημασία για την πραγματοποίηση αποδεκτής ποιότητας συγκολλήσεων. Καθώς οι παράμετροι αυτές δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους, η αλλαγή μίας εξ' αυτών γενικά απαιτεί προσαρμογή και των υπολοίπων για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Η επίδραση των παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης συνοψίζεται στον Πίνακα 1-2.

Είναι απαραίτητη η γνώση του θεωρητικού υπόβαθρου, όπως και η εμπειρία, για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερου αποτελέσματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιλογή των παραμέτρων εξαρτάται και από άλλες μεταβλητές όπως τον τύπο του μετάλλου βάσης, τη θέση της συγκόλλησης, τις ποιοτικές απαιτήσεις και τον αριθμό των απαιτούμενων συγκολλήσεων, η εκλογή αυτή των παραμέτρων καθίσταται ακόμα πιο περίπλοκη. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι ιδιότητες της συγκόλλησης από την κάθε παράμετρο.

Ρεύμα συγκόλλησης: Αλλάζοντας το ρυθμό τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου, αλλάζει και η τιμή του ρεύματος συγκόλλησης με αντίστοιχο τρόπο όταν πρόκειται για πηγή σταθερού ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι το παρεχόμενο ρεύμα από την πηγή διαφοροποιείται σημαντικά με μικροαλλαγές στην τάση (μήκος τόξου) που προκαλούνται όταν αλλάζει ο ρυθμός τροφοδοσίας ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, μια ενδεχόμενη αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση του βάθους και του πλάτους της διείσδυσης, του ρυθμού απόθεσης και του μεγέθους της ραφής.

Πολικότητα: Η πλειοψηφία των συγκολλήσεων με χρήση GMAW γίνεται με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στο θετικό πόλο της πηγής (ανάστροφη πολικότητα), διότι προσφέρει σταθερότητα στο τόξο, μικρό πιτσίλισμα, καλό προφίλ ραφής και μεγαλύτερη διείσδυση.

Τάση τόξου: Η τάση και το μήκος του τόξου είναι σχετικοί όροι και συχνά χρησιμοποιούνται κατ' εναλλαγή. Ωστόσο δεν είναι ταυτόσημοι. Η τάση του τόξου είναι ένα μέγεθος το οποίο αντικατοπτρίζει το φυσικό μήκος του τόξου με ηλεκτρικούς όρους. Από την άλλη, το φυσικό μήκος τόξου μπορεί να αποδώσει διαφορετικές τιμές τάσης, ανάλογα με το αέριο προστασίας, το ρεύμα και την έκταση του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι παράμετροι παραμένουν σταθερές, υπάρχει μια συστηματική σχέση που συνδέει την τάση με το μήκος του τόξου: Με αύξηση της τάσης αυξάνεται και το μήκος του τόξου. Παρ' όλο που αυτό που ενδιαφέρει είναι το μήκος του τόξου, η τιμή της τάσης μπορεί πολύ πιο εύκολα να μετρηθεί και

άρα ο όρος αυτός είναι πολύ πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος. Με αύξηση της τάσης του τόξου παρατηρούνται πιο επίπεδες ραφές και αύξηση του πλάτους της ζώνης τήξης.

Ταχύτητα: Ορίζεται ως ο γραμμικός ρυθμός με τον οποίο το τόξο κινείται κατά μήκος της σύνδεσης. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι διατηρούνται αμετάβλητες, η διείσδυση της συγκόλλησης είναι μέγιστη σε μια μέση ταχύτητα. Όταν η ταχύτητα μειώνεται, ο ρυθμός απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους αυξάνεται. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες το τόξο επιδρά περισσότερο στο λουτρό της συγκόλλησης παρά στο μέταλλο βάσης και έτσι μειώνεται η αποτελεσματική διείσδυση. Με αύξηση της ταχύτητας, η θερμότητα που μεταδίδεται στο μέταλλο βάσης από το τόξο αυξάνεται διότι το τόξο επιδρά περισσότερο σε αυτό. Όμως περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμότητα στο μέταλλο βάσης. Οπότε, η τήξη του μετάλλου βάσης αρχικά αυξάνεται και μετά μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Σε μεγάλες ταχύτητες παρατηρείται τάση για δημιουργία υποκοπών κατά μήκος των άκρων των ραφών λόγω της ανεπαρκούς απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης.

Προσανατολισμός ηλεκτροδίου: Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου περιγράφεται με τους εξής δύο τρόπους: Με τη σχέση του άξονα του ηλεκτροδίου με την κατεύθυνση της συγκόλλησης (travel angle) και από τη γωνία μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας στην οποία γίνεται η συγκόλληση (work angle). Όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει σε κατεύθυνση αντίθετη με αυτή της ταχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οπισθέλκουσας γωνίας (trail angle). Αντίθετα, όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει προς την κατεύθυνση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πρόσω γωνίας (lead angle). Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται backhand welding technique και forehand welding technique, αντίστοιχα. Για όλες τις θέσεις, μια γωνία trailing μεταξύ 5-15° ως προς την κατακόρυφο αποδίδει συγκόλληση με μέγιστη διείσδυση και στενή κυρτή επιφάνεια της ραφής και, επίσης, επιτυγχάνεται η βέλτιστη προστασία του λουτρού συγκόλλησης. Ωστόσο, είναι πιο σύνηθες να εφαρμόζεται γωνία leading που προσφέρει καλύτερη ορατότητα στο χειριστή και ραφή με λιγότερη κυρτότητα. Για κάποια υλικά, όπως το αλουμίνιο, προτιμάται η leading angle διότι έτσι επιτυγχάνεται «καθαριστική δράση» μπροστά από το λουτρό συγκόλλησης, κάτι που μειώνει την υγρασία και την οξείδωση του μετάλλου βάσης.

Έκταση του ηλεκτροδίου: Είναι η απόσταση μεταξύ του τελευταίου σημείου του αγωγού επαφής του πιστολιού και του άκρου του ηλεκτροδίου. Αύξηση της απόστασης αυτής οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία προκαλεί επιπλέον θερμότητα στο ηλεκτρόδιο και

συμβάλλει σε υψηλότερους ρυθμούς τήξης του. Με σταθερή την τάση του τόξου το επιπλέον μέταλλο θα αποτεθεί σαν μια στενή και έντονα κυρτή ραφή. Η βέλτιστη έκταση του ηλεκτροδίου κυμαίνεται γενικά μεταξύ 6,4-13 mm για μεταφορά με περιοδικές βραχυκυκλώσεις του τόξου και μεταξύ 13-25 mm για μεταφορά με σταγόνες ή ψεκασμό.

Διάμετρος του ηλεκτροδίου: Η διάμετρος του ηλεκτροδίου επηρεάζει κι αυτή με τη σειρά της τη μορφή της ραφής. Ένα μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο απαιτεί υψηλότερη κατώτατη τιμή ρεύματος από ό, τι ένα μικρότερο για να επιτύχει τα ίδια χαρακτηριστικά μεταφοράς μετάλλου. Υψηλότερα ρεύματα, με τη σειρά τους, προκαλούν επιπλέον τήξη του ηλεκτροδίου και περισσότερη απόθεση μετάλλου σε ρευστή μορφή. Ακόμη, υψηλές τιμές ρεύματος έχουν αποτέλεσμα μεγαλύτερους ρυθμούς απόθεσης και μεγαλύτερη διείσδυση, αλλά μπορεί να μην επιτρέπουν τη χρήση κάποιων ηλεκτροδίων σε κατακόρυφη ή οροφιαία θέση.

Πίνακας 1-2. Επίδραση παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης GMAW

	Desired changes							
	Penetration		Deposition rate		Bead size		Bead width	
Welding variables to change	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease
Current and wire feed speed	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Little effect	Little effect
Voltage	No effect	No effect	Little effect	Little effect	Little effect	Little effect	Increase	Decrease
Travel speed	No effect	No effect	Little effect	Little effect	Decrease	Increase	Decrease	Increase
Electrode extension	Decrease	Increase	Increase(a)	Decrease(a)	Increase	Decrease	Decrease	Increase
Wire diameter	Decrease	Increase	Decrease	Increase	Little effect	Little effect	Little effect	Little effect
Shield gas %	Increase	Decrease	Little effect	Little effect	Little effect	Little effect	Increase	Decrease
Gun angle	Drag	Push	Little effect	Little effect	Little effect	Little effect	Push	Drag

(a) Will result in desired change if current levels are maintained by adjustment of wire feed speed

1.2.7. Πλεονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μήκος του ηλεκτροδίου όπως σε άλλες μεθόδους.
- Η συγκόλληση μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλες τις θέσεις με χρήση των κατάλληλων παραμέτρων.
- Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους (SMAW).

- Ο ρυθμός απόθεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος από ό, τι στη SMAW.
- Η συνεχής τροφοδοσία ηλεκτροδίου επιτρέπει τη συγκόλληση μεγάλου μήκους χωρίς διακοπές.
- Η διείσδυση είναι βαθύτερη σε σύγκριση με τη SMAW, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει τη χρήση μικρότερων ραφών σε αυχενικές συγκολλήσεις για ίδια αντοχή.
- Δεν απαιτείται μεγάλη ικανότητα χειρισμών από το συγκολλητή διότι το μήκος του τόξου διατηρείται σταθερό σε σχετικά μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην απόσταση ανάμεσα στο ακροφύσιο και το προς συγκόλληση μέταλλο.
- Απαιτείται ελάχιστος καθαρισμός μετά τη συγκόλληση λόγω της απουσίας βαριάς σκουριάς.

Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τη μέθοδο κατάλληλη για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής και σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές. Με την έλευση της ρομποτικής, η επιλογή της GMAW είναι όλο και συχνότερη.

1.2.8. Περιορισμοί

Όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης έτσι και η GMAW υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς:

- Ο εξοπλισμός της μεθόδου είναι πιο πολύπλοκος και συνήθως πιο ακριβός και, ακόμη, δεν είναι εύχρηστος ως προς τη φορητότητά του.
- Η μέθοδος είναι πιο δύσκολα εφαρμόσιμη σε δυσπρόσιτα σημεία λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του πιστολιού συγκόλλησης σε σχέση με τη SMAW και πρέπει να διατηρείται σε κοντινή απόσταση από τη ραφή για να διασφαλιστεί η επαρκής προστασία αερίου.
- Το τόξο πρέπει να προστατεύεται από ρεύματα αέρα που παρασύρουν το αέριο προστασίας κάτι που περιορίζει την εφαρμογή της μεθόδου σε εξωτερικούς χώρους.
- Τα σχετικά υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας και η ένταση του τόξου μπορεί να δυσκολέψουν το συγκολλητή να κρίνει την ποιότητα της συγκόλλησης.

1.3. Συγκόλληση με χρήση σωληνωτών ηλεκτροδίων (Flux-Core Arc Welding, FCAW) [1], [2], [5], [6], [8], [10]

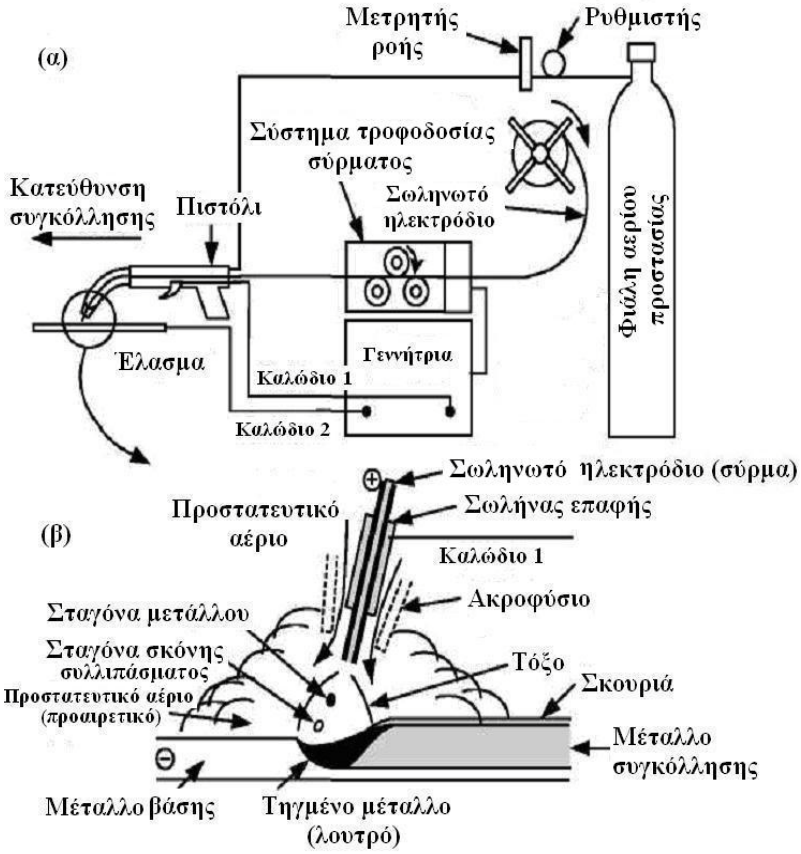
1.3.1. Η διαδικασία της μεθόδου

Η συγκόλληση με χρήση σωληνωτών ηλεκτροδίων (FCAW) είναι παρόμοια με τη GMAW, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10α. Όμως, το σωληνωτό ηλεκτρόδιο (σύρμα) περιέχει στον πυρήνα του συλλίπασμα (flux) και δεν είναι συμπαγές όπως και στη GMAW. Δηλαδή το ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας ο οποίος περιέχει τη σκόνη συλλιπάσματος και ενδεχομένως κραματικές προσμίξεις και αποξειδωτικά σιδηροκράματα. Ο ρόλος της σκόνης (flux) είναι παρόμοιος με εκείνο του συλλιπάσματος των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της συγκόλλησης SMAW, δηλαδή η δημιουργία ενός στρώματος σκουριάς πάνω από το λουτρό και η προστασία από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα.

Η χρήση πρόσθετου αερίου προστασίας είναι προαιρετική. Έτσι υπάρχουν δύο είδη συγκόλλησης FCAW:

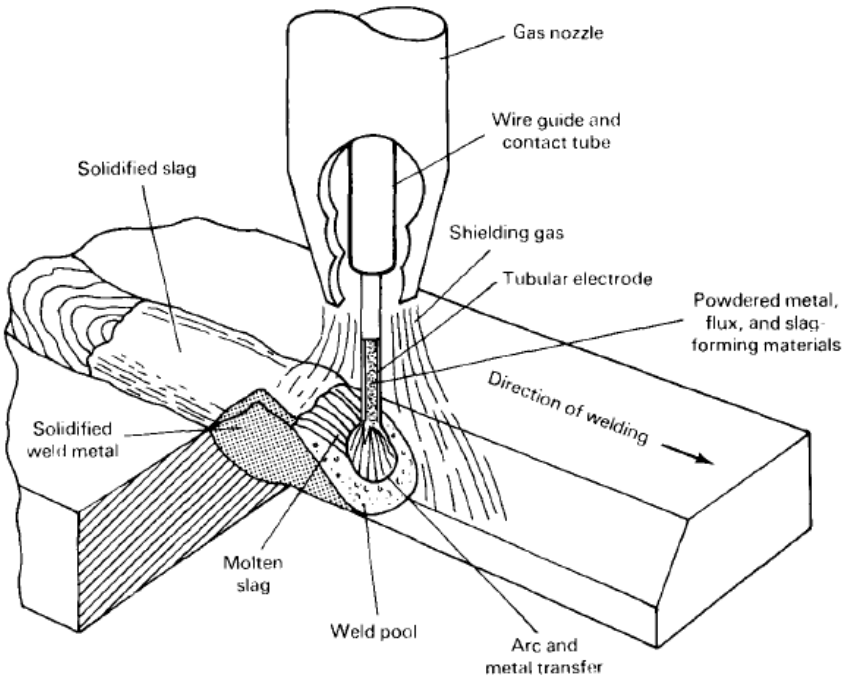
1. Με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου: Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τη συγκόλληση τεμαχίων χάλυβα μέσου και μεγάλου πάχους σε όλες τις θέσεις. Ο εξοπλισμός της είναι όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GMAW. Ως ελαφρά πλεονεκτήματα έναντι της μεθόδου GMAW θεωρούνται η μικρότερη ευαισθησία έναντι της παρουσίας οξείδωσης και ακαθαρσιών στα μέταλλα που συγκολλούνται και ότι είναι λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία ρευμάτων αέρα.

2. Χωρίς αέριο προστασίας: Η τεχνική αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη, με τη διαφορά ότι τα σωληνωτά ηλεκτρόδια περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα συλλιπάσματος, ώστε η σκουριά να επαρκεί για την προστασία της συγκόλλησης, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου. Βασικό πλεονέκτημα έναντι της μεθόδου GMAW είναι ότι δεν επηρεάζεται από την παρουσία ρευμάτων αέρα.



Σχήμα 1.10. Συγκόλληση με χρήση σωληνωτών ηλεκτροδίων (FCAW): (α) συνολική διαδικασία, (β) μεγέθυνση της περιοχής συγκόλλησης

Οι τεχνικές με σωληνωτά ηλεκτρόδια παρέχουν όλα τα πλεονεκτήματα υψηλής ποιότητας και παραγωγικότητας, όπως η ημιαυτόματη συγκόλληση τόξου σε προστατευτική ατμόσφαιρα Ar-CO_2 (MAG ή GMAW).



Σχήμα 1.11. Λουτρό συγκόλλησης FCAW

1.3.2. Πλεονεκτήματα

Λόγω του ότι η μέθοδος συνδυάζει την υψηλή παραγωγικότητα της συνεχούς συγκόλλησης με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ύπαρξη σκόνης προστασίας, η μέθοδος FCAW παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτά είναι:

- Οι υψηλότεροι ρυθμοί απόθεσης.
- Η υψηλότερη απαιτούμενη ικανότητα χειρισμού σε σχέση με τη GMAW.
- Η δυνατότητα συγκόλλησης σκουριασμένων υλικών ή κραμάτων με προστασία CO_2.
- Η βαθύτερη διείσδυση σε σχέση με τη SMAW.

1.3.3. Μειονεκτήματα

Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται:

- Η σκουριά πρέπει να αφαιρεθεί από τη συγκόλληση.
- Η κατανάλωση αερίου της μεθόδου είναι μεγαλύτερη, ενώ

- Η απόδοσή της χαμηλότερη σε σχέση με τη μέθοδο GMAW.
- Η εκπομπή περισσότερων αναθυμιάσεων από ό, τι στη GMAW και τη SAW και γενικά απαιτείται η απομάκρυνση των αναθυμιάσεων.
- Ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι πιο πολύπλοκος και η μεταφορά του είναι πολύ πιο δύσκολη σε σχέση με αυτόν της SMAW.

1.3.4. Εφαρμογές

Η FCAW είναι μία μέθοδος συγκόλλησης με μεγάλο εύρος εφαρμογών στη βιομηχανία. Και οι δύο παραλλαγές της μεθόδου εφαρμόζονται στις κατασκευές από κοινούς ανθρακούχους και ελαφρά κραματωμένους χάλυβες. Και οι δύο παραλλαγές χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους συνεργείων, όμως σε υπαίθριες συγκολλήσεις προτιμάται η FCAW χωρίς αέριο προστασίας. Η αποδοχή της μεθόδου για χρήση σε μεταλλικές κατασκευές επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι περιλαμβάνονται προδιαγραφές για σύνδεση σε συγκολλήσεις FCAW στα εγχειρίδια της AWS.

Ηλεκτρόδια για συγκόλληση με παρουσία αερίου προστασίας χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις ανθρακούχων, ελαφρά κραματωμένων και ανοξείδωτων χαλύβων σε δεξαμενές υψηλής πίεσης και σε σωληνώσεις για μεταφορά πετρελαίου και παραγώγων του κατά τη διύλιση και σε βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας. Επίσης, τα σωληνωτά ηλεκτρόδια βρίσκουν εφαρμογή σε συγκολλήσεις κραμάτων νικελίου. Εκτός αυτών, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία και γενικότερα στη βαρέως εξοπλισμού βιομηχανία για τη συγκόλληση πλαισίων, αξόνων, τμημάτων αναρτήσεων και άλλων μερών. Σωληνωτά ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου χρησιμοποιούνται στη συναρμολόγηση σασί αυτοκινήτων.

1.3.5. Ιδιότητες και παράμετροι της συγκόλλησης FCAW

Η συγκόλληση με σωληνωτά ηλεκτρόδια γίνεται συνήθως με CO_2 ή με μείγμα Ar+20-25% CO_2, ακόμη και στην περίπτωση συγκόλλησης με ανοξείδωτο σύρμα. Με το CO_2 η μεταφορά του μετάλλου στο λουτρό της συγκόλλησης γίνεται με χοντρές σταγόνες, ενώ με το μείγμα Ar+20-25% CO_2 η μεταφορά προσεγγίζει τον ψεκασμό λεπτών σταγόνων. Η μεταφορά με

βραχυκυκλωμένο τόξο δεν βρίσκει εφαρμογή. Το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν χρησιμοποιείται προστατευτικό αέριο, είναι πάντα DC+, ενώ όταν δε χρησιμοποιείται (κυρίως στην υπαίθρια ηλεκτροσυγκόλληση) ενδέχεται να είναι DC+ ή DC-, ανάλογα με το είδος του σύρματος.

Ενδεικτικές τιμές για τις παραμέτρους συγκόλλησης της μεθόδου δίνονται στον Πίνακα 1-3.

Πίνακας 1-3. Οι παράμετροι της συγκόλλησης FCAW (οι τιμές είναι ενδεικτικές και ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτροδίου)

Διάμετρος σύρματος σε mm	1,0	1,2	1,4	1,6	2,4
Τάση τόξου σε V	14-30	16-32	16-34	18-36	30-38
Ταχύτητα σύρματος σε m/min	2,5-10	1,8-12	2-9	1,5-8,5	3-5
Παροχή αερίου σε l/min	10-12	10-12	11-13	12-14	18-22
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, σε A	80-250	100-320	120-380	140-450	350-500
Ποσότητα απόθεσης μετάλλου σε kg/ώρα	1,2-4,2	1,3-7,5	1,6-7,5	1,6-8	5,5-8,5

1.3.6. Τυποποίηση των σωληνωτών ηλεκτροδίων (συρμάτων) της συγκόλλησης FCAW

Η τυποποίηση που υποχρεωτικά ισχύει στη χώρα μας, είναι κατά ISO, EN και ΕΛΟΤ. Στην πράξη, όμως, στην τεχνολογία των συγκολλήσεων, είναι διαδεδομένη και η πολύ απλή τυποποίηση κατά AWS. Το χαρακτηριστικό της τυποποίησης κατά AWS είναι η απλότητά της και η ευκολία απομνημόνευσης που προσφέρει. Επίσης, πρόκειται για ένα πλήρες σύστημα τυποποίησης, όπου συμπεριλαμβάνονται τα πάντα, όπως π.χ. η τυποποίηση των ηλεκτροδίων του αλουμινίου και των χυτοσιδήρων για τα οποία δεν υπάρχουν αντίστοιχα πρότυπα κατά ISO. Η ονομασία, όμως, των ηλεκτροδίων, από μόνη της, δε δίνει όλες τις πληροφορίες που, ενδεχομένως, να χρειάζονται, ενώ οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι του συστήματος I-P.

Η τυποποίηση των σωληνωτών συρμάτων είναι αρκετά πιο περίπλοκη από εκείνη των συμπαγών λόγω των πολλών δυνατών συνδυασμών που υπάρχουν, χωρίς όμως να φθάνει την περιπλοκότητα των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων. Οι παρακάτω ονομασίες είναι χαρακτηριστικές για τον τρόπο τυποποίησης και σ' αυτά τα πλαίσια κινείται η τυποποίηση όλων των συρμάτων και των ράβδων.

Μερικά συνηθισμένα σωληνωτά σύρματα είναι:

- Για κλειστό χώρο: το T422PM (AWS: E70T1M), όπου το 42 σημαίνει αντοχή 420 MPa, το 2 αφορά τη δυσθραυστότητα, το P ότι περιέχει συλλίπασμα ρουτιλίου και το M υποδηλώνει ότι το είδος του αερίου είναι Ar+20-25% CO_2 ή το T422MC (AWS: E70C-6C), που περιέχει μεταλλική σκόνη (M) και απαιτεί αέριο C, δηλαδή CO_2.
- Για υπαίθριο χώρο: το T462W (κατά AWS: E70T-4) που δεν απαιτεί αέριο.

Η τυποποίηση των σωληνωτών συρμάτων κατά ΕΝ

(α) Η τυποποίηση των σωληνωτών συρμάτων ανθρακούχων και λεπτόκοκκων χαλύβων

Η τυποποίηση γίνεται με βάση το πρότυπο EN-758. Δεν υπάρχει πρότυπο ISO για τα σωληνωτά σύρματα. Το βασικότερο σημείο που διαφοροποιείται η τυποποίηση από αυτή των συμπαγών συρμάτων, είναι ότι προτάσσεται το γράμμα T αντί του G.

Παράδειγμα συμβολισμού: το ηλεκτρόδιο (σύρμα) T424BC

Το 42 σημαίνει όριο ελαστικότητας 420 MPa, το 4 ότι η δυσθραυστότητα είναι 47 J, όταν η θερμοκρασία είναι -30°C και το C σημαίνει ότι το αέριο προστασίας είναι το CO_2. Δηλαδή, αυτά έχουν την ίδια σημασία που έχουν και στα συμπαγή σύρματα. Όταν δεν απαιτείται αέριο, υπάρχει το γράμμα N. Οι συμβολισμοί για τα αέρια προστασίας φαίνονται στον Πίνακα 1-4.

Πίνακας 1-4. Συμβολισμοί αερίων προστασίας

Αέριο	Συμβολισμός
Ar + 20-25% CO_2	M
CO_2	C
Χωρίς αέριο	N

Το στοιχείο «B» στο συμβολισμό σημαίνει ότι το σύρμα είναι παραγεμισμένο με σκόνη συλλιπάσματος. Για συλλίπασμα ρουτιλίου χρησιμοποιείται το R ή το P, ενώ για γέμιση με

σκόνη σιδήρου το Μ. Στην τελευταία περίπτωση δεν υπάρχει προστατευτική σκουριά από το συλλίπασμα. Στον Πίνακα 1-5 φαίνονται όλα τα είδη συλλιπάσματος των σωληνωτών συρμάτων.

Πίνακας 1-5. Συμβολισμοί, απαιτήσεις και ιδιότητες για το είδος του περιεχόμενου συλλιπάσματος

Σύμβολο	Περιγραφή	Απαιτήσεις αερίου	Ιδιότητες
K	Ρουτιλίου	Ναι	Σκουριά βραδείας πήξης
P	Ρουτιλίου	Ναι	Σκουριά ταχείας πήξης
B	Βασικό	Ναι	
M	Μεταλλική (σκόνη σιδήρου)	Ναι	Χωρίς σκουριά από το συλλίπασμα
V	Βασικό ή ρουτιλίου	Όχι	Ακατάλληλο για ραφή με πολλαπλά πάσα
W	Βασικό ή ρουτιλίου	Όχι	Σκουριά βραδείας πήξης
Y	Βασικό ή ρουτιλίου	Όχι	Σκουριά ταχείας πήξης
Z	Οτιδήποτε άλλο		

Εκτός από τα παραπάνω ενδέχεται να υπάρχουν και δύο προαιρετικοί συμβολισμοί. Παράδειγμα συμβολισμού με τα προαιρετικά σύμβολα: το T424BC1H5

- Το «1», που ακολουθεί το σύμβολο του αερίου, σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι δυνατή σε όλες τις θέσεις. Αν υπάρχει το «3», σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι δυνατή μόνο στις θέσεις PA, PB, PC (συμβολισμοί κατά ISO για την επίπεδη, επίπεδη υπό γωνία και μετωπική συγκόλληση, αντίστοιχα). Αν και υπάρχουν και άλλα σύμβολα για τις θέσεις συγκόλλησης, όπως φαίνονται στον Πίνακα 1-6, στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως σύρματα που εμπίπτουν στις κατηγορίες «1» και «3».

- Όταν το σύρμα (ηλεκτρόδιο) είναι χαμηλού υδρογόνου, υπάρχει επιπλέον ο συμβολισμός Hx που σημαίνει ότι περιέχονται το πολύ μέχρι x cm^3 αερίου ανά 100 g προστιθέμενου μετάλλου (όπως και στα επικαλυμμένα ηλεκτρόδια κατά ISO ή EN). Το x μπορεί να είναι 5, 10 ή 15.

Πίνακας 1-6. Ο συμβολισμός των θέσεων συγκόλλησης των σωληνωτών συρμάτων κατά EN-758

Ψηφίο	Θέσεις συγκόλλησης για τις οποίες προορίζεται το ηλεκτρόδιο
1	Κατάλληλο για συγκόλληση σε όλες τις θέσεις
2	Κατάλληλο για όλες τις θέσεις εκτός της PG (κατακόρυφης με κάθοδο)
3	Κατάλληλο μόνο για PA, PB και PC
4	Κατάλληλο μόνο για PA και PB
5	Κατάλληλο για PA, PB, PC και PG

Στην περίπτωση που υπάρχουν προσμίξεις και άλλων μεταλλικών στοιχείων, τότε αυτές αναφέρονται πριν από το γράμμα που υποδηλώνει τη γέμιση του σύρματος. Για παράδειγμα:

T4641NiPM1H5: με 1% Ni

T46AMoPM1H5: περιέχει Mo (κάτω του 1%, συνήθως είναι γύρω στο 0,5%)

T46AZPM1H5: περιέχει προσμίξεις που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις τυποποιημένες προσμίξεις που προβλέπει το πρότυπο και πρέπει να προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του ηλεκτροδίου.

Οι τυποποιημένοι συνδυασμοί προσμίξεων είναι οι: Mo, MnMo, 1Ni, 2Ni, 3Ni, Mn1Ni και 1NiMo. Όταν η σύσταση του εναποτιθέμενου μετάλλου δεν ανήκει σε κάποιον από αυτούς τους τυποποιημένους συνδυασμούς, χρησιμοποιείται το Z.

Εκτός από το πρότυπο EN-758, υπάρχουν ακόμη δύο πρότυπα, τα EN-12071 και EN-12535, που αναφέρονται σε σωληνωτά σύρματα ελαφρά κραματωμένων χαλύβων για ειδικές εφαρμογές, Ο τρόπος τυποποίησης των σωληνωτών συρμάτων σε αυτά τα πρότυπα μοιάζει αρκετά με τον τρόπο που γίνεται στο EN-758, αλλά έχουν διαφορετικούς τυποποιημένους συνδυασμούς προσμίξεων.

Παραδείγματα ονομασίας:

κατά EN-12071: TCrMo1BC3H5 (δεν υπάρχουν σύμβολα για την αντοχή και τη δυσθραυστότητα)

κατά EN-12535: T696Mn2NiCrMoBC53H5, T894ZBM3H5 (έχουν υψηλά όρια ελαστικότητας)

(β) Ανοξείδωτα σωληνωτά σύρματα κατά EN

Η τυποποίηση των ανοξείδωτων σωληνωτών συρμάτων ακολουθεί με το πρότυπο EN-12072. Οι ονομασίες είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν για τα σωληνωτά ηλεκτρόδια των ανθρακούχων χαλύβων, έχοντας και τους ίδιους συμβολισμούς για το συλλίπασμα, το αέριο και τη θέση συγκόλλησης. Παράδειγμα ονομασίας: T119RLM1.

1.4. Σύγκριση της συγκόλλησης FCAW με τη συγκόλληση GMAW [8], [10]

Η συγκόλληση FCAW είναι μία εξέλιξη της GMAW. Με αυτήν επιτυγχάνονται ορισμένες βελτιώσεις, αλλά η GMAW εξακολουθεί να υπερέχει σε αρκετά σημεία, όπως π.χ. στην ικανότητά της να εκτελεί συγκολλήσεις ελασμάτων πολύ μικρού πάχους και στο ότι δεν παράγει πολλές αναθυμιάσεις. Ο Πίνακας 1-7 δείχνει μία σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων, προκειμένου να επιλεγεί η πλέον κατάλληλη.

Όπως γίνεται φανερό, η GMAW, σε γενικές γραμμές, παρουσιάζει υπεροχή έναντι της FCAW, αλλά το πλεονέκτημα της δεύτερης είναι ότι με το κατάλληλο σύρμα δεν επηρεάζεται από τα ρεύματα αέρα και γι’ αυτό είναι σε θέση, να εκτελέσει και υπαίθριες συγκολλήσεις, κάτι που για τη GMAW είναι πολύ δύσκολο. Ακόμη, φαίνεται η δυσκολία με την οποία η GMAW μπορεί να κολλήσει ελάσματα μεγάλου πάχους με τη μέθοδο βραχυκυκλωμένου τόξου (η οποία συνήθως χρησιμοποιείται σε ανθρακούχους και ελαφρά κραματωμένους χάλυβες), λόγω του κινδύνου να μη γίνει καλή τήξη.

