



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θαλασσιών Κατασκευών
Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Διπλωματική Εργασία

«Μελέτη της Μικροδομής και της Συμπεριφοράς
σε Διάβρωση Συγκολλήσεων Τόξου και
Υβριδικών Συγκολλήσεων Laser-Τόξου Χαλύβων
ΑΗ36 και S690»

Λάμπη Σεβαστή

Τριμελής Επιτροπή: Καθηγητής Δ.Ι. Παντελής, Επιβλέπων
Καθηγητής Ν. Τσούβαλης
Επίκουρος Καθηγητής Α. Καραντώνης

Αθήνα, Απρίλιος 2016

Στη μοναδική Λυδία

Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί έχει τίτλο: «Μελέτη της Μικροδομής και της Συμπεριφοράς σε διάβρωση Συγκολλήσεων Τόξου και Υβριδικών Συγκολλήσεων Laser - Τόξου χαλύβων ΑΗ36 και S690» και εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παντελή Δ., Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος και τη βοήθειά του σε ο,τι χρειάστηκα κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Κιοσίδου Ε., Καζασίδη Μ. και την μεταπτυχιακή φοιτήτρια Μπούτσαλη Β. για την κατάρτιση και την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την εκπόνηση των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Τσιούρβα Θ., Χημικό Μηχανικό και μέλος του επιστημονικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για την καθοδήγησή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	i
Abstract	ii
<i>Θεωρητικό μέρος</i>	
Κεφάλαιο 1 - Μέταλλα και Μεταλλικά Υλικά	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Μέταλλα.....	2
1.2.1 Ορισμός και ιδιότητες των μετάλλων.....	2
1.2.1.1 Η δομή των μετάλλων.....	3
1.3 Μεταλλικά κράματα.....	8
1.3.1 Μικροδομή κραμάτων.....	8
1.3.2 Ανάπτυξη πολικρυσταλλικής δομής.....	9
1.3.3 Η επίδραση της κοκκώδους δομής στις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων.....	9
1.4 Χάλυβες.....	10
1.4.1 Εισαγωγή	10
1.4.2 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες.....	14
1.4.3 Κραματωμένοι χάλυβες.....	15
1.4.4 Χάλυβες υψηλής αντοχής (HTS)	16
1.4.4.1 Ο ναυπηγικός χάλυβας AH36	17
1.4.4.2 Χρήση χάλυβα AH36.....	19
1.4.5 Μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (HSLA)	21
1.4.5.1 Ο HSLA χάλυβας S690QL.....	21
1.4.5.2 Κατεργασίες των S690QL χαλύβων	23
1.4.5.3 Συγκολλησιμότητα του S690QL	24
1.4.5.4 Πεδίο εφαρμογών του S690QL.....	24
Κεφάλαιο 2 - Συγκολλήσεις μεταλλικών υλικών	25
2.1 Εισαγωγή	25
2.2 Γενικές μέθοδοι σύνδεσης μετάλλων.....	25
2.3 Σύγχρονες μέθοδοι συγκόλλησης	28
2.3.1 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)	29
2.3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	29
2.3.1.2 Ηλεκτρόδια.....	30
2.3.1.3 Πιστόλια συγκόλλησης.....	30
2.3.1.4 Χαρακτηριστική μηχανής συγκόλλησης.....	31
2.3.1.5 Τεχνικές μεταφοράς προστιθέμενου μετάλλου.....	31
2.3.1.7 Παράμετροι της μεθόδου.....	39
2.3.1.8 Τυπικά σφάλματα μεθόδου GMAW.....	41
2.3.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου GMAW.....	43

2.3.2 Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding - FCAW)	45
2.3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά.....	45
2.3.2.2 Ιδιότητες και παράμετροι της συγκόλλησης FCAW.....	47
2.3.2.3 Σωληνοειδή ηλεκτρόδια και τυποποίησή τους.....	49
2.3.2.4 Τυπικά σφάλματα μεθόδου FCAW.....	54
2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW.....	56
2.3.3 Συγκόλληση με Laser.....	57
2.3.3.1 Αρχή λειτουργίας Laser.....	57
2.3.3.2 Τύποι Laser.....	59
2.3.3.3 Είδη Laser που χρησιμοποιούνται στις υβριδικές συγκολλήσεις στη ναυπηγική	59
2.3.3.4 Είδη συγκόλλησης με laser.....	66
2.3.3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκόλλησης με laser.....	67
2.3.4 Υβριδική συγκόλληση laser – τόξου.....	69
2.3.4.1 Εισαγωγή.....	69
2.3.4.2 Βασικές διατάξεις.....	70
2.3.4.3 Νεότερες, μη συμβατικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης.....	74
2.3.4.4 Αέρια προστασίας.....	80
2.3.4.5 Πλεονεκτήματα της μεθόδου HLAW	84
2.3.4.6 Τυπικά σφάλματα υβριδικών συγκολλήσεων.....	84
Ενότητα Α - Ανομοιογενείς Συγκολλήσεις.....	85
A.1 Εισαγωγή- Παράδειγμα.....	85
A.2 Βασικές αρχές dissimilar συγκόλλησης σιδηρούχων κραμάτων	86
A.3 Προβλήματα των DMWs.....	86
A.4 Γενικά συμπεράσματα για τις dissimilar συγκολλήσεις.....	88
ΕΝΟΤΗΤΑ Β - Ανάπτυξη και εφαρμογές των μεθόδων Laser και Laser-Arc Hybrid συγκολλήσεων στη Ναυπηγική Βιομηχανία.....	89
B.1 Η αρχική χρήση του Laser και ο έλεγχος.....	93
B.2 Βασικές αρχές των συγκολλήσεων Laser.....	90
B.2.2 Μηχανισμός της «κλειδαρότρυπας».....	90
B.3 Χρήση των συγκολλήσεων Laser στη σημερινή ναυπηγική βιομηχανία.....	91
B.4 Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.....	93
Κεφάλαιο 3 - Διάβρωση και Ηλεκτροχημεία.....	95
3.1 Ορισμός - Γενικά χαρακτηριστικά του φαινομένου.....	95
3.2 Ηλεκτροχημεία της διάβρωσης.....	95
3.3 Θερμοδυναμική της διάβρωσης.....	98

3.4 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης.....	101
3.4.1 Μέθοδος Γραμμικής Πόλωσης ή Αντίστασης Πόλωσης (Linear Polarization ή Polarization Resistance)	102
3.4.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης	107
3.4.3 Η μέθοδος Προεκβολής των ευθειών Tafel.....	115

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 4 - Πειραματικές Μέθοδοι.....	120
4.1 Εισαγωγή.....	120
4.2 Μικροσκοπική Παρατήρηση Επιφανειών	121
4.2.1 Προετοιμασία Δοκιμίου.....	121
4.2.2 Στερεοσκόπιο Leica MZ6.....	123
4.2.3 Οπτικό Μικροσκόπιο Leica DMILM.....	123
4.2.4 Μικροσκληρότητα.....	125
4.3 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις.....	126
4.3.1. Ηλεκτροχημικό Κελί	126
4.3.1.1 Θερμοδυναμική του ηλεκτροχημικού κελιού.....	126
4.3.1.2 Βασικά ηλεκτρόδια του ηλεκτροχημικού κελιού.....	127
4.3.1.3 Ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode).....	127
4.3.1.4 Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (counter electrode).....	127
4.3.1.5 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (reference electrode).....	127
4.3.2 Πειραματική Διάταξη Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων.....	129
4.3.2.1 Χαρακτηριστικά του Ποτενσιοστάτη.....	129
4.3.2.2 Χαρακτηριστικά του ηλεκτρολυτικού κελιού.....	129
4.3.2.3 Σωλήνας Luggin (Luggin's capillary).....	130
4.3.2.4 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς – Κορεσμένου Καλομέλανα.....	131
4.3.3 Διάβρωση Χάλυβα με Ηλεκτροχημικές μεθόδους.....	131
4.3.4 Επεξεργασία ηλεκτροχημικών μετρήσεων.....	132
4.3.5 Λήψη καμπυλών πόλωσης.....	132
4.4. Θάλαμος Αλατονέφωσης.....	134
4.4.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης.....	134
4.4.2 Κυκλικές δοκιμές κατά το πρότυπο ISO 14993 (2001)	136
4.4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Θαλάμου.....	138
4.4.4 Προετοιμασία Δοκιμίων.....	139
4.4.5 Τοποθέτηση δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης- Planned Interval Test.....	143
4.4.6 Έξοδος των δοκιμίων από το θάλαμο αλατονέφωσης.....	145
Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα – Συζήτηση.....	146
5.1 Εισαγωγή.....	146
5.2 Μεταλλογραφική μελέτη των δοκιμίων	146

5.2.1	Μέταλλα βάσης.....	146
5.2.2	Υβριδική Συγκόλληση Laser- tandem τόξου AH36-S690.....	147
5.2.2.1	Μακροσκοπική παρατήρηση.....	148
5.2.2.2	Μικροσκοπική παρατήρηση επιφανειών ανά περιοχή.....	148
5.2.3	Συγκόλληση FCAW AH36-S690.....	154
5.2.3.1	Μακροσκοπική παρατήρηση επιφανειών.....	154
5.2.3.2	Μικροσκοπική παρατήρηση επιφανειών ανά περιοχή.....	156
5.3	Πειραματικά Αποτελέσματα των Μικροσκληρομετρήσεων.....	160
5.3.1	Μικροσκληρομέτρηση της υβριδικής συγκόλλησης laser - τόξου AH36-S690 (dissimilar).....	160
5.3.2	Μικροσκληρομέτρηση της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36- S690	170
5.4	Ηλεκτροχημικές μέθοδοι.....	179
5.4.1	Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για τα Μέταλλα Βάσης.....	179
5.4.2	Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για την Υβριδική Συγκόλληση Laser- MAG+Tandem AH36-S690.....	182
5.4.3	Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για την Συγκόλληση FCAW AH36-S690.....	186
5.4.4	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ηλεκτροχημικών μεθόδων.....	189
5.5	Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης.....	192
5.5.1	Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο αλατονέφωσης.....	194
5.5.2	Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.....	195
5.5.3	Δοκίμια ανόμοιων κραμάτων AH36-S690 με υβριδική συγκόλληση laser-GMA+tandem τόξου.....	196
5.5.4	Δοκίμια ανόμοιων κραμάτων AH36-S690 με συγκόλληση FCAW	204
5.5.5	Δοκίμια μετάλλου βάσης AH36.....	210
5.5.6	Δοκίμια μετάλλου βάσης S690.....	211
5.6	Μετρήσεις απώλειας βάρους.....	213
5.6.1	Διαγράμματα Απώλειας Βάρους	215
5.6.1.1	Διαγράμματα της Υβριδικής laser-GMA+tandem τόξου συγκόλλησης AH36-S690.....	215
5.6.1.2	Διαγράμματα της FCAW συγκόλλησης AH36-S690	217
5.6.2	Συγκριτικά διαγράμματα διάβρωσης	218
	Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα	220
6.1	Συμπεράσματα ως προς τις ιδιότητες των υλικών.....	220
6.2	Συμπεράσματα ως προς τις μικροσκληρότητες των μετώπων των δοκιμών.....	222
6.3	Συμπεράσματα ως προς την ηλεκτροχημική διάβρωση των δοκιμών.....	222

6.4 Συμπεράσματα ως προς τις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης.....	226
Βιβλιογραφία.....	223
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η συμπεριφορά σε διάβρωση α) του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36, β) του χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης S690 και γ) των συγκολλήσεών τους μετά από έκθεση δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης. Μελετήθηκαν δύο ειδών συγκολλήσεις: υβριδική συγκόλληση laser-τόξου (συγκεκριμένα laser-MAG+tandem) και συγκόλληση τόξου με σωληνοειδές ηλεκτρόδιο, καθώς και δοκίμια μετάλλων βάσης.

Η εργασία αποτελείται τόσο από το θεωρητικό, όσο και από το πειραματικό μέρος. Στο θεωρητικό μέρος παρατίθενται διεξοδικά πληροφορίες για τις συγκολλήσεις τήξης που χρησιμοποιήθηκαν στα υπό μελέτη δοκίμια (LBW, GMAW και FCAW) και για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου και τη μέθοδο Tandem MIG/MAG. Επίσης εμπεριέχεται κεφάλαιο σχετικά με τις μορφές διάβρωσης των συγκολλήσεων ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων και τους τρόπους προστασίας αυτών. Στο πειραματικό μέρος περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε: έκθεση των δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης, μετρήσεις απώλειας βάρους και υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης, μικροσκοπημετρήσεις, μεταλλογραφία καθώς και ηλεκτροχημική διάβρωση. Στη συνέχεια, παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων καθώς και η ανάλυση και επεξεργασία τους.

Τέλος, παρατίθενται τα ουσιαστικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Abstract

Corrosion behavior of high tensile strength steel AH36 and high strength-low alloy steel S690 specimens and its weldments, after exposure of several specimens to accelerated aging conditions, was studied within the present thesis. There were examined two different types of weldments: produced by Hybrid Laser-Arc Welding (specifically Hybrid Laser-MAG+Tandem Welding) and by FCAW, as well as specimens of parent metals.

The thesis consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part includes detailed information on the following fusion welding processes: GMAW, LBW, FCAW and HLAW. In addition a detailed reference on Tandem MIG/MAG Welding is included as well as a chapter referring to forms of weld corrosion and practices to minimize it. The experimental part includes a detailed description of the experimental procedure that was followed: exposure of specimens to accelerated aging conditions, weight loss measurements and calculation of corrosion rate, microhardness tests and optical microscopy. Subsequently, all experimental results are presented and analyzed.

Finally, substantial conclusions which have arisen through the entire course of this research are notated.

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1

Μέταλλα και Μεταλλικά Υλικά

1.1. Εισαγωγή [1] [2]

Τα μέταλλα και τα κράματά τους αποτελούν βασικό ποσοστό των σημερινών κατασκευών. Τα μεταλλικά υλικά έχουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, γεγονός που τα καθιστά ικανά να υποστηρίξουν πλήθος κτισμάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εφαρμογές των μετάλλων στα κτίρια, στις εγκαταστάσεις εργοστασίων, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή κινητήρων παντός τύπου, και φυσικά, στις ναυπηγικές κατασκευές.

Πράγματι, τα πλοία αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από μεταλλικά υλικά, κράματα δηλαδή μετάλλων που στοχεύουν στην ασφάλεια της κατασκευής και της λειτουργίας τους. Το κράμα που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ανέγερση των πλοίων είναι ο χάλυβας, ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα, του οποίου τα χαρακτηριστικά αναλύονται σε αυτή την ενότητα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως υπάρχουν διάφορα είδη χαλύβων, κατασκευασμένων ώστε να ανταποκρίνονται στην εκάστοτε εφαρμογή.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως πρώτο αντικείμενό της την μελέτη της μικροδομής της συγκόλλησης των δύο χαλύβων:

- **AH36:** χάλυβας υψηλής αντοχής (High Tensile Strength- HTS)
- **S690QL:** μικροκραματωμένος χάλυβας υψηλής αντοχής (High Strength Low Alloy- HSLA) που ανήκει στην ειδική κατηγορία των HSLA χαλύβων Fatigue Crack Arresters- FCA.

με δύο μεθόδους συγκόλλησης, καθώς και των συμπεριφορών τους σε διάβρωση. Είναι λοιπόν απαραίτητο να παρουσιαστεί μία γενική θεωρία των μετάλλων, για την κατανόηση και την περιγραφή των φαινομένων που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

1.2. Μέταλλα [1] [11]

Τα μέταλλα είναι μια μεγάλη κατηγορία χημικών στοιχείων που εμφανίζουν ορισμένες κοινές ιδιότητες, όπως είναι η λάμψη, η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, η δυνατότητα σχηματισμού ελασμάτων (ελατά) και συρμάτων (όλκιμα). Τα περισσότερα, αλλά όχι όλα, έχουν μεγάλη πυκνότητα και είναι σκληρά και ανθεκτικά. Διακρίνονται από τα αμέταλλα, που αποτελούν επίσης τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία των στοιχείων, τόσο από τις φυσικές όσο, κυρίως, από τις χημικές τους ιδιότητες.

Χαρακτηριστικά μέταλλα είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, το αργίλιο (αλουμίνιο), το νάτριο, το ασβέστιο, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο, το τιτάνιο και το ουράνιο.

Με εξαίρεση τον υδράργυρο όλα τα μέταλλα σε θερμοκρασία δωματίου (20° C) είναι στερεά. Έχουν επίσης το χαρακτηριστικό αργυρόλευκο χρώμα, με εξαίρεση τον χαλκό (ερυθρός) και τον χρυσό (κίτρινος).

1.2.1 Ορισμός και ιδιότητες των μετάλλων

Τα χημικά στοιχεία διακρίνονται σε μέταλλα (περίπου 70 τον αριθμό) και σε αμέταλλα (περίπου 30 τον αριθμό). Αυτή η διάκριση οφείλεται στη διαφοροποίηση των ανωτέρω στοιχείων από άποψης χημικών και φυσικών ιδιοτήτων. Ο ηλεκτροθετικός χαρακτήρας των στοιχείων είναι αυξημένος στις πρώτες στήλες (Ομάδες) και στις τελευταίες σειρές (Περίοδοι) του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων (Εικόνα 1.1):

The image shows a periodic table of elements. The elements are color-coded: blue for metals, green for metalloids, and yellow for nonmetals. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og), with Lanthanide and Actinide series shown below the main grid. The legend indicates: Metal (blue), Metalloid (green), and Nonmetal (yellow).

Εικόνα 1.1: Περιοδικός Πίνακας των Στοιχείων, όπου το γκρι χρώμα δηλώνει μέταλλο, το πράσινο μεταλλοειδές, και το κίτρινο αμέταλλο στοιχείο.

Έτσι, μέταλλο λέγεται κάθε υλικό, που λαμβάνεται από τα διάφορα μεταλλεύματα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων μεταλλουργικών μεθόδων (πυρομεταλλουργία - υδρομεταλλουργία), παρουσιάζει μεταλλικό δεσμό και κατά κανόνα εμφανίζει τις παρακάτω ιδιότητες:

- βρίσκεται σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εκτός από τον υδράργυρο (Hg) που είναι υγρός
- έχει χαρακτηριστική μεταλλική λάμψη
- παρουσιάζει αργυροφαιό χρωματισμό, εκτός από το χαλκό (ερυθρός) και το χρυσό (κίτρινος)
- έχει σχετικά υψηλή πυκνότητα
- έχει σχετικά υψηλό σημείο τήξεως
- εμφανίζει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- διαθέτει πλαστικότητα, δηλαδή είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί εν ψυχρώ (χωρίς να θερμανθεί)
- έχει κρυσταλλική δομή

Τα μέταλλα, ως γνωστό, είναι ελατά (μετατρέπονται εύκολα σε ελάσματα) και όλκιμα (μορφοποιούνται εύκολα σε σύρματα). Υπάρχουν όμως και αμέταλλα, που παρουσιάζουν κάποιες ιδιότητες μετάλλων, όπως π.χ. ο άνθρακας, που είναι σχετικά καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.

1.2.1.1. Η δομή των μετάλλων

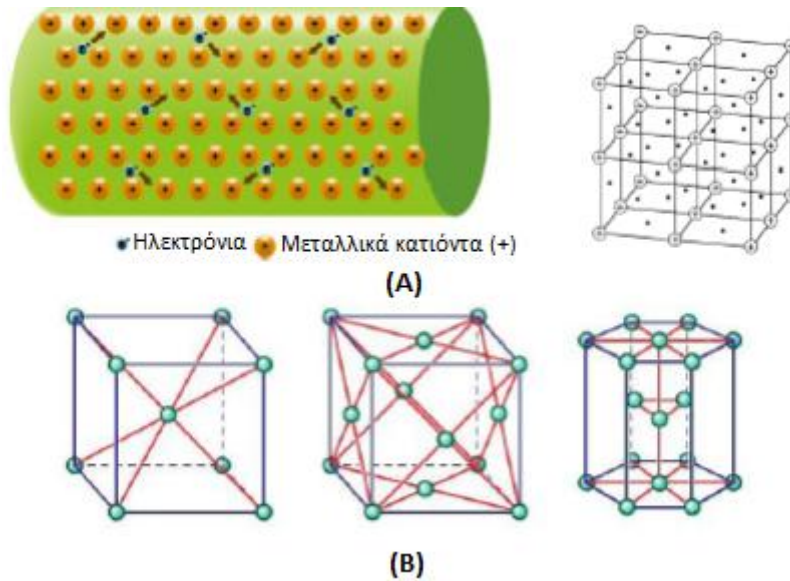
Η δομή των μετάλλων παρουσιάζει τις εξής δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες:

- Το μεταλλικό δεσμό
- Η μάζα τους αποτελείται από κόκκους κρυστάλλων

Στη συνέχεια αναπτύσσονται αυτά τα δύο χαρακτηριστικά της δομής των μετάλλων.

1.2.1.1.1. Ο μεταλλικός δεσμός

Στα μέταλλα, οι πυρήνες των ατόμων είναι διατεταγμένοι σε κανονικές πολυεδρικές μορφές, που ονομάζονται «κρυσταλλικά πλέγματα». Στην Εικόνα 1.2 βλέπουμε μία απλή περίπτωση τέτοιας διάταξης. Οι μορφές αυτές ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του κάθε μετάλλου και τη θερμοκρασία του.

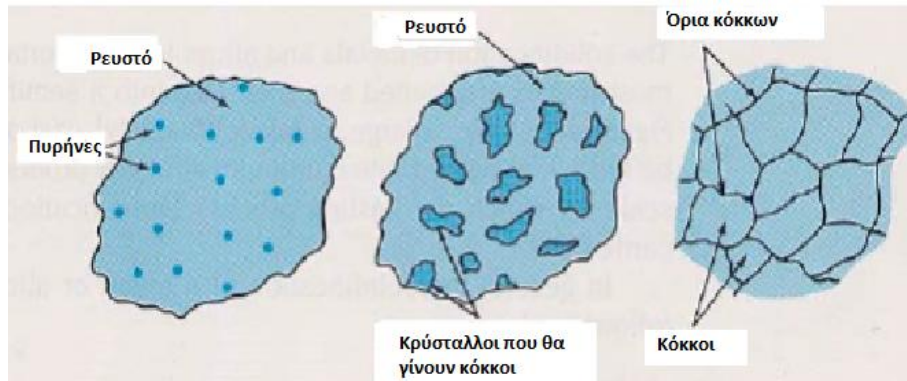


Εικόνα 1.2: Παράδειγμα διάταξης των ατόμων εντός των μετάλλων Α) Το κρυσταλλικό πλέγμα και Β) Οι κυψελίδες του κρυσταλλικού πλέγματος

1.2.1.1.2. Η κοκκώδης δομή των μετάλλων

Η μάζα ενός μεταλλικού τεμαχίου αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους που τους ονομάζουμε «κόκκους» και που στον κάθε ένα από αυτούς τα άτομα είναι διατεταγμένα με μία γεωμετρική μορφή, όπως αυτή που είδαμε στην Εικόνα 1.2. Ο σχηματισμός των κόκκων οφείλεται στον τρόπο που παράγονται τα μέταλλα. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στις διαδοχικές φάσεις της Εικόνας 1.3.

Στην αρχή το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή μορφή, κάτω από υψηλή θερμοκρασία. Ενώ η θερμοκρασία αρχίζει να ελαττώνεται, αρχίζει η στερεοποίηση. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα φαίνονται και μπορούν να περιγραφούν ως εξής:



Εικόνα 1.3: Οι διαδοχικές φάσεις στερεοποίησης του μετάλλου και ο σχηματισμός των κόκκων

Σε διάφορα σημεία της μάζας του ρευστού μετάλλου αρχίζει η στερεοποίηση. Εμφανίζονται οι πρώτοι μικροί κρύσταλλοι.

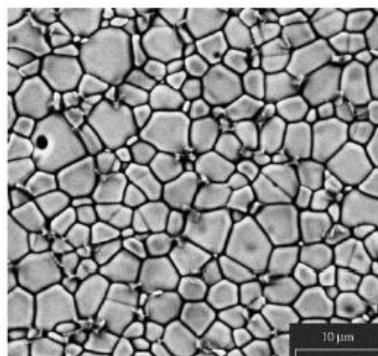
- Πάνω στους πρώτους κρυστάλλους προσκολλώνται συνεχώς νέα άτομα. Συγχρόνως εμφανίζονται και νέοι κρύσταλλοι.
- Όταν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του μετάλλου έχει ενσωματωθεί στους κρυστάλλους, αυτοί θα αρχίσουν να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους.
- Όταν η θερμοκρασία ελαττωθεί κάτω από το σημείο πήξης, τότε όλη η μάζα του μετάλλου έχει στερεοποιηθεί και οι κόκκοι έχουν ενωθεί μεταξύ τους.

Στα σημεία επαφής των κόκκων, η πολυεδρική διάταξη έχει διαταραχτεί. Τα άτομα βρίσκουν τις θέσεις ισορροπίας τους αλλά με ακανόνιστες μορφές.

Η παραπάνω διαδικασία στερεοποίησης του μετάλλου καταλήγει σε μία δομή στην οποία έχουμε:

- Τους κόκκους του μετάλλου με την κανονική κρυσταλλική δομή τους
- Τις επιφάνειες που ενώνονται οι κόκκοι μεταξύ τους, οι οποίες αποτελούν περιοχές ακαταστασίας της κρυσταλλικής δομής.

Τους κόκκους μπορούμε να τους δούμε κάτω από μικροσκόπιο, αφού γίνει η κατάλληλη επεξεργασία στην επιφάνεια του μετάλλου. Στην Εικόνα 1.4 φαίνεται μία φωτογραφία της κοκκώδους δομής ενός μετάλλου.



Εικόνα 1.4: Μικροσκοπική παρατήρηση, δείχνει την κοκκώδη δομή των μετάλλων και διακρίνονται σαφώς τα όρια των κόκκων

1.2.1.1.3. Η επίδραση της κοκκώδους δομής στις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων

Ένα μέταλλο, που θα αποτελέσει από ένα και μοναδικό κρύσταλλο, θα έσπαγε πολύ εύκολα. Οι καλές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, ελαστικότητα) οφείλονται στην αντοχή που παρουσιάζουν τα σημεία που ενώνονται οι κόκκοι μεταξύ τους. Ο κανόνας που πρέπει να γνωρίζουμε είναι: Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι ενός μεταλλικού τεμαχίου, τόσο καλύτερες είναι οι μηχανικές του ιδιότητες.

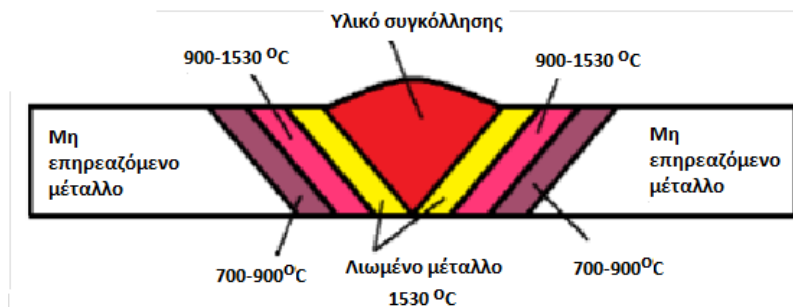
Το μέγεθος των κόκκων ποικίλλει. Για να δοθεί μία ιδέα για το μέγεθός τους, αναφέρουμε ότι η μέση διάμετρος στους χάλυβες κυμαίνεται από 0,022 mm μέχρι 0,25 mm. Οι χάλυβες με μέσο μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0,088 mm ονομάζονται λεπτόκοκκοι, ενώ πάνω από αυτό το όριο ονομάζονται χοντρόκοκκοι.

1.2.1.1.4. Η επίδραση της συγκόλλησης στην κοκκώδη δομή των μετάλλων και στην αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων τους

Αν ένα μέταλλο θερμανθεί πάνω από μία ορισμένη θερμοκρασία, αρχίζει η ανακρυστάλλωσή του. Αυτή μπορεί, μετά την ψύξη, να οδηγήσει σε άλλη κρυσταλλική δομή και να αλλάξει τις ιδιότητες του μετάλλου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι προς το καλύτερο, όταν γίνεται κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες. Όταν όμως γίνεται τυχαία, συνήθως, το αποτέλεσμα είναι η μείωση της αντοχής.

(α) Η ζώνη που επηρεάζεται θερμικά (ΘΕΖ)

Η συγκόλληση των μετάλλων γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά την ψύξη γίνεται ανακρυστάλλωση γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης. Η ζώνη επιρροής επεκτείνεται μέχρι το σημείο που η θερμοκρασία μειώνεται κάτω από ένα όριο που αποτελεί προϋπόθεση για την εμφάνιση της ανακρυστάλλωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη** και συμβολίζεται ως **ΘΕΖ**.



Εικόνα 1.5: ΘΕΖ σε έναν ανθρακούχο χάλυβα

Στη ΘΕΖ η δομή του μετάλλου μεταβάλλεται από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση.

Το αποτέλεσμα είναι, σχεδόν πάντοτε, να έχουμε μείωση της αντοχής γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης. Ο κανόνας είναι:

«Η αντοχή του μετάλλου στην ΘΕΖ συνήθως μειώνεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας η οποία προκαλεί την αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του.»

(β) Ανόπτηση- Βαφή - Επαναφορά

Δύο βασικές έννοιες που έχουν σχέση με τη δημιουργία της κοκκώδους μορφής ενός μετάλλου είναι η ανόπτηση και η βαφή. Πρόκειται για δύο θερμικές κατεργασίες που συνήθως γίνονται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Αλλά, κατά τη συγκόλληση, αυτές γίνονται αυθόρμητα και επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες.

Ανόπτηση είναι η θέρμανση ενός μετάλλου σε μία θερμοκρασία τέτοια που να αρχίζει η ανακρυστάλλωσή του. Με την εφαρμογή ενός ελεγχόμενου ρυθμού ψύξης μπορεί να προκύψει μέταλλο με την επιθυμητή κρυσταλλική δομή και το επιδιωκόμενο μέγεθος κόκκου.

Βαφή είναι η απότομη ψύξη του μετάλλου, η οποία, συνήθως, γίνεται με την εμβάπτιση του μετάλλου σε νερό. Το αποτέλεσμα είναι να μην υπάρχει χρόνος για την ομαλή ανακρυστάλλωση και να προκύπτει μέταλλο σκληρό, αλλά συγχρόνως εύθραυστο. Όταν ο ηλεκτροσυγκολλητής, μετά τη συγκόλληση, ρίχνει το καυτό τεμάχιο στο νερό, για να το ψύξει ταχύτερα, του προκαλεί βαφή, δηλαδή το κάνει σκληρό και εύθραυστο.

Ένα μεταλλικό τεμάχιο που υπεβλήθη σε βαφή, αν υποστεί ανόπτηση, θα γίνει πάλι ελαστικό, αλλά θα χάσει τη σκληρότητά του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαναφορά.

Η σημασία των προσμίξεων

Η κρυσταλλική μορφή μέσα στον κάθε κόκκο διαταράσσεται εξ αιτίας ξένων προσμίξεων. Δεν υπάρχει τρόπος παραγωγής απόλυτα καθαρού μετάλλου. Τα άτομα των προσμίξεων εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή των κόκκων και την ανατρέπουν. Συχνά, επίσης, δημιουργούν χημικές ενώσεις οι οποίες διασπείρονται μέσα στη μάζα του μετάλλου.

Σημαντική επισήμανση: Εδώ θα μπορούσε να δημιουργηθεί η εσφαλμένη εντύπωση ότι η παρουσία των προσμίξεων είναι ανεπιθύμητη. Αυτό όμως δεν είναι αληθές. Αν και υπάρχουν επιβλαβείς προσμίξεις, υπάρχουν και άλλες που είναι χρήσιμες και βελτιώνουν τις ιδιότητες των μετάλλων, όπως θα δούμε στη συνέχεια

Με τη χρήση των κατάλληλων προσμίξεων, βελτιώνονται οι ιδιότητες των μετάλλων και προκύπτουν κράματα διαφορετικών μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων π.χ. παράγονται κράματα με μεγάλη μηχανική αντοχή ή με μεγάλη ελαστικότητα ή με αντοχή στην οξειδωση κτλ. Ο κανόνας είναι:

«Οι ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις προσμίξεις τους.»

Υπάρχουν όμως και ανεπιθύμητες προσμίξεις, οι οποίες ονομάζονται ακαθαρσίες και μειώνουν τη μηχανική αντοχή του μετάλλου. Τα μικρότερα σωματίδια της ύλης, που μπορούν να βρεθούν ελεύθερα και να διατηρούν τις ιδιότητες του σώματος στο οποίο ανήκουν, λέγονται μόρια. Τα ελάχιστα σωματίδια της ύλης, τα οποία προκύπτουν από περαιτέρω διάσπαση των μορίων με χημικό τρόπο, λέγονται άτομα. Το άτομο αποτελείται από τον πυρήνα που περιέχει τα νετρόνια, που είναι ουδέτερα, και τα πρωτόνια που είναι θετικά φορτισμένα. Άρα, συνολικά ο πυρήνας θα είναι θετικά φορτισμένος. Γύρω από τον πυρήνα κινούνται σε κυκλικές τροχιές, που ονομάζονται στιβάδες, τα ηλεκτρόνια, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα. Το άτομο, για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, θα πρέπει ο αριθμός των ηλεκτρονίων να ισούται με τον αριθμό των πρωτονίων.

Οι χημικοί δεσμοί χωρίζονται σε κύριους και δευτερεύοντες.

- Οι κύριοι δεσμοί είναι: ιοντικός (ή ετεροπολικός), ομοιοπολικός και *μεταλλικός*.
- Οι δευτερεύοντες δεσμοί είναι: ο δεσμός Van der Waals και ο δεσμός υδρογόνου.

Μεταλλικός δεσμός

Ο δεσμός αυτός συναντάται στα μέταλλα και στα κράματα και δημιουργείται μεταξύ ηλεκτροθετικών στοιχείων του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων. Όσο περισσότερο αυξάνεται η ατομική ακτίνα (αυξάνεται ο αριθμός σειράς του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων) και μειώνεται ο αριθμός ηλεκτρονίων της στιβάδας σθένους (μειώνεται ο αριθμός στήλης του Περιοδικού Πίνακα των Στοιχείων), τόσο περισσότερο χαλαρώνει η δύναμη συγκράτησης των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας των ατόμων, με αποτέλεσμα να μπορούν διαφεύγουν από την "επήρεια" του πυρήνα και να μετακινούνται ελεύθερα σε ολόκληρη τη μάζα του μετάλλου. Τα ηλεκτρόνια αυτά ονομάζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια και το σύνολο των ελεύθερων ηλεκτρονίων συνιστά το λεγόμενο νέφος ηλεκτρονίων. Το "σύνολο" αυτό των ηλεκτρονίων, το

οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο, ανήκει από κοινού σε όλα τα θετικά φορτισμένα ιόντα του μετάλλου.

Από το γεγονός της ύπαρξης νέφους ηλεκτρονίων, που κατανέμεται μεταξύ των θετικών ιόντων του μετάλλου, εξηγείται η υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων. Επίσης, η πλαστικότητα των περισσοτέρων μετάλλων (δηλαδή η ικανότητα των μετάλλων να παραμορφώνονται πλαστικά) εξηγείται σε ατομικό επίπεδο με την ύπαρξη του μεταλλικού δεσμού. Κατά την επίδραση δυνάμεων πάνω στο μεταλλικό στερεό, τα άτομα μετακινούνται σε νέες θέσεις, οι οποίες είναι σταθερές, επειδή δε διαταράσσονται οι ηλεκτροστατικές έλξεις μεταξύ ατόμων - ελευθέρων ηλεκτρονίων.

1.3. Μεταλλικά κράματα [3]

Κράμα καλείται κάθε μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων (A,B,..., κ.λπ.) από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο.

Τα κράματα μετάλλων δημιουργούνται προκειμένου να συνδυαστούν ιδιότητες των βασικών συστατικών σε ένα νέο υλικό. Έτσι, για παράδειγμα, ο χάλυβας (κράμα σιδήρου με άνθρακα) είναι πιο σκληρός και ανθεκτικός από τον σίδηρο, ένα από τα βασικά συστατικά του. Βασικός λόγος, λοιπόν, παραγωγής κραμάτων είναι η βελτίωση σκληρότητας, αντοχής, βάρους, αντίστασης στη διάβρωση κ.λπ. των καθαρών (πρωτογενών) μετάλλων.

Ένα χαρακτηριστικό των κραμάτων, σε αντίθεση με τα πρωτογενή μέταλλα, είναι ότι δεν έχουν καθορισμένο σημείο τήξης, συγκεκριμένη θερμοκρασία δηλαδή, στην οποία λιώνουν. Σε αυτά υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών, μέσα στο οποίο τα κράματα βρίσκονται μεταξύ στερεάς και υγρής κατάστασης.

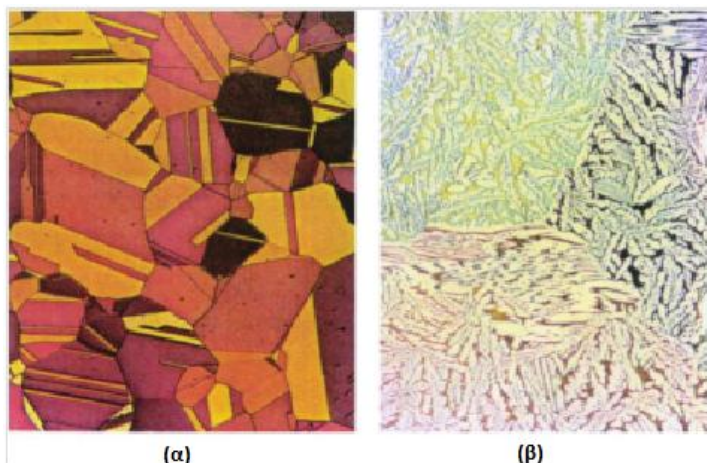
Συνηθισμένες εφαρμογές κραμάτων απαντούν στα πολύτιμα μέταλλα, στις κατασκευές, στις οικοδομές, κ.λπ.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του κράματος είναι ότι τα συστατικά του στοιχεία συμμετέχουν στη δημιουργία μίας κοινής κρυσταλλικής δομής, ή οποία προκαλείται συνήθως με σύντηξη των στοιχείων του κράματος και ακόλουθη στερεοποίηση (πήξη). Η οπτική εμφάνιση ενός μετάλλου ή κράματος με τη βοήθεια μικροσκοπίου (π.χ. μεταλλογραφικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης), μετά από κατάλληλη προετοιμασία, είναι γνωστή με τον όρο μικροδομή.

1.3.1. Μικροδομή κραμάτων

Συστατικά στοιχεία της μικροδομής είναι οι φάσεις και οι κόκκοι. Κόκκος ή κρυσταλλίτης ή απλώς κρύσταλλος είναι η δομική μονάδα των μεταλλικών υλικών και αποτελεί κάθε περιοχή του υλικού, που έχει προκύψει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στο χώρο, με τον ίδιο προσανατολισμό. Οι δομή κόκκων είναι η συνηθέστερα συναντώμενη δομή, στην περίπτωση μετάλλων και κραμάτων, και προκύπτει από τη στερεοποίηση του υλικού μετά από τη χύτευση, με τους μηχανισμούς πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, που θα αναπτυχθούν σε επόμενη παράγραφο. Το μέγεθος των κόκκων ενός υλικού είναι καθοριστικό για τις συναγόμενες μηχανικές του ιδιότητες. Έτσι, ένα λεπτόκοκκο υλικό έχει μεγαλύτερη σκληρότητα και μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με ένα χονδρόκοκκο υλικό.

Φάση είναι μια ομογενής περιοχή υλικού. Ομογενής σημαίνει ότι έχει παντού την ίδια χημική σύσταση, την ίδια κρυσταλλική δομή και τις ίδιες ιδιότητες. Στην παρατήρηση ενός κράματος με οπτικό μικροσκόπιο, οι υπάρχουσες φάσεις ξεχωρίζουν μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής τονικότητας (contrast) που τις χαρακτηρίζει. Η μικροδομή, άρα, ενός κράματος μπορεί να αποτελείται από πολλούς κόκκους, αλλά από μια φάση (σχήμα 1.1α) ή από δύο φάσεις (σχήμα 1.1β) ή από περισσότερες φάσεις. Σε κάθε κόκκο μπορεί να υπάρχουν μία ή περισσότερες φάσεις.



Σχήμα 1.1: (α) Μικρογραφία μονοφασικού α-ορείχαλκου (67% Cu -33% Zn) και (β) μικρογραφία διφασικού α+β'-ορείχαλκου (60% Cu -40% Zn). (Μεγέθυνση x100)

1.3.2. Ανάπτυξη πολυκρυσταλλικής δομής

Τα μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές αποτελούνται από κόκκους ή κρυστάλλους, που δημιουργούνται πρωτογενώς κατά τη διαδικασία της πήξης (στερεοποίησης) μετά από τη χύτευση. Η δημιουργία της πολυκρυσταλλικής δομής περιλαμβάνει τα εξής στάδια : (α) πυρηνοποίηση και (β) ανάπτυξη.

Η πυρηνοποίηση είναι το στάδιο δημιουργίας φύτρων ή εμβρύων κρυστάλλων, όταν η θερμοκρασία είναι λίγο χαμηλότερη του σημείου πήξεως, που καταλαμβάνουν μικρό όγκο μέσα στο περιβάλλον υγρό. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, οι πυρήνες (φύτρα) αυξάνουν σε αριθμό και μέγεθος. Η ανάπτυξή τους συνεχίζεται μέχρι τα όριά τους να συγκρουσθούν και να καταλάβουν όλο τον όγκο του τήγματος, δημιουργώντας έτσι τους κόκκους του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των αρχικών πυρήνων κρυστάλλωσης και άρα και ο τελικός αριθμός των κόκκων. Για ένα συγκεκριμένο όγκο υλικού, μεγάλος αριθμός πυρήνων κρυστάλλωσης σημαίνει ότι το τελικά δημιουργούμενο στερεό θα είναι λεπτόκοκκο. Στην αντίθετη περίπτωση, το στερεό θα έχει λίγους κόκκους και μεγάλου 10 μεγέθους και ονομάζεται χονδρόκοκκο. Ένα λεπτόκοκκο υλικό παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από ένα χονδρόκοκκο.

1.3.3. Η επίδραση της κοκκώδους δομής στις μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων

Ένα μέταλλο, που θα αποτελείτο από ένα και μοναδικό κρύσταλλο, θα έσπαγε πολύ εύκολα. Οι καλές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή, ελαστικότητα) οφείλονται στην αντοχή που παρουσιάζουν τα σημεία που ενώνονται οι κόκκοι μεταξύ τους. Ο κανόνας που πρέπει να γνωρίζουμε είναι:

Όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι ενός μεταλλικού τεμαχίου, τόσο καλύτερες είναι οι μηχανικές του ιδιότητες.

Το μέγεθος των κόκκων ποικίλλει. Για να δοθεί μία ιδέα για το μέγεθός τους, αναφέρουμε ότι η μέση διάμετρος στους χάλυβες κυμαίνεται από 0,022 mm μέχρι 0,25 mm. Οι χάλυβες με μέσο μέγεθος κόκκου μικρότερο από 0,088 mm ονομάζονται λεπτόκοκκοι, ενώ πάνω από αυτό το όριο ονομάζονται χοντρόκοκκοι.

1.4. Χάλυβες

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζεται η θεωρία των χαλύβων, με σκοπό την κατανόηση των κραμάτων που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

1.4.1. Εισαγωγή [1][2][3]

Χάλυβες ονομάζονται τα σιδηρούχα κράματα με περιεκτικότητα έως 2% άνθρακα και αποτελούν πάνω από το 80% των βιομηχανικών κραμάτων. Αυτό οφείλεται τόσο στο χαμηλό τους κόστος όσο και στη σχετική ευκολία παραγωγής χαλύβων σε μεγάλες ποσότητες με ακριβείς προδιαγραφές.

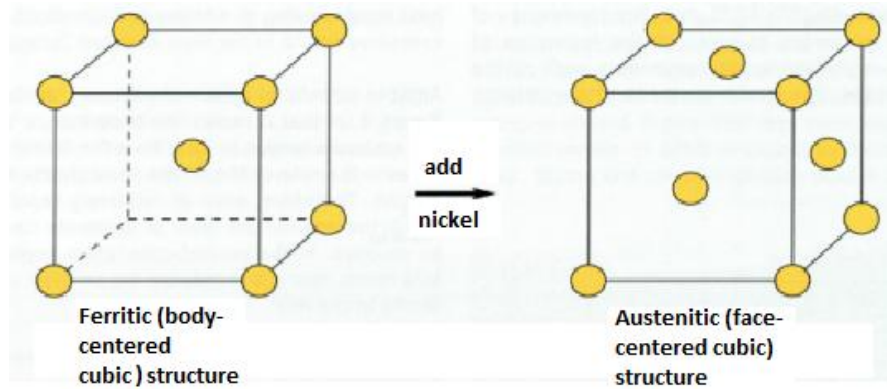
Οι ακόλουθοι τρεις παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ευρεία χρήση του χάλυβα:

(α) τα μεγάλα παγκόσμια αποθέματα μεταλλεύματος (ο φλοιός της γης περιέχει περίπου 4% σίδηρο Fe) που ανάγονται εύκολα στη μεταλλική κατάσταση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανακυκλώσεως του παλαιοσιδήρου (scrap)

(β) το σημείο τήξεως του σιδήρου (1539°C) επιτρέπει τη θερμική ενεργοποίηση διεργασιών σε θερμοκρασίες ($T > 400^\circ\text{C}$) που επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα και ελέγχονται βιομηχανικά

(γ) η αλλοτροπία του σιδήρου και ο μετασχηματισμός φάσεων στους χάλυβες (π.χ. ο μαρτενιτικός μετασχηματισμός) επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων. Αλλότροπα στοιχεία ονομάζονται αυτά τα οποία εμφανίζονται με περισσότερες της μίας φυσικές μορφές, αφού τα άτομά τους συνδυάζονται με ποικίλους τρόπους (π.χ. ο γραφίτης και το διαμάντι είναι αλλότροπα του άνθρακα).

Τα παραπάνω καθιστούν τους χάλυβες το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Κυρίαρχο ρόλο παίζει η αλλοτροπία του σιδήρου. Η διαμόρφωση της δομής και των ιδιοτήτων των χαλύβων πραγματοποιείται με τις θερμικές κατεργασίες (κυριότερη των οποίων είναι η ανόπτηση). Η μεγαλύτερη ποικιλία μικροδομών στους χάλυβες σχηματίζεται κατά το μετασχηματισμό του ωστενίτη όταν αυτός ψύχεται. Έτσι, βάσει της λόγω της αλλοτροπίας του σιδήρου: έχουμε τη φάση του $\alpha\text{-Fe}$ BCC (κυβικό ενδοκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα) να κυριαρχεί μέχρι τους 910°C , τη φάση $\gamma\text{-Fe}$ FCC (κυβικό ολοεδρικό κεντρωμένο) μεταξύ 910 και 1400°C και τον $\alpha\text{-Fe}$ να επανεμφανίζεται μεταξύ 1400°C και σημείου τήξεως (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Με την προσθήκη Ni η κρυσταλλική δομή αλλάζει από φερριτική κυβικά ενδοκεντρωμένη (λίγο ή και καθόλου Ni) σε κυβικά ολοεδρικά κεντρωμένη- ωστενιτική (τουλάχιστον 6% Ni).

Το στερεό διάλυμα του α -Fe με άνθρακα ονομάζεται φερρίτης, ενώ το αντίστοιχο στερεό διάλυμα του γ -Fe με άνθρακα ονομάζεται ωστενίτης. Βασική διαφορά των δύο φάσεων αποτελεί η στερεά διαλυτότητα του άνθρακα η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη στον ωστενίτη απ' ό τι στο φερρίτη. Για παράδειγμα ο ωστενίτης μπορεί να διαλύσει 2% άνθρακα ενώ ο φερρίτης μόλις 0,02% κ.β.

Αν και το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο των χαλύβων είναι ο άνθρακας, τις περισσότερες φορές προστίθενται και άλλα κραματικά στοιχεία για διάφορους λόγους. Έτσι στους περισσότερους χάλυβες θα συναντήσουμε το Mn και το Si ή ακόμα το Cr, το Ni και το Mo. Ο ρόλος ενός κραματικού στοιχείου είναι σύνθετος. Επηρεάζει την στερεά διαλυτότητα των άλλων κραματικών στοιχείων, τη θερμοδυναμική σταθερότητα των φάσεων και εν γένει τη διαμόρφωση της μικροδομής στους χάλυβες καθώς και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες εξαιτίας της τάσης τους να προωθούν είτε την ωστενιτική είτε τη φερριτική μικροδομή. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι κυριότερες επιδράσεις των κραματικών στοιχείων.

Στοιχεία ενίσχυσης της φερριτικής δομής

Χρώμιο (Cr): πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο. Τα **καρβίδια** του χρωμίου αυξάνουν την σκληρότητα και τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα. Επιπλέον το χρώμιο αυξάνει την αντοχή σε οξειδωση (συμπεριλαμβανομένης και αυτής που προκαλείται από υψηλές θερμοκρασίες) και διάβρωση. Αποτελεί το βασικό κραματικό στοιχείο των ανοξειδωτων χαλύβων.

Μολυβδαίνιο (Mo): πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο που αυξάνει ταυτόχρονα και την **εμβαπτότητα** των χαλύβων. Επίσης προσδίδει περαιτέρω αύξηση της αντοχής στη διάβρωση και ιδιαίτερα στη μικροδιάβρωση (pitting corrosion) και τη διάβρωση κοιλοτήτων (crevice corrosion) – αναλύονται παρακάτω. Τέλος, το μολυβδαίνιο (όπως και το νιόβιο) αυξάνει τη μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τιτάνιο (Ti) και Νιόβιο (Nb): πρόκειται για καρβιδιογόνα στοιχεία που συντελούν στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής με τον σχηματισμό καρβιδίων ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν την αύξηση του μεγέθους των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Και τα δύο παίζουν το ρόλο του **σταθεροποιητή** και συμβάλουν στη μείωση του ρίσκου της περικρυσταλλικής διάβρωσης (intergranular corrosion) – αναλύεται παρακάτω.

Πυρίτιο (Si) και Αλουμίνιο (Al): είναι τα δύο συστατικά που προστίθενται για την αποξείδωση του χάλυβα. Υψηλή περιεκτικότητα πυριτίου οδηγεί σε μείωση της κατεργασιμότητας του χάλυβα. Και τα δύο αυξάνουν την αντοχή στην οξείδωση σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας.

Στοιχεία ενίσχυσης της ωστενιτικής δομής

Νικέλιο (Ni): προσδίδει ολκιμότητα και αυξάνει τη δυσθραυστότητα των χαλύβων, ενώ προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας μεταβάσεως από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά θραύσεως. Σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 7% σταθεροποιεί την ωστενιτική δομή σε θερμοκρασία δωματίου αποτελώντας ένα σημαντικό στοιχείο των ανοξείδωτων χαλύβων. Το νικέλιο συμβάλλει επίσης στη γενικότερη αντοχή στη διάβρωση.

Άνθρακας (C): αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο στους χάλυβες συμβάλλοντας σημαντικά στην ισχυροποίησή τους. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα αυξάνονται η σκληρότητα, η αντοχή και η εμβαπτότητα, ενώ μειώνονται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα.

Άζωτο (N): αυξάνει τη σκληρότητα και την αντοχή, ενώ παράλληλα μειώνει την ολκιμότητα. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες των ωστενιτικών και των διφασικών (duplex) ανοξείδωτων χαλύβων, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την αντοχή τους στη μικροδιάβρωση και τη διάβρωση κοιλοτήτων.

Μαγγάνιο (Mn): συναντάται σε όλους τους χάλυβες σε περιεκτικότητες πάνω από 0,2% και προστίθεται κυρίως για αποθείωση αφού σχηματίζει τα σουλφίδια MnS. Ο σχηματισμός αυτών των σουλφιδίων ευνοεί την κατεργασιμότητα και τη συγκολλησιμότητα του χάλυβα. Βελτιώνει τη συμπεριφορά του χάλυβα στην κατεργασία εν θερμό (έλαση και σφυρηλάτηση) και δύναται να αντικαταστήσει ως ένα σημείο (max 15%) το νικέλιο στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Χαλκός (Cu): αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση από θειικό οξύ.

Ουδέτερα στοιχεία

Θείο (S) και Φώσφορος (P): αποτελούν ανεπιθύμητες ακαθαρσίες. Επιδρούν μειώνοντας την ολκιμότητα, τη δυσθραυστότητα, τη συγκολλησιμότητα και την αντοχή σε κρούση. Επιπλέον, μειώνουν την αντοχή στη διάβρωση και αυξάνουν την τάση ρωγμάτωσης του χάλυβα.

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

Ως προς τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- χάλυβες διαμόρφωσης και
- χυτοχάλυβες

Ως προς τις χρήσεις τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- χάλυβες κατασκευών
- εργαλειοχάλυβες
- ανοξείδωτους ή πυρίμαχους
- χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών κλπ.

Ο σίδηρος και ο χάλυβας, που αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μεταλλικό κράμα διαβρώνεται σε πολλές διαφορετικές συνθήκες. Η επιλογή για τη χρήση τους βασίζεται κυρίως σε ιδιότητες όπως η αντοχή, η ευκολία διαμόρφωσης και το κόστος και δευτερευόντως στην αντοχή τους σε διάβρωση.

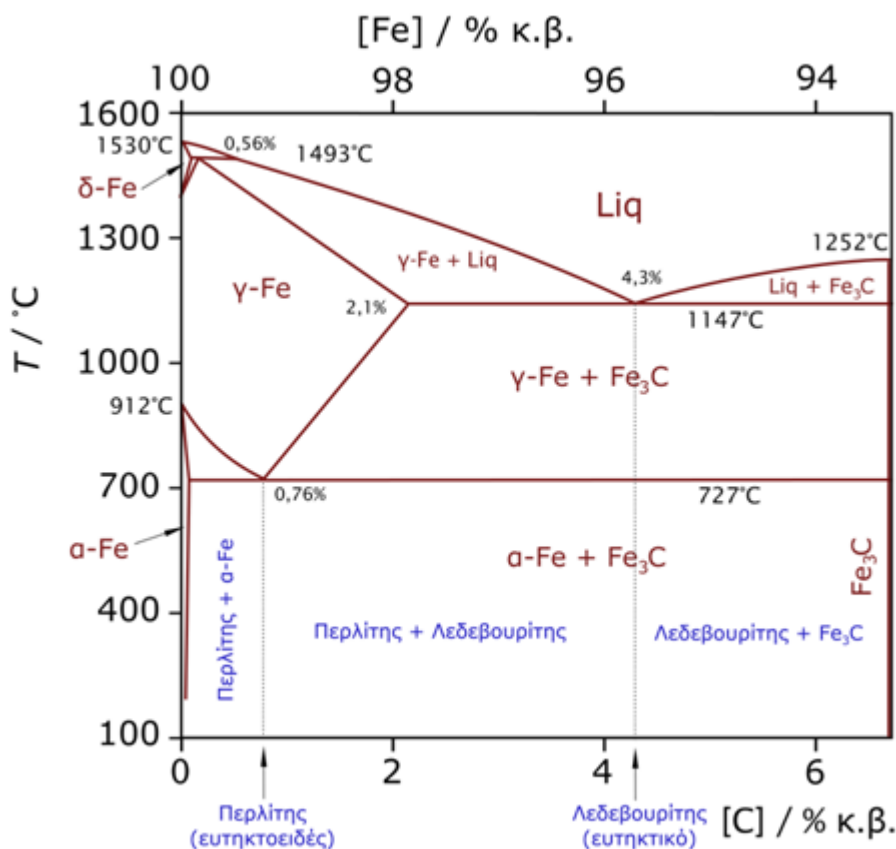
Όλοι οι χάλυβες και οι χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης διαβρώνονται σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Σε κάποιες περιπτώσεις η προσθήκη Cu σε ποσοστό περίπου 3% μπορεί να επιφέρει μείωση του ρυθμού διάβρωσης σε ποσοστό 25 ή και 50%. Στοιχεία όπως ο Cu, ο P, το Cr και το Ni έχει αποδειχτεί ότι βελτιώνουν την αντίσταση σε διάβρωση. Ο σχηματισμός συμπαγούς, στενά συνδεδεμένης σκουριάς, ως προϊόν της διάβρωσης, μειώνει το ρυθμό της διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης είναι συνήθως υψηλότερος τον πρώτο χρόνο της έκθεσης στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τα επόμενα χρόνια, ενώ αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ρύπανσης και της υγρασίας.

1.4.2. Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες καλούνται τα κράματα Fe-C, τα οποία εκτός από τις συνήθεις ακαθαρσίες (έως 0.04%P και 0.05%S), δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης εκτός από μικρά ποσοστά σε Mn (0.25-1%). Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα σιδήρου – άνθρακα Fe-C.

Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Υποευτηκτοειδείς, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο από 0.80% κ.β. Όσοι περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό από 0.10% έως 0.25% ονομάζονται μαλακοί χάλυβες, από 0.20% έως 0.50% χάλυβες μετρίου άνθρακα και, τέλος, για ποσοστά μεγαλύτερα από 0.50% ονομάζονται χάλυβες υψηλού άνθρακα.
- Ευτηκτοειδείς, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.80% κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.80-2.00% κ.β.



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα Fe-C

Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, η μηχανική αντοχή των χαλύβων αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητά τους ελαττώνεται. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά και καθιστά το χάλυβα δύσκολα συγκολλησιμο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχουν χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα, που οφείλουν την αντοχή τους στην κραμάτωση.

1.4.3. Κραματωμένοι χάλυβες

Το ποσοστό του άνθρακα στους κραματωμένους χάλυβες δεν υπερβαίνει στην πράξη το 1% ενώ τα συνήθη στοιχεία προσθήκης είναι : Ni, Mn, Cr, Si και Mo (κύριες προσθήκες) και V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb (δευτερεύουσες προσθήκες). Για τη βελτίωση διαφόρων ιδιοτήτων τους, οι χάλυβες κραματώνονται με στοιχεία ιδανικά για την απαίτηση (Πίνακας 1.3).

Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%.
- Μετρίως κραματωμένους, με ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10% κ.β.
- Ισχυρά κραματωμένους, όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10% κ.β.

Γενικά οι κοινοί χάλυβες παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση και ανεπαρκή δυσθραυστότητα, ιδιότητες που βελτιώνονται με προσθήκη στοιχείων. Ανάλογα με την προσθήκη στοιχείων μπορούμε να πάρουμε χάλυβες διαφόρων μικροδομών, όπως μαρτενσιτικούς χάλυβες οι οποίοι έχουν δομή μαρτενσίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος με κύρια χαρακτηριστικά την αυξημένη σκληρότητα και αντοχή και τη μειωμένη ολκιμότητα, ωστενιτικούς χάλυβες με μικροδομή ωστενίτη μετασταθούς κατάστασης, φερριτικούς χάλυβες, κλπ (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Κύρια στοιχεία κραμάτωσης των κοινών χαλύβων

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

1.4.4. Χάλυβες υψηλής αντοχής (HTS) [5] [9] [10]

Η γάστρα του πλοίου και οι δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από κοινό ναυπηγικό χάλυβα. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα μικρότερου πάχους ελάσματα και χαμηλότερο βάρος, σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες.

Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ένας χάλυβας υψηλής αντοχής:

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

Ωστόσο, ο χάλυβας υψηλής αντοχής υφίσταται μεγαλύτερες τάσεις (λόγω του μειωμένου πάχους), συνεπώς η απόξεση των προστατευτικών επικαλύψεων γίνεται πιο γρήγορα, άρα αυξάνεται η πιθανότητα έναρξης ρωγμής και συνεπώς ο κίνδυνος διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση.

Τέλος, λόγω του μειωμένου πάχους κατά τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής, μειώνεται και το περιθώριο διάβρωσης (περιθώριο διάβρωσης, corrosion margin: είναι το πάχος του χάλυβα που μπορεί να θυσιαστεί χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων αντοχής στην κατασκευή). Συνεπώς κατασκευές από χάλυβα HS μπορεί να είναι ευπαθέστερες στη διάβρωση από τμήματα από κοινό χάλυβα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας AH36, που ανήκει στους χάλυβες υψηλής αντοχής, καθώς και ο S690 που ανήκει στους HSLA (παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα).

1.4.4.1. Ο ναυπηγικός χάλυβας AH36

Η ονομασία και κατάταξη του ως ναυπηγικού χάλυβα τύπου AH36 , ακολουθεί το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τον Lloyd's Register of Shipping Steels. Με αυτήν την ονομασία είναι παγκόσμια γνωστός, ωστόσο συναντάται και με άλλη ονομασία , σύμφωνα με την κωδικοποίηση κάποιων χωρών (πχ K11852 Η.Π.Α, A36 Ρωσία, 1.0565 Γερμανία κλπ). Η χημική σύσταση του εν λόγω χάλυβα δίνεται στον πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Χημική σύσταση (% κ.β.) σε στοιχεία κραμάτωσης του χάλυβα AH36.

Χημική σύσταση	% max. unless specified in range
C	0.18
Mn	0.90–1.60
Si	0.10–0.50
P	0.035
S	0.035
Al (acid Soluble) min	0.015
Nb	0.02–0.05
V	0.05–0.10
Ti	0.02
Cu	0.35
Cr	0.20
Ni	0.40
Mo	0.08

Το όριο διαρροής του χάλυβα είναι 36 Kp/mm² ή 353.2 MPa. Σύμφωνα με τον IACS (International Association of Classification Societies) οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 1.3).

Πίνακας 1.3: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

Grade	Ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση R_{eHr} σε N/mm ²	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό R_{eHr} σε N/mm ²
A B D E	235	400 - 520
AH32 DH32 EH32 FH32	315	440 - 570
AH36 DH36 EH36 FH36	355	490 - 630
AH40 DH40 EH40 FH40	390	510 - 660

Για πάχη έως 12.5 mm (0.50 in) ο χάλυβας είναι συνήθως ημι-καθισχυασμένος, δηλαδή μερικώς αποξειδωμένος, ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο χάλυβας είναι καθισχυασμένος, δηλαδή πλήρως αποξειδωμένος. Επίσης, για πάχος ελάσματος έως 12.5 mm η ελάχιστη περιεκτικότητα σε Mn μπορεί να φτάσει το 0.70% κ.β., ενώ για τέτοια πάχη και για ημι-καθισχυασμένο χάλυβα, η κατώτερη περιεκτικότητα σε Si μπορεί να είναι χαμηλότερη του 0.10% κ.β.

Όταν χρησιμοποιείται ένα εκ των Al, Nb και V πρέπει να ικανοποιείται η ελάχιστη περιεκτικότητα που έχει οριστεί για το καθένα, ενώ όταν γίνεται συνδυασμός, το συνολικό άθροισμα της περιεκτικότητας σε Al, Nb και V δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.12% κ.β.

Η σκληρότητα του χάλυβα AH36 είναι της τάξης των 180 Vickers.

Η ποσότητα του ισοδύναμου άνθρακα (equivalent carbon content-ECC) του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 δίνεται από τη σχέση:

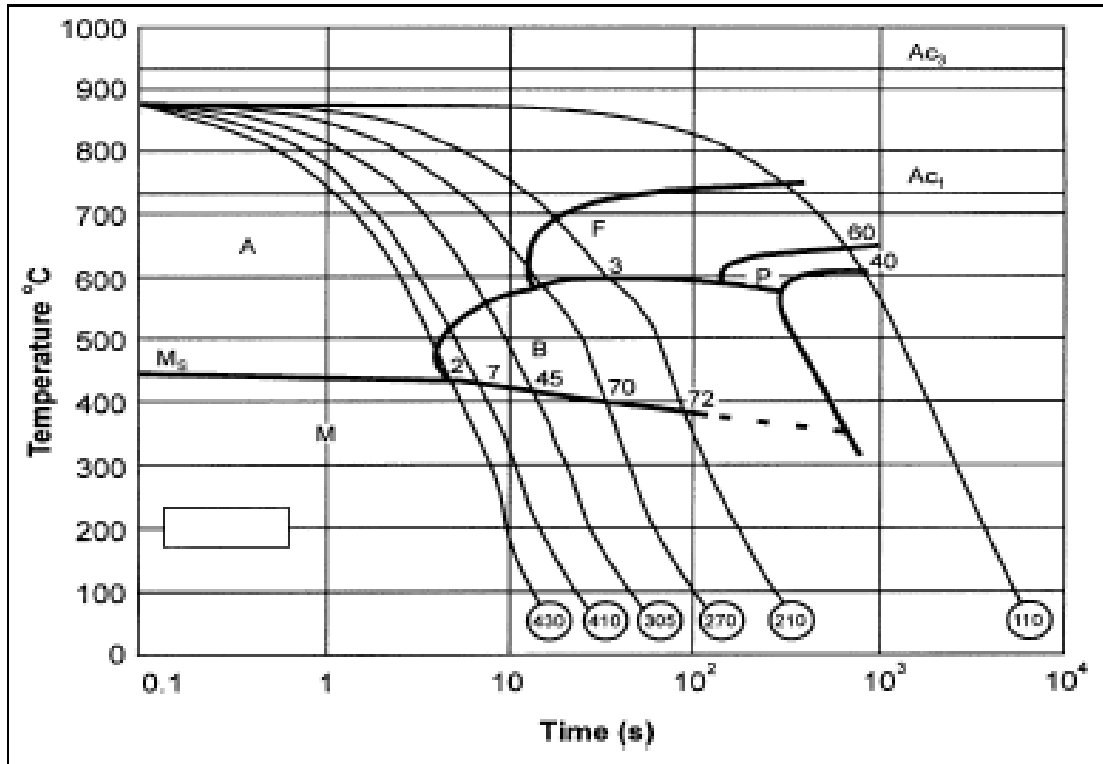
$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$$

Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα C_{eq} για τον AH36 ποικίλει από 0.38 – 0.57, αφού υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση στην περιεκτικότητα του Mn. Συνήθως η τιμή του C_{eq} για τον AH36 του εμπορίου δεν ξεπερνάει το 0.40.