Πίνακας 1-7. Σύγκριση της FCAW με τη GMAW

Σημείο σύγκρισης	**GMAW**	**FCAW**
Συγκόλληση λεπτών ελασμάτων	Από 0,6 mm (24 gauge)	Από 1 mm (20 gauge)
Συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους	Χρειάζεται προσοχή σε πάχη > 6 mm (με βραχυκυκλωμένο τόξο)	Δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα
Εμφάνιση της ραφής	Καλή εμφάνιση	Μέτρια εμφάνιση

Εκτινάξεις	Λίγες	Πολλές
Αναθυμιάσεις	Περιορισμένες	Πάρα πολλές
Προστασία της ραφής	Πολύ καλή	Άριστη
Ευκολία εκμάθησης-χειρισμού	Πολύ εύκολη	Χρειάζεται εξάσκηση και πείρα
Τήρηση αποθήκης αναλωσίμων	Απαιτούνται ελάχιστα είδη συρμάτων	Χρειάζονται αρκετά σύρματα
Προετοιμασία επιφανείας	Απαιτείται να είναι καλή	Ελάχιστη προετοιμασία
Ευαισθησία σε ρεύματα αέρα	Πολύ μεγάλη	Μικρή
Υπαίθρια συγκόλληση	Μόνο με άπνοια	Ναι, με το κατάλληλο σύρμα
Ανάγκη ακρίβειας στη ρύθμιση των παραμέτρων ηλεκτροσυγκόλλησης	Όχι ιδιαίτερη, τα μικρά λάθη δεν έχουν δυσμενείς επιπτώσεις.	Χρειάζεται σχετική ακρίβεια στη ρύθμιση της

1.5. Οι χρησιμοποιούμενες μορφές ηλεκτρικού ρεύματος στις συγκολλήσεις τόξου [6] – [8]

Σε κάθε μηχανή ηλεκτροσυγκόλλησης υπάρχουν δύο ηλεκτρικές τάσεις:

- Η τάση του δικτύου ή πρωτεύουσα τάση, η οποία δίνει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC). Σε μονοφασική μηχανή είναι 230 V και σε τριφασική 400 V.
- Η τάση εξόδου από τη μηχανή ή δευτερεύουσα τάση**,** με την οποία εκτελείται η συγκόλληση**.**

Όταν δεν εκτελείται ηλεκτροσυγκόλληση, είναι συνήθως 50-90 V.

Η δευτερεύουσα τάση μπορεί να δίνει:

- Συνεχές ρεύμα (DC). Στην περίπτωση αυτή έχει πολύ μεγάλη σημασία αν το ηλεκτρόδιο θα είναι στο (+) ή στο (-).
- Εναλλασσόμενο ρεύμα (AC)
- Παλμικό ρεύμα

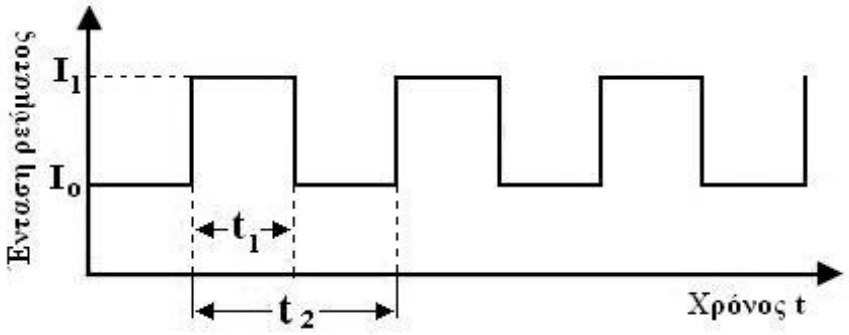
Τα χαρακτηριστικά του παλμικού ρεύματος φαίνονται στο I1 : Ένταση ρεύματος παλμού (η ρύθμιση του ρεύματος εξόδου της μηχανής)

Io : Βασικό ρεύμα, που συνήθως ρυθμίζεται ως % του I1

t2 : Χρονική διάρκεια παλμού

t1 : Χρονική διάρκεια της υψηλής έντασης του ρεύματος, συνήθως % του t2

Σχήμα 1.:



I_1 : Ένταση ρεύματος παλμού (η ρύθμιση του ρεύματος εξόδου της μηχανής)

I_o : Βασικό ρεύμα, που συνήθως ρυθμίζεται ως % του I_1

t_2 : Χρονική διάρκεια παλμού

t_1 : Χρονική διάρκεια της υψηλής έντασης του ρεύματος, συνήθως % του t_2

Σχήμα 1.12. Χαρακτηριστικά παλμικού ηλεκτρικού ρεύματος

Το κάθε είδος συγκόλλησης, καθώς και το κάθε ηλεκτρόδιο, απαιτεί το κατάλληλο είδος ηλεκτρικής παροχής. Οι κατασκευαστές αναλωσίμων υλικών συγκόλλησης (ηλεκτροδίων, συρμάτων κ.λπ.) προδιαγράφουν τις μορφές του ρεύματος που μπορούν να εφαρμοστούν. Ενδέχεται όμως ένα ηλεκτρόδιο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με περισσότερα από ένα είδη ηλεκτρικού ρεύματος και ο συγκολλητής πρέπει να έχει την απαραίτητη τεχνογνωσία για να κάνει τη σωστή επιλογή. Σε βασικές γραμμές ισχύουν τα εξής:

(α) Επιλογή της κατάλληλης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος

- Το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα είναι κατάλληλο για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις.
- Το εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται στη SMAW, όταν επιδιώκουμε μεγάλη εναπόθεση μετάλλου ή όταν η επένδυση των ηλεκτροδίων περιέχει σκόνη μετάλλου.
- Εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται και στην περίπτωση που παρουσιαστεί μαγνητικό φύσημα.
- Παλμικό ρεύμα χρησιμοποιείται στη GTAW, αλλά και στη GMAW.

(β) Επιλογή της πολικότητας για συνεχές ρεύμα

Η κάθοδος (-) έχει θερμοκρασία περίπου 2500 °C, ενώ η άνοδος (+) έχει περίπου 3500 °C. Για το λόγο αυτό, έχει σημασία αν θα έχουμε το (+) ή το (-) στο ηλεκτρόδιο ή στο μέταλλο βάσης. Γενικά ισχύουν τα εξής:

- Αν επιδιώκεται μεγάλη τήξη στο μέταλλο βάσης με σκοπό την καλή ανάμειξη, τότε έχουμε το (+) στο μέταλλο βάσης και το (-) στο ηλεκτρόδιο (ορθή πολικότητα). Οι περισσότερες συγκολλήσεις ανθρακούχων χαλύβων ανήκουν σ' αυτή την κατηγορία. Συμβολίζεται ως DCEN ή DC-.
- Αν δεν απαιτείται έντονη ανάμειξη του μετάλλου βάσης με το μέταλλο του ηλεκτροδίου, τότε έχουμε το (-) στο μέταλλο βάσης και το (+) στο ηλεκτρόδιο (ανάστροφη πολικότητα). Τέτοια περίπτωση π.χ. είναι η αναγόμωση χαλύβων. Εφαρμόζεται, επίσης, όταν δε θέλουμε να περιοριστεί η ΘΕΖ (π.χ. ειδικοί χάλυβες), ή όταν επιδιώκεται μεγάλη εναπόθεση μετάλλου. Συμβολίζεται ως DCEP ή DC+.

1.6. Οι μηχανές των συγκολλήσεων τόξου [2], [6] – [8]

1.6.1. Ταξινόμηση μηχανών συγκόλλησης τόξου

Οι μηχανές συγκόλλησης μπορούν να ταξινομηθούν είτε σύμφωνα με το είδος ρεύματος που παράγουν είτε σύμφωνα με τη μορφή της στατικής τους χαρακτηριστικής (καμπύλη τάσης-έντασης ρεύματος).

<u>Α) Ταξινόμηση σύμφωνα με το είδος ρεύματος</u>

Με βάση το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγουν και διοχετεύουν στο τόξο, οι μηχανές συγκόλλησης διακρίνονται σε συνεχούς ρεύματος (direct current, DC) και εναλλασσόμενου ρεύματος (alternating current, AC).

Το συνεχές ρεύμα που απαιτείται για συγκόλληση μπορεί να προέρχεται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που κινείται από κατάλληλη πηγή μηχανικής ενέργειας. Συνήθως η πηγή αυτή είναι ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος συνδεδεμένος στο δίκτυο της πόλης. Ακολουθεί ένας δεύτερος τύπος μηχανής συνεχούς ρεύματος που ανορθώνει το εναλλασσόμενο ρεύμα από ένα μετασχηματιστή και έτσι παράγει συνεχές ρεύμα. Τέλος, ένας τρίτος τύπος

συνδυάζει τον ανορθωτή με μια μηχανικά κινούμενη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος για παραγωγή συνεχούς ρεύματος συγκόλλησης.

Οι πιο συνηθισμένες μηχανές συγκόλλησης εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απλοί μετασχηματιστές που δέχονται εναλλασσόμενο ρεύμα από το δίκτυο πόλης και το μετασχηματίζουν σε άλλο με τιμές κατάλληλες για συγκόλληση. Τέλος, εναλλασσόμενο ρεύμα συγκόλλησης μπορεί να παραχθεί και από γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Β) Ταξινόμηση σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης ρεύματος:

Με βάση τη μορφή της στατικής χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-έντασης ρεύματος οι μηχανές συγκόλλησης διακρίνονται σε δύο τύπους:

α) Μηχανές σταθερού ρεύματος ή κατερχόμενου (constant current or dropping).

β) Μηχανές σταθερής ή ανερχόμενης τάσης (constant voltage or increasing voltage).

Υπάρχουν, βέβαια, και μερικές μηχανές που συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά και των δύο τύπων. Επίσης, ο όρος «σταθερός» σε αυτή την περίπτωση δεν είναι απόλυτος, αλλά σχετικός.

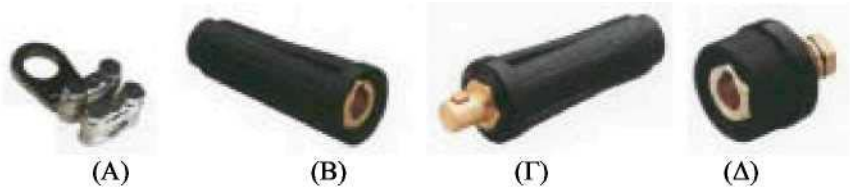
Η μηχανή συγκόλλησης σταθερού ρεύματος ορίζεται ως εκείνη που παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της έντασης ρεύματος και που διαθέτει στατική χαρακτηριστική τάσης-έντασης ρεύματος τέτοια που οδηγεί στην παραγωγή σχετικά σταθερής έντασης ρεύματος. Για δεδομένη ένταση ρεύματος, η τάση τόξου εξαρτάται από το ρυθμό τροφοδοσίας του τηκόμενου ηλεκτροδίου ή, σε περίπτωση μη αναλισκόμενου ηλεκτροδίου, από την απόσταση του άκρου του ηλεκτροδίου από το προς συγκόλληση τεμάχιο. Η μηχανή συγκόλλησης σταθερού ρεύματος χρησιμοποιείται συνήθως σε χειροκίνητες μεθόδους συγκόλλησης.

Η μηχανή συγκόλλησης σταθερής τάσης ορίζεται ως εκείνη που παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης τόξου και που διαθέτει στατική χαρακτηριστική τάσης-έντασης ρεύματος τέτοια που οδηγεί στην παραγωγή σχετικά σταθερής τάσης. Για δεδομένη τάση, η ένταση ρεύματος εξαρτάται από το ρυθμό τροφοδοσίας του τηκόμενου ηλεκτροδίου. Η μηχανή συγκόλλησης σταθερής τάσης χρησιμοποιείται συνήθως σε μεθόδους συγκόλλησης που παρέχουν συνεχή τροφοδοσία του ηλεκτροδίου (π.χ. GMAW, SAW).

1.6.2. Η σύνδεση με τη μηχανή συγκόλλησης

Για να κλείσει το κύκλωμα του ηλεκτρικού ρεύματος, απαιτούνται δύο καλώδια, το ένα είναι το καλώδιο της γείωσης και το άλλο της τσιμπίδας. Από τη μία πλευρά τα καλώδια συνδέονται με τη μηχανή συγκόλλησης και από την άλλη το ένα συνδέεται με την τσιμπίδα και το άλλο με το μέταλλο βάσης.

Τα καλώδια συνδέονται με ταχυσυνδέσμους και με ακροδέκτες. Στο Σχήμα 1. βλέπουμε τέτοια εξαρτήματα. Πάνω στη μηχανή υπάρχουν δύο ταχυσύνδεσμοι, όπως ο (Δ), στους οποίους συνδέονται τα καλώδια με τον ακροδέκτη (Γ). Όταν χρειάζεται μεγαλύτερο μήκος καλωδίου, η ένωση θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά και να είναι μονωμένη. Το καλύτερο είναι να γίνεται με αρσενικό-θηλυκό ταχυσυνδέσμους καλωδίων (Β & Γ).



Σχήμα 1.13. Εξαρτήματα σύνδεσης καλωδίων: (Α) ακροδέκτες, (Β) ταχυσύνδεσμος καλωδίων θηλυκός, (Γ) ταχυσύνδεσμος καλωδίων αρσενικός, (Δ) ταχυσύνδεσμος μηχανής.

Η σύνδεση με το μέταλλο βάσης γίνεται με το «σώμα γείωσης». Δεν πρόκειται όμως για πραγματική γείωση, αφού πουθενά δεν υπάρχει απευθείας σύνδεση με τη γη. Πρόκειται απλά για το σημείο σύνδεσης με τον έναν από τους δύο αγωγούς του ηλεκτρικού ρεύματος, που έχει καθιερωθεί να ονομάζεται «γείωση». Η μορφή των σωμάτων γείωσης είναι η ίδια σε όλα τα είδη συγκόλλησης. Υπάρχουν ακόμη και τα σώματα γείωσης πάγκου, με τα οποία γειώνεται μόνιμα ένας μεταλλικός πάγκος εργασίας. Κάθε μεταλλικό αντικείμενο που είναι πάνω στον πάγκο βρίσκεται αυτόματα συνδεδεμένο με τη μηχανή της συγκόλλησης.

1.7. Ο Αυτοματισμός και η ρομποτική στις συγκολλήσεις [6], [7]

Ο αυτοματισμός εισήχθη στην τεχνική των συγκολλήσεων με σκοπό τη μείωση του κόστους, τη χρονική επιτάχυνση των εργασιών συγκόλλησης, την εξασφάλιση σταθερής ποιότητας, καθώς και τη βελτίωση της εμφάνισης της ραφής.

Το πρώτο σύστημα αυτόματης διαδικασίας συγκόλλησης ήταν η SAW (βυθισμένου τόξου) και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1951. Όλα τα συστήματα SAW χρησιμοποιούν σύρμα, μεγάλης διαμέτρου, που αρχίζει από 2 mm και φθάνει μέχρι και 6 mm, ενώ το συλλίπασμα πέφτει στο λουτρό της συγκόλλησης χύμα.

Στη συνέχεια, ο αυτοματισμός στη συγκόλληση έχει κάνει μεγάλη πρόοδο και σήμερα χρησιμοποιούνται στις αυτόματες διαδικασίες και μηχανές ρομπότ. Η χρήση των ρομπότ στις συγκολλήσεις γίνεται σε εργασίες που εκτελούνται σε γραμμή παραγωγής ή σε εργασίες που δεν είναι δυνατόν να εκτελεστούν από άνθρωπο, όπως όταν υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες ή δημιουργούνται πολλοί σπινθήρες. Το σύστημα αποτελείται από τα ίδια μέρη που αποτελείται ένα συγκρότημα συγκόλλησης, με μόνη διαφορά ότι τη θέση του ανθρώπου την έχει πάρει μία μηχανή που προγραμματίζεται για να εκτελεί συγκεκριμένες κινήσεις.

Τα μέρη ενός ρομποτικού συστήματος είναι:

- Η μηχανή συγκόλλησης, που ενδέχεται να είναι και ακριβώς η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται στις συγκολλήσεις με το χέρι.
- Ενδεχομένως ένα κατάλληλα διαμορφωμένο τραπέζι εργασίας, πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα προς συγκόλληση τεμάχια.
- Το ρομπότ (π.χ. ρομποτικός βραχίονας) και
- Ο πίνακας ελέγχου του ρομπότ.

Τα ρομποτικά συστήματα απαιτούν εξοικειωμένους χειριστές οι οποίοι πρέπει να είναι πολύ καλοί συγκολλητές ώστε να είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται την ποιότητα μιας συγκόλλησης. Πρέπει, όμως, προηγουμένως να εκπαιδευτούν στον προγραμματισμό τέτοιων συστημάτων, δηλαδή ουσιαστικά πρόκειται για συγκολλητές-προγραμματιστές. Επίσης, είναι αδύνατο να εκτελούνται όλων των ειδών οι συγκολλήσεις με ρομπότ. Συχνά τα ρομπότ κάνουν την εργασία μέχρι ενός σημείου και αυτή ολοκληρώνεται από κάποιο τεχνίτη με τα συμβατικά συστήματα συγκόλλησης.

Σε όλα γενικά τα ρομποτικά συστήματα εφαρμόζονται οι συγκολλήσεις σε προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου. Τα συστήματα GMAW είναι τα πλέον συνηθισμένα, αλλά υπάρχουν και συστήματα που βασίζονται στην GTAW (TIG), με τη μόνη διαφορά από την κλασική TIG ότι η τροφοδοσία του υλικού συγκόλλησης γίνεται υπό μορφή σύρματος. Στο Σχήμα 1. φαίνεται ένα σύγχρονο ρομπότ. Αυτό μπορεί να εκτελέσει 6 διαφορετικές κινήσεις γύρω από άξονες και έτσι έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Στην περιοχή, όμως, που κινείται ένα τέτοιο ρομπότ, όταν αυτό είναι

σε λειτουργία δεν επιτρέπεται να εισέλθει κάποιος, επειδή υπάρχει κίνδυνος να τραυματιστεί σοβαρά από κάποια κίνηση του ρομπότ. Γι' αυτό η περιοχή αυτή θα πρέπει να είναι περιφραγμένη.

Σχήμα 1.14. Ρομποτικός βραχίονας συγκόλλησης με 6 βαθμούς ελευθερίας.

Τα ρομπότ διαθέτουν και αισθητήρες που τους επιτρέπουν να κάνουν τις απαιτούμενες διορθωτικές κινήσεις. Υπάρχουν οι αισθητήρες επαφής που αντιλαμβάνονται το τι συμβαίνει κατά την επαφή π.χ. με το λουτρό συγκόλλησης και οι αισθητήρες που αντιλαμβάνονται χωρίς να προκληθεί επαφή, π.χ. μετρώντας κάποια τάση ή κάποια συχνότητα. Επίσης, ενδέχεται να υπάρχουν και οπτικοί αισθητήρες που να μεταφέρουν εικόνα στο χειριστή, ο οποίος στη συνέχεια έχει τη δυνατότητα να δώσει στο ρομπότ τις ανάλογες εντολές. Με τη χρήση των αισθητήρων, το ρομποτικό σύστημα εκτελεί όλες τις διορθωτικές κινήσεις που χρειάζονται για τη ρύθμιση των παραμέτρων της συγκόλλησης.

2. ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

2.1. Χάλυβες – Γενικά [1] - [3]

Οι χάλυβες, ως γνωστόν, 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, ενίοτε σε μικρές ποσότητες, και ορισμένα άλλα στοιχεία κραμάτωσης, τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες, και
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.

Οι κραματωμένοι χάλυβες, ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων ταξινομούνται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους,
- Μέτρια κραματωμένους, και
- Ισχυρά κραματωμένους.

Ως προς τις χρήσεις τους διακρίνονται σε:

- Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, μαγγανιοπυριτιούχοι, κ.α.),
- Εργαλειοχάλυβες,
- Ανοξείδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες, και
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαγνητικοί, μη μαγνητικοί χάλυβες)

2.1.1. Είδη χαλύβων με χρήση στη ναυπηγική

Οι κοινοί χάλυβες ή χάλυβες συνήθους αντοχής αποτελούν την πιο διαδεδομένη ομάδα ναυπηγικών χαλύβων, με ιδιότητες που εξαρτώνται κύρια από τη χημική τους σύσταση και τη μικροδομή τους (συνήθως φερριτική). Εκτός από άνθρακα, που περιέχεται σε ποσοστό κατά βάρος μέχρι και 0,23%, οι χάλυβες αυτοί περιέχουν σε διάφορα ποσοστά μαγγάνιο, πυρίτιο, φώσφορο και θείο, ενώ διάφορα άλλα στοιχεία μπορεί να συνυπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, η μηχανική αντοχή τους αυξάνεται,

ενώ η ολκιμότητά τους ελαττώνεται. Επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά και καθιστά το χάλυβα δυσκολότερα συγκολλήσιμο. Γενικά, οι χάλυβες αυτοί έχουν ως χαρακτηριστικό την πολύ καλή έως εξαιρετική συγκολλησιμότητά τους.

Σε ευρεία χρήση συναντώνται και χάλυβες υψηλής αντοχής με όριο διαρροής που μπορεί να φτάσει τα 400 MPa. Η χρήση τέτοιων χαλύβων οδηγεί σε μείωση των παχών των στοιχείων αντοχής, άρα και του βάρους μιας κατασκευής λόγω των υψηλότερων τιμών των επιτρεπόμενων τάσεων. Η βασική διαφορά τους από τους συνήθεις χάλυβες έγκειται στην προσθήκη ειδικών στοιχείων κραμάτωσης (όπως αλουμίνιο, κολόμβιο και βανάδιο) τα οποία βελτιώνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Επιπλέον, όταν οι απαιτήσεις σε αντοχή είναι ιδιαίτερα μεγάλες είναι δυνατή η χρήση μικρο-κραματοποιημένων χαλύβων υψηλής αντοχής (HSLA steels) με όρια διαρροής από 415 MPa μέχρι 690 MPa. Για την επίτευξη τέτοιων τιμών αντοχής οι χάλυβες αυτοί περιέχουν ειδικές προσμίξεις και υφίστανται ειδικές θερμικές κατεργασίες.

Τέλος, υπάρχουν διαθέσιμοι και ειδικοί χάλυβες με βελτιωμένες ιδιότητες που χρησιμοποιούνται όπου υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις (ασυνήθιστες υπηρεσιακές θερμοκρασίες, υπερβολικά διαβρωτικό περιβάλλον, ασυνήθιστες φορτίσεις κλπ.). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η χρήση κρυογενών κραμάτων σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένων αερίων (LNG-LPG), όπου σε διάφορα τμήματα των πλοίων αυτών οι συνθήκες πιέσεων και θερμοκρασιών καθιστούν ακατάλληλη τη χρήση των προηγούμενων χαλύβων.

2.1.2. Μικροδομή

Η μικροδομή των ναυπηγικών χαλύβων συνίσταται σε αιωρήματα σεμεντίτη διασκορπισμένα σε φερριτική μήτρα. Όταν η θερμοκρασία ενός χάλυβα φτάσει στη θερμοκρασία αλλοτροπικού μετασχηματισμού του, θα παρουσιαστεί μετασχηματισμός του σιδήρου που βρισκόταν στη φερριτική φάση σε μία άλλη φάση, την ωστενιτική, όπου ο σεμεντίτης είναι πολύ διαλυτός. Με ψύξη του χάλυβα κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού, ο ωστενίτης με το διαλυμένο σε αυτόν σεμεντίτη θα επανέλθουν στην προηγούμενη φερριτική φάση με αιωρήματα σεμεντίτη. Η μικροδομή του χάλυβα που

αποτελείται από στρώσεις σεμεντίτη και φερρρίτη καλείται περλίτης και είναι κύριο γνώρισμα των ναυπηγικών χαλύβων.

Γενικά, το ποσοστό του άνθρακα και ο ρυθμός απόψυξης επιδρούν στη μικροδομή, η οποία με τη σειρά της είναι αυτή που καθορίζει τις ιδιότητες του χάλυβα (αντοχή, σκληρότητα, δυσθραυστότητα κλπ.). Η πλειονότητα των ναυπηγικών χαλύβων αποψύχεται στον αέρα μετά από την όποια θερμική κατεργασία έχουν υποστεί. Εξαίρεση αποτελούν μερικοί ναυπηγικοί χάλυβες υψηλής αντοχής με όριο διαρροής πάνω από 350 MPa οι οποίοι υφίστανται βαφή σε νερό (water quenching) από θερμοκρασία υψηλότερη εκείνης του μετασχηματισμού, και στη συνέχεια υπόκεινται σε επαναφορά (tempering) με θέρμανση σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη αυτής του μετασχηματισμού. Η παραπάνω θερμική κατεργασία, η οποία εξηγείται στη συνέχεια, οδηγεί σε ειδική μικροδομή που ονομάζεται επαναφερμένος μαρτενσίτης και έχει υψηλές τιμές αντοχής και δυσθραυστότητας.

2.2. Μέθοδοι Παραγωγής [2], [8], [12], [16], [I], [VII]

2.2.1. Μέθοδοι παρασκευής

Οι ναυπηγικοί χάλυβες παρασκευάζονται συνήθως με μια από τις ακόλουθες μεθόδους:

- Ανοικτής φλογοκαμίνου (open-hearth furnace),
- Βασικής οξυγόνου (basic oxygen furnace), και
- Ηλεκτρικής καμίνου (electric furnace).

Τελευταία, μικρές ποσότητες ναυπηγικού χάλυβα παρασκευάζονται και με άλλες νεότερες μεθόδους, όπως με ανάτηξη σε κενό με τόξο (vacuum-arc remelt) ή με ανάτηξη ηλεκτροσκωρίασης (electroslag remelt) κ.α.

Κατά την παρασκευή του χάλυβα η σημαντικότερη αντίδραση από μεταλλουργική σκοπιά είναι εκείνη όπου ο άνθρακας και το οξυγόνο ενώνονται και δημιουργείται αέριο. Η διαδικασία αποξείδωσης (deoxidation) αποτελεί βασικό παράγοντα από τον οποίο καθορίζεται η ποιότητα του ναυπηγικού χάλυβα. Διακρίνονται οι ακόλουθες ποιότητες:

- Ο πλήρως καθησυχασμένος χάλυβας (killed steel): Πρόκειται για τελείως αποξειδωμένο χάλυβα του οποίου η ομοιογενής μεταλλουργική δομή τον καθιστά

κατάλληλο για παχιά ελάσματα. Στοιχεία όπως το αλουμίνιο και το πυρίτιο είναι αυτά χάρη στα οποία επιτυγχάνεται η αποξείδωση.

- Ο ημικαθησυχασμένος χάλυβας (semi-killed steel): Σε αυτόν προστίθεται μικρότερη ποσότητα αποξειδωτικών στοιχείων σε σύγκριση με τον πλήρως καθησυχασμένο. Αποτελεί την ποιότητα των συνήθων ναυπηγικών χαλύβων, καθώς έχει χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τον πλήρως καθησυχασμένο και είναι καλύτερης ποιότητας από τον περιθωριακό.
- Ο περιθωριακός χάλυβας (rimmed steel): Πρόκειται για χάλυβα ελάχιστα αποξειδωμένο και συνήθως παράγεται σε πάχη μέχρι 12,5 mm. Η χρήση του στη ναυπηγική περιορίζεται σε δευτερεύουσες κατασκευές.

2.2.2. Θερμικές κατεργασίες ναυπηγικών χαλύβων

Οι περισσότεροι ναυπηγικοί χάλυβες συνήθους αντοχής προσφέρονται στο εμπόριο αμέσως μετά την εν θερμώ εξέλασή τους. Όπου, όμως, απαιτείται χάλυβας υψηλής δυσθραυστότητας προδιαγράφεται συνήθως και κάποια θερμική κατεργασία (πχ. εξομάλυνση, βαφή και επαναφορά, ελεγχόμενη έλαση). Επίσης, είναι δυνατή η απαίτηση λεπτόκοκκου χάλυβα, δομή η οποία προσδίδει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, κάτι που επιτυγχάνεται με την προσθήκη ποσοτήτων στοιχείων, όπως αλουμίνιο, βανάδιο και νιόβιο. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες από τις θερμικές κατεργασίες στις οποίες μπορεί να υποβληθούν οι ναυπηγικοί χάλυβες.

<u>Ανόπτηση (Annealing)</u>

Ο όρος ανόπτηση είναι συνηθισμένος στις θερμικές κατεργασίες και περιλαμβάνει αρκετούς τύπους διαφορετικών κατεργασιών. Γενικά, η ανόπτηση θεωρείται η θερμική κατεργασία κατά την οποία οδηγούμαστε σε χαμηλότερες τιμές σκληρότητας του χάλυβα.

Η ανόπτηση μπορεί να οδηγήσει στα παρακάτω επιθυμητά αποτελέσματα:

- Να μειώσει τη σκληρότητα του μετάλλου ώστε να είναι ευκολότερα κατεργάσιμο εν ψυχρώ,
- Να καταστήσει το χάλυβα κατάλληλο για επεξεργασία σε εργαλειομηχανές, και

- Να ανακουφίσει το χάλυβα από τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις που δημιουργούνται κατά τη μόρφωση ή τη συγκόλλησή του.

Η γενική διαδικασία για πλήρη ανόπτηση έχει ως εξής:

1. Θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία 28 ^{o}C - 56°C πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης A_3.
2. Διατήρηση στο επίπεδο αυτό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ένας γενικός κανόνας είναι να διατηρηθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία αυτή μία ώρα για κάθε ίντσα πάχους ελάσματος.
3. Απόψυξη του χάλυβα με ελεγχόμενο ρυθμό περίπου 28°C κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία έναρξης ωστενιτοποίησης A_1.
4. Βαφή στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Είναι γνωστό ότι το τελικό μέγεθος των κόκκων εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-1, το όριο διαρροής και η ολκιμότητα αυξάνονται όσο το μέγεθος των κόκκων μειώνεται.

Ένας άλλος τύπος ανόπτησης είναι η ανόπτηση κατεργασίας (process annealing). Η θερμική αυτή κατεργασία εφαρμόζεται συχνά σε χαμηλού άνθρακα χάλυβες. Ο χάλυβας θερμαίνεται, αλλά παραμένει σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την A_1, και διατηρείται σε αυτές για τόσο χρόνο ώστε να μειωθεί η σκληρότητα και τελικά αποψύχεται στον αέρα. Πρόκειται για ταχύτερη και οικονομικότερη κατεργασία σε σχέση με την πλήρη ανόπτηση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και των ταχύτερων ρυθμών απόψυξης που τη χαρακτηρίζουν.

Πίνακας 2-1. Επίδραση του μεγέθους των κόκκων στο όριο διαρροής και στην ολκιμότητα. Η μείωση της επιφάνειας είναι μία ένδειξη της ολκιμότητας του μετάλλου ή της ικανότηταςς να παραμορφώνεται πριν τη θραύση. Μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης της επιφάνειας, σημαίνει μεγαλύτερη ολκιμότητα.

Αριθμός κόκκων ανά ίντσα (25,4mm)	Όριο διαρροής		Μείωση της επιφάνειας (%)
	psi	MPa	
210	44000	303	20
222	44500	307	22
322	47000	324	35

Εξομάλυνση (Normalizing)

Αν δεν υπάρχει απαίτηση για εξαιρετικά μαλακό πλήρως ανοπτημένο χάλυβα, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της θερμικής κατεργασίας της εξομάλυνσης, η οποία συνεισφέρει στην εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος σε σύγκριση με την ανόπτηση.

Η εξομάλυνση εφαρμόζεται για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ομοιογένεια στη μικροδομή ενός χάλυβα. Μία εξομαλυμένη δομή θα παρουσιάζει, επιπλέον, ομοιογενείς μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη ολκιμότητα από τμήμα ελάσματος το οποίο περιέχει παραμένουσες τάσεις. Ωστόσο, οι εξομαλυμένοι χάλυβες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη σκληρότητα σε σχέση με τους πλήρως ανοπτημένους.

Η διαδικασία της εξομάλυνσης έχει ως εξής:

1. Θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία περίπου 100°F (56°C) πάνω από την A_3.
2. Διατήρηση στα επίπεδα αυτά έως ότου η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη σε όλη την έκταση του ελάσματος.
3. Απόψυξη στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Βαφή και επαναφορά (Quenching and Tempering)

Ένας χάλυβας ο οποίος έχει υποστεί γρήγορη βαφή από την ωστενιτική περιοχή οδηγείται στο σχηματισμό μαρτενσιτικών δομών. Η επαναφορά εφαρμόζεται για να βελτιωθούν η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα του μαρτενσίτη. Αυτό συνοδεύεται από μερική απώλεια της αρχικής αντοχής και της σκληρότητας. Η τελική δομή, ωστόσο, παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή και σκληρότητα, ταυτόχρονα με καλή δυσθραυστότητα και ολκιμότητα.