Συνήθως η τιμή του C_{eq} για τον AH36 του εμπορίου δεν ξεπερνάει το 0,40. Για τιμή του C_{eq} ίση με 0,38 υπάρχει εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα ρωγμάτωσης στη Θ.Ε.Ζ., ακόμα και με σχετικά υψηλούς ρυθμούς απόψυξης. Αντίθετα, τιμές του C_{eq} άνω του 0,48 δείχνουν υψηλές πιθανότητες ρωγμάτωσης, ακόμα και με χαμηλούς ρυθμούς απόψυξης.

Τα CCT διαγράμματα παρέχουν πληροφορίες για τη μικροδομή, κάτω από συνθήκες μη ισορροπίας κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης. Τα διαγράμματα αυτά έχουν συνεισφέρει σημαντικά στη κατανόηση αλλά και βελτίωση των μεταλλουργικών και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων. Έχουν άμεση σχέση και επηρεάζονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα στοιχεία κραμάτωσης, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο καθώς και τη θερμοκρασία. Τα CCT δείχνουν την επίδραση των διαφόρων κραματικών στοιχείων στους θερμικούς μετασχηματισμούς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT του χάλυβα AH36.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα CCT για τον χάλυβα AH36

1.4.4.2 Χρήση χάλυβα AH36

Η γάστρα του πλοίου και οι δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από κοινό ναυπηγικό χάλυβα. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα μικρότερου πάχους ελάσματα και χαμηλότερο βάρος, σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας AH36, που ανήκει στους χάλυβες υψηλής αντοχής.

Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36:

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

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται τα στοιχεία κραμάτωσης συνήθη χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής.

Πίνακας 1.3: Στοιχεία κραμάτωσης κοινού ναυπηγικού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής

	% max. unless specified in range
--	---

Χημική σύσταση	Κοινός χάλυβας	Χάλυβας υψηλής αντοχής
C	0.18- 0.21	0.18
Mn	min 0.60	0.90-1.60
Si	0.35 – 0.50	0.10-0.50
P	0.035	0.035
S	0.035	0.035
Al (acid Soluble) min	-	0.015
Nb	-	0.02-0.05
V	-	0.05-0.10
Ti	-	0.02
Cu	-	0.35
Cr	-	0.20
Ni	-	0.40
Mo	-	0.08

Ωστόσο, ο χάλυβας υψηλής αντοχής υφίσταται μεγαλύτερες τάσεις (λόγω του μειωμένου πάχους), συνεπώς η απόξεση των προστατευτικών επικαλύψεων γίνεται πιο γρήγορα, άρα αυξάνεται η πιθανότητα έναρξης ρωγμής και συνεπώς ο κίνδυνος διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση. Τέλος, λόγω του μειωμένου πάχους κατά τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής, μειώνεται και το περιθώριο διάβρωσης (Περιθώριο διάβρωσης, corrosion margin : είναι το πάχος του χάλυβα που μπορεί να θυσιαστεί χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων αντοχής στην κατασκευή). Συνεπώς κατασκευές από χάλυβα HS μπορεί να είναι ευπαθέστερες στη διάβρωση από αντίστοιχες από κοινό χάλυβα.

Η χημική σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες, όπως δίνονται από τους αναγνωρισμένους Νηογνώμονες, περιγράφονται στους Πίνακες 1.4 και 1.5 αντίστοιχα παρακάτω:

Πίνακας 1.4: Χημική σύσταση του AH36 σύμφωνα με τους νηογνώμονες ABS, BV, DNV&GL

AH36							
Grade	Χημική σύσταση (%)						
	C≤	Mn≤	Si≤	P≤	S≤	Al≤	Cu≤
AH36	0.18	0.90-1.60	0.50	0.035	0.035	0.015	0.30

Πίνακας 1.5: Μηχανικές ιδιότητες του AH36 σύμφωνα με τους νηογνώμονες KR, LR, NK και RINA

AH36				
Grade	Μηχανικές Ιδιότητες			
	Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	% Επιμήκυνση σε 2 in. (50 mm) min.	Θερμοκρασία δοκιμής κρούσης (°C)
AH36	490-620	355	21	0

1.4.5 Μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής (HSLA) [6] [7] [8] [12] [13]

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

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

1.4.5.1 Ο HSLA χάλυβας S690QL

Η ονομασία και κατάταξη του ως μικροκραματωμένος χάλυβας υψηλής αντοχής είναι σύμφωνα με το πρότυπο A514 της ASTM και προέρχεται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Νηογνωμόνων (International Association of Classification Societies, IACS). Τα πρότυπα EN10029 και EN10064 ορίζουν τις ανοχές των χαλύβων αυτών.

Το όνομά του συντίθεται από τα παρακάτω στοιχεία:

- S: Structural Steel
- 690: minimum yield strength (MPa)
- Q: quenching & tempering
- L: low notch toughness testing temperature

Ο S690QL έχει περιορισμό στην περιεκτικότητα του άνθρακα, $C \leq 0.20\%$, γεγονός που διευκολύνει τη συγκολλητότητά του. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων του γίνεται προσθήκη και άλλων στοιχείων (για παράδειγμα η πρόσθεση νιόβιου (Nb) και βόριου (B) αποξειδώνουν τον χάλυβα και συντελούν στην κατασκευή ενός πιο λεπτόκοκκου κράματος).

Η χημική σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες περιγράφονται στους Πίνακες 1.6 και 1.7 αντίστοιχα παρακάτω:

Πίνακας 1.6: Μηχανικές ιδιότητες του S690QL

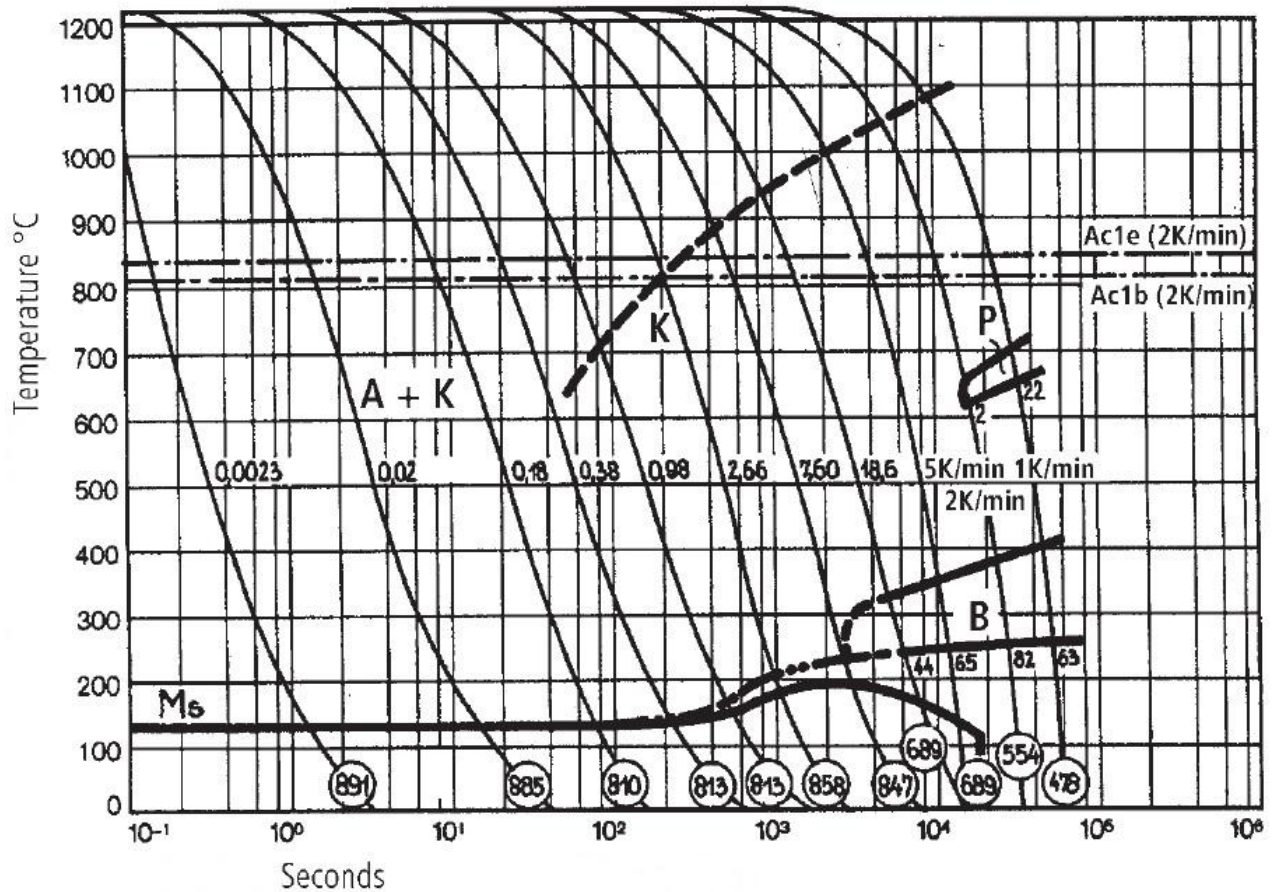
Grade	Μηχανικές Ιδιότητες						% Min. Επιμήκυνση μετά τη θραύση
	Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (MPa)			Όριο διαρροής (MPa)			
Ονομαστικό πάχος (mm)			Ονομαστικό πάχος (mm)				
≥3	≥50	≥100	≥3≤50	≥50	≥100		
≤50	≤100	≤150		≤100	≤150		
S690QL	690	650	630	770/940	760/930	710/900	14

Πίνακας 1.7: Χημική σύσταση του S690QL

S690QL							
Grade	Χημική σύσταση (%)						
	C≤	Mn≤	Si≤	P≤	S≤	Al≤	Cu≤
S690QL	0.20	0.90- 1.60	0.80	0.025	0.015	0.015	0.30
	N≤	B≤	Ni ≤	Ti≤	V≤	Zr≤	Nb≤
	0.015	0.0050	2.0	0.05	0.12	0.15	0.06

Τα CCT διαγράμματα παρέχουν πληροφορίες για τη μικροδομή, κάτω από συνθήκες μη ισορροπίας κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης. Τα διαγράμματα αυτά έχουν συνεισφέρει σημαντικά στη κατανόηση αλλά και βελτίωση των μεταλλουργικών και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων. Έχουν άμεση σχέση και επηρεάζονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα στοιχεία κραμάτωσης, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο καθώς και τη θερμοκρασία. Τα CCT δείχνουν την επίδραση των διαφόρων κραματικών στοιχείων στους θερμικούς μετασχηματισμούς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT του χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης S690:



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα CCT του χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης S690 [11]

1.4.5.2 Κατεργασίες των S690QL χαλύβων

Κατά την παραγωγή αυτού του κράματος, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη σύσταση των διαφόρων φάσεων που το αποτελούν, ώστε να είναι πλήρως καθορισμένες οι ιδιότητες καθεμιάς περιοχής. Οι φάσεις που υπάρχουν στη δομή τους είναι που τους δίνουν τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες, και τους καθιστούν εύκολα συγκολλησίμους όταν πρόκειται για ελάσματα μικρού πάχους (περίπου 12 mm).

Ένας βασικός προβληματισμός είναι πως ο S690QL είναι επιρρεπής στο φαινόμενο της ψυχρής ρωγμάτωσης, που προκύπτει από τις θερμομηχανικές διαδικασίες κατά το στάδιο της παραγωγής, σε ημιτελή ελάσματα και σε αυξημένες θερμοκρασίες.

Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, το υλικό θερμαίνεται ώστε να περάσει στην ωστενιτική περιοχή (άνω των 723° C), και όταν η ανακρυστάλλωση ολοκληρωθεί, ακολουθούν οι θερμικές κατεργασίες βαφή και επαναφορά.

Ο S690 υπόκειται στις θερμικές κατεργασίες βαφή και επαναφορά ώστε να αποκτήσει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα:

- με τη βαφή (quench) το κράμα αποψύχεται με ταχύτητα σε χαμηλότερη θερμοκρασία (T_1) από αυτήν της ισορροπίας του (T), με αποτέλεσμα η αρχική δομή του κράματος να παραμένει ίδια, αλλά σε μετασταθή πλέον κατάσταση. Αυτό συμβαίνει λόγω της ταχύτατης μείωσης της θερμοκρασίας, όπου ο μεταλλουργικός μετασχηματισμός δεν

προλαβαίνει να συμβεί. Αποτέλεσμα της βαφής είναι αφενός η αυξημένη σκληρότητα του κράματος, και αφετέρου η ελάττωση της ολκιμότητάς του.

- Κατά την επαναφορά μετά τη βαφή (tempering), το κράμα θερμαίνεται σε θερμοκρασία T_2 , όπου $T_1 < T_2 < T$, παραμένει σε αυτήν για αρκετό χρόνο, και ύστερα αποψύχεται στον αέρα. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη καθώς ελαττώνει τη σκληρότητα του κράματος λόγω της βαφής. Επίσης μέσω τη επαναφοράς αυξάνει η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα του υλικού. Οι παράμετροι της επαναφοράς (T_2 και παραμονή σε αυτή) επιλέγονται ώστε να είναι συμβατές και αξιοποιήσιμες οι τελικές τιμές της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας.

1.4.5.3 Συγκολλησιμότητα του S690QL

Η συμμετοχή κραμάτων τέτοιου τύπου σε συγκολλήσεις είναι δυνατή, αν και θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε κάποιες παραμέτρους. Για παράδειγμα, το φαινόμενο της ψυχρής ρωγμάτωσης που απειλεί το κράμα, καθιστά αναγκαία την προθέρμανση των τεμαχίων. Η προθέρμανση αυτή γίνεται σε θερμοκρασία άνω των 140°C για πάχη συγκόλλησης από 10.1 μέχρι 20 mm. Αυξανόμενου του πάχους, η προθέρμανση μπορεί να αυξηθεί (για παράδειγμα σε πάχος 15 mm προτείνεται προθέρμανση των ελασμάτων στους $150\text{-}200^\circ\text{C}$). Η προθέρμανση όμως δεν θα πρέπει ποτέ να ξεπεράσει τους 200°C , καθώς δύναται να αλλοιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος, που απέκτησε από την πρωτότερη κατεργασία και από την διαδικασία της μικροκραμάτωσης.

Επίσης θα πρέπει να είναι αυστηρά ελεγχόμενη τόσο η πρόσδοση θερμότητας κατά τη διαδικασία, αλλά και η θερμική κατεργασία μετά το πέρας της συγκόλλησης (Post Weld Heat Treatment- PWHT).

Παράλληλα καθορίζεται ο ισοδύναμος άνθρακας του κράματος, ο οποίος δίνεται από τον Πίνακα 1.8.

Πίνακας 1.8: Ισοδύναμος άνθρακας ανάλογα με το πάχος και τη χημική σύσταση του S690QL

Πάχος (mm)	Ισοδύναμος άνθρακας (%)	
	$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$	$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} (\%)$
8	0.43-0.55	0.29-0.36
20	0.43-0.55	0.29-0.36
30	0.46-0.55	0.31-0.36
60	0.57-0.55	0.35-0.36

1.4.5.4. Πεδίο εφαρμογών του S690QL

Εξαιτίας των πολύ υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων του, ο χάλυβας αυτός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται εξαιρετική αντοχή, όπως είναι οι ανυψωτικοί μηχανισμοί και οι γερανοί, οι χαλύβδινες πλατφόρμες, οι δεξαμενές μεταφοράς φορτίων, καθώς και τμήματα και συνδεσμολογίες που εκτίθενται σε υψηλά δυναμικά φορτία.

Κεφάλαιο 2

Συγκολλήσεις μεταλλικών υλικών

2.1. Εισαγωγή

Κάθε μεγάλη κατασκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα συγκολλημένα μεταξύ τους. Η γεωμετρία και η μορφή καθενός από αυτά είναι μελετημένη ως προς την συγκόλληση που πρόκειται να ακολουθήσει. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να χτιστούν σύνθετες και ογκώδεις κατασκευές, όπως είναι ένα πλοίο.

Η συγκόλληση που αφορά στη σύνδεση μεταλλικών τμημάτων αποτελεί πεδίο μελέτης εδώ και αρκετές δεκαετίες, με σκοπό τη γνώση της συμπεριφοράς των συγκολλημένων τμημάτων στη διάρκεια της ζωής τους και την επάρκεια της αντοχής τους. Πέραν αυτών, η μελέτη έχει οδηγήσει σε καινοτόμες ιδέες και τρόπους συγκόλλησης, αλλά και σε προτάσεις για ασφαλέστερη και αποδοτικότερη συγκόλληση ανάλογα με τις ανάγκες μίας εφαρμογής.

Η μελέτη των συγκολλήσεων μεταλλικών τμημάτων πλέον εγγυάται:

- ✓ Πλήρη στεγανότητα σύνδεσης
- ✓ Αντοχή της περιοχής της συγκόλλησης όμοια με αυτής του μετάλλου βάσης
- ✓ Σύνδεση τμημάτων από διαφορετικά μέταλλα
- ✓ Σύνδεση ελασμάτων ανεξάρτητη του πάχους τους

Στην ακόλουθη ενότητα θα παρουσιαστεί η γενική κατηγοριοποίηση των μεθόδων σύνδεσης, και όλοι οι δυνατοί τύποι συγκόλλησης δύο ελασμάτων.

2.2. Γενικές μέθοδοι σύνδεσης μετάλλων [21] [22] [27]

1. **Συγκόλληση με τήξη (fusion welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα μέχρι να συμβεί σύντηξη. Δεν απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης.
**Πρόκειται για τη μέθοδο που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη ναυπηγική, και για αυτό θα παρουσιαστεί παρακάτω.*
2. **Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electric – resistance welding)**, όπου πρώτα προσδίδεται θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος που περνάει από τα υπό ένωση μέταλλα (φαινόμενο Joule) και στη συνέχεια εφαρμόζεται εξωτερική πίεση.
3. **Συγκόλληση σε στερεά φάση (solid – phase welding)**, όπου εφαρμόζεται εξωτερική πίεση χωρίς προηγούμενη τήξη των υπό συγκόλληση μετάλλων, εκτός από ένα πολύ λεπτό στρώμα κοντά στις επιφάνειες συγκόλλησης.
4. **Ετερογενής συγκόλληση ή ένωση σε υγρή – στερεή φάση (liquid – solid phase joining)**, όπου τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία μικρότερη του σημείου τήξης τους και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο (χαμηλότερου σημείου τήξης) σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί η ένωση σε στερεή κατάσταση.

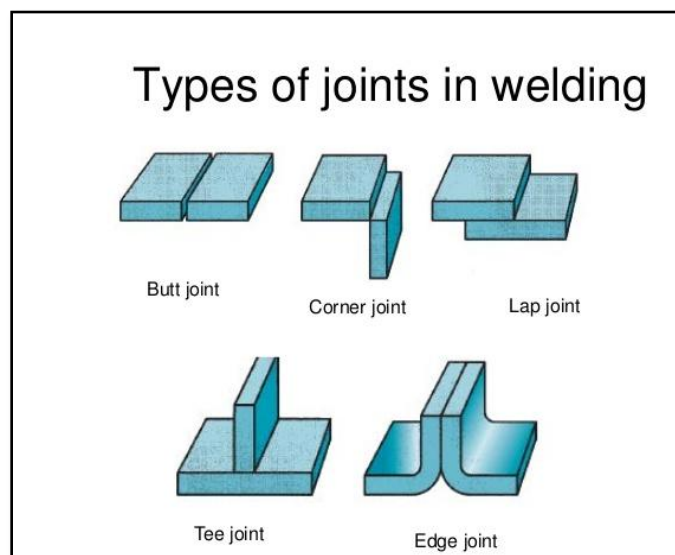
5. **Ένωση με κόλλα (adhesive bonding)**, όπου οι ενώσεις δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα της μοριακής έλξης μεταξύ των προς ένωση επιφανειών και της κόλλας.

Συγκόλληση με τήξη (fusion welding)- Τύποι σύνδεσης

Οι συγκολλήσεις τήξεως (fusion welding) είναι κατεργασίες μέσω των οποίων επιτυγχάνεται συνεχής σύνδεση δύο μεταλλικών στοιχείων, μέσω της τήξης τους από κάποια πηγή θερμότητας, με ή χωρίς τη χρήση πρόσθετου υλικού (filler).

Οι βασικοί τύποι σύνδεσης (*σχετικές θέσεις των προς συγκόλληση ελασμάτων- joint types*) μεταξύ δύο μελών είναι (Σχ.2.1):

- A. **Σύνδεση κατά συμβολή (butt joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου στο ίδιο επίπεδο.
- B. **Γωνιακή σύνδεση (corner joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου κάθετα μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν γωνία περίπου 90° .
- C. **Σύνδεση T (tee joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου κάθετα μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν το γράμμα ταυ.
- D. **Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων μελών.
- E. **Σύνδεση κατά ακμή (edge joint)**, η σύνδεση μεταξύ των ακμών δύο ή περισσότερων παράλληλων ή περίπου παράλληλων μελών.



Σχήμα 2.1 : Βασικοί τύποι σύνδεσης μεταξύ δύο μελών.[13]

Η κατασκευή ενός πλοίου αναφέρεται κυρίως στους τρεις πρώτους τύπους σύνδεσης, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

A. Συγκόλληση κατά συμβολή (Butt weld)

Παρουσιάζονται όλες οι δυνατές διαμορφώσεις των προς συγκόλληση επιφανειών (Σχ.2.2)

1) Κλειστή συμβολή (closed butt or square groove weld): οι ακμές των υπό συγκόλληση ελασμάτων, χωρίς καμία διαμόρφωση, έρχονται σε επαφή. Η συγκόλληση γίνεται από τη μια ή και τις δύο πλευρές.

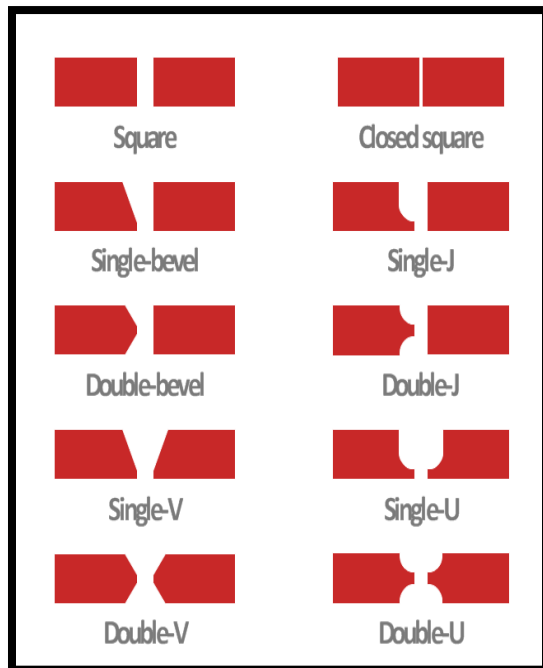
2) Ανοικτή συμβολή (open square butt or open square groove weld): απομακρύνονται λίγο οι ακμές των ελασμάτων ώστε να δημιουργηθεί ένα κενό μεταξύ τους. Σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη ή μη επιθυμητή η αμφίπλευρη συγκόλληση, είναι δυνατόν να γίνει συγκόλληση πλήρους διείσδυσης των ελασμάτων από τη μια μόνο πλευρά με τη βοήθεια της επικάλυπτρας (σχήμα 1.3).

3) Τύπου V (single V and single bevel groove): σε μεγαλύτερα πάχη ελασμάτων συγκόλληση πλήρους διείσδυσης μπορεί να γίνει μόνο με κατάλληλη διαμόρφωση των ακμών των προς συγκόλληση ελασμάτων. Η συνηθέστερη τέτοια διαμόρφωση είναι η V με τις διάφορες παραλλαγές της.

4) Τύπου X (double V and double bevel groove): σε πολύ παχιά ελάσματα η διαμόρφωση τύπου V απαιτεί μεγάλες ποσότητες προστιθέμενου μετάλλου, ενώ η συγκόλληση από τη μια μόνο πλευρά δημιουργεί μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών χρησιμοποιείται η συγκόλληση τύπου X, με την οποία μπορούν να συγκολληθούν ελάσματα απεριόριστου πάχους.

5) Τύπου J (single J and double J groove): ο συγκεκριμένος τύπος συγκόλλησης είναι παραλλαγή της $\frac{1}{2}$ V και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ελάσματα κάθε πάχους.

6) Τύπου U (single U and double U groove): οι ακμές του αυχένα των ελασμάτων έρχονται σε τέλεια επαφή. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ελάσματα πάχους πάνω από 20 mm. Η αμφίπλευρη U χρησιμοποιείται για την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων.



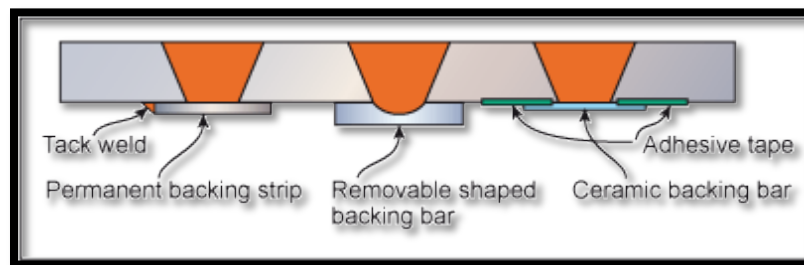
Σχήμα 2.2: Βασικοί τύποι συγκόλλησης

B. Αυχενική συγκόλληση (Fillet weld)

Είναι ο συνηθέστερος τύπος συγκόλλησης που εφαρμόζεται στη ναυπηγική. Θεωρητικά, η γωνία που σχηματίζει το μέταλλο συγκόλλησης με κάθε έλασμα είναι 45°. Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προπαρασκευή των ακμών εκτός από εξαιρετικές περιπτώσεις που η συγκόλληση δεν πρέπει να προεξέχει. Ακόμη, δεν απαιτείται η ύπαρξη διάκενου μεταξύ των προς συγκόλληση ελασμάτων.

C. Συγκόλληση με επικάλυψη (Lap welded joint)

Ο τύπος αυτός συγκόλλησης είναι υπόλειμμα της μεθόδου ήλωσης με επικάλυψη και αρμοκαλύπτρες. Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο σε κάποιες περιπτώσεις σε ναυπηγικές και άλλες σιδηρές κατασκευές, για ορισμένες συνδέσεις μορφοσιδήρων μέσω ελασμάτων (π.χ. σύνδεση αγκώνων με ζυγά και νομείς). Η επικάλυψη πρέπει να είναι ίση προς το τετραπλάσιο του πάχους του λεπτότερου ελάσματος, όχι όμως μεγαλύτερη των 50mm.



Σχήμα 2.3 : Διάφοροι τύποι χρήσης επικαλύπτρας. [43]

2.3 Σύγχρονες μέθοδοι συγκόλλησης

Η συγκόλληση με τήξη περιλαμβάνει περαιτέρω μεθόδους, με σκοπό να καλύψει τις ανάγκες της βιομηχανίας. Μια τέτοια κατηγοριοποίηση, με έμφαση στις πιο συχνά εφαρμοζόμενες διαδικασίες, φαίνεται παρακάτω.

- Συγκόλληση με Αέριο και Κοπή με Οξυγόνο (Oxyfuel Gas Welding and Cutting)
- Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding, SMAW)
- Συγκόλληση με Ηλεκτρόδια Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)
- Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)
- Συγκόλληση Τόξου με Χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding, FCAW), που είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW
- Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (Submerged Arc Welding, SAW)
- Αυτόματες Μέθοδοι Κατακόρυφης Συγκόλλησης (Vertical Automatic Welding Processes), όπου οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στη ναυπηγική είναι δύο, η electroslag και η electrogas.
- Συγκόλληση και Κοπή με Τόξο Πλάσματος (Plasma Arc Welding, PAW, and Cutting, PAC)
- Συγκόλληση με Laser

Σημείωση:

Στις ενότητες που ακολουθούν θα αναλυθούν οι μέθοδοι Laser, GMAW και FCAW, καθώς μέρος των συγκολλημένων δοκιμών που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική φέρουν τα είδη συγκολλήσεων FCAW, και υβριδική συγκόλληση Laser- GMAW.

2.3.1 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW) [21][22][27][30][31][32][34][35][36][39]

2.3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

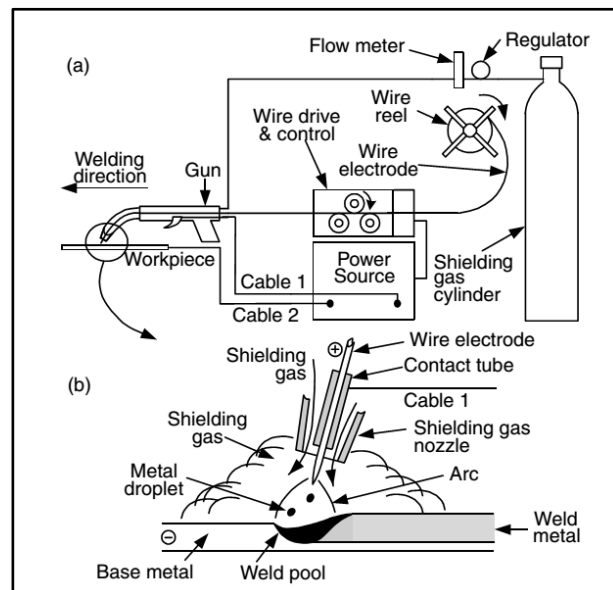
Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιεί προστασία αερίου και η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Στα πρώτα στάδια εμφάνισής της, η μέθοδος αυτή εθεωρείτο μια μέθοδος υψηλής πυκνότητας ρεύματος με γυμνά ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου και με προστασία που δινόταν από παροχή αδρανών αερίων. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείτο για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Έτσι της δόθηκε η ονομασία MIG (Metal Inert Gas). Στην πορεία, ακολουθώντας τις εξελίξεις, άρχισαν να χρησιμοποιούνται ρεύματα χαμηλής πυκνότητας καθώς επίσης και παλλόμενο συνεχές ρεύμα. Η χρήση της μεθόδου επεκτάθηκε και σε συγκολλήσεις άλλων μετάλλων (ανθρακούχοι & ανοξείδωτοι χάλυβες, μαγνήσιο, χαλκός, νικέλιο κ.ά.) και πλέον για την επίτευξη προστασίας άρχισαν να χρησιμοποιούνται και ενεργά αέρια (κυρίως CO₂).

Έτσι, η μέθοδος μετονομάστηκε σε GMAW που είναι ευρύτερος όρος. Στη μέθοδο GMAW ενδείκνυται η χρήση DCEP (συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας), καθώς έτσι εξασφαλίζεται σταθερό τόξο, ομαλή ροή μετάλλου με λίγες εκτοξεύσεις και πολύ καλή διείσδυση. Με χρήση DCEN (συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας) ή AC (εναλλασσόμενο ρεύμα) η μεταφορά των τηγμένων μεταλλικών σταγόνων είναι αρκετά ακανόνιστη και ασταθής.

Μια τυπική διάταξη GMAW φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.4 και αποτελείται από επιμέρους μέρη, τα κυριότερα εκ των οποίων είναι τα εξής:

- η μηχανή συγκόλλησης
- το πιστόλι συγκόλλησης
- το ηλεκτρόδιο
- η τροφοδοσία ηλεκτροδίου
- η παροχή αερίου προστασίας και η ρυθμιστική βαλβίδα
- το ψυκτικό σύστημα του πιστολιού συγκόλλησης
- το τηλεχειριστήριο



Σχήμα 2.4: Τυπική διάταξη GMAW:(a) συνολική διαδικασία, (b) η περιοχή της συγκόλλησης.[13]

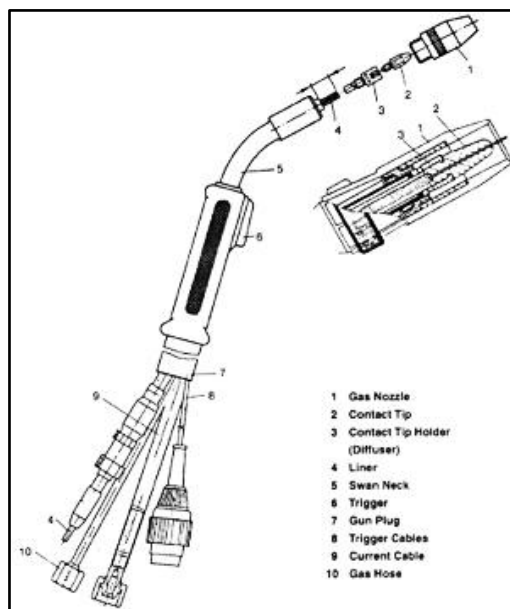
2.3.1.2. Ηλεκτρόδια

Στις συγκολλήσεις μαλακών χαλύβων και χαλύβων υψηλής αντοχής με τη μέθοδο GMAW χρησιμοποιούνται δύο τύποι ηλεκτροδίων: (α) συμπαγή και (β) με πυρήνα προστατευτικής σκόνης (flux cored). Στη ναυπηγική βιομηχανία, έχει επικρατήσει η χρησιμοποίηση της δεύτερης κατηγορίας ηλεκτροδίων, καθώς προσφέρει υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού με εξαιρετική όψη ραφής και χαμηλά ποσοστά εκτοξεύσεων. Ουσιαστικά στην περίπτωση (β) πρόκειται για τη μέθοδο FCAW, η οποία είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW.

Τα συμπαγή ηλεκτρόδια με προστασία αδρανούς αερίου έχουν συνήθως την ίδια σύνθεση με το προς συγκόλληση βασικό μέταλλο. Στην περίπτωση, όμως, που το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ενεργό (π.χ. μίγμα με O₂ ή CO₂), τότε είναι απαραίτητη η προσθήκη αποξειδωτικών στο κράμα του ηλεκτροδίου (κυρίως Si και Mn). Οι πιο συνηθισμένες χρησιμοποιούμενες διαμέτροι ηλεκτροδίων κυμαίνονται μεταξύ 1.02 και 1.59 mm (0.045 με 1/16 in), αλλά υπάρχουν και ηλεκτρόδια μικρότερων (μέχρι 0.5 mm) και μεγαλύτερων (μέχρι 3.18 mm) διαμέτρων.

2.3.1.3. Πιστόλια συγκόλλησης

Στη μέθοδο GMAW υπάρχουν πιστόλια για χειροκίνητη και ημιαυτόματη συγκόλληση. Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το πιστόλι πρέπει απαραίτητα να διαθέτει μια ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνα επαφής) για τη διοχέτευση του ρεύματος. Πρέπει, επίσης, να διαθέτει ακροφύσιο για την παροχή του αερίου προστασίας. Η απαιτούμενη ψύξη του πιστολιού γίνεται ή με το αέριο προστασίας ή με κλειστό κύκλωμα νερού ή και με τα δύο. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται ένα τυπικό πιστόλι συγκόλλησης GMAW.



Σχήμα 2.5: Ημιαυτόματο, αερίοψυκτο πιστόλι συγκόλλησης GMAW. [40]

2.3.1.4. Χαρακτηριστική μηχανής συγκόλλησης

Η GMAW είναι μέθοδος συγκόλλησης με πολύ υψηλή πυκνότητα έντασης ρεύματος ($i = 50 \times 10^3 \div 100 \times 10^3 \text{ A/in}^2$). Για το λόγο αυτό απαιτεί μηχανή συγκόλλησης σταθερής ή ελαφρά ανερχόμενης τάσης (constant voltage or rising). Ας σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης GMAW, το συνεχές ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα. Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών συγκόλλησης GMAW είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος (pulsed d.c. power supply). Οι μηχανές αυτές παρέχουν δύο επίπεδα έντασης ρεύματος: ένα σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης, που δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηγμένου υλικού σε σταγονίδια, και ένα ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπό μορφή παλμών, που υπερτίθεται στο πρώτο (συχνότητας συνήθως 50 Hz). Η μέγιστη τιμή του συνολικού ρεύματος είναι υψηλότερη της τιμής μετάβασης (transition current), οπότε η μεταφορά γίνεται με ψεκασμό. Το σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι η επιθυμητή μεταφορά με ψεκασμό γίνεται με αποδοτικότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

2.3.1.5. Τεχνικές μεταφοράς προστιθέμενου μετάλλου

Γενικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο μεταφοράς μετάλλου είναι οι εξής:

- η ένταση και το είδος του ρεύματος
- η διάμετρος του ηλεκτροδίου
- η σύσταση του ηλεκτροδίου
- το μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου
- το αέριο προστασίας

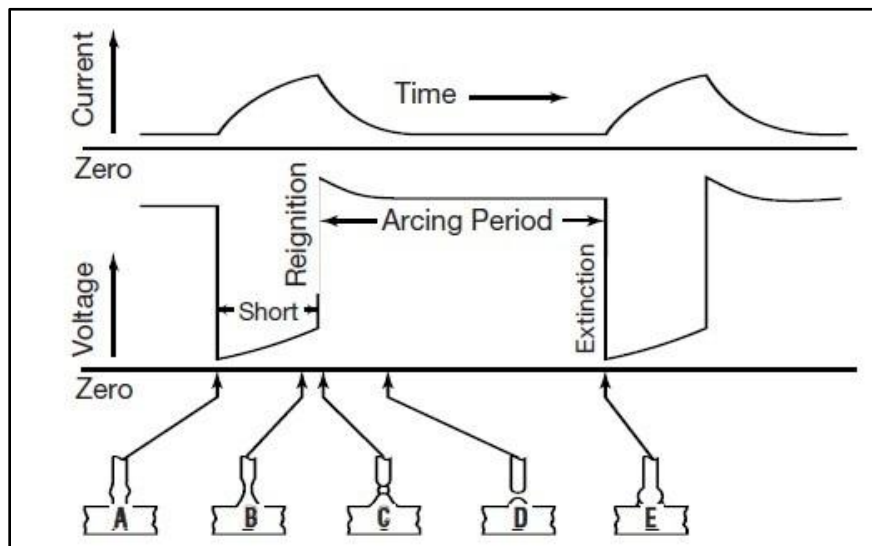
Η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου από την άκρη του ηλεκτροδίου στο λουτρό της συγκόλλησης μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

A. Μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση (short circuit transfer)

Η τεχνική αυτή, γνωστή και ως GMAW-S, αναπτύχθηκε για να γίνει δυνατή η συγκόλληση σε πολύ λεπτά ελάσματα και σε όλες τις θέσεις χωρίς τη χρήση αδρανών αερίων προστασίας. Το τηγμένο μέταλλο στην άκρη του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο λουτρό της συγκόλλησης όταν το ηλεκτρόδιο αγγίξει την επιφάνεια του λουτρού, προκαλώντας δηλαδή βραχυκύκλωμα του τόξου, κάτι που συμβαίνει 20 με 200 φορές το δευτερόλεπτο. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται μικρές εντάσεις ρεύματος (50-220 A) και μικρές τάσεις (12-22 V). Συνήθως, η μέθοδος υποστηρίζει ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.6-1.1 mm υπό την προστασία 100% CO₂ ή μίγμα 75%-80% Ar με 20%-25% CO₂. Υπό προϋποθέσεις, χρησιμοποιείται και τριμερής προστασία αερίου Ar + CO₂ + O₂. Τα συνήθη πάχη μετάλλων βάσης είναι 0.6-5.0 mm. Η ραφή που προκύπτει από αυτόν τον τύπο μεταφοράς ψύχεται γρήγορα, γεγονός αρκετά επιθυμητό σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων σε οροφιαίες συγκολλήσεις και σε εναποθέσεις ραφών ρίζας με μεγάλο άνοιγμα.

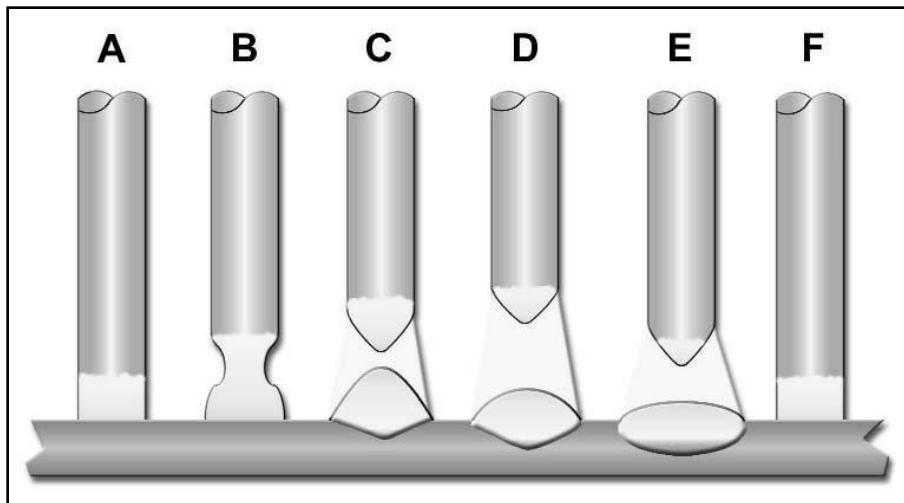
Αναλυτικότερα, η τεχνική μεταφοράς πραγματοποιείται σε πέντε στάδια, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 2.6.

- A. Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Η τάση του τόξου τείνει στο μηδέν, ενώ η ένταση του τόξου αυξάνεται. Ο ρυθμός αύξησης μέχρι τη μέγιστη τιμή ρεύματος είναι σε άμεση εξάρτηση από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης επαγωγής.
- B. Στη συνέχεια, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις ασκούνται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η επίδρασή τους έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δύναμης η οποία προκαλεί τη συμπίεση της τηγμένης σταγόνας στο άκρο του ηλεκτροδίου (neck or pinch effect). Η τάση του τόξου αυξάνεται σταδιακά, ενώ το ρεύμα συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή του.
- C. Στο σημείο αυτό, η τηγμένη μεταλλική σταγόνα αποκολλάται από το άκρο του ηλεκτροδίου και το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Οι δυνάμεις αντίδρασης στη λίμνη συγκόλλησης αποτρέπουν την επανένωση της τηγμένης σταγόνας με το ηλεκτρόδιο.
- D. Η υψηλή τάση που χαρακτηρίζει το σημείο αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη τόξου, ενώ το ρεύμα διατηρεί ελάχιστη τιμή. Κατά την περίοδο αυτή, σχηματίζεται νέα σταγόνα στο άκρο του ηλεκτροδίου.
- E. Το ηλεκτρόδιο βρίσκεται και πάλι σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης με την διαδικασία μεταφοράς να επαναλαμβάνεται. Η συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων εξαρτάται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης και το αέριο προστασίας. Προσθήκη Ar αυξάνει τη συχνότητα βραχυκυκλωμάτων και μειώνει το μέγεθος της τηγμένης μεταλλικής σταγόνας.



Σχήμα 2.6: Στάδια τεχνικής μεταφοράς με βύθιση [Lincoln Electric 2006]

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται καλύτερα τα στάδια ολοκλήρωσης της τεχνικής αυτής, με αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερα κατανοητή η διαδικασία. Στο σχήμα αυτό, επίσης, η διαδικασία ολοκληρώνεται σε έξι στάδια, καθώς φαίνεται μια ενδιάμεση κατάσταση (στάδιο E) κατά την οποία το ηλεκτρόδιο πλησιάζει στο βασικό μέταλλο για νέα βραχυκύκλωση.



Σχήμα 2.7: Στάδια ολοκλήρωσης μεταφοράς με βραχυκύκλωση: A) φυσική επαφή ηλεκτροδίου με το βασικό μέταλλο, B) «τσιμπημα» ηλεκτροδίου, C) μεταφορά τηγμένης σταγόνας, D) μέγιστο μήκος και τάση τόξου, E) πλησίασμα ηλεκτροδίου στο βασικό μέταλλο, F) εκ νέου βραχυκύκλωση [Miller 2012].

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση:

- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις, όπως επίπεδη, οριζόντια, κατακόρυφη και οροφισία.
- Ίδανική για συγκολλήσεις τεμαχίων χωρίς κατάλληλη προετοιμασία και για εναποθέσεις ρίζας σε σωληνώσεις.
- Μικρότερη παραμόρφωση, λόγω μικρής πρόσδωσης θερμότητας.
- Βαθμοί απόδοσης ηλεκτροδίου πάνω από 93% .

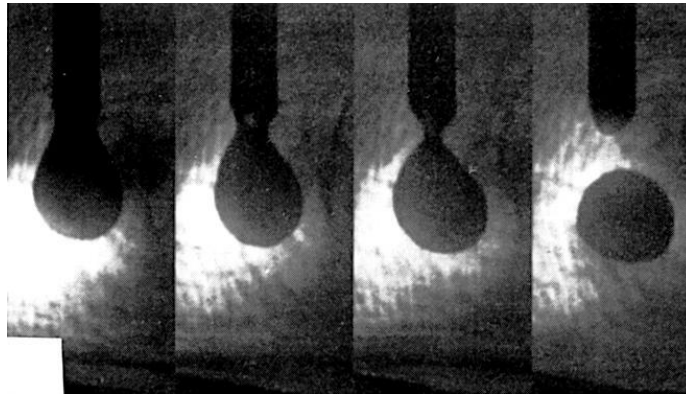
Μειονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση:

- Περιορισμός σε εφαρμογές εναποθέσεως ρίζας σε παχιά ελάσματα.
- Ανεπαρκής έλεγχος της διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει σε ατελή τήξη. Ένα ακόμα σημαντικό σφάλμα της μεταφοράς μετάλλου με την τεχνική αυτή είναι η πρόκληση υπερκαλύψεων.
- Ελλιπής έλεγχος της συγκολλητικής διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικές εκτοξεύσεις μετάλλου και συνεπώς σε αύξηση του κόστους καθαρισμού της συγκόλλησης.
- Σε εξωτερικές εργασίες, για την αποφυγή απώλειας του αερίου προστασίας, είναι απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα.

B. Μεταφορά με σταγόνες (Globular transfer)

Μεμονωμένες σταγόνες τηγμένου μετάλλου μεταφέρονται μέσα στο τόξο υπό την επίδραση της βαρύτητας. Η αλληλεπίδραση των σταγόνων με την επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης επηρεάζει τη ροή μέσα στη συγκόλληση. Η διάμετρος των σταγόνων είναι περίπου ίδια ή και μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτροδίου (συνήθως 2-4 φορές η διάμετρος του ηλεκτροδίου) ενώ το σχήμα τους ακανόνιστο. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται η μεταφορά με χοντρές σταγόνες κατά τη διάρκεια συγκόλλησης GMAW ενός χάλυβα, με ένταση ρεύματος 180 A και προστασία αερίου Ar-2% O₂. Η μεταφορά με σταγόνες δεν είναι πάντοτε ομαλή και χαρακτηρίζεται από εκτινάξεις μετάλλου εκτός της ραφής (spatter). Ως συνέπεια των εκτοξεύσεων είναι η παραγωγή καπνού, αν και το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από τη μεταφορά των σταγόνων. Ο παραγόμενος καπνός περιέχει βλαβερά προς τον άνθρωπο στοιχεία (Fe, Cr, Ni, Mn), γι' αυτό και είναι απαραίτητη η πρόβλεψη του βαθμού έκθεσης του συγκολλητή σε αυτά. Σε ορθή πολικότητα και σχετικά χαμηλές εντάσεις

ρεύματος η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται με σταγόνες, ανεξάρτητα από το αέριο προστασίας. Ωστόσο, με χρήση CO₂ και He παρατηρείται σε όλες τις εντάσεις ρεύματος. Σε συγκολλήσεις GMAW ανθρακούχων και μικροκραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιείται προστασία CO₂ με σκοπό την ελαχιστοποίηση των εκτοξεύσεων.



Εικόνα 2.1: Μεταφορά μεταλλικών σταγόνων κατά τη συγκόλληση GMAW χάλυβα με προστασία Ar-2% O₂, με ρεύμα 180 A και τάση 29 V, ανά 3×10^{-3} s [Jones 2003].

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες:

- Χρήση φθηνών αερίων προστασίας όπως CO₂ και μίγματος Ar/ CO₂.
- Ικανότητα συγκολλήσεων σε υψηλές ταχύτητες.
- Χρήση φθηνών ηλεκτροδίων (συμπαγών ή μεταλλικού πυρήνα).
- Φθηνός εξοπλισμός συγκόλλησης.

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες:

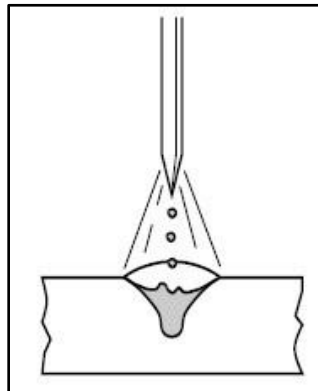
- Τα υψηλά επίπεδα εκτοξεύσεων μετάλλου απαιτούν καθαρισμό των επιφανειών, μια αρκετά πολυέξοδη διαδικασία.
- Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σφαλμάτων υπερκάλυψης, που απαιτούν δαπανηρές επιδιορθώσεις.
- Υπερβολική κυρτότητα ραφής και ελλειπής διαβροχή της βάσης της συγκόλλησης.
- Το υψηλό ποσοστό εκτοξεύσεων οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας των ηλεκτροδίων στα επίπεδα του 87%-93%.

Γ. Μεταφορά με σταγονίδια (spray transfer)

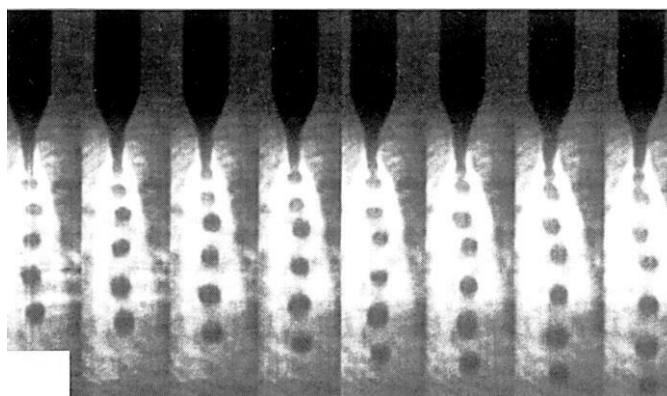
Όταν η ένταση του ρεύματος ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, που καλείται τιμή μετάβασης (I_{tr}), σταγονίδια τηγμένου μετάλλου αρχίζουν να μεταφέρονται μέσα στο τόξο υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, με μεγαλύτερη ταχύτητα και συχνότητα από ότι στο μηχανισμό μεταφοράς χοντρών σταγόνων. Η κρίσιμη τιμή του ρεύματος (ρεύμα μετάβασης) δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το προς συγκόλληση υλικό, η διάμετρος και η προέκταση του ηλεκτροδίου και, τέλος, από τη σύνθεση του αερίου προστασίας. Η μεταφορά με σταγονίδια είναι η τεχνική μεταφοράς μετάλλου με την υψηλότερη ενέργεια, όπου το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ροής μικρών τηγμένων σταγονιδίων τα οποία μεταφέρονται αξονικά κατά μήκος του τόξου. Επίσης, είναι σταθερότερη διαδικασία και επειδή τα τηγμένα σταγονίδια είναι μικρότερα του μήκους τόξου δε συμβαίνουν βραχυκυκλώσεις και έτσι δεν προκύπτουν εκτοξεύσεις. Το φαινόμενο παρατηρείται σε

ανάστροφη πολικότητα, ενώ απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη Ar στο περιβάλλον προστασίας. Συχνά χρησιμοποιούνται μίγματα Ar+1-5% O₂ ή Ar+CO₂, όπου τα επίπεδα CO₂ κυμαίνονται κάτω του 18%. Στη διαδικασία χρησιμοποιούνται συμπαγή ηλεκτρόδια ή ηλεκτρόδια μεταλλικού πυρήνα. Επίσης, συναντάται σε όλα τα κοινά κράματα, όπως κράματα αλουμινίου, χαλκού, νικελίου, ανοξειδωτου χάλυβα και μαγνησίου. Η μεγάλη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης περιορίζει τη χρήση της τεχνικής σε μετωπικές και επίπεδες θέσεις συγκόλλησης. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.

Σε ανθρακούχους χάλυβες η μεταφορά με σταγονίδια εφαρμόζεται σε παχέα ελάσματα σε αυχενικές συγκολλήσεις και σε συγκολλήσεις κατά συμβολή. Η διείσδυση είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζεται από τα υπάρχοντα μαγνητικά πεδία. Η χρήση μίγματος Ar σε ποσοστό 95% με O₂, ελαττώνει το προφίλ της μακρόστενης διείσδυσης (deep finger-like penetration profile) και δίνει διείσδυση με πιο ομαλοποιημένη μορφή. Η αξονική μεταφορά με σταγονίδια, λοιπόν, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων και της δυνατότητας συγκόλλησης σε μετωπικές και επίπεδες θέσεις. Η τελική όψη της ραφής είναι πολύ καλή, ειδικά αν οι προς συγκόλληση επιφάνειες είναι καθαρές χωρίς υπολείμματα σκουριάς, ελαίου και άλλων ακαθαρσιών.



Σχήμα 2.8: Τεχνική μεταφοράς τηγμένου μετάλλου με σταγονίδια [Lincoln Electric 2006]



Εικόνα 2.2: Στιγμιότυπα, ανά 2.5×10^{-4} s, μεταφοράς με σταγονίδια σε συγκόλληση χάλυβα για 320A και 29V [Jones 2003].

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια:

- Υψηλός ρυθμός εναπόθεσης.
- Υψηλή αποδοτικότητα ηλεκτροδίου, μεγαλύτερη από 98%.
- Δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος προστιθέμενων μετάλλων και διαμέτρων ηλεκτροδίων.
- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Πολύ μικρές απαιτήσεις διαδικασιών καθαρισμού μετά τη συγκόλληση.
- Απουσία εκτοξεύσεων μετάλλου.
- Εξαιρετική τήξη συγκόλλησης.
- Χρησιμοποιείται σε ρομποτικές και ημιαυτόματες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια:

- Δεν είναι δυνατή η χρήση της σε επίπεδη και μετωπική συγκόλληση.
- Υψηλό ποσοστό παραγωγής καπνού.
- Απαιτήση αυστηρών μέτρων προστασίας για τον συγκολλητή, λόγω της υψηλής θερμότητας και ακτινοβολίας του τόξου.
- Απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα στην περίπτωση χρήσης της διαδικασίας σε εξωτερικό χώρο.
- Το κόστος του χρησιμοποιούμενου αερίου προστασίας είναι, λόγω της ύπαρξης του Ar, μεγαλύτερο από ότι σε περίπτωση χρήσης 100% CO₂.

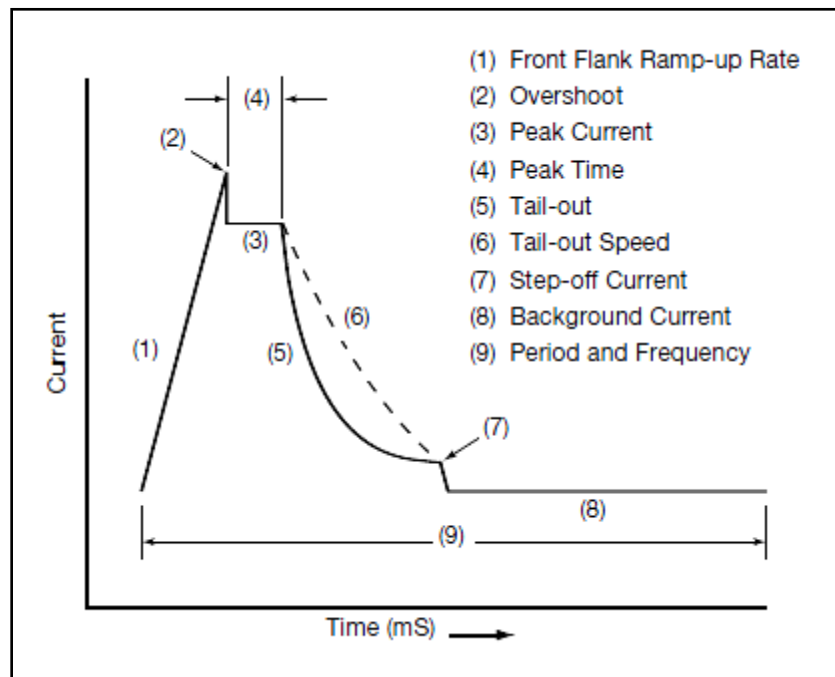
Δ. Παλμική μεταφορά με σταγονίδια (pulsed spray transfer)

Η συγκεκριμένη τεχνική είναι μια παραλλαγή της μεταφοράς με σταγονίδια. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της έντασης του ρεύματος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών, μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης (high peak current & low background current αντίστοιχα). Η μεταφορά της τηγμένης σταγόνας πραγματοποιείται τη στιγμή που η ένταση του ρεύματος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η τεχνική αυτή, γνωστή και ως GMAW-P, αναπτύχθηκε για δύο λόγους: τον έλεγχο των εκτοξεύσεων του τηγμένου μετάλλου και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων λόγω ατελούς τήξης.

Ωστόσο, παρουσιάζει και αρκετά πλεονεκτήματα. Η τεχνική εφαρμόστηκε αρχικά στη ναυπηγική βιομηχανία σε συγκολλήσεις γάστρας βασικών μετάλλων από μικροκραματωμένο χάλυβα υψηλής αντοχής. Είναι αρκετά διαδεδομένη για τους εξής λόγους: η απόδοση των ηλεκτροδίων σε σύγκριση με τη FCAW είναι μεγαλύτερη και οι πιθανότητες προσρόφησης υδρογόνου από τη λίμνη συγκόλλησης αρκετά περιορισμένες. Η GMAW-P εφαρμόζεται κυρίως σε συμπαγή ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.8-1.6 mm και σε ηλεκτρόδια μεταλλικού πυρήνα διαμέτρου 1.1-2.0 mm. Επίσης, χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις διαφόρων υλικών με προστασία αερίου μίγματος Ar + έως 18% CO₂.

Η τιμή της έντασης του ρεύματος εναλλάσσεται, όπως προαναφέρθηκε, μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής, αλλά η μέση τιμή της είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στη μεταφορά με σταγονίδια. Ο χρόνος εναλλαγής ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές ονομάζεται περίοδος ή κύκλος. Στην GMAW-P η μέγιστη τιμή ρεύματος είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης στη μεταφορά με σταγόνες, ενώ η ελάχιστη τιμή είναι μικρότερη εκείνης στη μεταφορά με βραχυκύκλωση. Όταν το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, αποκολλάται η τηγμένη σταγόνα από το άκρο του ηλεκτροδίου και μεταφέρεται κατά μήκος του τόξου προς τη λίμνη συγκόλλησης. Το χαμηλότερο ρεύμα της GMAW-P εξασφαλίζει σταθερότητα στο τόξο και παρέχει τη συνολική θερμότητα στη συγκόλληση. Βασικοί παράμετροι της τεχνικής αυτής είναι: η τιμή της μέγιστης έντασης ρεύματος (I_p), η διάρκεια της μέγιστης έντασης (T_p), η τιμή της ελάχιστης έντασης ρεύματος (I_b) και η διάρκεια ελάχιστης έντασης (T_b).

Ο αριθμός των περιόδων που παρατηρούνται ανά δευτερόλεπτο ορίζεται ως συχνότητα. Η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας παροχής του προστιθέμενου μετάλλου. Από την υπέρθεση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής ρεύματος προκύπτει μια μέση ένταση, με την οποία εξασφαλίζονται συγκολλήσεις σε όλες τις θέσεις και για μεγάλα πάχη ελασμάτων. Στο σχήμα 2.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της τεχνικής GMAW-P.



Σχήμα 2.9: Στάδια μηχανισμού GMAW-P κατά τη διάρκεια μια περιόδου [Lincoln Electric 2006].

Πλεονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια

- Περιορισμένες έως και μηδαμινές εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου.
- Ανθεκτικότερη τεχνική σε σφάλματα λόγω ατελούς τήξης σε σύγκριση με άλλες τεχνικές μεταφοράς μετάλλου.
- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Δυνατότητα ελέγχου του παραγόμενου, εκ της συγκόλλησης, καπνού.
- Πολύ χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Περιορισμένη προσρόφηση υδρογόνου.
- Περιορισμένη ευαισθησία σε μαγνητικό φύσημα.
- Πολύ καλή απόδοση του μηχανισμού μεταφοράς ακόμη και όταν οι επιφάνειες των δοκιμίων δεν έχουν προετοιμασθεί κατάλληλα.
- Χαμηλού κόστους διαδικασία, υψηλής αποδοτικότητας ηλεκτρόδια (έως 98%), συγκριτικά με τις μεθόδους SMAW, FCAW και GMAW-S.
- Χρησιμοποιείται σε ρομποτικές και αυτοματοποιημένες εφαρμογές.
- Δυνατότητα ανάπτυξης υψηλών ταχυτήτων συγκόλλησης (έως 120 cm/min).

Μειονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια

- Ο εξοπλισμός είναι αρκετά ακριβότερος από τον παραδοσιακό εξοπλισμό.

- Τα μίγματα Ar που χρησιμοποιούνται για προστασία είναι ακριβότερα του CO₂.
- Υψηλές απαιτήσεις προστασίας για το συγκολλητή, λόγω της υψηλής ενέργειας τόξου.
- Απαιτήση ανεμοθώρακα για εξωτερικές δραστηριότητες.

2.3.1.6. Αέρια προστασίας

Στα σιδηρούχα μέταλλα, το He ως αέριο προστασίας μπορεί να παράγει εκτινάξεις (spatter), ενώ το Ar μπορεί να προκαλέσει αβαθή διείσδυση. Η προσθήκη του O₂ (περίπου 3%) ή του CO₂ (περίπου 9%) στο Ar περιορίζει τα προβλήματα. Οι ανθρακούχοι και οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ενώνονται συνήθως με το CO₂ ως αέριο προστασίας, με αποτέλεσμα την υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης, τη μεγαλύτερη διείσδυση και το χαμηλότερο κόστος. Όμως, το CO₂ 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.

Τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση μετάλλων και κραμάτων τους αναφέρονται συγκεντρωτικά και στον Πίνακα 2.1:

Αλουμίνιο

- Αργό για μικρά πάχη (μέχρι 25 mm).
- Μίγμα 75% He+25% Ar για πάχη από 25 μέχρι 76 mm.
- 90% He+10% Ar για πολύ μεγάλα πάχη.

Μαλακός χάλυβας

- Μίγμα Ar+5% O₂.
- Για μεταφορά με βύθιση Ar+25% CO₂ για πάχη μικρότερα από 3.2 mm, Ar+50% CO₂ για μεγαλύτερα πάχη, ή σκέτο CO₂ για μεγαλύτερη διείσδυση.

Ανοξειδωτος χάλυβας

- Μίγμα αργού με 1-2% O₂.
- Για μεταφορά με βύθιση, μίγμα 90% He+7.5% Ar+2.5% CO₂.

Πίνακας 2.1: Μίγματα αερίων προστασίας ανάλογα με το πάχος του ελάσματος, το μέταλλο και τον τύπο της GMAW που χρησιμοποιείται

Welding Process	Material Thickness	Mild Steel	Stainless	Aluminum	Gas Blend
GMAW, Pulse GMAW	0.063-0.250			X	Ar
GMAW, Pulse GMAW	0.250-0.500			X	Ar / He
Pulse GMAW	0.063-0.500	X			Ar / 5% O ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.063-0.500	X			Ar / 5-15% O ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.063-0.500	X			Ar 85%/O ₂ / CO ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.040-0.250	X			Ar / He / CO ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.040-0.250		X		Ar / N ₂ / CO ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.250-0.500		X		Ar / H ₂ / CO ₂
GMAW Short Arc and Pulse Arc, Spray Arc	0.063-0.250		X		Ar / 5% O ₂
GMAW Pulse Arc, Spray Arc	0.063-0.250	X			Ar / 2% O ₂
GMAW Short Arc	0.040-0.250	X			Ar / 25% CO ₂
GMAW Short Arc	0.063-0.250	X			He / Ar / CO ₂
GMAW Global	0.063-0.250		X		CO ₂
FCAW	0.063-0.500	X			Ar / 25% CO ₂
FCAW Global	0.063-0.500	X			CO ₂

2.3.1.7. Παράμετροι της μεθόδου

Οι παράμετροι της μεθόδου GMAW, με τον έλεγχο των οποίων μπορούμε να έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα από τη διαδικασία, αναλύονται στη συνέχεια:

Ρεύμα συγκόλλησης: Πρακτικά, δηλαδή, ο ρυθμός τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου. 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 τη μέθοδο GMAW γίνεται με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στο θετικό πόλο της πηγής (συνδεσμολογία ανάστροφης πολικότητας-DCEP), διότι προσφέρει σταθερότητα στο τόξο, χαμηλό ποσοστό εκτοξεύσεων (spatter), καλό προφίλ ραφής και μεγαλύτερη διείσδυση.