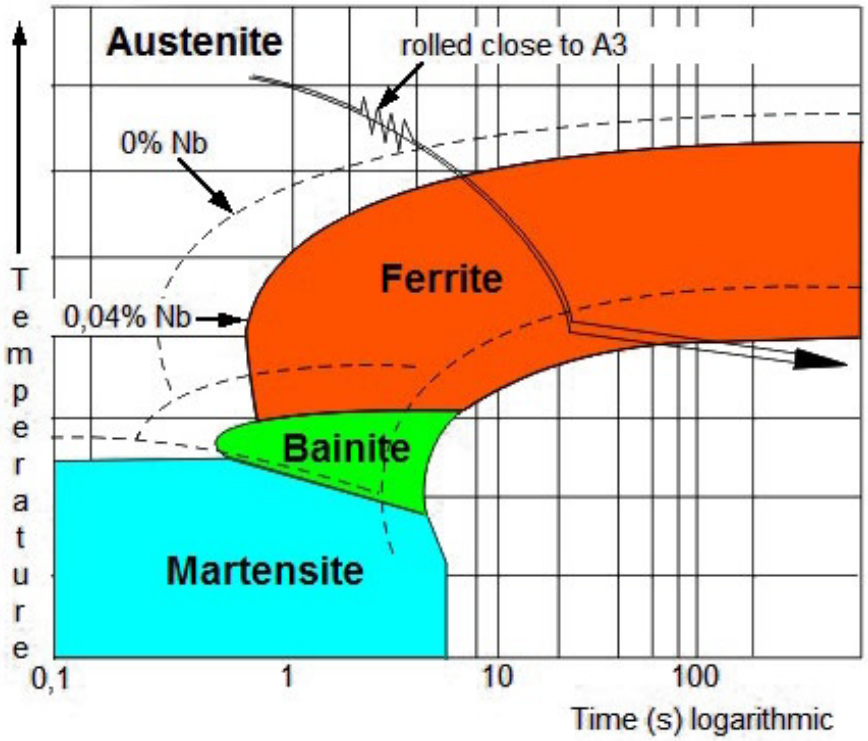
Η κατεργασία της βαφής και επαναφοράς έχει ως εξής:

1. Θέρμανση του χάλυβα στην ωστενιτική περιοχή. (Ο χάλυβας μπορεί να βρίσκεται ήδη στην περιοχή αυτή λόγω της συγκόλλησης.)
2. Γρήγορη βαφή ώστε να οδηγηθούμε σε σχηματισμό μαρτενσίτη.
3. Αναθέρμανση (επαναφορά) σε θερμοκρασίες 200°C - 400°C (δηλαδή χαμηλότερα από την A_1 θερμοκρασία) και διατήρηση στο επίπεδο αυτό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
4. Απόψυξη στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

2.2.3. Μέθοδος εξέλασης με θερμομηχανική διαδικασία (TMCP)

Η ευρύτερη εφαρμογή των χαλύβων υψηλής αντοχής, τόσο σε πλοία, όσο και σε πλωτές εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, έχει συναντήσει προβλήματα που σχετίζονται με τη δυσθραυστότητά τους και τις ιδιότητές τους κατά την έννοια του πάχους.

Για το λόγο αυτό, έχει δοθεί έμφαση στην εύρεση τρόπων επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων με σκοπό την παρασκευή χαλύβων ακόμα καλύτερης ποιότητας. Μία τέτοια προσπάθεια συνίσταται στη μέθοδο εξέλασης με θερμομηχανική διαδικασία (Thermomechanical Control Process, TMCP). Η γενική αρχή της μεθόδου είναι ότι η εξέλαση δε χρησιμοποιείται μόνο για τη μόρφωση των ελασμάτων, αλλά και για τη μείωση του μεγέθους των κόκκων του χάλυβα. Έτσι μπορεί να παραχθεί χάλυβας με ιδιότητες ίδιες ή ανώτερες από εκείνες του εξομαλυμένου χάλυβα χωρίς να απαιτείται η εφαρμογή θερμικής κατεργασίας μετά την εξέλαση. Η μέθοδος περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.



Σχήμα 2.1. Αποτύπωση της TMCP σε διάγραμμα TTT

Η TMCP περιλαμβάνει αυστηρό έλεγχο τόσο της θερμοκρασίας όσο και της διαδικασίας της έλασης. Γενικά μεγάλο μέρος της έλασης πραγματοποιείται κοντά στη θερμοκρασία πλήρους

ωστενιτοποίησης (Ar_3) (Σχήμα 2.1) και ενδέχεται να περιλαμβάνει έλαση και στη διφασική περιοχή. Η TMCP αποτελείται από συνδυασμό παραμόρφωσης του υλικού στην ωστενιτική φάση με συγκεκριμένη απόψυξη που οδηγεί σε δομές οι οποίες δεν μπορούν να επιτευχθούν με κάποια θερμική κατεργασία.

Μεγάλη σημασία έχουν η αρχική και η τελική θερμοκρασία της διαδικασίας της έλασης και επίσης η ύπαρξή ή μη στοιχείων μικροκραμάτωσης όπως V (βανάδιο), Nb (νιόβιο), Zr (ζιρκόνιο), B (βόριο) και Cr (χρώμιο). Εξαιτίας αυτών των στοιχείων, το αποτέλεσμα της TMCP είναι η δημιουργία λεπτόκοκκης δομής με υψηλή αντοχή και καλή δυσθραυστότητα.

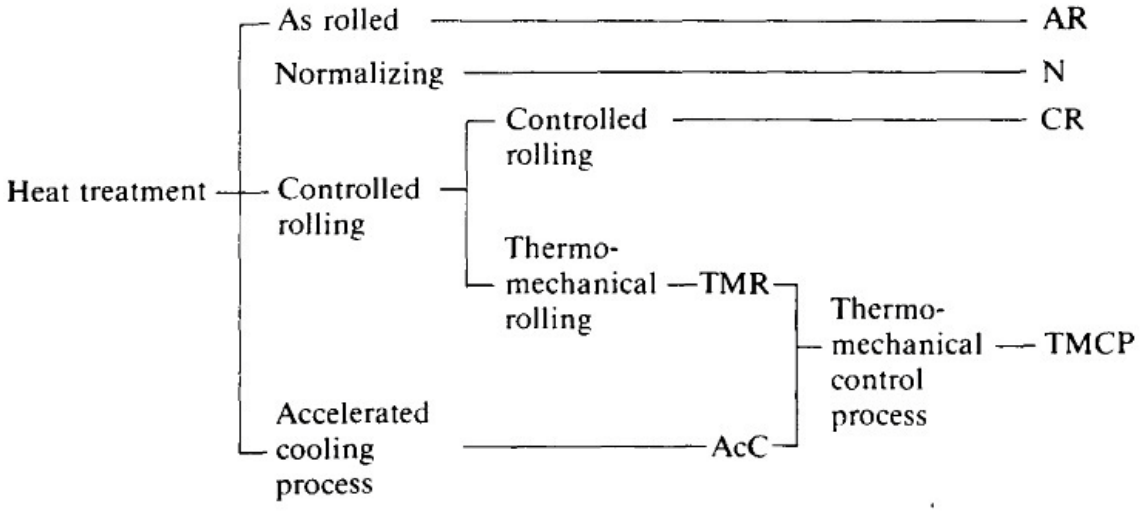
Η έλευση των χαλύβων υψηλής αντοχής με όρια διαρροής της τάξης των 320 MPa, δηλαδή των AH32, DH32 και EH32 (στο εξής θα συμβολίζονται ως YP-320) και 360 MPa, δηλαδή των AH36, DH36 και EH36 (θα συμβολίζονται ως YP-360) και, πιο πρόσφατα, της τάξης των 400 MPa, δηλαδή των AH40, DH40 και EH40 (θα συμβολίζονται ως YP-400), οι οποίοι κατασκευάζονται, ανάλογα με την περίπτωση, με τη μέθοδο εξέλασης TMCP έδωσε το έναυσμα για συχνότερη εφαρμογή, σε σχέση με παλαιότερα, χαλύβων υψηλής αντοχής σε ναυπηγικές κατασκευές. Έτσι, οι TMCP χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν ήδη βρει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις στη ναυπηγική, όπου όλο και περισσότερα πλοία έχουν κατασκευαστεί πρόσφατα με χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής που έχει υποστεί TMCP. Πρέπει να τονιστεί ότι τέτοιοι χάλυβες δε βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε πρωτεύουσες κατασκευές (πχ. το κύριο κατάστρωμα) αλλά και σε περίπλοκα δομικά μέρη, όπως τα σημεία με έντονη συγκέντρωση τάσεων.

Σε μεγάλα πλοία η αναλογία χαλύβων υψηλής αντοχής YP-360 προς τη συνολική ποσότητα χάλυβα υψηλής αντοχής που χρησιμοποιείται αυξάνεται συνεχώς. Η επικρατούσα αυτή τάση χρήσης χαλύβων υψηλής αντοχής συμπληρώνεται από την πιο πρόσφατη έλευση της ομάδας χαλύβων υψηλής αντοχής YP-400 στη ναυπηγική βιομηχανία. Καθώς φαίνεται, διανύουμε μία μεταβατική περίοδο με τους χάλυβες υψηλής αντοχής ολοένα και να αντικαθιστούν τους συνήθους αντοχής.

Παράμετροι της μεθόδου εξέλασης με TMCP

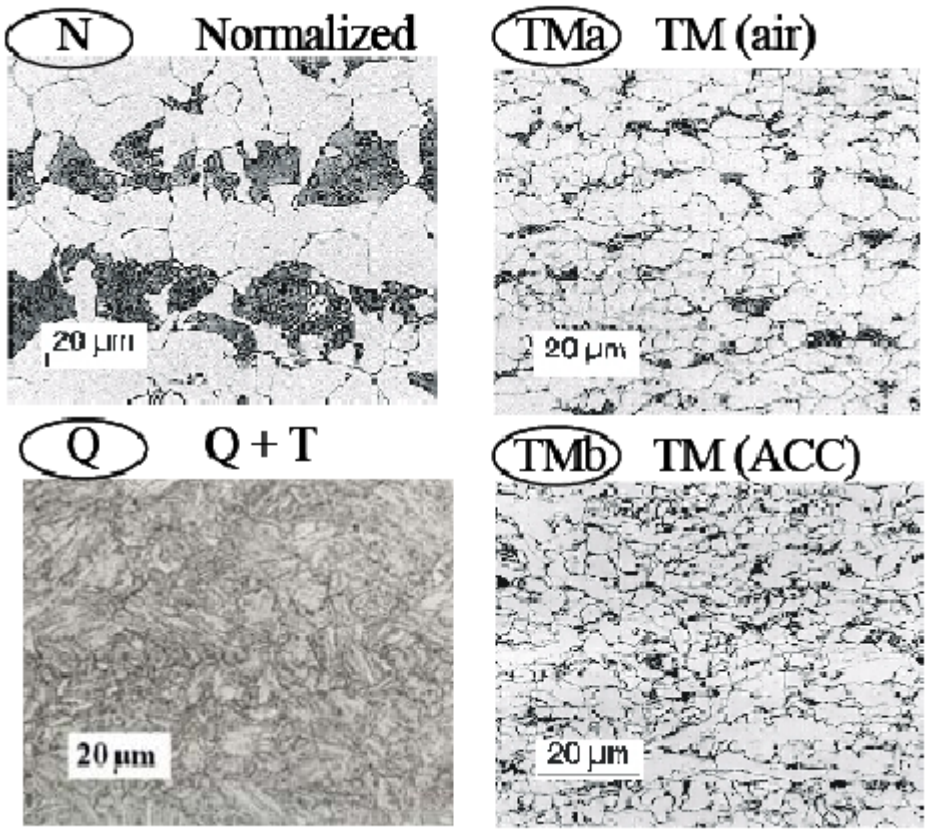
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική, σε αντίθεση με άλλες κατηγορίες κατασκευαστικών χαλύβων, απαιτείται να έχουν αντοχή σε δυσθραυστότητα και να έχουν αυστηρότερες προδιαγραφές για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης.

Γενικά για τους χάλυβες υψηλής αντοχής οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές-κατεργασίες εν θερμώ φαίνονται στο Σχήμα 2.2. Η μέθοδος εξέλασης TMCP είναι συνδυασμός της επιταχυνόμενης απόψυξης (Accelerated Cooling, AcC) και της μηχανικής έλασης εν θερμώ (Thermo-mechanical Rolling, TMR).



Σχήμα 2.2. Κατεργασίες εν θερμώ για παραγωγή χαλύβων υψηλής αντοχής

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται μικροδομές χαλύβων ανάλογα με την κατεργασία. Είναι εύκολο να διακρίνει κανείς την τυπική μικροδομή του εξομαλυμένου χάλυβα (N) που χαρακτηρίζεται από εναλλαγή φερρίτη-περλίτη. Μια απευθείας σύγκριση με τις δομές χαλύβων TMCP (TMa, TMb) κάνει εμφανείς δύο κύριες διαφορές. Πρώτον, στις δεύτερες υπάρχουν λιγότερες μαύρες περιοχές, αποτέλεσμα της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα και, δεύτερον, το μικρότερο μέγεθος κόκκων, που ελαχιστοποιείται στην περίπτωση που εφαρμόζεται και επιταχυνόμενη απόψυξη. Μια τελείως διαφορετική δομή έχει ο χάλυβας που έχει υποστεί βαφή και επαναφορά (Q+T) όπου παρατηρείται σχηματισμός βελονοειδούς μαρτενσίτη.



Σχήμα 2.3. Μικροδομές ναυπηγικού χάλυβα ανάλογα με την κατεργασία που έχει υποστεί

Καθοριστικός παράγοντας για την απόδοση των απαιτούμενων ιδιοτήτων είναι η χημική σύσταση, για την οποία ισχύουν τα εξής: Ο γενικός κανόνας όσον αφορά στη χημική σύσταση είναι ότι η περιεκτικότητα σε Mn αυξάνεται ανάλογα με τα Grades. Παρόλο που οι Grade AH και DH είναι κατά βάση ίδιοι ως προς τη διαδικασία καθορισμού της χημικής τους σύστασης, ο Grade EH είναι σχεδιασμένος να περιέχει λιγότερο άνθρακα (C) και περισσότερο μαγγάνιο (Mn) και, επιπλέον, το περιεχόμενό του σε Ti, Al και N είναι επίσης ελεγχόμενο για τη βελτιστοποίηση της δυσθραυστότητας των συγκολλήσεων. Το χαρακτηριστικό των χαλύβων YP-400 είναι η ελάχιστη ποσότητα νιόβιου (Nb) σε ποσοστό 0,01% που προστίθεται λόγω του χαμηλού ισοδύναμου σε άνθρακα. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο το ποσοστό του Nb παραμένει χαμηλό, η δυσθραυστότητα της συγκόλλησης δεν επηρεάζεται.

Όσον αφορά στις συνθήκες της έλασης, για τους χάλυβες YP-400 επιλέγεται, συνήθως, θερμοκρασία θέρμανσης (T_r) ελαφρώς χαμηλότερη απ' ό, τι στους χάλυβες YP-320 και YP-360. Ακόμη, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή και η δυσθραυστότητα ορίζεται θερμοκρασία

μεγαλύτερη ή ίση από εκείνη του Ar_3 μετασχηματισμού. Ανεξάρτητα από το είδος του χάλυβα, ο γενικός κανόνας είναι ότι ορίζεται χαμηλότερη T_r για Grade AH από την T_r για Grade DH και EH.

Οι συνθήκες για την επιταχυνόμενη απόψυξη (εύρος θερμοκρασιών χαμηλότερα από το σημείο Ar_3) χαλύβων TMCP περιλαμβάνουν το ρυθμό απόψυξης (V_C) και τη θερμοκρασία τερματισμού της διαδικασίας. Στις πιο πολλές περιπτώσεις ο ρυθμός απόψυξης παίρνει τιμές 3-20 $^oC/s$, ενώ η τελική θερμοκρασία είναι συνήθως 400-600 ^oC, αν και διαφοροποιείται ανάλογα με τις ιδιότητες που επιδιώκονται (μεταλλογραφική δομή, αντοχή, δυσθραυστότητα), το πάχος και το ρυθμό απόψυξης. Στους χάλυβες YP-400 η τελική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη απ' ό,τι στους YP-320 και YP-360 για να διασφαλιστεί η υψηλή τιμή αντοχής που απαιτείται.

Συμπερασματικά, από το συνδυασμό των παραμέτρων των παραπάνω διαδικασιών μπορούν να αποδοθούν στα ελάσματα οι επιθυμητές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης σε διάδοση ρωγμών σε χαμηλές θερμοκρασίες.

2.3. Προδιαγραφές ναυπηγικών χαλύβων [2]

2.3.1. Οι ναυπηγικοί χάλυβες κατά το πρότυπο A131 της ASTM

Με βάση το πρότυπο A131 της ASTM προδιαγράφονται οι ιδιότητες και οι μέθοδοι παρασκευής των χαλύβων για χρήση στη ναυπηγική.

Διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Χάλυβες συνήθους αντοχής (Grades A, B, D, DS, CS και E) με κατώτατο όριο διαρροής τα 235 MPa.
- Χάλυβες υψηλής αντοχής (Grades AH, DH, και EH) με κατώτατο όριο διαρροής τα 315, 350 ή 390 MPa.

Είναι κανονικά διαθέσιμοι ως Grades A, AH32 ή AH36. Οι υπόλοιποι Grades προμηθεύονται κατόπιν συμφωνίας μεταξύ αγοραστή και κατασκευαστή. Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει οδηγίες για τις πληροφορίες που πρέπει να συνοδεύουν κάθε παραγγελία.

Επίσης, αναφέρονται οι τρόποι παρασκευής των χαλύβων ανάλογα με την προδιαγραφόμενη ποιότητά τους, οι θερμικές κατεργασίες στις οποίες υπόκεινται, οι απαιτήσεις για τη χημική

σύστασή τους και οι μέθοδοι απόδοσης της επιθυμητής μεταλλογραφικής δομής τους. Τέλος, παρουσιάζονται οι απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες και οι δοκιμές που πρέπει να λάβουν χώρα για την πιστοποίηση της ποιότητας του κάθε Grade.

2.3.2. Προδιαγραφές νηογνωμώνων για χάλυβες υψηλής αντοχής

Οι ποιότητες ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής κατά τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (ABS) φαίνονται στον Πίνακα 2-2. Παρατηρούνται χάλυβες διαφορετικών επιπέδων δυσθραυστότητας, κάτι που επιτυγχάνεται με έλεγχο του λόγου μαγγανίου προς άνθρακα, με την απαίτηση συγκεκριμένης μεθόδου αποξείδωσης, δημιουργίας λεπτόκοκκης δομής και θερμικής κατεργασίας ή με την απαίτηση δοκιμής δυσθραυστότητας για κάθε έλασμα. Παρόμοιες ποιότητες ναυπηγικών χαλύβων προδιαγράφονται και στους κανονισμούς όλων των άλλων σημαντικών νηογνωμώνων.

Οι επιτρεπόμενες χρήσεις των διαφόρων κατηγοριών χάλυβα για ελάσματα περιγράφονται στον Πίνακα 2-3 για χάλυβες υψηλής αντοχής κατά ABS.

Πίνακας 2-2. Προδιαγραφές ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής κατά ABS

Μέθοδος κατασκευής: Ανοικτή Κάμινος, Βασικού Οξυγόνου ή Ηλεκτρική Κάμινος

Ποιότητες	AH32	DH32	EH32	AH36	DH36	EH36
Αποξείδωση	Ημικαθησυχασμένος ή καθησυχασμένος[1]	Καθησυχασμένος, Λεπτόκοκκη μέθ.[2]	Καθησυχασμένος, Λεπτόκοκκη μέθ.	Ημικαθησυχασμένος ή καθησυχασμένος	Καθησυχασμένος, Λεπτόκοκκη μέθ	Καθησυχασμένος, Λεπτόκοκκη μέθ

Χημική Σύνθεση για όλες τις ποιότητες

(Ανάλυση δείγματος της κουτάλας του χυτηρίου)

C	0,18 % (max)	
Mn	0,90-1,60 %	
P	0,04 % (max)	
S	0,04 % (max)	
Si	0,10-0,50 %	
Ni	0,40 % (max)	Η καταγραφή των στοιχείων αυτών στην κατάσταση του χαλυβουργείου δεν είναι απαραίτητη εκτός από την περίπτωση που έχουν ειδικά προστεθεί
Cr	0,25 % (max)	
Mo	0,08 % (max)	
Cu	0,35 % (max)	
Cb (Ni)	0,05 % (max)	
V	0,10 % (max)	

Δοκιμή Εφελκυσμού		
Αντοχή Εφελκυσμού	48-60 kg/mm^2	50-63 kg/mm^2
Όριο διαρροής	32 kg/mm^2	36 kg/mm^2
Ελάχιστη επιμήκυνση	Για όλες τις ποιότητες: 19% σε 200mm ή 22% σε 50mm ή 20% ας $5{,}65\sqrt{A}$ (A: εμβαδό διατομής του δοκιμίου)	

Δοκιμή Κρούσης κατά Charpy με εγκοπή V

Θερμοκρασία	0 ^oC	-40 ^oC	-20 ^oC	-40 ^oC	-20 ^oC	-40 ^oC
Ελάχιστος μέσος όρος απορροφούμενης ενέργειας	3,5 kg-m	3,5 kg-m	3,5 kg-m	3,5 kg-m	3,5 kg-m	3,5 kg-m
Διαμήκη δοκίμια	2,4 kg-m	2,4 kg-m	2,4 kg-m	2,4 kg-m	2,4 kg-m	2,4 kg-m
Εγκάρσια δοκίμια						

[1] Η ποιότητα AH μπορεί να είναι ημικαθησυχασμένη για πάχη μέχρι και 12,5mm και στην περίπτωση αυτή δε θα εφαρμόζεται η προδιαγραφή για την ελάχιστη σε πυρίτιο περιεκτικότητα 0,10%. Εκτός από την περίπτωση όπου υπάρχει διαφορετική έγκριση, τα μεγαλύτερα 12,5% πάχη της ποιότητας AH θα καθησυχάζονται με 0,10% μέχρι 0,50% πυρίτιο

[2] Οι ποιότητες DH και EH πρέπει να περιέχουν τουλάχιστον ένα από τα στοιχεία που προκαλούν λεπτούς κόκκους σε αρκετή ποσότητα για την ικανοποίηση των προδιαγραφών για λεπτόκοκκη μέθοδο

Πίνακας 2-3. Χρήση ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής κατά ABS

Α. Ελάσματα πάχους 51mm και κάτω – Κανονικές εφαρμογές:	
Τα ελάσματα με πάχος από 51mm και κάτω που χρησιμοποιούνται για κανονικές εφαρμογές πρέπει να είναι των παρακάτω ποιοτήτων:	
Ποιότητα AH	Αποδεκτή μέχρι και για πάχος 19mm. Αποδεκτή επίσης και για τα πάνω από 19 mm μέχρι και 51mm ελάσματα εκτός από αυτά του πυθμένα, της σειράς του ζωστήρα και των καταστρωμάτων αντοχής στο μεσαίο τμήμα του πλοίου και για άλλα στοιχεία που μπορεί να υποβληθούν σε σχετικά ψηλές τάσεις
Ποιότητα DH	Αποδεκτή για πάχη μέχρι και 51mm
Ποιότητα EH	Αποδεκτή για πάχη μέχρι και 51mm
Β. Ελάσματα πάχους 51mm και κάτω – Ειδικές εφαρμογές:	
Τα ελάσματα με πάχος από 51mm και κάτω που χρησιμοποιούνται για ειδικές εφαρμογές[3] πρέπει να είναι των παρακάτω ποιοτήτων:	
Ποιότητες AH & DH	Αποδεκτές μέχρι και για πάχος 19mm.
Ποιότητα DH	Αποδεκτή μέχρι και για πάχος 27,5mm όταν το υλικό είναι εξομαλυμένο. Ωστόσο δεν απαιτείται ομαλοποίηση για πάχη μέχρι 19mm εκτός αν αυτό προδιαγράφεται
Ποιότητα EH	Αποδεκτή για πάχη μέχρι και 51mm

Τέλος, παρατίθενται στον Πίνακα 2-4 οι προδιαγραφές παρασκευής του Νορβηγικού Νηογνώμονα για τα ελάσματα χάλυβα υψηλής αντοχής για χρήση στη ναυπηγική, ανάλογα με το Grade και το πάχος.

[3] Παραδείγματα ειδικών εφαρμογών: το κυρτό της γάστρας, στην υδρορροή και στο ζωστήρα καταστρώματος

Πίνακας 2-4. Προδιαγραφές DNV για ναυπηγικούς χάλυβες υψηλής αντοχής

Table C4 Condition of supply for High Strength (HS) steel			
Grade	*Grain refining elements*	*Thickness, t mm*	*Condition of supply* [1]
NV A27S **NV A32** **NV A36**	Nb and/or V	t ≤ 12.5 12.5 < t ≤ 150	Any AR [3]., CR, N, QT, TM
	Al only or with Ti	t ≤ 20 20 < t ≤ 35 35 < t ≤ 150	Any Any [2] AR [3], CR, N, QT, TM
NV A40	Any	t ≤ 12.5 12.5 < t ≤ 150	Any CR, N, QT, TM
NV D27S **NV D32** **NV D36**	Nb or V	t ≤ 12.5 12.5 < t ≤ 150	Any AR [3], CR, N, QT, TM
	Al only or with Ti	t ≤ 20 20 < t ≤ 25 25 < t ≤ 150	Any Any [2] AR [3], CR, N, QT, TM
NV D40	Any	t ≤ 150	CR, N, QT, TM
NV E27S **NV E32** **NV E36**	Any	t ≤ 150	CR [3], N, QT, TM
NV E40	Any	t ≤ 150	N, QT, TM
NV F32 **NV F36**	Any	t ≤ 150	CR [4], N, QT, TM
NV F40	Any	t ≤ 150	N, QT, TM

1) Condition of supply:
AR: As rolled condition.
N: Normalised.
QT: Quenched and tempered
CR: Controlled rolled.
TM: Thermo-mechanically controlled processed (TMCP)
2) As rolled (AR) subject to special consideration and approval
3) Subject to special consideration and approval, sections in grades A27S, A32, A36, D27S, D32 and D36 may be supplied as rolled (AR) provided satisfactory results are consistently obtained from Charpy V-notch impact tests. Similarly sections in grades E27S, E32 and E36 may be supplied as rolled (AR) or controlled rolled (CR).
4) Subject to special consideration, sections in grades F32 and F36 may be supplied controlled rolled (CR).

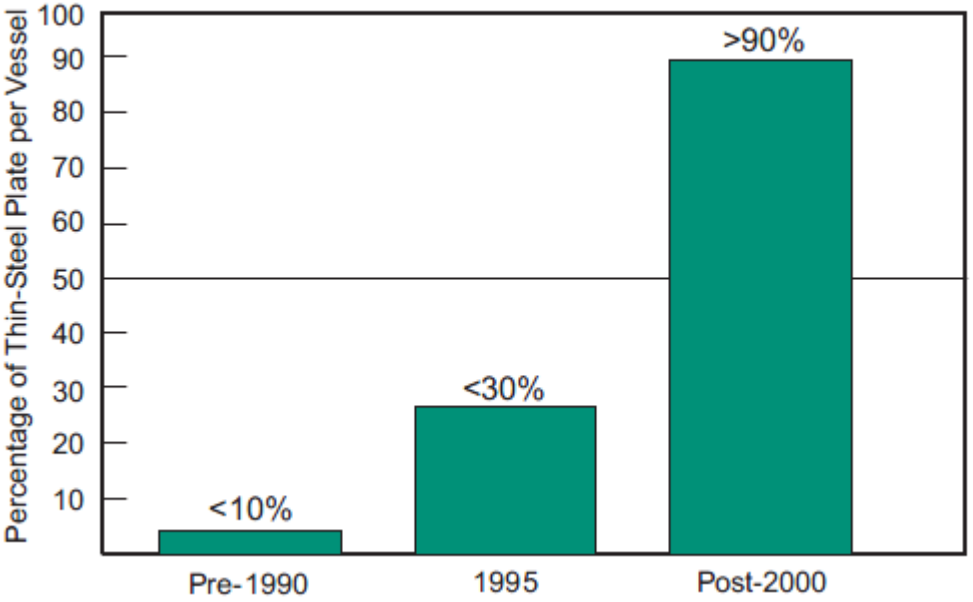
.

2.4. Τελευταίες εξελίξεις στη ναυπηγική: Χρήση ελασμάτων χάλυβα μικρού πάχους [II] – [VI]

2.4.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος στις τεχνικές παρασκευής χαλύβων με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (χάλυβες υψηλής αντοχής) κατέστησε εφικτή την όλο και μεγαλύτερη χρήση ελασμάτων μικρού πάχους και άρα και μικρότερου βάρους στη σχεδίαση ναυπηγικών κατασκευών. Πέρα από την προφανή μείωση στο συνολικό βάρος της κατασκευής, τα λεπτά

ελάσματα συνεισφέρουν στη βελτίωση της ευστάθειας αλλά και στην εξοικονόμηση ενέργειας, τόσο κατά τη λειτουργία όσο και κατά το στάδιο της κατασκευής. Την ολοένα και ευρύτερη χρήση λεπτών ελασμάτων επιβεβαιώνουν και στατιστικές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, με το συνολικό ποσοστό λεπτών ελασμάτων ανά πλοίο ως ποσοστό επί του συνόλου να ξεπερνά το 90% την τελευταία δεκαετία. Ταυτόχρονα με αυτή την εξέλιξη έχουν αυξηθεί οι απαιτήσεις σχεδίασης σε επίπεδο αντοχής, δυσκαμψίας, και ανοχών κατά τη συναρμολόγηση, τόσο για τα πολεμικά πλοία, όσο και για τα εμπορικά.



Σχήμα 2.4. Ποσοστό παραγγελιών ελασμάτων μικρού πάχους ανά πλοίο για τα ναυπηγεία Northrop Grumman Ship System Avondale Shipyards (USA)

Σημαντικό μειονέκτημα της χρήσης τέτοιων ελασμάτων είναι η τάση που έχουν κατά τη συναρμολόγηση να παρουσιάζουν έντονες παραμορφώσεις λυγισμού, λόγω της επίδρασης θερμικών θλιπτικών τάσεων. Το πρόβλημα αυτό αναλύεται στη συνέχεια.

2.4.2. Παραμόρφωση λυγισμού ελασμάτων μικρού πάχους

Κατά τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων είναι πιθανό να παρουσιαστεί το φαινόμενο της παραμόρφωσης λυγισμού, που οφείλεται στις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση. Η παραμόρφωση λυγισμού διαφέρει

από την παραμόρφωση λόγω κάμψης λόγω της μεγαλύτερης έκτασής της και διότι είναι δυνατή η δημιουργία περισσότερων της μίας ιδιομορφών.

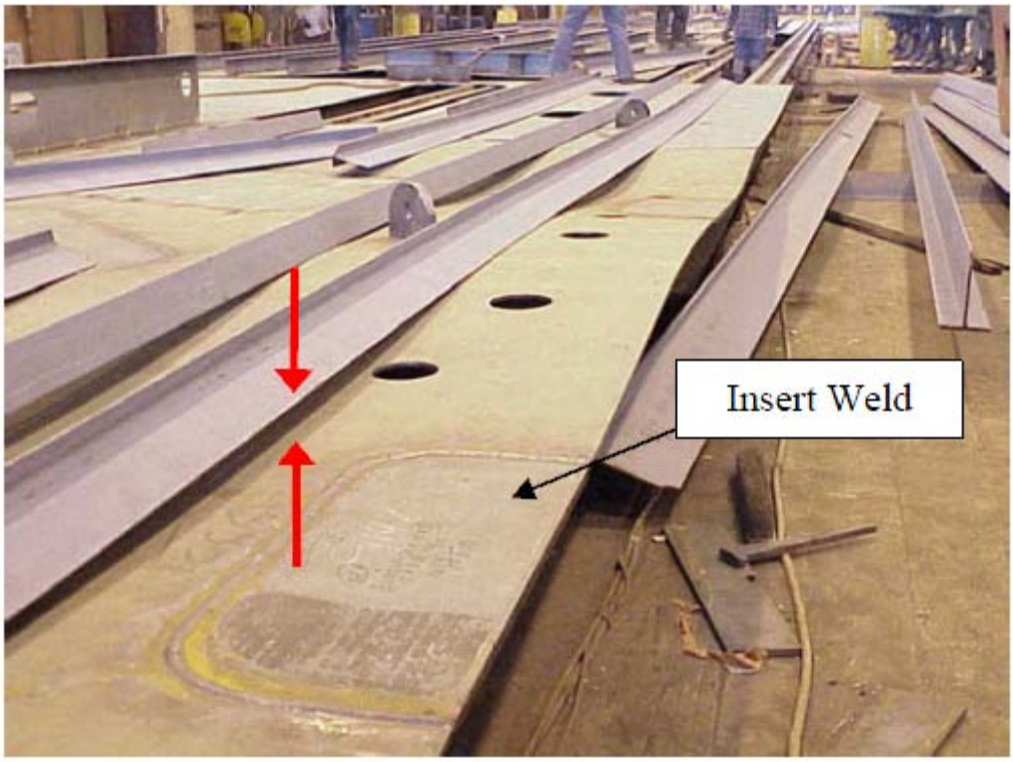
Το παραπάνω πρόβλημα είναι αποτέλεσμα της τάσης για λυγισμό που εμφανίζουν οι αποτελούμενες από ελάσματα μικρού πάχους κατασκευές, εφόσον οι παραμένουσες τάσεις που συσσωρεύονται καθ' όλη τη διαδικασία της παραγωγής, από την παρασκευή του ελάσματος μέχρι τη συναρμολόγηση, ξεπεράσουν μία κρίσιμη κατανομή στη γεωμετρία της κατασκευής. Το γεγονός ότι οι παραμένουσες τάσεις δεν οφείλονται μόνο σε έναν παράγοντα καθιστά το πρόβλημα πολυσύνθετο. Είναι δεδομένο πως η παραμόρφωση λυγισμού σχετίζεται έντονα με τη συγκόλληση και το ποσό της προσδιδόμενης από αυτή θερμότητα. Επίσης, το πάχος των ελασμάτων και ο λόγος μήκους προς πλάτος της κατασκευής καθορίζουν το όριο πάνω από το οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο.