Τάση του τόξου: Πρακτικά, δηλαδή, το μήκος του 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, η τάση με το μήκος του τόξου συνδέονται ως εξής: με αύξηση της τάσης αυξάνεται και το μήκος του τόξου. Παρόλο 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 ευρύτερα 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 παραμένουν σταθερές, 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 με 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 οξειδωση 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 ότι 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.

2.3.1.8. Τυπικά σφάλματα μεθόδου GMAW

Τα κυριότερα σφάλματα που εμφανίζονται στη συγκεκριμένη διαδικασία συγκόλλησης είναι τα εξής:

Αστάθεια κατά το άναμμα του τόξου (arc star instability)

Είναι ένα τυπικό πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου. Αν το άναμμα του τόξου δεν είναι επιτυχές, είναι αδύνατη η εναπόθεση μετάλλου μέχρι το τόξο να ξαναάψει, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται έντονες εκτοξεύσεις. Συνεπώς, η συγκόλληση θα παρουσιάσει περιορισμένη διείσδυση και κακή ποιότητα επιφάνειας. Όταν το τόξο αδυνατεί να ανάψει, το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το προς συγκόλληση τεμάχιο, θερμαίνεται και αρχίζει να αναλίσκεται (electrode disintegration), με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτοξεύσεων (spatter).

Εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter)

Είναι ένα πολύ συχνό πρόβλημα της GMAW και μπορεί να έχει διάφορα αίτια. Συνήθως συμβαίνουν όταν η ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου ή η τάση κυμαίνονται σε πολύ υψηλές τιμές. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα της συγκόλλησης παίζει η καθαρότητα της επιφάνειας του βασικού μετάλλου. Για το λόγο αυτό πριν την πραγματοποίηση της συγκόλλησης ενδείκνυται ο σχολαστικός καθαρισμός των προς συγκόλληση τεμαχίων για την απομάκρυνση διαφόρων ακαθαρσιών (λάδι, σκουριά, μπογιά κλπ.). Όσο πιο καθαρή είναι η επιφάνεια των βασικών μετάλλων, τόσο μειώνεται η πιθανότητα εκτοξεύσεων. Εξίσου καθαρό και στεγνό πρέπει να είναι το ηλεκτρόδιο. Τέλος, απαραίτητη είναι η επαρκής παροχή αερίου προστασίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, καθώς αν το τόξο δεν προστατεύεται πλήρως προκαλούνται εκτοξεύσεις και η ραφή έχει άγρια όψη.

Πόροι (porosity)

Το πιο συνηθισμένο αίτιο του φαινομένου είναι η ανεπαρκής αέρια προστασία κατά τη συγκόλληση. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η λήψη μέτρων για εξασφάλιση επαρκούς ροής αερίου, ο καθαρισμός του ακροφύσιου παροχής, ο έλεγχος στους σωλήνες παροχής για τυχόν διαρροές και η διατήρηση μικρής απόστασης μεταξύ όπλου και λίμνης συγκόλλησης μετά το πέρας της διαδικασίας μέχρι να στερεοποιηθεί το τηγμένο μέταλλο. Ωστόσο, πολλές φορές το σφάλμα μπορεί να οφείλεται στο ίδιο το αέριο. Σε μια τέτοια περίπτωση, το αέριο πρέπει να αντικαθίσταται με το κατάλληλο για την εφαρμογή.

Ατελής τήξη (incomplete fusion)

Ορίζεται ως η αδυναμία επίτευξης πλήρους τήξης του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό μέταλλο και οφείλεται σε ακαθαρσίες της επιφάνειας του βασικού μετάλλου. Για το λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλίζεται η καθαρότητα των επιφανειών πριν την έναρξη της διαδικασίας. Άλλο πιθανό αίτιο του προβλήματος είναι η ανεπαρκής πρόσδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση, πράγμα που διορθώνεται με αύξηση της τάσης ή της ταχύτητας παροχής προστιθέμενου μετάλλου. Τέλος, την ποιότητα τήξης μπορεί να επηρεάσει η χρησιμοποιούμενη τεχνική συγκόλλησης, καθώς αν δεν είναι κατάλληλη η τελική όψη ραφής δεν είναι η επιθυμητή.

Ατελής διείσδυση (lack of penetration)

Προκύπτει όταν η διείσδυση που επιτεύχθηκε είναι μικρότερη από την απαιτούμενη, με αποτέλεσμα η συγκόλληση να είναι ανεπαρκής για την προοριζόμενη εφαρμογή. Συνήθως, το πρόβλημα οφείλεται σε ακατάλληλη προετοιμασία των τεμαχίων και του διάκενου μεταξύ τους ή όταν τα προς

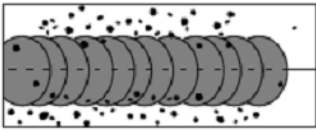
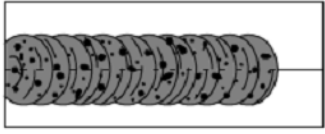
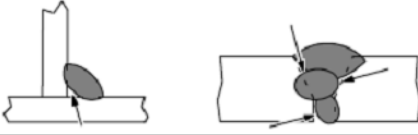
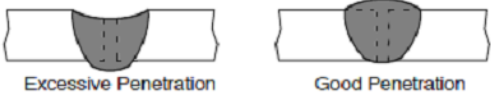

συγκόλληση ελάσματα έχουν μεγαλύτερο πάχος από αυτό που υποστηρίζει η διαδικασία συγκόλλησης. Πολύ σημαντικό ρόλο στο τελικό προφίλ διείσδυσης παίζει και ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου. Η προετοιμασία της διάταξης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται πρόσβαση στην βάση της συμβολής, ικανοποιητική προέκταση ηλεκτροδίου και κατάλληλα χαρακτηριστικά τόξου. Τέλος, για την εξασφάλιση ικανοποιητικής διείσδυσης, πρέπει η τεχνική που εφαρμόζεται να είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και η πρόσδοση θερμότητας επαρκής.

Υπερβολική διείσδυση (excessive penetration)

Προκύπτει όταν η ποσότητα του μετάλλου συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, με αποτέλεσμα να παρατηρείται υπέρμετρη ενίσχυση στη ρίζα της συγκόλλησης, ειδικά αν αυτή γίνεται μονόπλευρα. Παρουσιάζεται σε περιπτώσεις υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί, αν αυξηθεί η ταχύτητα της συγκόλλησης ή αν ελαττωθεί η τάση ή η ταχύτητα παροχής προστιθέμενου μετάλλου.

Άλλα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη μέθοδο GMAW είναι τρέξιμο μετάλλου (burn through), ανώμαλη επιφάνεια όψης της ραφής, παραμορφώσεις καθώς επίσης και υπερκαλύψεις (cold laps or overlaps). Η εμφάνιση υπερκαλύψεων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ποιότητα και την αντοχή της συγκόλλησης. Γενικά, τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW, έχουν μεταλλουργικό και μορφολογικό χαρακτήρα και προκαλούν υποβάθμιση της ποιότητας της συγκόλλησης. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται μερικά από τα σφάλματα που περιγράφηκαν παραπάνω.

Πίνακας 2.2 : Τυπικά σφάλματα μεθόδου GMAW [Miller Electric 2012].

	Εκτοξεύσεις
	Πόροι
	Ατελής τήξη
	Υπερβολική διείσδυση
	Ατελής διείσδυση

2.3.1.9. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου GMAW

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Δυνατότητα χρήσης της μεθόδου για συγκολλήσεις μιας μεγάλης ποικιλίας μετάλλων και κραμάτων καθώς και πάχος ελασμάτων.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Πολύ καλή όψη ραφής.
- Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους (SMAW).
- Ο ρυθμός απόθεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τη SMAW.
- Βαθύτερη διείσδυση συγκριτικά με τη SMAW, άρα και δυνατότητα χρήσης μικρότερων ραφών σε αυχενικές συγκολλήσεις για ίδια αντοχή.
- Χαμηλότερα επίπεδα αναθυμιάσεων συγκριτικά με τις SMAW και FCAW.
- Υψηλότερος ρυθμός εναπόθεσης υλικού συγκριτικά με τη GTAW.
- Οικονομικός και άμεσα διαθέσιμος εξοπλισμός συγκριτικά με άλλες, υψηλού κόστους διαδικασίες (laser).
- Υψηλότερη αποδοτικότητα ηλεκτροδίων συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους συγκόλλησης (93-98%).
- Χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων και απουσία βαριάς σκουριάς, με αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης απαίτησης καθαρισμού μετά τη συγκόλληση.
- Κατάλληλη μέθοδος για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής σε ημι-αυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες υψηλών ταχυτήτων.

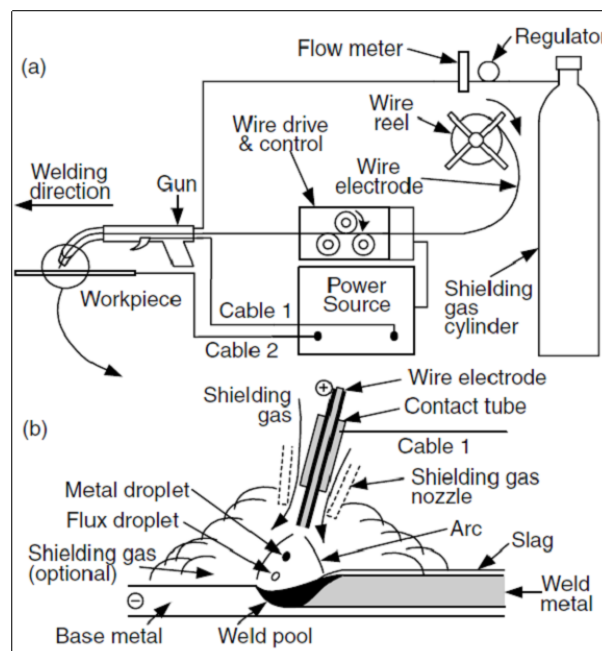
Αντίθετα, όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης, έτσι και η GMAW υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς:

- 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.
- Η GMAW δεν είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις ενός περάσματος σε ελάσματα μεγάλου πάχους. Για το λόγο αυτό απαιτούνται συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων, που έχουν ως συνέπεια της μεγάλη πρόσδοση θερμότητας και τη σημαντική κατανάλωση υλικών πλήρωσης.
- Απαιτήση πρόσθετου εξοπλισμού σε σχέση με τη μέθοδο SMAW, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φορητότητα.
- Δαπανηρή η χρήση μιγμάτων αερίων προστασίας με βάση το αργό, για τις τεχνικές παλμικής και μη μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια, σε σχέση με άλλες τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί 100% CO₂.

2.3.2. Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding - FCAW) [21][22][27][29][34][35][38][39]

2.3.2.1. Γενικά χαρακτηριστικά

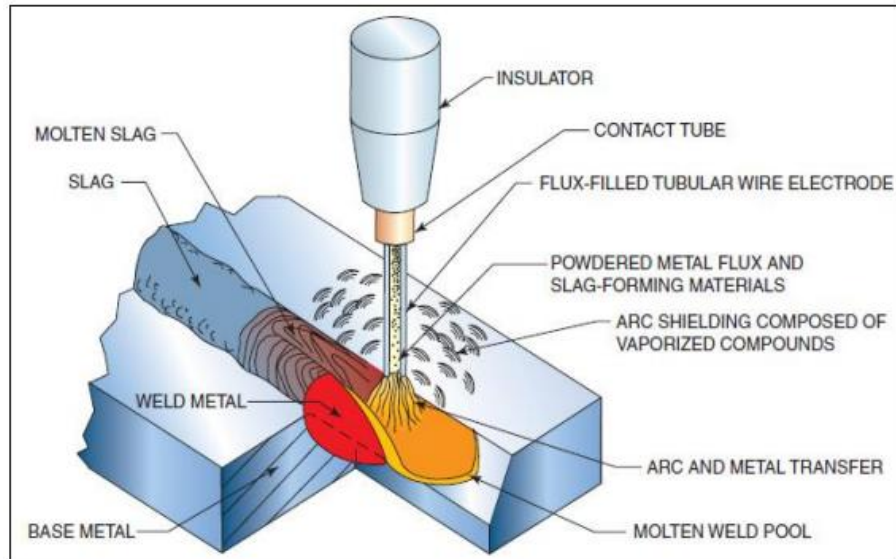
Η συγκόλληση με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (FCAW) είναι παρόμοια με τη GMAW όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Όμως, το σωληνοειδές ηλεκτρόδιο περιέχει στον πυρήνα του συλλίπασμα (flux) και δεν είναι συμπαγές όπως στη GMAW. Δηλαδή, το ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας ο οποίος περιέχει τη σκόνη 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.



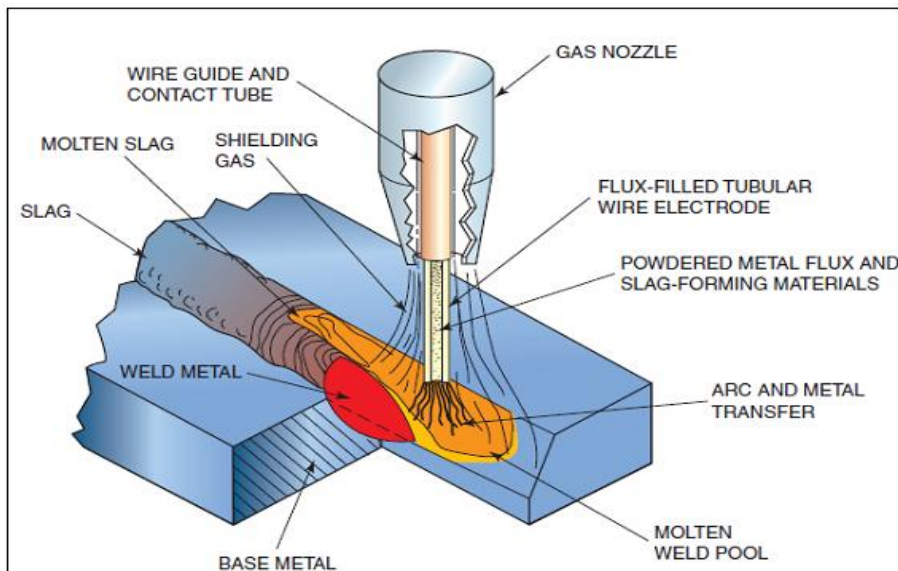
Σχήμα 2.11: Συγκόλληση FCAW: (a) συνολική διαδικασία, (b) η περιοχή της συγκόλλησης. [13]

Ανάλογα με τη χρήση ή μη αερίου για την προστασία του τόξου και της λίμνης συγκόλλησης από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από την ατμόσφαιρα, η μέθοδος FCAW διακρίνεται σε δύο παραλλαγές. Η πρώτη, γνωστή και ως αυτοπροστατευόμενη συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια FCAW-S (self shielded-FCAW), προστατεύει το μέταλλο συγκόλλησης μέσω διάσπασης και εξάτμισης της προστατευτικής σκόνης, με ενέργεια που παρέχεται από τη θερμότητα του τόξου (σχήμα 2.12). Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε κατασκευές εξωτερικού χώρου, όπου η παρουσία ανέμων θα μπορούσε να επηρεάσει την προστασία αερίου. Η δεύτερη παραλλαγή είναι η μέθοδος FCAW με προστασία αερίου, FCAW-G (gas shielded-FCAW), η οποία χρησιμοποιεί σωληνοειδή ηλεκτρόδια με πυρήνα προστατευτικής σκόνης καθώς και προστασία αερίου (σχήμα 2.13). Έχει, δηλαδή, διπλή προστασία (dual shield). Με τη FCAW-G μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις κατά συμβολή, όπου η απόσταση ανάμεσα στα δοκίμια, η γωνία συμβολής και το

άνοιγμα ρίζας έχουν μικρές τιμές. Στη FCAW-S, όμως, όπου η διείσδυση είναι σχετικά μικρότερη, η γωνία διαμόρφωσης πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή. Επιπλέον, σε επίπεδες συγκολλήσεις κατά συμβολή χωρίς χρήση επικαλύπτρας, η προέκταση του ηλεκτροδίου και το άνοιγμα της ρίζας πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητικό προφίλ διείσδυσης. Σε περίπτωση, όμως, χρήσης επικαλύπτρας η διαμόρφωση της συμβολής πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει επαρκή και ολοκληρωμένη διείσδυση.



Σχήμα 2.12: Αυτοπροστατευόμενη FCAW (self shielded FCAW or FCAW-S).[Jeffus & Bower 2009]



Σχήμα 2.13: FCAW με προστασία αερίου (gas shielded FCAW or FCAW-G).[Jeffus & Bower 2009]

Και στις δύο περιπτώσεις εξασφαλίζεται η παρουσία προστατευτικού στρώματος σκουριάς στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης, για την ικανοποιητική προστασία του μετάλλου συγκόλλησης.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της FCAW-G έναντι της FCAW-S είναι τα μικρότερα ποσοστά εκλυόμενου καπνού και αναθυμιάσεων. Επίσης, η σχεδίαση και χρήση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων με προστασία αερίου είναι ευκολότερη από αυτή των αυτοπροστατευόμενων.

Η FCAW παρουσιάζει τρία βασικά χαρακτηριστικά, στα οποία έγκεινται και τα πλεονεκτήματά της:

- 1) την παραγωγικότητα που εξασφαλίζεται με συνεχή παροχή ηλεκτροδίου
- 2) τη σκουριά που προστατεύει και δίνει σχήμα στη ραφή και
- 3) τα μεταλλουργικά οφέλη που προσφέρει η χρήση της προστατευτικής σκόνης.

Στη μέθοδο FCAW-G το αέριο προστασίας, που συνήθως είναι CO₂ ή μίγμα Ar+CO₂, προστατεύει το τηγμένο μέταλλο από το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας δημιουργώντας προστατευτικό περίβλημα γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απόλυτο, καθώς μπορεί να προκύψει δημιουργία κάποιας ποσότητας οξυγόνου από τη διάσπαση του CO₂ σε CO και O₂. Στη μέθοδο FCAW-S η προστασία εξασφαλίζεται από τα εξαμιζόμενα στοιχεία της προστατευτικής σκόνης, τα οποία απομονώνουν την περιοχή συγκόλλησης από τον αέρα και από τα στοιχεία σκουριάς τα οποία περιβάλλουν τις τηγμένες μεταλλικές σταγόνες.

Η μέθοδος FCAW είναι συνήθως ημιαυτοματοποιημένη. Ωστόσο, μπορεί να εφαρμοστεί σε πλήρως αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις.

2.3.2.2. Ιδιότητες και παράμετροι της συγκόλλησης FCAW

Παρακάτω παρατίθενται οι παράμετροι της μεθόδου FCAW και οι τρόποι που επηρεάζουν τη διαδικασία και τα αποτελέσματά της:

Ταχύτητα συγκόλλησης: Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, τόσο μικρότερη είναι η εναπόθεση μετάλλου. Αν η τιμή της ταχύτητας είναι πολύ μεγάλη, το προστιθέμενο μέταλλο δε μπορεί να μεταφερθεί αρκετά γρήγορα ώστε να καλύψει τη ραφή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υποκοπές στην ένωση του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό μέταλλο στο πρόσωπο της συγκόλλησης. Μικρότερες τιμές ταχύτητας αυξάνουν τη διείσδυση και το προστιθέμενο μέταλλο που εναποτίθεται.

Πρόεκταση του ηλεκτροδίου: Υπολογίζεται από το σημείο όπου το ηλεκτρόδιο συναντά το σωλήνα επαφής μέχρι το άκρο του όπου ξεκινά το τόξο. Η πρόεκταση που απαιτείται στη FCAW είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη GMAW, καθώς βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης. Κατά τη διαρροή του ηλεκτροδίου από ρεύμα προκαλείται προθέρμανση της προστατευτικής σκόνης, λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η προθέρμανση αυτή αυξάνει τη σταθερότητα του τόξου και ελαττώνει τις εκτοξεύσεις (spatter). Αντίθετα, αν η πρόεκταση είναι πολύ μικρή, η σκόνη δεν έχει προλάβει να προθερμανθεί αρκετά κατά το άναμμα του τόξου, με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζει επαρκή καθαρισμό και κραμάτωση της τηγμένης λίμνης συγκόλλησης. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να προκύψουν εγκλείσματα σκουριάς στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης. Αν η πρόεκταση είναι πολύ μεγάλη, η σκόνη μπορεί να καεί πριν δράσει, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν αστάθεια και έντονες εκτοξεύσεις.

Ένταση του ρεύματος: Είναι ανάλογη του ρυθμού παροχής του ηλεκτροδίου. Αν η ταχύτητα παροχής προστιθέμενου μετάλλου αυξηθεί, αυξάνεται και η ένταση. Αύξηση της έντασης ρεύματος

αυξάνει το ρυθμό εναπόθεσης του ηλεκτροδίου, τη διείσδυση και το πλάτος ραφής, εφόσον οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Ένταση μεγαλύτερη της προβλεπόμενης, οδηγεί σε αλλοίωση της ποιότητας συγκόλλησης και σε μεγάλη κυρτότητα της επιφάνειας. Αντίθετα, μικρή ένταση ρεύματος προκαλεί έντονες εκτοξεύσεις και μεταφορά υλικού με μεγάλες σταγόνες. Τα περισσότερα σωληνοειδή ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα να συνδυάζονται με μεταφορά με σταγόνες, αλλά σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος μπορεί να προκύψει μεταφορά τηγμένου μετάλλου με ψεκασμό. Στα σωληνοειδή ηλεκτρόδια με προστασία αερίου, αν χρησιμοποιηθεί αέριο μίγμα, μπορεί να προκύψει αξονική μεταφορά με σταγονίδια σε μεγαλύτερες τιμές έντασης ρεύματος.

Τάση συγκόλλησης: Είναι η απόσταση από το άκρο του ηλεκτροδίου μέχρι το μέταλλο βάσης (μήκος του τόξου). Οι μηχανές συγκόλλησης σταθερής τάσης διατηρούν μια συγκεκριμένη τάση σταθερή προκειμένου να είναι σταθερό το μήκος του τόξου. Οι μηχανές σταθερού ρεύματος διαθέτουν αισθητήρες μέτρησης της τάσης συγκόλλησης. Έτσι, ανάλογα με τη μετρούμενη τάση, προσαρμόζεται η ταχύτητα παροχής μετάλλου προκειμένου να διατηρείται σταθερό το μήκος του τόξου και κατ'επέκταση σταθερή τάση στη συγκόλληση. Κάθε ένταση ρεύματος απαιτεί συγκεκριμένη τάση, ώστε να εξασφαλισθεί βέλτιστη ποιότητα συγκόλλησης. Η βέλτιστη τάση για την εφαρμογή εξαρτάται από το μέγεθος του ηλεκτροδίου, το πάχος του βασικού μετάλλου, τη θέση συγκόλλησης, τον τύπο συμβολής και το είδος του αερίου προστασίας (αν χρησιμοποιείται). Πολύ μεγάλη τάση προκαλεί ανομοιόμορφες ραφές και μεγάλα επίπεδα εκτοξεύσεων. Πολύ μικρή τάση προκαλεί μικρή διείσδυση και μικρό πλάτος ραφής καθώς και μεγάλες ποσότητες εκτοξεύσεων.

Μέγεθος του ηλεκτροδίου: Η μέθοδος FCAW ενδείκνυται για συγκολλήσεις παχιών ελασμάτων, συνεπώς απαιτεί ηλεκτρόδια μεγαλύτερης διαμέτρου και εξασφαλίζει μεγαλύτερους ρυθμούς εναπόθεσης. Ηλεκτρόδια μικρότερης διαμέτρου δίνουν μεγαλύτερη διείσδυση και υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης για την ίδια ταχύτητα κίνησης και το ίδιο ρεύμα. Αυτό συμβαίνει γιατί η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη για τα μικρότερα ηλεκτρόδια. Παρόλα αυτά, ηλεκτρόδια μεγαλύτερου μεγέθους μπορούν να τρέξουν με μεγαλύτερες εντάσεις ρεύματος, αν το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι σημαντικό.

Προστασία αερίου: Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, στη FCAW δύναται να χρησιμοποιηθεί προστασία αερίου, συνήθως CO₂ ή μίγμα Ar+20-25% CO₂, ακόμη και στην περίπτωση συγκόλλησης με ανοξειδωτο σύρμα. Με το CO₂ η μεταφορά του μετάλλου στο λουτρό της συγκόλλησης γίνεται με χοντρές σταγόνες, ενώ με το μίγμα Ar+20-25% CO₂ 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 των παραμέτρων της μεθόδου δίνονται στον Πίνακα 2.3:

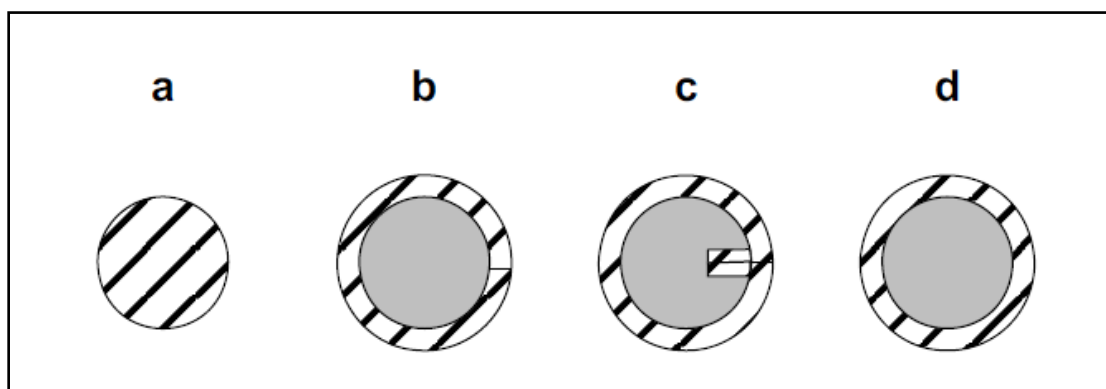
Πίνακας 2.3: Παράμετροι της μεθόδου FCAW (ενδεικτικές τιμές οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτροδίου)

Διάμετρος σύρματος (mm)	1.0	1.2	1.4	1.6	2.4
Τάση τόξου (V)	14-30	16-32	16-34	18-36	30-38
Ταχύτητα συγκόλλησης (m/min)	2.5-10	1.8-12	2-9	1.5-8.5	3-5
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (A)	80-250	100-320	120-380	140-450	350-500
Ποσότητα απόθεσης μετάλλου (kg/h)	1.2-4.2	1.3-7.5	1.6-7.5	1.6-8	5.5-8.5
Παροχή αερίου (l/min)	10-12	10-12	11-13	12-14	18-22

2.3.2.3. Σωληνοειδή ηλεκτρόδια και τυποποίησή τους

Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια αποτελούνται συνήθως από μεταλλικό, κυλινδρικό, εξωτερικό περίβλημα παρόμοιας σύστασης με το βασικό μέταλλο και από πυρήνα μεταλλικής, προστατευτικής σκόνης, η σύσταση της οποίας εξαρτάται από την κατηγοριοποίηση του ηλεκτροδίου και τον κατασκευαστή του.

Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των συμπαγών, όπως: υψηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας ρεύματος που τα χαρακτηρίζει, προσθήκη κραματικών στοιχείων στη σκόνη, προστασία της λίμνης συγκόλλησης λόγω της δημιουργίας του προστατευτικού στρώματος σκουριάς, καλύτερη σταθερότητα του τόξου, ανοχή σε λιγότερο καθαρή επιφάνεια του βασικού μετάλλου και, τέλος, ανάγκη για λιγότερο εξειδικευμένο προσωπικό. Μερικά είδη σωληνοειδών ηλεκτροδίων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Εγκάρσιες τομές συνήθων ηλεκτροδίων: a) συμπαγές ηλεκτρόδιο, b-d) σωληνοειδή ηλεκτρόδια [Pires 2006].

Η προστατευτική σκόνη βρίσκεται στεγανά κλεισμένη στο εσωτερικό των σωληνοειδών ηλεκτροδίων. Υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής τους. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει πρώτα τη δημιουργία ενός λεπτού ελάσματος σε σχήμα U. Στη συνέχεια συγκεκριμένη ποσότητα σκόνης διοχετεύεται στο διαμορφωμένο έλασμα και ακολούθως συμπιέζεται. Έπειτα, το έλασμα σχήματος U

περνάει από μια σειρά ραούλων και διαμορφώνεται ώστε να πάρει το τελικό του σχήμα και να σφραγιστεί η σκόνη στο εσωτερικό του. Στη δεύτερη μέθοδο παραγωγής, η διαδικασία ξεκινά με σωλήνα χωρίς ραφές, ο οποίος συνήθως έχει διάμετρο 2.54cm (1in). Το ένα άκρο του είναι σφραγισμένο, ενώ η είσοδος της σκόνης γίνεται από το ανοιχτό άκρο. Κατά το γέμισμα, ο σωλήνας υφίσταται ταλαντώσεις, ώστε να εξασφαλιστεί 100% πληρότητα σε σκόνη. Μετά την πλήρωση του σωλήνα, σφραγίζεται το ανοιχτό άκρο και όλο το σύστημα διέρχεται από μια σειρά ραούλων προς την τελική του διαμόρφωση. Και στις δύο μεθόδους παραγωγής, ο σωλήνας και το έλασμα παρασκευάζονται από το επιθυμητό κράμα. Επίσης, και στις δύο περιπτώσεις η σκόνη σφραγίζεται και στεγανοποιείται στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου, κάτι το οποίο βοηθάει στη σταθερή και ομαλή λειτουργία του ηλεκτροδίου. Τα ηλεκτρόδια διατίθενται σε διαμέτρους από 0.8mm ως 3.9mm. Τα μικρότερης διαμέτρου ηλεκτρόδια είναι σημαντικά πιο ακριβά, καθώς η διαδικασία πλήρωσης τους με σκόνη είναι ακριβότερη. Τα μεγαλύτερης διαμέτρου ηλεκτρόδια παράγουν πολύ μεγάλες ραφές που δε μπορούν να ελεγχθούν σε όλες τις θέσεις. Οι πιο διαδεδομένες διαμέτρους κυμαίνονται από 0.9mm ως 2.3mm.

Όπως είναι φυσικό, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια υπόκεινται και σε ορισμένους περιορισμούς. Αυτοί είναι οι εξής: Η ποσότητα των παραγόμενων αναθυμιάσεων είναι αρκετά μεγάλη, οι οποίες θεωρούνται τοξικές. Είναι αναγκαία η αφαίρεση της σκουριάς, ειδικά σε συγκολλήσεις με πολλά πάσα. Τέλος, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια είναι ακριβότερα από τα συμπαγή, αλλά αυτή η διαφορά στο κόστος αντισταθμίζεται από την απόδοσή τους, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλότερους ρυθμούς τήξης σε σχέση με τα συμπαγή.

Γενικά, η προστατευτική σκόνη αποτελείται κυρίως από πυρίτιο (Si), μαγγάνιο (Mn), τιτάνιο (Ti), αλουμίνιο (Al) και ζirkόνιο (Zr). Τα στοιχεία αυτά έχουν αντιοξειδωτική και αντινιτρίδική δράση. Τα κραματικά στοιχεία που περιέχονται συνήθως στον πυρήνα των σωληνοειδών ηλεκτροδίων είναι το νικέλιο (Ni), το βανάδιο (V), το πυρίτιο (Si), το χρώμιο (Cr), το κοβάλτιο (Co) και το μαγγάνιο (Mn). Κάθε ένα από αυτά συμβάλλει στη βελτίωση των χαρακτηριστικών της συγκόλλησης. Αυτά τα συστατικά, υπό τη θερμότητα του τόξου, ενώνονται με το τηγμένο μεταλλικό περιβλήμα του ηλεκτροδίου και μεταφέρονται στο βασικό μέταλλο. Στην περίπτωση των αυτοπροστατευόμενων ηλεκτροδίων, τα κύρια στοιχεία της σκόνης, εκτός από μεταλλικά, είναι ανθρακικά και φθοριούχα άλατα καλίου (K) και αλκαλικών γαιών (πχ ασβέστιο, Ca). Τα φθοριούχα άλατα έχουν χαμηλό σημείο τήξης και είναι αυτά που ατμοποιούνται πρώτα και παρέχουν την απαραίτητη αέρια προστασία γύρω από το ηλεκτρόδιο. Ωστόσο, τα αέρια αυτά είναι άκρως επικίνδυνα για το συγκολλητή λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τοξικού φθορίου και ενώσεων του.

Η προστατευτική σκόνη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο FCAW έχει τις ίδιες ιδιότητες και εξυπηρετεί τους ίδιους σκοπούς με τη σκόνη των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της μεθόδου SMAW. Παρέχει, δηλαδή, στη συγκόλληση τα εξής:

- **Αποξειδωτικά μέσα (deoxidizers)**, τα οποία ενώνονται με το ελεύθερο οξυγόνο από τη διάσπαση του CO₂ και σχηματίζουν αβλαβείς ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές είτε γίνονται μέρος της προστατευτικής σκουριάς και επιπλέον ή σχηματίζουν πολύ μικρά εγκλείσματα. Σε κάθε περίπτωση, η δέσμευση του οξυγόνου ελαττώνει την εμφάνιση πόρων και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.
- **Στοιχεία βελτίωσης ροής (fluxing agents)**, τα οποία αυξάνουν τη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης και ευνοούν την κίνησή της προς τις παρειές, ώστε να μην δημιουργούνται υποκοπές.
- **Κραματικά στοιχεία (alloying elements)**, τα οποία προστίθενται στην προστατευτική σκόνη για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση σε διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης. Πολλές φορές, τα κραματικά στοιχεία προστίθενται για να αυξήσουν τους ρυθμούς εναπόθεσης τηγμένου μετάλλου.
- **Στοιχεία σχηματισμού σκουριάς (slag formers)**, τα οποία ευνοούν τη δημιουργία προστατευτικού στρώματος πάνω από την τηγμένη λίμνη συγκόλλησης. Στην τηγμένη

κατάσταση, η σκουριά αντιδρά με τις ακαθαρσίες του μετάλλου και τις αφαιρεί. Ακόμη, μπορεί να στερεοποιηθεί σε υψηλή θερμοκρασία συμβάλλοντας στη διατήρηση του σχήματος της συγκόλλησης και στην ελάττωση του ρυθμού απόψυξης της.

- **Σταθεροποιητές τόξου (arc stabilizers)**, δηλαδή χημικές ουσίες που περιέχονται στη σκόνη του ηλεκτροδίου και συμβάλλουν στη σταθερότητα του τόξου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η διείσδυση, η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου καθώς και το παραγόμενο ποσοστό εκτοξεύσεων.
- **Αέρια προστασία (shielding gas)**, η οποία εξασφαλίζεται από την ατμοποίηση των συστατικών μερών της σκόνης. Με την ατμοποίηση δημιουργείται νέφος προστασίας μεγάλου όγκου, που προστατεύει τη συγκόλληση από οξειδωση.

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 τυποποίηση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων είναι αρκετά πιο περίπλοκη από εκείνη των συμπαγών λόγω των πολλών δυνατών συνδυασμών που υπάρχουν, χωρίς όμως να φθάνει την περιπλοκότητα των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων.

Τυποποίηση κατά EN

1. Τυποποίηση σωληνοειδών ηλεκτροδίων ανθρακούχων και λεπτόκοκκων χαλύβων

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

Παράδειγμα συμβολισμού: το ηλεκτρόδιο T424BC

Το 42 σημαίνει όριο ελαστικότητας 420 Μpa, το 4 ότι η δυσθραυστότητα είναι 47 J, όταν η θερμοκρασία είναι -30°C και το C σημαίνει ότι το αέριο προστασίας είναι το CO₂. 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 2.4.

Πίνακας 2.4 : 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 ηλεκτρόδιο είναι παραγεμισμένο με σκόνη συλλιπάσματος. Για συλλίπασμα ρουτιλίου χρησιμοποιείται το R ή το P, ενώ για γέμιση με σκόνη σιδήρου το M. Στην τελευταία περίπτωση δεν υπάρχει προστατευτική σκουριά από το συλλίπασμα. Στον πίνακα 2.5 φαίνονται όλα τα είδη συλλιπάσματος των σωληνοειδών ηλεκτροδίων.

Πίνακας 2.5: 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 συλλιπάσμα
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 $x \text{ cm}^3$ 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 2.6 : συμβολισμός των θέσεων συγκόλλησης σωληνοειδών ηλεκτροδίων 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, PC
4	Κατάλληλο μόνο για PA, PB
5	Κατάλληλο PA, PB, PC, PG

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

Παραδείγματα:

- 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 σωληνοειδή ηλεκτρόδια 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)

2. Ανοξειδωτα σωληνοειδή ηλεκτρόδια κατά EN

Η τυποποίηση των ανοξειδωτων σωληνωτών συρμάτων ακολουθεί 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.

Τυποποίηση κατά AWS

Η τυποποίηση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων κατά AWS , για τις συγκολλήσεις ανθρακομαγνανιούχων χαλύβων γίνεται με τη βοήθεια του παρακάτω ορισμού:

E X X T - XX π.χ. E 7 0 T - 11

όπου:

- Στην πρώτη θέση, το γράμμα E υποδεικνύει την ύπαρξη ηλεκτροδίου.
- Στη δεύτερη θέση εισάγεται αριθμός, ο οποίος πολλαπλασιασμένος επί 10, δίνει την αντοχή του ηλεκτροδίου σε εφελκυσμό.
- Στην τρίτη θέση εισάγεται είτε ο αριθμός 0 είτε ο αριθμός 1, και υποδεικνύουν τη θέση συγκόλλησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρόδιο. Το 0 αντιστοιχεί σε επίπεδες και οριζόντιες θέσεις, ενώ το 1 χρησιμοποιείται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Στην τέταρτη θέση , το γράμμα T υποδεικνύει σωληνοειδές ηλεκτρόδιο.
- Ο αριθμός στην πέμπτη θέση (X = 1-14) υποδηλώνει τη χρήση του ηλεκτροδίου. Στο άνωθεν παράδειγμα, ο αριθμός 11 αντιστοιχεί σε ηλεκτρόδιο το οποίο κατά την τήξη του μεταφέρεται στη λίμνη συγκόλλησης με τη μέθοδο των σταγονιδίων, χρησιμοποιείται με συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας, δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης και είναι κατάλληλο για υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και πολλαπλά πάσα.
- Η έκτη θέση υποδηλώνει το είδος της προστασίας. Για προστασία αερίου μίγματος Ar+20-25% CO₂ χρησιμοποιείται το γράμμα M, για προστασία αερίου 100% CO₂ χρησιμοποιείται το γράμμα C, ενώ αν η θέση είναι κενή δε χρησιμοποιείται αέρια προστασία.

Η τυποποίηση, κατά AWS, για τον πυρήνα σωληνοειδών ηλεκτροδίων δίνεται από τα ακόλουθα πρότυπα:

- AWS A5.20-1979 → Ηλεκτρόδια ανθρακούχου χάλυβα
- AWS A5.22-1980 → Ηλεκτρόδια με πυρήνα χρωμίου και χρωμίου-νικελίου.
- AWS A5.29-1980 → Ηλεκτρόδια χαμηλά κραματωμένων χαλύβων.

2.3.2.4 Τυπικά σφάλματα μεθόδου FCAW

Τα συνηθέστερα σφάλματα που εντοπίζονται σε συγκολλήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με σωληνοειδή ηλεκτρόδια, αναλύονται στη συνέχεια:

Εμφάνιση πόρων: Μπορεί να προκύψουν από υγρασία στην προστατευτική σκόνη, από ύπαρξη ακαθαρσιών στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης ή από ακατάλληλο χειρισμό του πιστολιού συγκόλλησης.

Εξαιτίας της ευαισθησίας της προστατευτικής σκόνης στην υγρασία του περιβάλλοντος, τα ηλεκτρόδια πρέπει να αποθηκεύονται σε χώρους με ξηρή ατμόσφαιρα. Ειδικά τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην απορρόφηση υγρασίας από το περιβάλλον. Γενικά αν η πάστα απορροφήσει υγρασία, η αφαίρεσή της είναι πάρα πολύ δύσκολη. Το νερό, υπό την παρουσία του τόξου, διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο μπορεί να απορροφηθεί από τη λίμνη συγκόλλησης, ενώ το οξυγόνο ευνοεί το σχηματισμό οξειδίων.

Τα χαλύβδινα ελάσματα που έχουν υποστεί θερμή έλαση καλύπτονται συνήθως από ένα σκούρο γκρι ή μαύρο επιφανειακό στρώμα οξειδίων του σιδήρου. Παρόλο που το στρώμα αυτό είναι αρκετά λεπτό, μπορεί να αποτελέσει πηγή επαρκούς ποσότητας οξυγόνου που θα προκαλέσει εμφάνιση πόρων στη συγκόλληση. Οι πόροι που δημιουργούνται από το στρώμα αυτό των οξειδίων συνήθως κατανέμονται ομοιόμορφα στο μέταλλο συγκόλλησης. Αν, όμως, το στρώμα οξειδίων έχει μεγάλο πάχος, οι πόροι δεν είναι ορατοί στην επιφάνεια της συγκόλλησης, καθώς βρίσκονται κάτω από αυτή. Σε κάθε περίπτωση, τα οξειδία πρέπει να αφαιρούνται από την επιφάνεια του βασικού μετάλλου πριν τη συγκόλληση.

Στη FCAW-G, το πιστόλι πρέπει να βρίσκεται αρκετά κοντά στη λίμνη συγκόλλησης προκειμένου να εξασφαλίζεται επαρκής αέρια προστασία. Αν κατά τη διαδικασία συγκόλλησης υπάρχουν ισχυρά ρεύματα αέρα ή το πιστόλι δεν είναι επαρκώς κοντά στη λίμνη συγκόλλησης, δεν εξασφαλίζεται κατάλληλη αέρια προστασία, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο εμφάνισης πόρων. Αν η συγκόλληση πραγματοποιείται σε εξωτερικό χώρο ή σε περιοχή με ρεύματα, είναι αναγκαία η αύξηση της παροχής του αερίου προστασίας ή η χρήση ανεμοθώρακα.

Ένα πολύ κοινό σφάλμα στη μέθοδο FCAW είναι ένα είδος πόρων που ονομάζεται «worm tracks». Το φαινόμενο εκδηλώνεται ως μια γραμμική επιφάνεια κενών κοντά στην κεντρική γραμμή συγκόλλησης, παράλληλα με την επιφάνεια ραφής. Κύρια αιτία του φαινομένου είναι ο εγκλεισμός αερίων στο μέταλλο συγκόλλησης κατά τη στερεοποίηση της συγκόλλησης. Το προστατευτικό στρώμα σκουριάς στερεοποιείται πριν προλάβουν τα αέρια να δραπετεύσουν εντελώς από το μέταλλο συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να παγιδεύονται ανάμεσα στη σκουριά και τη λίμνη συγκόλλησης. Έτσι, δημιουργείται η επιφάνεια πόρων που φαίνεται στην εικόνα 2.3. Η εμφάνιση πόρων αυτής της μορφής είναι πιθανότερη όταν χρησιμοποιείται αέρια προστασία μίγματος Ar/CO₂, παρά 100% CO₂.



Εικόνα 2.3 : Γραμμική ένωση πόρων, γνωστή ως «worm tracks»

Αιτίες του φαινομένου μπορεί να είναι μια ή περισσότερες από τις εξής:

- Υγρασία από ακαθαρσίες στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια του βασικού μετάλλου.
- Υγρασία στο μέταλλο συγκόλλησης που μπορεί να εισέλθει και από το ίδιο το ηλεκτρόδιο.
- Μεγάλη παροχή αερίου, με αποτέλεσμα την πρόκληση τυρβώδους ροής και, ως εκ τούτου, εισροή ατμοσφαιρικού αέρα στην περιοχή του τόξου.
- Απορρόφηση ακαθαρσιών από το μέταλλο συγκόλλησης, λόγω διαρροής στους σωλήνες παροχής αερίου προστασίας.
- Λιγότερο πιθανό, το αέριο προστασίας να έχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας ή υψηλό σημείο υγροποίησης.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου λαμβάνονται οι απαραίτητες προφυλάξεις για την κάθε μια από τις προαναφερθείσες αιτίες. Καταρχάς είναι απαραίτητος ο καθαρισμός των επιφανειών των προς συγκόλληση τεμαχίων πριν την έναρξη της διαδικασίας. Πρέπει να απομακρυνθούν, δηλαδή, υπολείμματα ελαίου, λιπαντικών ή γράσου, που μπορεί να έχουν μείνει από την κατεργασία των τεμαχίων. Επίσης είναι πολύ σημαντικός ο έλεγχος των σωληνώσεων μεταφοράς αερίου για τυχόν διαρροές, καθώς και ο έλεγχος του ρυθμού παροχής του αερίου κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Επιπλέον, είναι αναγκαίο τα ηλεκτρόδια να φυλάσσονται σε ξηρό μέρος. Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο έχει απορροφήσει υγρασία, μπορεί να τοποθετηθεί σε φούρνο συγκεκριμένης θερμοκρασίας για ένα χρονικό διάστημα, ώστε να επανέλθει στην επιθυμητή κατάσταση. Τέλος, απαραίτητη είναι η εκλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου κατά περίπτωση.

Εμφάνιση ρωγμών: Οφείλεται σε υπέρμετρη εντατική κατάσταση της ραφής, χρήση ακατάλληλου ηλεκτροδίου και ανεπαρκή ποσότητα αποξειδωτικών στοιχείων στον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Για την πρόληψη του φαινομένου, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ραφή με όσο το δυνατόν μικρότερες παραμένουσες τάσεις και να χρησιμοποιείται αρκετά όγκιμο βασικό μέταλλο. Επίσης, κατά την επιλογή του ηλεκτροδίου, πρέπει να ελέγχεται η σύσταση της προστατευτικής σκόνης.

Ατελής τήξη και ατελής διείσδυση: Τα συγκεκριμένα προβλήματα προκύπτουν από εφαρμογή ακατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης, λανθασμένο σχεδιασμό της συμβολής συγκόλλησης και λανθασμένους χειρισμούς. Αν η επιλογή των παραμέτρων είναι ακατάλληλη, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές σε ρεύμα και ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της

συγκόλλησης. Αν ο σχεδιασμός της συμβολής είναι λάθος, θα πρέπει να γίνει αλλαγή στο άνοιγμα της ρίζας. Τέλος, ο ακατάλληλος χειρισμός οδηγεί σε λανθασμένη τοποθέτηση του ηλεκτροδίου ως προς τη λίμνη συγκόλλησης, οπότε θα πρέπει να τοποθετηθεί στην κατάλληλη θέση.

2.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- Καλή όψη ραφής και μικρά ποσοστά εκτοξεύσεων.
- Υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης.
- Καλές μηχανικές ιδιότητες συγκόλλησης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Στην περίπτωση της FCAW-G, πολύ υψηλή απόδοση των ηλεκτροδίων (άνω του 90%), πολύ μικρά ποσοστά υδρογόνου στο μέταλλο συγκόλλησης και εύκολο άναμμα τόξου.
- Στην περίπτωση της FCAW-S, πολύ εύκολη η εφαρμογή της σε εξωτερικούς χώρους και με περιορισμένες επανεναύσεις του τόξου. Επίσης, δεν απαιτεί μεγάλη καθαρότητα μετάλλου βάσης και, τέλος, μειώνεται σημαντικά το κόστος της διαδικασίας, καθώς δε χρησιμοποιείται αέρια προστασία.

Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή:

- Αρκετά υψηλά ποσοστά αναθυμιάσεων.
- Είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της σκουριάς μετά το πέρας της διαδικασίας, κάτι το οποίο είναι αρκετά χρονοβόρο, ειδικά σε συγκολλήσεις με πολλαπλά πάσα.
- Στην περίπτωση της FCAW-G, η συγκόλληση σε εξωτερικό χώρο παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες.
- Στην περίπτωση της FCAW-S, μπορεί να παρουσιαστούν εκτοξεύσεις μετάλλου, ενώ, προκειμένου να γίνει επανέναυση του τόξου πρέπει να κοπεί ένα μέρος της προέκτασης του ηλεκτροδίου.

2.3.3 Συγκόλληση με Laser [21][22][27][39][54-60]

2.3.3.1 Αρχή λειτουργίας Laser

Ο όρος "LASER" προέκυψε ως ακρωνύμιο των λέξεων της φράσης "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" που αποδίδεται στα ελληνικά ως «ενίσχυση φωτός με διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Το Laser αποτελεί μία ειδική δέσμη φωτεινής ακτινοβολίας, που δεν υπάρχει σε φυσικές συνθήκες, αλλά παράγεται μόνο στο εργαστήριο με ειδικό τεχνολογικό εξοπλισμό. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί τύποι Laser, διαφορετικοί ως προς τα χαρακτηριστικά και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, υπάρχουν ορισμένες βασικές αρχές στη λειτουργία τους που είναι κοινές για όλους τους τύπους.

Ειδικότερα, το Laser αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

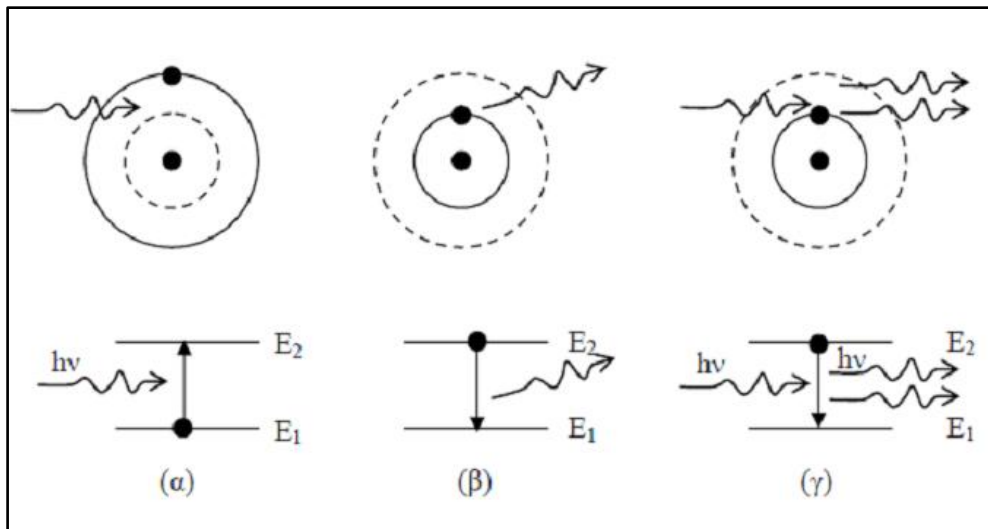
- Το ενεργό μέσο ή μέσο ενίσχυσης
- Την πηγή άντλησης
- Την οπτική κοιλότητα ή κοιλότητα συντονισμού ή οπτικό αντηχείο

Ενεργό μέσο: Η ύλη και το φως, ως γνωστόν, αλληλεπιδρούν. Όταν ένα άτομο ύλης εκτίθεται σε μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η κατανομή του ηλεκτρικού του φορτίου επηρεάζεται περιοδικά από την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας. Συνεπώς, λαμβάνει χώρα μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα φωτόνια και το άτομο.

Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις αλληλεπιδράσεως:

- Θεωρούμε ένα άτομο που χαρακτηρίζεται από τις ενεργειακές στάθμες E_1 και E_2 ($E_1 < E_2$), και έστω ότι προσπίπτει σε αυτό ακτινοβολία κάποιας ενέργειας με την οποία αλληλεπιδρά. Τότε, το άτομο περνάει από τη στάθμη E_1 στη διεγερμένη στάθμη E_2 . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **απορρόφηση** και είναι αναστρέψιμη, οπότε συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.
- Ως γνωστόν, η θεμελιώδης στάθμη είναι η σταθερότερη. Αυτό σημαίνει ότι μετά την πάροδο κάποιου χρόνου, το διεγερμένο άτομο αποδιεγείρεται αυθόρμητα στη θεμελιώδη στάθμη. Αποδίδει λοιπόν ενέργεια ίση με $E_2 - E_1$ υπό μορφή ενός φωτονίου με τέτοια συχνότητα, ώστε $h\nu = E_2 - E_1$. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας**.
- Επιπλέον, αν στο διεγερμένο άτομο προσπέσει ένα φωτόνιο που προέρχεται από το εξωτερικό του ατόμου και που έχει ακριβώς την ίδια ενέργεια με αυτήν του φωτονίου που προέρχεται από την μετάβαση από τη στάθμη E_2 στη στάθμη E_1 , το άτομο εκπέμπει ένα δεύτερο φωτόνιο. Το προσπίπτον και το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά (διεύθυνση, συχνότητα, φάση, πόλωση). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **εξαναγκασμένη εκπομπή**. Η λήψη laser επιτυγχάνεται χάρη στην εξαναγκασμένη εκπομπή.

Το μέσο μέσα στο οποίο μπορούμε να έχουμε εκπομπή Laser ονομάζεται ενεργό μέσο και μπορεί να βρίσκεται σε στερεά, υγρή ή αέρια φάση.



Σχήμα 2.15 : (α) Εξαναγκασμένη απορρόφηση , (β) Αυθόρμητη εκπομπή , (γ) Εξαναγκασμένη εκπομπή

Πηγή άντλησης: Σύμφωνα με τη θεωρία των ενεργειακών καταστάσεων, η αντιστροφή πληθυσμών, η οποία είναι και απαραίτητη για τη λήψη δράσης laser, απαιτεί τη διέγερση ατόμων σε ένα ανώτερο επίπεδο ενέργειας , κάτι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Αυτό ονομάζεται άντληση. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι άντλησης, όπως:

- Οπτική
- Ηλεκτρονική
- Χημική
- Θερμική
- Με βαρέα στοιχεία
- Με ιονίζουσες ακτινοβολίες

Οπτική κοιλότητα: Η ενίσχυση του φωτός εξαρτάται εκτός από την ισχύ της πηγής εξωτερικής άντλησης και από την αύξηση των διαστάσεων του ενεργού μέσου. Αυτό έχει προφανώς περιορισμένες διαστάσεις, οπότε και πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία η οποία θα επιτρέψει την εκμετάλλευση πολλαπλών περασμάτων της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας μέσα από το εκάστοτε μέσο ενίσχυσης. Το παραπάνω το επιτυγχάνουμε χρησιμοποιώντας μια κοιλότητα συντονισμού η οποία αποτελείται από δυο κάτοπτρα, εκ των οποίων το ένα, ημιπερατό, επιτρέπει σε κάποιο ποσοστό της ακτινοβολίας να εξέλθει, στέλνοντας εξ ανακλάσεως το υπόλοιπο ποσοστό μέσα στο ενεργό μέσο, τα διεγερμένα άτομα του οποίου και παράγουν εκ νέου εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Αυτή η κοιλότητα ονομάζεται και οπτικό αντηχείο, εφόσον οι περιοχές συχνότητας που μας απασχολούν ανήκουν στο υπέρυθρο, το ορατό ή το υπεριώδες.

Τα χαρακτηριστικά μιας δέσμης Laser είναι τα εξής:

- **Συμφωνία φάσης:** Είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της δέσμης laser. Μια ακτινοβολία ονομάζεται συμφωνική χωρικά ή χρονικά, όταν μπορούμε να υπολογίσουμε τη φάση του κύματος και το πλάτος του, για κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο,

ξεκινώντας από κάποιες γνωστές τιμές. Η συμφωνία φάσης μπορεί να διακριθεί σε χρονική και χωρική.

- **Κατευθυντικότητα:** Οι συμβατικές πηγές φωτός εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις. Συνεπώς η ένταση της ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο του χώρου μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης αυτού του σημείου από την πηγή. Έτσι, λόγω των ιδιοτήτων του αντηχείου, εκπομπή φωτός πραγματοποιείται μόνο παράλληλα και πολύ κοντά στον οπτικό άξονα της κοιλότητας.
- **Πυκνότητα ισχύος:** Η ένταση της δέσμης μπορεί να είναι πολύ ψηλή, καθώς η αποδιδόμενη ενέργεια είναι εστιασμένη σε μια πολύ μικρή επιφάνεια. Η λειτουργία ενός laser μπορεί να είναι συνεχής ή παλμική. Για την παλμική λειτουργία, η ενέργεια αποδίδεται σε έναν παλμό ή σε μια σειρά επαναλαμβανόμενων παλμών. Δεδομένου ότι η διάρκεια ενός παλμού μπορεί να είναι της τάξης των 10^{-9} sec, η ισχύς είναι πάρα πολύ μεγάλη (1MW) ακόμα και αν η συνολική αποδιδόμενη ενέργεια είναι πολύ χαμηλή (10^{-3} J).
- **Ενεργειακή κατανομή στο χώρο:** Η κατανομή της ενέργειας σε μια διατομή μιας δέσμης laser καθορίζει την ενεργειακή της κατανομή. Η μορφολογία της ενεργειακής κατανομής καθορίζεται από τη διαμόρφωση του αντηχείου. Διάφορες μορφολογίες είναι εφικτές κάτω από την ονομασία Transverse Electromagnetic Mode ή Εγκάρσιος Ηλεκτρομαγνητικός Ρυθμός. Οι δείκτες x , y είναι θετικοί ακέραιοι και εκφράζουν τις κατανομές έντασης κατά μήκος των δυο αξόνων x , y κάθετων στον άξονα z (ο άξονας της δέσμης).

2.3.3.2. Τύποι Laser

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα Laser χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες με τη σειρά τους σε υποομάδες, ως εξής:

1. Τα Laser στερεάς κατάστασης, που χωρίζονται σε:
 - i. Μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη, σαπφείρου).
 - ii. Ημιαγωγών (διόδων).
2. Τα Laser αερίων, που χωρίζονται σε:
 - i. Ατομικά (π.χ. He-Ne, He-Cd).
 - ii. Μοριακά (CO_2 , N_2 , χημικά, μακρινού υπερύθρου, excimer).
 - iii. Ατμών μετάλλου (Cu, Au).
 - iv. Ιοντικά (Ar^+ , Kr^+).
3. Τα υγρά Laser, τα οποία είναι κυρίως χρωστικών dye.
4. Τα ειδικά Laser, όπως:
 - i. Ακτίνων Χ.
 - ii. Ελεύθερου ηλεκτρονίου.

2.3.3.2.1. Laser στερεάς κατάστασης

Τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν. Γι' αυτό το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των αερίων. Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός και μάλιστα όχι απαραίτητα laser.

Το ενεργό υλικό στο laser στερεάς κατάστασης είναι ένα συγκεκριμένο υλικό, στο οποίο έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων. Τα ιόντα του υλικού πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα

του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για τη μεταπήδηση laser. Το υλικό βάσης επηρεάζει λίγο το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ίδιο υλικό πρόσμιξης σε δύο διαφορετικά υλικά βάσης έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser. Το υλικό βάσης καθορίζει, όμως, τις φυσικές ιδιότητες του ενεργού υλικού, όπως θερμοχωρητικότητα, διαστολή και επομένως τη μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύ.

Το στερεό ενεργό υλικό που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία είναι κρύσταλλος ή γυαλί, συνήθως σε σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο. Η ενέργεια εισέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια, ενώ το laser εξέρχεται από μια από τις βάσεις.

Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή laser με παλμούς είναι συνήθως από λάμπες ξένου ή κρυπτού χαμηλής πίεσης. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή συνεχούς laser είναι συνήθως από λάμπες αλογόνου ή υδραργύρου υψηλής πίεσης. Τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε και η τεχνολογία των laser διόδων τα οποία έχουν εφαρμογή και στην προσφορά ενέργειας για laser στερεάς κατάστασης, επειδή το μήκος κύματος των laser διόδων μπορεί να προσαρμοστεί και να ταιριάζει στο φάσμα απορρόφησης του ενεργού (στερεού) υλικού.

2.3.3.2.2. Laser αερίων

Τα περισσότερα αέρια (άτομα ή μόρια) μπορούν να οδηγηθούν σε κατάσταση κατάλληλη για εκπομπή laser, κυρίως όταν βρίσκονται υπό χαμηλή πίεση.

Η ύπαρξη χαμηλής πίεσης διευκολύνει τη διαδικασία για τους εξής δύο λόγους :

- για να είναι δυνατή η ηλεκτρική εκκένωση μακράς πορείας, κατά μήκος του σωλήνα με το ενεργό υλικό, στα δυο άκρα του οποίου εμβαπτίζονται τα δύο ηλεκτρόδια.
- για να παραχθεί ηλεκτρομαγνητικό φάσμα πολύ μικρού εύρους, το οποίο ευρύνεται όταν παρεμβάλλονται συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων.

Τα αέρια Laser μπορούν να διεγερθούν με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται με εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα. Ηλεκτρόνια αποσπώνται από την κάθοδο, επιταχύνονται προς την άνοδο, συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και τους μεταδίδουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας διεγείροντάς τα (η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται στις λάμπες φθορισμού).

Η οπτική άντληση ως μέθοδος διέγερσης είναι δύσκολη για τα laser αερίου. Για να απορροφηθεί αρκετό ποσό ενέργειας απαιτείται το φάσμα απορρόφησης του υλικού να είναι παρόμοιο με το φάσμα εκπομπής της πηγής. Όμως οι κοινές πηγές φωτός έχουν ευρύ φάσμα εκπομπής, ενώ τα άτομα του αερίου απορροφούν σε «λεπτές γραμμές». Γενικά η οπτική άντληση δεν επιλέγεται για τη διέγερση του ενεργού υλικού αερίων laser. Εξαιρεση είναι η χρήση της δέσμης laser CO₂ για την οπτική άντληση του ενεργού υλικού του μακρινού υπέρυθρου αερίου laser.

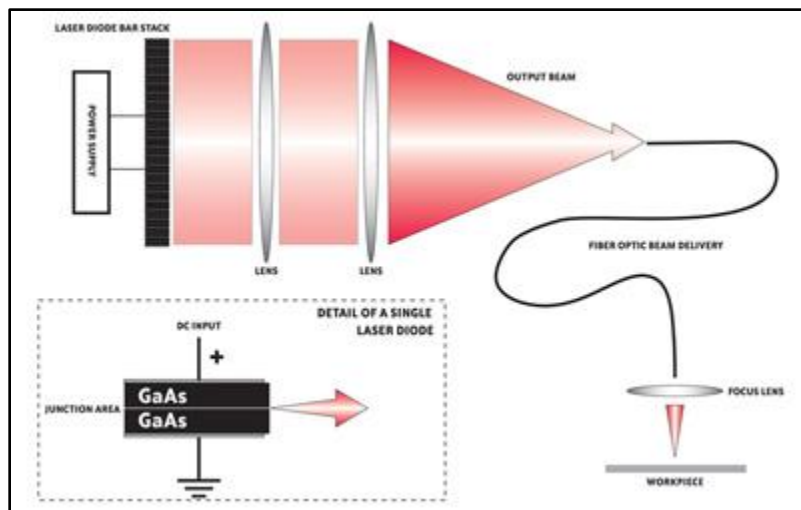
2.3.3.2.3. Laser ημιαγωγών/διόδων (Semiconductor/Diode Laser)

Τα laser διόδων είναι πολύπλοκοι ημιαγωγοί οι οποίοι μετατρέπουν ηλεκτρικό ρεύμα σε φως. Η διαδικασία μετατροπής είναι αρκετά αποδοτική κατά το ότι παράγει μικρό ποσό θερμότητας συγκρινόμενο με το λαμπρό φως.

Όταν το ρεύμα περνάει μέσα από μία ημιαγωγή ένωση, προκαλείται μία αναστροφή πληθυσμού (population inversion), στην οποία τα ηλεκτρόνια στη στοιβάδα αγωγιμότητας (conduction band) ξεπερνούν αυτά που βρίσκονται στη στοιβάδα σθένους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι πιο πιθανή η πτώση ενός ηλεκτρονίου από την στοιβάδα αγωγιμότητας στη στοιβάδα σθένους παράγοντας ένα επιπλέον φωτόνιο, από ότι το αντίστροφο. Έτσι, όταν το φως διέρχεται από μία

τέτοια ένωση, αυξάνεται η έντασή του. Τα τοιχώματα της κοιλότητας laser είναι απέναντι το ένα από το άλλο, έτσι ώστε η μεγαλύτερη ποσότητα από το ενισχυμένο φως να ανακλαστεί μέσα στην κοιλότητα, όπου θα ενισχυθεί επιπλέον. Αν η απώλεια στη διαδρομή επιστροφής του φωτός είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες στο τέλος της κοιλότητας, τότε θα δημιουργηθούν περιοδικές μεταβολές στη συχνότητα. Οι συχνότητες στις οποίες δημιουργούνται αυτές οι μεταβολές καθορίζονται από τις διαστάσεις της κοιλότητας.

Σε γενικές γραμμές, οι μεταβολές αυτές θα δημιουργηθούν σε κάθε συχνότητα, όπου το μήκος της κοιλότητας είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος, με την προϋπόθεση ότι στη διαδρομή επιστροφής η απώλεια του laser είναι θετική για τη συχνότητα αυτή. Μια σχηματική παράστασή ενός τέτοιου laser φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 2.16:



Σχήμα 2.16 : Βασική διάταξη των laser διόδων.[41]

Τα laser αυτά είναι αρκετά ελκυστικά , καθώς παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Καταλαμβάνουν μικρό χώρο.
- Η περιοχή εκπομπής τους είναι μικρή , συγκρινόμενη με τις διαστάσεις των οπτικών ινών.
- Έχουν υψηλή ακτινοβολία (εκπέμπουν πολύ φως σε μικρή περιοχή).
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία.

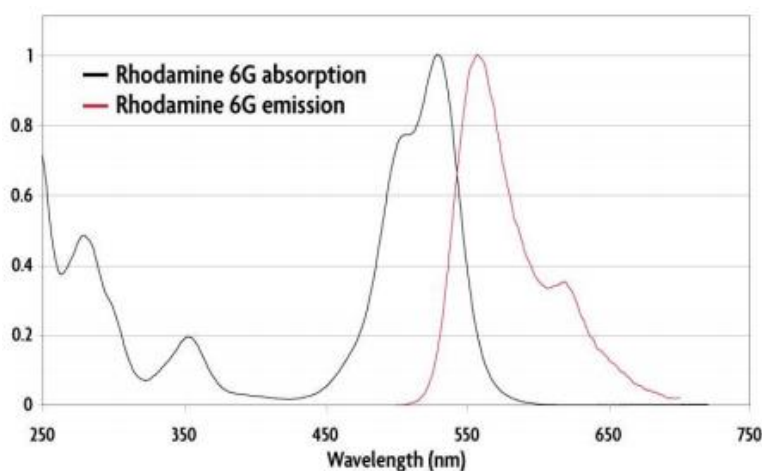
Τα laser διόδων συνήθως κατασκευάζονται από GaAlAs (Γάλλιο Αλουμίνιο Αρσενίδιο) για συσκευές μικρών μηκών κύματος. Συσκευές μεγάλων μηκών κύματος γενικά χρησιμοποιούν InGaAsP (Ίνδιο-Γάλλιο-Αρσενίδιο-Φωσφίδιο).

2.3.3.2.4. Υγρά Laser

Το laser χρωστικών μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική συσκευή μετατροπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός μήκους κύματος σε ένα άλλο και μάλιστα προσαρμόσιμο κατά το επιθυμητό. Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία μπορεί να γίνει η προσαρμογή εξαρτάται από τη χρωστική. Μόρια χρωστικής (dye) συνήθως είναι οργανικά φθορίζοντα συμπλέγματα που περιέχουν μεγάλο αριθμό κυκλικών δομών. Το ενεργό υλικό Laser χρωστικής είναι τέτοια μόρια χρωστικής διαλυμένα συνήθως σε αλκοόλη. Από την αλληλεπίδραση των μορίων χρωστικής με το διαλύτη διευρύνεται η ζώνη των ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης και σχηματίζεται ευρεία

ζώνη εκπεμπόμενων (αλλά και απορροφούμενων) συχνοτήτων. Η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της εκπεμπόμενης επειδή υπάρχει απώλεια ενέργειας κατά τη διαδικασία της «μεταφοράς». Επομένως τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης (βλ. σχήμα 2.17).

Είναι εφικτή σημαντική ισχύς laser στην έξοδο επειδή υπάρχουν πολλά μόρια χρωστικής (ενεργό υλικό), συγκριτικά με το μικρό ποσοστό των ιόντων στο ενεργό υλικό των Laser στερεάς κατάστασης. Απαραίτητες προϋποθέσεις λειτουργίας του laser υγρής κατάστασης είναι να απορροφά έντονα τα μήκη κύματος που προκαλούν τη διέγερσή του και να μην απορροφά τα μήκη κύματος που το ίδιο εκπέμπει. Ο φωτισμός του ενεργού υλικού μπορεί να γίνει εξωτερικά ή όλου του υγρού που βρίσκεται σε διαφανές δοχείο ή του μέρους του υγρού που κατά τη διάρκεια ροής του περνά από ειδικά διαμορφωμένο ακροφύσιο. Η επιλογή του επιθυμητού μήκους κύματος εξόδου γίνεται με κατάλληλη τοποθέτηση ενός πρίσματος ή ενός πλέγματος.



Σχήμα 2.17 : Τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης.

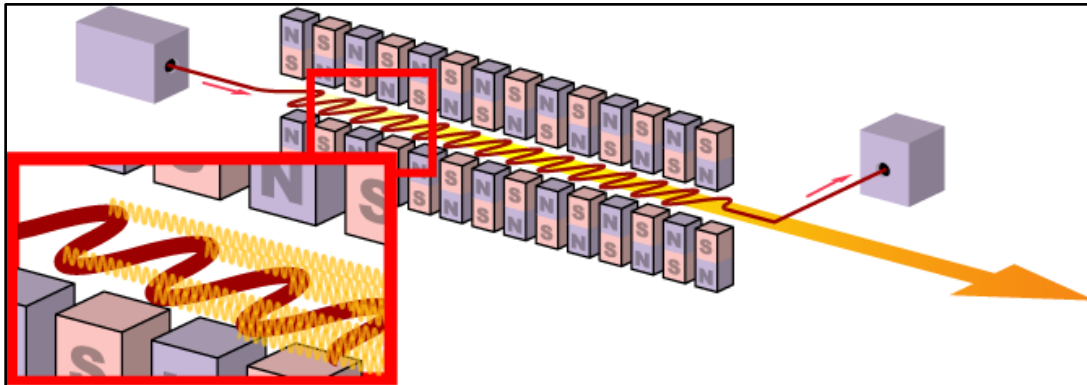
2.3.3.2.5. Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων (Free Electron Lasers, FELs)

Το Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μια συσκευή υψηλής απόδοσης που εκπέμπει ακτίνες Laser οποιουδήποτε μήκους κύματος, το οποίο εξαρτάται από το σχεδιασμό της συσκευής και όχι από τις ιδιότητες του ενεργού υλικού.

Η τιμή της ταχύτητας των ηλεκτρονίων είναι παραπλήσια αυτής του φωτός και η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων γίνεται σε κενό. Υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόνια και ειδικά διαμορφωμένο, περιοδικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, από σειρά μαγνητών τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις (βλ. σχήμα 2.10). Περιοδικά ασκούμενο μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει κατά βήματα τη διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου, που χάνει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser (επιτάχυνση ηλεκτρικού φορτίου → εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser). Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος καθορίζεται από την περιοδικότητα του μαγνητικού πεδίου και την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια μεταδίδουν μέρος της ενέργειάς τους στο «συμπεριεχόμενο» ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ειδικότερα στην «ηλεκτρική» συνιστώσα του, εφόσον είναι πολωμένο

για να διατηρείται η ταλάντωσή του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, κάθετο προς το επίπεδο του επιπρόσθετου περιοδικού μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν, όμως, μειονεκτήματα επειδή οι συσκευές αυτές απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα χιλιάδων Amperes και υψηλό δυναμικό χιλιάδων Volts για να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ταχύτητες των ηλεκτρονίων. Η συσκευή έχει μεγάλες διαστάσεις, υψηλό κόστος και αναπόφευκτα δημιουργούνται επικίνδυνες ακτίνες X. Βέβαια, η εξερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser μπορεί να έχει ισχύ ακόμη και Giga Watt.



Σχήμα 2.18 : Διάταξη της συστοιχίας μαγνητών στην καρδιά του συστήματος laser ελεύθερων ηλεκτρονίων.[55]

2.3.3.3. Είδη Laser που χρησιμοποιούνται στις υβριδικές συγκολλήσεις στη ναυπηγική

2.3.3.3.1. Laser CO₂

Το laser CO₂ ανήκει στην κατηγορία laser αερίων. Το μήκος κύματος εκπομπής αυτών των laser είναι 10.6 μm στην περιοχή της μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το Laser CO₂ αποδίδει δέσμη ισχύος μερικών Watt έως και 25kW (ή και μεγαλύτερη) και είναι το πιο διαδεδομένο στη βιομηχανία. Ακόμα, αποδίδει περισσότερη ενέργεια από άλλα είδη, γεγονός που του προσδίδει ένα ακόμα πλεονέκτημα, οικονομικής φύσεως. Το ενεργό μέσο του laser CO₂ είναι ένα μίγμα CO₂, N₂, He και πιθανόν κάποιας μικρής ποσότητας H₂, υδρατμών και/ή Xe. Όπως συμβαίνει στα περισσότερα laser αερίων, η άντληση πραγματοποιείται με ηλεκτρική εκκένωση. Αυτή η εκκένωση διεγείρει τα μόρια του N₂ που θα μεταφέρουν την ενέργειά τους στα άτομα του CO₂, καθώς συγκρούονται μαζί τους. Αυτού του είδους το laser μπορεί να λειτουργήσει και παλμικά, διακόπτοντας τη δέσμη, διανέμοντας τη διαθέσιμη ενέργεια με μια συχνότητα της τάξης του 1kHz.

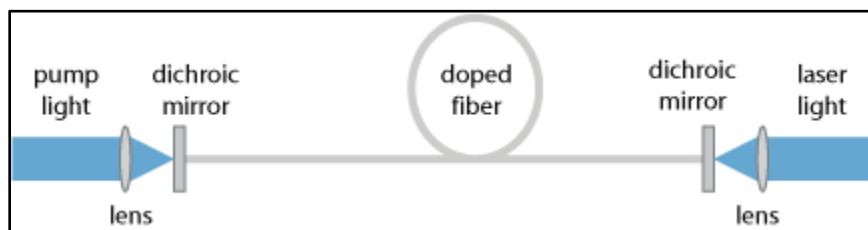
2.3.3.3.2. Laser οπτικών ινών (Fiber Laser)

Το laser οπτικών ινών ανήκει στην κατηγορία laser μονωτών με προσμίξεις. Το ενεργό μέσο αποτελείται από μια οπτική ίνα ενισχυμένη με ιόντα σπάνιων γαιών όπως το έρβιο (Er³⁺), το νεοδύμιο (Nd³⁺), το υπέρβιο (Yb³⁺), το θούλιο (Tm³⁺) ή το πρασεοδύμιο (Pr³⁺). Η οπτική κοιλότητα δημιουργείται με την τοποθέτηση διηλεκτρικών κατόπτρων στις τερματικές επιφάνειες

της ίνας. Μία ή περισσότερες διόδοι laser χρησιμοποιούνται για την άντληση φωτός. Χρησιμοποιείται εξωτερικός, χωρίς προσμίξεις, πολύ μεγαλύτερος πυρήνας για τη συλλογή του φωτός της αντλούσας πηγής. Η ενέργεια από την πηγή σταθερής κατάστασης συνδυάζεται μέσα στην επένδυση της ίνας, κατευθύνεται στον πυρήνα και αντλεί το υλικό ενίσχυσης.

Από τα πιο κοινά είδη είναι τα έρβιο-ενισχυμένα laser ινών. Σε μια κανονική οπτική ίνα από γυαλί πυριτίου, προσθέτουμε πολύ μικρά ποσά σπάνιων γαιών από το στοιχείο έρβιο. Τα μικρά σωματίδια από έρβιο αναμιγνύονται στον πυρήνα της ίνας. Αυτή η διαδικασία υλοποίησης των μικρών ποσών ονομάζεται doping. Ο λόγος που χρησιμοποιείται έρβιο είναι επειδή τα άτομα του έχουν πολύ χρήσιμα ενεργειακά επίπεδα.

Στο σχήμα 2.19 φαίνεται η δομή ενός απλού fiber laser. Το φως αντλείται από την αριστερή πλευρά, μέσω ενός διχρωματικού κατόπτρου και κατευθύνεται στον πυρήνα της ενισχυμένης ίνας. Το παραγόμενο laser εξέρχεται από τη δεξιά πλευρά.

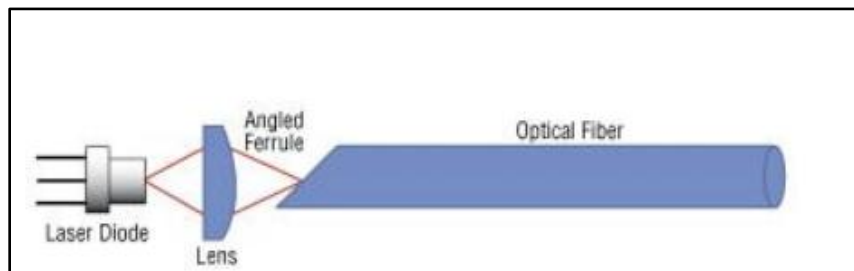


Σχήμα 2.19 : Δομή ενός απλού fiber laser.[56]

2.3.3.3. Fiber-coupled Diode Laser

Το Fiber-coupled Diode Laser αποτελείται από ένα laser διόδων στην έξοδο του οποίου συνδέεται μια οπτική ίνα προκειμένου να παραδοθεί το φως στη θέση όπου απαιτείται (βλ. σχήμα 2.20). Τα Fiber-coupled Lasers διόδων έχουν διάφορα πλεονεκτήματα:

- Το φως που βγαίνει από την ίνα έχει μια κυκλική και ομαλή (ομογενοποιημένη) μορφή η οποία σε πολλές περιπτώσεις προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.
- Είναι δυνατό να αφαιρεθούν οι διόδοι laser μαζί με το σύστημα ψύξης τους
- Καταλαμβάνουν μικρό όγκο.
- Τα ελαττωματικά Fiber-coupled Diode Lasers μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν χωρίς την ανάγκη ευθυγράμμισης της συσκευής laser με την κεφαλή συγκόλλησης.



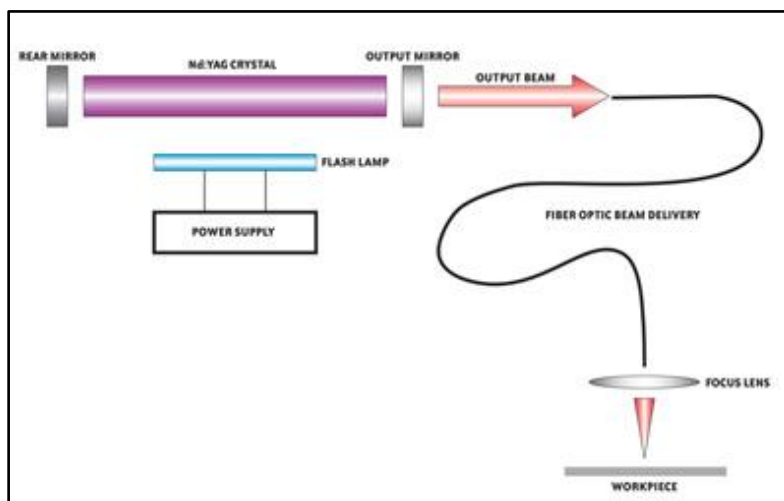
Σχήμα 2.20 : Διάταξη της σύνδεσης του laser διόδων με την οπτική ίνα.[57]

2.3.3.3.4. Laser Nd: YAG

Ο όρος YAG laser χρησιμοποιείται συνήθως για στερεάς κατάστασης laser , όπου το ιόντα νεοδυμίου χρησιμοποιούνται ως προσμίξεις σε κρυστάλλους YAG. Το νεοδύμιο (Nd) είναι ένα τρισθενές λανθανίδιο (σπάνια γαία). Το ιόν Nd^{3+} χρησιμοποιείται ως πρόσμιξη σε κρυστάλλους , από τους οποίους ο γνωστότερος είναι ένας Γρανάτης Υτρίου Αλουμινίου ($Y_3Al_5O_{12}$) , από τὰ αρχικά του οποίου σχηματίζεται το συνθετικό YAG (Yttrium Aluminium Garnet). Η ατομική συγκέντρωση του Nd είναι γενικά μεταξύ 0.6 και 1.2%. Η ενεργειακή απόδοση αυτού του laser , που φτάνει το 3% , είναι η υψηλότερη από όλα τα άλλα laser στερεάς κατάστασης. Το μήκος κύματος εκπομπής των laser Nd:YAG είναι 1.06 μm , εκπέμπει δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο.

Τα laser Nd:YAG (σχήμα 2.21) μπορούν να λειτουργήσουν τόσο συνεχώς όσο και παλμικά. Στη συνεχή λειτουργία , τα laser Nd:YAG αποδίδουν ισχύ μεταξύ 1 και 20W στο βασικό TEM₀₀ και από 10 έως και 1200W όταν υπάρχουν και εγκάρσιοι ρυθμοί ταλάντωσης. Στην παλμική δε λειτουργία αποδίδουν:

- Στον Q-switched ρυθμό, παλμούς πολύ υψηλής ισχύος (~GW) , των οποίων η χρονική διάρκεια είναι μεταξύ 15 και 700ns.
- Σε fixed-Q ρυθμό, παλμούς μερικών joules σε συχνότητα που ποικίλλει από 1 έως 200Hz. Η διάρκεια των παλμών είναι μεταξύ 0.1 και 20ms, συνεπώς η μέση ισχύς είναι της τάξης των 400W.



Σχήμα 2.21 : Διάταξη Nd:YAG laser.[54]

2.3.3.3.5. Disk Laser

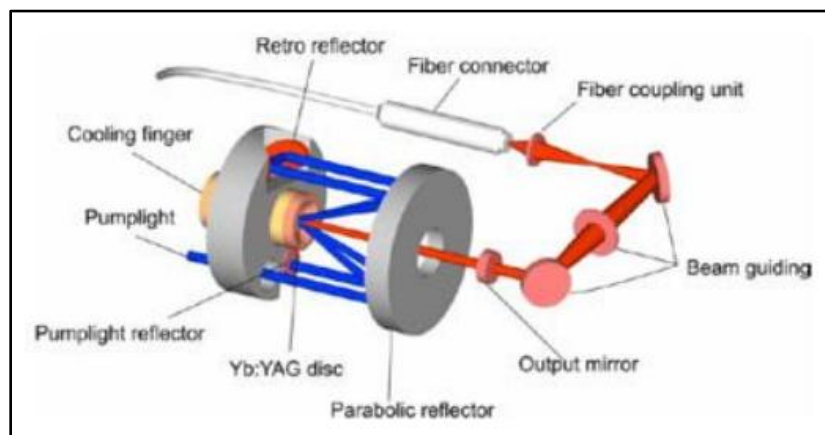
Το disk laser αποτελείται από έναν δίσκο με διάμετρο κάποιων χιλιοστών (ανάλογα με την ισχύ) και πάχος που κυμαίνεται από 100 ως 200 μm . Ο δίσκος αποτελείται από έναν κρύσταλλο Yb:YAG, η μπροστινή του πλευρά διεγείρεται μέσω ενός laser διόδων. Επειδή υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ιόντων Yb^{3+} στο δίσκο επιτρέπεται η σχεδίαση του με μικρό όγκο. Η πίσω πλευρά του δίσκου έχει επιστρωθεί με ένα ανακλαστικό υλικό. Ο δίσκος κολλάται με την πίσω πλευρά του πάνω στην μεταλλική επιφάνεια ενός εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος λειτουργεί με νερό. Αυτή η τεχνική αποτρέπει οποιαδήποτε παραμόρφωση του δίσκου λόγω της σταθεροποίησης του πάνω στην ψύκτρα και πετυχαίνει την ικανοποιητική ψύξη του. Είναι σημαντικό να μην υπάρχουν παραμορφώσεις γιατί ο δίσκος ενεργεί ως καθρέφτης. Εξαιτίας της αποτελεσματικής ψύξης που

προέρχεται από την μεγάλη επιφάνεια του δίσκου και το μικρό του πάχος, η ποιότητα της ακτίνας του laser είναι πολύ καλή.

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα παραβολικό κάτοπτρο (parabolic mirror) και ένα γωνιακό ανακλαστήρα (retroreflector). Η ενέργεια που δεν έχει απορροφηθεί από τον δίσκο κατευθύνεται εκ νέου μέσω των κατόπτρων σε ένα άλλο σημείο του δίσκου. Μπορούν να γίνουν μέχρι 32 τέτοια περάσματα βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος (βλ. σχήμα 1.22). Τελικά πάνω από το 90% της ισχύος απορροφάται από τον δίσκο.

Η βελτίωση της τεχνολογίας του disk laser έκανε δυνατή την παραγωγή disk lasers με ισχύ 6kW και με την ποιότητα της ακτίνας τους να τα καθιστά ιδανικά για συγκολλήσεις. Το μήκος κύματος αυτού του laser βρίσκεται στο φάσμα της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR-A) με τιμή 1.03μm. Ο συνδυασμός περισσότερων του ενός δίσκου επιτυγχάνει ισχύς μεγαλύτερη των 6kW. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, είναι δυνατό να επιτευχθεί μια άριστη ποιότητα των ακτίνων laser ακόμη και στα υψηλής ισχύος laser.

Τα disk lasers προσφέρουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και καλύτερη ποιότητα ακτίνων σε σύγκριση με τα laser Nd:YAG. Θεωρούνται από πολλούς ο διάδοχος του Nd:YAG laser για τις περισσότερες εφαρμογές συγκόλλησης.

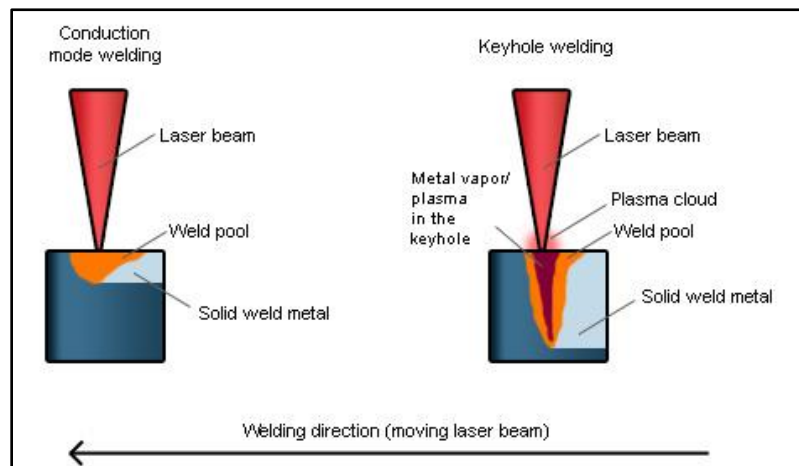


Σχήμα 2.22 : Διάταξη του disk laser. Σε αυτό το μοντέλο γίνονται 8 επανακατευθύνσεις της ακτίνας πάνω στο δίσκο. Στην πραγματικότητα συμβαίνουν περισσότερα περάσματα.[55]

2.3.3.4. Είδη συγκόλλησης με laser

Υπάρχουν δύο είδη συγκόλλησης με laser, η συγκόλληση με κλειδαρότρυπα (keyhole) και συγκόλληση με laser μέσω αγωγής (βλ.σχήμα 2.23). Στην πρώτη περίπτωση το laser παρέχει ενέργεια στα προς τα συγκόλληση μέταλλα και αν η ένταση του laser είναι αρκετά υψηλή αναπτύσσεται θερμοκρασία η οποία υπερβαίνει τη θερμοκρασία εξάτμισης του μετάλλου σχηματίζοντας μια οπή (κλειδαρότρυπα) στο εσωτερικό της περιοχής τήξης. Η τελευταία προκαλεί αύξηση της απορρόφησης με αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης. Έτσι μπορούν να συγκολληθούν αποτελεσματικά παχιά υλικά.

Στην περίπτωση συγκόλλησης με laser μέσω αγωγής το laser παρέχει ενέργεια στα προς συγκόλληση μέταλλα και επιτυγχάνεται συγκόλληση μικρού βάθους. Η συγκόλληση είναι σχεδόν επιφανειακή χωρίς να πετυχαίνει την ποιότητα συγκόλλησης κλειδαρότρυπας.



Σχήμα 2.23: Αριστερά φαίνεται συγκόλληση με laser μέσω αγωγής και δεξιά συγκόλληση τύπου κλειδαρότρυπας.[59]

2.3.3.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκόλλησης με laser

Η συγκόλληση με laser προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης τόξου, όπως:

- Δυνατότητα εκτέλεσης συγκόλλησης βαθιάς διείσδυσης με τον τρόπο της κλειδαρότρυπας. Δίνεται, έτσι η δυνατότητα συγκόλλησης παχών ελασμάτων με μια ενιαία συγκόλληση παρουσιάζοντας λιγότερες στέλειες.
- Η δυνατότητα να ενωθούν τα παχέα ελάσματα με ένα ενιαίο πέρασμα, μπορεί να επιδράσει ουσιαστικά στην ποσότητα των απαραίτητων αναλωσίμων και στη μείωση των επικίνδυνων εκπομπών.
- Ο ακριβής έλεγχος της ενέργειας των ακτίνων laser επιτρέπει τη μειωμένη πρόσδοση θερμότητας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες παραμορφώσεις.
- Η μειωμένη πρόσδοση θερμότητας μπορεί, επιπλέον, να οδηγήσει σε βελτιωμένες μεταλλικές μικροδομές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μερικές φορές στη ζώνη τήξης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.
- Δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων τιμών ταχύτητας συγκόλλησης, που είναι αδύνατες με άλλους τύπους συγκολλήσεων (μέχρι 10m/min).

Όπως κάθε μέθοδος, έτσι και η συγκόλληση με laser παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα:

- Σημαντικά αυξημένο κόστος κτήσης του εξοπλισμού.
- Η ευθυγράμμιση της συγκόλλησης είναι μεγάλης σημασίας και το κενό πρέπει να περιοριστεί, διαφορετικά είναι αναγκαία η προσθήκη μετάλλου πλήρωσης για τη διασφάλιση επαρκούς τήξης.
- Τα γρήγορα ποσοστά απόψυξης που συνδέονται με τη συγκόλληση laser μπορούν να δημιουργήσουν κάποιο ράγισμα της κεντρικής συγκόλλησης, ρωγμάτωση υγρής κατάστασης ή να σχηματίσουν εύθραυστες και μη όλκιμες μικροδομές.

- Αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα εφαρμογής της μεθόδου , λόγω αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας (π.χ. ασφάλεια των ματιών κατά τη χρήση Nd:YAG laser , diode laser και fiber laser).
- Λόγω των απαιτήσεων ασφάλειας, είναι πολύ δύσκολη η χρήση της μεθόδου σε φορητές ή χειρωνακτικές διαδικασίες.
- Σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας, τα σταγονίδια που μπορεί να εμφανιστούν είναι πιθανό να βλάψουν τα πανάκριβα οπτικά συστήματα.

2.3.4 Υβριδική συγκόλληση laser – τόξου

2.3.4.1 Εισαγωγή

Οι laser και υβριδικές laser συγκολλήσεις παίζουν πλέον σημαντικό ρόλο στη μεσαία και βαριά βιομηχανία συγκολλήσεων. Η ναυπηγική βιομηχανία ηγείται της εισαγωγής υψηλής ισχύος laser και υβριδικών laser συγκολλήσεων, αλλά οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και στην κατασκευή σωληνώσεων και λεβήτων. Το βασικό κίνητρο που ώθησε στη χρήση laser είναι η μείωση των παραμορφώσεων, καθώς εκτιμάται ότι το 20-30 % των εργατωρών στη ναυπηγική βιομηχανία οφείλεται στην αναμόρφωση των παραμορφώσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων. Ένα τέτοιο πρόβλημα παραμορφώσεων φαίνεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 : Παραμορφωμένα deck panels επιβατηγού πλοίου που συγκολλήθηκαν με συγκόλληση τόξου.[26]

Η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό δύο (ή περισσότερων) διαφορετικών πηγών θερμότητας (ακτίνες laser και ηλεκτρικά τόξα) σε μια μοναδική τεχνική συγκόλλησης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης, η ακτίνα laser χρησιμοποιείται ως μια υψηλής ενεργειακής πυκνότητας πηγή θερμότητας και χρησιμεύει συνήθως ως η αρχική πηγή θερμότητας, επιτρέποντας βαθιάς διείσδυσης συγκόλληση, ενώ το τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας και αναλαμβάνει τις πρόσθετες λειτουργίες, προκειμένου να βελτιωθούν η σταθερότητα διαδικασίας, η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα καθώς επίσης και η ποιότητα της ραφής συγκόλλησης. Αντίθετα, υπάρχουν και διαδικασίες συγκόλλησης τόξου οι οποίες καλούνται laser-assisted, όπου το τόξο ενεργεί ως αρχική πηγή θερμότητας.

Η έννοια της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου εισήχθη στη δεκαετία του '70 από τους STEEN και EBOO, οι οποίοι συνδύασαν ένα CO₂ laser 2KW και ένα TIG τόξο για εφαρμογές συγκόλλησης και κοπής. Αυτές οι πρώτες έρευνες ήδη έδειξαν ότι ο συνδυασμός ακτίνων laser και τόξου, σε μια κοινή ζώνη διαδικασίας, είναι κάτι περισσότερο από έναν απλό συνδυασμό δύο πηγών θερμότητας. Ως συνέπεια των αρχικών πειραμάτων τους, αποδεικνύεται ότι η ακτινοβολία laser άσκησε ουσιαστική επίδραση στη συμπεριφορά τόξου. Από τότε, η ιδέα του STEEN έχει αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές και μηχανικούς συγκόλλησης. Εξετάστηκαν και αναπτύχθηκαν διάφοροι συνδυασμοί laser - τόξου. Οι συνδυασμοί περιλαμβάνουν τις διατάξεις με μια κοινή περιοχή επεξεργασίας, ρυθμίσεις όπου το laser και το τόξο ενεργούν χωριστά, καθώς επίσης και διατάξεις με περισσότερες από δύο πηγές. Οι αντίστοιχες τεχνολογικές εξελίξεις παρακινούνται, αφ' ενός,

από τα πλεονεκτήματα της συνδυασμένης διαδικασίας συγκόλλησης και αφ' ετέρου, από το γεγονός ότι τα μειονεκτήματα των συμβατικών συγκολλήσεων μπορούν να αντισταθμιστούν.

Για παράδειγμα, πιθανόν το σημαντικότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα των πηγών θερμότητας με ακτίνα laser είναι ο ακριβής έλεγχος της έντασης στο σημείο εστίασμού με τον ανεξάρτητο προσδιορισμό της ισχύος laser και τη διάμετρο εστίασης. Συνήθως χρησιμοποιούνται μικρές διάμετροι εστίασης με μέγεθος μικρότερο του χιλιοστόμετρου, με σκοπό να επιτευχθούν οι υψηλές εντάσεις, επιτρέποντας τη βαθιά διείσδυση με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, η ενέργεια συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους είναι συγκριτικά μικρή, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή συγκολλήσεων με ελάχιστες παραμορφώσεις. Εντούτοις, η ακραία ικανότητα της εστίασης των ακτίνων laser έχει επίσης δυσάρεστες συνέπειες, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής απαίτησης για μικρές ανοχές στο ταίριασμα των ενώσεων και την ακριβή παρακολούθηση των ραφών.

Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να υπερκεραστούν με τη χρήση μιας πρόσθετης πηγής θερμότητας τόξου, που διευρύνει τη ραφή της συγκόλλησης και αυξάνει έτσι τη δυνατότητα συγκόλλησης μεγάλων διάκενων.

Άλλες αναφερόμενες βελτιώσεις των διαδικασιών laser-τόξου περιλαμβάνουν τις αυξήσεις:

- στην ταχύτητα συγκόλλησης ή/και το συγκολλούμενο πάχος του υλικού.
- στην αποτελεσματικότητα και τη σταθερότητα της διαδικασίας συγκόλλησης.
- στην ποιότητα συγκόλλησης με μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης πόρων και ρωγμών.

2.3.4.2 Βασικές διατάξεις[29][31][32][33][38]

Η προδιαγραφή των διατάξεων των υβριδικών συγκολλήσεων laser-τόξου περιλαμβάνει την επιλογή τουλάχιστον μιας κύριας και μιας δευτερεύουσας πηγής θερμότητας και τον καθορισμό της γεωμετρικής θέσης αυτών.

Ως κύριες πηγές θερμότητας χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι laser υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις, όπως τα CO₂ laser, disk laser, Nd:YAG laser, fiber laser και fiber-coupled diode laser. Αν και τα τελευταία χρόνια τα πιο αξιόπιστα συστήματα laser ήταν τα CO₂ και Nd:YAG laser, λόγω της επικράτησής τους στο εργαστήριο και τα βιομηχανικά περιβάλλοντα, το disk laser, το fiber laser καθώς επίσης και το υψηλής ισχύος fiber-coupled diode laser καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις ώστε να λειτουργούν ως αρχικές πηγές θερμότητας και αναμένεται ότι αυτοί οι τύποι laser θα εφαρμοστούν όλο και περισσότερο στις μελλοντικές εξελίξεις της υβριδικής τεχνολογίας.

Ένα κύριο κριτήριο για την επιλογή της πρωτεύουσας πηγής θερμότητας, εκτός από την ισχύ του laser και την ποιότητα των ακτίνων, είναι το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, το οποίο μπορεί να περιορίσει την επιλογή του χρησιμοποιήσιμου τύπου αερίου προστασίας. Για παράδειγμα, η συγκόλληση με ένα CO₂ laser, χρειάζεται συνήθως μίγματα αερίου με μια υψηλή περιεκτικότητα σε He ή καθαρό αέριο He, προκειμένου να αποτρέψει το σχηματισμό του προστατευτικού πλάσματος, ενώ για τους άλλους τύπους laser υψηλής ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέριο Ar και μίγματα αυτού με προσθήκη ενεργών αερίων όπως το CO₂ ή O₂. Συνεπώς, υβριδικοί συνδυασμοί με Nd: YAG, disk, fibre ή υψηλής ισχύος diode laser προσφέρουν περισσότερη ευελιξία στον επηρεασμό της μεταλλουργικής σύνθεσης της λίμνης συγκόλλησης και της μεταφοράς μετάλλου κατά τη συγκόλληση (όταν χρησιμοποιούνται αναλώσιμα ηλεκτρόδια) επιτρέποντας μεγαλύτερη δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων αερίων προστασίας.

Σαν δευτερεύουσες πηγές θερμότητας μπορούν να επιλεγούν μέθοδοι συγκολλήσεων με καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια (MIG, MAG) ή μη (TIG), συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW), ή

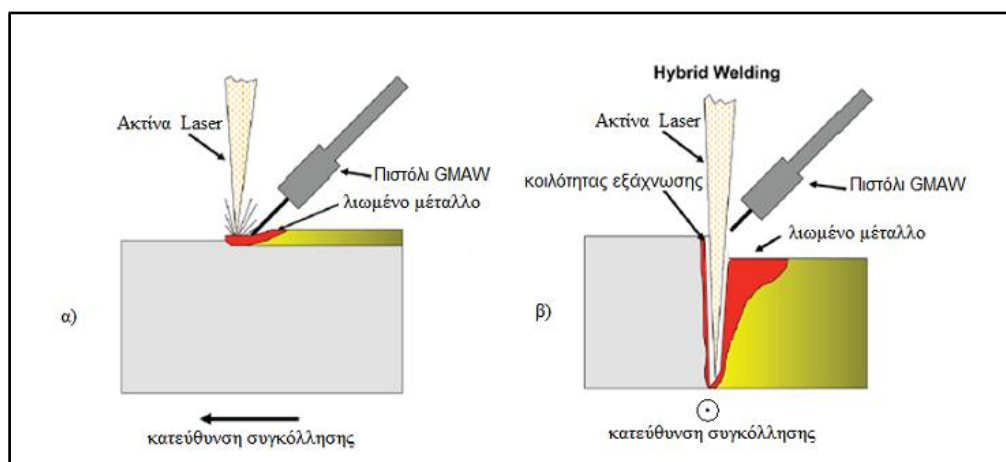
συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW). Για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα συγκόλλησης, αν είναι αναγκαία η χρήση μετάλλου πληρώσεως, εφαρμόζονται μέθοδοι συγκολλήσεων με αναλώσιμα ηλεκτρόδια, διαφορετικά προτιμούνται συγκολλήσεις με μη αναλώσιμα ηλεκτρόδια.

Αφού επιλεγούν οι πηγές θερμότητας, το σημαντικότερο ρόλο για την ικανότητα και την αποδοτικότητα της υβριδικής διαδικασίας καθώς και την ποιότητα των παραγόμενων συγκολλήσεων, διαδραματίζει η γεωμετρική τοποθέτησή τους. Οι τεχνικές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτές με κοινά και σε αυτές με διαφορετικά σημεία εφαρμογής. Κοινό σημείο εφαρμογής σημαίνει ότι το τόξο και το κέντρο εστίασης του laser κατευθύνονται στην ίδια θέση της επιφάνειας του υλικού που συγκολλείται. Αυτό επιτυγχάνεται με την ομοαξονική διάταξη της ακτίνας laser και του ηλεκτρικού τόξου.

Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας ρύθμισης εφαρμόζονται ορισμένες τεχνικές, όπως:

- η χρήση ενός συνόλου διαφόρων ράβδων ηλεκτροδίων, πάνω σε έναν κυλινδρικό μονωτή που επιτρέπει την εστίαση της ακτίνας.
- Η χρήση ενός πρόσθετου συστήματος καθρεφτών που περιστρέφει την ακτινοβολία laser γύρω από ένα αξονικά τοποθετημένο ηλεκτρόδιο.
- Η άμεση χρήση κοίλων ηλεκτροδίων ή με μορφή δακτυλίου.

Ωστόσο, οι ουσιαστικά πραγματοποιούμενες συγκολλήσεις laser-τόξου στην πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν διάταξη όπου ένα συμβατικό πιστόλι συγκόλλησης συγκλίνει με τη συναφή ακτίνα laser. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται διατάξεις με τα κεκλιμένα πιστόλια συγκόλλησης στο επίπεδο κατά μήκος της κατεύθυνσης συγκόλλησης και πίσω από την ακτίνα laser (σχήμα 2.24.α) και εγκάρσια της κατεύθυνσης συγκόλλησης (σχήμα 2.24.β). Η περίπτωση που το πιστόλι είναι πίσω από την ακτίνα laser (σχήμα 2.24.α) είναι η προτιμώμενη διάταξη για τη συμβατική υβριδική συγκόλληση laser-τόξου. Το τόξο κατευθύνεται στην παραγόμενη από το laser κοιλότητα εξαχνωσης, όπου το ατμοποιημένο μέταλλο προσφέρει ένα εύκολο προς ιονισμό αγωγίμο μέσο λόγω της χαμηλής δυνατότητας ιονισμού του.

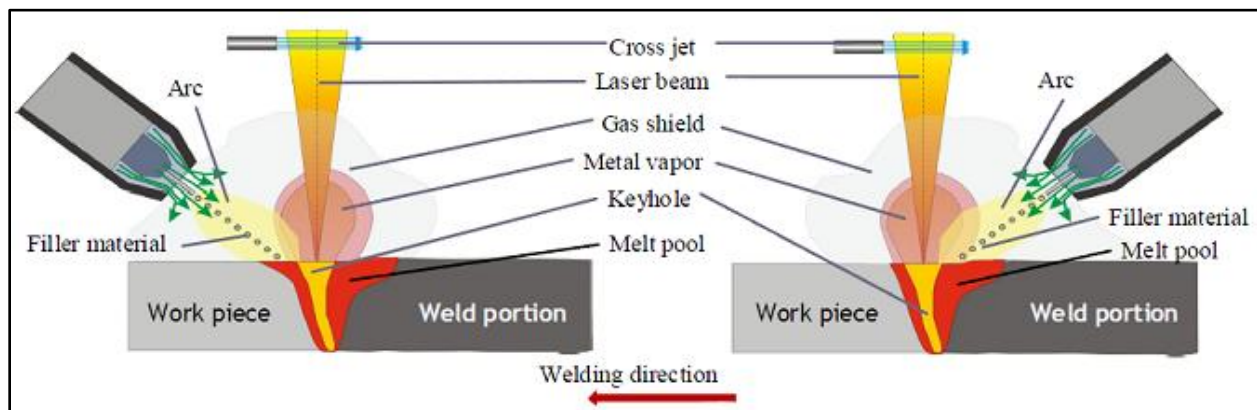


Σχήμα 2.24 : Δύο διαφορετικές διατάξεις της υβριδικής συγκόλλησης.[53]

Το 1994 χρησιμοποιήθηκε από τον Beyer μια διάταξη με ένα laser Nd: YAG ως βασική και ένα TIG τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας και διαπίστωσε ότι η διαθέσιμη ισχύς του laser καθορίζει κυρίως το επιτεύξιμο βάθος διείσδυσης, ενώ ο έλεγχος των παραμέτρων τόξου επιτρέπει τη ρύθμιση του πλάτους της ραφής της συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις για την προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση μετάλλων θα μπορούσαν να μειωθούν. Επιπλέον,

συνδυάζοντας το τόξο και την ακτίνα laser με ένα βέλτιστο τρόπο, επιτεύχθηκε το ίδιο βάθος συγκόλλησης με μειωμένη ισχύ laser ή εναλλακτικά, πραγματοποιήθηκε μια αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης. Ως δεύτερη παραλλαγή, έχουμε ένα εγκάρσιως κεκλιμένο πιστόλι συγκόλλησης, που χρησιμοποιήθηκε από την ίδια ομάδα ερευνητών για τη συγκόλληση ελασμάτων με διαφορετικά πάχη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24.β, όπου ο συνδυασμός και των δύο πηγών θερμότητας (i) μείωσε τις απαιτήσεις προετοιμασίας των ακρών, (ii) αύξησε τον όγκο του λιωμένου υλικού, (iii) βελτίωσε την εμφάνιση συγκόλλησης με μια ομαλή ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο ελασμάτων, επειδή το τόξο εφαρμόστηκε στην άκρη του παχύτερου ελάσματος, και (iv) αύξησε την αποδοτικότητα της διαδικασίας με συνέπεια τις σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης έναντι της διαδικασίας συγκόλλησης μόνο με laser. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του μεμονωμένου και ανεξάρτητου συνδυασμού των επιλεγμένων πηγών θερμότητας, είναι το γεγονός ότι και τα δύο σημεία εφαρμογής μπορούν εύκολα να διαχωριστούν με την αλλαγή των γωνιών κλίσης ή τη διατήρηση μιας ορισμένης απόστασης μεταξύ του άξονα των ακτίνων laser και του πιστολιού συγκόλλησης. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να προσαρμόσει τα χαρακτηριστικά της υβριδικής πηγής θερμότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις ή/και τις συγκεκριμένες συνθήκες ενός ιδιαίτερου προβλήματος συγκόλλησης.

Τα διάφορα σημεία εφαρμογής, υπονοούν ένα χρονικό ή/και τοπικό διαχωρισμό των επιλεγμένων πηγών θερμότητας. Οι πηγές θερμότητας μπορούν να βρίσκονται σε παράλληλη ή σειριακή διάταξη. Μια παράλληλη διάταξη χαρακτηρίζεται από μια απόσταση στην κάθετη ή οριζόντια κατεύθυνση κατά μήκος της πορείας μεταξύ και των δύο πηγών θερμότητας. Αντίθετα, η κύρια και δευτερεύουσα πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της ίδιας πορείας συγκόλλησης σε σειριακή διάταξη αλλά σε μια ορισμένη απόσταση μεταξύ των δύο πηγών. Έτσι, το ηλεκτρικό τόξο είτε θα ακολουθεί την ακτίνα laser είτε θα προπορεύεται. (Σχήμα 2.25)

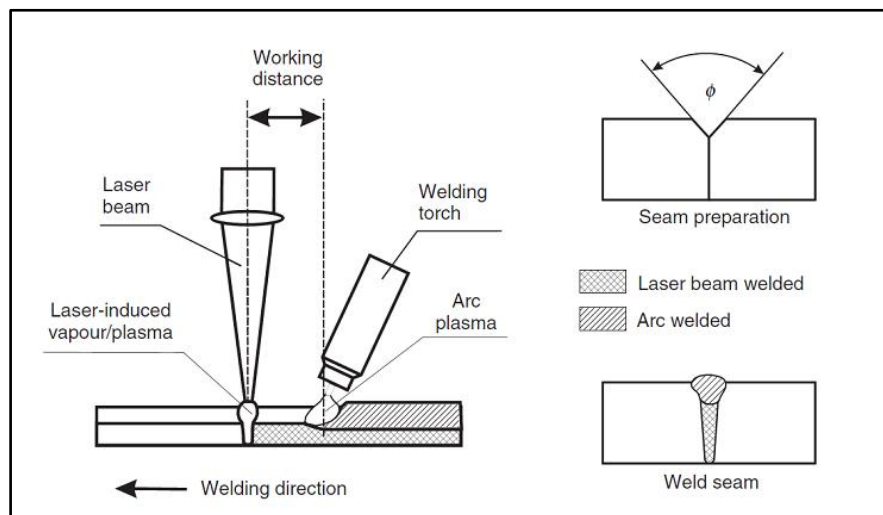


Σχήμα 2.25 : Δύο διαφορετικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης. Το τόξο προπορεύεται (αριστερά) ή ακολουθεί (δεξιά) την ακτίνα laser.[31]

Κατά την προπόρευση του τόξου, επιτυγχάνεται μια αποτελεσματική προθέρμανση της προς συγκόλληση περιοχής. Αυτό μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της αρχικής πηγής θερμότητας ακτίνων laser επειδή οι ενεργειακές απώλειες μειώνονται και την ποιότητα της ραφής συγκόλλησης εξαιτίας της σταθεροποιημένης συμπεριφοράς της κοιλότητας εξάχνωσης. Στην περίπτωση κατά την οποία το τόξο ακολουθεί την ακτίνα laser σε μικρή απόσταση, αυξάνεται η αποδοτικότητα και η σταθερότητα της διαδικασίας συγκόλλησης laser, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του laser και του τόξου μέσα στο κοινό πλάσμα. Επιπλέον, εφαρμόζοντας μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ της ακτίνας laser και του τόξου που ακολουθεί μπορεί να επιτευχθεί

μια βραχυπρόθεσμη αναθέρμανση στην περιοχή της ραφής της συγκόλλησης laser που μπορεί να αλλάξει τη μικροδομή ευνοϊκά και να βελτιώσει τις ιδιότητες της συγκόλλησης.

Στο σχήμα 2.26 φαίνεται μια υβριδική συγκόλληση laser-τόξου με χωριστά σημεία εφαρμογής σε παράλληλη διάταξη. Η συγκεκριμένη προετοιμασία ραφών σε σχήμα Y, επιτρέπει τη συγκόλληση της ρίζας, δηλ. το κατώτατο μέρος της ένωσης, με ακτίνα laser και το τελικό ανώτερο στρώμα με μια διαδοχική διαδικασία συγκόλλησης τόξου με χρήση καταναλισκόμενων ηλεκτροδίων. Ο Seyffahrt (1994) χρησιμοποίησε μια τέτοια διάταξη ώστε να αυξήσει το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της ναυπηγικής βιομηχανίας. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια (διπλό πέρασμα) με διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης των πηγών θερμότητας ή σε ένα στάδιο (single-pass) με ένα κατάλληλο ποσοστό μεταξύ των δύο πηγών θερμότητας. Παρόλο που η ακτίνα laser και το τόξο μπορεί να μη συνεργάζονται άμεσα, προκύπτουν κάποια ωφέλιμα αποτελέσματα. Κατ' αρχάς, η σταθεροποίηση των προς συγκόλληση τεμαχίων από τη συγκολλημένη με laser ένωση, μειώνει τις παραμορφώσεις μετά από τη διαδικασία συγκόλλησης τόξου (MAG). Αφετέρου, η πρόσθετη ισχύς του τόξου οδηγεί σε μια ανόπτηση της συγκόλλησης με αποτέλεσμα η σκληρότητα της ραφής να μειωθεί ικανοποιητικά.



Σχήμα 2.26 : Σχηματική διάταξη υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου με διαφορετικό σημείο εφαρμογής.[37]

Έρευνες από τον Matsuda (1988) έδειξαν ότι τα αποτελέσματα της συγκόλλησης, εκτός από τις κύριες παραμέτρους όπως η ισχύς laser, η ένταση ρεύματος τόξου και το ποσοστό τροφοδοσίας, εξαρτώνται έντονα από την απόσταση μεταξύ της ακτίνας laser και του ηλεκτροδίου (σειριακή μετατόπιση) καθώς επίσης και από την εστιακή θέση της ακτίνας laser (παράλληλη μετατόπιση).

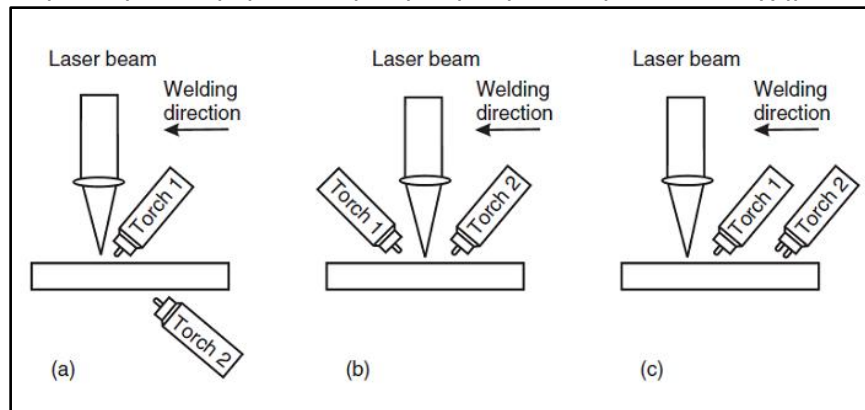
Εν περιλήψει, δεν είναι δυνατό να δοθούν γενικές οδηγίες για τις βέλτιστες βασικές διατάξεις στην υβριδική συγκόλληση laser-τόξου, επειδή υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν και που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η σχετική θέση του τόξου ως προς την ακτίνα laser (προπορεύεται, ακολουθεί ή ομοαξονικό καθώς και η κλίση και απόσταση μεταξύ τους) εξαρτάται από το προς συγκόλληση υλικό και τις ιδιότητες επιφάνειάς του. Σημαντικά, επίσης, είναι ο τύπος σύνδεσης, η προετοιμασία των άκρων και η θέση συγκόλλησης. Η ενέργεια του τόξου και του laser, οι παράμετροι εστίασης του laser, το μήκος κύματος της ακτίνας, και η τεχνική μεταφοράς μετάλλου (MIG/MAG) καθώς επίσης και ειδικές οριακές συνθήκες όπως π.χ. η προσβασιμότητα ενός

αισθητήρα παρακολούθησης της ραφής, είναι παράγοντες που έχουν ισχυρή επίδραση στο σχεδιασμό της όλης υβριδικής διαδικασίας και του εξοπλισμού.

2.3.4.3 Νεότερες, μη συμβατικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης [26][28][29][31][32][33][38]

2.3.4.3.1 Διατάξεις με περισσότερες από δύο πηγές θερμότητας

Εκτός από τις συμβατικές υβριδικές συγκολλήσεις laser-τόξου με μια ακτίνα laser ως κύρια πηγή θερμότητας και ένα ηλεκτρικό τόξο ως δευτερεύουσα, υπάρχουν ακόμα μερικές τεχνολογικές εξελίξεις που χρησιμοποιούν δύο ή και περισσότερα ηλεκτρικά τόξα. Οι πιθανές τέτοιες διατάξεις που ήδη εφαρμόστηκαν για διαφορετικούς λόγους παρουσιάζονται στο σχήμα 2.27.

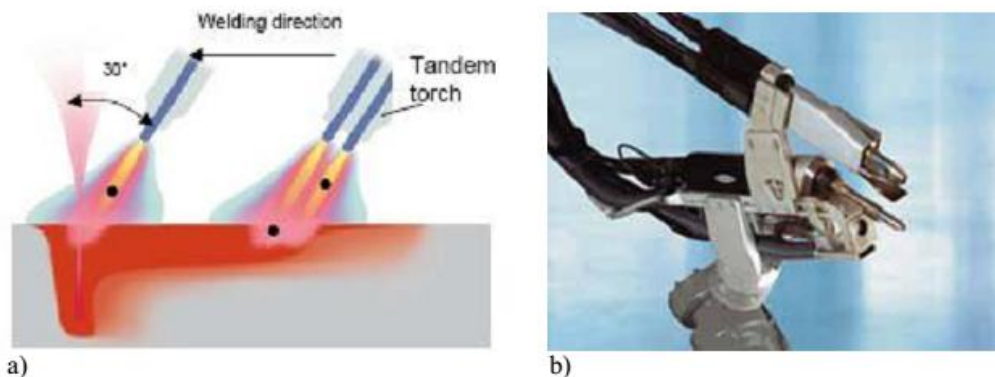


Σχήμα 2.27 : Διάφορα είδη διατάξεων με δύο δευτερεύουσες πηγές ενέργειας.[53]

- a) Πραγματοποιήθηκε από τον Winderlich το 2003. Ως κύρια πηγή θερμότητας χρησιμοποιήθηκε CO₂ laser και ως δευτερεύουσες πηγές θερμότητας δύο ακολουθούντα πιστόλια TIG. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το ένα πιστόλι TIG (Torch 1) λειτουργούσε από την ίδια πλευρά με την ακτίνα laser και το δεύτερο (Torch 2) από την αντίθετη πλευρά με σκοπό να παράγει μια συγκόλληση χωρίς εγκοπές, κατάλληλη για δυναμική φόρτιση. Συγκριτικά με την απλή χρήση της συγκόλλησης με ακτίνες laser, η αντίσταση κόπωσης εδώ θα μπορούσε να αυξηθεί κατά περίπου 50%. Επίσης, τέτοια διάταξη χρησιμοποιήθηκε και κατά τη διάρκεια του project HYBLAS (ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2007 με τη συμμετοχή διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών), όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο πιστόλια MAG (Dual MAG/Laser Hybrid Welding) για τη συγκόλληση χαλύβδινων ελασμάτων πάχους 30mm.
- b) Αποτελείται από δύο χωριστά πιστόλια συγκόλλησης, εκατέρωθεν της ακτίνας laser. Η ακτίνα laser και τα τόξα όλων των συγκολλήσεων ευθυγραμμίζονται σύμφωνα με τη γραμμή συγκόλλησης. Το κύριο ηλεκτρόδιο (Torch 1) έχει φορά αντίθετη προς τη φορά της κίνησης (backhand) και το δεύτερο ηλεκτρόδιο (Torch 2) έχει φορά ίδια με αυτής της συγκόλλησης (forehand). Μια τέτοια διάταξη, (καλούμενη υβριδική συγκόλληση με διπλό τόξο) είναι η διαδικασία HyDRA. Εφαρμόστηκε, αρχικά, από τους Diltthey και Keller (2001) που συνδύασαν τη συγκόλληση laser CO₂ με δύο πιστόλια GMAW. Σε σύγκριση με τη συμβατική υβριδική συγκόλληση με μόνο ένα τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας, το ποσοστό απόθεσης του υλικού πληρώσεως θα μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης και ένα μειωμένο θερμικό φορτίο. Οι εναλλακτικές διαμορφώσεις της διαδικασίας HyDRA περιλαμβάνουν ακόμα τις παραλλαγές όπου τα τόξα

είναι τοποθετημένα παράλληλα στη γραμμή συγκόλλησης, είτε σε μια θέση πρωτοπορίας είτε σε ακολουθία, σε σχέση με τον άξονα της ακτίνας laser. Οι γωνίες κλίσης μπορούν να ποικίλουν με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιούνται *forehand* και *backhand* διατάξεις. Σχετικά με τη δυνατότητα συγκόλλησης μεγάλου διάκενου, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με δύο προπορευόμενα τόξα.

- c) Η διάταξη αυτή πραγματοποιήθηκε πρόσφατα και το ιδιαίτερο γνώρισμά της είναι η εφαρμογή μιας τεχνικής συγκόλλησης με διπλό ηλεκτρόδιο (μέθοδος *tandem*) ως πρόσθετη πηγή θερμότητας (εικόνα 2.5). Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και παρουσιάζεται πιο αναλυτικά παρακάτω, καθώς αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στις υβριδικές συγκολλήσεις των δοκιμών που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 2.5 : a) Σχηματική αναπαράσταση HLAW+tandem , b) Πιστόλι συγκόλλησης HLAW+tandem (Schweissen & Schneiden, 2005)

2.3.4.3.2 Μέθοδος συγκόλλησης Tandem MIG/MAG

Οι MIG/MAG συγκολλήσεις πολλαπλών ηλεκτροδίων συμπεριλαμβάνονται στις πιο επιτυχημένες μεθόδους συγκολλήσεων που εφαρμόζονται σήμερα στη βιομηχανία. Μπορεί κανείς να βρει στην αγορά διάφορες διατάξεις πολλαπλών ηλεκτροδίων με διάφορα ονόματα. Ωστόσο, η συγκόλληση με πολλαπλά ηλεκτρόδια μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με κάποιες βασικές αρχές:

- **Twin welding (μια μονάδα τροφοδοσίας):** Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται από την ίδια τροφοδοτική μονάδα. Και τα δύο σύρματα έχουν τις ίδιες δυνατότητες και συνδέονται στην ίδια πηγή ενέργειας.
- **Twin welding (δύο μονάδες τροφοδοσίας):** Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται από δύο διαφορετικές τροφοδοτικές μονάδες. Και τα δύο ηλεκτρόδια έχουν τις ίδιες δυνατότητες και συνδέονται στην ίδια πηγή ενέργειας.
- **Tandem welding (δύο τροφοδοτικές μονάδες και δύο πηγές ενέργειας):** Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται, το κάθε ένα από μια διαφορετική τροφοδοτική μονάδα και κάθε ηλεκτρόδιο συνδέεται με μια διαφορετική πηγή ενέργειας. Το προπορευόμενο ηλεκτρόδιο καλείται *master* και το ακόλουθο *slave*. Επίσης, τα ηλεκτρόδια είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους μέσα στο πιστόλι συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια, τέλος, μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες και οι παράμετροι συγκόλλησης μπορούν να ορισθούν ελεύθερα για κάθε ένα από αυτά.

Επιπλέον, εκτός από τις παραπάνω, υπάρχουν διατάξεις στις οποίες η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι τόσο μεγάλη, ώστε μπορεί να θεωρηθεί πως σχηματίζονται δύο διαφορετικές λίμνες συγκόλλησης.

Η εταιρεία ESAB έχει αναπτύξει μια διάταξη tandem MAG συγκόλλησης, όπου μπορούν να ορισθούν οι παράμετροι συγκόλλησης για τα δύο ηλεκτρόδια και η μεταξύ τους απόσταση είναι σχετικά μικρή, ώστε και τα δύο να εργάζονται στην ίδια λίμνη συγκόλλησης. Αναμφισβήτητα, η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι ο ορισμός των παραμέτρων συγκόλλησης να γίνεται ξεχωριστά για κάθε ηλεκτρόδιο, καθώς όταν δύο τόξα εργάζονται στην ίδια λίμνη συγκόλλησης, ο σκοπός που εξυπηρετεί το κάθε ένα είναι διαφορετικός. Το προπορευόμενο ηλεκτρόδιο θερμαίνει το βασικό μέταλλο ώστε να σχηματιστεί η λίμνη συγκόλλησης, ενώ το ηλεκτρόδιο που ακολουθεί γεμίζει το κενό εξομαλύνοντας ταυτόχρονα την επιφάνεια της συγκόλλησης, χωρίς να προκαλέσει πολλές εκτοξεύσεις (spatter).

Για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα είναι σημαντικό ο εξοπλισμός να πληροί ορισμένες βασικές απαιτήσεις:

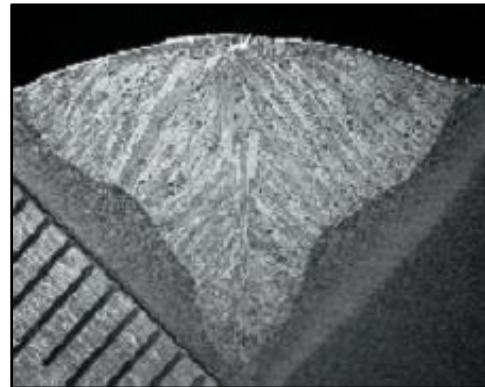
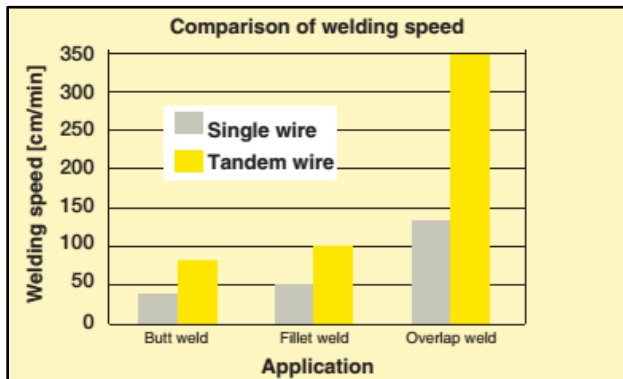
- Άκαμπτη και σταθερή, χωρίς δονήσεις, σύνδεση του πιστολιού συγκόλλησης.
- Υψηλές επιδόσεις σε ταχύτητες.
- Υψηλών απαιτήσεων μονάδες τροφοδοσίας ηλεκτροδίων, και εξασφάλιση ασφαλούς και ομαλής τροφοδοσίας ηλεκτροδίου.
- Συστήματα παρακολούθησης της σύνδεσης, ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι παράμετροι συγκόλλησης παραμένουν αμετάβλητες.

Στη συγκόλληση tandem MAG, η μεταφορά τηγμένου μετάλλου πρέπει να ελεγχθεί κατάλληλα ώστε να έχουμε ως αποτέλεσμα μια ομαλή ραφή. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 – Παράγραφος 2.3.1, υπάρχουν διάφοροι τρόποι μεταφοράς τηγμένου μετάλλου στις συγκολλήσεις MIG/MAG (GMAW γενικά): με βραχυκύκλωση, με χοντρές σταγόνες, με σταγονίδια, παλμική μεταφορά με σταγονίδια. Στην περίπτωση της tandem MAG όλοι οι συνδυασμοί αυτών των τεχνικών είναι δυνατοί. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο τόξων με αποτέλεσμα την πρόκληση διαταραχών. Ένας κατάλληλος συνδυασμός είναι όταν και στα δύο τόξα γίνεται παλμική μεταφορά τηγμένου μετάλλου με σταγονίδια.

Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο SIMR (Swedish Institute for Metals Research) πάνω σε tandem MAG συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό της ESAB, εξήχθησαν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

- Η διαδικασία tandem δίνει τη δυνατότητα υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης και ρυθμών εναπόθεσης υλικού, σε σχέση με συγκολλήσεις όπου γίνεται χρήση ενός ηλεκτροδίου (σχήμα 2.5).
- Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από μια μεγάλη γκάμα συνδυασμών παραμέτρων συγκόλλησης, από όπου μπορούν να προκύψουν αποδεκτά αποτελέσματα.
- Συγκριτικά με συγκολλήσεις ενός ηλεκτροδίου, φαίνεται να είναι απαραίτητο ένα ελάχιστο μέγεθος λίμνης συγκόλλησης.
- Έχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης σε σχέση με συγκολλήσεις ενός ηλεκτροδίου (εικόνα 2.6).

- Όταν οι ρυθμοί τροφοδοσίας ηλεκτροδίων είναι χαμηλοί και παρόμοιοι για τα ηλεκτρόδια, τα τόξα αρχίζουν να ταλαντώνονται πιο εύκολα. Αυτό εξυπηρετεί τη χρήση της tandem MAG έναντι της twin-wire συγκόλλησης.
- Όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του προπορευόμενου ηλεκτροδίου είναι υψηλός και τα σχηματιζόμενα τόξα στενά, ευνοείται η σταθερότητα αναφορικά με την ταλάντωσή τους, ωστόσο μπορεί να αυξηθούν οι εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter).