Οι κυριότερες παράμετροι που προκαλούν και καθορίζουν την κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι οι εξής:

Κατάσταση των ελασμάτων: Τα ελάσματα, προτού οδηγηθούν για συναρμολόγηση, έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία, είτε κατά την παραγωγή τους είτε κατά τη διαμόρφωσή τους, γεγονός που έχει ήδη προκαλέσει την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων. Οι τάσεις αυτής της προέλευσης έχουν συνήθως μικρότερες τιμές, αλλά πολύ μεγάλο εύρος κατανομών. Καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία τους παίζουν οι εργασίες κοπής των ελασμάτων. Καθώς ένα τμήμα ελάσματος αφαιρείται, παρουσιάζεται ανακατανομή της αρχικής εντατικής κατάστασης στο έλασμα και στο αφαιρούμενο τμήμα του, η οποία οδηγεί σε μικρομετακινήσεις κατά τη διάρκεια της κοπής και άρα σε ανακρίβεια στις διαστάσεις του, οπότε και πρόβλημα στις ανοχές μεταξύ των τεμαχίων για τη συναρμολόγηση. Όταν δε πρόκειται για λεπτό έλασμα, η ταυτόχρονη ανακούφιση των τάσεων και η δημιουργία νέων θλιπτικών τάσεων μακριά από τη γραμμή της κοπής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση λόγω λυγισμού.

Συγκόλληση: Το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων που οφείλονται στη συγκόλληση θεωρείται ανάλογο του μεγέθους της συγκόλλησης και αντιστρόφως ανάλογο με την ταχύτητα του τόξου. Οπότε, τα φαινόμενα λυγισμού εξασθενούν με χρήση συγκολλήσεων υψηλής ακρίβειας, χαμηλότερης προσδιδόμενης θερμότητας ή και μεγαλύτερης ταχύτητας. Σε διάφορες πειραματικές μελέτες παρατηρήθηκε ότι η εμφάνιση αυτού του είδους παραμόρφωσης ξεκινούσε

μετά από κάποια τιμή προσδιδόμενης θερμότητας, οπότε γίνεται εμφανής η σημασία της κρίσιμης τιμής προσδιδόμενης θερμότητας, κάτω από την οποία δεν παρατηρείται το φαινόμενο. Γενικά, η τιμή της παραμέτρου αυτής μειώνεται με μείωση του πάχους του ελάσματος και αύξηση του ελεύθερου (ανυποστήρικτου) πλάτους. Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται ένα παράδειγμα παραμόρφωσης λυγισμού λόγω τοποθέτησης ελάσματος προσθήκης εντός ενός λεπτότερου με χρήση των συμβατικών μεθόδων SAW και FCAW.



Εικόνα 2.1. Παραμόρφωση λόγω λυγισμού λόγω συγκόλλησης ελάσματος προσθήκης διαφορετικού πάχους από το κύριο

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής: Η κρίσιμη τιμή της δύναμης που προκαλεί λυγισμό σε έναν κατασκευαστικό υποτομέα μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση του λόγου μήκος/πλάτος (a/b) της κατασκευής, του μέτρου κάμψης και της απόστασης μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών στη μορφή της εξίσωσης:

$$N_{cr} = k\frac{\pi^2 D}{b^2}$$

$$\text{όπου } k = \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b}\right)^2$$

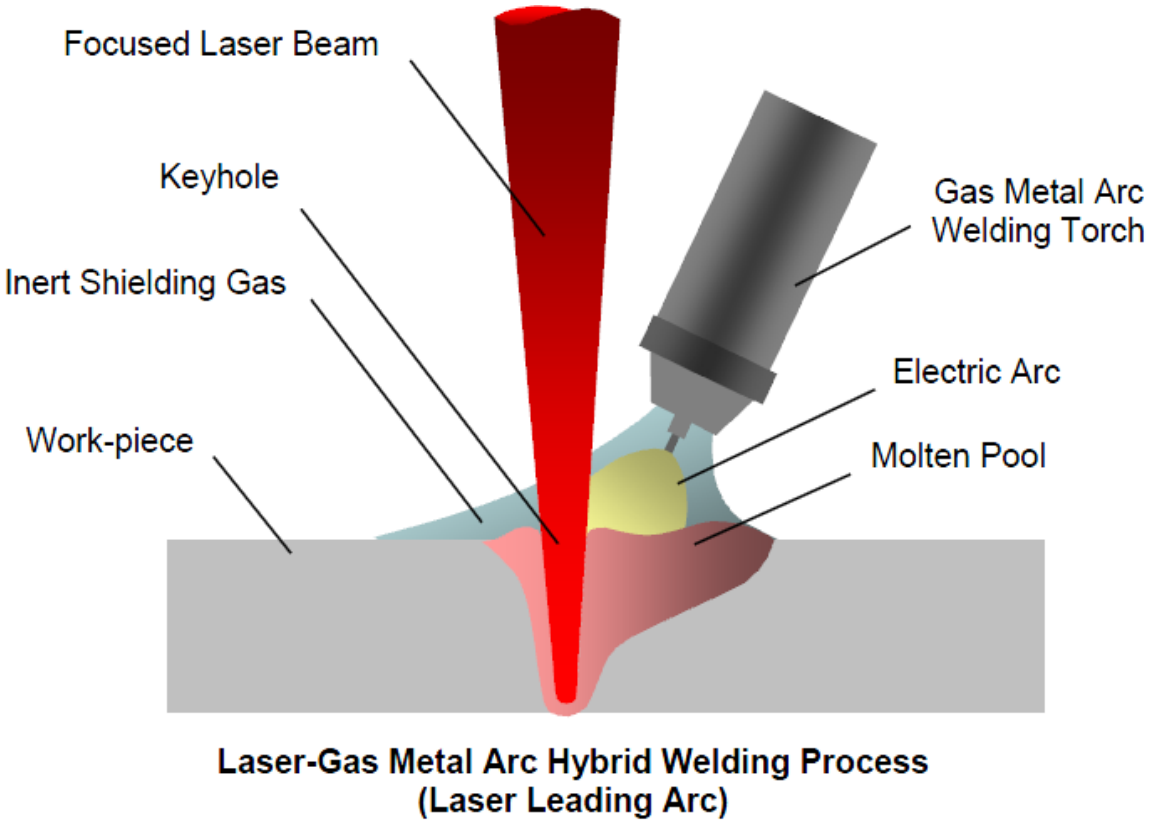
Η απόσταση μεταξύ ενισχυτικών μπορεί να υπεισέλθει στον υπολογισμό της παραμέτρου k με πιο περίπλοκο τρόπο (χρήση πεπερασμένων στοιχείων). Χωρίς να δώσουμε έμφαση ποσοτικά στην παραπάνω εξίσωση, παρατηρείται ότι η τιμή της κρίσιμης δύναμης ελαχιστοποιείται όταν a/b=1, οπότε πρέπει να αποφεύγονται ισόπλευροι σχεδιασμοί τέτοιων κατασκευών. Με αντίστοιχη λογική εκλέγεται και η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών κατά τη σχεδίαση, καθώς και τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

2.4.3. Τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος

Η αντιμετώπιση του προβλήματος του λυγισμού σε συγκολλητές κατασκευές ελασμάτων μικρού πάχους γίνεται με τους τρόπους που περιγράφονται εν συνεχεία. Στην πράξη, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με συνδυασμό πολλών παραμέτρων, τόσο κατά τη σχεδίαση, όσο και κατά την κατασκευή.

Κατάλληλη μέθοδος συγκόλλησης: Όπως προαναφέρθηκε, τα φαινόμενα λυγισμού εξασθενούν με χρήση συγκολλήσεων υψηλής ακρίβειας, χαμηλότερης προσδιδόμενης θερμότητας και μεγαλύτερης ταχύτητας. Η συγκόλληση με δέσμη laser (Laser Beam Welding, LBW) θεωρείται μία μέθοδος που πληροί αυτά τα κριτήρια λόγω της χαμηλής προσδιδόμενης θερμότητας, της ταχύτητάς της και της βαθιάς διείσδυσης που πραγματοποιεί. Από την άλλη, η LBW δεν μπορεί να καλύψει κενά αισθητού μεγέθους χωρίς προσθήκη μετάλλου συγκόλλησης. Τελευταία έχει τεθεί σε εφαρμογή η υβριδική μορφή συγκόλλησης laser σε συνδυασμό με τόξο και προστασία αερίου (Hybrid Laser Arc Welding, HLAW) η οποία συνδυάζει την LBW με την GMAW, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η HLAW συνδυάζει το πλεονέκτημα της ταχύτητας της LBW και της ευκολίας προσαρμογής της GMAW σε διαφόρων τύπων συνδέσεις. Επίσης, οι συγκολλήσεις με προστασία αερίου προσδίδουν χαμηλότερα ποσά θερμότητας λόγω της ψύξης που επιτυγχάνεται εξαιτίας της παρουσίας του αερίου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι αποτελούν

συμβατικές μεθόδους με σχετικά εύκολη εφαρμογή, τις καθιστά μία πολύ καλή επιλογή που μειώνει τη δαπάνη σε χρήμα για την αντιμετώπιση του φαινομένου σε σχέση με το αποτέλεσμα που επιτυγχάνουν. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις, οι μέθοδοι που αναφέρονται παραπάνω μπορούν να επιτύχουν 50-90% μικρότερη πρόσδοση θερμότητας σε σύγκριση με την SAW.



Σχήμα 2.5. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου HLAW με τη δέσμη laser να προηγείται του ηλεκτρικού τόξου

Αποφυγή υπερβολικής συγκόλλησης: Στην πράξη το πραγματικό μέγεθος συγκόλλησης κυμαίνεται συνήθως από 6 mm μέχρι 8 mm για απαιτούμενο πλάτος 5 mm. Αυτό είναι ένα απλό παράδειγμα της τάσης που υπάρχει οι συγκολλήσεις να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από το απαιτούμενο. Αν αναλογιστεί κανείς και τις συγκολλήσεις που γίνονται επιπλέον για λόγους επιδιόρθωσης προβλημάτων ή σφαλμάτων και κάλυψης μικροκενών στις αρχικές, συμπεραίνει ότι η συνολικά προσδιδόμενη θερμότητα μπορεί, με κατάλληλη κατάρτιση των τεχνιτών-

συγκολλητών μπορεί να περιοριστεί κατά ένα ποσοστό η προσδιδόμενη λόγω των συγκολλήσεων θερμότητα και, κατά συνέπεια, η παρουσία παραμενουσών τάσεων.

Ακολουθία/Προγραμματισμός συναρμολόγησης: Ο προγραμματισμός της ακολουθίας της συναρμολόγησης ενός τμήματος του πλοίου (υποτομέα), από την πρώτη μετωπική συγκόλληση μέχρι τις αυχενικές των ενισχυτικών, θεωρείται πολύ σημαντικός. Ενδείκνυται μία ακολουθία συναρμολόγησης με άξονα συμμετρίας και, αν είναι εφικτή, η συμμετρική ταυτόχρονη συγκόλληση διαμήκων ενισχυτικών. Ωστόσο, ένας θεωρητικά βέλτιστος προγραμματισμός συναρμολόγησης μπορεί να αποδειχθεί αναποτελεσματικός, καθώς είναι πιθανό να εμποδίζει την πραγματοποίηση αυτοματοποιημένων συγκολλήσεων π.χ. λόγω παρεμβαλλόμενων ενισχυτικών.

Μέθοδοι κοπής: Όπως προαναφέρθηκε, η σωστή εφαρμογή βάσει του σχεδιασμού προϋποθέτει και ακρίβεια στις διαστάσεις, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλης μεθόδου κοπής. Συνιστώνται μέθοδοι κοπής μεγάλης ακρίβειας και με απουσία φλόγας ή μικρή προσδιδόμενη θερμότητα. Τέτοιες είναι η υδροκοπή, η υποβρύχια κοπή με τόξο πλάσματος και η κοπή με δέσμη laser.

Θερμομηχανικές τεχνικές: Οι παραμένουσες τάσεις που οφείλονται στη συγκόλληση μειώνονται με ελεγχόμενη προθέρμανση εκατέρωθεν της θέσης συγκόλλησης κατά το διάμηκες. Το ελεγχόμενο αυτό θερμοκρασιακό πεδίο προκαλεί μία ισοδύναμη εντατική κατάσταση στην περιοχή της συγκόλλησης μειώνοντας έτσι τις παραμένουσες τάσεις, καθώς η συγκόλληση ψύχεται στο περιβάλλον ταυτόχρονα με το τμήμα του ελάσματος που έχει προθερμανθεί.

Άλλες παρόμοιες τεχνικές αντιμετώπισης του προβλήματος της παραμόρφωσης λόγω λυγισμού είναι η άσκηση εφελκυστικής δύναμης κατά τη συγκόλληση, η εκ των προτέρων κάμψη των συνδέσεων και η ελεγχόμενη απόψυξη.

Η κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών εφαρμογής των παραπάνω τεχνικών είναι πολύ σημαντική για την όσο το δυνατό αρτιότερη κατασκευή ενός συναρμολογημένου πλαισίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους αντιμετώπισης του φαινομένου της στρέβλωσης λόγω λυγισμού ενδέχεται να αυξήσουν το κόστος παραγωγής λόγω

των αυξημένων απαιτήσεων σε εξειδικευμένο εξοπλισμό και λόγω της επιπλέον ενέργειας που θα δαπανηθεί. Το κόστος αυτό μπορεί να αυξήσει τον αρχικό προϋπολογισμό μέχρι και 30%.

3. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ [2], [6], [10]

3.1. Γενικά

Η προσδιδόμενη από το τόξο θερμότητα διαχέεται στα προς συγκόλληση τεμάχια κυρίως με το μηχανισμό μεταφοράς με αγωγιμότητα και προκαλεί πολύπλοκες χωρικές και χρονικές θερμοκρασιακές κατανομές. Αποτέλεσμα των κατανομών αυτών είναι:

Α) Η μετατροπή της μικροδομής του υλικού στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ),

Β) Η δημιουργία παροδικών θερμικών τάσεων και μετατοπίσεων, και

Γ) Η δημιουργία παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Λόγω των παραπάνω συνεπειών, κρίνεται αναγκαία η πρόβλεψη του τρόπου εξέλιξης του φαινομένου, το οποίο είναι και το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου.

3.2. Παραγωγή και διάχυση της θερμότητας συγκόλλησης

3.2.1. Παραγωγή θερμότητας συγκόλλησης

Σε συγκολλήσεις τόξου οι πηγές θερμότητας είναι:

Α) Η θερμότητα που παράγεται από την ηλεκτρική ισχύ του τόξου συγκόλλησης και δίνεται από τη σχέση:

$$H = V \cdot I$$

Όπου: V = τάση τόξου (Volts)

I = ένταση ρεύματος τόξου (Ampere)

Β) Η θερμότητα που προέρχεται από χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στις επενδύσεις των ηλεκτροδίων, στην ατμόσφαιρα του τόξου, και στο τηγμένο μέταλλο (αντίδραση μεταξύ της σκουριάς και του τηγμένου μετάλλου κλπ.).

Γ) Η λανθάνουσα θερμότητα που οφείλεται στους αλλοτροπικούς μετασχηματισμούς του μετάλλου.

Από τις παραπάνω κατηγορίες σημαντικότερη συνεισφορά συνολικά έχει η προερχόμενη από την ισχύ του τόξου θερμότητα.

Για την έκφραση της έντασης της πηγής θερμότητας συνηθίζεται η χρήση της παραμέτρου h, που ονομάζεται ενέργεια τόξου συγκόλλησης και δίνεται από τη σχέση:

$$h = \frac{V \cdot I}{u} \qquad (J/m)$$

όπου u είναι η ταχύτητα κίνησης του τόξου.

Από την παράμετρο αυτή εξαρτώνται οι ρυθμοί θέρμανσης και ψύξης των συγκολλούμενων τεμαχίων και το μέγεθος του λουτρού συγκόλλησης. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της h, τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός ψύξης και τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του λουτρού συγκόλλησης. Επιπλέον, η ενέργεια του τόξου συγκόλλησης επηρεάζει άμεσα και το μέγεθος (ενδεχομένως και το είδος) των κόκκων της ισχυρά θερμαινόμενης ζώνης και του μετάλλου συγκόλλησης.

3.2.2. Ο συντελεστής απόδοσης τόξου

Η θερμότητα που παράγεται από το ηλεκτρικό τόξο διαχέεται προς:

Α) Τα τεμάχια προς συγκόλληση με θερμική αγωγιμότητα.

Β) Το ηλεκτρόδιο, επίσης με θερμική αγωγιμότητα, που στην περίπτωση των τηκόμενων ηλεκτροδίων μεταφέρεται μέσω των σταγόνων στα προς συγκόλληση τεμάχια.

Γ) Την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα με μορφή συναγωγής και ακτινοβολία απευθείας από το τόξο και από τα συγκολλούμενα τεμάχια.

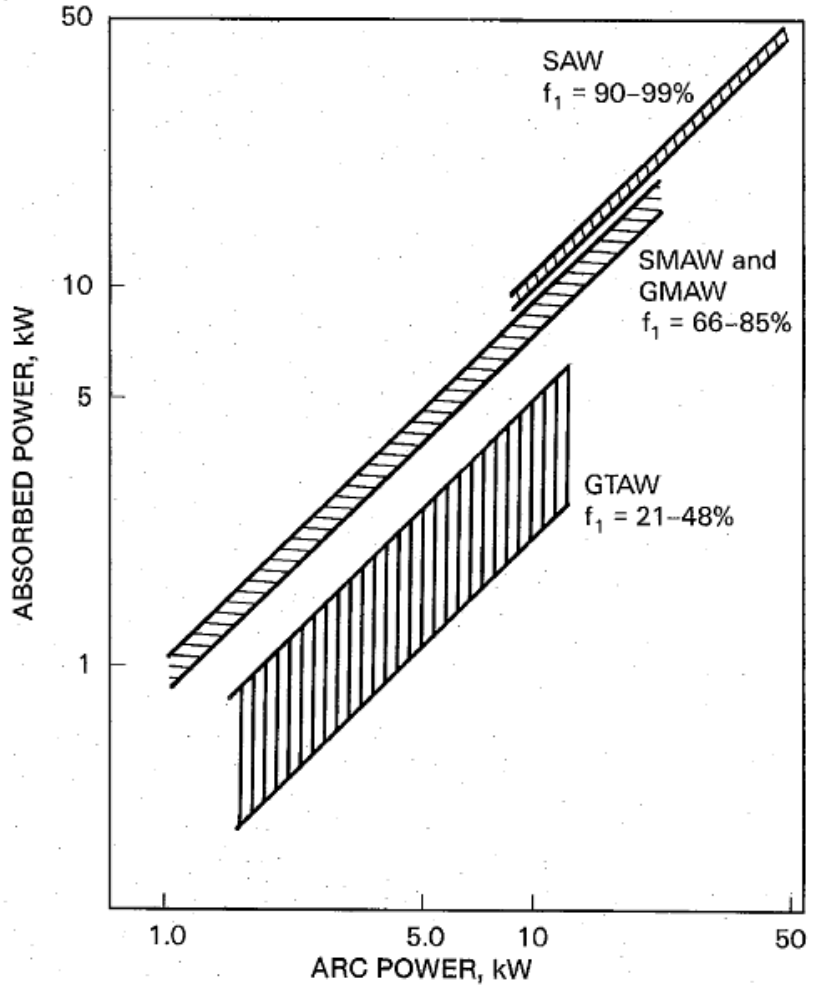
Είναι προφανές ότι δε μεταφέρεται όλη η θερμότητα του τόξου προς τα συγκολλούμενα τεμάχια, αλλά μόνο ένα ποσοστό αυτής, το οποίο ονομάζεται συντελεστής απόδοσης τόξου και συμβολίζεται με η.

Έστω ότι η συνολική ενέργεια του τόξου υποδιαιρείται σε τρία μέρη: Σε εκείνο που διαχέεται στο ηλεκτρόδιο q_e, σε εκείνο που διαχέεται με συναγωγή και ακτινοβολία από τη στήλη τόξου q_p, και σε εκείνο που προσδίδεται στα προς συγκόλληση τεμάχια q_w. Στην περίπτωση τηκόμενου ηλεκτροδίου, η θερμότητα q_e προσδίδεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στα προς συγκόλληση τεμάχια, ένα ποσοστό n της θερμότητας που απάγεται από τη στήλη τόξου, q_p, προσδίδεται τελικά στα προς συγκόλληση τεμάχια και ένα ποσοστό m της θερμότητας q_w χάνεται με ακτινοβολία. Τότε ο συντελεστής απόδοσης τόξου είναι:

$$\eta = \frac{(1-n)q_p + mq_w}{VI}$$

Συνεπώς, η συνολικά προσδιδόμενη στα τεμάχια θερμότητα εκφράζεται ως:

$$Q = \eta \cdot V \cdot I$$



Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή απόδοσης τόξου από μετρήσεις

Ενδεικτικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, σε συγκολλήσεις με προστασία αερίου η απόδοση τόξου κυμαίνεται μεταξύ 66-85%.

3.3. Προσομοίωση της διαδικασίας συγκόλλησης και βασικές υποθέσεις

Το φαινόμενο της πρόσδοσης και μετάδοσης θερμότητας σε συγκολλήσεις τόξου μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια:

1) Διαδικασία θερμικού κορεσμού: Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από το τόξο συγκόλλησης.
2) Ημι-μόνιμη κατάσταση: Η θερμοκρασιακή κατανομή είναι μόνιμη ως προς το σύστημα συντεταγμένων που κινείται με την πηγή θερμότητας.
3) Στάδιο εξισορρόπησης: Μετά το σβήσιμο του τόξου η θερμοκρασία τείνει να εξισωθεί με εκείνη του περιβάλλοντος.

Το δεύτερο στάδιο θεωρείται και το πιο εύκολο να αναλυθεί μαθηματικά, καθώς το πρόβλημα μετατρέπεται σε μόνιμο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας για κινούμενο σύστημα συντεταγμένων. Με πιο αυστηρή αντιμετώπιση του προβλήματος, όμως, η ημι-μόνιμη υπόθεση ισχύει μόνο για μια μικρή περιοχή γύρω από την πηγή θερμότητας. Για το πρώτο και το τρίτο στάδιο το πρόβλημα είναι μη μόνιμο, και άρα αρκετά πολύπλοκο, ακόμα και σε συγκολλήσεις πολύ μεγάλου μήκους.

Σχετικά με την πηγή θερμότητας, στις περισσότερες αναλυτικές θεωρήσεις του προβλήματος η πηγή θερμότητας προσομοιάζεται με μια κινούμενη σημειακή, γραμμική ή επίπεδη πηγή θερμότητας με σταθερή ταχύτητα. Η θεώρηση αυτή στηρίζεται στην αρχή ότι η θερμοκρασιακή κατανομή εξαιτίας της πηγής θερμότητας μικρού μεγέθους επηρεάζεται από το μέγεθος μόνο σε μια περιοχή πολύ κοντά στην πηγή. Οπότε σε σημεία που βρίσκονται σε ικανή απόσταση από την πηγή θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια η θερμοκρασιακή κατανομή. Σε αρκετές περιπτώσεις, όμως, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των θερμοκρασιών κοντά στη συγκόλληση ή και σε αυτήν ακόμα. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων είναι απαραίτητη η χρήση αναλυτικών μεθόδων με προσομοίωση της πηγής θερμότητας με τρισδιάστατο τρόπο ή με χρήση πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων.

Επίσης, το γεγονός ότι οι φυσικές ιδιότητες κάθε υλικού δεν παραμένουν σταθερές συναρτήσει της θερμοκρασίας (π.χ. ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας), οι εξισώσεις επίλυσης του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας είναι μη γραμμικές και η αναλυτική επίλυσή τους είναι πολύ δύσκολη. Οπότε, γίνεται συνήθως η παραδοχή ότι οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων παραμένουν σταθερές ή είναι γραμμικές συναρτήσεις της θερμοκρασίας.

3.4. Θερμική ιστορία της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) – Θερμικοί κύκλοι ΘΕΖ

3.4.1. Προσδιορισμός της θερμικής ιστορίας της ΘΕΖ

Ο όσο το δυνατόν πιο ακριβής προσδιορισμός της θερμικής ιστορίας της ΘΕΖ, δηλαδή της περιοχής ενδιάμεσα στο μέταλλο βάσης (ΜΒ) και το μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ), κρίνεται αναγκαίος για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων εξαιτίας της συγκόλλησης. Επίσης, από τη θερμική ιστορία της ΘΕΖ εξαρτώνται η μικροδομή και η φύση των μετασχηματισμών φάσεων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή αυτή.

Όσο ακριβής και αν θεωρηθεί ένας μαθηματικός υπολογισμός στο πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας, δεν παύει να είναι προσέγγιση της λύσης του προβλήματος, λόγω των παραδοχών και των υποθέσεων πάνω στις οποίες στηρίζεται η όποια επίλυση (πχ σταθερές φυσικές ιδιότητες υλικού, σημειακή ή γραμμική θεώρηση πηγής θερμότητας κλπ).

Τα παραπάνω οδήγησαν στο να υιοθετηθούν πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό των θερμικών κύκλων της ΘΕΖ. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης είναι εκείνη με χρήση θερμοστοιχείων (thermocouples) κατάλληλα τοποθετημένων σε προκαθορισμένες θέσεις της ΘΕΖ. Σημειώνεται, ότι για τη λήψη ικανοποιητικών μετρήσεων απαιτείται μεγάλη ακρίβεια τοποθέτησης των θερμοστοιχείων και μεγάλη προσοχή στον τρόπο σύνδεσής τους στην επιφάνεια μέτρησης.

3.4.2. Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό ψύξης της ΘΕΖ

Ο ρυθμός ψύξης είναι αυτός που καθορίζει τη μικροδομή και τη σκληρότητα της ΘΕΖ. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ψύξης είναι το πάχος του ελάσματος, οι συνθήκες συγκόλλησης, η προθέρμανση, το μήκος συγκόλλησης κα. Πιο αναλυτικά:

<u>Πάχος ελάσματος και αρχική θερμοκρασία</u>: Γενικά παρατηρείται ότι με αύξηση του πάχους του ελάσματος μέχρι κάποια τιμή αυξάνεται και ο ρυθμός ψύξης και πάνω από το όριο αυτό παραμένει ουσιωδώς σταθερός. Ακόμη, παρατηρείται μείωση του ρυθμού ψύξης με αύξηση της θερμοκρασίας προθέρμανσης.

<u>Συνθήκες συγκόλλησης</u>: Η προσδιδόμενη στο έλασμα θερμότητα είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος και, γενικά, ο ρυθμός ψύξης μειώνεται με αύξηση του λόγου I/u, όπου u η ταχύτητα της πηγής θερμότητας.

Είδος επένδυσης ηλεκτροδίου: Σύμφωνα με τις μέχρι στιγμής πειραματικές μετρήσεις, η επίδραση του είδους της επένδυσης των ηλεκτροδίων στο ρυθμό ψύξης δεν είναι σημαντική, εφόσον οι συγκολλήσεις γίνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Αναλόγως του είδους της επένδυσης των ηλεκτροδίων προκαλούνται διαφοροποιήσεις στην εκλυόμενη θερμότητα κατά τη χημική αντίδραση και στο σημείο τήξης της επένδυσης ή της σκουριάς και άρα αλλαγές στο θερμικό κύκλο.

Μήκος συγκόλλησης και γεωμετρία ραφής: Παρατηρείται ότι ο ρυθμός ψύξης στο κέντρο και στον κρατήρα της συγκόλλησης για αυχενικές και επιφανειακές συγκολλήσεις μειώνεται με αύξηση του μήκους συγκόλλησης μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή. Επίσης, ο ρυθμός ψύξης στον κρατήρα μιας συγκόλλησης μικρού μήκους έχει τιμή διπλάσια περίπου από το ρυθμό ψύξης στο κέντρο μιας συγκόλλησης μεγάλου μήκους. Στη ΘΕΖ μιας αυχενικής συγκόλλησης ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο σε επιφανειακή συγκόλληση για ίδιες συνθήκες, εξαιτίας του γεγονότος ότι σε αυχενικές συγκολλήσεις η θερμότητα προς περισσότερες κατευθύνσεις από ό, τι σε επιφανειακές.

Θερμικές ιδιότητες του υλικού: Για την επίδραση που έχουν οι θερμικές ιδιότητες του υλικού στη θερμοκρασιακή κατανομή στη ΘΕΖ ισχύουν οι εξής γενικοί κανόνες: α) Για μικρό συντελεστή θερμικής διάχυσης είναι και πιο απότομη η κατανομή των μέγιστων θερμοκρασιών ως συνάρτηση της απόστασης από τον άξονα της συγκόλλησης. β) Για μεγάλους συντελεστές θερμικής διάχυσης παρουσιάζονται μεγαλύτεροι ρυθμοί ψύξης για θερμικό κύκλο με δεδομένη μέγιστη θερμοκρασία. γ) Τέλος, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος παραμονής σε υψηλή θερμοκρασία για θερμικό κύκλο με δεδομένη μέγιστη θερμοκρασία.

3.4.3. Έλεγχος της προσδιδόμενης θερμότητας

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίνεται στην επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά, ειδικά όταν πρόκειται για συγκόλληση κατασκευών από χάλυβα υψηλής αντοχής, λόγω του κινδύνου υποβάθμισης των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Απαιτείται έλεγχος της προσδιδόμενης θερμότητας έτσι ώστε:

α) Να αποτραπεί η δημιουργία σκληρής και ψαθυρής μαρτενσιτικής φάσης λόγω ταχέων ρυθμών ψύξης. Η δομή αυτή ενδέχεται να οδηγήσει σε ρωγμάτωση.

β) Ειδικά όταν πρόκειται για χάλυβες που έχουν υποστεί θερμικές κατεργασίες (για παράδειγμα ανόπτηση ή θερμομηχανική έλαση) με σκοπό τη βελτίωση της δυσθραυστότητάς τους, πρέπει να αποφευχθούν αργοί ρυθμοί απόψυξης ώστε να αποτραπεί η δημιουργία μικροδομών που έχουν μικρή ολκιμότητα.

4. Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ Η ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

4.1. Γενικά

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς και ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του ναυπηγικού χάλυβα DH36 πάχους 6 mm κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με χρήση των μεθόδων συγκόλλησης GMAW και FCAW με ρομποτική διάταξη. Ακόμη, εξετάζεται η ποιότητα και οι ιδιότητες του σχηματιζόμενου μετάλλου συγκόλλησης. Κατά την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων καταγράφηκαν οι θερμικοί κύκλοι με τη βοήθεια θερμοστοιχείων τοποθετημένων σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τον άξονα συμμετρίας της ραφής, καθώς επίσης και οι κατακόρυφες παραμορφώσεις στο ελεύθερο άκρο του ενός εκ των δύο τεμαχίων προς συγκόλληση. Τέλος, σε τομές των συγκολλημένων ελασμάτων πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος με μετρήσεις μικροσκληρότητας και παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.

Οι συγκολλήσεις και οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ενώ μέρος της προετοιμασίας των ελασμάτων και της κοπή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε μηχανουργείο εκτός ΕΜΠ.

Παρακάτω αναπτύσσεται όλη η προετοιμασία και η εκτέλεση των πειραμάτων που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

4.2. Ναυπηγικός χάλυβας DH36

Στην παρούσα εργασία το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ναυπηγικός χάλυβας υψηλής αντοχής DH36. Η ονομασία του είναι σύμφωνα με το πρότυπο A131/A131M της ASTM. Η τυπική % κατά βάρος χημική σύσταση του χάλυβα αυτού δίνεται στον Πίνακα 4-1, ενώ στον Πίνακα 4-2 φαίνονται οι μηχανικές του ιδιότητες.

Η συμπεριφορά των χαλύβων γενικά εξαρτάται από τη μικροδομή τους. Είναι γνωστό ότι χάλυβες με κυβική χωροκεντρομένη (bcc) μικροδομή, όπως στην προκειμένη περίπτωση ο DH36, είναι ευαίσθητοι σε αλλαγές θερμοκρασιών και ρυθμών φόρτισης και οι ιδιότητές τους εξαρτώνται εν πολλοίς από τις ακαθαρσίες που εμπεριέχουν. Γενικά, ο DH36 παρουσιάζει καλή ολκιμότητα και πλαστικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλούς ρυθμούς φόρτισης.