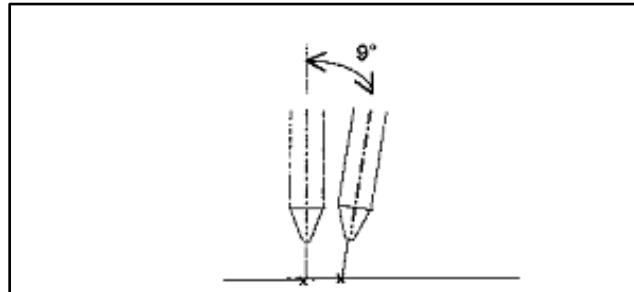
Σχήμα 2.28: Σύγκριση των ταχυτήτων συγκόλλησης για εφαρμογές με μονό / διπλό ηλεκτρόδιο.[28]

Εικόνα 2.6: Συγκόλληση διείσδυσης 80%(12mm πάχος ελάσματος, χωρίς προετοιμασία της σύνδεσης). Ταχύτητα συγκόλλησης 80cm/min.[28]

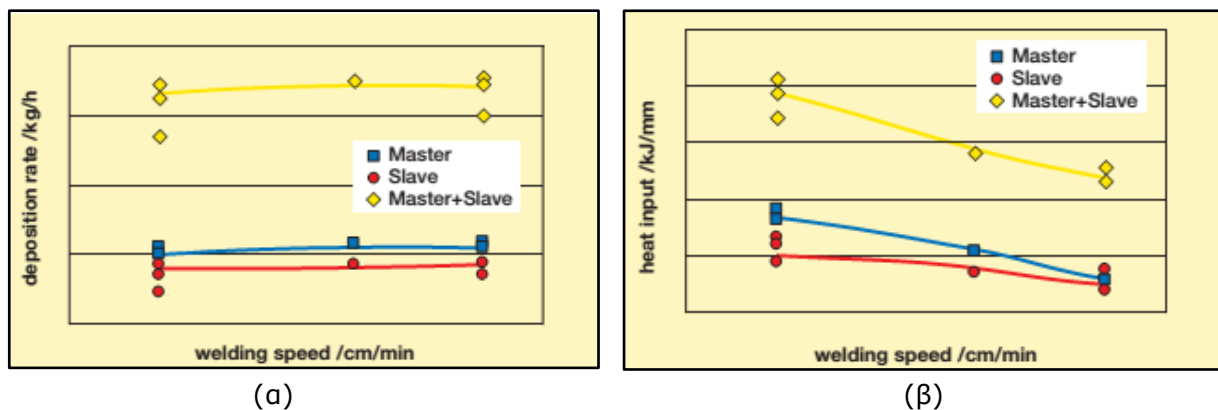
Τέλος, όπως είναι φυσικό, η μέθοδος υπόκειται σε κάποιους **περιορισμούς**. Καταρχήν, βρέθηκε ότι το ευρύτερο επιτεύξιμο φάσμα παραμέτρων και οι καλύτερες συγκολλήσεις προκύπτουν όταν οι γωνίες των ακροφυσίων στο πιστόλι συγκόλλησης είναι 0° για το master και 9° για το slave (σχήμα 2.29). Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των σημείων επαφής, οδηγεί το πίσω τόξο να ωθεί το τηγμένο μέταλλο προς τα εμπρός ενώ το προπορευόμενο τόξο καταλήγει στην κορυφή του σχηματιζόμενου κύματος του τηγμένου μετάλλου. Για τη σταθερότητα της διαδικασίας όταν το ρεύμα δίνεται σε παλμική μορφή, ο συγχρονισμός των τόξων είναι απαραίτητος. Ο κύριος λόγος για ασταθή διαδικασία είναι το έντονο κύμα της λίμνης συγκόλλησης το οποίο δυσκολεύει τον έλεγχο του μήκους του τόξου. Χρησιμοποιώντας συγχρονισμένη παλμική μορφή της έντασης ρεύματος στα δύο τόξα, το κύμα στη λίμνη συγκόλλησης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, με τη βέλτιστη κατάσταση να προκύπτει για μήκος παλμού (PPS, Pulse Phase Shift) της τάξης του 1 ms. Έτσι η λίμνη συγκόλλησης σταθεροποιείται. για υψηλότερες τιμές PPS το ύψος του κύματος αυξάνεται και η διαδικασία γίνεται πιο τυρβώδης. Από την άλλη πλευρά, σε μη συγχρονισμένη παλμική μορφή, το κύμα στη λίμνη συγκόλλησης προκαλεί εναπόθεση μετάλλου με βραχυκύκλωση και έναρξη εκτοξεύσεων (spatter). Οι εκτοξεύσεις προκαλούνται κυρίως από λάθος μεταφορά των σταγόνων στο πίσω τόξο, κάτι το οποίο ωθεί τη σταγόνα οριζόντια, διαμέσου του προπορευόμενου τόξου.

Οι υπόλοιποι συνδυασμοί τύπων τόξων οδηγούν, γενικά, σε φτωχότερα αποτελέσματα. Στα τόξα όπου η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται με σταγονίδια, η όλη διαδικασία είναι πολύ ασταθής και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εκτοξεύσεων. Κατά τη μεταφορά με σταγόνες

παρατηρείται μεγάλης κλίμακας κύμα στη λίμνη συγκόλλησης μεταξύ των τόξων, ενώ αν υπάρχει συνδυασμός τεχνικών (π.χ. στο προπορευόμενο τόξο παλμική και στο πίσω μεταφορά με σταγόνες), εμφανίζεται συχνά βραχυκύκλωμα στο τόξο στο οποίο χρησιμοποιείται παλμικής μορφής ρεύμα.



Σχήμα 2.29 : Ασύμμετρη γωνία των ακροφυσίων του πιστολιού συγκόλλησης.[28]



Σχήμα 2.30 : (α) Ρυθμός εναπόθεσης μετάλλου και (β) θερμική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας συγκόλλησης.[28]

2.3.4.3 Μορφή της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου [29][31]

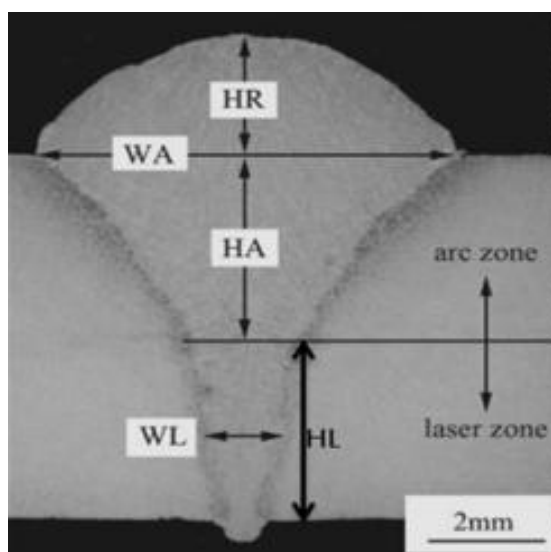
Σε μια εγκάρσια τομή, η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου σχηματικά μοιάζει με ένα ποτήρι του κρασιού και μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη (εικόνα 2.7): το άνω ευρύ μέρος είναι η περιοχή που εργάζεται το τόξο (arc zone) και το κάτω πιο στενό μέρος είναι η περιοχή που εργάζεται το laser (laser zone). Το χαρακτηριστικό αυτό σχήμα δείχνει ότι κατά την υβριδική συγκόλληση laser-MIG/MAG οι κατανομές ενέργειας του laser και του τόξου είναι διαφορετικές στη λίμνη συγκόλλησης. Η ενέργεια του τόξου δρα κυρίως στο άνω μέρος σχηματίζοντας την ευρεία περιοχή τόξου, ενώ η ενέργεια του laser εισέρχεται στο κάτω μέρος μέσα από την κλειδαρότρυπα/μάτι (keyhole) δίνοντας στη συγκόλληση χαρακτηριστικά βαθειάς διείσδυσης.

Οι διαστάσεις των δύο περιοχών, arc zone και laser zone, μπορούν να μεταβληθούν από το λόγο ενέργειας laser-τόξου (laser-arc energy ratio, ERLA) που επηρεάζει την ενεργειακή κατανομή στη λίμνη συγκόλλησης της υβριδικής διαδικασίας. Δηλαδή, μια μείωση στο ERLA μπορεί να μειώσει τη διαφορά ανάμεσα στα πάχη και τα ύψη των δύο περιοχών (WA,WL και HA,HL αντίστοιχα στην εικόνα 2.7) και να μεταβάλλει τη γενικότερη μορφή της υβριδικής συγκόλλησης. Στη MIG/MAG

συγκόλληση, όσο αυξάνει η ένταση του ρεύματος, τόσο αυξάνει η πίεση του τόξου και η δύναμη πρόσκρουσης της τηγμένης σταγόνας στη λίμνη συγκόλλησης. Αύξηση, λοιπόν, των προαναφερθέντων μεγεθών οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού του τηγμένου μετάλλου που καταλήγει στη ρίζα της συγκόλλησης, κάτι που σημαίνει ότι περισσότερη θερμότητα εισέρχεται στο κάτω μέρος της συγκόλλησης και αυξάνει το HA και περισσότερο υπόστρωμα λιώνει στην περιοχή laser και αυξάνει το WL. Από την άλλη πλευρά, το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειώσει την επίδραση της θερμότητας από την ενέργεια του τόξου στην περιοχή τόξου, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του WA. Η διαφορά, δηλαδή, στις διαστάσεις ανάμεσα στις δύο περιοχές μειώνεται καθώς μειώνεται το ERLA. Όταν η υβριδική συγκόλληση έχει υψηλή αναλογία σε ενέργεια από το laser, η διαδικασία μοιάζει περισσότερο με συγκόλληση laser και η συγκόλληση μπορεί να αποκτήσει λεπτόκοκκη, σκληρότερη μικροδομή, μαρτενσιτική ή μπαινιτική. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η αναλογία είναι υψηλή σε ενέργεια προερχόμενη από το τόξο, η διαδικασία μοιάζει περισσότερο σε συγκόλληση τόξου και η μικροδομή της έχει περισσότερο χονδροειδείς κόκκους περλίτη και σχετικά μικρή σκληρότητα.

Η αύξηση στην ισχύ του τόξου βασίζεται κυρίως στην αύξηση της παροχής ηλεκτροδίου και της τάσης του τόξου. Έτσι, αύξηση του όγκου του τηγμένου μετάλλου οδηγεί σε αύξηση του ύψους στο κορδόνι συγκόλλησης, εφόσον όλες οι διαστάσεις της σύνδεσης παραμένουν σταθερές. Αυξάνοντας την ισχύ του τόξου, η αύξηση του πάχους της συγκόλλησης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ύψους στη ζώνη τήξης, επειδή η περιοχή που θερμαίνεται από το MIG/MAG τόξο δε μπορεί να διευρυνθεί άμεσα αναλογικά με την αύξηση της ισχύος του τόξου.

Η αναλογία της έκτασης της περιοχής laser και της περιοχής τόξου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά, εξαρτώμενη από τη ισχύ του laser, την προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση τεμαχίων, τη διαδικασία συγκόλλησης, τις παραμέτρους συγκόλλησης και το είδος του υλικού. Το τελικό σχήμα της συγκόλλησης (σε εγκάρσια τομή) εξαρτάται, επίσης, από παράγοντες όπως: η κατάσταση του διάκενου, η προπορευόμενη πηγή θερμότητας, η κίνηση του τηγμένου μετάλλου στο διάκενο και τυχόν αποτελέσματα προθέρμανσης.



Εικόνα 2.7: Μακροδομή και σχήμα υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου σε εγκάρσια τομή.[Gao et al.2008a]

2.3.4.4 Αέρια προστασίας [29][30][34]

2.3.4.4.1 Εισαγωγή

Η αέρια προστασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υβριδική συγκόλληση laser-τόξου, καθώς έχει μεγάλη επίδραση στη σταθερότητα της διαδικασίας και στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, όταν η θερμοκρασία του μετάλλου φτάσει στο σημείο τήξης, το τηγμένο μέταλλο τείνει να οξειδώνεται γρήγορα κατά την αντίδρασή του με τον αέρα. Τα αέρια προστασίας παίζουν μεγάλο ρόλο στην παρεμπόδιση της οξειδωσης του τηγμένου μετάλλου. Στη συγκόλληση HLAW (Hybrid Laser-Arc Welding) ο σκοπός του αερίου προστασίας είναι αρχικά η απομόνωση του τηγμένου μετάλλου από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται για την καταστολή του σχηματιζόμενου από την ακτίνα laser πλάσματος, την απομάκρυνση του «νέφους» των ατμών του μετάλλου από την κλειδαρότρυπα και τη σταθεροποίηση της μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου.

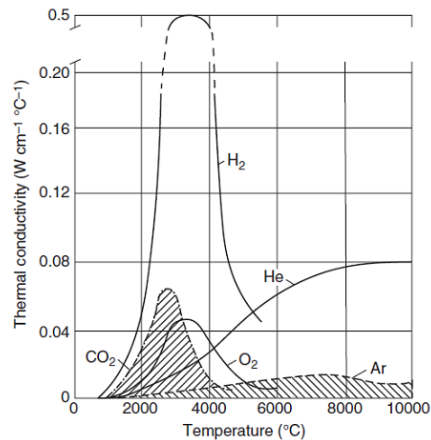
Είναι σαφές ότι λόγω των διαφορετικών και μερικές φορές αντίθετων φυσικών ιδιοτήτων των δύο πλασμάτων (του σχηματιζόμενου εκ του laser και του αντίστοιχου εκ του τόξου), τα αέρια προστασίας πρέπει να ισορροπήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις αυτών. Γενικά, οι διαφορετικές απαιτήσεις των προστατευτικών αερίων στη συγκόλληση HLAW είναι οι εξής:

- **Σύνθεση:** είναι απαραίτητη η βέλτιστη σύνθεση του αερίου μίγματος προστασίας, ώστε να εκμεταλλεύεται κανείς στο έπακρο τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνικών (laser και τόξου) κατά τη συγκόλληση HLAW. Τα αέρια πρέπει να είναι αδρανή όσον αφορά τα υλικά εργασίας καθώς και στις υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, η προσθήκη μερικών ενεργών βελτιώνει τη σταθερότητα του τόξου και το σχήμα της ραφής συγκόλλησης.
- **Ροή:** για συγκεκριμένη και σταθερή σύνθεση αερίου μίγματος προστασίας, υπάρχει μια βέλτιστη ροή αερίου που οδηγεί στη βέλτιστη διείσδυση κατά τη συγκόλληση. Πολύ μικρή ροή αερίου δε μπορεί να καταστείλει αποτελεσματικά το πλάσμα που σχηματίζεται από την ακτίνα laser, ενώ πολύ μεγάλη ροή μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης μειώνοντας την αποτελεσματικότητα στην προστασία της.
- **Δυνατότητα ιονισμού:** η υψηλή δυνατότητα ιονισμού του αερίου προστασίας βοηθά στη μείωση ενός φαινομένου που παρατηρείται στο πλάσμα (plasma defocusing effect), με αποτέλεσμα συγκολλήσεις βαθύτερης διείσδυσης. Συχνά, ωστόσο, οδηγεί σε αστάθεια του τόξου.

2.3.4.4.2 Συνήθη αέρια προστασίας και ιδιότητές τους

Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως στη συγκόλληση HLAW είναι τα : ήλιο (He), αργό (Ar), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξυγόνο (O₂), άζωτο (N₂) και υδρογόνο (H₂). Μια σημαντική παράμετρος για το laser και για τη συγκόλληση τόξου, είναι η ενέργεια ιονισμού του αερίου προστασίας. Μπορεί να επηρεάσει το σχηματισμό και τον ιονισμό της στήλης τόξου, τη μορφή του τόξου και την ενεργειακή κατανομή του. Επίσης έχει επιπτώσεις στη μορφή και την ποσότητα του πλάσματος, καθώς επίσης και στη σταθερότητα της συγκόλλησης laser.

Στο σχήμα 2.31 παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα των αερίων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, η οποία έχει επιπτώσεις στη μορφή της συγκόλλησης τόξου και τη μορφή πλάσματος της συγκόλλησης laser.



Σχήμα 2.31 : Θερμική αγωγιμότητα των αερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας.

2.3.4.4.3 Αδρανή αέρια

Το ήλιο και το αργό είναι τα δύο αέρια που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη συγκόλληση laser και τόξου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.31 το ήλιο έχει την υψηλότερη ενέργεια ιονισμού και τη θερμική αγωγιμότητα. Στη συγκόλληση laser, το ήλιο είναι το προτιμώμενο αέριο προστασίας, εξαιτίας της καλής συμπεριφοράς του στην καταστολή πλάσματος της ακτίνας laser.

Το αργό (συνήθως σε μίγματα με CO₂ και O₂) επίσης χρησιμοποιείται στη συγκόλληση laser, ειδικά για τα στερεά laser, όπως τα Nd: YAG, fiber και diode laser. Σε αυτά τα laser, το αποτέλεσμα του πλάσματος προστασίας για την ακτίνα laser δεν είναι σημαντικό επειδή η απορρόφηση του πλάσματος είναι μικρή για το σχετικά μικρού μήκους κύματος ακτίνας laser. Επομένως, η συγκόλληση laser με τα στερεά laser παρέχει επίσης τα επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το αργό ως αέριο προστασίας.

Ωστόσο, για τη συγκόλληση laser των παχέων ελασμάτων, ειδικά όταν χρησιμοποιείται CO₂ laser, η αυξανόμενη δύναμη του laser σχηματίζει ένα ισχυρό πλάσμα που δεν μπορεί να κατασταλεί μόνο από το αργό. Η ακτίνα laser απεστιάζεται και η σταθερότητα της διαδικασίας μειώνεται. Περιστασιακά, τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης αλλάζουν από συγκόλληση βαθιάς διείσδυσης σε συγκόλληση θερμότητας, δημιουργώντας έτσι μια μερικώς διαπερατή συγκόλληση.

Σε αρκετές περιπτώσεις συγκολλήσεων laser χρησιμοποιείται ήλιο ως αέριο προστασίας. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους του (10-20 φορές το κόστος του αργού), μειώνεται η χρήση του και προτιμούνται μίγματα ηλίου-αργού. Μελέτες έχουν δείξει ότι σε συγκολλήσεις που χρησιμοποιείται laser CO₂, όταν αναμιγνύονται ήλιο με αργό σε αναλογία 3:1, το αέριο προστασίας μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα. Εντούτοις, γενικά, για μια σταθερή διαδικασία και μια αξιόπιστη διείσδυση συγκόλλησης, το ήλιο είναι το μόνο χρησιμοποιήσιμο αέριο προστασίας στη συγκόλληση παχέων ελασμάτων με laser CO₂.

Στη συγκόλληση τόξου συμπεριλαμβανομένης της συγκόλλησης TIG και της συγκόλλησης MIG/MAG, το αργό είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο αδρανές αέριο, εξαιτίας της σταθερότητας που προσδίδει στην ανάφλεξη του τόξου. Στη συγκόλληση MIG/MAG με αέρια προστασία αργού, ο τρόπος μεταφοράς με σταγονίδια τηγμένου μετάλλου (spray) μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με πολύ λίγες εκτινάξεις (spatter). Επιπλέον, η υψηλή πυκνότητα του αργού σε σχέση με του αέρα δίνει καλή προστασία για τη λίμνη συγκόλλησης. Συγκρινόμενο με το αργό, το τόξο ηλίου απαιτεί υψηλότερη τάση τόξου με το ίδιο μήκος τόξου, υψηλότερη θερμοκρασία τόξου και μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας, λόγω της μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας. Αυτά τα πλεονεκτήματα διευκολύνουν τη συγκόλληση των παχέων μερών και ενισχύουν την ταχύτητα συγκόλλησης. Όμως, λόγω της υψηλής ενέργειας ιονισμού του ηλίου κατά τη διάρκεια της MIG διαδικασίας συγκόλλησης τόξου, δημιουργείται υψηλή πίεση στα σταγονίδια, η οποία καθιστά τη μεταφορά των σταγονιδίων δύσκολη και αυξάνει το όριο του ρεύματος της μεταφοράς ψεκασμού. Η σταθερότητα διαδικασίας μειώνεται επίσης για αυτόν το λόγο.

2.3.4.4.4 Ενεργά αέρια

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα ενεργά αέρια προστασίας στις συγκολλήσεις τόξου είναι τα CO₂ και O₂, τα οποία όμως δε χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις laser.

Ο κύριος σκοπός της χρήσης των δύο αερίων, είναι η βελτίωση των ιδιοτήτων συγκόλλησης και η μείωση μερικών προβλημάτων, όπως η ολίσθηση της καθόδου και οι μορφολογικές ατέλειες της συγκόλλησης. Το ινστιτούτο έρευνας των μετάλλων LU-group έχει μελετήσει τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας του οξυγόνου στα μίγματα He-O₂ και Ar-O₂ της συγκόλλησης TIG του χαμηλού σε περιεκτικότητα άνθρακα, ανοξειδωτού χάλυβα 304. Αυτή η μελέτη κατέδειξε ότι σε υψηλή θερμοκρασία το οξυγόνο διαχωρίζεται από το μόριο του O₂. Όταν μπει στη λίμνη συγκόλλησης και φθάσει σε μια κρίσιμη συγκέντρωση μπορεί να αλλάξει την επιφανειακή τάση του λιωμένου μετάλλου της λίμνης επηρεάζοντας έτσι τη ροή του και συνεπώς τη μορφή συγκόλλησης.

Όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι υψηλή στο αέριο προστασίας, η υγρή ροή μετάλλου που οδηγείται από την επιφανειακή τάση, μεταφέρεται από τις άκρες της λίμνης στο κέντρο και τα χαμηλότερα μέρη, δημιουργώντας μία στενή και βαθιά συγκόλληση. Όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι χαμηλότερη, η λιωμένη ροή του μετάλλου μεταφέρεται από το κέντρο της λίμνης στις άκρες, δημιουργώντας μια πλατειά και ρηχή συγκόλληση. Στη συγκόλληση MAG, επιπλέον, τα δύο ενεργά αέρια προωθούν τον καθαρισμό των μεταλλικών σταγονιδίων και μειώνουν στη συνέχεια το ελάχιστο ρεύμα ώστε να επιτευχθεί μεταφορά με ψεκασμό.

2.3.4.4.5 Υδρογόνο και άζωτο

Υδρογόνο και άζωτο είναι άλλα αέρια που χρησιμοποιούνται σπάνια στη συγκόλληση laser-τόξου. Το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο. Είναι μη τοξικό και εύφλεκτο (σημείο ανάφλεξης σε 560 °C). Είναι πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα και εκρηκτικό σε ένα μίγμα με αέρα και οξυγόνο, σε μεγάλη ποσότητα. Από όλα τα αέρια, έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, υψηλή ενθαλπία και είναι αέριο, το οποίο συνδυαζόμενο με το οξυγόνο, εμποδίζει το σχηματισμό οξειδίων. Σαν αέριο προστασίας, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως προσθήκη σε άλλα αέρια, κυρίως σε αργό, αλλά και ήλιο σε μικρότερες ποσότητες. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ως αέριο πλάσματος με το αργό, ή ως συστατικό στο μίγμα αργού-υδρογόνου όταν συγκολλούνται υψηλά κραματωμένοι ανοξειδωτοί χάλυβες με συγκόλληση τόξου. Γενικά, η προσθήκη του υδρογόνου γίνεται σε ποσοστό 4-8%. Ο κύριος σκοπός της προσθήκης του υδρογόνου είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του τόξου και της θερμότητας που εισάγεται για το υπόστρωμα και συνεπώς, μια αύξηση στην ταχύτητα ή την αποδοτικότητα συγκόλλησης.

Το άζωτο είναι επίσης ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο και είναι μη τοξικό. Είναι το κύριο συστατικό του αέρα. Ο ιονισμός του αζώτου, απαιτεί σχετικά υψηλή ενέργεια, επειδή καταναλώνει κάποια ενέργεια όταν διασπάται το άτομο N₂. Αυτό το φαινόμενο διευκολύνει την καταστολή πλάσματος για τη συγκόλληση με laser. Έναντι του αργού τα πλεονεκτήματα του αζώτου είναι το χαμηλότερο κόστος και η καλύτερη καταστολή του πλάσματος στη συγκόλληση laser, ενώ τα μειονεκτήματά του είναι η εμφάνιση πόρων και η μείωση της αντοχής της συγκόλλησης ως αποτέλεσμα της δημιουργίας ενώσεων αζώτου. Το άζωτο, επομένως, χρησιμοποιείται σπάνια στη συγκόλληση laser για απαιτήσεις υψηλής ποιότητας ενώσεων. Όταν συγκολλάται ωστενιτικός ανοξειδωτός χάλυβας, η προσθήκη αζώτου στο αέριο προστατευτικό μίγμα αργού, μπορεί να βελτιώσει την ακαμψία του τόξου και τη μορφή της συγκόλλησης.

2.3.4.5 Πλεονεκτήματα της μεθόδου HLAW [26][27][29]

Η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου συνδυάζει τα καλύτερα στοιχεία των δύο επιμέρους μεθόδων και, όπως είναι λογικό, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα αν συγκριθεί με αυτές.

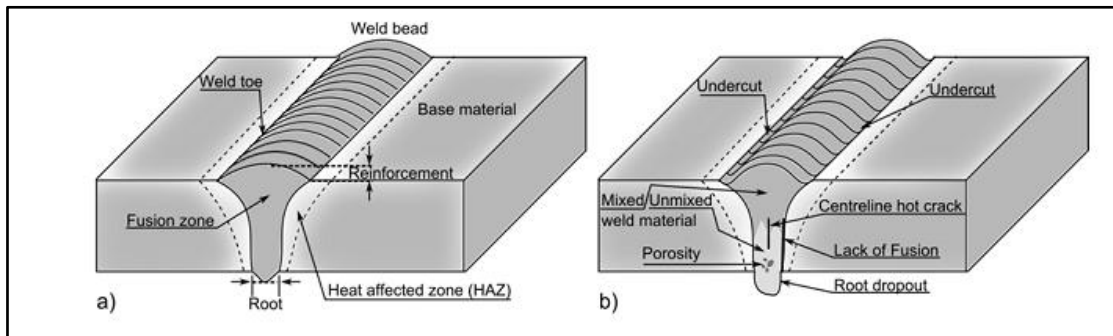
Σε σχέση με τη συγκόλληση **laser**:

- Για χαμηλότερη ισχύ της ακτίνας laser, καλύτερη σύνδεση των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Μικρότερες απαιτήσεις προετοιμασίας και σύσφιξης των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Σε σχέση με τις συγκολλήσεις **τόξου**:

- Υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης με μηδενικό διάκενο μεταξύ των τεμαχίων και δυνατότητα συγκόλλησης I seam σε σύνδεση των τεμαχίων με επικάλυψη (lap joint).
- Συγκόλληση μεγάλης διείσδυσης μονού περάσματος, ακόμα και για ελάσματα μεγάλου πάχους.
- Χαμηλότερα επίπεδα θερμικής ισχύος (Q), άρα και μεγαλύτεροι ρυθμοί απόψυξης.
- Πολύ λιγότερες παραμορφώσεις.

Γενικά, η μέθοδος HLAW παρουσιάζει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας όσον αφορά τη διαδικασία συγκόλλησης. Για παράδειγμα, η εισροή ενέργειας και η μεταφορά τηγμένου μετάλλου μπορούν να ελεγχθούν αρκετά εύκολα.



Σχήμα 2.32 : a) Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιας τομής υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου, b) Τυπικά σφάλματα και ατέλειες της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου.

2.3.4.6 Τυπικά σφάλματα υβριδικών συγκολλήσεων [26][27][29]

Τα σφάλματα και οι ατέλειες που εμφανίζονται συνηθέστερα στις υβριδικές συγκολλήσεις laser-τόξου, καθώς και στις αυτογενείς laser συγκολλήσεις, είναι πόροι και σφάλματα στερεοποίησης (ή ρωγμές). Μπορεί, επίσης, να παρατηρηθούν σφάλματα ατελούς τήξης, υπερβολικής διείσδυσης με αποτέλεσμα υπέρμετρη ενίσχυση της ρίζας καθώς και σφάλματα υποκοπών (σχήμα 2.32). Από τα προαναφερθέντα, οι ρωγμές είναι σημαντικά πιο κρίσιμες και κυρίως το στάδιο έναρξής τους και η επακόλουθη αστοχία. Οι ατέλειες αυτές είναι σφάλματα στερεοποίησης, αλλά αντίθετα με τις κοινές ρωγμές στερεοποίησης (hot cracks), είναι γενικά πολύ μικρές, της τάξεως μερικών τετραγωνικών χιλιοστών και είναι απομονωμένες ρωγμές που σχηματίζονται με μια συγκεκριμένη κανονικότητα κατά μήκος της συγκόλλησης. Τα σφάλματα αυτά προκύπτουν πιο εύκολα όσο αυξάνεται το πάχος του ελάσματος και συνήθως εντοπίζονται μόνο στον κεντρικό άξονα της συγκόλλησης. Οι αιτίες που τα προκαλούν είναι πολλαπλές, με πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που μπορεί να ποικίλουν κατά περίπτωση.

Ενότητα Α

Ανομοιογενείς Συγκολλήσεις

A.1. Εισαγωγή- Παράδειγμα

Σε εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας, τα τμήματα των λεβήτων που εργάζονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες είναι κατασκευασμένα από φερριτικούς χάλυβες, για πολλούς λόγους: μαγνητισμού, χαμηλής θερμικής διαστολής, υψηλής αντοχής στην οξειδωση που προκαλείται από υψηλή θερμοκρασία. Επίσης έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα διαχέοντας έτσι τη θερμότητα αποδοτικότερα και είναι λιγότερο εκτεθειμένοι στο φαινόμενο της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking).

Δηλαδή οι φερριτικοί ανοξειδωτοί χάλυβες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα για εφαρμογές τέτοιου τύπου, καθώς επίσης έχουν και χαμηλό κόστος (ώστε να συμμετέχουν σε μεγάλο ποσοστό διαφόρων εγκαταστάσεων). Παρόλα αυτά, εμφανίζονται περισσότερο ευπαθείς σε σημεία όπου οι συνθήκες απαιτούν υψηλή απόδοση, με αποτέλεσμα τον αναγκαίο τους συνδυασμό με χάλυβες άλλου τύπου. Στα τμήματα των λεβήτων που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, λοιπόν, χρησιμοποιούνται χάλυβες ωστενιτικοί.

Άλλες εφαρμογές όπου κρίνεται αναγκαία η συγκόλληση δύο κραμάτων διαφορετικής σύστασης, είτε για οικονομικούς, είτε για λειτουργικούς λόγους, είναι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι τουρμπίνες ατμού και τα πετροχημικά εργοστάσια. Στην βιομηχανία, σκάφη, σωλήνες και εναλλάκτες θερμότητας κατασκευάζονται με συνδυασμούς κραμάτων για τη βελτιστοποίηση των αποδόσεών τους.

Με τα παραπάνω παραδείγματα φαίνεται πόσο σημαντική είναι η χρήση ενός κράματος για τμήμα κάποιας εφαρμογής, και πόσο μπορεί να ωφελήσει την ίδια εφαρμογή ένα άλλο κράμα. Για παρόμοιους λόγους («συνεργασίας» κραμάτων) έχουν αναπτυχθεί τεχνικές συγκόλλησης για δύο διαφορετικά κράματα (Dissimilar Metal Welds- DMWs), των οποίων οι ιδιότητες αναλύονται στην παρούσα ενότητα.

A.2. Βασικές αρχές *dissimilar* συγκόλλησης σιδηρούχων κραμάτων [59]

Στις ανομοιογενείς συγκολλήσεις πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους παρακάτω παράγοντες:

Υπό συγκόλληση parent metals

Εκτός από όλες τις παρατηρήσεις που πρέπει να γίνονται σε μία ομοιογενή συγκόλληση, (η σύστασή τους και οι μηχανικές ιδιότητες να είναι σαφώς ορισμένες), όταν πρόκειται να συγκολληθούν διαφορετικά κράματα, πρέπει να λειτουργούν συνδυαστικά οι ιδιότητές τους αυτές. Για παράδειγμα, κατά τη συγκόλληση, οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες οφείλουν να είναι ευνοϊκές και για τα δύο μεταλλικά υλικά.

Ζώνη τήξης

Στη ζώνη τήξης της συγκόλλησης πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς παρουσιάζει πολλές μεταβολές στη δομή της και τις ιδιότητές της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μία της πλευρά πλησιάζει τη σύσταση ενός διαφορετικού κράματος, του οποίου τα κραματικά στοιχεία ενδέχεται να εισχωρήσουν στη δομή της (π.χ. άνθρακας). Δηλαδή η ζώνη τήξης έχει διαφορετική χημική σύσταση κατά το μήκος της, εξαρτώμενη από τις περιοχές πλησίον των κραμάτων.

Επιλογή προστιθέμενου μετάλλου (filler metal)

Στις ανομοιογενείς συγκολλήσεις δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα το φαινόμενο της διάλυσης (dilution), όπου τμήμα του βασικού μετάλλου λιώνει εξαιτίας της αναπτυσσόμενης θερμότητας, και συμμετέχει στη σύσταση του συγκολλημένου μετάλλου. Στις ομοιογενείς συγκολλήσεις είναι πιο εύκολος ο έλεγχος της θερμότητας και ως εκ τούτου δεν υφίσταται διάλυση. Το φαινόμενο στις DMWs συμβαίνει είτε επειδή κάποιο από τα δύο υλικά είτε το προστιθέμενο μέταλλο είναι διαφορετικής σύστασης, οδηγώντας στο προαναφερόμενο πρόβλημα.

Όλες οι συγκολλήσεις ακολουθούν λοιπόν απαιτήσεις που αφορούν στα ποσοστά της διάλυσης, στη συμβατότητα της μεταλλουργικής διαδικασίας, καθώς και στις μηχανικές και διαβρωτικές ιδιότητες καθενός parent metal αλλά και filler metal. Η επιλογή του κατάλληλου προστιθέμενου μετάλλου οφείλει να είναι αποτέλεσμα εμπειρίας, γνώσης των ιδιοτήτων και των μετασχηματισμών που συμβαίνουν με τις θερμοκρασιακές αλλαγές, και πολλών δοκιμών πριν την τελική εφαρμογή.

A.3. Προβλήματα των DMWs

Έχει παρατηρηθεί πως οι ανομοιογενείς συγκολλήσεις αστοχούν πριν το προσδόκιμο σχεδιασμού τους. Οι έρευνες που έχουν γίνει επ' αυτού δείχνουν πως αιτία της αστοχίας είναι οι μεγάλες θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στα μέρη της συγκόλλησης. Λόγω διαφορετικών ιδιοτήτων, κάθε μέταλλο έχει διαφορετική θερμική διαστολή, οπότε οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας δημιουργούν τις θερμικές τάσεις. Παράλληλα, οι θερμικές τάσεις εντός της *dissimilar* δημιουργούνται και από τις μεταλλουργικές αλλαγές (όπως είναι η μεταφορά του άνθρακα και η κατακρήμνιση των καρβιδίων στα όρια των κόκκων).

Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω παρουσιάζονται διάφοροι συνδυασμοί κραμάτων για ανομοιογενή συγκόλληση, οι παράμετροι και οι δυσκολίες που προκύπτουν:

A) Μικροκραματωμένος χάλυβας- Μαλακός χάλυβας

Οι παράμετροι της συγκόλλησης θα πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τον χαμηλά κραματωμένο χάλυβα, ενώ η επιλογή των καταναλισκόμενων ηλεκτροδίων σύμφωνα με τον μαλακό (ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο κατάλληλο για μικροκραματωμένους χάλυβες, αυτό δεν θα οδηγήσει στην αύξηση της αντοχής της σύνδεσης).

Πιθανό πρόβλημα είναι η μη επίτευξη της επιθυμητής σκληρότητας, εξαιτίας των κραματικών στοιχείων του μικροκραματωμένου χάλυβα. Όταν δηλαδή πρόκειται για συγκόλληση HSLA, η πρόσδοση θερμότητας έχει την τάση να μαλακώνει την θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, συνίσταται η θερμική κατεργασία μετά στη συγκόλληση, στις ωστενιτικές περιοχές της. Δεν είναι όμως όλες οι κατεργασίες κατάλληλες, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να εντείνει το φαινόμενο. Επιπρόσθετα, μέθοδοι συγκόλλησης όπως είναι η GTAW και η GMAW οδηγούν σε μεγάλου εύρους θερμικά επηρεασμένων ζωνών, με επίπτωση στο όριο διαρροής.

B) Μικροκραματωμένος χάλυβας A - Μικροκραματωμένος χάλυβας B

Εδώ, το ηλεκτρόδιο που θα επιλεγεί είναι καλό να έχει ισοδύναμο άνθρακα C_E περίπου ίσο με το C_E του λιγότερο σκληρυνόμενου parent metal (εάν είναι μόνο το C_E που διαφέρει στα δύο κράματα, τότε η συγκόλληση δεν παρουσιάζει προβλήματα).

Στην περίπτωση ενός χάλυβα υψηλής αντοχής και σκληρότητας, πρέπει να γίνεται συμβιβασμός και να χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρόδιο ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα, και είναι απαραίτητη η προθέρμανση των τεμαχίων πριν τη διαδικασία της συγκόλλησης. Η προθέρμανση αυτή όμως πρέπει να γίνεται ελεγχόμενα, καθώς είναι πιθανό να οδηγήσει σε διεύρυνση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ), που με τη σειρά της εγκυμονεί κίνδυνο ρωγμάτωσης.

Γ) Ανοξειδωτος χάλυβας- Μικροκραματωμένος χάλυβας

Εάν η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τους 370°C , τότε το ηλεκτρόδιο που θα χρησιμοποιηθεί θα αποτελείται και αυτό από ανοξειδωτο χάλυβα. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην κραμάτωση του ηλεκτροδίου, ώστε να περιέχει στοιχεία που εμποδίζουν την ανάπτυξη μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης, σε συνδυασμό με τη διάλυση του βασικού μετάλλου και με τον υπολειπόμενο φερριτή ενδέχεται να οδηγήσουν σε θερμή ρωγμάτωση. Η θερμή ρωγμάτωση επίσης μπορεί να συμβεί λόγω των χαμηλών σημείων τήξης των ακαθαρσιών (φώσφορος P και θείο S).

Δυσμενή έκβαση έχει επίσης η χρήση ηλεκτροδίου ανθρακούχου ή μικροκραματωμένου χάλυβα σε ωστενιτικούς ανομοιογενείς χάλυβες, διότι οι δημιουργούμενες συγκολλήσεις προκύπτουν σκληρές και πολύ ψαθυρές.

Δ) Ανοξειδωτος χάλυβας A- Ανοξειδωτος χάλυβας B

Προσοχή δίνεται στις θερμικές κατεργασίες που έχουν προηγηθεί, στη μικροδομή της προκύπτουσας συγκόλλησης, στην επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου και της μεθόδου.

Φαινόμενα που πρέπει να αποφευχθούν είναι η υψηλή σκληρότητα και οι παραμένουσες τάσεις μετά τη συγκόλληση. Η δημιουργία μαρτενσίτη και η ευπάθεια του ωστενίτη καθιστούν τη μικροδομή της συγκόλλησης επιδεκτική στη διάβρωση, για αυτό η επιλογή της μεθόδου και των παραμέτρων της οφείλει να τις αποτρέπει.

A.4. Γενικά συμπεράσματα για τις *dissimilar* συγκολλήσεις

Πολλοί συνδυασμοί μετάλλων μπορούν να συγκολληθούν, είτε είναι κραματωμένοι, είτε ανθρακούχοι είτε ανοξειδωτοί. Επίσης είναι δυνατό να συγκολληθούν διαφορετικοί χάλυβες υψηλής αντοχής (HTS) καθώς και χάλυβες που έχουν την ιδιότητα να αντιστέκονται στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Οι συγκολλήσεις μεταξύ των ανθρακούχων, κατασκευαστικών, και άλλων ισχυρών χαλύβων είναι ευαίσθητες από άποψη πρόσδοσης θερμότητας. Δεν ωφελεί μόνο η κατάλληλη επιλογή του προστιθέμενου μετάλλου, αλλά και ο έλεγχος της έντασης της πηγής θερμότητας που χρησιμοποιείται, καθώς μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου συγκολλημένου τεμαχίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η σκληρότητα αυξάνει με την υψηλή θερμοκρασία, και, σε αντίθεση με το όριο διαρροής, μειώνεται όσο η θερμότητα που προσδίδεται αυξάνει.

Όσον αφορά στη συγκόλληση ενός HSLA χάλυβα με ένα χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (LCS), υπάρχει ο κίνδυνος της μεταφοράς του άνθρακα από την πλευρά του LCS στην πλευρά του HSLA κατά τη διεργασία, και να αλλοιώσει τις ιδιότητές του. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η επιλογή του καταλληλότερου προστιθέμενου μετάλλου. Επίσης πρέπει να αναπτύσσονται αυστηρά ελεγχόμενες θερμοκρασίες που θα περιορίζουν το εύρος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ), αλλά και της ζώνης διάλυσης.

Συμπερασματικά, εκτός από το προστιθέμενο μέταλλο, είναι υψίστης σημασίας ο έλεγχος των παραμέτρων της συγκόλλησης όπως το ρεύμα, το δυναμικό και η ταχύτητα, προκειμένου οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες να επιτευχθούν.

Τελικά, το συμπέρασμα είναι πως οι συγκολλήσεις σιδηρούχων κραμάτων απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και σαφή καθορισμό των παρακάτω παραμέτρων:

- Βασικές μηχανικές ιδιότητες των parent metals
- Χημική σύσταση των parent metals
- Επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου
- Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου
- Έλεγχος της θερμότητας και της θερμοκρασίας
- Έλεγχος της έντασης του ρεύματος και της ταχύτητας της συγκόλλησης
- Μετέπειτα κατεργασία για τη χαλάρωση των παραμενουσών τάσεων

ΕΝΟΤΗΤΑ Β

Ανάπτυξη και εφαρμογές των μεθόδων Laser και Laser-Arc Hybrid συγκολλήσεων στη Ναυπηγική Βιομηχανία. [60]

B.1. Η αρχική χρήση του Laser και ο έλεγχος

Οι μέθοδοι συγκολλήσεων Laser δεν έχουν εφαρμοσθεί αρκετά στην κατασκευή των πλοίων, καθώς λίγα μόνο Ναυπηγεία έχουν την τεχνογνωσία και τον εξοπλισμό για τέτοιου είδους συγκολλήσεις. Τον Ιούνιο του 1992, εκ μέρους της Ευρωπαϊκής Ναυπηγικής Βιομηχανίας (European Shipbuilding Industry), εκδόθηκε μία μελέτη που αφορούσε στη χρήση του Laser σε αυτό τον τομέα, και η οποία ανέφερε τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν πριν η τεχνική αυτή θεωρηθεί ασφαλής. Καίριο ζήτημα αυτής της έρευνας αποτέλεσαν οι αυστηροί κανονισμοί των Νηογνώμωνων (Classification Societies), όπως του Lloyd's Register, και οι οποίοι ορίζουν τους κανόνες και τους κανονισμούς που διέπουν την κατασκευή ενός πλοίου. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη έρευνα, που ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας της Ναυπηγικής Βιομηχανίας και των Νηογνώμωνων. Αντικείμενο αυτής ήταν η εφαρμογή του Laser στα διάφορα Panels του πλοίου, τόσο στις αυχενικές όσο και στις κατά συμβολή συγκολλήσεις. Κινητήριος δύναμη για αυτό αποτέλεσε η μεγάλη αναμενόμενη μείωση των παραμορφώσεων, που θα οδηγούσε στην βελτιωμένη ακρίβεια της κατασκευής, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση των εργατικών εξόδων που έφεραν οι προκύπτουσες παραμορφώσεις. Δηλαδή, θεωρήθηκε πως το μεγάλο κόστος μιας συγκόλλησης Laser, μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μείωση των εργατο-ωρών της εκ νέου εργασίας που θα απαιτούσε ένα παραμορφωμένο έλασμα.

Η εν λόγω έρευνα ολοκληρώθηκε το 1996, το βασικό της συμπέρασμα ήταν η έκδοση των κατευθυντήριων γραμμών που εγκρίνουν κάθε διαδικασία που περιλαμβάνει η συγκόλληση CO₂ laser στην κατασκευή ενός πλοίου, από τους Ευρωπαϊκούς Νηογνώμονες, αλλά και αργότερα από τον Αγγλικό Lloyd's Register. Με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης πραγματοποιήθηκε περαιτέρω έρευνα (υπό το ακρωνύμιο SHILWACQ), η οποία ασχολήθηκε διεξοδικά με τον έλεγχο ποιότητας και τις μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου των συγκολλήσεων Laser κατά το στάδιο της κατασκευής.

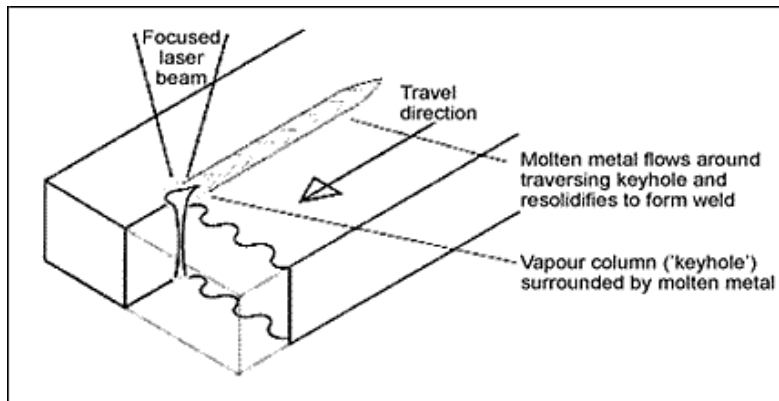
Άλλες έρευνες επικεντρώθηκαν στα Nd:YAG lasers, των οποίων οι δέσμες ακτινών μεταφέρονται στο υπό κατασκευή τμήμα μέσω εύκαμπτων καλωδίων οπτικών ινών. Αυτού του είδους Lasers όμως εμφανίζουν περιορισμό λόγω της χαμηλής ισχύος (~4kW), και για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε ο συνδυασμός τους με τα CO₂ lasers.

Εν τω μεταξύ, η ανάπτυξη στη βιομηχανία προχώρησε, και εξ αιτίας της δυσκολίας στην επίτευξη της ακρίβειας με άλλες μεθόδους, στην ευρεία χρήση του συνδυασμού του τόξου και του laser στις συγκολλήσεις, με τον νέο τύπο που ονομάστηκε laser-arc hybrid welding. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τα πλεονεκτήματα των δύο μορφών, δηλαδή της παραδοσιακής συγκόλλησης τόξου και των ακτινών laser σε κοινή λίμνη συγκόλλησης.

Η νέα αυτή εφαρμογή αποτέλεσε αντικείμενο νέων ερευνών, ως προς την εφαρμογή της και την τεχνογνωσία, με αποτέλεσμα την αναθεώρηση των γενικών αρχών που είχαν εκδώσει οι Νηογνώμονες, και στη δημιουργία ανανεωμένων κανονισμών όπου συμπεριλήφθηκε η νέα τεχνολογία του laser-arc hybrid welding.

B.2. Βασικές αρχές των συγκολλήσεων Laser

Η αρχική χρήση του Laser ήταν η αξιοποίησή του ως πηγή ενέργειας για διάφορες εφαρμογές, όπως είναι η διάνοιξη οπών, η κοπή και η συγκόλληση διαφόρων υλικών. Στη διάδοση αυτής της τεχνικής έπαιξε ρόλο η βασική ιδιότητά του, ότι με ισχύ από μερικά milli-watts μέχρι και αρκετά kilowatts, η ενέργεια του Laser δύναται να συγκεντρωθεί σε ένα σημείο με διάμετρο μικρότερη του ενός χιλιοστού, και αυτό προσφέρει πολύ υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Όταν μάλιστα αυτή η τεχνική χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση μεταλλικών υλικών, η μεγάλη πυκνότητα της ενέργειας ωφελεί τον λεγόμενο μηχανισμό της «κλειδαρότρυπας», όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.4: Schematic of laser keyhole welding mechanism

B.2.2. Μηχανισμός της «κλειδαρότρυπας»

Η συγκεντρωμένη ενέργεια που δημιουργείται από την ακτίνα laser τρυπά μία στήλη του υπό συγκόλληση τεμαχίου. Η στήλη αυτή, που περιβάλλεται από τηγμένο μέταλλο, στην ουσία περιέχει ατμούς, και καθώς προχωρά η συγκόλληση, το τηγμένο μέταλλο στερεοποιείται, πραγματοποιώντας έτσι τη συγκόλληση. Με αυτό τον μηχανισμό, είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις με μεγάλο λόγο βάθους προς πλάτος με μικρή πρόσδοση θερμότητας, και με αποτέλεσμα τις στενές θερμικά επηρεασμένες ζώνες (HAZ), και με λιγότερες παραμορφώσεις (συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης).

Αρχικά το laser βρήκε εφαρμογή σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων (μερικά millimeters), όμως, καθώς αυξήθηκε η ισχύς του, είναι πλέον δυνατή η συγκόλληση παχύτερων ελασμάτων. Προτιμάται εξαιτίας του παραπάνω μηχανισμού, ο οποίος προσφέρει επαρκή συγκόλληση με ένα μόνο πέρασμα, έναντι στις παραδοσιακές μεθόδους που απαιτούν πολλαπλά πάσα. Τα οφέλη της τεχνικής αυτής όμως δεν σταματούν εκεί, διότι εκτός της λιγότερης απαιτούμενης θερμότητας, και των μικρότερων παραμορφώσεων, διευκολύνεται η προετοιμασία των ελασμάτων. Παράλληλα, μείωση του συνολικού κόστους φέρει και η μηδενική ή μειωμένη αναγκαιότητα για μέταλλο προσθήκης. Όπως γίνεται κατανοητό, και επειδή στην κατασκευή ενός πλοίου η συγκόλληση είναι μία εκ των βασικότερων διεργασιών, η τεχνική του Laser έχει τραβήξει την προσοχή των κατασκευαστών προς αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της.

B.3. Χρήση των συγκολλήσεων Laser στη σημερινή ναυπηγική βιομηχανία

Η αυξημένη ακρίβεια της κατασκευής, που προσφέρει μια συγκόλληση laser, και που προκύπτει από τη μειωμένη θερμική παραμόρφωση, είναι η αιτία της προτίμησης στη συγκεκριμένη μέθοδο. Αυτό διότι το κόστος από την μετέπειτα επεξεργασία των παραμορφωμένων ελασμάτων και την ευθυγράμμισή τους εκτιμάται ότι ισοδυναμεί με το 15-30% του εργατικού κόστους της συνολικής κατασκευής της γάστρας του πλοίου.

Παρόλα αυτά, σήμερα, υπάρχουν μόνο λίγα ναυπηγεία σε παγκόσμιο επίπεδο με χρήση laser στην παραγωγή. Μερικά από αυτά χρησιμοποιούν laser ή υβριδικό laser-τόξο ως άμεσο υποκατάστατο για μια πιο παραδοσιακή διαδικασία συγκόλλησης. Άλλα χρησιμοποιούν τα ειδικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες του laser, για παράδειγμα, που προκύπτουν από τον μηχανισμό κλειδαρότρυπας, ώστε να χρησιμοποιηθούν νέοι σχεδιασμοί ή λεπτότερα υλικά. Επιπλέον, σε ορισμένα ναυπηγεία το laser δεν χρησιμοποιείται μόνο για συγκόλληση, αλλά και για άλλες τεχνικές επεξεργασίας υλικών όπως είναι η κοπή, η σήμανση και η αφαίρεση των primers. Στη συνέχεια, θα συζητηθούν σύντομα οι κύριες εφαρμογές των λέιζερ σε ναυπηγεία της Ευρώπης.

Ναυπηγείο Meyer Werft [61-68]

Το Ναυπηγείο Meyer Werft στο Papenburg της Γερμανίας, ειδικεύεται σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια, σε κρουαζιερόπλοια ποταμού, καθώς και σε πλοία μεταφοράς εμπορευμάτων. Είναι χωρίς αμφιβολία το ναυπηγείο που κάνει την πιο εντατική χρήση των λέιζερ για εφαρμογές συγκόλλησης.

Πρώτον, υπάρχουν τα λεγόμενα πάνελ I-Core TM, τα οποία είναι μεταλλικά πάνελ σάντουιτς, και στα οποία η εσωτερική δυσκαμψία παρέχεται από μεμονωμένα μεταλλικά ελάσματα σε ορθές γωνίες προς τις πλάκες καλύμματος. Η συγκόλληση πραγματοποιείται με τη χρήση κλειδαρότρυπας-δοκού μέσω των πλακών κάλυψης στα ενισχυτικά ελάσματα, με αποτέλεσμα πολύ επίπεδα πάνελ και επομένως εύκολη μετέπειτα χρήση στα πλοία. Ναυπηγείο Meyer Werft άρχισε να αναπτύσσει το I-Core το 1994 και δημιούργησε ένα ξεχωριστό κατάστημα συγκόλλησης για αυτές τις ομάδες, που σήμερα είναι εξοπλισμένο με δύο 12kW λέιζερ CO₂. Τα πάνελ σάντουιτς I-Core για παράδειγμα χρησιμοποιούνται στα καταστρώματα, στα τοιχώματα, στις φρακτές και στις βάσεις των κλιμάκων σε κρουαζιερόπλοια, αλλά βρίσκουν επίσης αυξημένη εφαρμογή εκτός της ναυπηγικής βιομηχανίας (για παράδειγμα: σιδηροδρομικές τροχιές, οικοδομήματα και φορτηγά).

Η άλλη εφαρμογή λέιζερ στο ναυπηγείο Meyer Werft είναι στα panel lines. Εγκαταστάθηκε στις αρχές του 2002 και πιστεύεται ότι είναι η μεγαλύτερη εγκατάσταση συγκόλλησης με λέιζερ στον κόσμο, εξοπλισμένη με τέσσερις περαιτέρω 12kW CO₂ λέιζερ. Σε αυτή την πλήρως αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής, πραγματοποιούνται συγκολλήσεις κατά συμβολή (butt weld) και συγκολλήσεις T (T-joints) έως και 20m μήκος για τις «παραδοσιακά» ενισχυμένες πλάκες, χρησιμοποιώντας υβριδική laser-GMA συγκόλληση.

Οι πλάκες και τα ενισχυτικά διαμορφώνονται πριν από τη συγκόλληση, και δημιουργείται ένα μικρό αυλάκι (της τάξης των 6 °). Τα οφέλη είναι κυρίως η αύξηση της παραγωγικότητας (επίσης επιτρέπει τη μείωση του αριθμού των σταθμών συγκόλλησης) και η βελτίωση της ακρίβειας (μειωμένη παραμόρφωση των επί μέρους τμημάτων). Εκτιμάται ότι σήμερα πάνω από το μισό του ολικού μήκους συγκόλλησης στα πλοία της Meyer Werft έχει συγκολληθεί με τις μεθόδους του laser.



Εικόνα 2.5: Panel lines στο ναυπηγείο Meyer Werft όπου εφαρμόζονται οι μέθοδοι του laser

Ναυπηγείο Blohm + Voss [69-73]

Το Ναυπηγείο Blohm + Voss ειδικεύεται στην κατασκευή φρεγατών, ταχυπλόων, γρήγορων κρουαζιερόπλοιων και μεγάλων σκαφών αναψυχής, και ως εκ τούτου, ένα μεγάλο μέρος των χαλύβων που συγκολλώνται είναι μόνο 4-5 mm σε πάχος. Το 2000 - μετά από περισσότερα από 10 χρόνια έρευνας - εισήγαγε μια γραμμή παραγωγής για συγκόλληση με λέιζερ κατά συμβολή (butt weld) και συγκολλήσεις T (T-joints) των «παραδοσιακών» πάνελ στις εγκαταστάσεις του στο Αμβούργο, Γερμανία.

Η ξεχωριστή γραμμή παραγωγής εισήχθη ως μέρος των προσπαθειών για ακριβείς κατασκευές και για τον εξορθολογισμό του προγραμματισμού του ναυπηγείου, και είναι εξοπλισμένο με δύο 12kW CO₂ λέιζερ.

Το Ναυπηγείο Blohm + Voss χρησιμοποιεί το λέιζερ ως «ευέλικτο εργαλείο», που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται για την συγκόλληση, την κοπή, τη σήμανση και την αφαίρεση των primers. Πραγματοποιούνται κατά συμβολή συγκολλήσεις με λέιζερ σε πάνελ μήκους έως και 12m (σε πάχος τυπικά 3 έως 8 mm). Επίσης διερευνάται η υβριδική laser-GMA συγκόλληση για κατά συμβολή συγκολλήσεις, εξαιτίας της αυξημένης ανοχής σε κενά σύνδεσης. Για τη συγκόλληση T, με σκοπό την ισχυρότερη σύνδεση, χρησιμοποιεί μια ταυτόχρονη διαδικασία διπλής όψης αυτογενή συγκόλληση με λέιζερ. Για την αποφυγή της ελλιπούς πλήρωσης της ζώνης συγκόλλησης, η κάτω πλευρά των ενισχυτικών διαμορφώνεται ώστε να γίνει επίπεδη για να δώσει μια σφιχτή προσαρμογή. Με την προσέγγιση αυτή, το ναυπηγείο μπορεί να δημιουργήσει μια πλήρη διείσδυση, διπλής όψης συγκόλληση T-κατά συμβολή σε ενισχυτικά πάχους μεταξύ 5 και 12 χιλιοστά.

Ναυπηγείο Odense Steel Shipyard [73-75]

Το ναυπηγείο Odense Steel Shipyard (OSS) στο Odense της Δανίας, δραστηριοποιήθηκε κυρίως στον τομέα των μη-επιβατηγών πλοίων, όπως τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) και δεξαμενόπλοιων (tankers). Η έρευνα σχετικά με τη χρήση των λέιζερ ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980, οδηγώντας στη δημιουργία (το 1997) ενός ξεχωριστού τμήματος επεξεργασίας τμημάτων των πλοίων, εξοπλισμένο με ένα λέιζερ CO₂ 12 kW. όπως συμβαίνει και με το ναυπηγείο Blohm + Voss, το λέιζερ που χρησιμοποιείται για κατεργασίες όπως είναι η κοπή, η σήμανση, η αφαίρεση των primers και η

συγκόλληση (κυρίως οι T). Από το 2000 και μετά, το OSS άρχισε να ερευνά την υβριδική laser-GMA συγκόλληση, η ανάπτυξη της οποίας επιταχύνθηκε το 2003, όταν αναβαθμίστηκε και αυξήθηκε η χρήση των λέιζερ για τη συγκόλληση των υποτμημάτων ορισμένων μικρών σκαφών υποστήριξης ναυτικού.

Επιπλέον, το ναυπηγείο OSS έχει ασχοληθεί με την ανάπτυξη project που αφορά στην καταλληλότητα της χρήσης ευέλικτων οπτικών ινών- Nd: YAG ακτίνες λέιζερ προκειμένου να εφαρμοσθεί ρομποτική συγκόλληση για τα πιο πολύπλοκα μέρη των πλοίων.

Το ναυπηγείο έχει σταματήσει τη λειτουργία του, ανακοινώνοντας το κλείσιμο το 2009 και παραδίδοντας το τελευταίο πλοίο τον Ιανουάριο του 2012.

Χρήση του Laser σε άλλα ναυπηγεία [77-83]

Το Ναυπηγείο Fincantieri ξεκίνησε να ερευνά τις συγκολλήσεις λέιζερ στις εγκαταστάσεις του στο Monfalcone της Ιταλίας, όπου πραγματοποιούνται κατασκευές μεγάλων κρουαζιερόπλοιων.

Εκεί, εγκατέστησε οξυγονοκολλητή εξοπλισμένο με 17 kW CO₂ λέιζερ ως μέρος της παραδοσιακής γραμμής της παραγωγής. Αρχικά, είχε σκοπό να πραγματοποιεί αυτογενείς laser συγκολλήσεις κατά συμβολή, σε ελάσματα που είχαν διαμορφωθεί καταλλήλως. Εξαιτίας όμως της ποικιλομορφίας των προς συγκόλληση τεμαχίων, και της επερχόμενης δυσκολίας της συνένωσης, υιοθετήθηκε η χρήση προστιθέμενου μετάλλου στη μέθοδο του laser. Επίσης εξετάστηκε η εισαγωγή της μεθόδου Hybrid Laser-GMA, και σήμερα πραγματοποιούνται τέτοιου είδους συγκολλήσεις, τόσο για ερευνητικούς, όσο και για πρακτικούς σκοπούς.

Πολλά είναι τα υπόλοιπα ναυπηγεία που έχουν εξετάσει τη συγκόλληση laser και την μέθοδο Hybrid Laser-GMA, και τις έχουν εντάξει στην παραγωγική τους διαδικασία. Για παράδειγμα, το ναυπηγείο Aker Kvaerner Masa στο Ελσίνκι της Φινλανδίας, χρησιμοποιεί κατάλληλες διατάξεις για Hybrid Laser συγκολλήσεις. Ομοίως, το ναυπηγείο Aker Warnow Werft κοντά στο Rostock της Γερμανίας, έχει προχωρήσει στην τοποθέτηση δύο 4.4kW diode-pumped Nd:YAG lasers στην ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση συναρμολόγησής του. Υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τις ευέλικτες ίνες του laser στερεάς κατάστασης, λόγω της ευκολότερης καθοδήγησης της δέσμης και ως εκ τούτου τη νέα δυνατότητα που προκύπτει για τρισδιάστατη επεξεργασία των τεμαχίων. Άλλα ναυπηγεία, που ασχολούνται με το laser στερεάς κατάστασης (ευέλικτες ίνες ή Nd: YAG) είναι το Meyer Werft, και το Navantia στο Cádiz, της Ισπανίας.

B.4. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Από όλα τα παραπάνω, είναι σαφής η ανάπτυξη που έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια των ετών στις laser και υβριδικές laser -τόξου συγκολλήσεις στη ναυπηγική βιομηχανία. Τα οφέλη είναι κατά κύριο λόγο στον τομέα των βελτιωμένων ποσοστών ολοκλήρωσης και τη μείωση της θερμικής παραμόρφωσης, ιδιαίτερα σε λεπτότερα φύλλα. Η έγκαιρη συμμετοχή των ρυθμιστικών φορέων και των νηογνώμωνων σε αυτή την εξέλιξη συνέβαλε στο να διευκολυνθεί η πορεία της εισαγωγής.

Για την επιτυχή εισαγωγή, τα χαρακτηριστικά της πρόσδοσης θερμότητας κατά την διεργασία της χαμηλής κλειδαρότρυπας θέτει ορισμένες προϋποθέσεις. Επιπλέον, οι γρήγορες ταχύτητες ψύξεως που συμβαίνουν στη ζώνη συγκόλλησης και το στενό προφίλ της συγκόλλησης θέτει ορισμένους περιορισμούς σχετικά με την επιτρεπόμενη χημική σύνθεση των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Παρόλα αυτά, η επιτυχής εισαγωγή έχει πραγματοποιηθεί από ορισμένα ναυπηγεία στην Ευρώπη. Προκειμένου να διευκολυνθεί η περαιτέρω εισαγωγή, οι Νηογνώμονες έχουν εκδώσει κανόνες/οδηγίες που επιτρέπουν την έγκριση και την επιτυχή εισαγωγή της συγκόλλησης με λέιζερ σε ναυπηγήσεις εμπορικών πλοίων.

Κεφάλαιο 3

Διάβρωση και Ηλεκτροχημεία

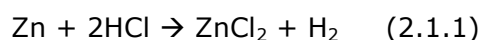
3.1. Ορισμός - Γενικά χαρακτηριστικά του φαινομένου. [87], [88], [89]

Η διάβρωση ορίζεται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αλλά η συνήθης ερμηνεία του όρου είναι: "αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του (ISO 8044 ,1986)." Η έννοια της διάβρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο ευρύ πεδίο, όπου συμπεριλαμβάνεται και η επίθεση σε μη μεταλλικά υλικά, αλλά τέτοιου είδους περιπτώσεις διάβρωσης είναι εκτός της οπτικής γωνίας της παρούσας διπλωματικής.

Διάβρωση εν γένει θεωρείται η καταστρεπτική επίθεση που υφίσταται ένα μέταλλο από το περιβάλλον του με ηλεκτροχημική ή χημική αντίδραση. Η υποβάθμιση του υλικού από φυσικά αίτια δεν ονομάζεται διάβρωση αλλά εκτριβή, φθορά. Σε μερικές περιπτώσεις η χημική επίθεση συνοδεύεται και από φυσική υποβάθμιση. Παραδείγματα αυτής είναι η διάβρωση λόγω απόξεσης και λόγω εκτριβής. Η διάβρωση των μετάλλων και των κραμάτων είναι εντονότερη και ταχύτερη και έχει ως συνέπεια μεγαλύτερες οικονομικές επιπτώσεις από ότι η διάβρωση άλλων υλικών (όπως π.χ. ξύλο, πέτρα, μάρμαρα, πλαστικά κλπ). Το γεγονός αυτό οφείλεται στις διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες που κατέχουν τα μέταλλα και τα κράματα αυτών, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερη τάση για υποβάθμιση, δηλαδή διάβρωση. Ο έλεγχος της διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με την αναγνώριση και την κατανόηση των μηχανισμών του φαινομένου, με τη χρήση και το σχεδιασμό υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση, και με τη χρήση και εφαρμογή συστημάτων και μεθόδων προστασίας.

3.2. Ηλεκτροχημεία της διάβρωσης [87]

Η φύση της διάβρωσης είναι κατ' εξοχήν ηλεκτροχημική, δηλαδή εμπεριέχει μεταφορά ηλεκτρονίων. Για να περιγράψουμε την ηλεκτροχημική διεργασία της διάβρωσης, θα θεωρήσουμε ψευδάργυρο (Zn) σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέως (HCl). Όταν το μέταλλο τοποθετηθεί στο διάλυμα αυτό, λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



Η εξίσωση αυτή ανάγεται σε δύο απλούστερες: μία οξειδωση και μία αναγωγή.

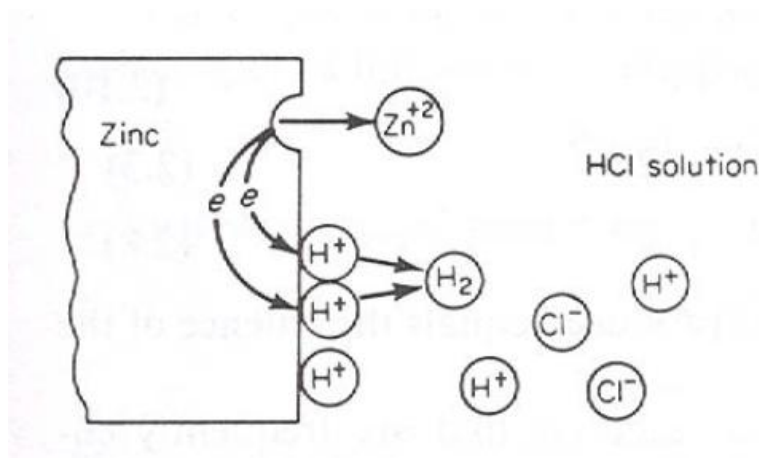
- Οξειδωση (Ανοδική αντίδραση) $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$ (2.1.2)
- Αναγωγή (Καθοδική αντίδραση) $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ (2.1.3)

Ο ψευδάργυρος στο διάλυμα HCl οξειδώνεται προς ιόντα ψευδαργύρου Zn^{2+} και τα ιόντα υδρογόνου ανάγονται προς αέριο υδρογόνο.

Η **οξειδωση** ή ανοδική αντίδραση χαρακτηρίζεται από αύξηση στο φορτίο (παραγωγή ηλεκτρονίων). Μείωση του φορτίου (κατανάλωση ηλεκτρονίων) υποδεικνύει **αναγωγή** ή καθοδική αντίδραση. Στις εξισώσεις (2.1.2) και (2.1.3) παρουσιάζονται οι επιμέρους αντιδράσεις, οι οποίες συμβαίνουν ταυτόχρονα και με τον ίδιο ρυθμό στην επιφάνεια του μετάλλου. Αν δεν συνέβαινε αυτό, το μέταλλο θα αποκτούσε αμέσως ηλεκτρικό φορτίο. Η

παρατήρηση αυτή αποτελεί μία από τις βασικότερες αρχές της διάβρωσης: κατά τη διάβρωση των μετάλλων, ο ρυθμός της οξειδωσης ισούται με το ρυθμό της αναγωγής (με όρους παραγωγής και δαπάνης ηλεκτρονίων).

Η ανωτέρω αρχή παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 3.1. Ένα άτομο ψευδαργύρου μετατρέπεται σε ιόν ψευδαργύρου και ελευθερώνονται δύο ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά που παραμένουν στην επιφάνεια του μετάλλου, καταναλώνονται αμέσως από την αναγωγή των ιόντων του υδρογόνου. Στο σχήμα αυτό οι δύο διεργασίες παρουσιάζονται ξεχωριστά για λόγους ευκρίνειας. Ανεξάρτητα από το αν οι δύο διεργασίες είναι διαχωρισμένες ή συμβαίνουν στο ίδιο σημείο της επιφάνειας, η αρχή διατήρησης του φορτίου δεν επηρεάζεται. Σε κάποιες περιπτώσεις διάβρωσης, η αντίδραση της οξειδωσης συμβαίνει ομοιόμορφα στην επιφάνεια, ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι εντοπισμένη και συμβαίνει σε συγκεκριμένες περιοχές.

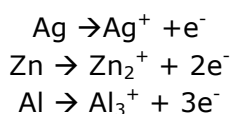


Σχήμα 3.1: Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις κατά τη διάβρωση ψευδαργύρου σε απασερωμένο διάλυμα HCl

Η **ανοδική αντίδραση** σε κάθε περίπτωση διάβρωσης είναι η οξειδωση του μετάλλου προς τα ιόντα του :



Π.χ.



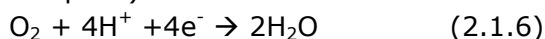
Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται ισούται με το φορτίο του ιόντος.

Υπάρχουν ωστόσο, πολλές διαφορετικές καθοδικές αντιδράσεις που συμμετέχουν στη διάβρωση των μετάλλων. Οι συνηθέστερες είναι :

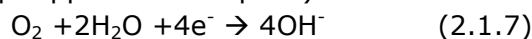
Έκλυση υδρογόνου



Αναγωγή οξυγόνου (όξινα διαλύματα)



Αναγωγή οξυγόνου (ουδέτερα ή βασικά διαλύματα)



Αναγωγή ιόντων μετάλλου



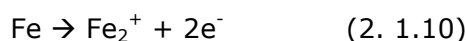
Απόθεση μετάλλου



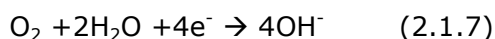
Η έκλυση υδρογόνου αποτελεί κοινή καθοδική αντίδραση αφού οξέα και όξινα μέσα συναντώνται συχνά. Επίσης η αναγωγή του οξυγόνου είναι συνήθης αφού κάθε υδατικό διάλυμα σε επαφή με τον αέρα μπορεί να παράξει αυτήν την αντίδραση. Οι αντιδράσεις της αναγωγής του μετάλλου καθώς και της απόθεσης δε συμβαίνουν πολύ συχνά, αλλά αποτελούν μέρος χημικών διεργασιών. Όλες οι ανωτέρω αντιδράσεις πραγματοποιούνται με δαπάνη ηλεκτρονίων.

Με βάση τις ανωτέρω επιμέρους αντιδράσεις ερμηνεύονται ουσιαστικά όλα τα θέματα της διάβρωσης.

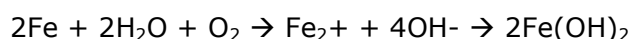
Στην περίπτωση σιδήρου εμβαπτισμένου σε νερό ή θαλασσινό νερό που εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και διαβρώνεται, η ανοδική αντίδραση είναι :



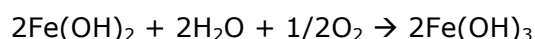
Αφού το υδατικό μέσο εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Το νερό και το θαλασσινό νερό είναι σχεδόν ουδέτερα διαλύματα και γι' αυτό η καθοδική αντίδραση είναι η ακόλουθη :



Έχοντας υπόψη ότι τα ιόντα του νατρίου και του χλωρίου δε συμμετέχουν στην αντίδραση, η συνολική αντίδραση από τις (2.1.7) και (2.1.10) είναι :



Από το διάλυμα κατακρημνίζεται υδροξείδιο του σιδήρου $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



Ωστόσο, η ένωση αυτή δεν είναι σταθερή σε διαλύματα που περιέχουν οξυγόνο και έτσι οξειδώνεται σε σιδηρούχο άλας, που αποτελεί και το τελικό προϊόν (κοινή σκουριά).

Κατά τη διάβρωση μπορεί να συμβούν περισσότερες από μία αντιδράσεις αναγωγής ή/και οξείδωσης. Όταν διαβρώνεται ένα κράμα, στοιχεία του μετάλλου περνούν στο διάλυμα με τη μορφή των αντίστοιχων ιόντων. Επίσης, περισσότερες από μία καθοδικές αντιδράσεις μπορεί να συμβούν κατά τη διάβρωση (όξινο διάλυμα που περιέχει O_2 , εξισώσεις (2.1.4) και (2.1.6)), με αποτέλεσμα μεγαλύτερη δαπάνη ηλεκτρονίων και συνεπώς αύξηση του ρυθμού διάλυσης του μετάλλου. Συνεπώς, όξινα διαλύματα που περιέχουν διαλυμένο οξυγόνο είναι περισσότερο διαβρωτικά από εκείνα που δεν περιέχουν.

Επειδή οι αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής στη διάβρωση είναι αλληλοεξαρτώμενες, μείωση του ρυθμού διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με μείωση του ρυθμού πραγματοποίησης κάθε αντίδρασης. Αν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από βαφή ή άλλο μη αγώγιμο υλικό οι ρυθμοί οξειδωσης και αναγωγής μειώνονται δραστικά και η διάβρωση επιβραδύνεται. Οι αναστολείς διάβρωσης είναι ουσίες οι οποίες όταν προστίθενται σε διαβρωτικό μέσο μειώνουν τη διαβρωτικότητα του. Οι αναστολείς διάβρωσης δρουν παρεμβαίνοντας στην καθοδική αντίδραση, στην ανοδική ή και στις δύο. Πολλές από αυτές τις ουσίες είναι οργανικές. Δημιουργούν αδιαπέραστη μεμβράνη στην επιφάνεια του μετάλλου ή παρεμβαίνουν στην αντίδραση οξειδωσης ή αναγωγής. Αμίνες υψηλού μοριακού βάρους επιβραδύνουν την έκλυση υδρογόνου μειώνοντας έτσι το ρυθμό διάβρωσης. Είναι προφανές ότι η καλή αγωγιμότητα θα πρέπει να διατηρείται στο μέταλλο και στον ηλεκτρολύτη κατά τη διάβρωση. Βέβαια δεν είναι πρακτικό να αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου, αφού οι ανοδικές και οι καθοδικές περιοχές δεν είναι γνωστές και δεν μπορούν να προβλεφθούν. Ωστόσο, αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη συνεπάγεται μείωση της διάβρωσης. Το καθαρό νερό είναι πολύ λιγότερο διαβρωτικό από το ακάθαρμο ή το φυσικό νερό. Η χαμηλή διαβρωτικότητα του νερού υψηλής καθαρότητας οφείλεται στην υψηλή ηλεκτρική του αντίσταση.

3.3. Θερμοδυναμική της διάβρωσης

Όλα τα μέταλλα (και αυτά που προορίζονται για ναυπηγική χρήση) με εξαίρεση το χρυσό, τον υδράργυρο και το λευκόχρυσο δε βρίσκονται στη φύση σε καθαρή μορφή αλλά σε οξειδωμένη (μεταλλεύματα). Έτσι, τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα με κατάλληλες φυσικοχημικές κατεργασίες στις οποίες απαιτείται ενέργεια .

Ένα μέρος της ενέργειας αυτής με τη μορφή εντροπίας (ΔS) και ελεύθερης ενέργειας (ΔG) παραμένει στα μεταλλικά υλικά. Η αύξηση της ελεύθερης ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τα μέταλλα να αποκτούν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από αυτή του αρχικού μεταλλεύματος. Κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί με μία σειρά διεργασιών είναι συνήθως υλικό αναβαθμισμένο ενεργειακά σε σχέση με τις πρώτες ύλες του. Επομένως, σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, έχει την προδιάθεση να ελαττώσει την ελεύθερη ενέργεια (G) ή την ελεύθερη ενθαλπία (H) και να αυξήσει την εντροπία του (S). Έχει την τάση να υποβαθμιστεί ενεργειακά, γεγονός που στη περίπτωση των μετάλλων και των κραμάτων ισοδυναμεί με τάση προς οξειδωση (επιστροφή στην αρχική τους κατάσταση) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Αυτή είναι η αιτία διάβρωσης των μεταλλικών υλικών.

Μια ηλεκτροχημική δράση, η οποία εξελίσσεται από μία κατάσταση A προς μία κατάσταση B, είναι θερμοδυναμικά δυνατή μόνο όταν η μετάβαση από την κατάσταση A στην κατάσταση B συνοδεύεται από μείωση της ελεύθερης ενέργειας ΔG του συστήματος. Στην περίπτωση των ηλεκτροχημικών δράσεων ισχύει :

$$\Delta G = -n \cdot F E$$

όπου,

n: ο αριθμός των ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται κατά την αντίδραση,

F: η σταθερά του Faraday ($96490 \text{ Cb} \cdot \text{mol}^{-1}$)

E: το δυναμικό ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων A και B.

Η μετάβαση από το A στο B δεν είναι δυνατή παρά μόνο όταν η διαφορά των δυναμικών ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων B και A είναι αρνητική ($\Delta E < 0$), δηλαδή όταν $E_A > E_B$. Η

παραπάνω συνθήκη αν και αναγκαία δεν είναι ικανή για την πραγματοποίηση της δράσης $A \rightarrow B$. Πρέπει, επιπλέον η ταχύτητα της δράσης να μην είναι αμελητέα.

Στον Πίνακα 3.1, δίνεται η μεταβολή της πρότυπης ελεύθερης ενέργειας ΔG^0 κατά Gibbs κατά το σχηματισμό τεσσάρων χαρακτηριστικών οξειδίων μετάλλων σε θερμοκρασία 25°C (298°K).

Πίνακας 3.1: Μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας ΔG^0 κατά Gibbs

Οξειδοαναγωγική Δράση	Οξείδιο	ΔG^0 σε kJ/mol
$2\text{Cu} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow$	Cu_2O	-146.0
$\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow$	FeO	-245.1
$2\text{Cr} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow$	Cr_2O_3	-1058.1
$2\text{Al} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow$	Al_2O_3	-1582.4

Από τον πίνακα 3.1 φαίνεται ότι το αλουμίνιο Al έχει τη μεγαλύτερη τάση μεταξύ των τεσσάρων μετάλλων να μετατραπεί σε οξείδιο. Στην πράξη όμως το αλουμίνιο ενώνεται αμέσως με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας δημιουργώντας λεπτή στοιβάδα οξειδίου που είναι πολύ συνεκτική με το μέταλλο, με αποτέλεσμα να το προστατεύει από την περαιτέρω οξείδωση (παθητικοποίηση). Το φαινόμενο αυτό βρίσκει εφαρμογή ως μέθοδος προστασίας του Al (ανοδίωση).

Από τον πίνακα 3.1 φαίνεται επίσης ότι ο χαλκός έχει τη μικρότερη τάση σχηματισμού οξειδίου, που σημαίνει ότι δε διαβρώνεται εύκολα παρουσία οξυγόνου.

Από τα προηγούμενα οδηγούμαστε στα συμπεράσματα:

- ✓ από τα θερμοδυναμικά δεδομένα μιας αντίδρασης, δε μπορεί να προβλεφθεί η εξέλιξη και η ταχύτητα της διάβρωσης στην πράξη.
- ✓ ο ρόλος του διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι καθοριστικός.

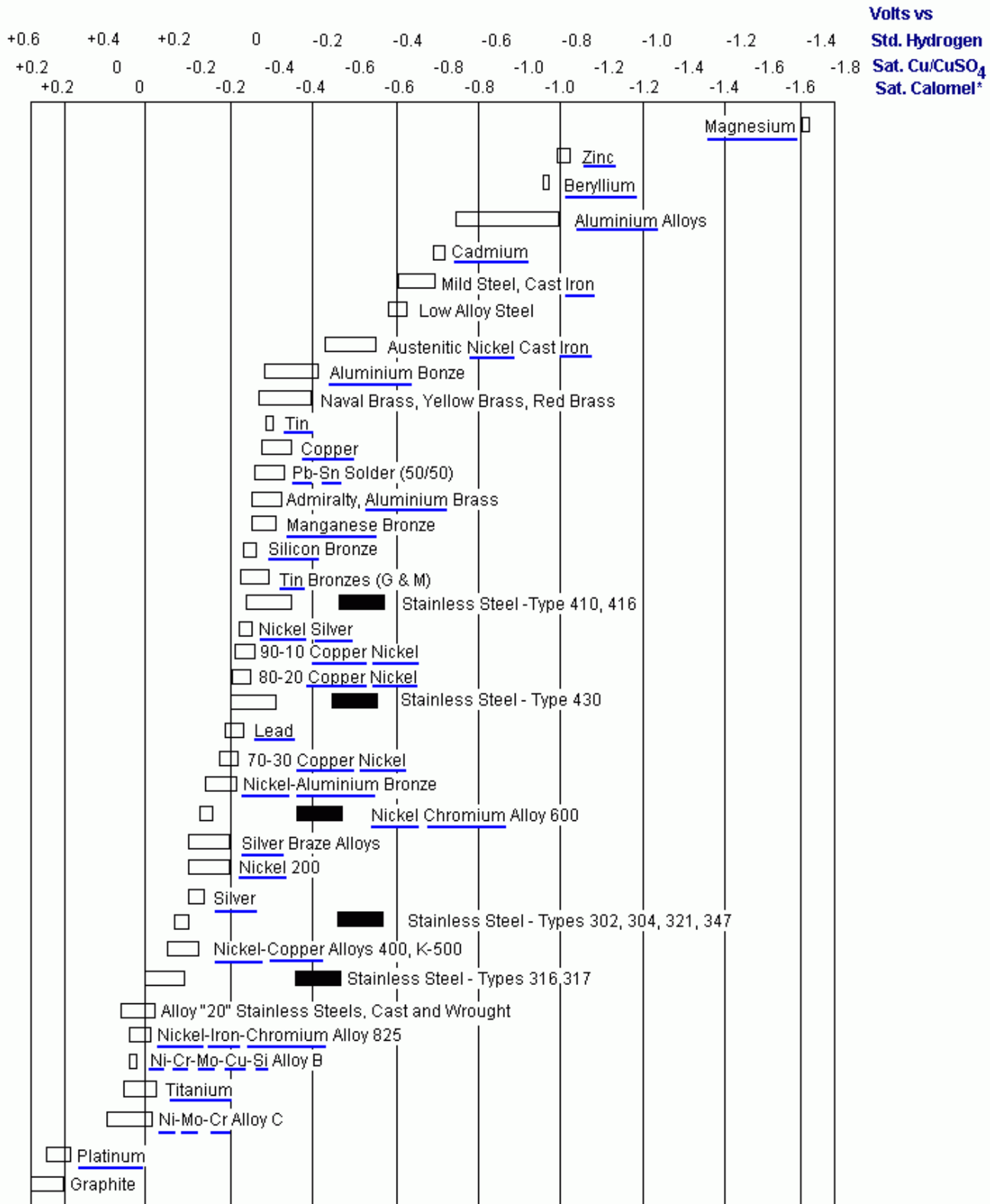
Σχετικό μέτρο τάσης για την διάβρωση ενός μετάλλου είναι το δυναμικό του ηλεκτροδίου του μετάλλου (μέταλλο διαλύματος των ιόντων του) ως προς ένα πρότυπο ηλεκτρόδιο αναφοράς (π.χ. υδρογόνου, καλομέλινα, χαλκού/θειικού χαλκού, αργύρου/χλωριούχου αργύρου) σε αυστηρά καθορισμένες συνθήκες.

Η συστηματική κατάταξη των μετάλλων με ελαττούμενη προδιάθεση για οξείδωση είναι η γνωστή ηλεκτροχημική σειρά των στοιχείων. Όμως η κατάταξη αυτή έχει σχετική αξία στη μελέτη της διάβρωσης για δύο λόγους:

- αναφέρεται σε καθαρά μέταλλα και όχι σε κράματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη,
- το ηλεκτρολυτικό διάλυμα δεν αντιστοιχεί στο διαβρωτικό περιβάλλον στη πράξη.

Αυτό οδήγησε στη διαμόρφωση πρακτικών πινάκων ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς των μετάλλων και των κραμάτων τους. Ένας τέτοιος πίνακας είναι αυτός που ακολουθεί (Πίν. 3.2). Στον πίνακα αυτό φαίνονται οι τιμές δυναμικών διαφόρων μετάλλων ως προς τρία διαφορετικά ηλεκτρόδια αναφοράς (υδρογόνου, χαλκού/θειικού χαλκού και καλομέλινα) για ταχύτητες ροής θαλασσινού νερού από 2.4 έως 4 m/sec και σε θερμοκρασιακή διακύμανση από $10 - 27^\circ\text{C}$.

Πίνακας 3.2: Γαλβανική σειρά στοιχείων και κραμάτων σε θαλασσινό νερό



3.4 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης [88-92]

Οι μέθοδοι αυτές ανήκουν στην κατηγορία των επιταχυνόμενων εργαστηριακών δοκιμών. Κυρίως έχουν ως σκοπό τη μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων της διεπιφάνειας μετάλλου-διαλύματος και εφαρμόζονται για τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης. Οι μέθοδοι αυτοί είναι είτε απλές είτε πιο σύνθετες.

Ένα από τα βασικά μεγέθη που μετράται είναι το δυναμικό διάβρωσης, E_{corr} , και η μεταβολή του συναρτήσει του χρόνου. Η μέθοδος αυτή μας δίνει πληροφορίες για τη σχετική προδιάθεση των μετάλλων προς διάβρωση, καθώς και για τη διαμόρφωση και εν συνεχεία τη ρήξη του παθητικού στρώματος. Η πλειοψηφία των ηλεκτροχημικών μεθόδων στηρίζεται στη μετατόπιση ενός ηλεκτροδιακού συστήματος από την ισορροπία του και την καταγραφή της απόκρισής του. Αυτό κυρίως επιτυγχάνεται με την πόλωση του δοκιμίου, δηλαδή την επιβολή ενός δυναμικού μεταξύ των άκρων του δοκιμίου (ηλεκτρόδιο εργασίας) και του βοηθητικού ηλεκτροδίου, με σκοπό με τη δημιουργία ανόδου ή/και καθόδου, ανάλογα με το προς μελέτη φαινόμενο κάθε φορά. Έτσι, λαμβάνονται καμπύλες πόλωσης ή μέσω ποτενσιοδυναμικών (επιβολή ενός συνεχώς μεταβαλλόμενου δυναμικού και μέτρηση της πυκνότητας ρεύματος) ή μέσω εντασιοδυναμικών (επιβολή μιας συνεχώς μεταβαλλόμενης πυκνότητας ρεύματος και μέτρηση του δυναμικού) ή μέσω χρονοδυναμοστατικών και χρονοεντασιοστατικών (επιβάλλεται δυναμικό ή πυκνότητα ρεύματος και λαμβάνονται οι καμπύλες σε συνάρτηση με το χρόνο) μεθόδων.

Οι κυριότερες ηλεκτροχημικές μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

Μεταβατικές καμπύλες πόλωσης:

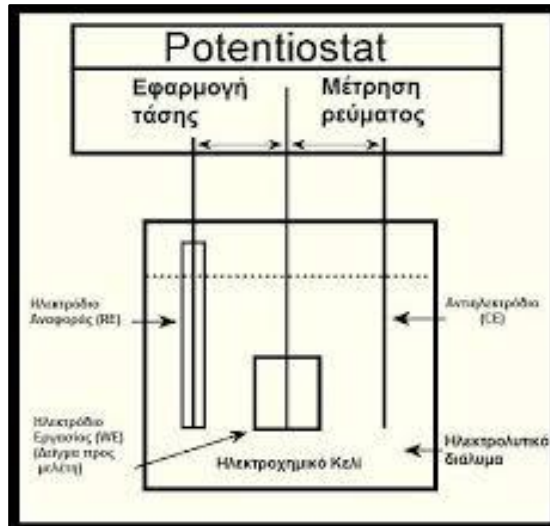
- Ποτενσιοδυναμικών καμπυλών πόλωσης :
 - ✓ Γραμμικής πόλωσης
 - ✓ Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)
 - ✓ Προεκβολής των ευθειών Tafel
- Σύνθετης (μιγαδικής) αντίστασης
- Κυκλικής ποτενσιοδυναμικής πόλωση

Καμπύλες πόλωσης μόνιμης κατάστασης:

- Γαλβανοστατικές δοκιμές
- Ποτενσιοστατικές δοκιμές

Η μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο των καμπυλών πόλωσης, βασίζεται στη **θεωρία του μικτού δυναμικού**. Η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο αυτή σε κάθε περίπτωση, αποτελείται από ένα κελί που περιέχει το διαβρωτικό διάλυμα και στο οποίο τοποθετείται το ηλεκτρόδιο του εξεταζόμενου μετάλλου (working electrode) και ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο (auxiliary ή counter electrode, συνήθως από λευκόχρυσο). Χρησιμοποιείται επίσης και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode, π.χ. καλομέλινα) το οποίο για λόγους ακρίβειας της μέτρησης μπορεί να τοποθετηθεί σε ξεχωριστό δοχείο με ειδικό διάλυμα και η επαφή του με το διαβρωτικό διάλυμα του κελιού γίνεται με ηλεκτρολυτικό σύνδεσμο (γέφυρα).

Μέρος της διάταξης αποτελεί και ένας ποτενσιοστάτης (Σχ. 3.2).



Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για τον καθορισμό των καμπυλών πόλωσης μετάλλου με τη χρήση ποτενσιοστάτη.

Σύμφωνα με τη **θεωρία του μικτού δυναμικού**, κάθε ηλεκτροχημική αντίδραση μπορεί να χωριστεί σε δύο ή περισσότερες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, κατά τη διάρκεια των οποίων δεν έχουμε συγκέντρωση ηλεκτρικού φορτίου (η ηλεκτροχημική αντίδραση λαμβάνει χώρα απουσία οιασδήποτε εφαρμογής εξωτερικής τάσης). Σε ένα διαβρωνόμενο σύστημα, η οξείδωση του μετάλλου (διάβρωση) και η αναγωγή κάποιων στοιχείων στο διάλυμα λαμβάνει χώρα με τον ίδιο ρυθμό και έτσι το μετρούμενο ρεύμα στο δίκτυο είναι μηδέν.

$$i_{MEASUR} = i_{O,M} - i_{R,Z} = 0$$

Όταν ένα μέταλλο ή κράμα έρχεται σε επαφή με ένα διάλυμα, θεωρείται η ύπαρξη ενός δυναμικού, το οποίο εξαρτάται από το ίδιο το μέταλλο και τη φύση του διαλύματος. Αυτό το δυναμικό «ανοιχτού κυκλώματος» (δεν εφαρμόζεται εξωτερικά δυναμικό στο κελί) αναφέρεται ως το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} . Το E_{corr} μετράται μέσω ποτενσιοστάτη. Είναι σημαντικό για την κατανόηση των διαβρωτικών φαινομένων, να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι τα ρεύματα οξείδωσης και αναγωγής είναι ίσα και όχι μηδέν. Δυστυχώς, μόνο το συνολικό ρεύμα είναι μετρήσιμο και αυτό είναι μηδέν σύμφωνα με την ανωτέρω εξίσωση.

3.4.1 Μέθοδος Γραμμικής Πόλωσης ή Αντίστασης Πόλωσης (Linear Polarization ή Polarization Resistance)

Η ηλεκτροχημική τεχνική πολωτικής αντίστασης χρησιμοποιείται για να μετρήσει απόλυτους ρυθμούς διάβρωσης, εκφρασμένους σε milli-inches ανά έτος (mpy) ή σε mils ανά έτος (mpy), όπου $1\text{ mpy} = 0.0254\text{ mpy}$. Οι μονάδες αυτές αντιστοιχούν στο πάχος δοκιμίου που διαβρώνεται σε διάστημα ενός έτους. Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης μπορούν να γίνουν πολύ γρήγορα, συνήθως σε λιγότερο από 10 λεπτά. Η αντίσταση πόλωσης (Polarization resistance, R_p) αναφέρεται επίσης και ως γραμμική πόλωση (Linear Polarization).

Οι μετρήσεις αντίστασης πόλωσης εφαρμόζονται σαρώνοντας ένα εύρος δυναμικού το οποίο είναι κοντά στο δυναμικό διάβρωσης E_{corr} . Το εύρος αυτού του δυναμικού είναι $\pm 25\text{ mV}$ γύρω από το E_{corr} . Το ρεύμα που προκύπτει σχεδιάζεται ως προς το δυναμικό.

Το ρεύμα διάβρωσης, i_{corr} , σχετίζεται με την παράγωγο του γραφήματος (Σχήμα 3.3) σύμφωνα με τη σχέση:

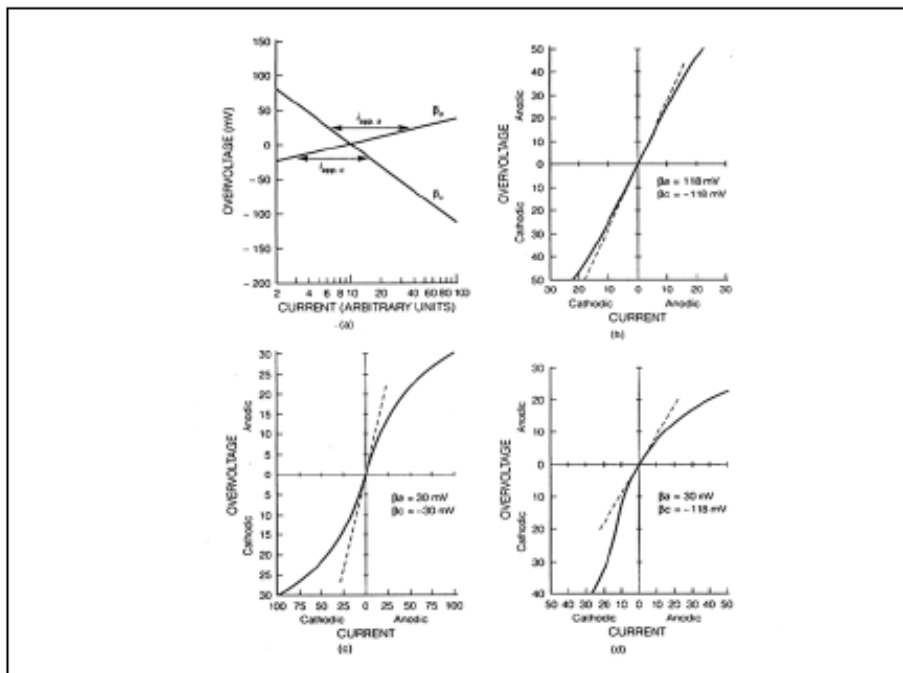
$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot i_{corr}} \quad (2.2.1)$$

Όπου:

$\frac{\Delta E}{\Delta I}$: εφαπτόμενη γραφήματος αντίστασης πόλωσης (μονάδες αντίστασης)

β_a, β_c : ανοδική και καθοδική σταθερά Tafel αντίστοιχα, οι οποίες καθορίζονται από το γράφημα Tafel (Volts /decade of current)

i_{corr} : ρεύμα διάβρωσης (μA)



Σχήμα 3.3: Υποθετικές ανοδικές και καθοδικές καμπύλες πόλωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση προσομοιωμένων πειραματικών καμπυλών πόλωσης σε γραμμικές συντεταγμένες με χρήση των σταθερών Tafel β_a, β_c .

Άρα,

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (2.2.2)$$

Το i_{corr} σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό διάβρωσης μέσω της ακόλουθης ισότητας:

$$\text{Corrosion Rate} = \frac{(E.W.) \cdot 0.13 \cdot i_{corr}}{d} \quad (2.2.3)$$

όπου :

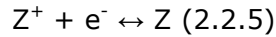
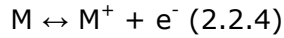
E.W. : ισοδύναμο βάρος του μετάλλου που εξετάζεται (gr)

d: πυκνότητα του μετάλλου (gr/cm^3)

i_{corr} : πυκνότητα ρεύματος ($\mu A/cm^2$).

Θεωρία ηλεκτροχημικής διάβρωσης της Γραμμικής Πόλωσης

Σύμφωνα με τους Stern και Geary σε ένα διαβρωνόμενο σύστημα, συνυπάρχουν δύο ηλεκτροχημικές αντιδράσεις :



όπου M είναι το διαβρωνόμενο μέταλλο και Z ένα στοιχείο του διαλύματος.

Δυναμικό ισορροπίας είναι το δυναμικό στο οποίο ο ρυθμός οξειδωσης του M είναι ίσος με τον ρυθμό αναγωγής του Z^+ . Το δυναμικό ισορροπίας των ζευγών στις εξισώσεις (1.15) και (1.16) ονομάζεται $E_{EQ,M}$ και $E_{EQ,Z}$, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι το ρεύμα του δικτύου είναι η διαφορά μεταξύ του ρεύματος οξειδωσης και αναγωγής, το μετρούμενο ρεύμα με μια εξωτερική συσκευή θα είναι μηδέν.

για $E = E_{corr}$ είναι

$$i_{MEASUR} = i_{O,M} - i_{R,Z} = 0 \quad (2.2.6)$$

και

$$i_{MEASUR} = i_{O,M} = i_{R,Z} \quad (2.2.7)$$

όπου :

$i_{O,M}$: ρεύμα οξειδωσης

$i_{R,Z}$: ρεύμα αναγωγής

Για να υπολογισθεί ο ρυθμός διάβρωσης, πρέπει να υπολογισθεί το ρεύμα της διάβρωσης i_{corr} . Όταν σε ένα μεταλλικό δοκίμιο εφαρμόζεται δυναμικό από μια εξωτερική πηγή, όπως από έναν ποτενσιοστάτη, θα περάσει ρεύμα σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση :

$$i_{MEASUR} = i_{O,M} - i_{R,Z} = 0 \quad (2.2.6)$$

Τα ανοδικά και τα καθοδικά ρεύματα ακολουθούν τις εξισώσεις Tafel :

$$n = \beta_a \cdot \log \frac{i_{O,M}}{i_{corr}} \quad (2.2.9)$$

$$n = -\beta_c \cdot \log \frac{i_{R,Z}}{i_{corr}} \quad (2.2.10)$$

όπου n είναι η διαφορά μεταξύ του εφαρμοζόμενου δυναμικού στο δοκίμιο και του δυναμικού διάβρωσης (υπέρταση).

Οι (2.2.9), (2.2.10) μπορούν να γίνουν:

$$\log \frac{i_{O,M}}{i_{corr}} = \frac{n}{\beta_a} \quad (2.2.11)$$

$$\log \frac{i_{R,Z}}{i_{corr}} = -\frac{n}{\beta_c} \quad (2.2.12)$$

Γνωρίζουμε ότι $\log x = y \Leftrightarrow 10^y = x$. Άρα, οι (2.2.11) και (2.2.12) γίνονται:

$$10^{\frac{n}{\beta_a}} = \frac{i_{o,M}}{i_{corr}} \quad (2.2.13)$$

$$10^{-\frac{n}{\beta_c}} = \frac{i_{R,Z}}{i_{corr}} \quad (2.2.14)$$

Αντικατάσταση των (2.2.13), (2.2.14) στην (2.2.6) δίνει :

$$i_{MEASURE} = i_{corr} \cdot (10^{\frac{n}{\beta_a}} - 10^{-\frac{n}{\beta_c}}) \quad (2.2.15)$$

Το 10^x μπορεί να προσεγγιστεί από τις ακόλουθες δυναμοσειρές:

$$10^x = 1 + 2.3 \cdot x + \frac{(2.3 \cdot x)^2}{2!} + \dots + \frac{(2.3 \cdot x)^n}{n!} \quad (2.2.15)$$

Αν το x είναι μικρό, ο τρίτος και οι υπόλοιποι όροι, της σειράς μπορούν να αγνοηθούν χωρίς σημαντικό σφάλμα. Αντικαθιστώντας το x με n/β_a και με $-n/\beta_c$ έχουμε:

$$10^{\frac{n}{\beta_a}} = 1 + 2.3 \cdot \frac{n}{\beta_a} \quad (2.2.16)$$

$$10^{-\frac{n}{\beta_c}} = 1 - 2.3 \cdot \frac{n}{\beta_c} \quad (2.2.17)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.2.16) και (2.2.17) στην :

$$i_{MEASURE} = i_{corr} \cdot (10^{\frac{n}{\beta_a}} - 10^{-\frac{n}{\beta_c}}) \quad (2.2.15)$$

και μετά την απλοποίηση, έχουμε :

$$i_{MEASURE} = 2.3 \cdot i_{corr} \cdot n \cdot \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \quad (2.2.18)$$

Δηλαδή:

$$\frac{n}{i_{MEASURE}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot i_{corr}} \quad (2.2.19)$$

η οποία είναι όμοια με την εξίσωση (2.2.1) που έχουμε αναφέρει στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου:

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot i_{corr}} \quad (2.2.1)$$

Ολοκληρώνοντας με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης πρέπει να τονιστούν ορισμένα σημεία:

- η εξίσωση (2.2.19)

$$\frac{n}{i_{MEASUR}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot i_{corr}}$$

και η σχέση (2.2.1)

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot i_{corr}}$$

ισχύουν όταν ο λόγος η/β είναι μικρός. Αυτό σημαίνει ότι το η πρέπει να είναι μικρό συγκρινόμενο με το β . Μια τυπική τιμή του β είναι 100 mV/decade. Στην περίπτωση αυτή η υπέρταση δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 10 mV.

- πρόκειται για μία μέθοδο όπου η μέτρηση της ταχύτητας διάβρωσης γίνεται με γρήγορο και μη καταστρεπτικό τρόπο, το οποίο επιτρέπει στο δοκίμιο να χρησιμοποιηθεί και για άλλες μετρήσεις καθώς η επιφάνεια του δεν προλαβαίνει να αλλοιωθεί
- ο απαιτείται χαμηλή ταχύτητα σάρωσης δυναμικού, προκειμένου κάθε φορά να αποκαθίσταται σχεδόν «μόνιμη κατάσταση» (μόνιμη κατάσταση έχουμε όταν το σύστημα μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα και τα χαρακτηριστικά του παραμένουν ανεξάρτητα του χρόνου)
- για περισσότερο ακριβή αποτελέσματα οι σταθερές Tafel, β_a και β_c μπορούν να υπολογιστούν από ένα γράφημα Tafel. Για γρηγορότερες μετρήσεις, οι τιμές των σταθερών Tafel μπορούν να εκτιμηθούν και οι συνηθέστερες τιμές που λαμβάνονται είναι 0,1 V/decade
- εάν τα β_a και β_c υποτεθούν 0.1 V/decade ο υπολογιζόμενος ρυθμός διάβρωσης είναι σωστός.

3.4.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης [93] [94]




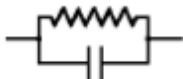
(Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS)

Η μέθοδος της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης (EIS) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μη καταστροφικές τεχνικές που εφαρμόζεται επιτυχώς για την μελέτη των δοκιμίων αυτών.

- Τι εκφράζει η εμπέδηση;

Τόσο η αντίσταση όσο και η εμπέδηση είναι όροι που εκφράζουν μία αντίσταση στη ροή των ηλεκτρονίων και του ρεύματος. Σε κυκλώματα με συνεχές ρεύμα, μόνο ο αντιστάτης προκαλεί αυτό το φαινόμενο. Σε κυκλώματα όμως που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα, τα πηνία και οι πυκνωτές είναι επίσης στοιχεία που εμποδίζουν τη ροή του ρεύματος. Η εμπέδηση λοιπόν μπορεί να εκφρασθεί από ένα μιγαδικό αριθμό, όπου το πραγματικό μέρος είναι η αντίσταση (R), ενώ το φανταστικό μέρος αποτελείται από το συνδυασμό του πηνίου (L) και του πυκνωτή (C).

Πίνακας 3.1: Εμπέδηση που δημιουργούν τα διάφορα στοιχεία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, εκφρασμένη σε μιγαδικούς αριθμούς

Circuit Element	Impedance Equation	
 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	$Z = R + 0j$	$j = \sqrt{-1}$
 ΠΥΚΝΩΤΗΣ	$Z = 0 - \frac{j}{\omega C}$	$\omega = 2\pi f$
 ΠΗΝΙΟ	$Z = 0 + j\omega L$	$\omega = 2\pi f$
 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩ ΜΕ ΠΥΚΝΩΤΗ)	$Z = \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} + \frac{j\omega R^2 C}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$	

Δηλαδή, η εμπέδηση είναι ένας αριθμός που εκφράζει τη συνολική αντίσταση του κυκλώματος στη ροή των ηλεκτρονίων, η οποία δημιουργείται λόγω των αντιστάσεων, των πυκνωτών και των πηνίων. Για την συνολική εμπέδηση ενός κυκλώματος που αποτελείται από τα παραπάνω απλά στοιχεία, αρκεί να ακολουθήσουμε τον παρακάτω κανόνα:

- Για στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά αρκεί να προσθέσουμε τα πραγματικά μέρη και τα φανταστικά σύμφωνα με τον τύπο:

$$Z'_{eq} + jZ''_{eq} = (Z'_1 + Z'_2 + \dots + Z'_N) + j(Z''_1 + Z''_2 + \dots + Z''_N)$$

- Για στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα, η αγωγιμότητα (αντιστρόφως ανάλογη της εμπέδησης, σχηματίζεται από την πρόσθεση:

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_N}$$

Τα πηνία και οι πυκνωτές επίσης επηρεάζουν τα χρονοεξαρτώμενα χαρακτηριστικά του εναλλασσόμενου ρεύματος και την φάση (όταν ο πυκνωτής δημιουργεί το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης, τότε το δυναμικό που εφαρμόζεται οδηγείται σε γωνία φάσης, ενώ όταν η αντίσταση λόγω του πηνίου είναι μεγαλύτερη, τότε το εφαρμοζόμενο δυναμικό οδηγείται σε χρονική υστέρηση).

Βασικές αρχές μέτρησης

Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, η ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{E}{I} \quad (2.3.1)$$

Η σχέση αυτή αναφέρεται για ένα ηλεκτρικό στοιχείο ενός κυκλώματος, τον ιδανικό αντιστάτη. Αυτός έχει τις εξής απλοποιημένες ιδιότητες:

- Οι τιμές της αντίστασης είναι ανεξάρτητες της συχνότητας
- Ακολουθεί τον νόμο του Ohm για οποιαδήποτε τιμή τάσης και ρεύματος
- Τα σήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος και τάσης είναι της ίδιας φάσης

Ωστόσο, επειδή στην πραγματικότητα τα στοιχεία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παρουσιάζουν πιο σύνθετη συμπεριφορά, χρησιμοποιείται μια πιο γενική παράμετρος, που καλείται εμπέδηση. Η εμπέδηση αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός ηλεκτρικού κυκλώματος να αντιστέκεται στη ροή του ρεύματος, χωρίς ωστόσο να περιορίζεται από τις ιδιότητες του ιδανικού αντιστάτη, όπως αυτές αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για την πραγματοποίηση της μεθόδου της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης εφαρμόζεται μία διαταραχή υπό τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης σε ένα ηλεκτροχημικό κελί και υπολογίζεται η απόκριση του ρεύματος σε αυτό.

Το εφαρμοζόμενο σήμα διέγερσης δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$E_t = E_o \sin(\omega t) \quad (2.3.2)$$

E_t : δυναμικό σε χρόνο t

E_o : πλάτος του σήματος

ω : γωνιακή ταχύτητα

Η γωνιακή συχνότητα δίνεται από τη σχέση

$$\omega = 2\pi f \quad (2.3.3)$$

f : η συχνότητα

Για ένα γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο σύστημα, η διέγερση θα οδηγήσει σε μία ημιτονοειδή απόκριση του ρεύματος:

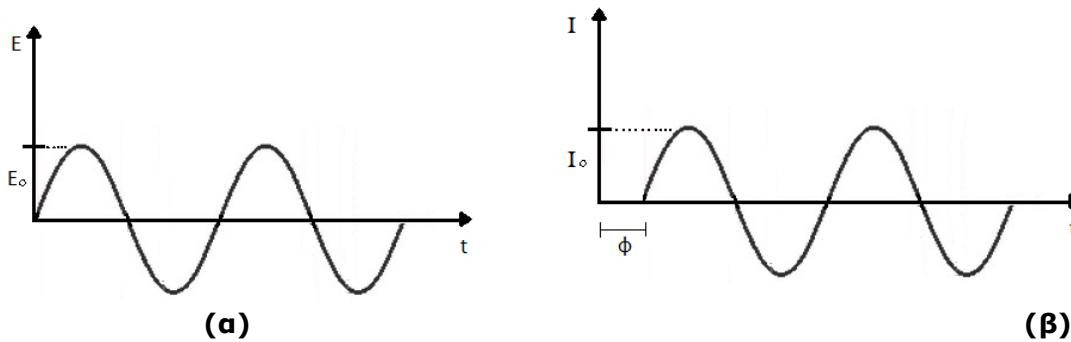
$$I_t = I_o \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.3.4)$$

I_t : ρεύμα σε χρόνο t

I_o : πλάτος του ρεύματος

ω : γωνιακή ταχύτητα

Η σχέση μεταξύ της τάσης E_t και του ρεύματος I_t απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.4: σχέση μεταξύ της τάσης E_t (α) και του ρεύματος I_t (β)

Το σήμα της διέγερσης που εφαρμόζεται είναι πολύ μικρό, συνήθως ίσο με $\pm 10\text{mV}$, προκειμένου η απόκριση του ηλεκτροχημικού κελιού να είναι ψευδογραμμική. Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτροχημικά συστήματα δεν είναι γραμμικά. Ωστόσο, ένα πολύ μικρό τμήμα της καμπύλης τάσης-ρεύματος ενός ηλεκτροχημικού συστήματος είναι γραμμικό.

Η εμπέδηση Z ορίζεται από τη σχέση:

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \varphi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \varphi)} \quad (2.3.5)$$

Όπου

Z : εμπέδηση του συστήματος

Z_0 : πλάτος της εμπέδησης

Τα μεγέθη που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς μπορούν να εκφραστούν ως μιγαδικοί αριθμοί. Επομένως, τα E_t και I_t μπορούν να παρασταθούν αντίστοιχα με τους μιγαδικούς αριθμούς E και I . Από τον λόγο της μιγαδικής τάσης προς το μιγαδικό ρεύμα προκύπτει η μιγαδική αντίσταση $Z(\omega)$.

Η εμπέδηση μπορεί να εκφραστεί ως μιγαδικός αριθμός σε καρτεσιανή μορφή με τα εξής μέρη:

1. Το πραγματικό Z' που αντιστοιχεί στην ωμική συνιστώσα της αντίστασης και
2. το φανταστικό μέρος Z'' που αντιστοιχεί στην επαγωγική ή στη χωρητική συνιστώσα της αντίστασης.

$$Z = Z' + j Z''$$

Επίσης, η εμπέδηση αναπαρίσταται ως μιγαδικός αριθμός σε εκθετική μορφή από τη σχέση:

$$Z = |Z|e^{j\varphi} \quad (2.3.6)$$

Όπου

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2}$$

Και

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z''}{Z'}\right)$$

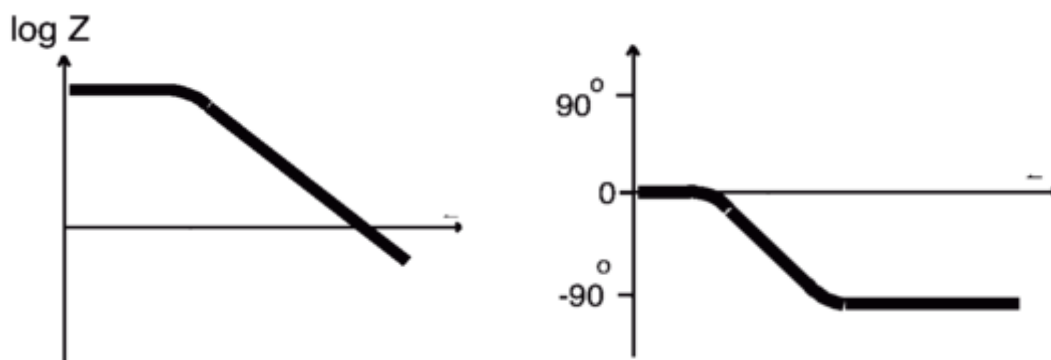
Τέλος, με χρήση της σχέσης του Euler:

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j\sin \varphi$$

Προκύπτει:

$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = |Z|e^{j\varphi} = |Z|(\cos \varphi + j\sin \varphi) \quad (2.3.7)$$

Διαγράμματα της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης



Σχήμα 3.5: Διαγράμματα της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης

Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της μεθόδου EIS

Μετά το πέρας αυτής της μεθόδου, έχουμε στοιχεία για τα μεγέθη:

- Το πραγματικό μέρος του δυναμικού (E')
- Το φανταστικό μέρος του δυναμικού (E'')
- Το πραγματικό μέρος του ρεύματος (I')
- Το φανταστικό μέρος του ρεύματος (I'')

Από τα παραπάνω αυτά στοιχεία μπορούμε να υπολογίσουμε την αλλαγή της φάσης (φ) καθώς και την συνολική εμπέδηση (Z) για κάθε μία συχνότητα. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου γίνεται με πολλούς τρόπους μέσω διαφόρων τύπων διαγραμμάτων.

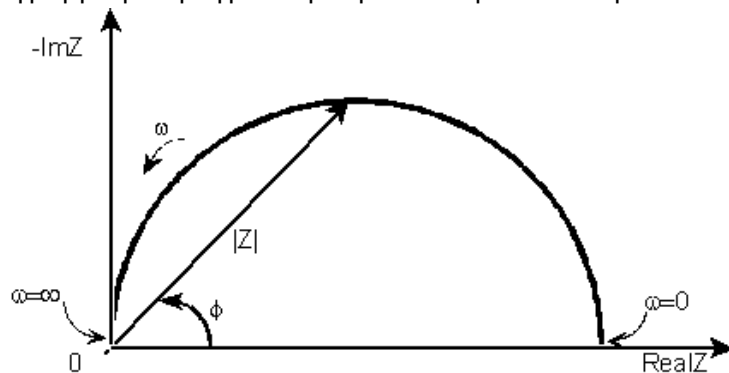
Θα αναλύσουμε δύο τρόπους αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου της φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Είναι τα διαγράμματα Nyquist και Bode.

- Διάγραμμα Nyquist

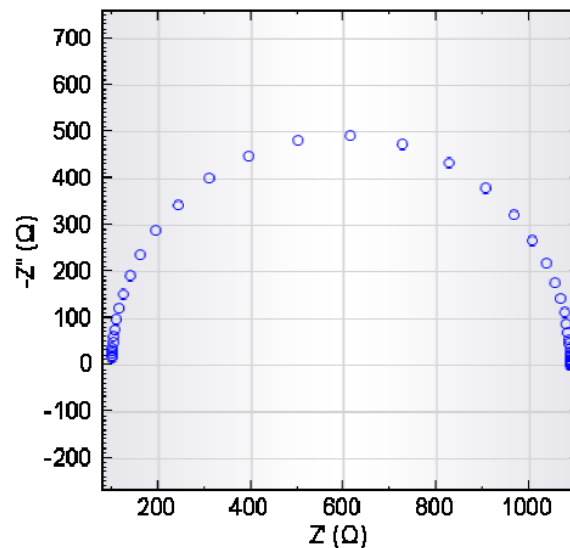
Στο διάγραμμα Nyquist, ο άξονας x αντιστοιχεί στο πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού της εμπέδησης, ενώ ο άξονας y αντιστοιχεί στο φανταστικό μέρος του. Η εμπέδηση μπορεί να αναπαρασταθεί με το διάνυσμα του μέτρου $|Z|$. Το διάγραμμα Nyquist δίνει μια γρήγορη επισκόπηση των δεδομένων προκειμένου να καταλήξει κανείς σε ποιοτικά συμπεράσματα. Βασικό του μειονέκτημα είναι ότι δεν δίνει πληροφορίες για τη συχνότητα.

Η γωνία του διανύσματος Z και του άξονα x αποτελεί τη γωνία φάσης φ , όπου $\varphi = \arg(Z)$. Προκειμένου να αποφευχθεί η στρέβλωση της καμπύλης, πρέπει ο φανταστικός και ο πραγματικός άξονας να σχεδιάζονται ίσοι.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται ένα διάγραμμα Nyquist με τη μορφή ημικυκλίου, ενώ στην Εικόνα 3.3 βλέπουμε ένα διάγραμμα με πραγματική παρουσίαση αποτελεσμάτων:



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα Nyquist με τη μορφή ημικυκλίου



Εικόνα 3.3: Τυπική μορφή ενός διαγράμματος Nyquist (παρουσίαση αποτελεσμάτων)

Όπως παρατηρείται κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί σε διαφορετική συχνότητα, χωρίς όμως να αναφέρεται για ποια συχνότητα έχει καταγραφεί το κάθε σημείο.

- Το διάγραμμα Bode

Απεικονίζει:

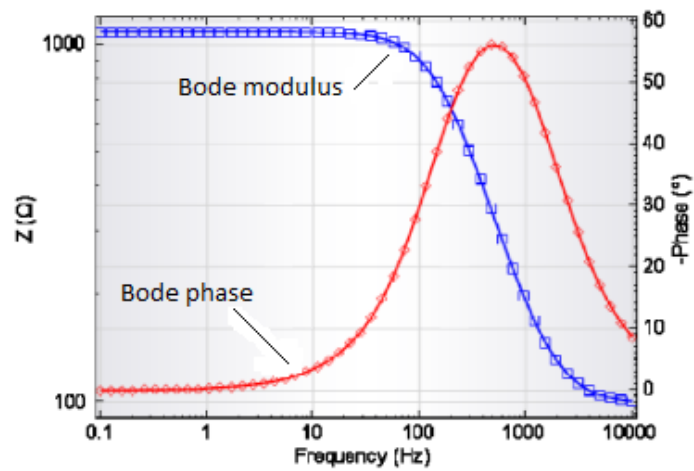
α) το μέτρο της σύνθετης αντίστασης $|Z|$, συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα, συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 3.5), και

β) τη γωνία φάσης συναρτήσει της συχνότητας (Εικόνα 3.6).

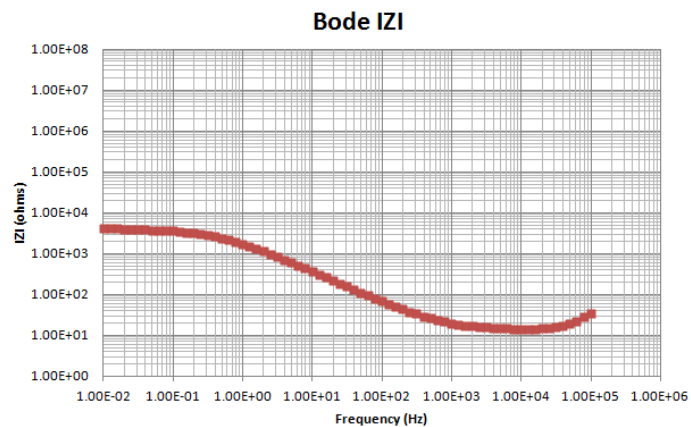
Σε αυτό το διάγραμμα η εμπέδηση αναπαρίσταται με τον x άξονα να εκφράζει τον λογάριθμο της συχνότητας, ενώ ο y άξονας την απόλυτη τιμή της εμπέδησης ($|Z| = Z_0$) καθώς και την αλλαγή της φάσης.

Σε αντίθεση με το διάγραμμα Nyquist, το Bode δίνει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη συχνότητα.

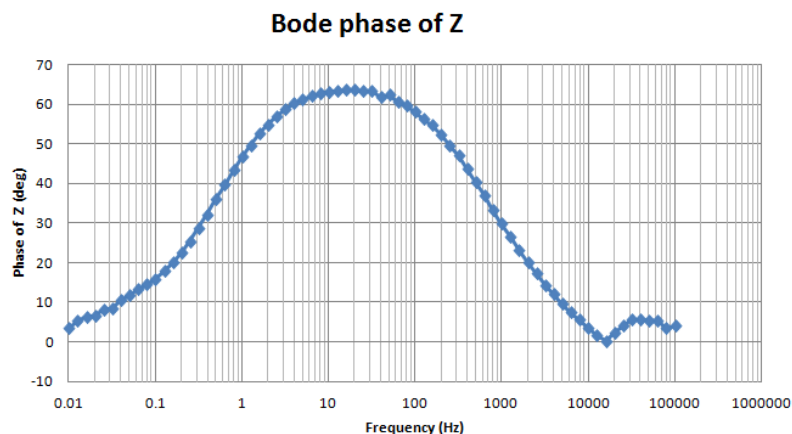
Στων Εικόνα 3.4 απεικονίζεται ένα διάγραμμα Bode, ενώ στην Εικόνα 3.5 βλέπουμε ένα διάγραμμα με πραγματική παρουσίαση αποτελεσμάτων:



Εικόνα 3.4: Τυπικό διάγραμμα Bode



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα Bode που απεικονίζει το μέτρο της σύνθετης αντίστασης $|Z|$, συναρτήσει της συχνότητας



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα Bode που απεικονίζει τη γωνία φάσης συναρτήσει της συχνότητας

Σύνθεση των αποτελεσμάτων

Όλες τις πληροφορίες που δίνει η μέτρηση, μπορούμε να τις συνθέσουμε σε ένα σύστημα τριών διαστάσεων, όπου ο άξονας x απεικονίζει το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού της εμπέδησης, ενώ ο y το φανταστικό μέρος. Ο άξονας z δίνει το λογάριθμο της συχνότητας

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + (-Z'')^2}$$

Και

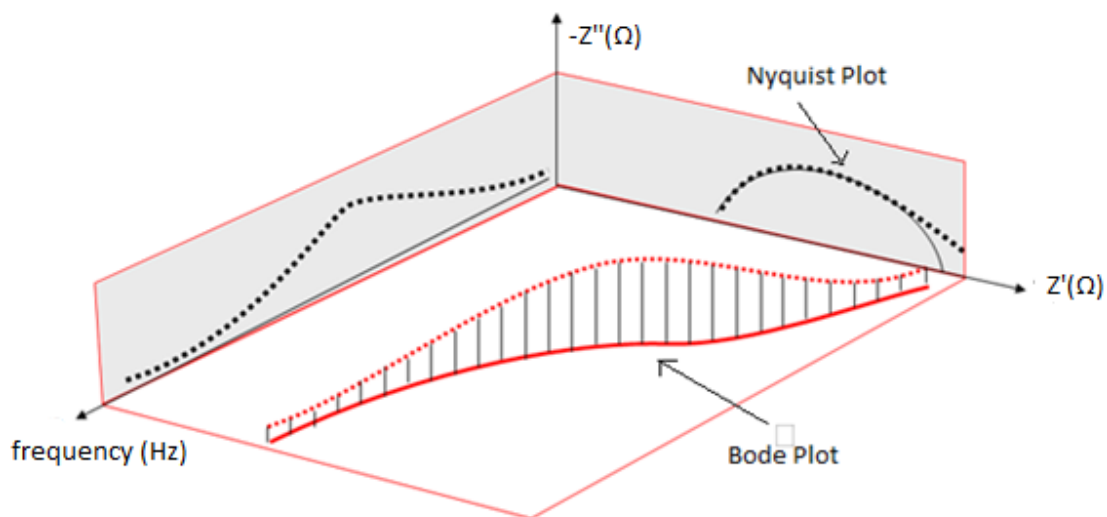
$$\tan\varphi = \frac{-Z''}{Z'}$$

Έτσι, τα φανταστικά και τα πραγματικά μέρη είναι τα:

$$Z' = |Z| \cdot \cos\varphi$$

$$-Z'' = -|Z| \cdot \sin\varphi$$

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η 3D παρουσίαση των αποτελεσμάτων της EIS



Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Στοιχεία ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των φυσικών και χημικών διαδικασιών που λαμβάνουν μέρος στην επιφάνεια του μεταλλικού δοκιμίου κατά την εφαρμογή της μεθόδου EIS είναι απαραίτητη η χρήση ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος, όπου το κάθε ηλεκτρικό στοιχείο του προσομοιώνει μία συγκεκριμένη λειτουργία του συστήματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο κοινά στοιχεία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και η σχέση τους με την εμπέδηση.

Στοιχείο κυκλώματος	Σχέση τάσης- ρεύματος	Εμπέδηση
Αντιστάτης	$E=IR$	$Z=R$
Πυκνωτής	$I=C (dE/dT)$	$Z=I/j\omega C$
Πηνίο	$E=L(di/dt)$	$Z=j\omega L$

Αντιστάτης

Η εμπέδηση του αντιστάτη είναι μιγαδικός αριθμός χωρίς φανταστικό μέρος και ανεξάρτητος από τη συχνότητα. Η διαφορά φάσης ρεύματος και τάσης είναι μηδενική.

Πυκνωτής

Η εμπέδηση του πυκνωτή έχει μηδενικό πραγματικό μέρος και αποτελεί συνάρτηση της συχνότητας. Το ρεύμα που διαπερνά τον πυκνωτή έχει μετατοπισμένη φάση 90° σε σχέση με την τάση.

Πηνίο

Η εμπέδηση του πηνίου έχει μηδενικό πραγματικό μέρος. Σε αντίθεση με τον πυκνωτή, η εμπέδηση του πηνίου είναι ανάλογη με τη συχνότητα. Το ρεύμα που διαπερνά το πηνίο έχει μετατοπισμένη φάση -90° σε σχέση με τη τάση.

Η ισοδύναμη εμπέδηση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος το οποίο αποτελείται από στοιχεία σε σειρά είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους εμπεδησεων των στοιχείων. Ισχύει δηλαδή:

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_N$$

Στην περίπτωση που το κύκλωμα έχει στοιχεία που συνδέονται παράλληλα, η ισοδύναμη εμπέδηση του ηλεκτρικού κυκλώματος, είναι ίση με:

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_N}$$

Φυσική σημασία των στοιχείων ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος

Αντίσταση ηλεκτρολύτη R_e

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου EIS χρησιμοποιείται ένα ηλεκτροχημικό κελί, το οποίο αποτελείται από το ηλεκτρόδιο εργασίας (μεταλλικό δοκίμιο), το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, τα οποία έρχονται σε επαφή με το διάλυμα 3.5 wt.% NaCl.

Η αντίσταση του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

1. Συγκέντρωση και τύπο ιόντων
2. Θερμοκρασία
3. Γεωμετρία της περιοχής στην οποία ρέει το ρεύμα

Για ένα διάλυμα που εκτίθεται σε μία ηλεκτροχημική περιοχή μήκους l και επιφάνειας A στην οποία ρέει ρεύμα, η αντίστασή του είναι ίση με

$$R_E = \rho \frac{l}{A}$$

Όπου ρ : η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη

Το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης ρ αποτελεί την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη, η οποία συμβολίζεται με κ και έχει μονάδα μέτρησης $\frac{S}{m}$, με $S = \frac{1}{\Omega m}$.

Αντίσταση μεταφοράς φορτίου R_{ct} και χωρητικότητα διπλού στρώματος C_{dl}

Όταν δημιουργηθεί αποκόλληση υλικού από το μεταλλικό στρώμα τότε σχηματίζεται ένα ηλεκτροχημικό διπλό στρώμα στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του ηλεκτρολύτη. Αυτό το στρώμα μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, όπου ένας πυκνωτής διπλού στρώματος και ένας αντιστάτης μεταφοράς φορτίου είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

Η χωρητικότητα διπλού στρώματος προέρχεται από τη δυσκολία των φορτίων (ηλεκτρόνια και ιόντα) να διαπεράσουν τη διεπιφάνεια μετάλλου/ηλεκτρολύτη με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό τους.

Η μεταφορά του φορτίου μπορεί να συμβεί μόνο μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η αντίσταση της μεταφοράς φορτίου αναπαρίσταται από τον αντιστάτη R_{ct} και σχετίζεται με τον ρυθμό των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων.

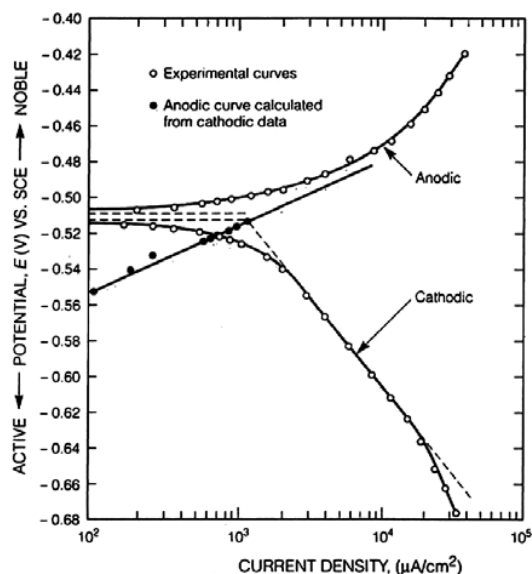
Αντίσταση της επιφάνειας του μετάλλου ή αντίσταση πόρων

Καθώς το μέταλλο βρίσκεται σε επαφή με το διαβρωτικό διάλυμα, η αντίστασή του σε διάβρωση φθίνει με το πέρασμα του χρόνου. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο και το ρυθμό της διάβρωσης, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπέρασμα σχετικά με τις διαβρωτικές ιδιότητες του μελετώμενου μεταλλικού υλικού.

3.4.3 Η μέθοδος Προεκβολής των ευθειών Tafel.