Η συγκολλησιμότητα του DH36 είναι πολύ καλή για όλες τις διαθέσιμες τεχνικές συγκόλλησης, πρέπει όμως σε κάθε περίπτωση το ισοδύναμο άνθρακα C_{eq}[4] να μην υπερβαίνει την τιμή 0,40% . Η τιμή του C_{eq} για τον DH36 ποικίλει από 0,38 – 0,57 και συνήθως αυτός του εμπορίου δεν ξεπερνά το 0,40. Για τιμή του C_{eq} ίση με 0,38 υπάρχει εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα ρωγμάτωσης στη ΘΕΖ, ακόμα και σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς απόψυξης. Αντίθετα, για τιμές του C_{eq} άνω του 0,48 οι πιθανότητες ρωγμάτωσης είναι μεγάλες και για χαμηλούς ρυθμούς απόψυξης. Η καλή συγκολλησιμότητα του DH36 φαίνεται και από το γεγονός ότι για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400K η αντοχή του δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές της θερμοκρασίας για χαμηλό ρυθμό εναλλαγών φόρτισης.

Οι μέθοδοι παρασκευής του DH36, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ABS, είναι:

- Ανοιχτής φλογοκαμίνου (open-hearth furnace).
- Βασικής οξυγόνου (basic oxygen furnace).
- Ηλεκτρικής καμίνου (electric furnace).

Πίνακας 4-1 Τυπική Χημική σύσταση (%) του ναυπηγικού χάλυβα DH36

C (max)	0,18
Cr (max)[5]	0,25
Mn	0,9-1,60
Ni (max)[3]	0,40
Si	0,1-0,5
V (max)[3]	0,10
Cu (max)[3]	0,35
S (max)	0,04
P (max)	0,04
Cb–Nb (max)[3]	0,05
Mo (max)[3]	0,06

Σύμφωνα με το πρότυπο A131/A131M της ASTM, το οποίο προδιαγράφει τα χαρακτηριστικά των κατασκευαστικών χαλύβων για χρήση στη ναυπηγική, ο DH36 οφείλει να

[4] $C_{eq}=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15}\%$

[5] Δεν απαιτείται η αναγραφή τους στο πιστοποιητικό του χαλυβουργείου αν δεν έχουν προστεθεί σκόπιμα.

είναι πλήρως καθησυχασμένος (killed steel) και να έχει παρασκευαστεί με χρήση κάποιας μεθόδου εκλέπτυνσης κόκκων (fine grain practice). Για την επίτευξη της τελευταίας προδιαγραφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία μικροκραματοποίησης αλουμίνιο, βανάδιο ή κολόμβιο (νιόβιο).

Ανάλογα με την περίπτωση, ο DH36 απαιτείται να έχει υποστεί κάποια θερμική κατεργασία κατά την παραγωγή του. Συγκεκριμένα, για πάχη μεγαλύτερα από 25,5 mm απαιτείται θερμική κατεργασία εξομάλυνσης (normalizing), ή σε ειδικές περιπτώσεις ελεγχόμενη έλαση (controlled rolling), για να επιτευχθεί η προδιαγραφόμενη υψηλή δυσθραυστότητα. Επίσης, όταν ο χάλυβας DH36 είναι εξομαλυμένος ή έχει υποστεί ελεγχόμενη έλαση πρέπει να συμβολίζεται ως DHN36. Τέλος, οι χάλυβες DH που έχουν προσθήκες αλουμινίου από την κατεργασία σε πάχη μεγαλύτερα των 19 mm πρέπει επίσης να έχουν υποστεί εξομάλυνση.

Για τη συγκόλληση του συγκεκριμένου χάλυβα, ο ABS απαιτεί το πάχος του να μην υπερβαίνει τις 2 in για συνήθεις εφαρμογές και τις 1,08 in εφόσον είναι εξομαλυμένος ή τις 0,75 in για μη εξομαλυμένο χάλυβα για ειδικές εφαρμογές (bilge strake, sheer strake, strength-deck, hatch-side strake ή stringer plate).

Πίνακας 4-2. Μηχανικές ιδιότητες του ναυπηγικού χάλυβα DH36

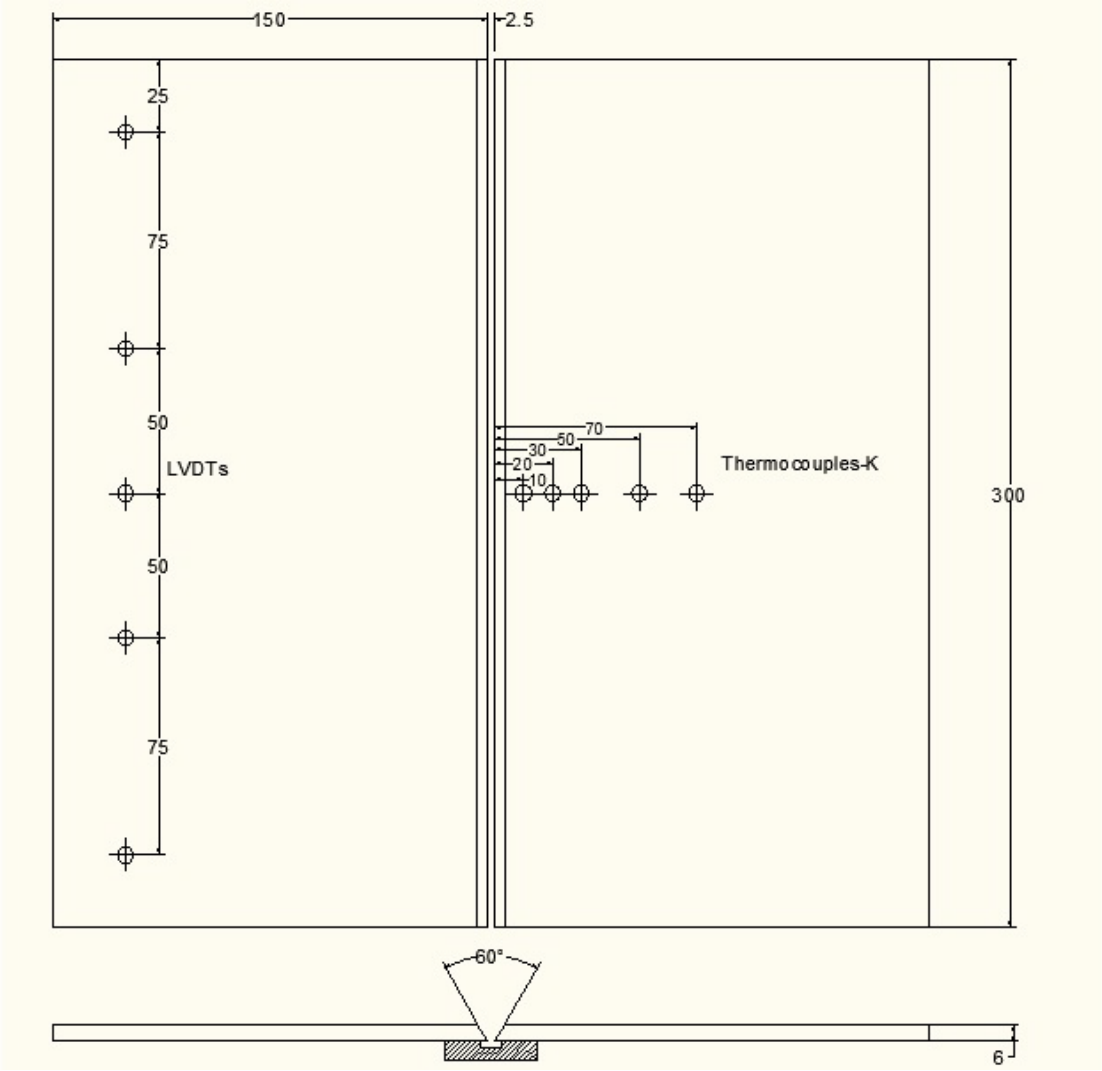
Χάλυβας	Όριο διαρροής (MPa)	Όριο θραύσης (MPa)	Επιμήκυνση (%)		Δυσθραυστότητα (J)		
			Σε 200 mm	Σε 50 mm	θ^oC	διαμήκης	εγκάρσια
DH36	>350	490-620	19	21	-20	34	23

4.3. Προετοιμασία δοκιμίων

Ο χάλυβας DH36 ήταν σε μορφή ελασμάτων πάχους 6 mm και διαστάσεων 30 X 15 cm. Αρχικά έγιναν δοκιμαστικές αποθέσεις (beads on plate) και δοκιμαστικές μετωπικές συγκολλήσεις σε κάποια από τα ελάσματα και μεταλλογραφία του μετάλλου βάσης.

Τα ελάσματα, όπως παρελήφθησαν από τα Ναυπηγεία Ελευσίνας, δεν είχαν υποστεί προετοιμασία στα άκρα (λοξοτομή). Ύστερα από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η ποιότητα των συγκολλήσεων για μη λοξοτομημένα άκρα και για μετωπική συγκόλληση από τη μία πλευρά, δεν ήταν καλή και προτιμήθηκε τελικά η προετοιμασία των άκρων για καλύτερο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, έγινε προετοιμασία των άκρων (λοξοτομή) τύπου V, γωνίας (φ) 60° (Σχήμα 4.1).

Επίσης, δημιουργήθηκαν σε δύο από τα ελάσματα από πέντε (5) οπές διαμέτρου 3 mm και βάθους 1 mm στην επιφάνεια του καθενός. Οι οπές αυτές έγιναν στο δράπανο του Εργαστηρίου σε αποστάσεις 10, 20, 30, 50, 70 mm από το προς συγκόλληση άκρο στον κεντρικό άξονα του ελάσματος. Σκοπός των οπών είναι η τοποθέτηση θερμοστοιχείων τύπου K (Thermocouples-K) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα σημεία αυτά κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

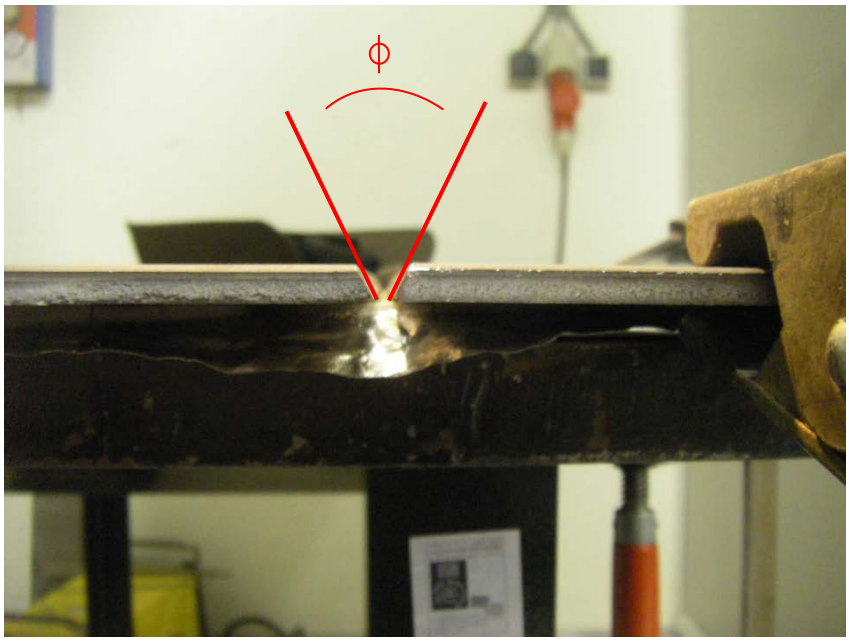


Σχήμα 4.1 Σκαρίφημα διάταξης των δύο συγκολλήσεων και των μετρητικών οργάνων

Το πρώτο έλασμα (με τις οπές για τα θερμοστοιχεία) και ένα ακόμα έλασμα χωρίς οπές τοποθετούνται στο μεταλλικό τραπέζι της συγκόλλησης με τα λοξοτομημένα άκρα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Στη συνέχεια, γίνεται συγκόλληση σε δύο σημεία (πόντες), ώστε οι

πλάκες να συγκρατούνται μεταξύ τους σε σταθερή απόσταση κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης των θερμοστοιχείων και των υπόλοιπων αισθητήρων (LVDTs).

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση των παραμέτρων της συγκόλλησης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αποθέσεις (beads on plate, BOP) σε άλλο έλασμα DH36. Αφού έγιναν αρκετές δοκιμαστικές αποθέσεις προέκυψαν κάποιες συνθήκες συγκόλλησης που φαίνονταν ότι δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Έτσι, επιλέχθηκαν οι παράμετροι που για BOP έδωσαν τις συνθήκες:



Εικόνα 4.1. Προφίλ ένωσης

GMAW

Παροχή προστατευτικού αερίου: 82%Ar-18% CO_2 18 lt/min

Ισχύς μηχανής (ποσοστό επί της μέγιστης): 50%

Ταχύτητα τσιμπίδας: 30 cm/sec

Τάση τόξου, V: 24 V

Ρεύμα συγκόλλησης, I: 225 A

Παρατηρήσεις: Επαρκές πάχος και μέτρια κύρτωση του κορδονιού της συγκόλλησης, καλή η όψη της και ικανοποιητικό πλάτος.

FCAW

Παροχή προστατευτικού αερίου: 82% Ar - 18% CO_2 , 18 lt/min

Ισχύς μηχανής (ποσοστό επί της μέγιστης): 55%

Ταχύτητα τσιμπίδας: 40 cm/sec

Τάση τόξου, V: 24,5 V

Ρεύμα συγκόλλησης, I: 245 A

Παρατηρήσεις: Επαρκές πάχος και μέτρια κύρτωση του κορδονιού της συγκόλλησης, καλή η όψη της, ικανοποιητικό πλάτος και μικρό μήκος μαγνητικού φυσήματος.

4.4. Ηλεκτρόδια συγκόλλησης

Για τη συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται συνήθως στα ναυπηγεία για ναυπηγικούς χάλυβες. Αυτό είναι το ER70S-6 κατά το πρότυπο AWS A5.18-05 ή G3Si1 κατά το EN 440:1995. Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία ήταν το EMK 6, κατασκευασμένο από την εταιρία BÖHLER, με διάμετρο 1,2 mm. Το ηλεκτρόδιο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συγκολλήσεις κατασκευών για χάλυβες με όρια διαρροής μέχρι 420 MPa. Σύμφωνα με την προδιαγραφή του κατασκευαστή τα αέρια προστασίας για συγκόλληση με το ηλεκτρόδιο αυτό πρέπει να είναι Ar+15-25% CO_2 ή 100% CO_2.

Πίνακας 4-3. Προδιαγραφές ηλεκτροδίων

		EMK 6 (GMAW)	**FLUXOFIL 14HD (FCAW)**
Χημική σύσταση	C (%)	0,08	0,05
	Mn (%)	1,45	1,20
	Si (%)	0,90	0,55
Μηχανικές Ιδιότητες	Όριο διαρροής σ_y (MPa)	440	460
	Όριο αντοχής σ_T (MPa)	530	550
	Επιμήκυνση A5 (%)	30	22
	Αντοχή σε κρούση (Δοκιμή Charpy) (J)	80 (στους -40°C)	80 (στους -20°C)

Για τη συγκόλληση με τη μέθοδο FCAW χρησιμοποιήθηκε σωληνωτό ηλεκτρόδιο FLUXOFIL 14HD κατασκευής OERLIKON για κοινούς μαγγανιούχους και για χαμηλής κραμάτωσης χάλυβες. Κατά το πρότυπο AWS A5.20 πρόκειται για το E71T-1 H4 και η διάμετρός του ήταν 1,2 mm. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή αυτό βρίσκει εφαρμογές σε συγκολλήσεις ναυπηγικών χαλύβων A, B, D, E, AH32 – EH36 για όλες τις θέσεις συγκόλλησης.

Στον Πίνακα 4-3 περιγράφονται αναλυτικά οι χημικές συστάσεις των ανωτέρω ηλεκτροδίων και οι μηχανικές ιδιότητες για το μέταλλο συγκόλλησης που δημιουργούν.

4.5. Πειραματική διάταξη- Διαδικασία Συγκόλλησης

Η πειραματική διάταξη (εξοπλισμός) η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση των ελασμάτων, αποτελείται από τις παρακάτω συσκευές:

1. Κονσόλα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα.
2. Ρομποτικός βραχίονας, του οίκου «IGM Robotersysteme» με 6 βαθμούς ελευθερίας, για τη μετακίνηση της τσιμπίδας στο χώρο κατά τους άξονες x, y, z.
3. Μηχανή συγκόλλησης GMAW του οίκου «Fronious».
4. Τροφοδότης σύρματος και σύστημα διεύθυνσής του με ράουλα, συνδεδεμένο με το βραχίονα και την τσιμπίδα.
5. Τσιμπίδα για τη δημιουργία του τόξου της συγκόλλησης.

Η τσιμπίδα για τις συγκολλήσεις GMAW/FCAW είναι συνδεδεμένη με το ρομποτικό βραχίονα και χρησιμοποιείται για τη διαδικασία έναυσης του τόξου, τη διακοπή του, καθώς και για τον έλεγχο της παροχής του προστατευτικού αερίου. Η κίνηση της τσιμπίδας στο χώρο πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ρομποτικού βραχίονα. Έτσι, μπορεί εύκολα και με μεγάλη ακρίβεια να επιλεγεί η επιθυμητή ταχύτητα προώθησης του τόξου πλάσματος (ταχύτητα κίνησης τσιμπίδας), καθώς και η αναγκαία απόσταση της τσιμπίδας (ακροφυσίου) από την επιφάνεια κατεργασίας. Τόσο η ταχύτητα προώθησης του τόξου, όσο και η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια κατεργασίας επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία της συγκόλλησης (ανήκουν στις παραμέτρους της).

Η γεννήτρια του ρεύματος (ίδια και για τις δύο μεθόδους), παράγει το ρεύμα για το τόξο. Η ρύθμιση της έντασης, που αποτελεί παράμετρο λειτουργίας, γίνεται από την κονσόλα ελέγχου

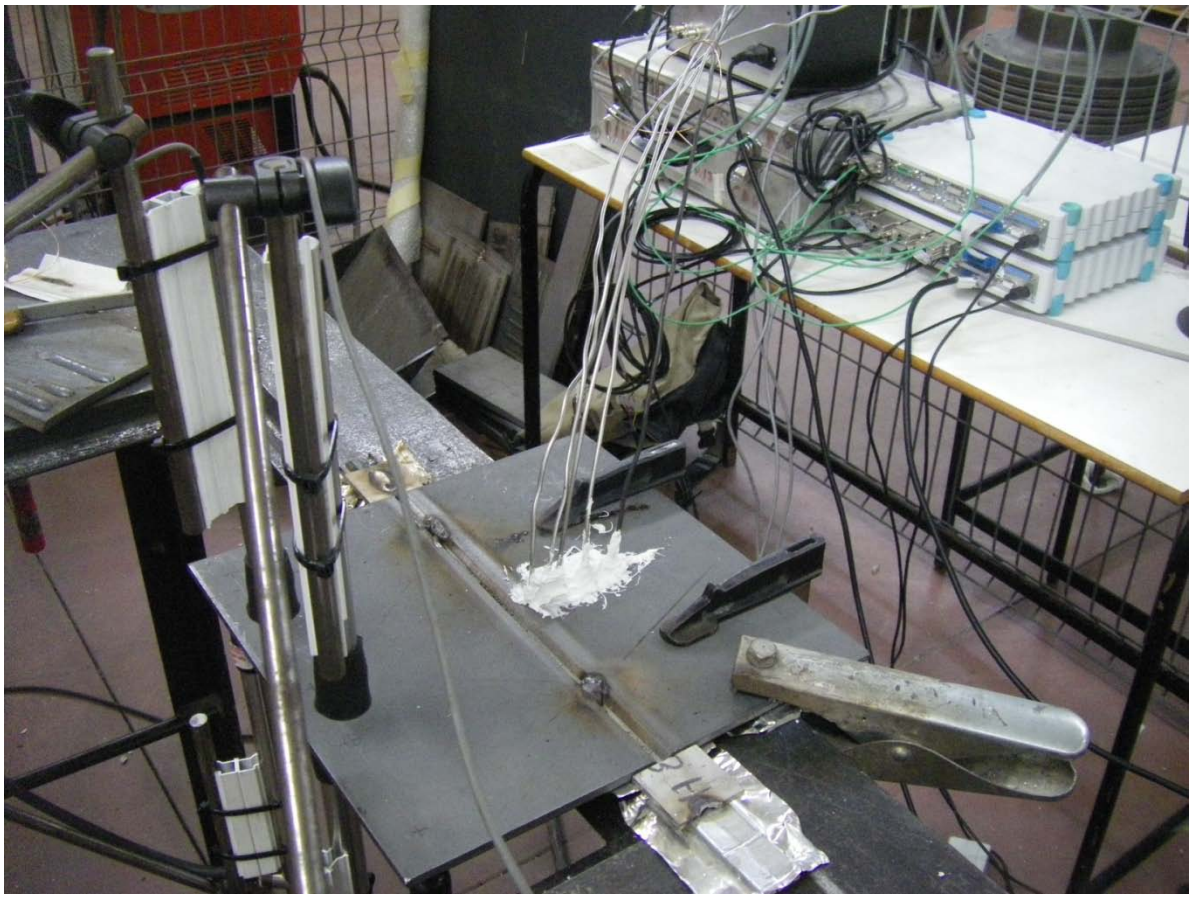
του ρομπότ. Για προστατευτικό αέριο χρησιμοποιήθηκε μείγμα Ar και CO_2 με ποσοστά 82% - 18%, αντίστοιχα.

Οι μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι η Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW) και η Συγκόλληση με Σωληνωτά Ηλεκτρόδια (Flux Cored Arc Welding, FCAW). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της κάθε συγκόλλησης περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

1. Τοποθέτηση των ενωμένων ελασμάτων (η ένωση έγινε κατά την προετοιμασία) στο μεταλλικό τραπέζι της συγκόλλησης. Το ένα από τα δύο ελάσματα, ανάλογα με το πού θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις, πακτώνεται στο τραπέζι με σφικτήρες. Η πάκτωση γίνεται πάντα στο έλασμα, το οποίο φέρει τις οπές για τα θερμοστοιχεία. Κάτω από τα ελάσματα τοποθετείται κεραμική επικαλύπτρα για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας της ρίζας της συγκόλλησης.

2. Τοποθέτηση των θερμοστοιχείων στον πακτωμένο χάλυβα, μέσα στις προκαθορισμένες οπές. Η συγκράτηση των θερμοστοιχείων στην επιφάνεια του ελάσματος έγινε με ειδική κεραμική πάστα δύο συστατικών, η οποία στερεοποιείται σε κάποιο χρονικό διάστημα από την εφαρμογή της.

3. Για τη μέτρηση των μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε σύστημα μέτρησης με αισθητήρια LVDT. Τα συνολικά πέντε (5) LVDTs, τοποθετήθηκαν παράλληλα στη συγκόλληση 30 mm από το ελεύθερο άκρο του ελάσματος και σε αποστάσεις 25 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 275 mm από το κάθετο στη ραφή άκρο του ελάσματος όπως δείχνει το Σχήμα 4.1. Για τη στήριξή τους χρησιμοποιήθηκε ειδική κατασκευή με μαγνητική βάση, η οποία εξασφαλίζει τη σταθερότητά τους,. Με χρήση αλφαδιού εξασφαλίστηκε η καθετότητα των LVDTs ως προς τα ελάσματα.

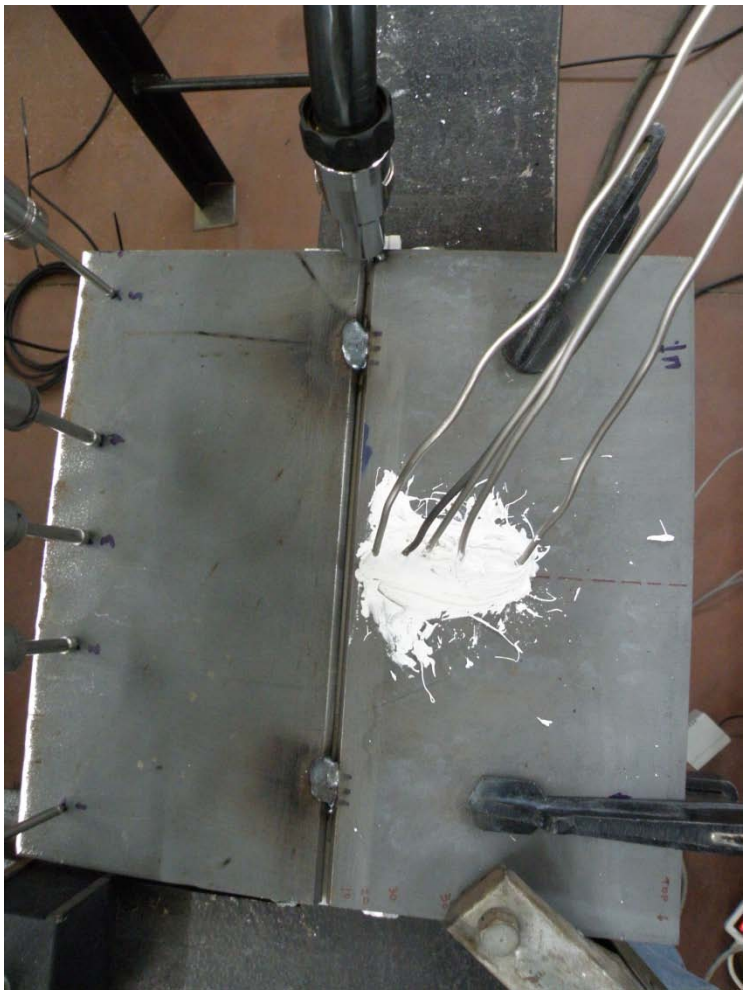


Εικόνα 4.2. Πειραματική διάταξη GMAW

4. Έλεγχος της θέσης και του σχήματος του ηλεκτροδίου. Τοποθέτηση του ακροφυσίου της τσιμπίδας στην επιθυμητή απόσταση, μέσω της κονσόλας ελέγχου του ρομπότ και τελικός έλεγχος αν και οι υπόλοιπες παράμετροι λειτουργίας του τόξου είναι αυτές που θέλουμε (ένταση ρεύματος, παροχή αερίου, ταχύτητα προώθησης). Με τη βοήθεια του αυτοματοποιημένου συστήματος (ρομποτικός βραχίονας) η κίνηση της τσιμπίδας περιορίζεται μέσα στα όρια της προς συγκόλληση επιφάνειας, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της κατεργασίας το τόξο να μην εξέλθει εκτός αυτών των ορίων.

5. Τέλος, η περιοχή της συγκόλλησης σαρώνεται από το τόξο. Πραγματοποιείται ταχεία τήξη τόσο του ηλεκτροδίου, όσο και μέρους των μετάλλων βάσης με αποτέλεσμα την ανάμειξή τους

και τη δημιουργία του μετάλλου συγκόλλησης. Μετά το τέλος της σάρωσης η τσιμπίδα απομακρύνεται και η συγκόλληση αφήνεται στο περιβάλλον να ψυχθεί.



Εικόνα 4.3 Πειραματική διάταξη FCAW

Σαν γενικές παρατηρήσεις από την εκτέλεση των συγκολλήσεων μπορούν να σημειωθούν:

1) Οι περισσότερες εκτινάξεις (spatter) της συγκόλλησης FCAW,
2) Η μεγαλύτερη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η FCAW,
3) Η δημιουργία περισσότερων αναθυμιάσεων με τη μέθοδο FCAW και
4) Η δημιουργία λεπτού στρώματος σκουριάς με τη μέθοδο FCAW, η οποία έπρεπε να απομακρυνθεί μετά τη συγκόλληση.

5. ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

5.1. Γενικά

Τα ελάσματα, μετά τη συγκόλλησή τους, οδηγήθηκαν για μελέτη της μικροδομής τους, μεταλλογραφική παρατήρηση και μικροσκληρομετρήσεις κατά Vickers ($HV_{0.3N}$). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρατήρησης των μικροδομών σε οπτικό μικροσκόπιο, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

5.2. Προετοιμασία δοκιμίων

Για την ανάλυση των φάσεων τα ελάσματα υποβλήθηκαν σε μια σειρά μηχανουργικών και χημικών κατεργασιών. Αρχικά, μετά τη συγκόλληση κόπηκαν σε μηχανουργείο με χρήση ψαλιδιού και δισκοτόμου σε διαστάσεις τέτοιες ώστε να είναι δυνατό και πρακτικό να παρατηρηθούν στο μικροσκόπιο και να τοποθετηθούν στο μικροσκληρόμετρο. Απομονώθηκε από την κάθε συγκόλληση μία περιοχή εκατέρωθεν της ραφής με πλάτος ικανό ώστε να συμπεριλαμβάνει όλες τις περιοχές της συγκόλλησης, δηλαδή μέταλλο βάσης (ΜΒ), θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) και ζώνη τήξης ή μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ). Συνολικά κόπηκαν 2 δοκίμια από την κάθε συγκόλληση, καθώς επίσης και άλλα δύο που περιλάμβαναν μόνο ΜΒ μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης.

Στη συνέχεια, τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη (δύο συστατικών) για να γίνει ευκολότερα η λείανση και η στίλβωσή τους στη λειαντική συσκευή του εργαστηρίου. Η λείανση έγινε με χρήση λειαντικών σιλικονούχων χαρτιών με τραχύτητα από 120 grit μέχρι 4000 grit και η στίλβωση με χρήση αλούμινας 1 μm αρχικά και 0,1 μm στη συνέχεια.

Ακολούθως, έγινε χημική προσβολή αυτών ούτως ώστε να προκληθεί τοπική διάβρωση στα όρια των κόκκων και στους κόκκους περλίτη (ήταν αναμενόμενο ο DH36 με την περιεκτικότητα σε C που έχει να αποτελείται από φερρίτη και περλίτη). Η χημική προσβολή των δοκιμίων έγινε με Nital, διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) σε αιθανόλη (C_2H_5OH) σε αναλογία 1:50.

Εικόνα 5.1 Δοκίμια συγκολλήσεων - Χημική προσβολή σε Nital

5.3. Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο

Τα δοκίμια, μετά τη χημική προσβολή οδηγήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο για παρατήρηση και λήψη φωτογραφιών. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.2 και 5.3 η μικροδομή του DH36 αποτελείται από κόκκους φερρίτη και περλίτη σε αναλογία περίπου 75%-25%, αντίστοιχα. Με λευκό χρώμα απεικονίζεται ο φερρίτης και με μαύρο ο περλίτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο περλίτης δεν είναι φάση, αλλά μεταλλογραφικό συστατικό που αποτελείται από δύο φάσεις. Επομένως, η έννοια «κόκκος» έχει την έννοια μιας αποκίας κρυστάλλων φερρίτη και σεμεντίτη που έχουν κοινά περατωτικά όρια με τις γειτονικές αποικίες. Παρατηρούνται, ακόμη, κάποιες γραμμές από κόκκους που οφείλονται στην κατεργασία της έλασης κατά την παραγωγή του χάλυβα.

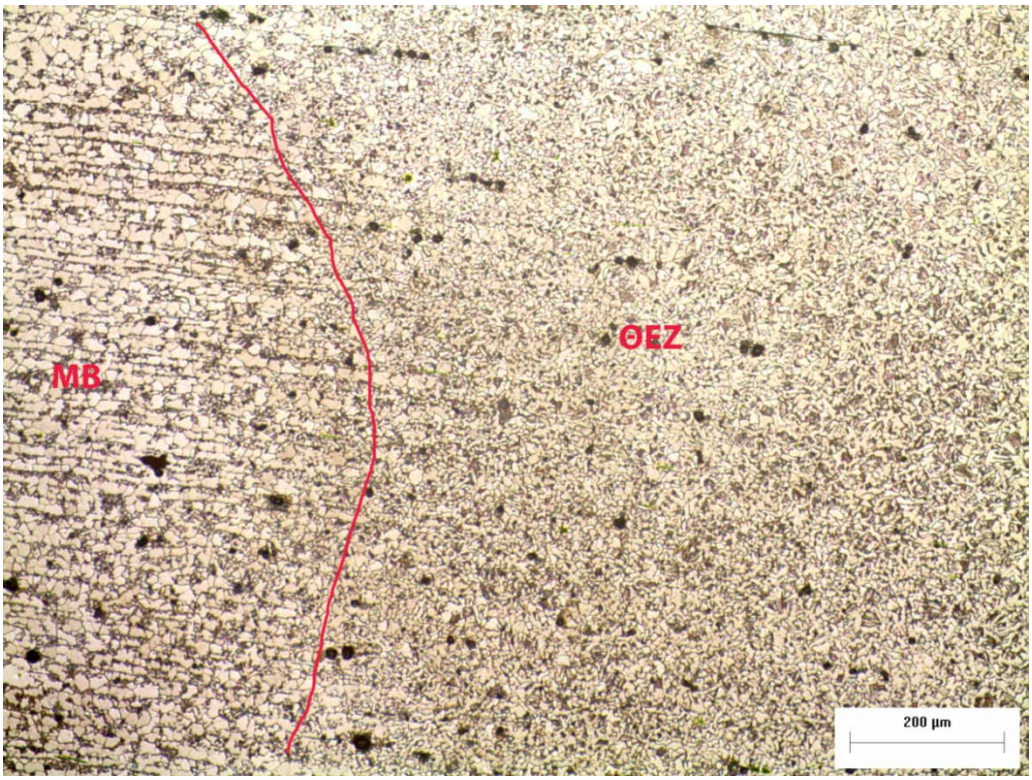
Εικόνα 5.2 Δομή μετάλλου βάσης

Όπως φαίνεται και στις εικόνες, είναι εμφανής η αλλαγή στη μικροδομή μεταξύ ΜΣ και ΘΕΖ. Παρατηρείται αλλαγή της διεύθυνσης των κόκκων, με τους κόκκους στη ΘΕΖ να έχουν χάσει την αρχική παράλληλη διάταξη που είχαν λόγω της έλασης και, ακόμη, σημειώνεται ότι η ΘΕΖ δεν αποτελεί ομοιόμορφη ζώνη ως προς τη μικροδομή της, αλλά αποτελείται από διαφορετικές οπτικά περιοχές έως ότου σταδιακά γίνεται η μετάβαση στο ΜΣ (Εικόνα 5.4. και Εικόνα 5.8).

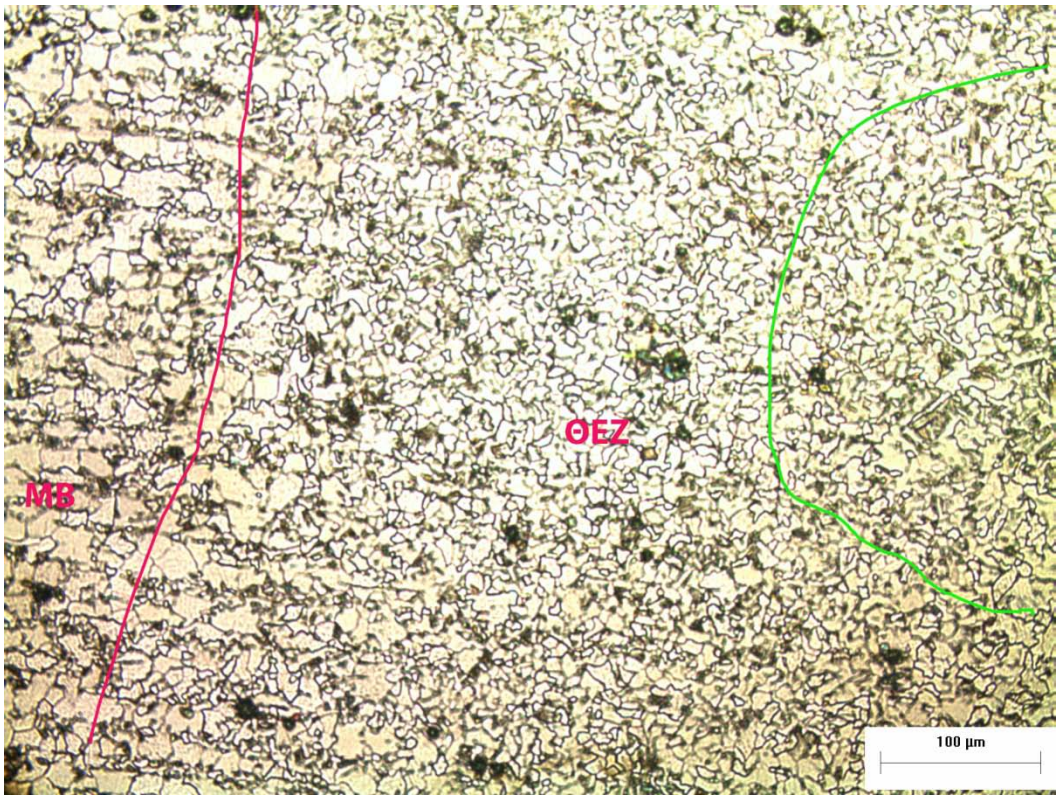
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.3, όσο μετακινούμαστε από τη ζώνη τήξης (μέταλλο συγκόλλησης) προς τα έξω παρατηρούμε, διαδοχικά, πρώτα χονδρόκοκκες δομές (φερρίτη-περλίτη), κατόπιν κόκκους μέσου μεγέθους που γίνονται διαρκώς όλο και λεπτότεροι και στο τέλος το μέταλλο βάσης χωρίς μεταβολή. Αυτό υποδεικνύει ότι υπήρξε αξιοσημείωτος θερμικός επηρεασμός λόγω της συγκόλλησης. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις διακρίνονται από κοινού τόσο στη συγκόλληση FCAW, όσο και στη GMAW.

Επίσης, παρατηρήθηκε σε μερικά σημεία στη ΘΕΖ και στο ΜΣ, κυρίως στη δεύτερη στρώση λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας απόψυξης, σχηματισμός φερρίτη Widmanstätten (εικόνες 5.9 και 5.10), δηλαδή φερρίτη με βελονοειδή μορφή λόγω πιθανώς της αύξησης των κόκκων ωστενίτη κατά την υπερθέρμανση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία του φερρίτη Widmanstätten οδηγεί συνήθως σε μείωση της δυσθραυστότητας, η οποία μπορεί να διαπιστωθεί όμως μόνο με δοκιμή Charpy.

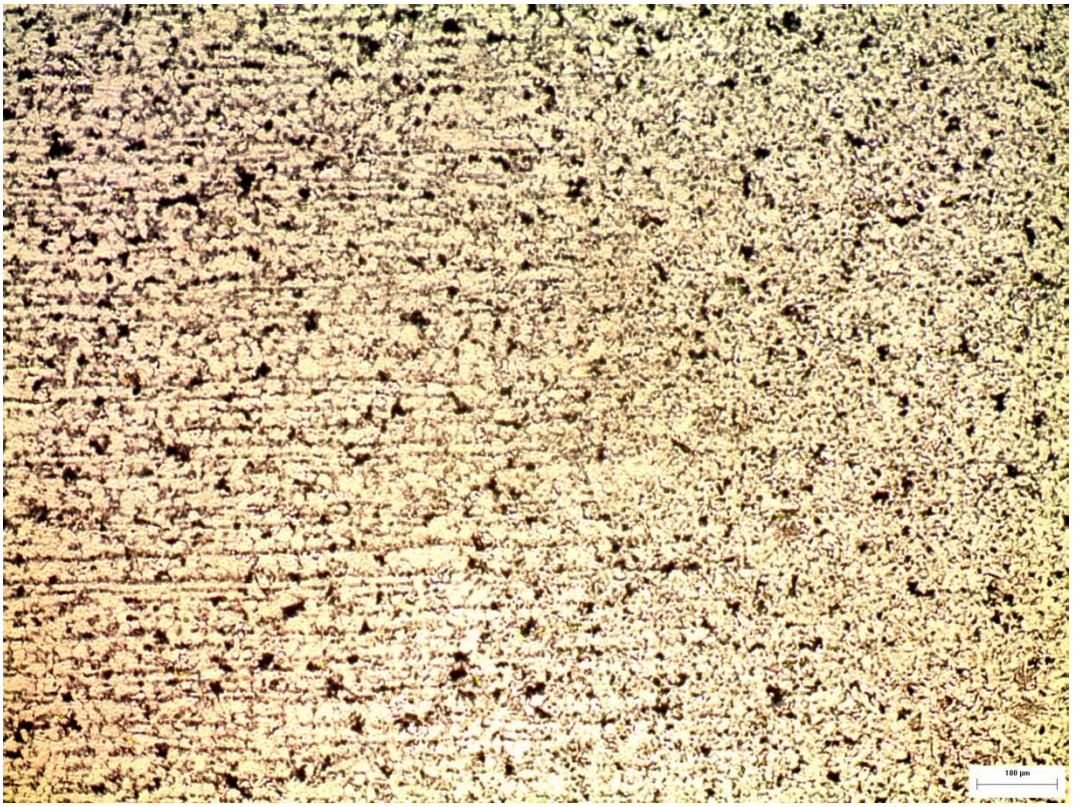
Τέλος, διακρίνουμε στο ΜΣ (ζώνη τήξης) και των δύο συγκολλήσεων περιοχές όπου, λόγω της ταχείας απόψυξης του τήγματος, έχουν σχηματιστεί κόκκοι υπό μορφή δενδριτών (Εικόνα 5.11 και Εικόνα 5.12). Οι δενδρίτες, με φορά αντίθετη προς τη ροή της θερμότητας, είναι τόσο λεπτότεροι, όσο η ταχύτητα απόψυξης είναι μεγαλύτερη. Η αργή απόψυξη ευνοεί τους μεγάλους και χονδρούς δενδρίτες και οδηγεί σε φτωχότερες μηχανικές ιδιότητες της ζώνης τήξης. Η απόψυξη είναι πιο αργή για μεγάλες θερμικές παροχές και μικρό πάχος ελασμάτων. Λόγω της παρουσίας του αερίου προστασίας και της ψυκτικής δράσης του, οι συγκολλήσεις GMAW και FCAW εξασφαλίζουν λεπτότερες δομές σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης χωρίς παρουσία αερίου προστασίας.



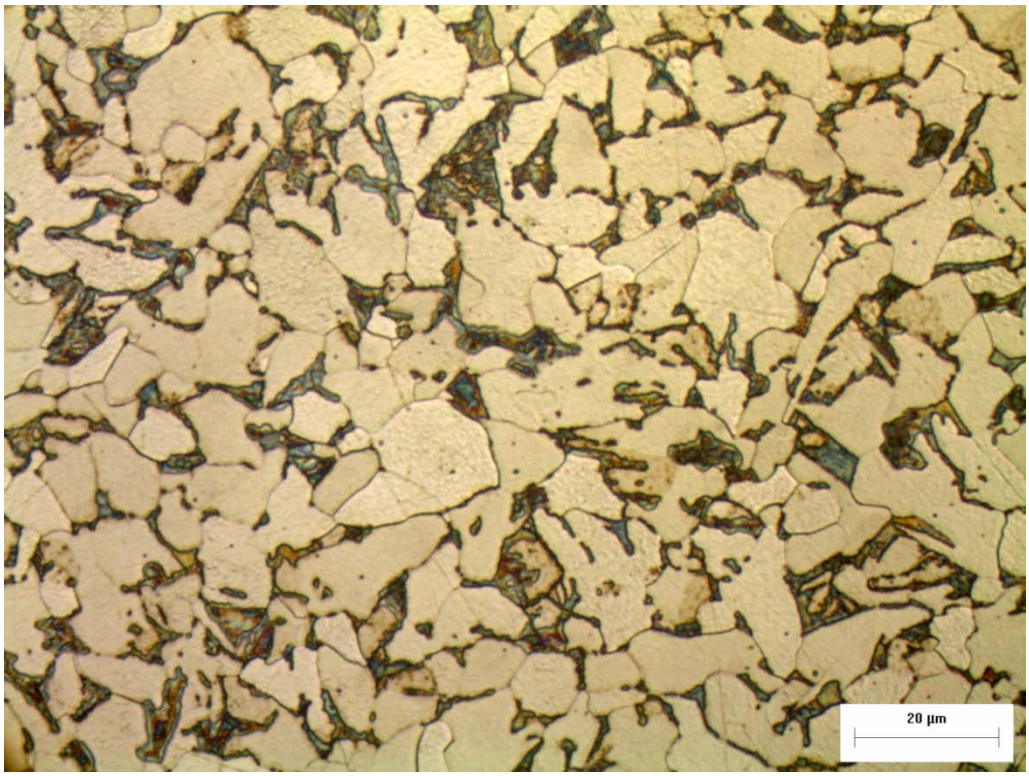
Εικόνα 5.3 Μεταλλογραφία στο όριο μετάλλου βάσης - θερμικά επηρεασμένης ζώνης (συγκόλληση FCAW)



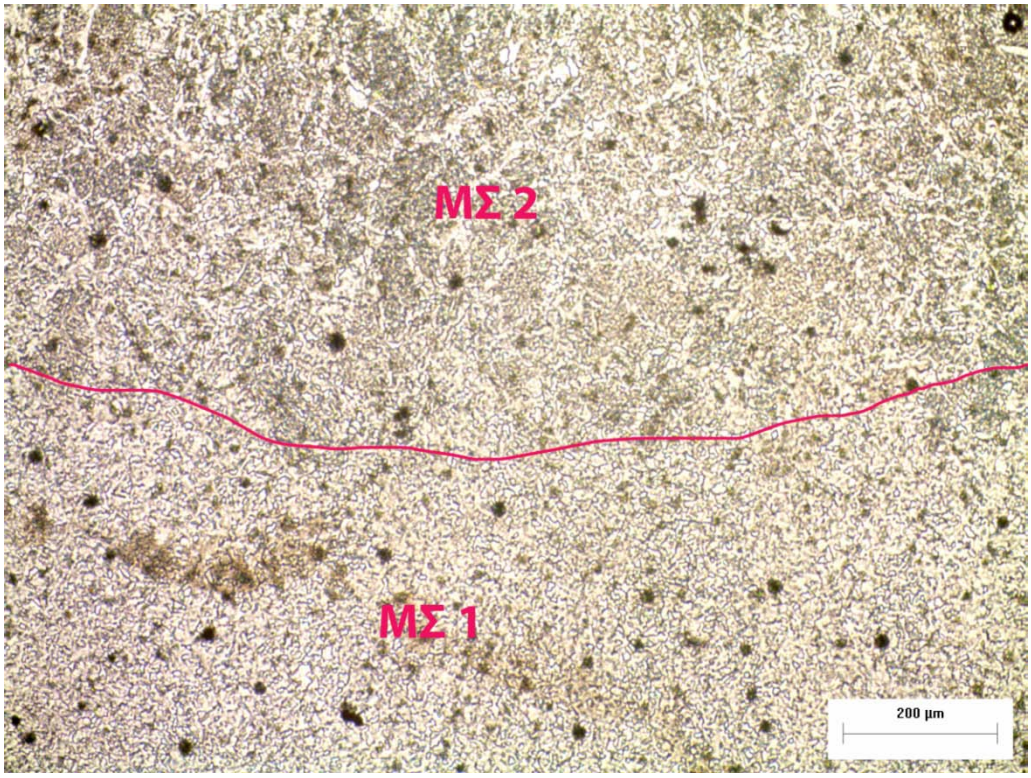
Εικόνα 5.4 Όρια ΜΒ – ΘΕΖ (FCAW)



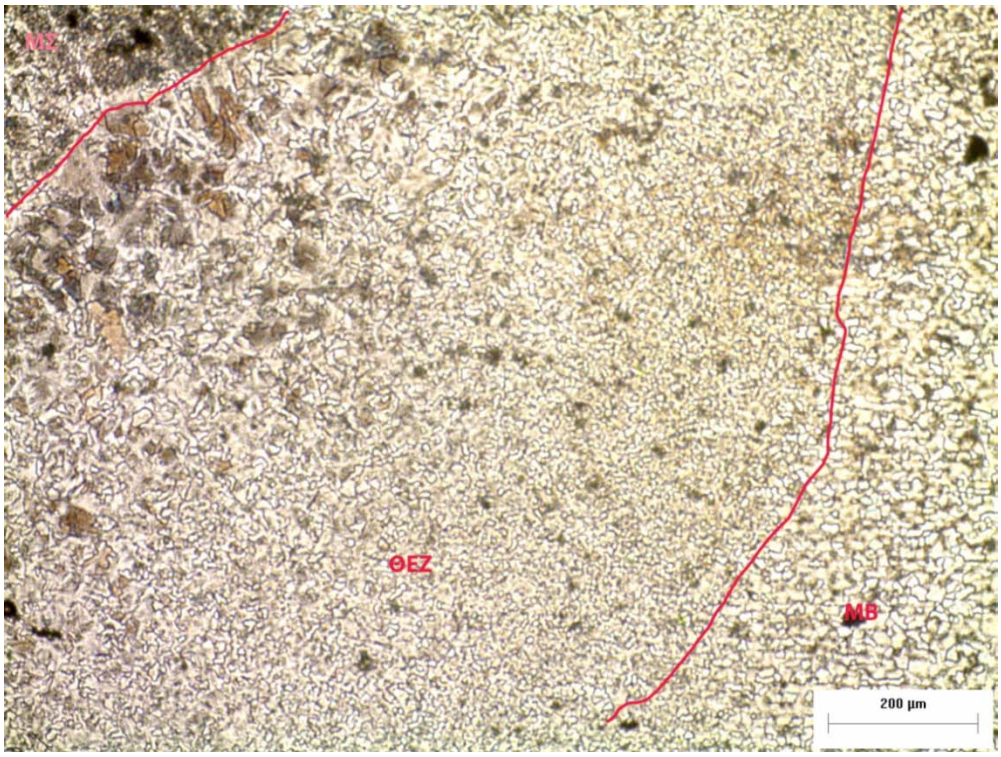
Εικόνα 5.5 ΜΒ και ΘΕΖ (GMAW)



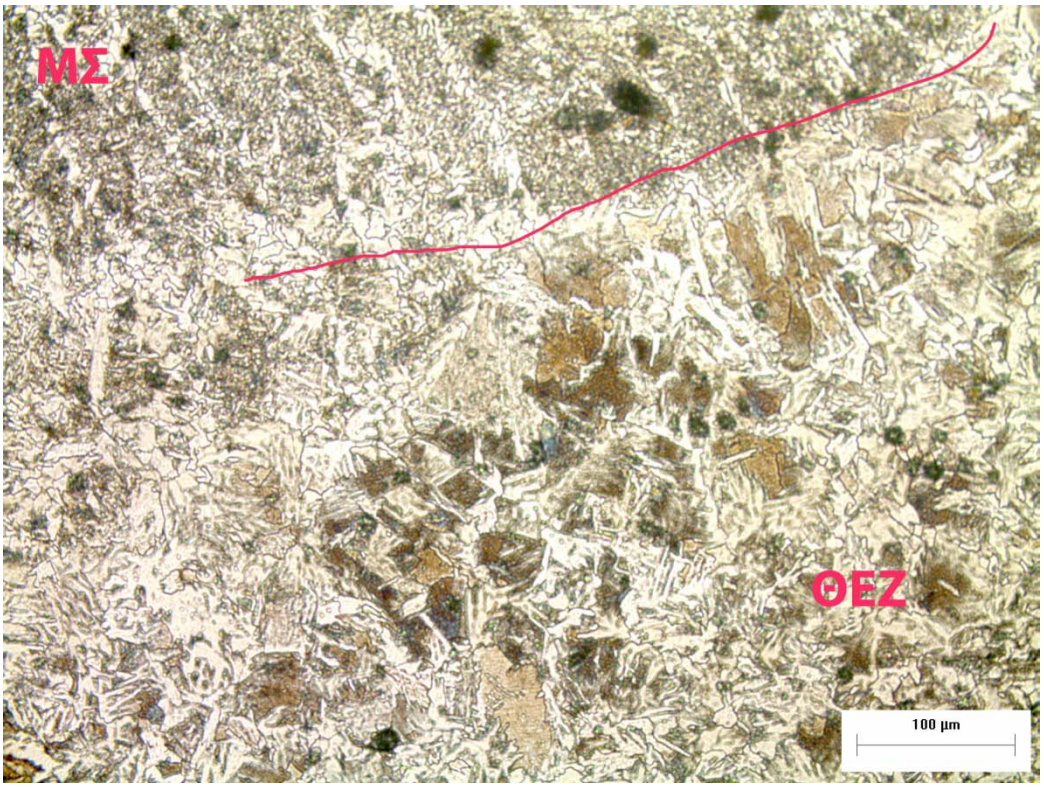
Εικόνα 5.6 ΘΕΖ στη FCAW



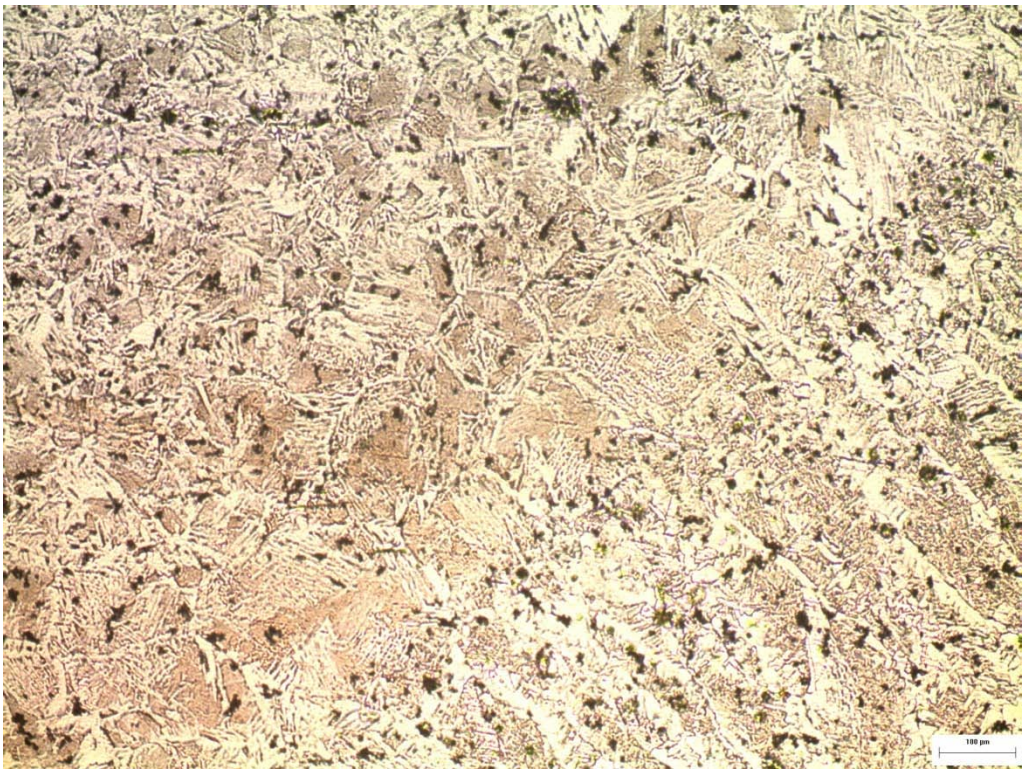
Εικόνα 5.7 Όρια των δύο στρώσεων (FCAW)



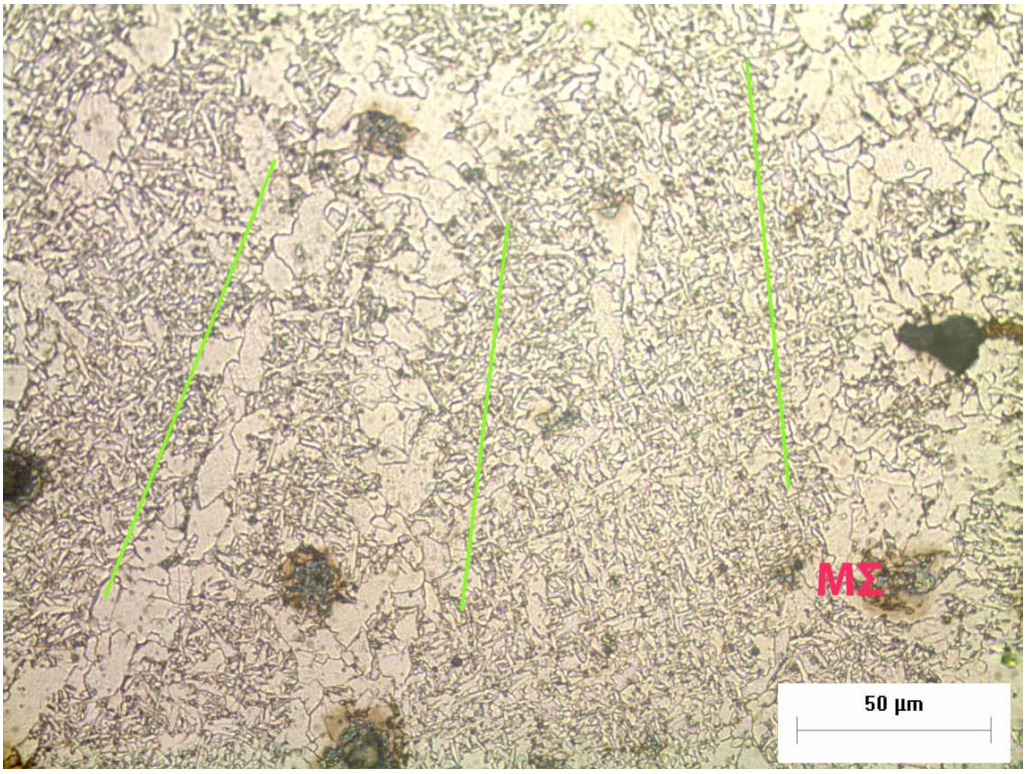
Εικόνα 5.8 Απεικόνιση και των τριών περιοχών, ΜΣ - ΘΕΖ - ΜΒ (FCAW)



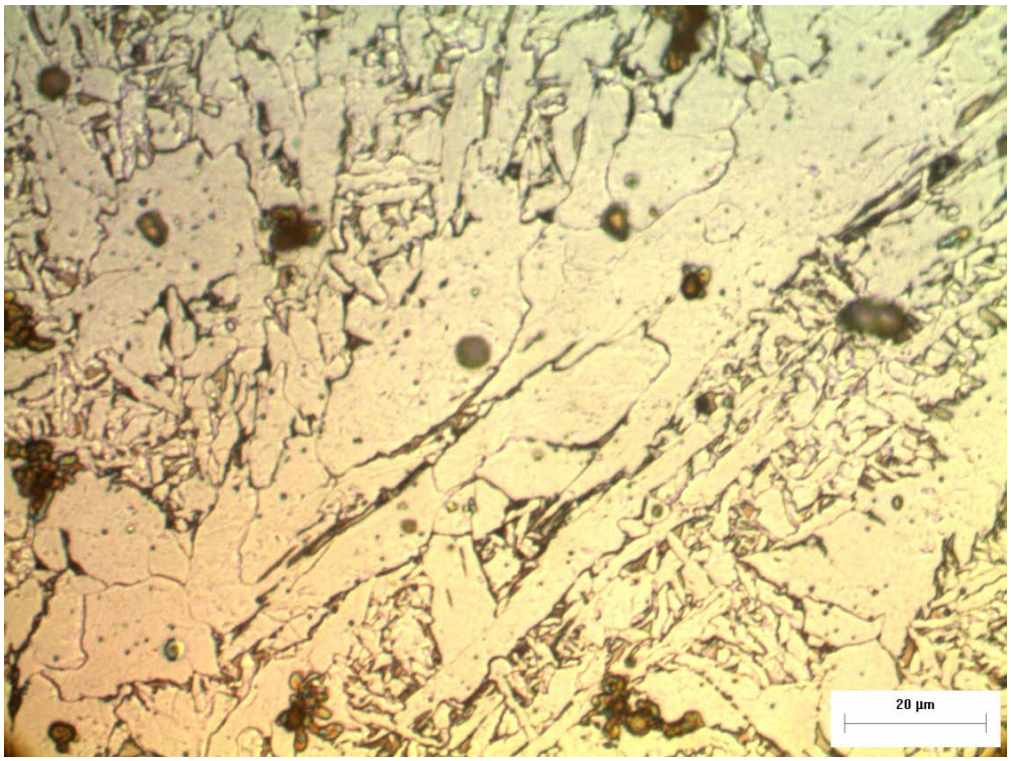
Εικόνα 5.9 Όρια μετάλλου συγκόλλησης – θερμικά επηρεασμένης ζώνης (FCAW) - Σχηματισμός φερρίτη Widmanstätten



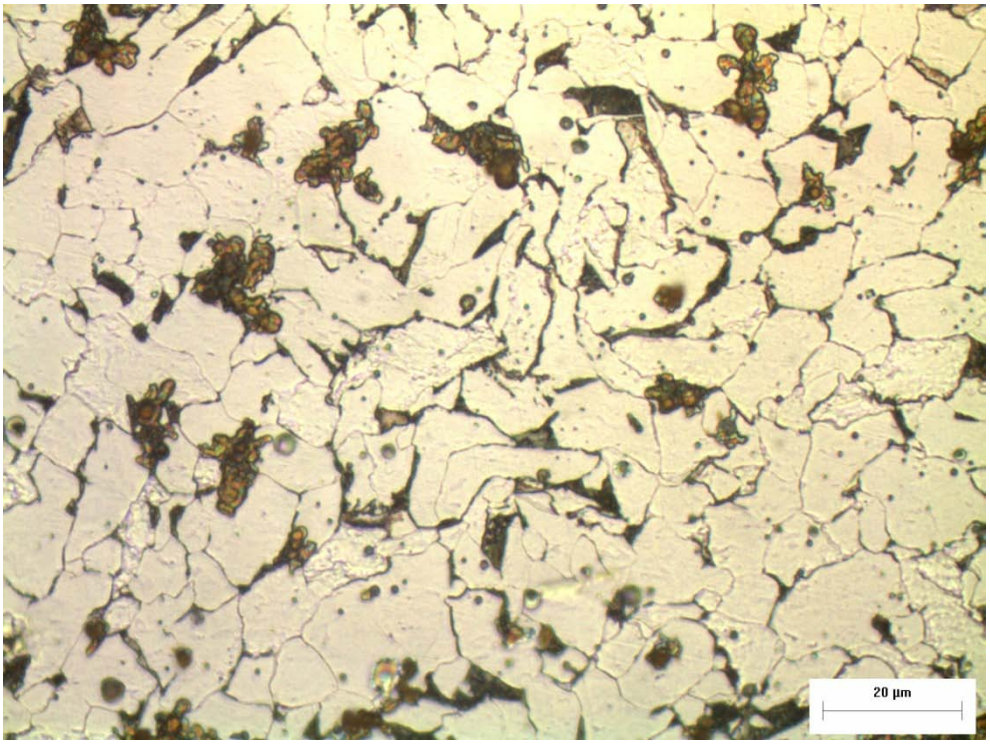
Εικόνα 5.10 Όριο των δύο στρώσεων στη GMAW - Σχηματισμός φερρίτη Widmanstätten



Εικόνα 5.11 Κόκκοι δενδριτικής μορφής - Ζώνες στερεοποίησης στο ΜΣ (FCAW)



Εικόνα 5.12 Κόκκοι δενδριτικής μορφής στη ζώνη τήξης (GMAW)



Εικόνα 5.13 Μέταλλο συγκόλλησης (GMAW)

5.4. Έλεγχος μικροσκληρότητας

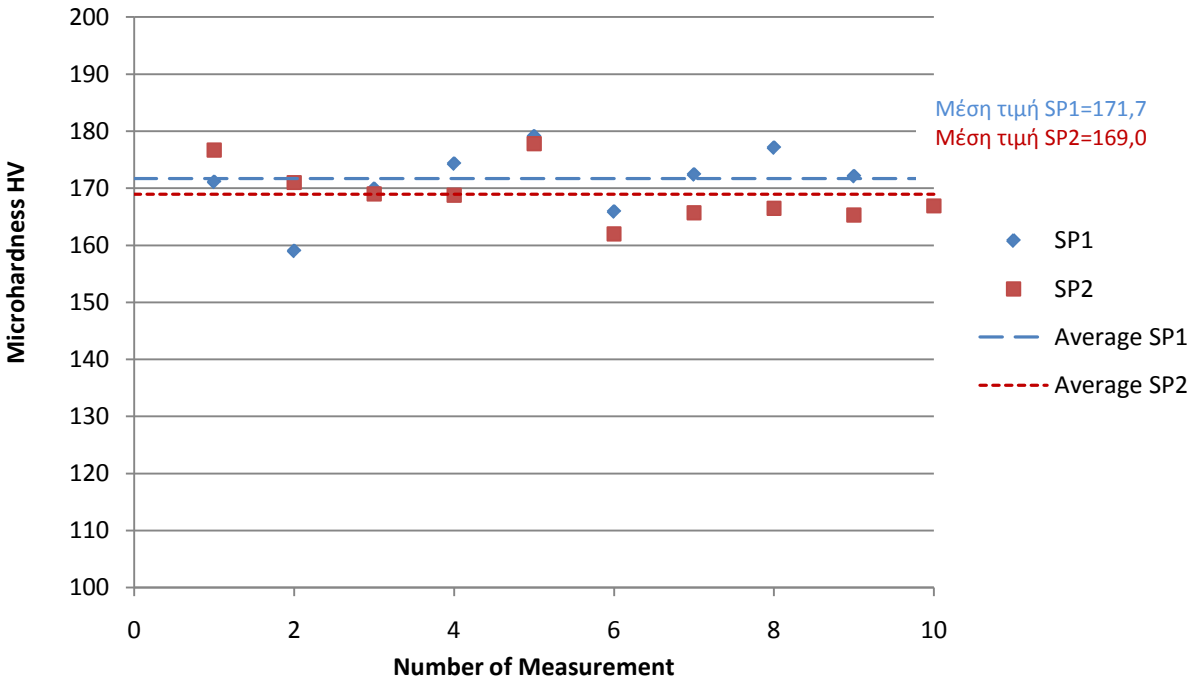
Για τον έλεγχο της μικροσκληρότητας $HV_{0.3N}$ της συγκόλλησης έγιναν μετρήσεις στα δύο δοκίμια που περιείχαν μόνο μέταλλο βάσης. Οι τιμές που μετρήθηκαν παρατίθενται στο Σχήμα 5.1. Η μέση τιμή σκληρότητας που προέκυψε για το μέταλλο βάσης DH36 ήταν 170,4 HV. Η τιμή αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η σκληρότητα του φερρίτη είναι γύρω στα 80-100 HV και του περλίτη γύρω στα 200 HV.

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας στις δύο συγκολλήσεις έδειξαν αύξηση των τιμών στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης κατά ποσοστό μέχρι και 30% ως προς τη σκληρότητα των δύο βασικών μετάλλων. Η αύξηση αυτή πραγματοποιείται σταδιακά στη ΘΕΖ των μετάλλων βάσης και κυμαίνεται ενός συγκεκριμένου εύρους στη ζώνη τήξης.