Θεωρία ηλεκτροχημικής διάβρωσης και γραφήματα Tafel

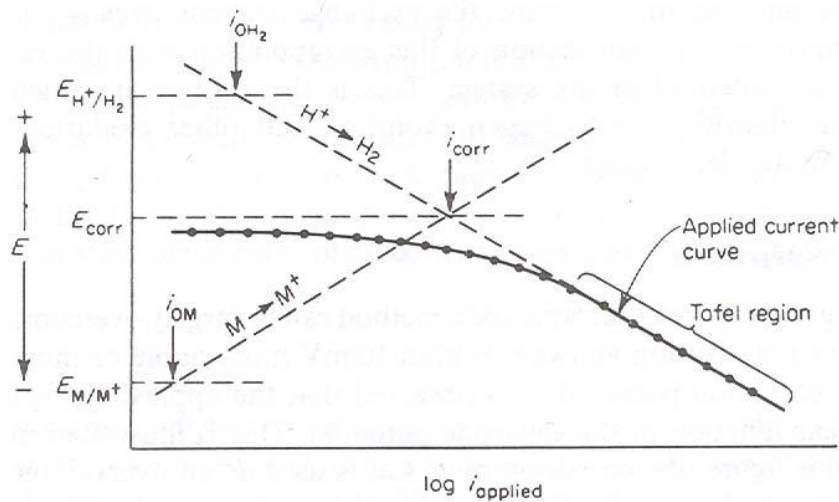
Η μέθοδος προεκβολής ευθειών Tafel για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης εφαρμόστηκε από τους Wagner και Traud για την επιβεβαίωση της θεωρίας του μικτού δυναμικού. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται δεδομένα μετρήσεων ανοδικής και καθοδικής πόλωσης (Σχ. 2.8). Προτιμώνται γενικά τα δεδομένα της καθοδικής πόλωσης, δεδομένου ότι αυτά λαμβάνονται ευκολότερα πειραματικά. Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης για την εφαρμογή μετρήσεων καθοδικής πόλωσης φαίνεται στο Σχ. 2.8. Στο δείγμα του μετάλλου (ηλεκτρόδιο εργασίας) εφαρμόζεται καθοδικό ρεύμα, μέσω βοηθητικού ηλεκτροδίου από κάποιο αδρανές υλικό, όπως είναι η πλατίνα. Το ρεύμα μετράται με αμπερόμετρο και το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας προσδιορίζεται σε σχέση με ηλεκτρόδιο αναφοράς μέσω κυκλώματος ποτενσιοστάτη. Πρακτικά, το ρεύμα αυξάνεται μειώνοντας την τιμή της μεταβλητής αντίστασης R . Το δυναμικό και το ρεύμα σε διάφορα σημεία προσδιορίζονται αυτόματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το Σχ.2.8 αποτελεί εξαιρετικά απλουστευμένο σχηματικό διάγραμμα, ενώ οι πραγματικές διατάξεις είναι εξαιρετικά πολύπλοκες.



Σχήμα 2.8: Γράφημα Tafel

Ας θεωρήσουμε τα δεδομένα από την καθοδική πόλωση μετάλλου Μ σε όξινο απαερωμένο διάλυμα. Πριν την εφαρμογή του καθοδικού ρεύματος, το βολτόμετρο δείχνει το δυναμικό διάβρωσης του δοκιμίου E_{corr} σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Αν το δυναμικό του ηλεκτροδίου σχεδιαστεί σε συνάρτηση με το λογάριθμο του ρεύματος, προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 2.8. Η καμπύλη της πόλωσης σημειώνεται από σημεία και συνεχή γραμμή. Η καμπύλη είναι μη γραμμική για χαμηλές τιμές ρεύματος, αλλά σε υψηλότερες τιμές ρεύματος γίνεται γραμμική σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Το εφαρμοζόμενο καθοδικό ρεύμα ισούται με τη διαφορά μεταξύ του ρεύματος που αντιστοιχεί στην αντίδραση αναγωγής και στην αντίδραση οξειδωσης. Με βάση την εξίσωση 2.2.6 και το διάγραμμα 2.8 είναι φανερό ότι για σχετικά υψηλές τιμές το εφαρμοζόμενο ρεύμα αρχίζει να προσεγγίζει το συνολικό καθοδικό ρεύμα, δεδομένου ότι το αντίστοιχο ανοδικό ρεύμα γίνεται αμελητέο.

Πρακτικά η εφαρμοζόμενη καμπύλη πόλωσης γίνεται γραμμική σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα σε δυναμικό περίπου 50mV πιο υψηλό από το δυναμικό διάβρωσης. Αυτή η περιοχή αναφέρεται ως περιοχή Tafel. Στο διάγραμμα του σχ. 2.9 οι συνολικές ανοδικές και καθοδικές καμπύλες πόλωσης που αντιστοιχούν στην έκλυση υδρογόνου και στη διάβρωση του μετάλλου εμφανίζονται ως διακεκομμένες γραμμές.



Σχήμα 2.9: Καμπύλη καθοδικής πόλωσης μετάλλου σε διάλυση σε προεκβολή Tafel

Για σχετικά υψηλή εφαρμοζόμενη πυκνότητα ρεύματος η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη συμπίπτουν. Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης από μετρήσεις ηλεκτροχημικής πόλωσης, η περιοχή Tafel προεκβάλλεται έως το δυναμικό διάβρωσης. Στο δυναμικό διάβρωσης, ο ρυθμός έκλυσης υδρογόνου είναι ίσος με το ρυθμό διάλυσης του μετάλλου και το σημείο αυτό αντιστοιχεί στο ρυθμό διάβρωσης του συστήματος που εκφράζεται με την πυκνότητα ρεύματος.

Ηλεκτροχημικά, η μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης, βασίζεται στον καθορισμό του ρεύματος οξείδωσης στο δυναμικό διάβρωσης. Αυτό το ρεύμα οξείδωσης, καλείται και ρεύμα διάβρωσης, i_{corr} .

$$i_{MEASUR} = i_{O,M} - i_{R,Z} = 0 \quad (2.2.6) \quad \text{για } E = E_{corr}$$

Ένα γράφημα Tafel, εκπονείται για να καθορίσει πειραματικά το ρεύμα διάβρωσης i_{corr} , από το οποίο υπολογίζεται ο ρυθμός διάβρωσης.

Υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης

Το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} προκύπτει από ένα γράφημα Tafel προεκτείνοντας το γραμμικό τμήμα της καμπύλης στο E_{corr} όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 2.8. Ο ρυθμός διάβρωσης, δηλαδή το Corrosion Rate (C.R), μπορεί να υπολογισθεί από το i_{corr} , χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

$$Corrosion Rate = \frac{(E.W.) \cdot 0.13 \cdot I_{corr}}{d} \quad [mpy] \quad (2.4.1)$$

όπου:

E.W. : ισοδύναμο βάρος διάβρωσης (gr)

d: πυκνότητα (gr/cm^3)

I_{corr} : πυκνότητα ρεύματος ($\mu A/cm^2$).

Το ανοδικό και καθοδικό τμήμα της καμπύλης Tafel, περιγράφεται από την εξίσωση Tafel :

$$n = \beta \cdot \log \frac{i}{i_{corr}} \quad (2.2.9-2.2.10)$$

όπου

η = διαφορά δυναμικού του δοκιμίου και του δυναμικού διάβρωσης

β = σταθερά Tafel

i_{corr} = ρεύμα στο η (μA).

Η εξίσωση (2.2.9-2.2.10) γίνεται :

$$n = \beta \cdot \log i - \log i_{corr} \quad (2.4.2)$$

Αυτή η εξίσωση έχει τύπο $y = m \cdot x + b$. Έτσι ένα γράφημα του η συναρτήσει του $\log i$ είναι μια ευθεία γραμμή με παράγωγο β .

Σημείωση που προκύπτει από την εξίσωση (1.31) είναι ότι όταν $\eta=0$ (στο $E=E_{corr}$) τότε

$$\log \frac{i}{i_{corr}} = 0 \rightarrow \frac{i}{i_{corr}} = 1 \rightarrow i = i_{corr} \quad (2.4.3)$$

Οι σταθερές Tafel , β_a , β_c πρέπει να υπολογίζονται και για το ανοδικό και για το καθοδικό τμήμα του γραφήματος Tafel. Η μονάδα των σταθερών Tafel είναι ή mV/decade ή V/decade.

Οι σταθερές Tafel χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουμε τον ρυθμό διάβρωσης με την μέθοδο της αντίστασης πόλωσης.

Υπολογισμοί ρυθμού διάβρωσης από το ρεύμα διάβρωσης

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday:

$$Q = \frac{n \cdot F \cdot W}{M} \quad (2.4.4)$$

όπου:

Q = Coulombs

n = αριθμός ηλεκτρονίων που συμμετείχαν στην ηλεκτροχημική αντίδραση

F = η σταθερά Faraday που είναι ίση με 96487 Cb

W = βάρος ηλεκτροενεργών σωματιδίων

M = μοριακό βάρος.

Από την εξίσωση (2.4.4),

$$W = \frac{Q \cdot M}{n \cdot F} \quad (2.4.5)$$

Ισχύει ότι το ισοδύναμο βάρος είναι

$$(E.W.) = \frac{M}{n}$$

Άρα η (2.4.5),

$$W = \frac{Q \cdot E.W.}{F} \quad (2.4.6)$$

Ενώ

$$Q = i \cdot t \rightarrow W = \frac{i \cdot t \cdot E.W.}{F} \quad (2.4.7)$$

Επίσης w/t είναι ο ρυθμός διάβρωσης σε gr/sec. Παραδοσιακά ο ρυθμός διάβρωσης εκφράζεται με mils per year (mpy). Αυτές οι μονάδες παρέχουν μια ένδειξη του βάθους της διάβρωσης.

Διαιρώντας την ισότητα (2.4.7) με την επιφάνεια του ηλεκτροδίου και την πυκνότητα, έχουμε:

$$C.R. = \frac{i \cdot (E.W.)}{d \cdot F \cdot A} \quad [\text{cm/sec}]$$

Η μετατροπή δευτερολέπτου σε χρόνια, εκατοστόμετρα σε mils, της σταθεράς του Faraday από $A \cdot \text{sec} / eq$ σε μA οδηγεί από την προηγούμενη σχέση στην εξής:

$$C.R. = \frac{i \cdot (E.W.) \cdot 31.6 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{d \cdot F \cdot A \cdot 2.5 \cdot 10^6} \quad [\text{mpy}]$$

Εκφράζοντας το λόγο i/A ως πυκνότητα ρεύματος και κάνοντας τις αριθμητικές πράξεις καταλήγουμε στον τύπο:

$$C.R. = \frac{0.13 \cdot I_{corr} \cdot (E.W.)}{d} \quad [\text{mpy}]$$

όπου :

$E.W.$: ισοδύναμο βάρος διάβρωσης (gr)

d : πυκνότητα υλικού ηλεκτροδίου (gr/cm^3)

I_{corr} : πυκνότητα ρεύματος ($\mu A/\text{cm}^2$).

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης από το i_{corr} .

Υπό ιδανικές συνθήκες, η ακρίβεια της μεθόδου Tafel αντιστοιχεί ή είναι μεγαλύτερη από συμβατικές μεθόδους απώλειας μάζας. Με την τεχνική αυτή μπορούν να μετρηθούν εξαιρετικά χαμηλοί ρυθμοί διάβρωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή καταγραφή του ρυθμού αυτού. Αν και μπορεί να γίνει γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η περιοχή Tafel θα πρέπει να εκτείνεται για πυκνότητα ρεύματος τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους. Επίσης η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια σε συστήματα όπου συμβαίνει μια μόνο διεργασία αναγωγής.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος Tafel είναι πολύ χρήσιμη και μπορεί να εφαρμοστεί, υπό συγκεκριμένες συνθήκες για τον ταχύ προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης.

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 4

Πειραματικές Μέθοδοι

4.1. Εισαγωγή

Κύριο αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη:

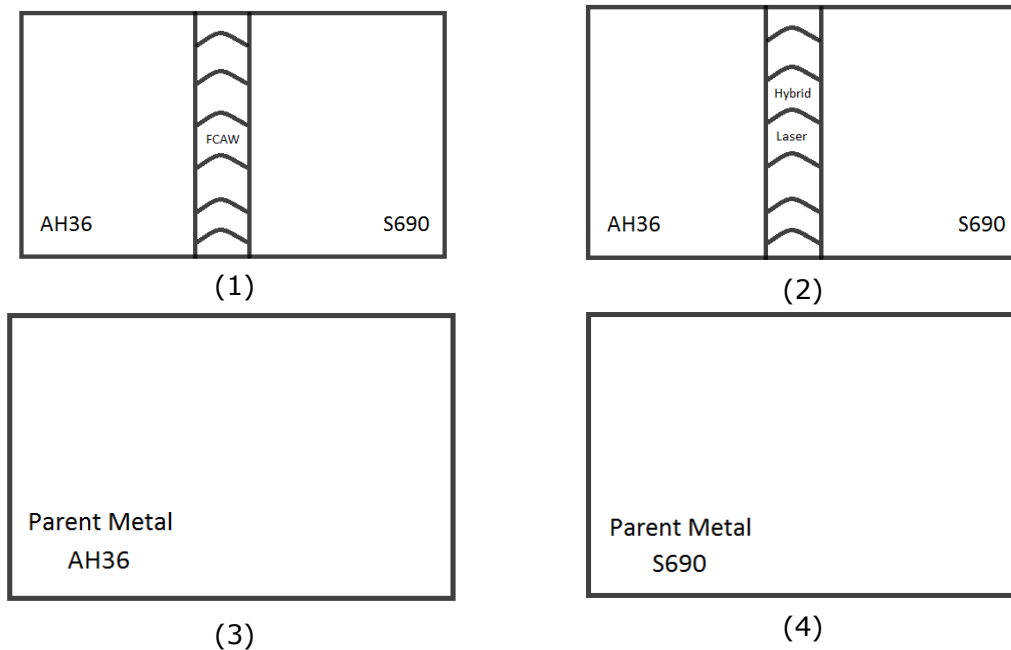
- Της μικροδομής των χαλύβων και των συγκολλήσεών τους, καθώς και
- Της συμπεριφοράς τους σε διάβρωση.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται λεπτομερώς οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, και στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έδωσαν.

Μέσω των πειραμάτων αυτής της εργασίας μελετήθηκε η συμπεριφορά σε διάβρωση των δύο χαλύβων AH36 και S690, καθώς και των συγκολλήσεών τους με τις μεθόδους FCAW και Υβριδική Laser- tandem τόξου. Πρόκειται για ανομοιογενείς συγκολλήσεις, αφού τα μέταλλα βάσης είναι δύο διαφορετικά κράματα.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα τέσσερα είδη δοκιμών (συνδυασμοί κραμάτων-συγκολλήσεων αλλά και κραμάτων αποκλειστικά):

Πίνακας 4.1: Είδη δοκιμών που μελετήθηκαν



Η συμπεριφορά σε διάβρωση των συγκολλημένων τμημάτων, αλλά και των κραμάτων διαπιστώθηκε με την έκθεση των δοκιμών σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 30 ημερών (90 κύκλοι γήρανσης, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14993:2001(E)). Η απώλεια μάζας στο τέλος των κύκλων έκθεσης συνεπάγεται τα συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό διάβρωσης των δύο κραμάτων και των συγκολλήσεών τους.

Πριν όμως τα πειράματα του θαλάμου, γίνεται αναφορά στις διαδικασίες μελέτης της μικροδομής, οι οποίες έγιναν στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου του ENT.

4.2 Μικροσκοπική Παρατήρηση Επιφανειών

4.2.1 Προετοιμασία Δοκιμίου

Η μελέτη της μικροδομής μιας συγκόλλησης προϋποθέτει τα εξής βήματα προετοιμασίας του δοκιμίου:

1. Με τη βοήθεια του δισκοτόμου (Εικόνα 4.1) πραγματοποιείται η κοπή του δοκιμίου, το οποίο περιέχει τα δύο μέταλλα βάσης εκατέρωθεν της συγκόλλησης, τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, και φυσικά τη ζώνη τήξης.



Εικόνα 4.1 Δισκοτόμος μηχανουργείου ENT.

2. Το εν λόγω δοκίμιο εγκιβωτίζεται σε μείγμα εποξειδικής ρητίνης και σκληρυντή, έτσι ώστε να παραχθεί ένας στέρεος κύλινδρος που περιέχει το δοκίμιο (Εικόνα 4.2). Το βήμα αυτό βοηθά στην καλύτερη προσαρμογή του δοκιμίου στο λειαντικό μηχάνημα.



Εικόνα 4.2: Δοκίμια εμβυτισμένα σε εποξειδική ρητίνη

3. Λείανση της προς παρατήρηση επιφάνειας. Πραγματοποιείται είτε με μηχανικές είτε με ηλεκτροχημικές μεθόδους και αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας (Εικόνα 4.3). Χρησιμοποιώντας χαρτιά με όλο και μικρότερους κόκκους, η λείανση γίνεται πιο λεπτομερής (grit 80- 4000).



Εικόνα 4.3: Μηχανή λείανσης / στίλβωσης Struers LaboPol-5 του ENT.

4. Το τελικό στάδιο της διαδικασίας αυτής ονομάζεται *στίλβωση* και περιλαμβάνει λείανση σε ειδικά βελούδα με τη βοήθεια κολλοειδούς αιωρήματος Al_2O_3 (κόκκους αλούμινας έως και $0.1 \mu m$), *spray* με λεπτούς κόκκους διαμαντιού κλπ. Στην επεξεργασία των δοκιμίων που εξετάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε αιώρημα Al_2O_3 με κόκκους αλούμινας 1 και $0.1 \mu m$.
5. Ακολουθεί η *χημική προσβολή*. Η χημική προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας γίνεται με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού, μιας και η απρόσβλητη επιφάνεια μπορεί να δώσει λίγες σχετικά πληροφορίες. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκάλυψης των χαρακτηριστικών της δομής και βασίζεται στην "εκλεκτική" διάβρωση των ορίων των κόκκων. Επίσης, τα άτομα που ανήκουν σε διαφορετικά κρυσταλλικά πλέγματα (δηλ. σε διαφορετικές φάσεις), διαλύονται, με διαφορετικούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίθεσης στην επιφάνεια και την εμφάνιση και απεικόνιση των μικροδομικών χαρακτηριστικών κατά την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο. Η προσβολή γίνεται με εμβάπτιση της λείας μεταλλικής επιφάνειας στο κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο.

Στην περίπτωση των ναυπηγικών χαλύβων AH36 και S690 επιλέχθηκε το αντιδραστήριο Nital (διάλυμα καθαρής αιθανόλης με 2% κ.ό. HNO_3 (νιτρικό οξύ)), που δίνει πολύ καλά αποτελέσματα με εμβάπτιση των δοκιμίων σε δοχείο με το αντιδραστήριο περίπου για 15 sec.

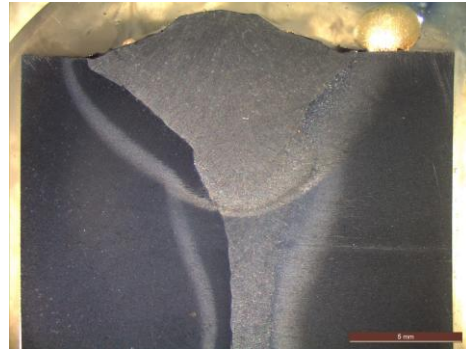
Μετά από τα προαναφερθέντα βήματα, η επιφάνεια του δοκιμίου είναι έτοιμη προς παρατήρηση τόσο στο στερεοσκόπιο Leica MZ6, όσο και στο μικροσκόπιο Leica DMILM του ENT.

4.2.2 Στερεοσκόπιο Leica MZ6

Το στερεοσκόπιο του ENT επιτρέπει την παρατήρηση της επιφάνειας του δοκιμίου, με σκοπό τη λήψη φωτογραφιών που απεικονίζουν σε μεγέθυνση το μελετώμενο κράμα (Εικόνα 4.4). Ενδεικτικά παρουσιάζεται η λήψη τμήματος της επιφάνειας της Υβριδικής συγκόλλησης Laser-tandem τόξου AH36-S690 από το στερεοσκόπιο, σε μεγέθυνση 0,63 (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.4: Στερεοσκόπιο του ENT, Leica MZ6



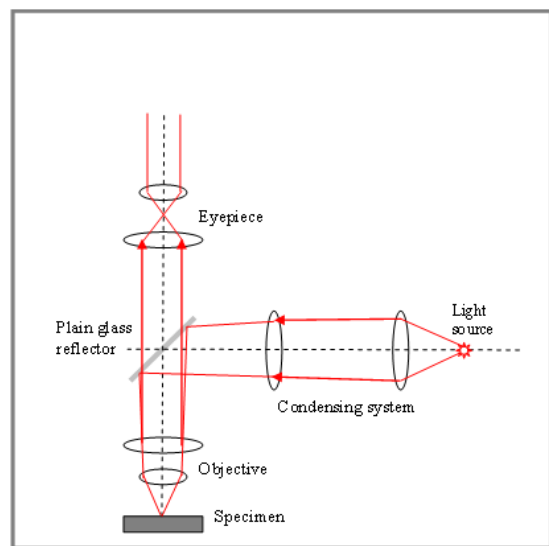
Εικόνα 4.5: Στερεοσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας της υβριδικής συγκόλλησης Laser-tandem τόξου AH36-S690.

4.2.3 Οπτικό Μικροσκόπιο Leica DMILM

Τα κύρια μέρη του μικροσκοπίου είναι (Σχήμα 4.6):

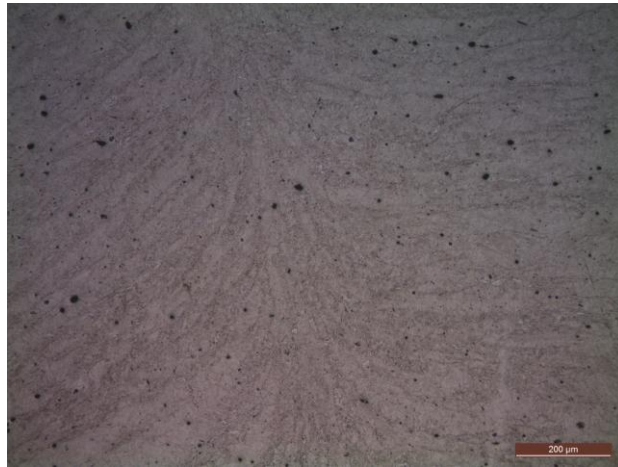
- Η πηγή φωτός
- Οι φακοί που κατευθύνουν τη φωτεινή δέσμη
- Το διάφραγμα
- Οι μεγεθυντικοί φακοί
- Το ημιανακλαστικό κάτοπτρο
- Ο αντικειμενικός φακός
- Η τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς παρατήρηση δοκίμιο και επιτρέπει τη μετακίνησή του μέσω κατάλληλης διάταξης
- Ο προσοφθάλμιος φακός

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



Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του οπτικού (μεταλλογραφικού) μικροσκοπίου.[51]

Ενδεικτικά παρουσιάζεται η φωτογραφία της μικροδομής της Υβριδικής συγκόλλησης Laser-tandem τόξου AH36-S690, στην περιοχή της ζώνης τήξης της Laser Zone (Εικόνα 4.7)



Εικόνα 4.7: Ζώνη τήξης της Laser Zone της Υβριδικής Laser-τόξου συγκόλλησης των χαλύβων AH36-S690 (10x)

4.2.4 Μικροσκληρότητα

Στη φυσική μεταλλουργία, η σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται ως η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος, του οποίου η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού.

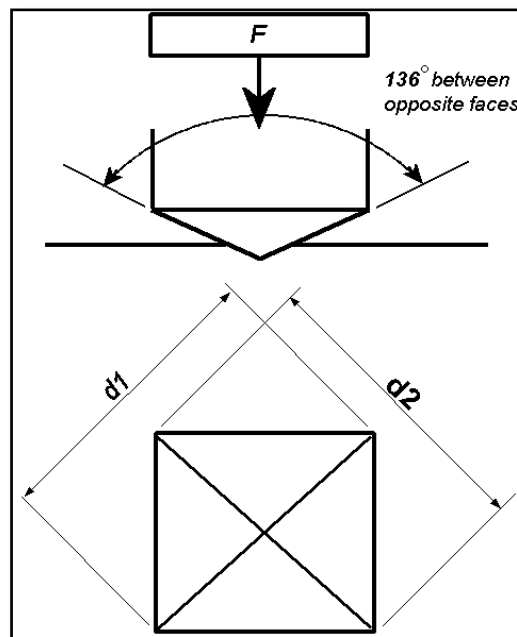
Η δοκιμή μικροσκληρότητας που πραγματοποιήθηκε στο ENT είναι στην ουσία μια δοκιμή σκληρότητας με πίεση ενός διεισδυτή γνωστής γεωμετρίας και μηχανικών ιδιοτήτων, και με εφαρμογή πολύ μικρού φορτίου (της τάξης μερικών δεκάδων γραμμαρίων), στο υπό μελέτη δοκίμιο.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η μικροσκληρομέτρηση κατά Vickers, στην οποία ο διεισδυτής είναι μία πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης, με γωνία κορυφής $\alpha=136^\circ$.

Με την επιβολή φορτίου $F=2.942\text{ N}$ για χρονικό διάστημα ίσου προς 10 sec , στην επιφάνεια του δοκιμίου εμφανίζεται ένα αποτύπωμα σχήματος ρόμβου. Οι δύο διαγώνιοι d_1 και d_2 του ρόμβου αυτού μετρώνται από το μικροσκληρόμετρο, και ο μέσος όρος τους d χρησιμοποιείται στον τύπο:

$$HV = \frac{1854.4 * N}{d^2}$$

προκειμένου να υπολογιστεί η σκληρότητα κατά Vickers (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Επιβολή φορτίου και αποτύπωμα κατά την μικροσκληρομέτρηση Vickers

4.3 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις

4.3.1. Ηλεκτροχημικό Κελί [2] [3] [5] [6] [8] [13]

Σε ένα ηλεκτροχημικό κελί συμβαίνουν διάφορες αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής εντός της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων αυτών συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος. Τα στοιχεία τα οποία κερδίζουν ηλεκτρόνια υφίστανται και μείωση του βαθμού οξειδωσης σε αντίθεση με αυτά που χάνουν ηλεκτρόνια. Η γενική εξίσωση που περιγράφει μια τέτοια αντίδραση, αν θεωρήσουμε ότι το O χάνει ηλεκτρόνια τα οποία πηγαίνουν R είναι:



Ένα ηλεκτροχημικό κελί αποτελείται κυρίως από τον ηλεκτρολύτη και δύο ηλεκτρόδια, το ανοδικό και το καθοδικό. Η οξειδωση συμβαίνει στην άνοδο ενώ η αναγωγή στην κάθοδο. Η πιο πάνω εξίσωση περιγράφει την αντίδραση της καθόδου. Η ανάποδη εξίσωση όπου το R χάνει ηλεκτρόνια γίνεται στην άνοδο όπου ξεκινάει η οξειδωση της ανόδου. Έτσι, ο συνδυασμός αυτών των δύο αντιδράσεων προκαλεί την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ροής ηλεκτρονίων μέσα σε ένα κύκλωμα είτε αυθόρμητα είτε όχι.

4.3.1.1 Θερμοδυναμική του ηλεκτροχημικού κελιού

Όπως προαναφέρθηκε, μέσω της οξειδωσης αναγωγής παράγεται ρεύμα εντός ενός κυκλώματος. Όσον αφορά το δυναμικό στο ηλεκτροχημικό κελί, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από δυναμικό του ηλεκτροδίου αναγωγής και λαμβάνεται από την εξίσωση του Nernst.

$$E^e_{\text{cell}} = E^e_{\text{C}} - E^e_{\text{A}} = E^e_{\text{min}} \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση, το δυναμικό ισορροπίας στο κελί είναι η διαφορά μεταξύ του δυναμικού της καθόδου και της ανόδου. Αυτό αποτελεί και την ελάχιστη τάση που απαιτεί το σύστημα για την πραγματοποίηση της οξειδωσης και αναγωγής. Τις περισσότερες όμως φορές το δυναμικό τόσο της οξειδωσης όσο και της αναγωγής δεν βρίσκεται στην αναμενόμενη τιμή, έτσι ο Nernst έχει αναπτύξει την εξής εξίσωση :

$$\Delta E^e = \Delta E^o - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_R}{C_O} \right) \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

Όπου, R η σταθερά αερίων

T: η θερμοκρασία σε Kelvin

n: τα ηλεκτρόνια που μεταφέρονται

F: η σταθερά Faraday

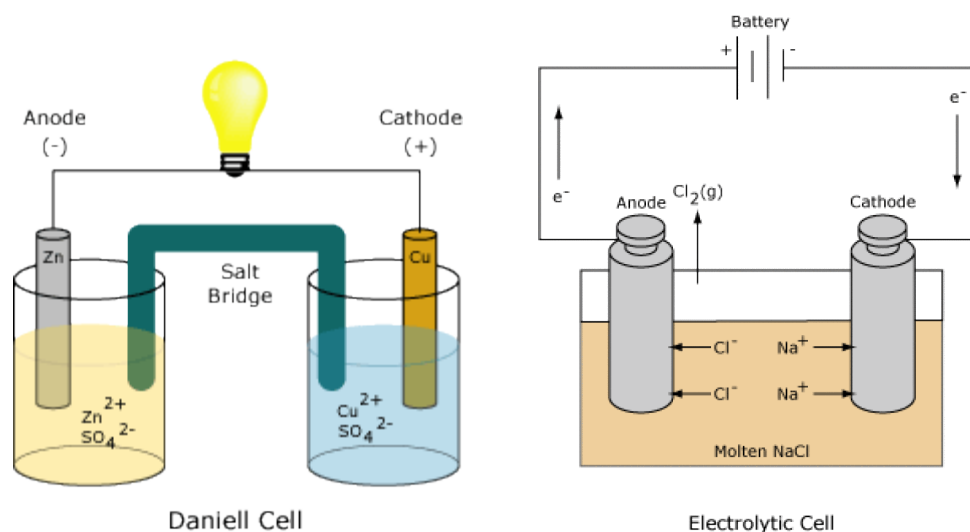
Το C_R/C_O εκφράζει το πηλίκιο της αντίδρασης για αναγωγή (reduction) και οξειδωση (oxidation)

Αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται μόνο όταν χρειάζεται να ισορροπήσει το σύστημα. Όταν ξεκινήσει η ροή ρεύματος δια μέσου του ηλεκτροδίου, τότε εμφανίζεται μετατόπιση του δυναμικού των ηλεκτροδίων από την κατάσταση ισορροπίας τους. Αυτή η μετατόπιση αφορά στην αύξηση της τάσης, η οποία επηρεάζεται από την αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, η τάση στο κελί επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής, το υλικό του ηλεκτροδίου και τη σύσταση του ηλεκτρολύτη.

Συνήθως, προτιμάται σταθερή μεταβολή της τάσης (δυναμικού) στο κελί και έπειτα για εφαρμογή σταθερού δυναμικού ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται ποτενσιοστάτης, ενώ για σταθερή μεταβολή του ρεύματος εφαρμόζεται γαλβανοστάτης.

Τέλος, τα κελιά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ηλεκτροχημικά ή γαλβανικά κελιά και τα ηλεκτρολυτικά. Η πρώτη κατηγορία παράγει ρεύμα μέσα από την αυθόρμητη αντίδραση (Daniell

cell), ενώ η δεύτερη κατηγορία εφαρμόζει ενέργεια για να δημιουργήσει μια μη αυθόρμητη αντίδραση. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται σχηματικά οι δύο διεργασίες. Σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση του ηλεκτρολυτικού κελιού.



Σχήμα 4.1 : Ηλεκτροχημικό και ηλεκτρολυτικό κελί

4.3.1.2 Βασικά ηλεκτρόδια του ηλεκτροχημικού κελιού

Τα ηλεκτρόδια ενός ηλεκτροχημικού κελιού είναι τρία. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode) το οποίο χρησιμεύει στη παρακολούθηση του εφαρμοζόμενου δυναμικού όσο δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Όταν ξεκινήσει η ροή ρεύματος το βοηθητικό ηλεκτρόδιο θα αντικαταστήσει κατά κάποιο τρόπο το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Εν ολίγοις, τα τρία ηλεκτρόδια επιτρέπουν τη μέτρηση της τάσης ή του ρεύματος από το ηλεκτρόδιο αναφοράς το οποίο όμως είναι ανεξάρτητο από τα ηλεκτρόδια εργασίας και το βοηθητικό. Επιπλέον, η τάση στο ηλεκτρόδιο εργασίας για δεδομένο δυναμικό δεν μπορεί να μετρηθεί μέσω διάταξης δύο ηλεκτροδίων, λόγω του ότι το ρεύμα που εφαρμόζεται αλλάζει το δυναμικό τόσο στο ηλεκτρόδιο αναφοράς όσο και στο βοηθητικό.

4.3.1.3 Ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode)

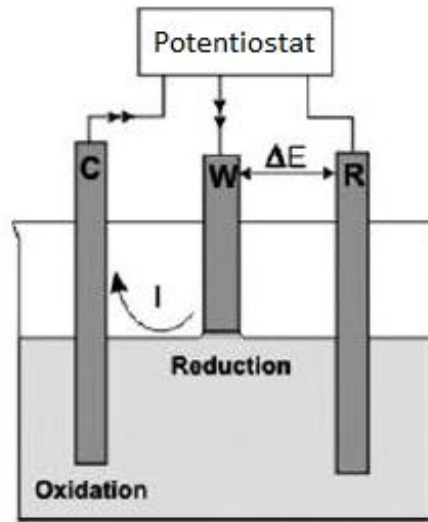
Το ηλεκτρόδιο εργασίας, βρίσκεται εκεί που λαμβάνει χώρα η αντίδραση, δηλαδή κοντά στο δοκίμιο. Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας πρέπει να είναι γνωστή ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα του ρεύματος. Επιπλέον, βρίσκεται σε συνεχή επαφή με τον ηλεκτρολύτη, ώστε να είναι εφικτή η αντίδραση και αποτελεί ουσιαστικά το μισό κύκλωμα. Το υλικό των ηλεκτροδίων αυτών είναι συνήθως είτε πλατίνα είτε γραφίτης.

4.3.1.4 Βοηθητικό ηλεκτρόδιο (counter electrode)

Το δεύτερο μισό του κυκλώματος αποτελεί το βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Η τάση στο ηλεκτρόδιο αυτό οδηγείται μέσω του ηλεκτροδίου αναφοράς στην κατάλληλη τιμή ανάλογα με το ρεύμα που εφαρμόζεται στο σύστημα. Έπειτα, το βοηθητικό ηλεκτρόδιο μεταφέρει το ρεύμα έτσι ώστε το ηλεκτρόδιο αναφοράς να μπορεί να καταγράφει ένα σταθερό δυναμικό έναντι του ηλεκτροδίου εργασίας. Και σε αυτή την περίπτωση το υλικό κατασκευής είναι η πλατίνα.

4.3.1.5 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς (reference electrode)

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς όπως προαναφέρθηκε έχει σκοπό να καταγράφει και να ελέγχει το δυναμικό που εφαρμόζεται στο σύστημα. Απαιτείται να έχει μια γνωστή και σταθερή τιμή δυναμικού ενώ δεν διέρχεται καθόλου ρεύμα μέσα από αυτό.



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση των ηλεκτροδίων εντός του κελιού

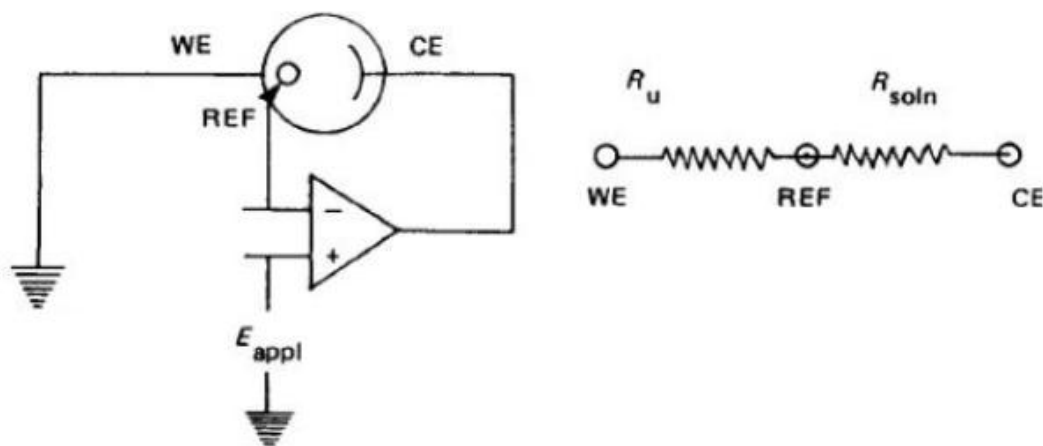
4.3.2 Πειραματική Διάταξη Ηλεκτροχημικών Μετρήσεων

Οι δοκιμές στο ηλεκτρολυτικό κελί του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης, της έντασης του ρεύματος και το δυναμικό διάβρωσης τόσο για τις δύο σειρές συγκολλήσεων καθώς και για τα μέταλλα βάσης, του ΑΗ36 και του S690. Σε όλες τις περιπτώσεις, η επιφάνεια του χάλυβα εκτέθηκε σε περιβάλλον NaCl 3.5% και μέσω κατάλληλου λογισμικού (Versa Studio) έγινε η συλλογή των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Ο υπολογισμός των παραπάνω έγινε με τις τρεις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέθοδος γραμμικής πόλωσης, μέθοδος προεκβολής των ευθειών Tafel και μέθοδος φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Τα κυριότερα στοιχεία της πειραματικής διάταξης θα αναπτυχθούν παρακάτω.

4.3.2.1 Χαρακτηριστικά του Ποτενσιοστάτη

Ο ποτενσιοστάτης που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο είναι ο VersaSTAT 4 της εταιρείας EG&G Princeton Applied Research- Perkin Elmer Instruments. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι :

- Βέλτιστη απόδοση και ακριβής αποτελέσματα σε πολύ μικρά ρεύματα της τάξης των μA .
- Δίνει μέγιστο ρεύμα 1 A αλλά με κατάλληλες διατάξεις φτάνει μέχρι 20 A.
- Πολύ γρήγορη μεταφορά δεδομένων περίπου 2 μs .
- Ύπαρξη αναλογικού φίλτρου για την τάση και το ρεύμα με αποτέλεσμα πολύ υψηλής ποιότητας σήμα.
- Επιλογή χρήσης αναλυτή της συχνότητας απόκρισης για συχνότητες 10 μHz έως MHz.
- Εύκολη χρήση του σε συνδυασμό με το λογισμικό VersaStudio.



Σχήμα 4.3: Συνδεσμολογία των ηλεκτροδίων με τον ποτενσιοστάτη

4.3.2.2 Χαρακτηριστικά του ηλεκτρολυτικού κελιού

Το ηλεκτρολυτικό κελί που χρησιμοποιήθηκε είναι και αυτό της εταιρείας EG&G Princeton Applied Research- Perkin Elmer Instruments. Συγκεκριμένα, είναι το μοντέλο K0235 Flat Cell και χρησιμοποιείται τόσο για τη μελέτη της διάβρωσης, όσο και για διάφορες επικαλύψεις. Λόγω της μορφολογία του μπορεί να δεχθεί ένα ευρύ φάσμα μεγεθών ηλεκτροδίων. Μπορεί γρήγορα και εύκολα να αποσυναρμολογηθεί ώστε να διευκολύνεται ο καθαρισμός του. Το υλικό κατασκευής του συγκεκριμένου κελιού είναι από γυαλί Pyrex ενώ στις άκρες αποτελείται από πολυπροπυλένιο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι:

Ως προς τις διαστάσεις:

- Χωρητικότητα σε ηλεκτρολύτη περίπου 250 ml.
- Η απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και του βοηθητικού είναι 80mm.
- Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου εργασίας είναι πάντα 1cm².
- Ο σωλήνας Luggin έχει πάντα διάμετρο 12mm και βάθος 60mm ενώ η χωρητικότητά του σε ηλεκτρολύτη είναι 5ml.
- Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο έχει διαστάσεις 2.54 cm x 2.54 cm.

Ως προς τα χαρακτηριστικά:

- Το pH εντός του κελίου είναι από 2-9.
- Το όριο για την θερμοκρασία είναι 80°C.

Ως προς τα υλικά:

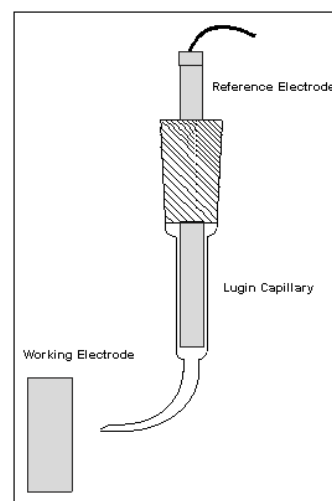
- Το υλικό του κελιού είναι γυαλί Pyrex.
- Οι άκρες είναι από πολυπροπυλένιο.
- Τα προστατευτικά στεγάνωσης (sealing gaskets) είναι από Viton.
- Ο σωλήνας Luggin είναι κατασκευασμένος από Ethyl Vinyl Acetate (EVA).
- Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι από πλατίνα.



Σχήμα 4.4 : Ηλεκτρολυτικό κελί τύπου K0235 Flat Cell

4.3.2.3 Σωλήνας Luggin (Luggin's capillary)

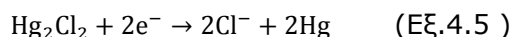
Ο σωλήνας Luggin αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να υπάρχει καθορισμένη απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και εργασίας. Ο σωλήνας αυτός πρέπει να είναι πάντα γεμάτος με τον ηλεκτρολύτη και εκεί βρίσκεται συνήθως το σημείο ανίχνευσης του ηλεκτροδίου αναφοράς. Σε εργαστηριακές εφαρμογές το υλικό κατασκευής του είναι είτε γυαλί είτε συνηθέστερα το πλαστικό. Ο σωλήνας αυτός εκτείνεται πολύ κοντά στο ηλεκτρόδιο εργασίας και είναι ανοιχτός στην άκρη για να γίνεται ευκολότερα η καταγραφή του δυναμικού (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Σωλήνας Luggin σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το ηλεκτρόδιο εργασίας

4.3.2.4 Ηλεκτρόδιο Αναφοράς – Κορεσμένου Καλομέλανα

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις είναι το ηλεκτρόδιο κορεσμένου καλομέλανα (Saturated Calomel Electrode, SCE). Το δυναμικό ισορροπίας του είναι $E = +0.241\text{V vs SHE}$. Το ηλεκτρόδιο καλομέλανα στηρίζεται στην αντίδραση μεταξύ υδραργύρου και υδραργύρου του χλωρίου:



και αυτή η φάση καλείται και ως κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου σε νερό. Το ηλεκτρόδιο αυτό αποτελείται από μια δεξαμενή υδραργύρου, καλυμμένη με πάστα υδραργύρου-χλωριούχου υδραργύρου (καλομέλανα) βυθισμένη σε κορεσμένο διάλυμα χλωριούχου καλίου. Το κορεσμένο αυτό διάλυμα επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων χλωρίου εντός του κελιού, καθώς επίσης η συγκέντρωση του διαλύματος αυτού επηρεάζει το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς.

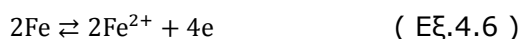
Το βασικότερο μειονέκτημα του ηλεκτροδίου είναι ότι σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 80°C η συγκέντρωση του χλωρίου αυξάνει έτσι το δυναμικό μειώνεται.

4.3.3 Διάβρωση Χάλυβα με Ηλεκτροχημικές μεθόδους

Σχεδόν σε όλες τις ηλεκτροχημικές διεργασίες ο σίδηρος εμφανίζεται σε ανοδική θέση και εισέρχεται εντός του ηλεκτρολύτη με τη μορφή ιόντος δισθενούς σιδήρου. Όσο τα άτομα του σιδήρου υφίστανται οξείδωση τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται με αποτέλεσμα το αρνητικό τους φορτίο να επιτείνει την ανοδική αντίδραση. Η αντίδραση αυτή θα συνεχιστεί προφανώς, μόνο εάν τα ηλεκτρόνια που φεύγουν βρουν την αντίστοιχη επιφάνεια που θα υποστεί καθοδική αντίδραση. Στην καθοδική αντίδραση, τα ηλεκτρόνια αντιδρούν πάντα με τον ηλεκτρολύτη. Ο ρυθμός αντίδρασης τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική περίπτωση πρέπει να είναι ισοδύναμος με τον νόμο του Faraday ο οποίος εξαρτάται από τη ροή ηλεκτρονίων και καθορίζει το ρεύμα διάβρωσης I_{corr} .

Οι πιο συχνές αντιδράσεις στην περίπτωση του σιδήρου είναι :

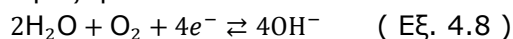
Ανοδική αντίδραση



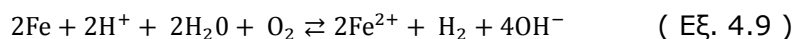
Καθοδική αντίδραση υδρογόνου



Και η καθοδική αντίδραση οξυγόνου



Οπότε τελικά προκύπτει ότι :



4.3.4 Επεξεργασία ηλεκτροχημικών μετρήσεων

Όλα τα πειραματικά δεδομένα μεταφέρονται, μέσω ενός interface καλωδίου, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium 4 CPU 1.6GHz από τον ποτενσιοστάτη - γαλβανοστάτη και στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία τους με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος 352 PowerCorr .

Το λογισμικό πρόγραμμα PowerCorr διαθέτει τρεις κύριες διαδικασίες επεξεργασίας των καμπυλών πόλωσης για τον προσδιορισμό των ακολούθων μεγεθών:

- της αντίστασης πόλωσης, R_p , μέσω της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης και της μεθόδου Tafel,
- των σταθερών β_a , β_c , μέσω της μεθόδου Tafel,
- του δυναμικού διάβρωσης, $E_{corr} = E(I=0)$, μέσω των δύο μεθόδων.

4.3.5 Λήψη καμπυλών πόλωσης

Στην πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκε η ίδια μέθοδος λήψης καμπυλών πόλωσης για το σύνολο των πειραμάτων που εκτελέστηκαν, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα.

Αρχικά, προσαρμόζεται το προς μελέτη μεταλλικό δοκίμιο στο κελί, το οποίο στη συνέχεια πληρώνεται με το υδατικό διάλυμα NaCl 3,5%κ.β. Έπειτα, τοποθετούμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Το επόμενο στάδιο αφορά στη σταθεροποίηση του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος των δοκιμίων, στην τιμή του δυναμικού διάβρωσης αυτών, E_{corr} . Η παρακολούθηση της σταθεροποίησης γίνεται με χρήση του προγράμματος Virtual Potentiostat. Παρατηρούμε την τιμή του δυναμικού έως ότου σταθεροποιηθεί και δεν μεταβάλλεται παραπάνω από 1mV σε διάστημα 3 λεπτών. Η αναμονή είναι αναγκαία, αφού για την εφαρμογή των ηλεκτροχημικών τεχνικών απαιτείται η τιμή του δυναμικού του ανοικτού κυκλώματος να είναι σταθεροποιημένη. Το επόμενο στάδιο αφορά στην έναρξη της εφαρμογής των ηλεκτροχημικών μεθόδων που έχουν επιλεγεί, δηλαδή της Γραμμικής Πόλωσης, της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης και της μεθόδου Tafel.

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στη παρούσα διπλωματική, και που αξιολογούν τη διαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμίων, είναι με τη σειρά οι παρακάτω:

A) DC Small signal polarization: Linear polarization method

Αφού σταθεροποιηθεί το δυναμικό, ενεργοποιούμε το PowerCorr. Το εύρος δυναμικού πόλωσης έχει οριστεί σε $\pm 20\text{mV}$. Το μεταλλικό ηλεκτρόδιο πολώνεται αρχικά καθοδικά ($-20\text{mV vs } E_{corr}$) και κατόπιν ανοδικά ($+20\text{mV vs } E_{corr}$).

Άλλες παράμετροι που ορίζονται είναι ο ρυθμός σάρωσης (scan rate = 0,1mV), η πυκνότητα (density = 7,85 gr/ml), το ισοδύναμο βάρος (Equivalent Weight=55,5 gr), ενώ τέλος επιλέγεται το ηλεκτρόδιο του κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς, καθώς και ο τύπος του Working Electrode ως Solid Electrode.

B) AC Response in Frequency Domain: Electrochemical Impedance Spectroscopy.

Επιλέγεται το ηλεκτρόδιο του κορεσμένου καλομέλανα (SCE: Saturated Calomel Electrode) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς, καθώς και ο τύπος του Working Electrode ως Solid Electrode. Η συχνότητα που επιβάλλεται ορίζεται με τις επιλογές Start Frequency στα 100000 Hz και End Frequency στα 0.1 Hz.

C) DC Large signal polarization: Tafel extrapolation method

Το εύρος του δυναμικού πόλωσης, είναι πλέον $\pm 250\text{mV}$. Πατώντας "Finish" το PowerCorr εκτελεί το πείραμα.

Να σημειωθεί ότι η επιφάνεια του δοκιμίου που εκτίθεται στο διάλυμα κάθε φορά είναι κυκλική εμβαδού 1cm^2 και ακτίνας $\sim 6\text{mm}$.

4.4 Θάλαμος Αλατονέφωσης

4.4.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η χρήση της μεθόδου της αλατονέφωσης εφαρμόζεται για περισσότερα από 100 χρόνια για τον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη διάβρωση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών, καθώς και για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές εφαρμόζονται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς μετάλλων και επικαλύψεων κατά την εφαρμογή συγκεκριμένου προτύπου. Στην επιστημονική κοινότητα γίνονται εκτεταμένες συζητήσεις σχετικά με την αξία των δοκιμών αυτών. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο η προετοιμασία των δοκιμών, του πειράματος, αλλά και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων να εφαρμόζονται με ακρίβεια. Τότε είναι δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την εφαρμογή προτυποποιημένου «ποσού διάβρωσης» για τη σύγκριση της σχετικής συμπεριφοράς των υλικών ή και των επιστρωμάτων.

Για τη διεξαγωγή δοκιμών διάβρωσης σε επικαλύψεις προστασίας του χάλυβα, προτάθηκε για πρώτη φορά δοκιμή με ουδέτερο διάλυμα αλατονέφωσης στο πλαίσιο του προτύπου ASTM B117. Πολλές βελτιώσεις και αναθεωρήσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια τόσο ως προς τις δοκιμές αλατονέφωσης όσο και στους θαλάμους που χρησιμοποιούνται και τις διατάξεις.

Οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 "Standard method of salt spray (FOG) testing"
- BS368 "Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing"
- ASTM G 85 "Standard practice for modified salt spray (FOG) testing"

Σημειώνεται ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ως συστατικό της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60).

Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες
- Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για μελέτη και ανάλυση. Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερο ρεαλιστικά την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο.

Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Διαφορετικές θερμοκρασίες
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
- Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες

Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% σε θερμοκρασία 35°C. Στα τελευταία 70 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις στο πρότυπο ASTM B 117. Ωστόσο παρά τις βελτιώσεις αποτελεί κοινό τόπο ότι τα αποτελέσματα δοκιμών αλατονέφωσης σε στατικές συνθήκες δεν ανταποκρίνονται στα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται στο περιβάλλον λειτουργίας.

Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Οι δοκιμές κυκλικής διάβρωσης θεωρούνται περισσότερο ρεαλιστικές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές προκαλείται διάβρωση των υλικών κατά τρόπο που ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα από τους συμβατικούς τρόπους έκθεσης. Δεδομένου ότι στο περιβάλλον λειτουργίας ενός υλικού περιλαμβάνονται συνήθως υγρές και ξηρές συνθήκες, στόχος είναι οι εργαστηριακές δοκιμές να προσομοιάζουν τις φυσικές κυκλικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας αποδεικνύουν ότι στις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης ο σχετικός ρυθμός διάβρωσης, η δομή και η μορφολογία που προκύπτει προσομοιάζουν το περιβάλλον λειτουργίας. Κατά τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης, τα δοκίμια εκτίθενται σε διαφορετικό περιβάλλον σε επαναλαμβανόμενο κύκλο. Οι απλοί κύκλοι αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες συνθήκες αλατονέφωσης και ξήρανσης. Οι πιο σύγχρονες αυτόματες μέθοδοι περιλαμβάνουν κύκλους πολλών βημάτων, όπως, υγρασία ή συμπύκνωση μαζί με αλατονέφωση και ξήρανση.

Για τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα που καθορίζουν με ακρίβεια τις συνθήκες του πειράματος:

- ASTM G85 "Standard practice for modified salt spray (FOG) testing"
- ISO 14993 (2001) "Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, "dry" and "wet" conditions"

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη μελέτη της διάβρωσης των χαλύβων και των συγκολλήσεών τους, υιοθετήθηκε το πρότυπο ISO 14993 (2001).

4.4.2 Κυκλικές δοκιμές κατά το πρότυπο ISO 14993 (2001)

Σε αυτή την περίπτωση οι συνθήκες εντός του θαλάμου εναλλάσσονται κυκλικά, στις φάσεις **αλατονέφωση, ξήρανση** και **υγρασία**.

Παρακάτω παρουσιάζεται κάθε μία φάση ξεχωριστά, καθώς και οι συνθήκες που επικρατούν στο θάλαμο σε κάθε μια από αυτές.

A. Αλατονέφωση (Fog), (Σχήμα 4.2):

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αλατονέφωσης, ο θάλαμος λειτουργεί ως συμβατική διάταξη αλατονέφωσης:

- Ο συμπιεσμένος αέρας υγροποιείται περνώντας από τη στήλη φυσαλίδων (bubble tower) κατά τη διαδρομή του προς το ακροφύσιο ψεκασμού.
- Διαβρωτικό διάλυμα αντλείται από την εσωτερική δεξαμενή (reservoir) στο ακροφύσιο ψεκασμού, όπου αναμιγνύεται με το συμπιεσμένο αέρα.
- Το ακροφύσιο ψεκασμού ατμοποιεί το διάλυμα και τον αέρα, δημιουργώντας νέφος διάβρωσης.
- Οι θερμοστάτες του θαλάμου (chamber heaters) διατηρούν την προγραμματισμένη θερμοκρασία του θαλάμου.

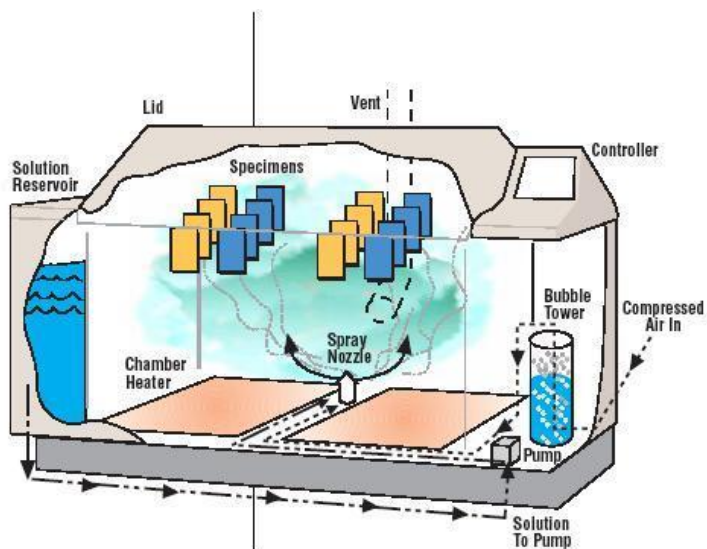
B. Ξήρανση (Dry), (Σχήμα 4.3):

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, ο συμπιεστικός αέρας οδηγεί τον αέρα του δωματίου σε ένα θερμοστάτη αέρος στο θάλαμο. Αυτό δημιουργεί συνθήκες χαμηλής υγρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου. Η θερμοκρασία του θαλάμου ελέγχεται από τους θερμοστάτες του θαλάμου και το θερμοστάτη αέρος.

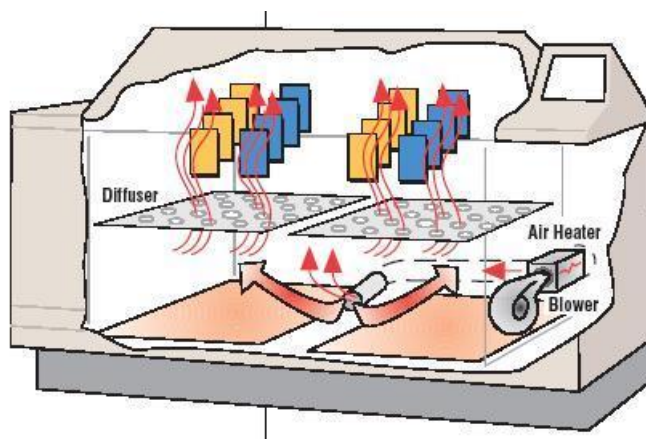
Γ. Υγρασία (Humid), (Σχήμα 4.4):

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτής, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας παρέχοντας ατμούς νερού στο θάλαμο.

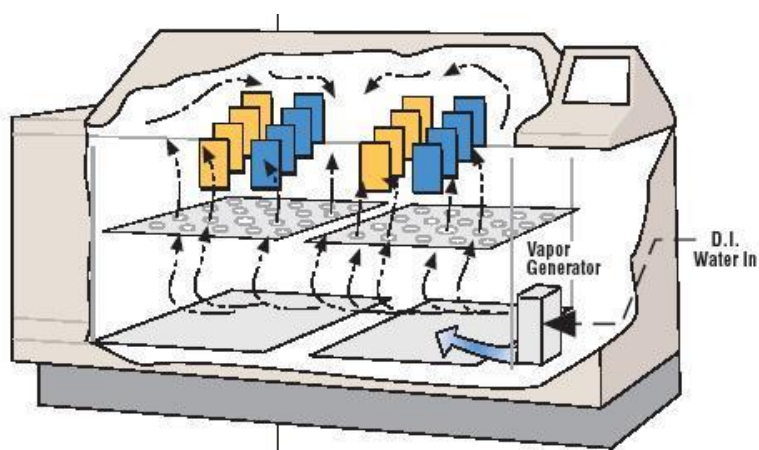
Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση ενός πλήρους κύκλου στο θάλαμο αλατονέφωσης.



Σχήμα 4.2: Συνθήκες Αλατονέφωσης στον κλιματικό θάλαμο.



Σχήμα 4.3: Συνθήκες Ξήρανσης στον κλιματικό θάλαμο.



Σχήμα 4.4: Συνθήκες Υγρασίας στον κλιματικό θάλαμο.

4.4.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά Θαλάμου

Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική είναι ο Q FOG CCT1100 (εικόνα 4.10), της εταιρείας Q Panel και διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ονομαστικό μέγεθος 1100 l
- Χωρητικότητα με υγρό 1103 l
- Χωρητικότητα χωρίς υγρό 857 l



Εικόνα 4.10: Θάλαμος αλατονέφωσης (Q FOG CCT 1100)

Ο θάλαμος αλατονέφωσης είναι αρκετά μεγάλης χωρητικότητας ώστε να διασφαλίζονται ομοιογενείς συνθήκες κατανομής συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανομής ψεκασμού. Τα ανώτερα μέρη του θαλάμου σχεδιάζονται έτσι ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται από την αλατονέφωση στις επιφάνειές του να μην πέφτουν στα δείγματα.

Τα κυριότερα μέρη του θαλάμου είναι τα εξής:

- 1) **Έλεγχος:** Οι συνθήκες δοκιμών ελέγχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας.
- 2) **Δοχείο διαλύματος άλατος:** Τα 120 λίτρα εξασφαλίζουν αρκετό διάλυμα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί αλατονέφωση για 5 συνεχόμενες ημέρες.
- 3) **Στήλη φυσαλίδων (Bubble tower):** Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο κορεσμός του αέρα με υγρασία πριν να φτάσει το ακροφύσιο εκνέφωσης. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται κορεσμός του αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του θαλάμου. Η θερμοκρασία και ο κορεσμός ελέγχονται αυτόματα.
- 4) **Γεννήτρια ατμού (Vapor generator):** Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υγρασίας, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας από ατμούς που παράγονται κατά τη θέρμανση νερού στο Vapor generator.
- 5) **Συμπιεστής αέρα (Purge Blower) και Εναλλάκτης θερμότητας (Air Heater):** Ο συμπιεστής αέρα ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για να φέρνει αέρα δωματίου στο θάλαμο. Όταν απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του εργαστηρίου, ο εναλλάκτης θερμότητας ενεργοποιείται και η ροή αέρος από τον συμπιεστή περνάει από τον ενεργοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας στη διαδρομή του προς το θάλαμο.
- 6) **Θερμαντικές πλάκες:** Οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες στον πυθμένα του θαλάμου. Χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης. Επίσης ενεργοποιούνται, όποτε χρειάζεται, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για τη διατήρηση της προγραμματισμένης θερμοκρασίας θαλάμου.

Πρότυπη δοκιμή κατά ISO 14993:2001

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πειραματική διαδικασία εκτελέστηκε με βάση την πρότυπη διαδικασία ISO 14993 (2001). Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο ISO 14993 αναφέρεται σε «Διάβρωση μετάλλων και κραμάτων – Επιταχυνόμενη δοκιμή που περιλαμβάνει κυκλική έκθεση σε συνθήκες αλατονέφωσης, ξήρανσης και υγρασίας». Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται η διάταξη και η πειραματική διαδικασία δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης για τη συγκριτική εκτίμηση υλικών με ή χωρίς προστατευτικές επικαλύψεις σε εξωτερικό περιβάλλον με υψηλά ποσοστά αλάτων. Το πρότυπο αυτό εφαρμόζεται για μέταλλα και κράματα, μεταλλικά επιστρώματα (ανοδικά και καθοδικά), οργανικά επιστρώματα σε μεταλλικά υλικά κλπ.

4.4.4 Προετοιμασία Δοκιμών

Αρχικά, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα της επιταχυνόμενης γήρανσης, προέρχονται από τις εξής πλάκες:

- ✓ Μία πλάκα που περιέχει μόνο συγκολλημένα δοκίμια AH36-S690 με Υβριδική Laser-τόξου συγκόλληση (15 δοκίμια), με πάχος 17.56 mm και
- ✓ Τρεις πλάκες που περιέχουν συγκολλημένα δοκίμια, αλλά και μέταλλα βάσης, AH36-S690 με συγκόλληση FCAW (27 δοκίμια), με πάχος 12.5 mm.

Τα δοκίμια προκύπτουν μετά από την κοπή των πλακών αυτών σε τμήματα διαστάσεων 100x70mm, και ο χαρακτηρισμός των δοκιμών γίνεται ως ijk , όπου:

- 1) i : ο αριθμός της πλάκας : I, II, ..., X
- 2) j : η σειρά στην οποία ανήκει το δοκίμιο (A, B, C, όπου το B αντιστοιχεί πάντα σε δοκίμιο με συγκόλληση και τα A,C στα εκάστοτε δοκίμια μετάλλου βάσης εκατέρωθεν αυτού)
- 3) k : η στήλη στην οποία ανήκει το δοκίμιο (1 - 4 για τις πλάκες πάχους 12.5 mm, 1 - 6 για τις πλάκες πάχους 17.56 mm)

Για την υβριδική συγκόλληση Laser-τόξου

Η πλάκα αυτή (την ορίζουμε ως πλάκα I) περιέχει μόνο μία σειρά δοκιμών (σειρά A), οπότε οι ονομασίες των δοκιμών προκύπτουν από τη σειρά τοποθέτησής τους στην πλάκα ως:

$$IA_i, i=1,2, 3, \dots, 15.$$

Η αρίθμηση γίνεται πιο σαφής στο Σκίτσο 4.1:

IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	IA6	IA7	IA8	IA9	IA10	IA11	IA12	IA13	IA14	IA15

Σκίτσο 4.1: Αρίθμηση δοκιμών της υβριδικής συγκόλλησης Laser-τόξου

Για τη συγκόλληση FCAW

Εδώ οι τρεις πλάκες ορίζονται με τη σειρά ως πλάκες II, III και IV, και χωρίζονται σε τρεις οριζόντιες ομάδες (δηλαδή τις σειρές A, B και C). Έτσι, οι ονομασίες των δοκιμών προκύπτουν από την ονομασία της πλάκας, την σειρά στην οποία ανήκουν, καθώς και τη θέση όπου είναι τοποθετημένα. Η αρίθμηση γίνεται πιο σαφής στο Σκίτσο 4.2:

IIA1	IIA2	IIA3	IIIA1	IIIA2	IIIA3	IVA1	IVA2	IVA3
IIB1	IIB2	IIB3	IIIB1	IIIB2	IIIB3	IVB1	IVB2	IVB3
IIIC1	IIIC2	IIIC3	IIIC1	IIIC2	IIIC3	IVC1	IVC2	IVC3

Σκίτσο 4.2: Αρίθμηση δοκιμών της συγκόλλησης FCAW

Πριν όμως τα δοκίμια εισέλθουν στον κλιματικό θάλαμο, είναι απαραίτητο να προετοιμαστούν ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιοποιήσιμα. Η προετοιμασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- 1) Αμμοβολή του δοκιμίου, προς απομάκρυνση των διαφόρων επικαλύψεων (shop primer) και ακαθαρσιών, με την εισαγωγή του δοκιμίου στον θάλαμο αμμοβολής του ENT (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Θάλαμος αμμοβολής του μηχανουργείου του ENT

Ακολουθούν εικόνες ενός δοκιμίου πριν και μετά την αμμοβολή (Εικόνες 4.12 και 4.13):

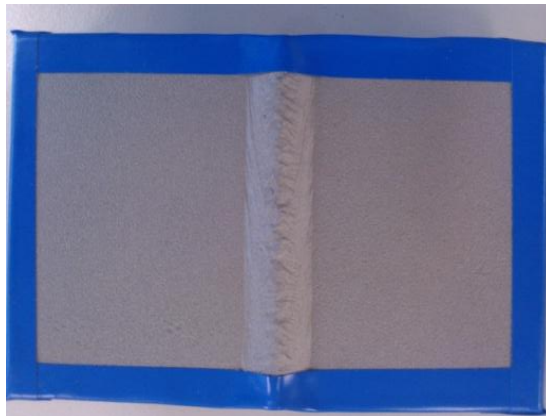


Εικόνα 4.12: Δοκίμιο Υβριδικής συγκόλλησης Laser- tandem τόξου AH36-S690 πριν την αμμοβολή



Εικόνα 4.13: Δοκίμιο Υβριδικής συγκόλλησης Laser- tandem τόξου AH36-S690 μετά την αμμοβολή

- 2) Καθαρίζονται με απιονισμένο νερό, στη συνέχεια με αιθανόλη και ακολουθεί στέγνωμα με παροχή θερμού αέρα.
- 3) Ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας (3 δεκαδικά) ακριβώς μετά την αμμοβολή και τον καθαρισμό, ώστε να υπάρχει σαφής εικόνα του βάρους του μετάλλου.
- 4) Τέλος, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14993 στο θάλαμο τα δοκίμια εκτίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον μόνο από τη μία πλευρά. Για το λόγο αυτό οι υπόλοιπες πλευρές του κάθε δοκιμίου επικαλύφθηκαν με προστατευτική ταινία (3M 471 Vinyl Tape) (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14: Κάλυψη του δοκιμίου με μονωτική ταινία

- 5) Εφόσον το δοκίμιο έχει ζυγισθεί και έχει καλυφθεί με την μονωτική ταινία, υπολογίζουμε το εμβαδό της ελεύθερης επιφάνειας. Πλέον το δοκίμιο είναι έτοιμο για το πείραμα του θαλάμου αλατονέφωσης.