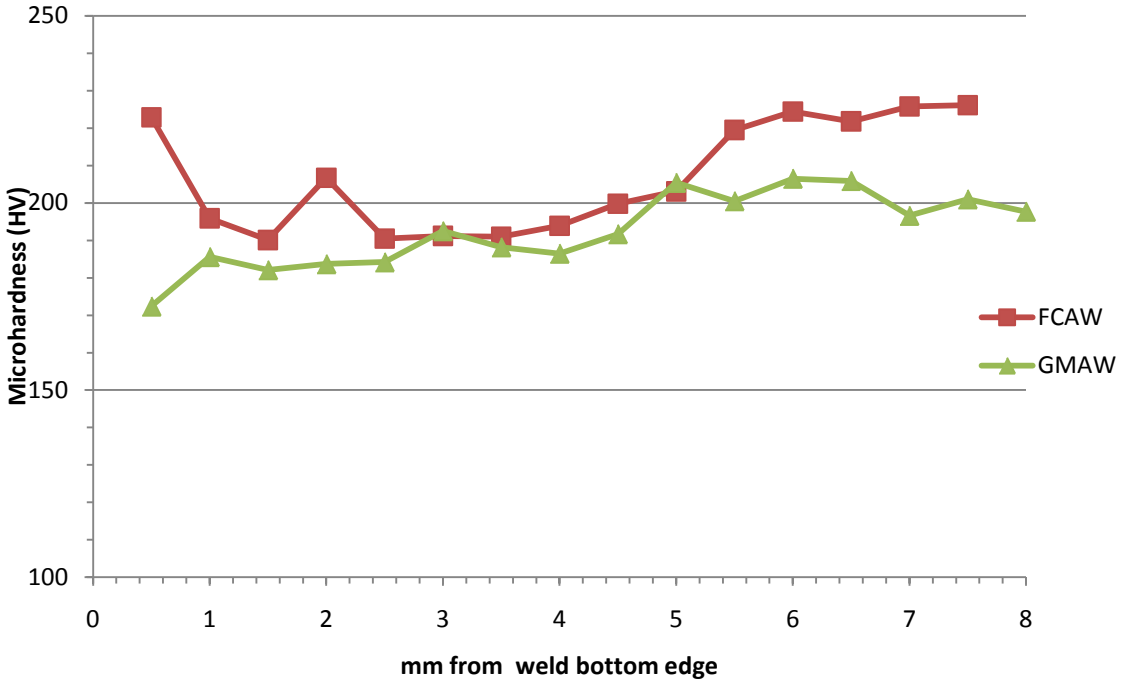
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο δοκίμια, ένα από κάθε συγκόλληση και σε κάθε ένα από αυτά έγιναν μετρήσεις σε 3 διευθύνσεις. Η πρώτη κατακόρυφα, κάθετα στις επιφάνειες των ελασμάτων, η δεύτερη κάθετα στη ραφή στην πρώτη στρώση (πάσο) και η τρίτη στην άνω στρώση. Οι τιμές που μετρήθηκαν παρουσιάζονται στα σχήματα 5.2 έως 5.5.

Η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο μετρήσεων ήταν 500 μm. Γενικά παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές για τη συγκόλληση FCAW σε σύγκριση με τη GMAW και, επίσης, ότι η άνω στρώση παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα από την κάτω. Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η κάτω στρώση που πραγματοποιήθηκε πρώτη χρονικά αναθερμάνθηκε λόγω της πραγματοποίησης της δεύτερης στρώσης συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να αποψυχθεί με ρυθμό λιγότερο δυσμενή για τη σκληρότητα. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η πρώτη στρώση κατά κάποιο τρόπο ανοπτήθηκε.

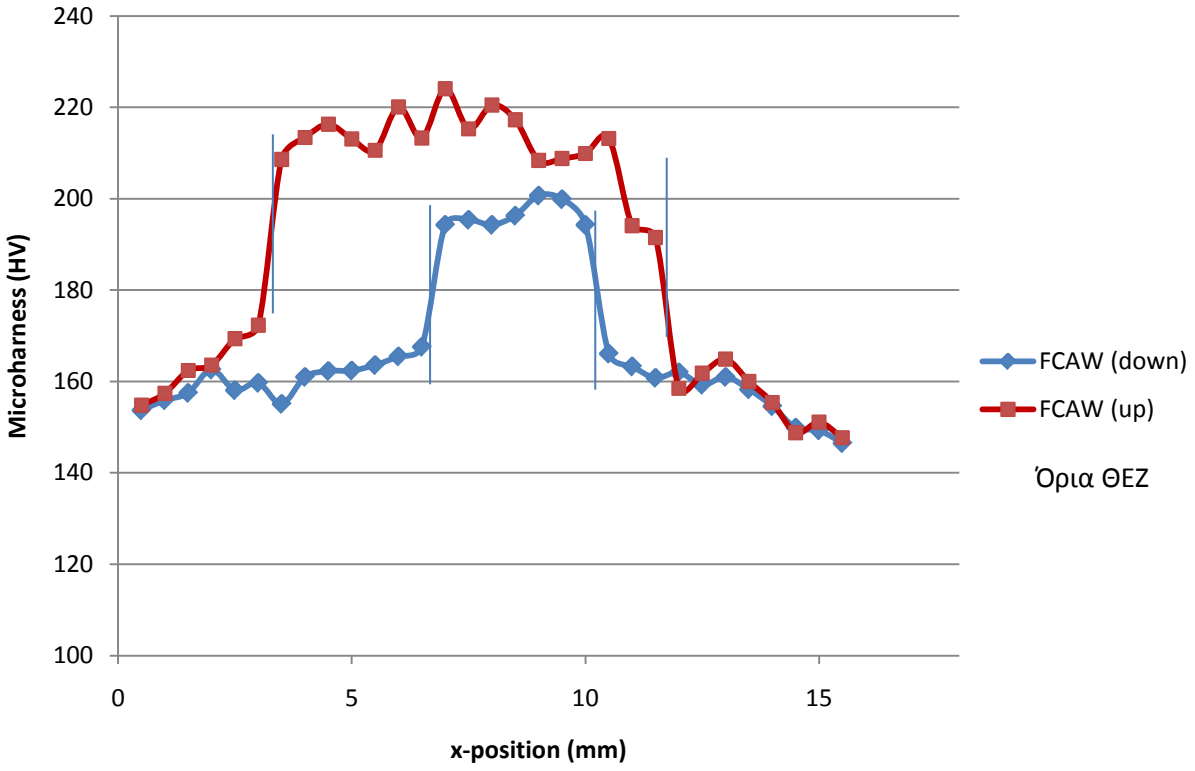
Άλλη μια παρατήρηση είναι ότι η ΘΕΖ στο ύψος της πρώτης στρώσης της συγκόλλησης FCAW εκτείνεται σε μικρότερη απόσταση εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα της συγκόλλησης και άρα παρουσιάζονται σε μικρότερη έκταση υψηλές τιμές σκληρότητας. Η μικρότερη σε έκταση ΘΕΖ γύρω από το πρώτο πάσο συγκόλλησης εξηγείται από τη γεωμετρία της συγκόλλησης, η οποία ήταν πολύ πιο στενή στο ύψος αυτό και εμφάνισε ανεπαρκές γέμισμα και υποκοπή στην κάτω πλευρά λόγω της μη ικανοποιητικής αρχικής απόστασης μεταξύ των ελασμάτων. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε στην επόμενη συγκόλληση (GMAW).



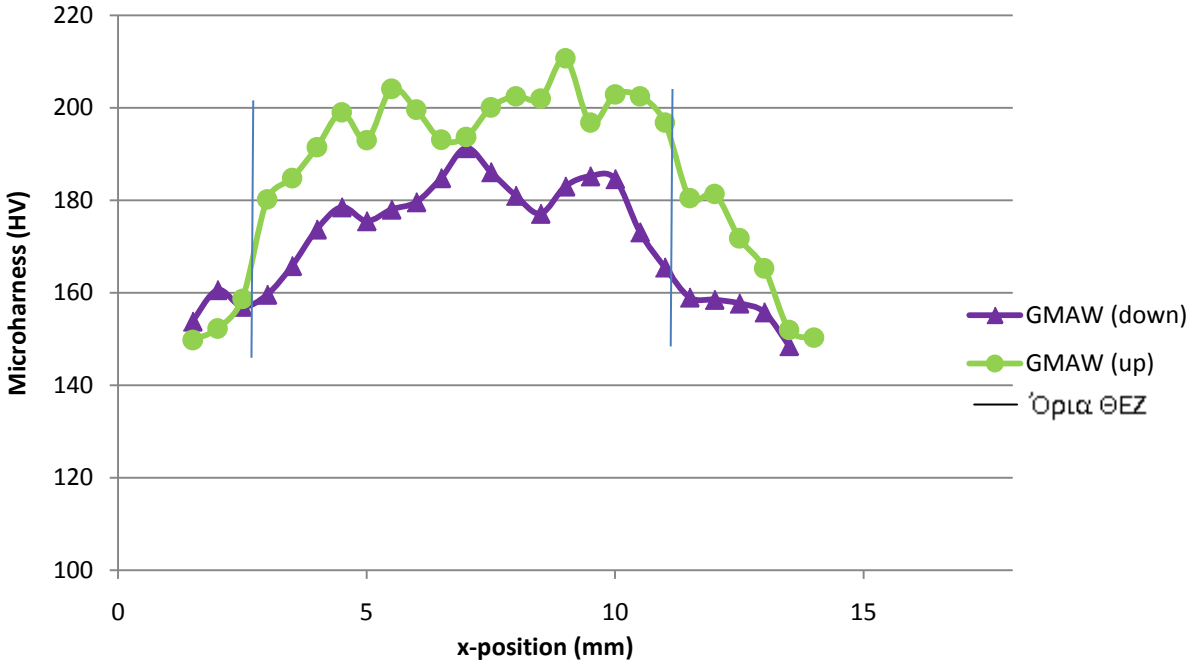
Σχήμα 5.1 Σκληρότητα DH36 (Μέταλλο Βάσης)



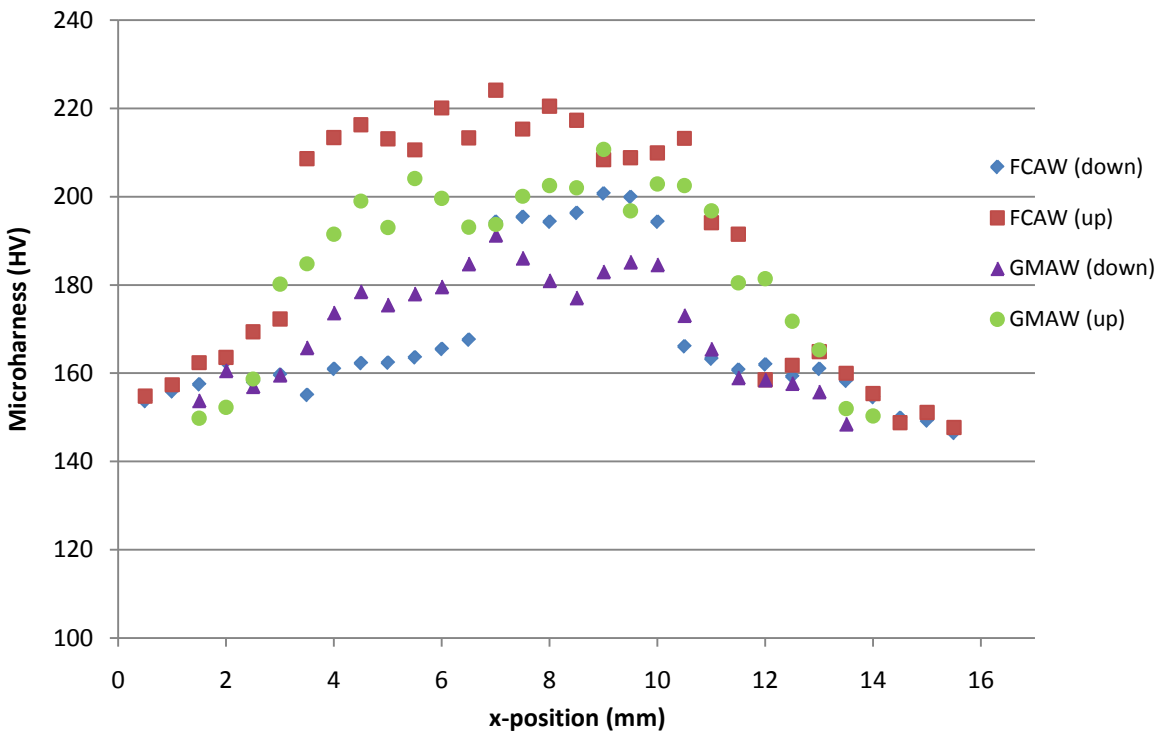
Σχήμα 5.2 Σκληρότητα Μετάλλου Συγκόλλησης (κατακόρυφα στον άξονα συμμετρίας)



Σχήμα 5.3 Σκληρότητα όλων των ζωνών κάθετα στη διεύθυνση της ραφής (συγκόλληση FCAW)



Σχήμα 5.4 Σκληρότητα όλων των ζωνών κάθετα στη διεύθυνση της ραφής (συγκόλληση GMAW)



Σχήμα 5.5 Σκληρότητα όλων των ζωνών κάθετα στη διεύθυνση της ραφής συγκριτικά και για τις δύο συγκολλήσεις

6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

6.1. Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης

Θερμικός κύκλος ενός συγκεκριμένου σημείου στη γειτονιά μιας συγκόλλησης λέγεται η μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέχρι ένα μέγιστο και πάλι μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το σημείο μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του ελάσματος. Ανάλογα με την απόσταση του σημείου από τη συγκόλληση, υπάρχει και ένας διαφορετικός θερμικός κύκλος. Κατά κανόνα σ' ένα θερμικό κύκλο διακρίνουμε: Την περίοδο της θέρμανσης, τη μέγιστη θερμοκρασία που αποκτά το σημείο σ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης, και την περίοδο απόψυξης. Επίσης, συγκρατούμε τη χρονική διάρκεια, που το σημείο έχει θερμοκρασία ανώτερη μιας (κατά περίπτωση) χαρακτηριστικής τιμής. Στους χάλυβες, για παράδειγμα, μια χαρακτηριστική θερμοκρασία είναι η AC_3 (830^oC για τον κοινό χάλυβα), δηλαδή η θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης κατά τη θέρμανση.

Οι θερμικοί κύκλοι των διαφόρων σημείων της συγκόλλησης έχουν μεγάλη σημασία, γιατί αποτελούν πραγματικές θερμικές κατεργασίες, από τις οποίες εξαρτάται η μικρογραφική δομή και οι μηχανικές ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού. Έτσι, για τους χάλυβες η ταχύτητα θέρμανσης, η μέγιστη αποκτώμενη θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε αυτή, είναι καθοριστικοί παράγοντες για τη δυνατότητα ωστενιτοποίησης, για τα φαινόμενα ομογενοποίησης με διάχυση και για την αύξηση του μεγέθους των κόκκων και τη μορφή της μικροδομής στο ΜΣ και τη ΘΕΖ. Στη συνέχεια, η ταχύτητα απόψυξης καθορίζει, με βάση το διάγραμμα CCT, τους διάφορους μετασχηματισμούς του ωστενίτη σε σταθερά και ασταθή, μαλακά ή σκληρά, εύθραυστα ή δύσθραυστα προϊόντα.

Οι θερμικοί κύκλοι εξαρτώνται από τις εξής, κυρίως, μεταβλητές:

- Από τη μέθοδο, τη διαδικασία συγκόλλησης και τις παραμέτρους της.
- Από τη θέση και απόσταση του σημείου από τον άξονα της συγκόλλησης.
- Από το πάχος και την έκταση των τεμαχίων προς συγκόλληση.
- Από την αρχική θερμοκρασία των τεμαχίων.
- Από το είδος του μετάλλου.

Από τις παραπάνω παραμέτρους ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση από τη φύση του προς συγκόλληση μετάλλου, το οποίο υπεισέρχεται στον θερμικό κύκλο με τη θερμική αγωγιμότητα, λ, την ειδική θερμότητα, c, και την πυκνότητα, ρ. Οι τρεις αυτές φυσικές ιδιότητες διαμορφώνουν τον συντελεστή θερμικής διάχυσης (ή διαχυσιμότητας) D:

$$D = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Για τους χάλυβες η θερμική διαχυσιμότητα, στο θερμοκρασιακό διάστημα από 900°C έως 400°C που ενδιαφέρει ιδιαίτερα, είναι κατά μέσο όρο 0,054 cm^{4}/s και δε μεταβάλλεται για τους κοινούς και τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες όπως ο DH36.

6.2. Θερμοστοιχεία τύπου Κ

Τα θερμοστοιχεία είναι μετρητικά όργανα που μετρούν τη θερμοκρασία, εκμεταλλευόμενα το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή, τότε στο σημείο επαφής παράγεται μικρή τάση, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την κοινή θερμοκρασία των θερμοστοιχείων στο σημείο αυτό. Η θερμοηλεκτρική τάση συναρτήσει της θερμοκρασίας δίδεται από τη σχέση:

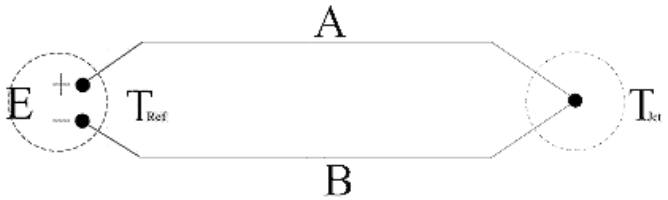
$$E(S) = S(T) \cdot T$$

όπου:

E: η θερμοηλεκτρική τάση,

T: η θερμοκρασία,

S: ο συντελεστής Seebeck (εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ζεύγος των μεταλλικών αγωγών).



Σχήμα 6.1 Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου

.

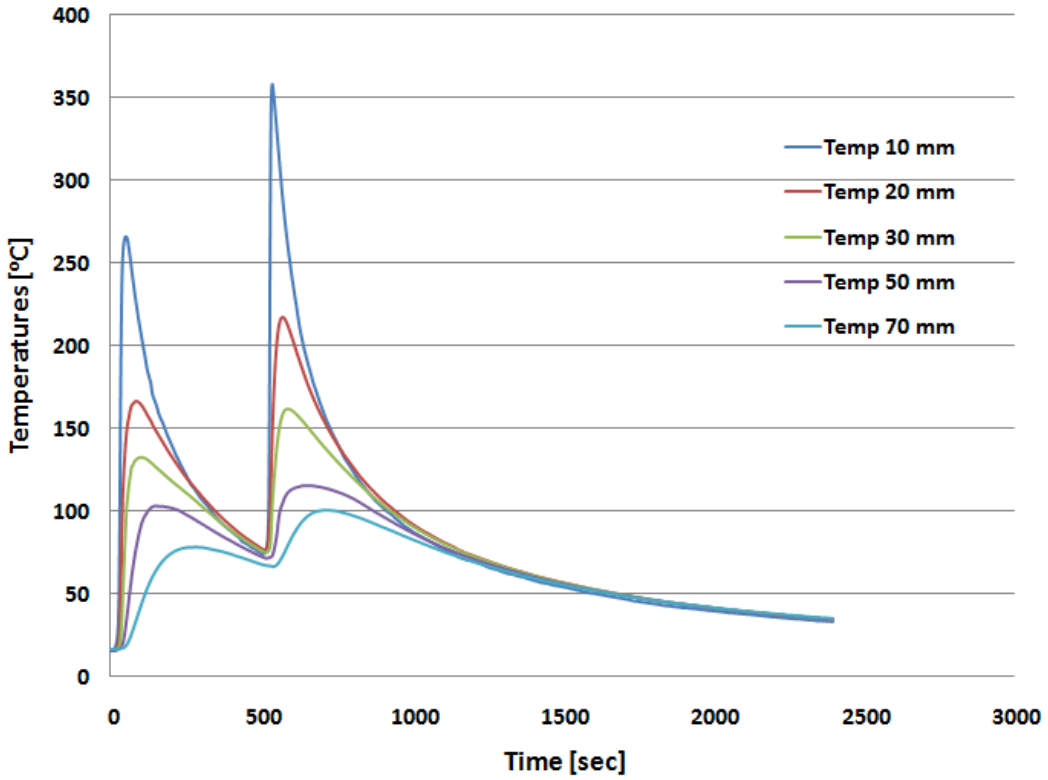
Υπάρχουν αρκετοί τύποι θερμοστοιχείων, ανάλογα με τα υλικά του ζεύγους των αγωγών. Το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι τύπου K (Thermocouples-K). Τα υλικά του θετικού πόλου είναι 90% Ni- 10% Cr, ενώ το υλικό του αρνητικού πόλου είναι 100% Ni. Τα θερμοστοιχεία τύπου K προτιμώνται αφού, εκτός των άλλων, η συμπεριφορά τους προσεγγίζει τη γραμμική περισσότερο από κάθε άλλου τύπου θερμοστοιχείου. Το εύρος λειτουργίας των συγκεκριμένων θερμοστοιχείων είναι από -200 έως 1050 ^{o}C και η προμήθειά τους έχει γίνει από την εταιρία «UTECO».

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αρκεί να μετρήσουμε την τάση στους ακροδέκτες του θερμοστοιχείου. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η σύνδεση του θερμοστοιχείου με κάποιο μετρητικό σύστημα. Οι τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το θερμοστοιχείο, μεταφέρονται σε Η/Υ μέσω της συσκευής που περιέχει τις μονάδες προσαρμογής σήματος, αποθηκεύονται σε αρχεία δεδομένων μέσω του προγράμματος Catman 5.1 και είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

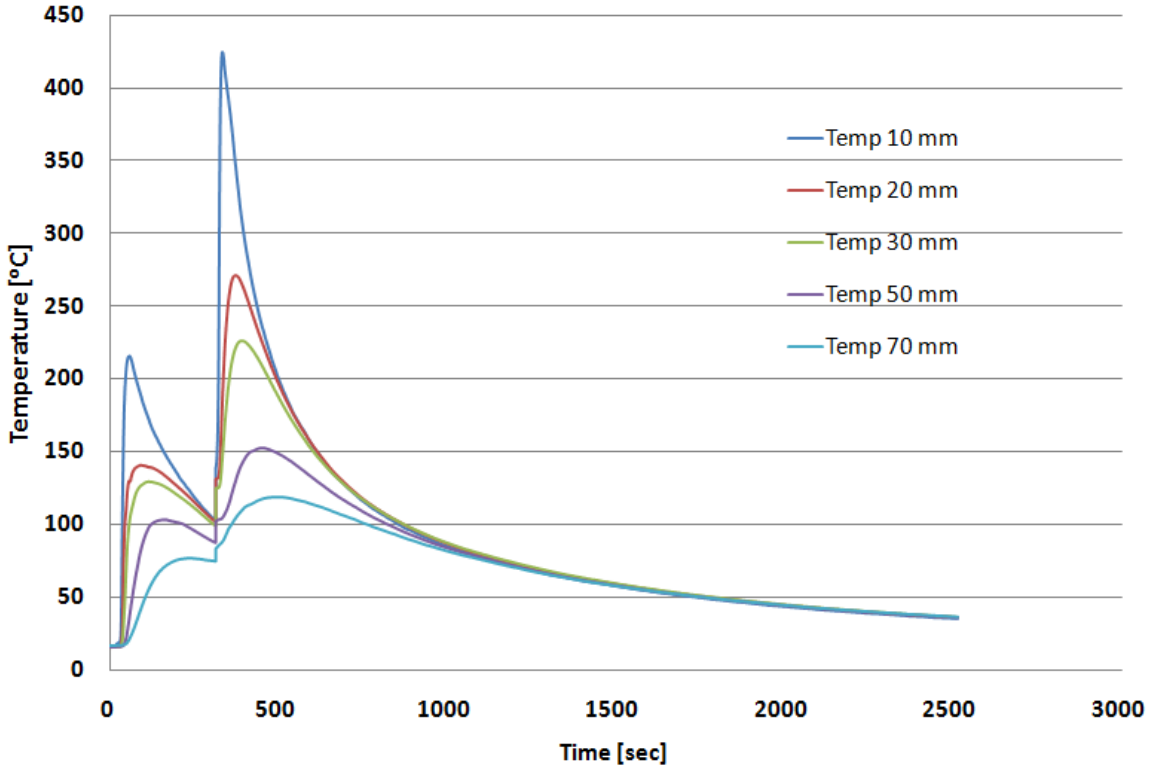
6.3. Τα αποτελέσματα της μετρητικής διάταξης των θερμοστοιχείων

Για τη μέτρηση των θερμικών κύκλων, χρησιμοποιήθηκαν πέντε θερμοστοιχεία τύπου K για κάθε συγκόλληση. Τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10 mm, 20 mm, 30 mm, 50 mm και 70 mm από το άκρο του ενός από τα δύο ελάσματα στην πάνω όψη και σε οπές βάθους 3 mm.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στα σχήματα 6.2 και 6.3. Από τη μελέτη των δύο διαγραμμάτων, υπολογίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες στα σημεία των μετρήσεων, καθώς και ο ρυθμός απόψυξης.



Σχήμα 6.2 Θερμικοί κύκλοι για τη συγκόλληση FCAW



Σχήμα 6.3 Θερμικοί κύκλοι για τη συγκόλληση GMAW

Οι μετρήσεις των θερμικών κύκλων της συγκόλλησης FCAW δείχνουν μέγιστη θερμοκρασία 365°C στο θερμοστοιχείο σε απόσταση 10 mm από τον άξονα της συγκόλλησης. Για τη συγκόλληση GMAW η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε από το ίδιο θερμοστοιχείο και έφτασε τους 425°C. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι χαμηλότερες από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (AC_3) του χάλυβα και σημειώθηκαν κατά τη δεύτερη στρώση. Ωστόσο, εντός της ζώνης τήξης οι θερμοκρασίες αναμένεται να έχουν φτάσει σε σαφώς μεγαλύτερα επίπεδα και ίσως ψηλότερα από την AC_3.

Τέλος, από τη μελέτη των διαγραμμάτων φαίνεται η διαφορά στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις δύο συγκολλήσεις. Η μέγιστη τιμή εμφανίστηκε στη συγκόλληση GMAW, λόγω του ότι το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα στις δύο στρώσεις (πάσα) ήταν μικρότερο σε σχέση με τη FCAW με αποτέλεσμα η απόψυξη μετά το πρώτο πάσο να διαρκέσει λιγότερο και έτσι η θερμοκρασία του ελάσματος κατά την έναρξη του δεύτερου πάσου ήταν μεγαλύτερη. Κατά το πρώτο πέρασμα η μέγιστη θερμοκρασία στη FCAW ήταν 266°C ενώ στη GMAW 216°C. Αυτό μπορεί να αποδοθεί ενδεχομένως στην υψηλότερη τιμή ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε κατά τη συγκόλληση FCAW.

7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

7.1. Παραμορφώσεις κατά τη συγκόλληση

Η ανομοιογενής κατανομή θερμοκρασιών που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης προκαλεί και ανομοιογενή διαστολή του υλικού. Η διαστολή αυτή, σε συνδυασμό με τη συστολή που προκαλείται στη συνέχεια στο υλικό κατά την ψύξη και την στερεοποίηση του τήγματος, αποτελεί την αιτία εμφάνισης πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή της ραφής συγκόλλησης. Οι αναπτυσσόμενες πλαστικές παραμορφώσεις είναι και ο λόγος στρέβλωσης μιας συγκολλητής κατασκευής. Οι παραμορφώσεις κατά τη θέρμανση και ψύξη των υλικών μπορούν να προέρχονται είτε από την ελεύθερη θερμική διαστολή/συστολή, είτε από αλλοτροπικούς μετασχηματισμούς φάσεων (π.χ. φερρίτης → ωστενίτης → φερρίτης).

Κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης μπορούν να εμφανιστούν τρεις βασικές αλλαγές στη γεωμετρία του προς συγκόλληση δοκιμίου:

1. Εγκάρσια συστολή κάθετα στη ραφή συγκόλλησης.
2. Διαμήκης συστολή παράλληλα στη ραφή συγκόλλησης.
3. Γωνιακή παραμόρφωση (περιστροφή γύρω από τη ραφή συγκόλλησης)

Οι αλλαγές αυτές στη γεωμετρία του δοκιμίου συνθέτουν την παραμόρφωση. Οι παραπάνω παραμορφώσεις παριστάνονται στο σχήμα 7.1 και ταξινομούνται σε σχέση με τον τρόπο που εμφανίζονται ως εξής:

α) Εγκάρσια συστολή: Συστολή κάθετα στη ραφή συγκόλλησης.

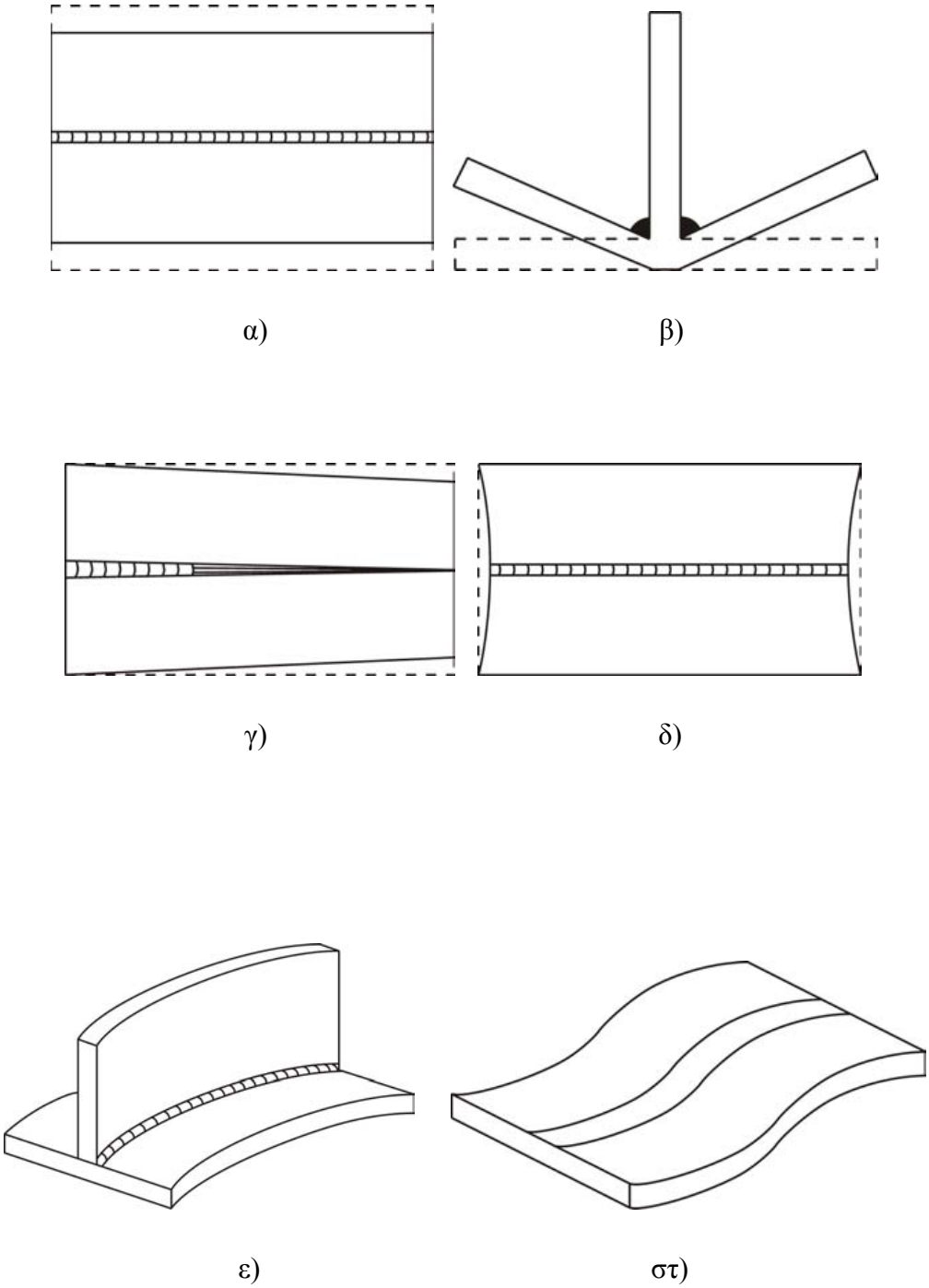
β) Γωνιακή αλλαγή (εγκάρσια παραμόρφωση): Η ανομοιογενής θερμοκρασιακή κατανομή κατά την διεύθυνση του πάχους προκαλεί στρέβλωση (γωνιακή αλλαγή) κοντά στη ραφή συγκόλλησης.

γ) Περιστροφική παραμόρφωση: Γωνιακή παραμόρφωση στο επίπεδο του ελάσματος λόγω της θερμικής διαστολής.

δ) Διαμήκης συστολή: Συστολή στη διεύθυνση της ραφής συγκόλλησης.

ε) Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση: Παραμόρφωση καθ' όλη τη ραφή συγκόλλησης και σε επίπεδο κάθετο του ελάσματος.

στ) Παραμόρφωση λόγω λυγισμού: Θλιπτικές θερμικές τάσεις προκαλούν λυγισμό όταν το έλασμα που συγκολλείται είναι λεπτό.



Σχήμα 7.1. Κύριοι τύποι παραμόρφωσης λόγω συγκόλλησης

7.2. Γραμμικός αισθητήρας μετατόπισης (LVDT)

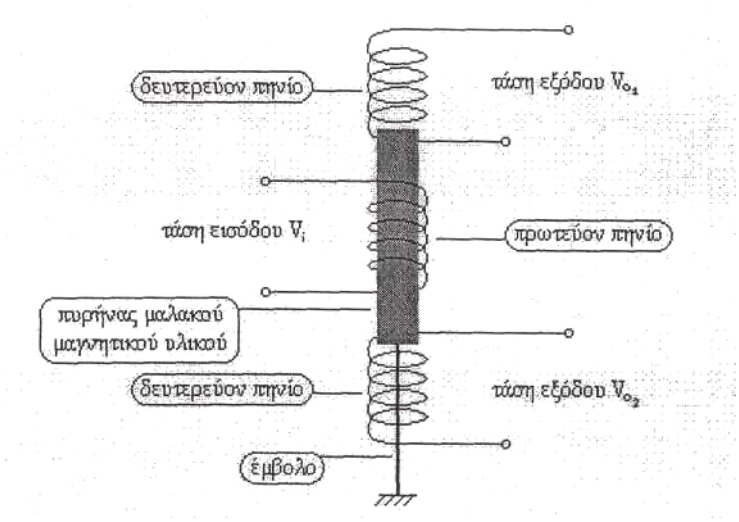
Πρόκειται για το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο μέτρησης μετατόπισης για μετατοπίσεις έως 300 mm. Ο αισθητήρας αυτός αποκαλείται LVDT από τα αρχικά της αγγλικής ονομασίας του (Linear Variable Differential Transformer). Η διάταξη αποτελείται από τρία πηνία, ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα. Στο κέντρο του πρωτεύοντος βρίσκεται ένας πυρήνας από μαλακό μαγνητικό υλικό (μαλακό σίδηρο, άμορφο σύρμα FeSiB κ.α.). Τα δευτερεύοντα πηνία έχουν μεταξύ τους αντίθετη περιέλιξη.

Λόγω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, όταν ένας αγωγός μετακινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε αναπτύσσεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα του, η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής. Συνεπώς, αν εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον πηνίο, τότε αυτό θα παράγει εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και λόγω του νόμου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής θα επαχθεί μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο εξαρτάται από το ποσό του ρεύματος που ρέει στο πρωτεύον πηνίο και το πηλίκο του αριθμού περιελίξεων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο. Η ονομασία του αισθητήρα περιγράφει την αρχή λειτουργίας του:

1. Πρόκειται για μετασχηματιστή (transformer), ο οποίος υπόκειται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.
2. Η μαγνητική σύζευξη ανάμεσα στα πηνία μπορεί να μεταβληθεί επηρεάζοντας το μέγεθος της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης, άρα μεταβλητός (variable).
3. Διαθέτει ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία, τα οποία συνδέονται και παρέχουν τη διαφορά των τάσεων τους στις αντίστοιχες εξόδους τους, εξ' ου και διαφορικός (differential).
4. Ο σχεδιασμός της διάταξης είναι τέτοιος, ώστε η μεταβολή της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των πηνίων να γίνεται γραμμικά, εξ' ου και γραμμικός (linear).

Στο σχήμα 7.2 φαίνεται η απεικόνιση μιας διάταξης LVDT με ένα πρωτεύον πηνίο στο κέντρο και δύο δευτερεύοντα πηνία εκατέρωθεν με τα πηνία να βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Στο κέντρο της διάταξης, εσωτερικά του πρωτεύοντος πηνίου, τοποθετείται ο πυρήνας του μαλακού μαγνητικού υλικού, που είναι ελεύθερος να κινείται κατά μήκος του κεντρικού

άξονα. Ο πυρήνας συνδέεται μέσω ενός εμβόλου με το σημείο του οποίου η μετατόπιση θα μετρηθεί. Έτσι, η κίνηση του μετρούμενου σημείου μεταφέρεται στον πυρήνα του μαλακού μαγνητικού υλικού.



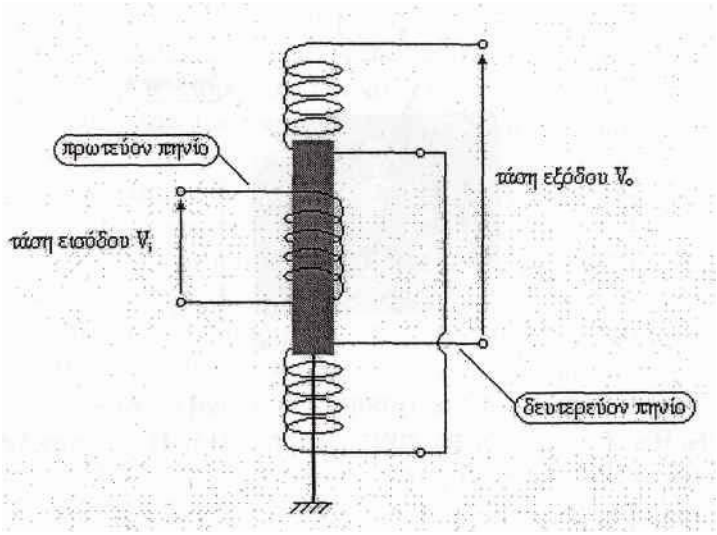
Σχήμα 7.2. Τυπική διάταξη LVDT

Αν το πρωτεύον πηνίο τροφοδοτηθεί με εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται από αυτό ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο με τη βοήθεια του πυρήνα μαλακού μαγνητικού υλικού προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων. Αν τα δευτερεύοντα πηνία συνδεθούν, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3 και, δεδομένου ότι ο πυρήνας βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της διάταξης, τα δύο παραγόμενα σήματα από τα δευτερεύοντα πηνία αλληλοαναιρούνται. Μόλις κινηθεί ο πυρήνας προς κάποια κατεύθυνση, αυτομάτως αυξάνεται η σύζευξη του πρωτεύοντος πηνίου με το πηνίο προς το οποίο κινήθηκε ο πυρήνας και εξασθενεί η σύζευξη με το άλλο.

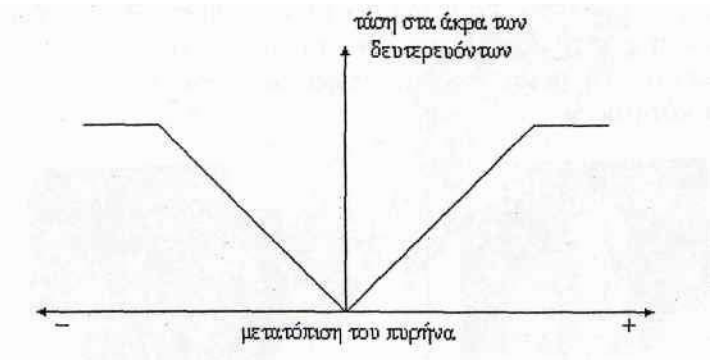
Στο σχήμα 7.4 φαίνεται ένα διάγραμμα που αποδίδει τη σχέση του πλάτους της τάσης εξόδου των δευτερευόντων πηνίων V_o με τη μετατόπιση του πυρήνα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, όταν ο πυρήνας του μαλακού μαγνητικού υλικού βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης, η τάση στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων είναι μηδενική. Αυτή η τάση αυξάνεται με τη μετατόπιση, έως ότου η σύζευξη του πρωτεύοντος πηνίου με το ένα δευτερεύον γίνεται μέγιστη, ενώ με το άλλο μηδενίζεται. Από το σημείο αυτό και έπειτα η

τάση εξόδου σταθεροποιείται σε μια τιμή. Αυτό το φαινόμενο λέγεται φαινόμενο του κόρου και εξαιτίας αυτού του φαινομένου περιορίζεται το πρακτικό εύρος λειτουργίας του LVDT.

Τα LVDT είναι εξαιρετικά ευαίσθητα και εμπεριέχουν σφάλμα ενδείξεως της τάξης του ±0,5%. Το εύρος των μετρούμενων μετατοπίσεων κυμαίνεται από 0,05 mm έως 300 mm περίπου. Ο πυρήνας δεν έρχεται σε επαφή με τα πηνία και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη τριβή ή μηχανική φθορά.



Σχήμα 7.3. Διάταξη LVDT με συνδεδεμένα τα δευτερεύοντα πηνία



Σχήμα 7.4. Διάγραμμα τάσης εξόδου των δευτερευόντων πηνίων (Vo) σε σχέση με τη μετατόπιση του πυρήνα.

Η συσκευή μέτρησης μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης και να παρέχει συνεχή τάση εξόδου ή να κατασκευαστεί με τρόπο που να αντιμετωπίζει δονήσεις και κρούσεις. Επίσης, τα LVDT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης ή επιτάχυνσης.

Για τον υπολογισμό της κατακόρυφης μετατόπισης αρκεί να μετρήσουμε την τάση στα άκρα των δευτερευόντων πηνίων του LVDT. Είναι λοιπόν απαραίτητη η σύνδεση των LVDTs με κάποιο μετρητικό σύστημα. Οι τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις, μεταφέρονται σε Η/Υ μέσω ενός αναλογικού αποκωδικοποιητή (Spider8), αποθηκεύονται σε αρχεία δεδομένων, μέσω του προγράμματος Catman 5.1 και είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

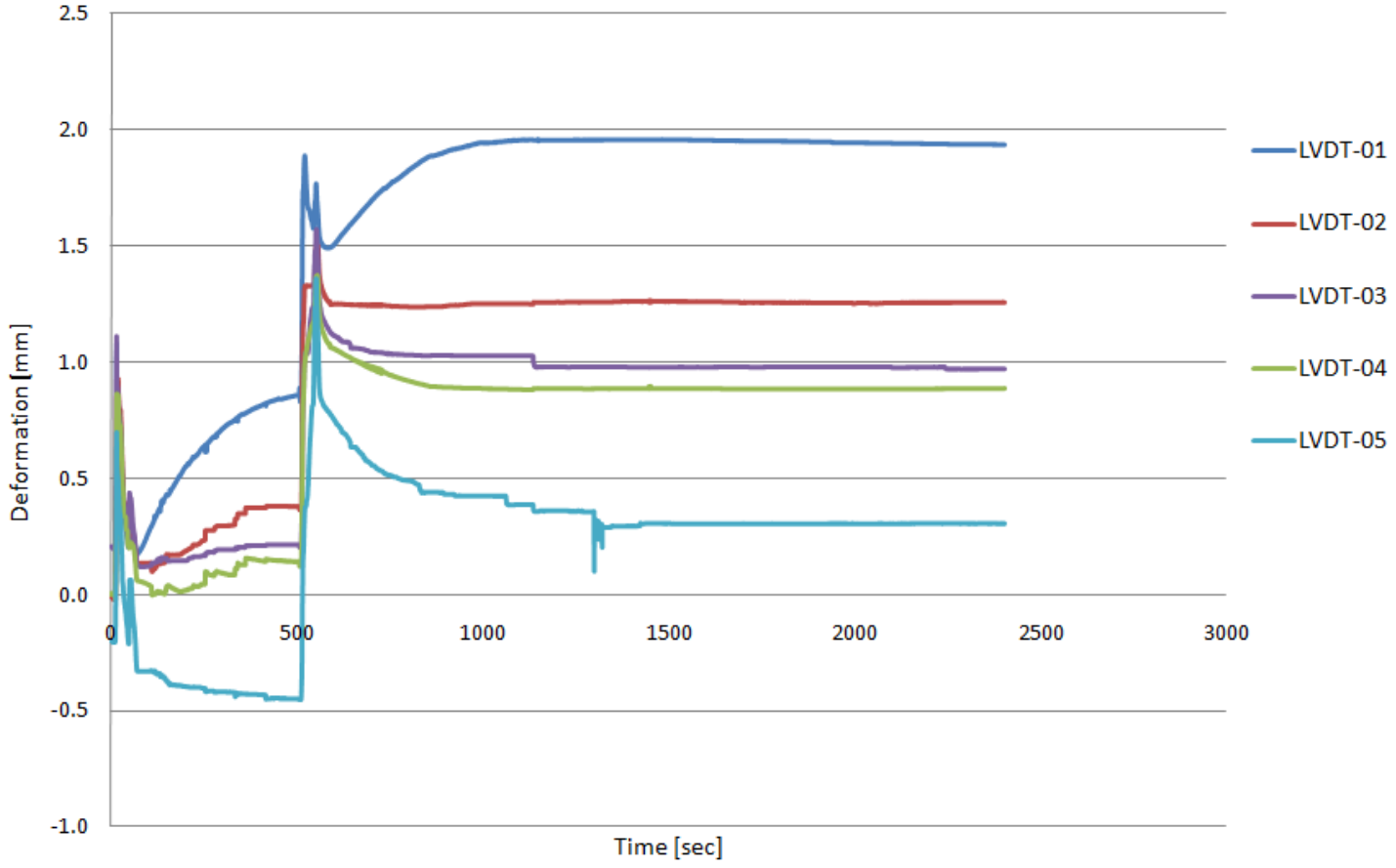
7.3. Αποτελέσματα μετρήσεων LVDTs

Για τη μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε σύστημα μέτρησης με αισθητήρες LVDT. Τα πέντε LVDTs, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4, τοποθετήθηκαν παράλληλα στον άξονα της συγκόλλησης 30 mm από το ελεύθερο άκρο του ελάσματος και σε απόσταση 25, 100, 150, 200, 275 mm από το κάθετο στη ραφή άκρο του ελάσματος. Στον Πίνακα 7-1 για κάθε LVDT αναγράφονται οι συντεταγμένες της θέσης του, θεωρώντας ως αρχή των αξόνων x,y το κάτω αριστερό άκρο του ελάσματος.

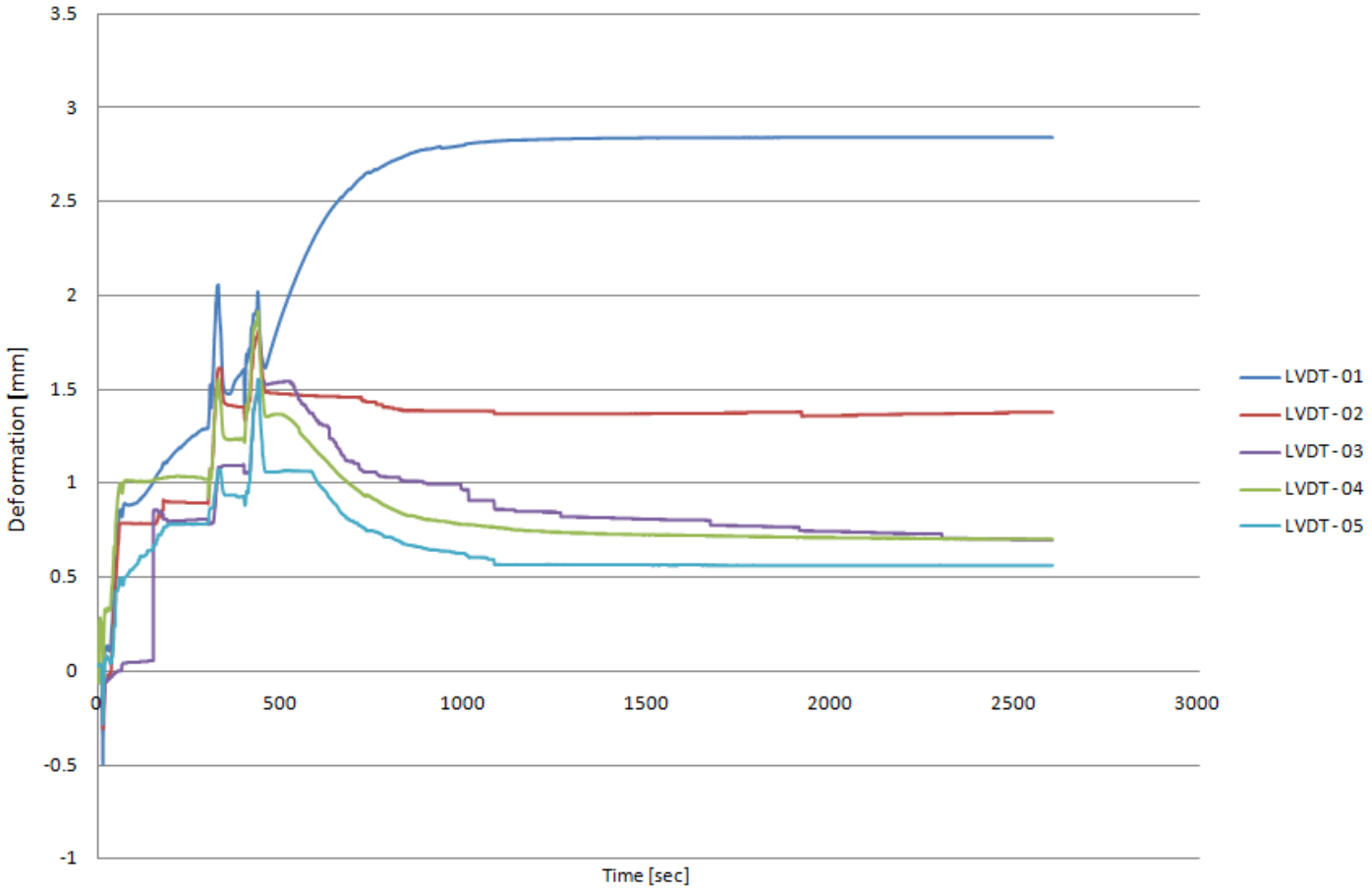
Πίνακας 7-1. Θέσεις LVDTs

LVDT No	x (mm) [// στη ραφή]	y (mm) [⊥ στη ραφή]
01	25	30
02	100	30
03	150	30
04	200	30
05	275	30

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις συγκολλήσεις FCAW και GMAW παρουσιάζονται στα σχήματα 7.5 και Σχήμα 7.6, αντίστοιχα. Από τη μελέτη των δύο διαγραμμάτων, υπολογίζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων και μέχρι το τέλος της απόψυξης.



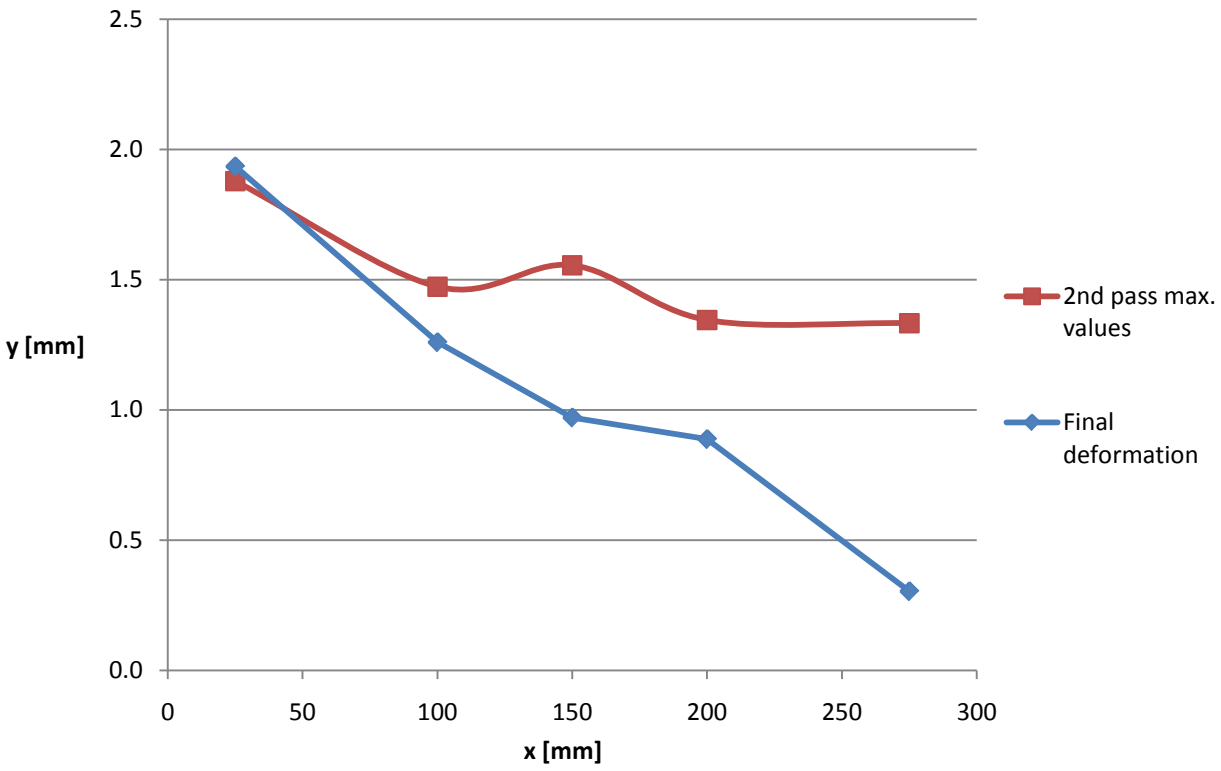
Σχήμα 7.5. Καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης-χρόνου για τη συγκόλληση FCAW



Σχήμα 7.6. Καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης-χρόνου για τη συγκόλληση GMAW

Στην περίπτωση της συγκόλλησης FCAW η κατακόρυφη μετατόπιση του ελάσματος ξεκινά με ελαφρά αρνητικές τιμές για τα πρώτα δευτερόλεπτα ($1^{η}$ στρώση) για όλα τα LVDTs (εκτός από το LVDT-03). Ο λόγος που παρατηρείται το φαινόμενο αυτό είναι η διαστολή από τη θερμότητα και η πλαστική ροή των υλικών στην περιοχή της συγκόλλησης. Στη συνέχεια, ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης είναι θετικός, λόγω της συστολής της ραφής και η μετατόπιση αποκτά θετικό πρόσημο. Οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης εμφανίζουν απότομη αύξηση κατά τις χρονικές περιόδους που πραγματοποιούνται οι στρώσεις της συγκόλλησης. Η μέγιστη τελική κατακόρυφη μετατόπιση παρουσιάζεται στο LVDT-01 (το οποίο βρίσκεται κοντά στο άκρο από το οποίο ξεκινά η συγκόλληση) μετά την πάροδο 1100 sec από την πρώτη έναυση του τόξου της συγκόλλησης και είναι της τάξης των 2 mm.

Τέλος, στο Σχήμα 7.7 αποτυπώνεται το προφίλ της διαμήκους παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι κατά μήκος της συγκόλλησης οι κατακόρυφες μετατοπίσεις φθίνουν και στο σημείο του LVDT-05 (275 mm) η μετατόπιση είναι η μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις.

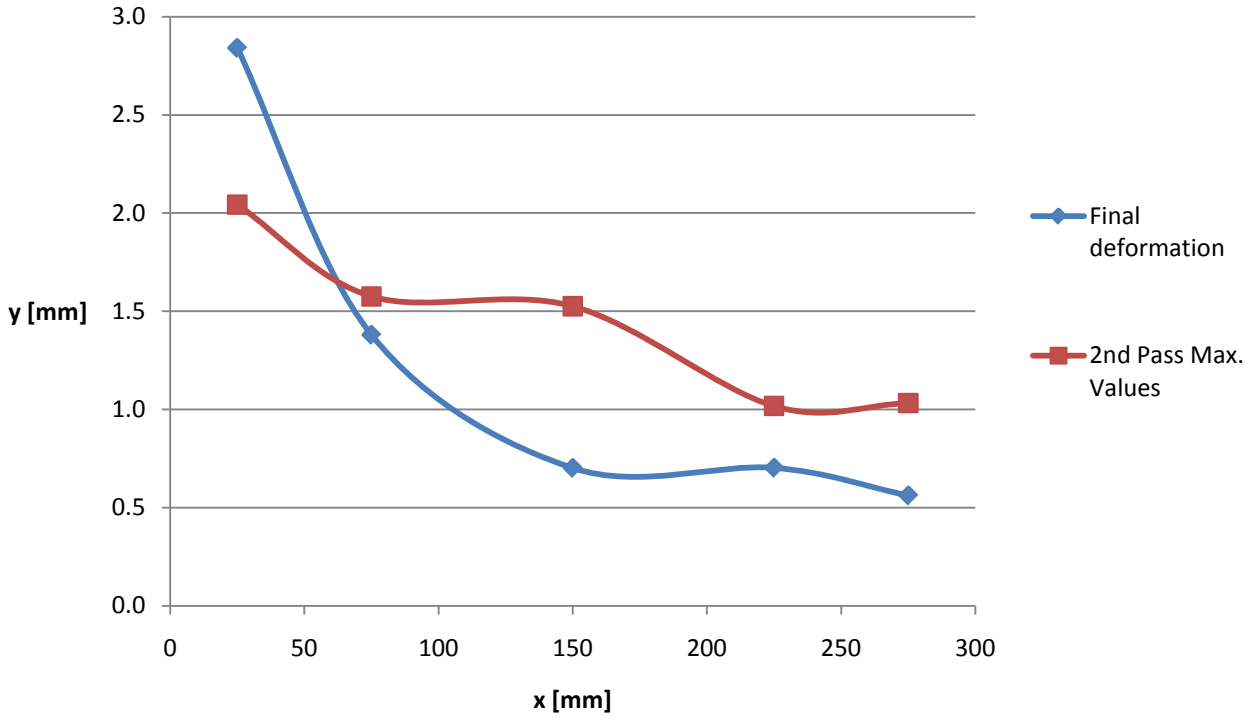


Σχήμα 7.7. Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του άξονα της συγκόλλησης FCAW

Στην περίπτωση της συγκόλλησης GMAW παρατηρούνται γενικά τα ίδια φαινόμενα. Η κατακόρυφη μετατόπιση του ελάσματος και πάλι ξεκινά με ελαφρά αρνητικές τιμές για τα πρώτα δευτερόλεπτα κατά την πρώτη στρώση για όλα τα LVDTs . Στη συνέχεια, ο ρυθμός μεταβολής της μετατόπισης είναι θετικός, λόγω της συστολής της ραφής και η μετατόπιση αποκτά θετικό πρόσημο. Οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης εμφανίζουν απότομη αύξηση κατά τις χρονικές περιόδους που πραγματοποιούνται οι στρώσεις της συγκόλλησης. Η μέγιστη τελική κατακόρυφη μετατόπιση παρουσιάζεται στο LVDT-01 μετά από 1300 sec από την πρώτη έναυση του τόξου της συγκόλλησης και είναι της τάξης των 3 mm. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στη συγκόλληση με τη μέθοδο FCAW, ενδεχομένως λόγω των

υψηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν σε σχέση με τη δεύτερη, δηλαδή της μεγαλύτερης θερμότητας που προσφέρθηκε στη GMAW.

Επιπλέον, σε σχέση με τη FCAW μπορούν να γίνουν δύο ακόμα παρατηρήσεις. Πρώτον, οι τελικές μετατοπίσεις στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερες από τη FCAW, ωστόσο οι μέγιστες κατά τη δεύτερη στρώση είναι παρόμοιες. Δεύτερον, το γεγονός ότι παρατηρούνται τρεις κορυφές στο διάγραμμα αποδίδεται στη μικρή επαφή που είχε το ακροφύσιο του ρομποτικού βραχίονα με τους αισθητήρες κατά την απομάκρυνσή του από την περιοχή της συγκόλλησης μετά το τέλος της δεύτερης στρώσης. Οπότε, στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα δεδομένο μετρητικό σφάλμα. Τέλος, στο Σχήμα 7.8 φαίνεται το προφίλ της διαμήκους παραμόρφωσης το οποίο έχει τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με αυτό της FCAW.



Σχήμα 7.8. Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά μήκος του άξονα της συγκόλλησης GMAW

Συμπερασματικά, φαίνεται πως η πρώτη στρώση της συγκόλλησης επιδρά λιγότερο στην τελική παραμόρφωση που θα έχουν τα ελάσματα σε σχέση με τη δεύτερη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετωπικές συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής DH36 με τις δύο (αυτοματοποιημένες) μεθόδους, την Gas Metal Arc Welding (GMAW) και την Flux Cored Arc Welding (FCAW).

Το μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ) και στις δύο περιπτώσεις αποτελείται από κόκκους φερρίτη και περλίτη άτακτα κατανεμημένους οι οποίοι έχουν αποκτήσει σε κάποια σημεία μορφή δενδριτών, ενώ φαίνεται ότι έχει σχηματισθεί τοπικά και φερρίτης Windmanstätten. Η ΘΕΖ αποτελεί τη μεταβατική περιοχή όπου σταδιακά μετακινούμαστε από την ομοιόμορφη λόγω της έλασης κατανομή των κόκκων στην τυχαία κατανομή του ΜΣ.

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έδειξαν αύξηση των τιμών στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης κατά ποσοστό περίπου 20-30% ως προς τη σκληρότητα του βασικού μετάλλου, με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στη δεύτερη στρώση.

Οι θερμικοί κύκλοι της συγκόλλησης FCAW έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία σε απόσταση 10 mm από τον άξονα της συγκόλλησης είναι γύρω στους 360°C, ενώ αυτοί της συγκόλλησης GMAW στην ίδια απόσταση, δείχνουν μέγιστη θερμοκρασία περίπου 420°C.

Τέλος, βρέθηκε ότι υπάρχουν απότομες διακυμάνσεις στις τιμές των παραμορφώσεων και των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τις χρονικές περιόδους όπου πραγματοποιείται μια στρώση συγκόλλησης. Παρατηρήθηκαν εντονότερες οι παραμορφώσεις στα ελάσματα της συγκόλλησης GMAW.

Περαιτέρω μελέτη των συγκολλήσεων αυτών θα μπορούσε να περιλαμβάνει μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων. Ακόμη, μπορεί να πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση της πειραματικής διαδικασίας με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των θερμικών κύκλων και των παραμορφώσεων ούτως ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά των πειραμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Γεωργίου Δ. Παπαδημητρίου, *Εισαγωγή στη Μεταλλουργία, την Τεχνολογία και τον Έλεγχο των Συγκολλήσεων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1996
2. Β. Ι. Παπάζογλου και Γ. Δ. Παπαδημητρίου, *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1994
3. Δ. Ι. Παντελής και Γ. Χρυσουλάκης, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005
4. Ε. Χριστοφόρου, *Αισθητήρες και Μικροσυστήματα (Σημειώσεις)*, Αθήνα 2006
5. Böhler, *Welding Guide*, Technical Handbook Edition 2005
6. Sindo Kou, *Welding Metallurgy (Second Edition)*, John Wiley and Sons Publication, 2003
7. Κοντογιάννης Παναγιώτης και Λιαρμακόπουλος Αθανάσιος, *Μεταπτυχιακή Εργασία: Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων με τη μέθοδο FCAW μεταξύ ελασμάτων από ναυπηγικό χάλυβα AH36 και ελασμάτων από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα 316L*, ΕΜΠ, Αθήνα 2008
8. ASM, *ASM Handbooks, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, 1993
9. American Welding Society (AWS), *ANSI-AWS D3.5-93, Guide for Steel Hull Welding*, AWS 1993
10. American Welding Society (AWS), *AWS Handbooks, Section 5, 6th Edition*, AWS 1973
11. American Bureau of Shipping (ABS), *Part 2, Rules for Materials and Welding*, ABS, 2010
12. GSI SLV Duisburg, *The Welding Engineer's Current Knowledge*,, DVS Verlag, Duisburg, Edition 06/07
13. Bruce L. Bramfitt, Arlan O. Benscoter, *Metallographer's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels*, ASM International, 2001
14. Det Norske Veritas (DNV), *Rules for Classification of Ships, Newbuildings, Part 2, Ch. 2, Metallic Materials*, Høvik, 1996
15. American Society for Testing and Materials (ASTM), *A131/A131M, Standard Specification for Structural Steel for Ships*, 2004
16. Althouse, A.D. Turnquist, C.H. Bowditch, W.A. Bowditch, K.E. and Bowditch, M.A. (eds.) *Modern Welding*. Tinley Park, Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc, 2004

ΑΡΘΡΑ

I. Susumu Machida, Hiroshige Kitada, Hiroshi Yajima and Akinobu Kawamura, *Extensive Application of TMCP Steel Plates to Ship Hulls: 40 kgf/mm2 Class High- Yield Stress Steel*, Marine Structures 1 (219-243), 1988

II. Sia Nemat-Nasser and Wei-Guo Guo, *Thermomechanical response of DH-36 structural steel over a wide range of strain rates and temperatures*, Mechanics of Materials 35 (1023-1047), 2003

III. T. D. Huang, Pingsha Dong, Lawrence A. DeCan and Dennis D. Harwig, *Residual Stresses and Distortions in Lightweight Ship Panel Structures*, Technology Review Journal, Spring/Summer 2003

IV. T. D. Huang, Dennis D. Harwig, Pingsha Dong and Lawrence A. DeCan, *Engineering and Ship Production Technology for Lightweight Structures*, Technology Review Journal, Spring/Summer 2005

V. S.M. Kelly, R.P. Martukanitz, P. Michaleris, M. Bugarewicz, T.D. Huang, and L. Kvidahl, *Low Heat Input Welding for Thin Steel Fabrication*, Journal of Ship Production, Volume 22, Number 2, pp. 105-109(5), May 2006

VI. C. L. Tsai, S. C. Park and W. T. Cheng, *Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure*, AWS Welding Journal, 1999

VII. R. Williams, *High strength steel for steel constructions*, Nordic Steel Construction Conference, 2009