Ένας κύκλος έκθεσης στον θάλαμο επιταχυνόμενης γήρανσης διαρκεί οκτώ ώρες, και λαμβάνουν χώρα οι φάσεις που περιγράφονται στον Πίνακα 4.10:

Πίνακας 4.10: Συνθήκες έκθεσης δοκιμίων στον κλιματικό θάλαμο

1	Συνθήκες αλατονέφωσης (Fog) (1) Θερμοκρασία (2) Διάλυμα άλατος	2 ώρες 35 °C±2 °C 50 g/l ± 5 g/l Διάλυμα NaCl
2	Συνθήκες Ξήρανσης (Dry) (παροχή αέρα σε συνθήκες ξήρανσης) (1) Θερμοκρασία (2) Σχετική υγρασία	4 ώρες 60 °C±2 °C <30%RH
3	Συνθήκες Υγρασίας (Humid) (1) Θερμοκρασία (2) Σχετική υγρασία	2 ώρες 50 °C±2 °C >90%RH

Σημειώνεται ότι στους χρόνους αυτούς περιλαμβάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει το σύστημα την καθορισμένη θερμοκρασία σε κάθε μεταβολή.

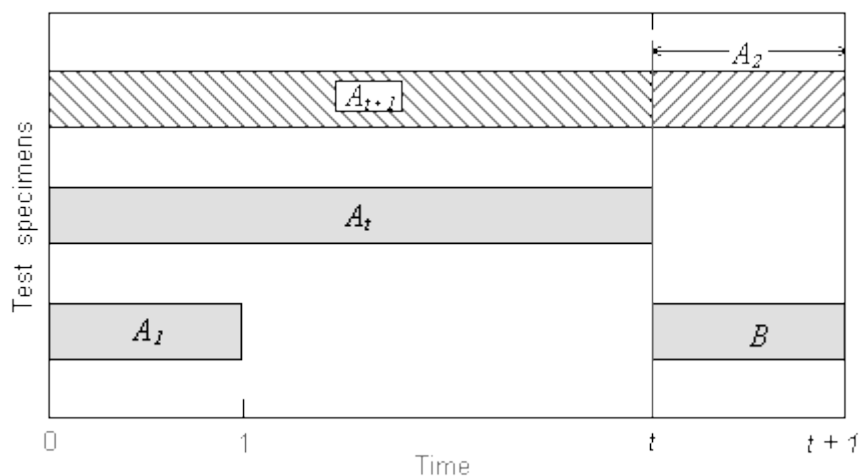
Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικές υποδοχές από αδρανές, μη μεταλλικό υλικό, υπό γωνία 15°–25°. Για την στήριξη και τη διατήρηση της θέσης των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο χρησιμοποιήθηκαν διαμορφωμένα racks από fiberglass.

4.4.5 Τοποθέτηση δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης- *Planned Interval Test*

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G31-72 (1999), τρόπος γνωστός και ως *Planned Interval Test*.

Η προτεινόμενη διαδικασία του *Planned Interval Test* είναι η (Σχήμα 4.5):

- **Δοκίμιο A_1** : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο που αντιστοιχεί σε μια χρονική μονάδα (unit time).
- **Δοκίμιο A_t** : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο t .
- **Δοκίμιο A_{t+1}** : Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο $t+1$ (όπου $1 = \text{unit time}$).
- **Δοκίμιο B** : Αντικαθιστά το δοκίμιο A_t όταν αυτό απομακρυνθεί από το θάλαμο σε χρόνο t και βγαίνει μαζί με το δοκίμιο A_{t+1} , δηλαδή παραμένει συνολικά στο θάλαμο χρόνο ίσο με unit time.



Σχήμα 4.5 : Σχηματική αναπαράσταση του *Planned Interval Test*.

Κατά αυτόν τον τρόπο με τη σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης των A και B που παραμένουν τον ίδιο χρόνο αλλά σε διαφορετικές περιόδους μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούν στο θάλαμο και αν αυτές μεταβάλλονται (διαβρωτικό περιβάλλον).

Συγκρίνοντας δε το ρυθμό διάβρωσης του B με τη διαφορά του ρυθμού διάβρωσης μεταξύ των A_t και A_{t+1} , βλέπουμε πως συμπεριφέρεται το μέταλλο όσο διαβρώνεται. Φαίνεται δηλαδή αν ο ρυθμός διάβρωσης είναι σταθερός, αν αυξάνεται με την πρόοδο της διάβρωσης ή αν μειώνεται. Στην παρούσα διπλωματική, θεωρήθηκε $\text{unit time} = 5$ ημέρες και η τοποθέτηση των δοκιμίων στο θάλαμο κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο δοκίμια που θα παραμείνουν τον ίδιο χρόνο μέσα στο θάλαμο, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Οργάνωση προγράμματος έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο

Η έναρξη του προγράμματος έγινε την 24^η Απριλίου του 2015 και διήρκησε έως την 25^η Μαΐου του 2015.

Το πρόγραμμα εισόδου και εξόδου των δοκιμών από τον θάλαμο επιταχυνόμενης γήρανσης κατασκευάστηκε σύμφωνα με το Planned Interval Test και οι σαφείς ημερομηνίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12:

Πίνακας 4.12: Πρόγραμμα εισόδου- εξόδου δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο

	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΒΑΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ (gr)	ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ A (cm²)
<i>t=0</i>	24/4/2015	IA1	1062.2	45.067
		IA2	1041	46.003
		IA3	1007.1	45.107
		IA4	1002.3	49.761
		IA6	1029.7	49.150
		IA12	1008.3	48.308
		IIB1	752.2	31.136
		IIB2	749.9	49.078
		IIB3	738.6	47.638
		IIIB2	712.1	46.673
		IVB3	711.7	44.083
		IIA1	752.8	48.361
		IIA2	726.3	39.967
		IIIC2	660.6	40.360
		IVC2	697.2	51.767
<i>t=5</i>	29/4/2015	IA5*	938.3	44.698
		IA7*	1026.6	48.272
		IIIB3*	736.1	48.496
<i>t=10</i>	5/5/2015	IA8*	1055.1	52.962
		IA9*	1066.3	50.930
		IVB1*	720.5	50.776
		IVB2*	710.2	48.772
<i>t=15</i>	10/5/2015	<i>καμία είσοδος</i>	-	-
<i>t=20</i>	15/5/2015	IA10*	1029.9	50.435
		IA11*	1065.5	52.256
<i>t=25</i>	20/5/2015	<i>καμία είσοδος</i>	-	-
<i>t=30</i>	25/5/2015	<i>καμία είσοδος</i>	-	-

Η τοποθέτηση των δοκιμών μέσα στο θάλαμο έγινε έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η διαβρωτικότητα του θαλάμου καθώς επίσης και να υπάρχει επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα.

4.4.6 Έξοδος των δοκιμών από το θάλαμο αλατονέφωσης

Μετά την απομάκρυνση κάθε δοκιμίου από το θάλαμο, ακολούθησε ο καθαρισμός και η επεξεργασία τους.

1) Καθαρισμός των δοκιμών από τα προϊόντα διάβρωσης

Για την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης και τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης επελέγη η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 8407 (1991).

Μετά την απομάκρυνση από το θάλαμο τα δοκίμια καθαρίζονται με απιονισμένο νερό και κατόπιν εμβαπτίζονται σε διάλυμα 1000 ml, για όσο χρόνο χρειαστεί, που αποτελείται από:

- 500ml HCl (37%)
- 3.5 gr τετρ-αμινο-εξαμεθυλένιο (hexamethyletetramine)
- απιονισμένο νερό έως τη συμπλήρωση 1000ml

Μετά την έκθεση στο διάλυμα τα δοκίμια καθαρίζονται με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και ξηραίνονται με παροχή θερμού αέρα.

2) Υπολογισμός απώλειας μάζας

Στη συνέχεια τα δοκίμια ζυγίζονται ξανά και από την απώλεια μάζας υπολογίζεται ο ρυθμός διάβρωσης με βάση τον τύπο:

$$Corrosion\ Rate = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

Όπου:

K : σταθερά (ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης (πίνακας 4.11)

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης (cm²) (με ακρίβεια 0.01cm²)

T : χρόνος έκθεσης σε ώρες (με προσέγγιση 0.01h)

D : πυκνότητα του χάλυβα (g/cm³), όπου για τα δύο κράματα AH36 και S690 θεωρήθηκε ίση με 7.86 ^{gr}/cm².

Πίνακας 4.11: Τιμές σταθεράς K για διαφορετικές μονάδες μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης

Μονάδες ρυθμού διάβρωσης	Σταθερά (K)
mils per year (mpy)	3,45x10 ⁶
inches per year (ipy)	3,45x10 ³
inches per month (ipm)	2,87x10 ²
millimeters per year (mm/y)	8,76x10 ⁴
micrometres per year (µm/y)	8,76x10 ⁷
picometres per second (pm/s)	2,78x10 ⁶
grams per square metre per hour (g/m ² h)	1,00x10 ⁴ xD ^A
milligrams per square 145ecimetre per day (mdd)	2,40x10 ⁶ xD ^A
micrograms per square metre per second (µg/m ² s)	2,78x10 ⁶ xD ^A

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα- Συζήτηση

5.1 Εισαγωγή

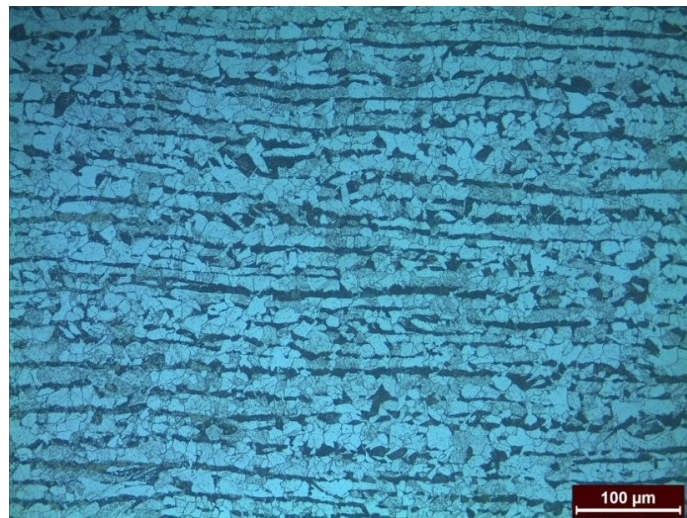
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε, με τη σειρά που παρουσιάστηκαν οι διαδικασίες στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταλλογραφίας, τόσο από το μικροσκόπιο όσο και από το στερεοσκόπιο. Έπειτα, δίνονται τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης, των ηλεκτροχημικών μεθόδων και τέλος του θαλάμου αλατονέφωσης. Σημειώνεται ότι όπως προαναφέρθηκε τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι 24 στο σύνολο. Από αυτά, τα 12 ανήκουν στην πρώτη σειρά συγκόλλησης Υβριδική laser- tandem τόξου: AH36 - S690 με πάχος συγκόλλησης 17.56 mm, τα 8 ανήκουν στη δεύτερη σειρά συγκόλλησης FCAW: AH36 - S690 με πάχος συγκόλλησης 12.5 mm, και τα υπόλοιπα δοκίμια είναι δύο του μετάλλου βάσης AH36, και δύο του μετάλλου βάσης S690 με πάχος 12 mm.

5.2 Μεταλλογραφική μελέτη των δοκιμών

5.2.1 Μέταλλα βάσης

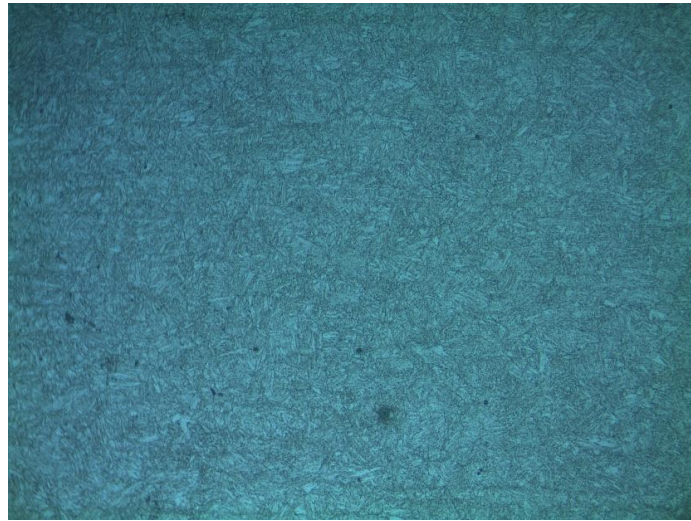
Αρχικά, παρατηρείται ότι ο AH36 αποτελείται από φερριτο-περλιτική μικροδομή όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 5.1. Η φερριτική δομή η οποία εκφράζεται με τις ανοιχτόχρωμες περιοχές έχει μεγαλύτερη έκταση, το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της χημικής σύστασης του χάλυβα (0.18% C). Παράλληλα, οι κόκκοι τόσο του φερρίτη όσο και του περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό, ο οποίος οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία (έλαση) των ελασμάτων του χάλυβα. Ο προσανατολισμός των κόκκων είναι κάθετος στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου (Εικόνα 5.1).

Οι σκουρόχρωμες περιοχές αποτελούνται από περλίτη, ενώ οι ανοιχτόχρωμες από φερρίτη.



Εικόνα 5.1: Μέταλλο βάσης χάλυβα AH36

Αντίθετα, στον S690 παρατηρείται δομή η οποία αποτελείται από περλίτη και μπαινίτη καθώς και μαρτενσίτη από επαναφορά (Εικόνα 5.2). Δεν εμφανίζεται ο προσανατολισμός των κόκκων εξαιτίας της θερμομηχανικής κατεργασίας που έχει υποστεί (βαφή και επαναφορά, κατά τον τρόπο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1).



Εικόνα 5.2: Μέταλλο βάσης χάλυβα S690

5.2.2 Υβριδική Συγκόλληση Laser- tandem τόξου AH36-S690

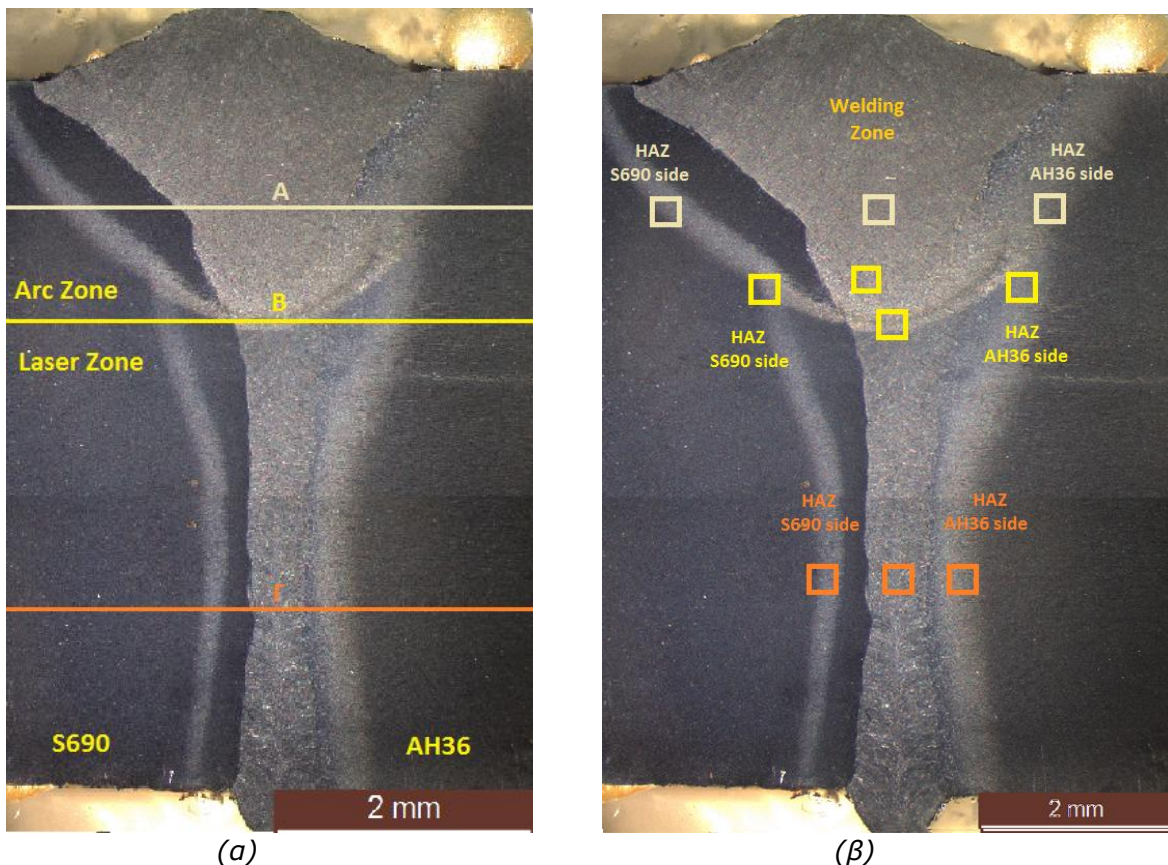
Η μελέτη έγινε στο μέτωπο της υβριδικής συγκόλλησης laser - τόξου AH36-S690, με δοκίμιο διαστάσεων 17.56 x 19.09 mm:

- Το πάχος των δύο πλακών που συγκολλήθηκαν είναι 17.56 mm
- Το πλάτος του δοκιμίου μελέτης είναι 19.09 mm

Το δοκίμιο έχει εγκιβωτιστεί σε εποξειδική ρητίνη και έχει προετοιμαστεί με τις διαδικασίες λείανσης, στίλβωσης και χημικής προσβολής ώστε να προχωρήσει η παρατήρηση στο στερεοσκόπιο και στο μικροσκόπιο.

Για την καλύτερη μελέτη του δοκιμίου, η μικροσκληρομέτρηση και η μελέτη της μικροδομής πραγματοποιήθηκαν στις ίδιες περιοχές, με σκοπό τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων. Έτσι, ορίστηκαν οι ευθείες A: κατά το μήκος της ζώνης Arc, B: κατά το μήκος της ενδιάμεσης ζώνης μεταξύ Arc και Laser, και Γ: κατά το μήκος της ζώνης Laser, για τη μικροσκληρομέτρηση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3 α. Στη συνέχεια, στις ίδιες ευθείες μελετήθηκε η μικροδομή των περιοχών της συγκόλλησης (Θερμικά Επηρασμένες Ζώνες εκατέρωθεν της ζώνης συγκόλλησης, και των ίδιων Ζωνών Συγκόλλησης). Οι περιοχές μελέτης της μικροδομής σημειώνονται στην Εικόνα 5.3 β.

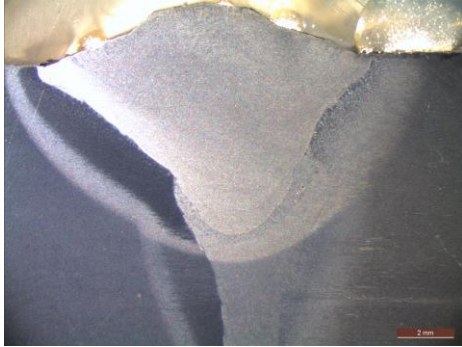
Ο άξονας της συγκόλλησης είναι ευδιάκριτος, και στην εικόνα σημειώνεται η ανώτερη περιοχή της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το τόξο (Arc Zone), καθώς και η κατώτερη περιοχή, όπου εργάζεται το laser (Laser Zone).



Εικόνα 5.3: α) Περιοχές μέτρησης της μικροσκληρότητας, A: κατά το μήκος της ζώνης Arc, B: κατά το μήκος της ενδιάμεσης ζώνης μεταξύ Arc και Laser, και Γ: κατά το μήκος της ζώνης Laser και β) Μελέτη της μικροδομής στις περιοχές των ζωνών A, B και Γ.

5.2.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται λεπτομερώς η ζώνη του τόξου (ανώτερη περιοχή της συγκόλλησης) και στην Εικόνα 5.6 η ζώνη του Laser (κατώτερη περιοχή) του μετώπου της υβριδικής laser-τόξου συγκόλλησης S690-AH36. Οι φωτογραφίες ελήφθησαν από το Στερεοσκόπιο του ENT.



Εικόνα 5.5: Ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το tandem τόξο (Arc Zone)



Εικόνα 5.6: Κατώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser (Laser Zone)

5.2.2.2 Μικροσκοπική παρατήρηση επιφανειών ανά περιοχή

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.2.2, η μελέτη της μικροδομής έγινε κατά μήκος των ευθειών που έγινε και η μικροσκληρομέτρηση, ώστε να είναι δυνατός ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι περιοχές της μικροδομής κατά μήκος των ευθειών αυτών, δηλαδή Α: κατά το μήκος της ζώνης Arc, Β: κατά το μήκος της ενδιάμεσης ζώνης μεταξύ Arc και Laser, και Γ: κατά το μήκος της ζώνης Laser.

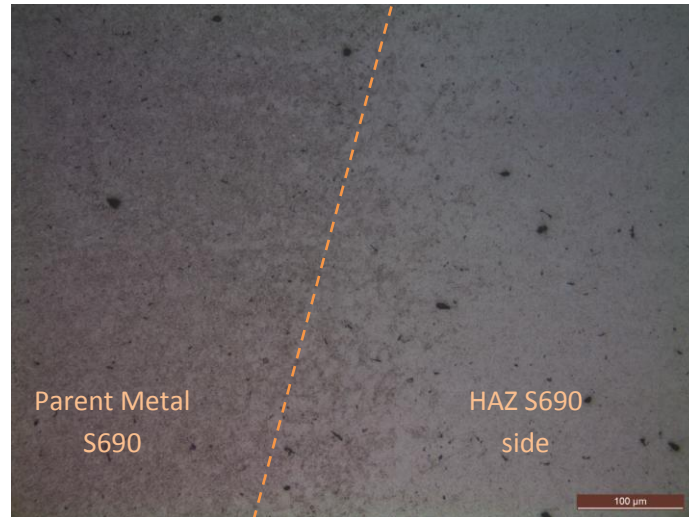
Παρουσιάζονται δηλαδή οι μικροδομές στα ύψη των ευθειών Α, Β και Γ:

- α) της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690
- β) της Ζώνης Τήξης της Συγκόλλησης και
- γ) της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36

A. Ανώτερο μέρος της υβριδικής συγκόλλησης (Arc Zone)

α) *Θερμικά επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690*

Η περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη, καθώς και μπαινίτη από επαναφορά. Στην Εικόνα 5.7 φαίνεται η μικροδομή της περιοχής αυτής, και είναι ευδιάκριτη η μετάβαση από τη ΘΕΖ στο μέταλλο βάσης S690.

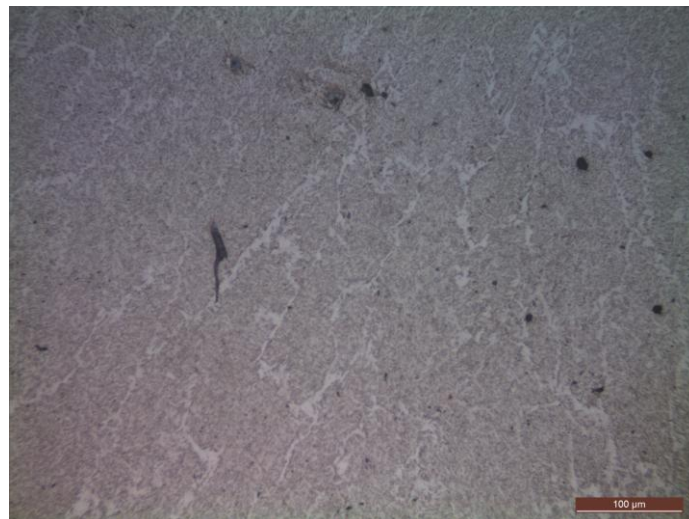


Εικόνα 5.7: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 του ανώτερου μέρους (Arc Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36.

Όπως παρατηρείται (Εικόνα 5.7), η ΘΕΖ από την πλευρά του S690 αποτελείται από μία σκουρόχρωμη και μία ανοιχτόχρωμη περιοχή. Η σκουρόχρωμη περιοχή οφείλεται στην μεγέθυνση των κόκκων του S690 λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας (πλησιέστερα στη ζώνη τήξης), με αποτέλεσμα χονδρόκοκκη δομή. Η ανοιχτόχρωμη περιοχή χαρακτηρίζεται από λεπτούς κόκκους, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας εκεί δεν είναι τόσο ισχυρή ώστε να επηρεάσει τους κόκκους της.

β) Ζώνη τήξης στην Arc Zone

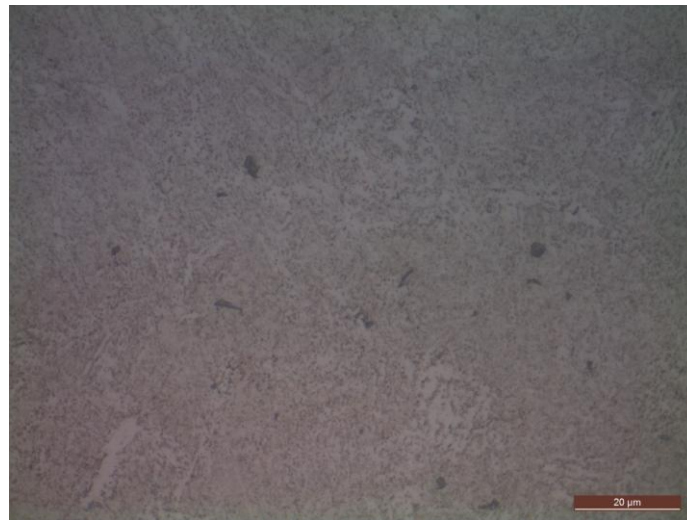
Στην περιοχή που εργάζεται το tandem τόξο (άνωτερο μέρος της υβριδικής συγκόλλησης), η ζώνη της συγκόλλησης παρουσιάζει φερριτο-μπαινιτική μικροδομή. Οι κόκκοι είναι διαμήκεις δενδριτικοί, και έχουν χαρακτηριστική μορφολογία ταχείας στερεοποίησης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8: Μικροσκοπική παρατήρηση της ζώνης τήξης του ανώτερου μέρους (Arc Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36.

γ) Θερμικά επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) από την πλευρά του ΑΗ36 στην Arc Zone

Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης ΑΗ36 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης ΑΗ36 του ανώτερου μέρους (Arc Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36.

Β. Κατώτερο μέρος της υβριδικής συγκόλλησης (Laser Zone)

α) Θερμικά επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690

Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη, καθώς και μπαινίτη από επαναφορά (Εικόνα 5.10).



Εικόνα 5.10: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 του κατώτερου μέρους (Laser Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36.

β) Ζώνη τήξης στην Laser Zone

Η ζώνη τήξης στη Laser Zone παρουσιάζει αξονική δενδριτική δομή στο μέσον της ζώνης τήξης, και κιονοειδή δενδριτική δομή εκατέρωθεν του κέντρου της. Οι δενδρίτες αναπτύσσονται κάθετα στις ισόθερμες. Η μορφή αυτή είναι τυπική της ταχείας απόψυξης της ζώνης του laser. Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η μικροδομή αυτής της περιοχής.



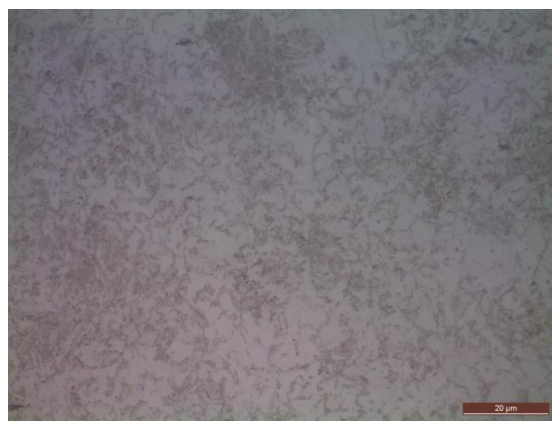
Εικόνα 5.10: Μικροσκοπική παρατήρηση της ζώνης τήξης του κατώτερου μέρους (Laser Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36.

γ) Θερμικά επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) από την πλευρά του AH36 στην Laser Zone

Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη. Κατά την παρατήρηση των περιοχών της συγκόλλησης, γίνεται φανερό πως καθώς πλησιάζει η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης, οι κόκκοι μεγαθύνονται, σε σχέση με τους κόκκους του μετάλλου βάσης AH36. Στην Εικόνα 5.12 α, β παρουσιάζονται δύο μεγεθύνσεις της περιοχής αυτής, και διακρίνονται οι επιμήκεις κόκκοι που τη χαρακτηρίζουν.



(α)

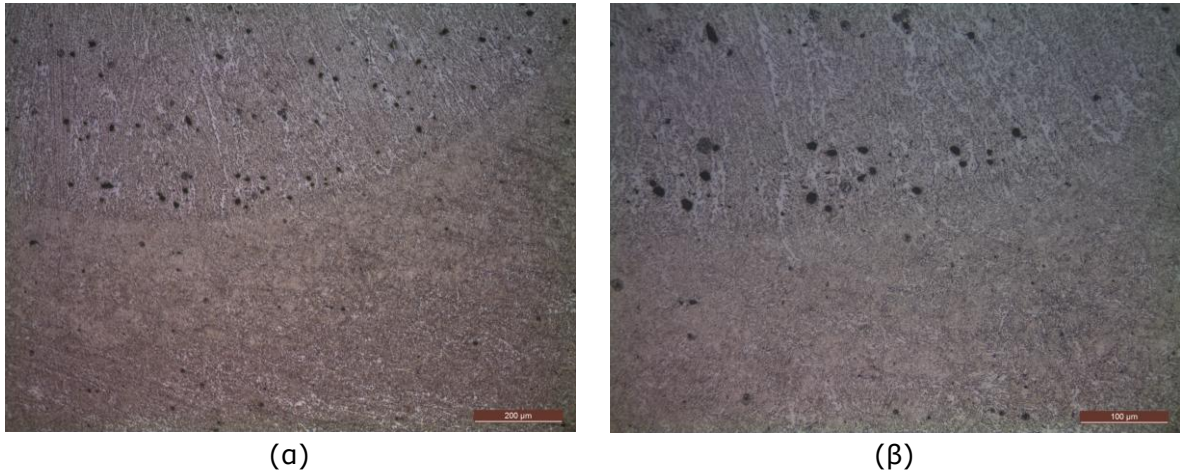


(β)

Εικόνα 5.12: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 του κατώτερου μέρους (Laser Zone) της υβριδικής συγκόλλησης Laser – MAG+Tandem S690-AH36 σε μεγέθυνση μικροσκοπίου α) 10x και β) 20x

Γ. Ζώνη μεταξύ Laser και Arc Zone

Στην περιοχή μεταξύ του Laser και του τόξου (Εικόνα 5.13 (α) και (β)) παρατηρείται το φαινόμενο της επιταξίας. Κατά το φαινόμενο αυτό τα άτομα του υγρού στη διεπιφάνεια υγρού/στερεού τοποθετούνται στις προεκτάσεις των διευθύνσεων των ατόμων της στερεάς προσκείμενης φάσης και στη συνέχεια εμφανίζεται η δημιουργία ενός νέου κρυστάλλου στην προέκταση του πρώτου. Η διαδικασία συνεχίζεται έως την πλήρη κρυσταλλοποίηση, δημιουργώντας τη συγκεκριμένη μορφολογία.



Εικόνα 5.13: Μικροσκοπική παρατήρηση της διαχωριστικής ζώνης μεταξύ της Laser και της Arc Zone: α) μεγέθυνση 10x και β) μεγέθυνση 20x

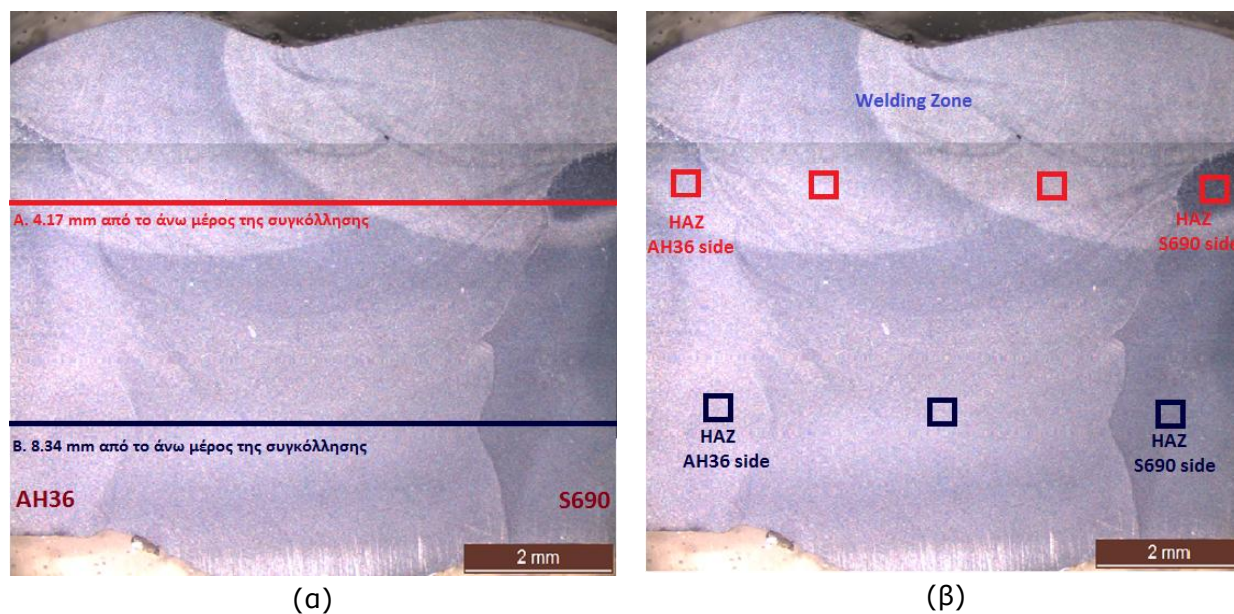
5.2.3 Συγκόλληση FCAW AH36-S690

Η μελέτη έγινε στο μέτωπο της συγκόλλησης FCAW AH36-S690, με δοκίμιο διαστάσεων 12.5 x 28 mm:

- Το πάχος των συγκολλημένων δύο πλακών (ύψος της συγκόλλησης) είναι 12.5 mm.
- Το πλάτος του δοκιμίου μελέτης (μήκος της συγκόλλησης) είναι 28 mm.

Το δοκίμιο έχει εγκιβωτιστεί σε εποξειδική ρητίνη και έχει προετοιμαστεί με τις διαδικασίες λείανσης, στίλβωσης και χημικής προσβολής ώστε να προχωρήσει η παρατήρηση στο στερεοσκόπιο και στο μικροσκόπιο.

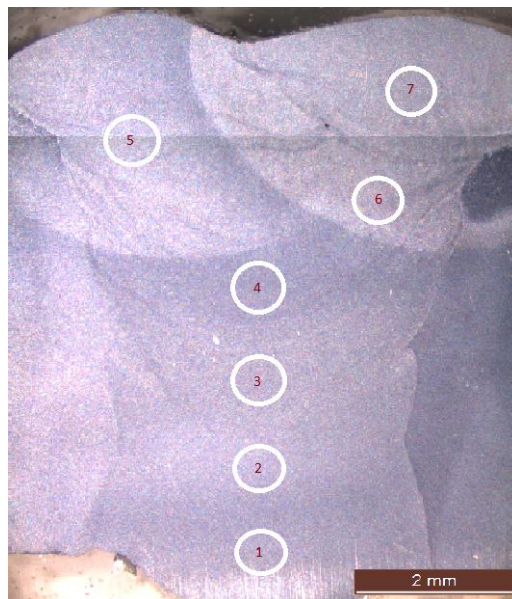
Για την καλύτερη μελέτη της μικροδομής του δοκιμίου, εξετάστηκαν οι ίδιες περιοχές της συγκόλλησης όπου έγινε και η μέτρηση της μικροσκληρότητας, με σκοπό τον συνδυασμό των πληροφοριών που προέκυψαν. Έτσι, η μελέτη επικεντρώθηκε στις περιοχές των ΘΕΖ εκατέρωθεν της συγκόλλησης, καθώς και στη ζώνη τήξης, τόσο στο $\frac{1}{3}$ του πάχους της συγκόλλησης (4.17 mm), όσο και στα $\frac{2}{3}$ του πάχους της (8.34 mm). Παρακάτω (Εικόνα 5.13 α και β), φαίνονται αφενός τα ύψη των μικροσκληρομετρήσεων (ευθεία Α: κατακόρυφη απόσταση 4.17 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης, και ευθεία Β: κατακόρυφη απόσταση 8.34 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης), και αφετέρου οι προαναφερθείσες περιοχές μελέτης της μικροδομής της συγκόλλησης στα ύψη αυτά.



Εικόνα 5.13: α) ύψη μέτρησης της μικροσκληρότητας: Α. 4.17 mm και Β. 8.34 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης και β) περιοχές μελέτης της μικροδομής (ΘΕΖ των μετάλλων βάσης AH36 και S690 και Ζώνη Συγκόλλησης) του μετώπου της συγκόλλησης FCAW AH36-S690 στα ύψη αυτά

5.2.3.1 Μακροσκοπική παρατήρηση επιφανειών

Η συγκόλληση FCAW πραγματοποιήθηκε για την ένωση δύο ανομοιογενών κραμάτων, του HTS AH36 με τον HSLA S690. Η συγκόλληση έγινε με πολλαπλά πάσα, όπως αναφέρεται στο συνοδευτικό έντυπο του Τεχνολογικού Ινστιτούτου Αίμεν, που πραγματοποίησε τη συγκόλληση. Στην Εικόνα 5.14 φαίνεται η ακολουθία των περασμάτων.



Εικόνα 5.14: Ακολουθία των περασμάτων για την FCAW συγκόλληση των κραμάτων AH36 και S690

Στην Εικόνα 5.15 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των διαφόρων περιοχών της συγκόλλησης FCAW AH36-S690 από το στερεοσκόπιο:



(α)
Μέταλλο βάσης AH36, ΘΕΖ και ζώνη τήξης

(β)
Ζώνη τήξης της FCAW

(γ)
Ζώνη τήξης



(δ)
ΘΕΖ και μέταλλο βάσης S690



(ε)
Ζώνη τήξης της FCAW



(στ)
ΘΕΖ και μέταλλο βάσης AH36

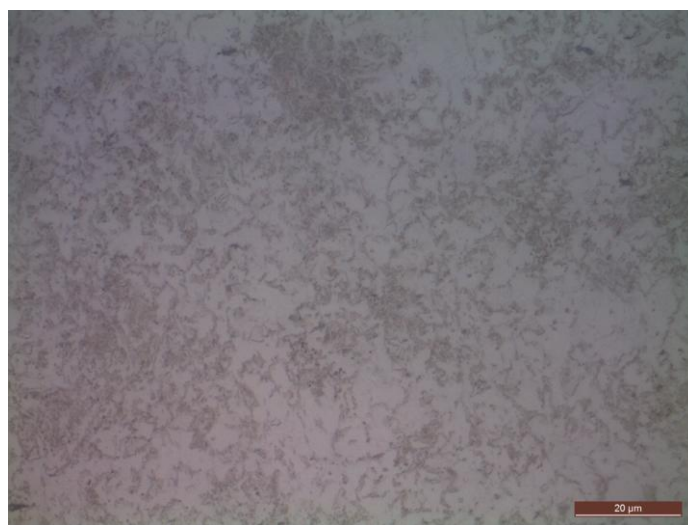
Εικόνα 5.15: Στερεοσκοπικές απεικονίσεις της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 των διαφόρων περιοχών της συγκόλλησης

5.2.3.2 Μικροσκοπική παρατήρηση επιφανειών ανά περιοχή

A. Μελέτη της μικροδομής στο $\frac{1}{3}$ του πάχους της συγκόλλησης (4.17 mm)

α) ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36

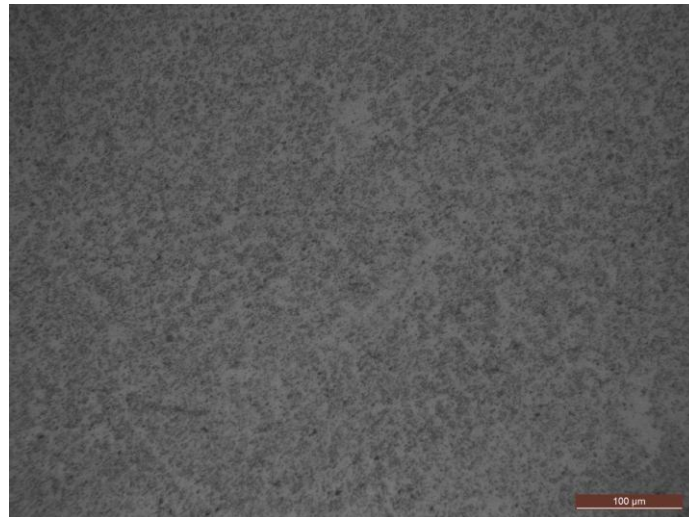
Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη. Κατά την παρατήρηση των περιοχών της συγκόλλησης, γίνεται φανερό πως καθώς πλησιάζει η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης, οι κόκκοι μεγεθύνονται, σε σχέση με τους κόκκους του μετάλλου βάσης AH36. Στην Εικόνα 5.16 παρουσιάζεται η μικροδομή της περιοχής αυτής, και διακρίνονται οι επιμήκεις κόκκοι που τη χαρακτηρίζουν.



Εικόνα 5.16: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 4.17 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης

β) Ζώνη Τήξης

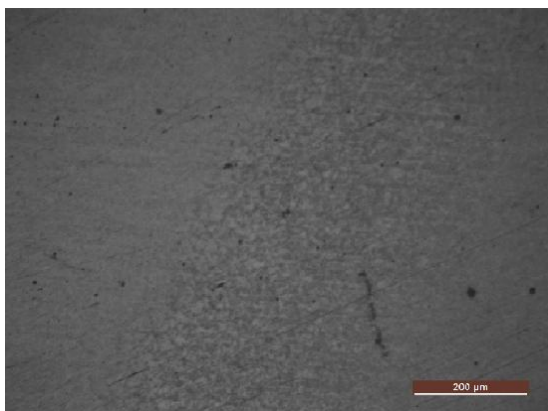
Μελετώντας τη μικροδομή της συγκεκριμένης περιοχής που περιλαμβάνει τη ζώνη τήξης, παρατηρείται ότι παρουσιάζει φερριτο-μπαινιτική μικροδομή, με μεγαλύτερο ποσοστό φερρίτη στη σύστασή της (Εικόνα 5.17). Η ποσότητα του φερρίτη είναι ο λόγος της μειωμένης σκληρότητας της περιοχής (όπως φαίνεται και στην Παράγραφο 5.3.2). Οι κόκκοι έχουν χαρακτηριστική μορφή δενδριτών, κάτι το οποίο οφείλεται στη γρήγορη απόψυξη κατά τη συγκόλληση.



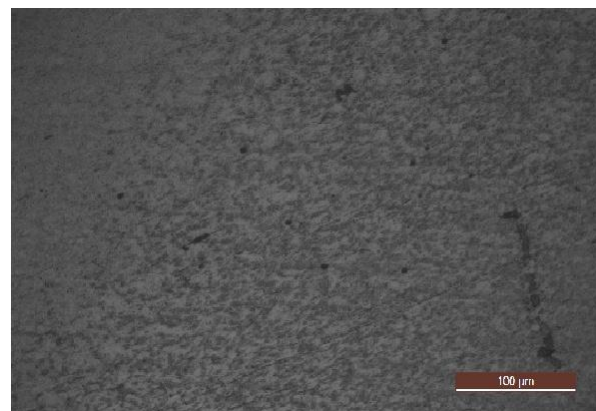
Εικόνα 5.17: Μικροσκοπική παρατήρηση της ζώνης τήξης της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 4.17 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης

γ) ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690

Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται μαρτενσίτη εξ επαναφοράς, μικρό ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη, φερρίτη, καθώς και μπαινίτη (Εικόνα 5.18 α και β). Η περιοχή αυτή παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα (Παράγραφος 5.3.2), που οφείλεται στη σύνθετη μικροδομή της.



(α)



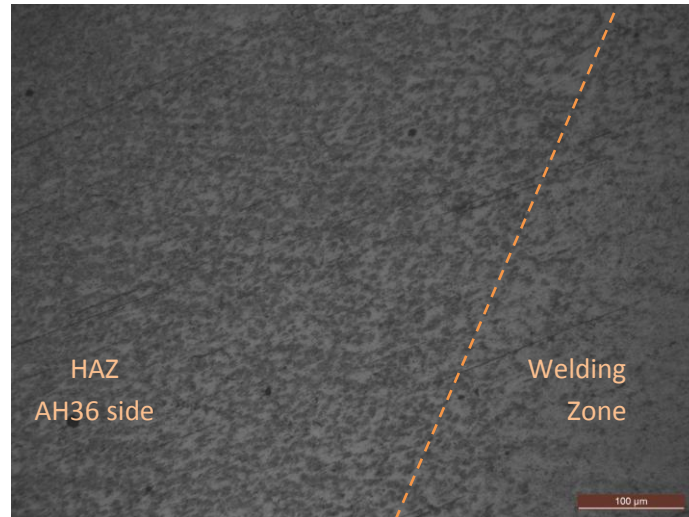
(β)

Εικόνα 5.18: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 4.17 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης, με μεγεθύνσεις α)10x και β)20x

B. Μελέτη της μικροδομής στα $\frac{2}{3}$ του πάχους της συγκόλλησης (8.34 mm)

α) ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36

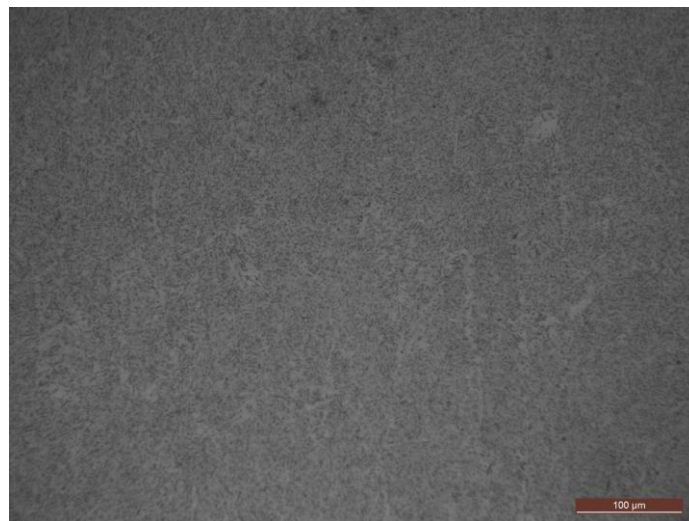
Η περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη. Η μικροδομή φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 5.19, όπου είναι και εμφανής η μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ.



Εικόνα 5.19: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 8.34 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης

β) Ζώνη Τήξης

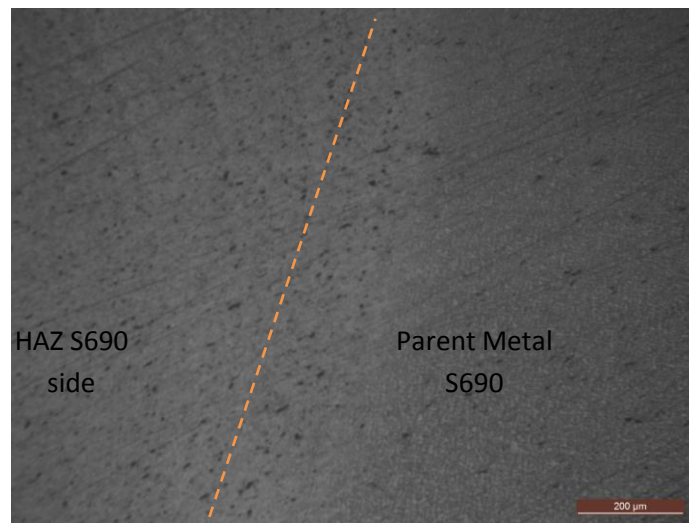
Μελετώντας τη μικροδομή της συγκεκριμένης περιοχής που περιλαμβάνει τη ζώνη τήξης, παρατηρείται ότι παρουσιάζει φερριτο-μπαινιτική μικροδομή, με μεγαλύτερο ποσοστό φερρίτη στη σύστασή της. Η ποσότητα του φερρίτη είναι ο λόγος της μειωμένης σκληρότητας της περιοχής (όπως φαίνεται και στην Παράγραφο 5.3.2). Οι κόκκοι έχουν χαρακτηριστική μορφή δενδριτών (Εικόνα 5.20), κάτι το οποίο οφείλεται στη γρήγορη απόψυξη κατά τη συγκόλληση.



Εικόνα 5.20: Μικροσκοπική παρατήρηση της ζώνης τήξης της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 8.34 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης

γ) ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690

Η περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη, καθώς και μπαινίτη.



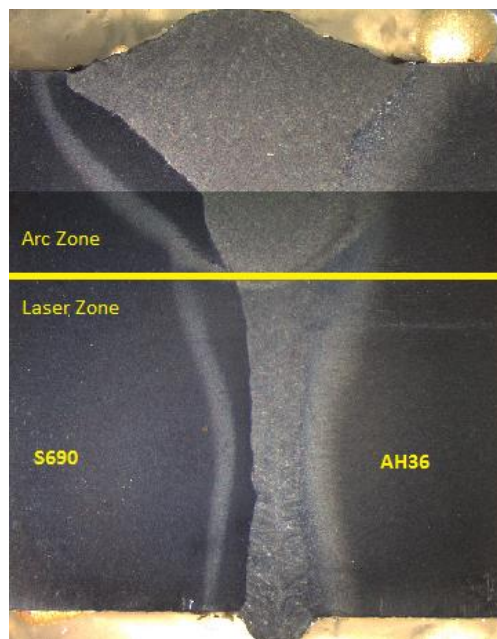
Εικόνα 5.21: Μικροσκοπική παρατήρηση της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690 σε απόσταση 8.34 mm από το άνω μέρος της συγκόλλησης

5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα των Μικροσκληρομετρήσεων

5.3.1 Μικροσκληρομέτρηση της υβριδικής συγκόλλησης laser - τόξου AH36-S690 (dissimilar)

Πρόκειται για ετερογενή μετωπική συγκόλληση πλάκας ναυπηγικού του χάλυβα υψηλής αντοχής (High Tensile Steel- HTS) AH36 και πλάκας του χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloy- HSLA) S690.

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στα ίδια δοκίμια που έγινε και η μεταλλογραφική μελέτη, ώστε να διακρίνονται οι περιοχές που γίνεται η μέτρηση κάθε φορά (μέταλλο βάσης, ΘΕΖ, ζώνη τήξης). Το μέτωπο της συγκόλλησης φαίνεται στην παρακάτω στερεοσκοπική φωτογραφία (Εικόνα 5.22):



Εικόνα 5.22: Τομή της Υβριδικής συγκόλλησης laser - τόξου AH36-S690

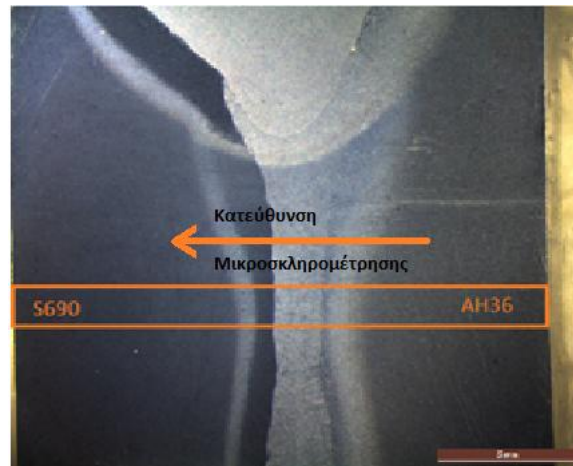
Όπως αναφέρθηκε, το πάχος των δύο πλακών που συγκολλήθηκαν είναι 17.56 mm και το πλάτος του δοκιμίου μελέτης είναι 19.09 mm. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε για τέσσερις περιοχές:

- 1) κατά μήκος της Laser Zone
- 2) κατά μήκος της Arc Zone
- 3) κατά μήκος της ενδιάμεσης ζώνης, μεταξύ Laser και Arc Zone
- 4) κατά το ύψος της συγκόλλησης, με αρχή τη ραφή της.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές που μετρήθηκαν με το μικροσκληρόμετρο για κάθε μία περιοχή, διάγραμμα που αποδίδει σχηματικά τη μεταβολή της σκληρότητας κατά το μήκος (ή το ύψος), καθώς και φωτογραφία που δείχνει την εκάστοτε μελετώμενη περιοχή.

1) Μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της Laser Zone

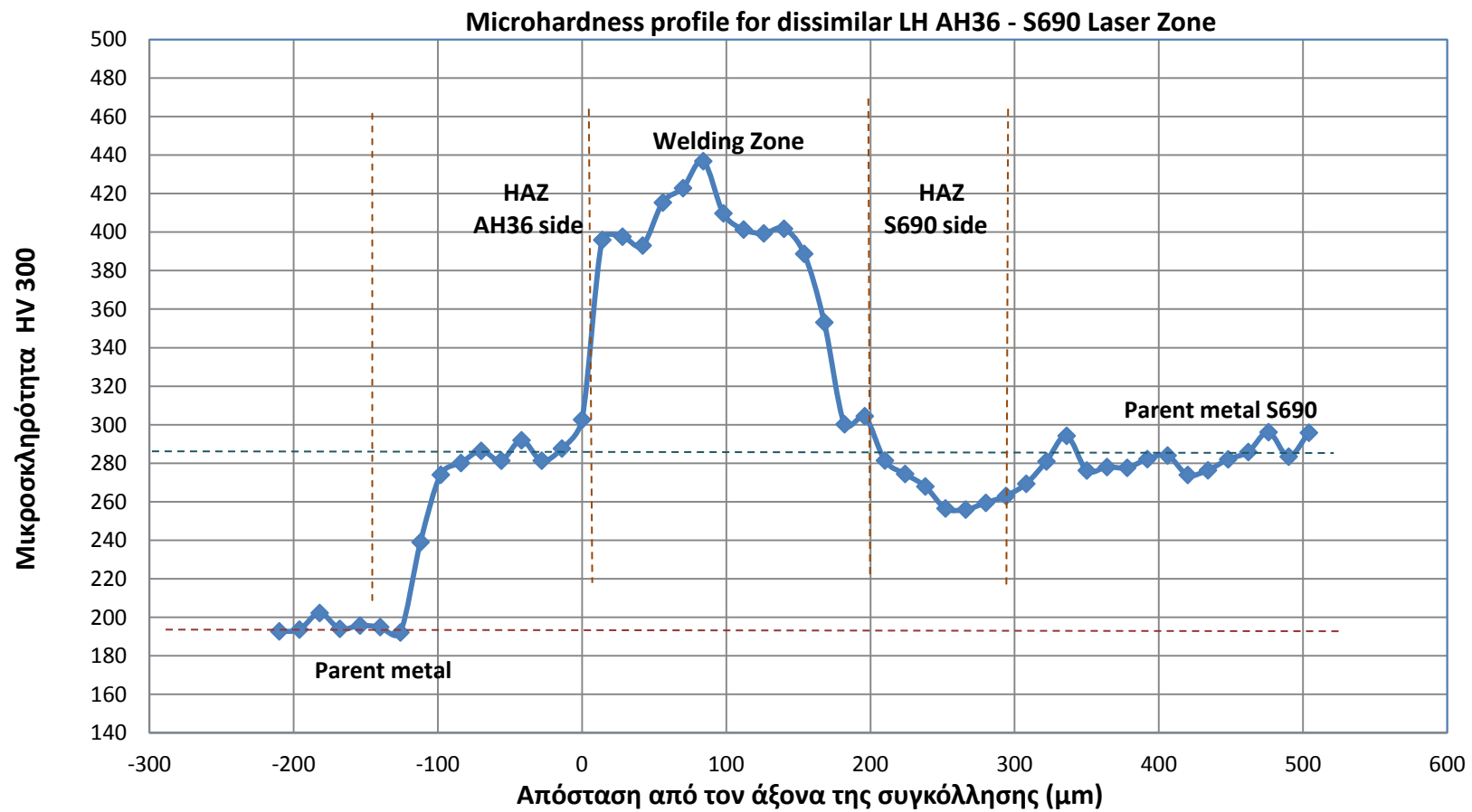
Το μήκος του δοκιμίου είναι 19.09 mm. Η μέτρηση ξεκινά από το άκρο του AH36 και προχωρά **με βήμα $dx=0.136$ mm** σε όλο το μήκος της Laser Zone, έως το άκρο του S690. Η ακριβής περιοχή που μετρήθηκε η μικροσκληρότητα του δοκιμίου φαίνεται στην Εικόνα 5.23.



Εικόνα 5.23: Περιοχή όπου έγινε η μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της Laser Zone

Η παρατήρηση του διαγράμματος της μικροσκληρότητας που ακολουθεί (Σχήμα 5.1) οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

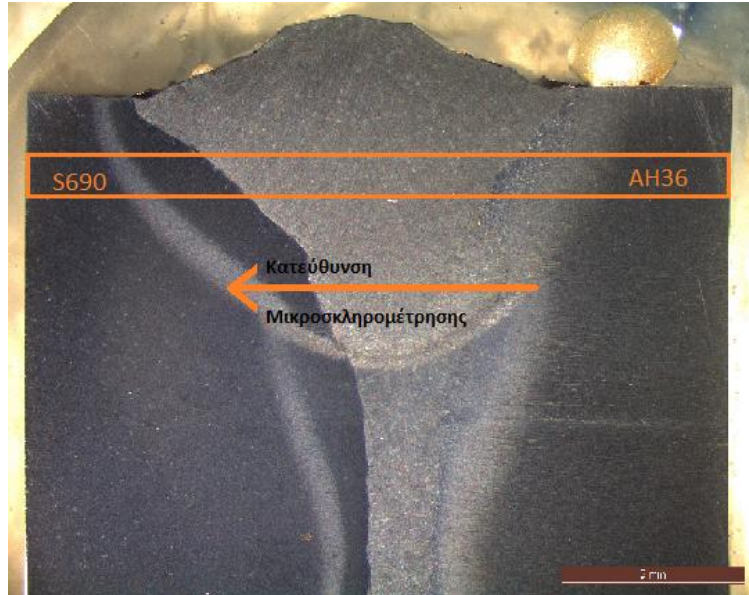
- ✓ η ζώνη τήξης εμφανίζει τις σκληρότερες δομές, λόγω της ταχείας απόψυξης του laser. Το εύρος της ζώνης τήξης κυμαίνεται από 380 HV έως 440 HV,
- ✓ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του AH36 παρουσιάζει μικροσκληρότητα της τάξης των 280 ± 10 HV,
- ✓ από την άλλη πλευρά, του S690, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρουσιάζει μικροσκληρότητα μικρότερη του μετάλλου βάσης S690, με τιμές που κυμαίνονται στα 255 ± 10 HV.
- ✓ τα μέταλλα βάσης εμφανίζουν συνήθεις μικροσκληρότητες (για τον AH36 οι τιμές κυμαίνονται στα 180 ± 10 HV, ενώ για τον S690 οι τιμές κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV).



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μικροσκληρότητας κατά μήκος της Laser Zone

2) Μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της Arc Zone

Εδώ η μικροσκληρομέτρηση ξεκινά από τον AH36 και διανύει όλη την απόσταση έως τον S690 (Εικόνα 5.24). Το μήκος που διανύεται είναι επίσης 19.09 mm και το βήμα προχώρησης είναι **dx=0.223 mm**.

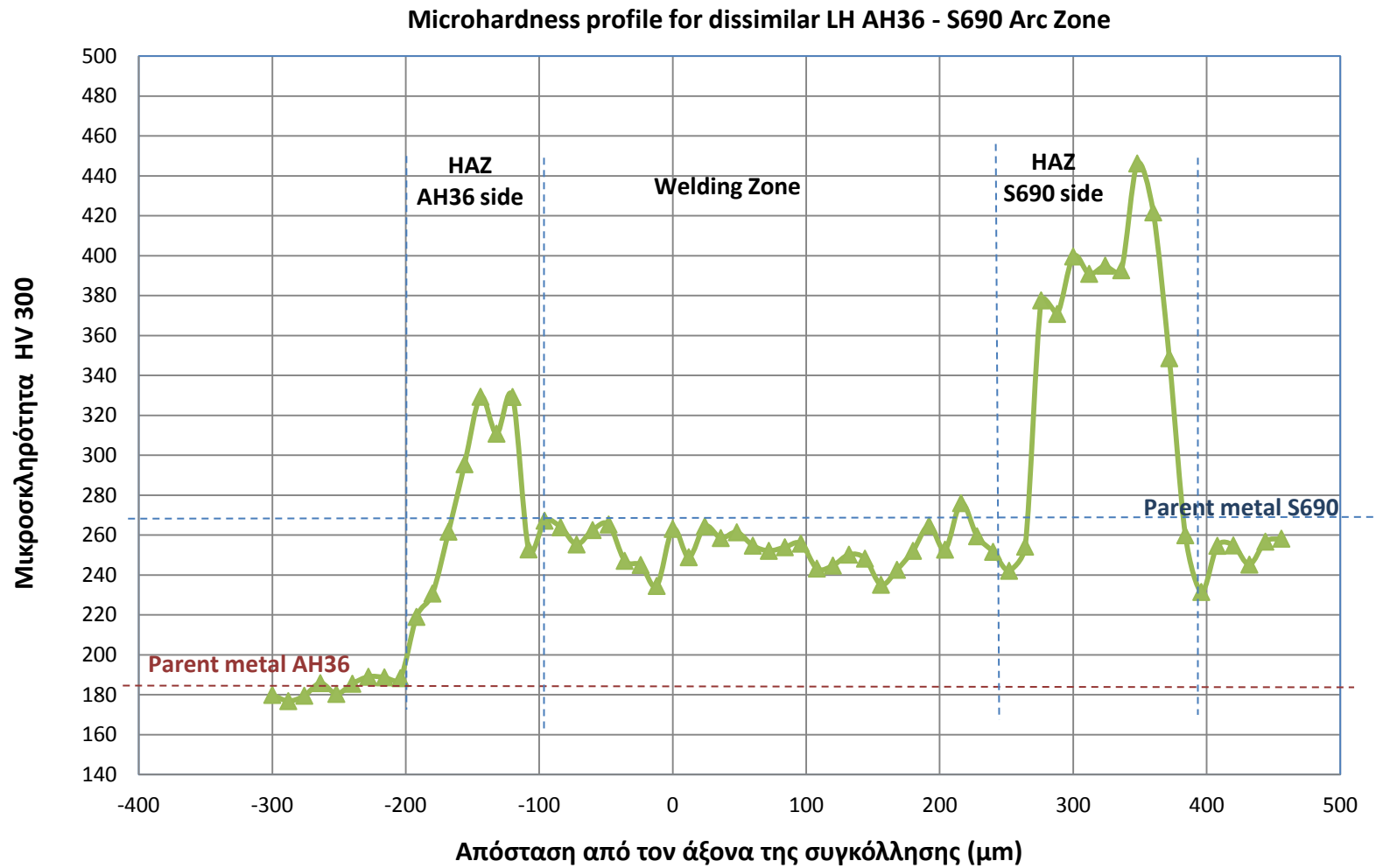


Εικόνα 5.24: Περιοχή όπου έγινε η μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της Arc Zone

Η μικροσκληρότητα που μετρήθηκε κατά μήκος της Arc Zone, δηλαδή του ανώτερου τμήματος της υβριδικής συγκόλλησης όπου εργάζεται το tandem τόξο, φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 5.2).

Κατά μήκος της ζώνης του tandem, παρατηρούνται:

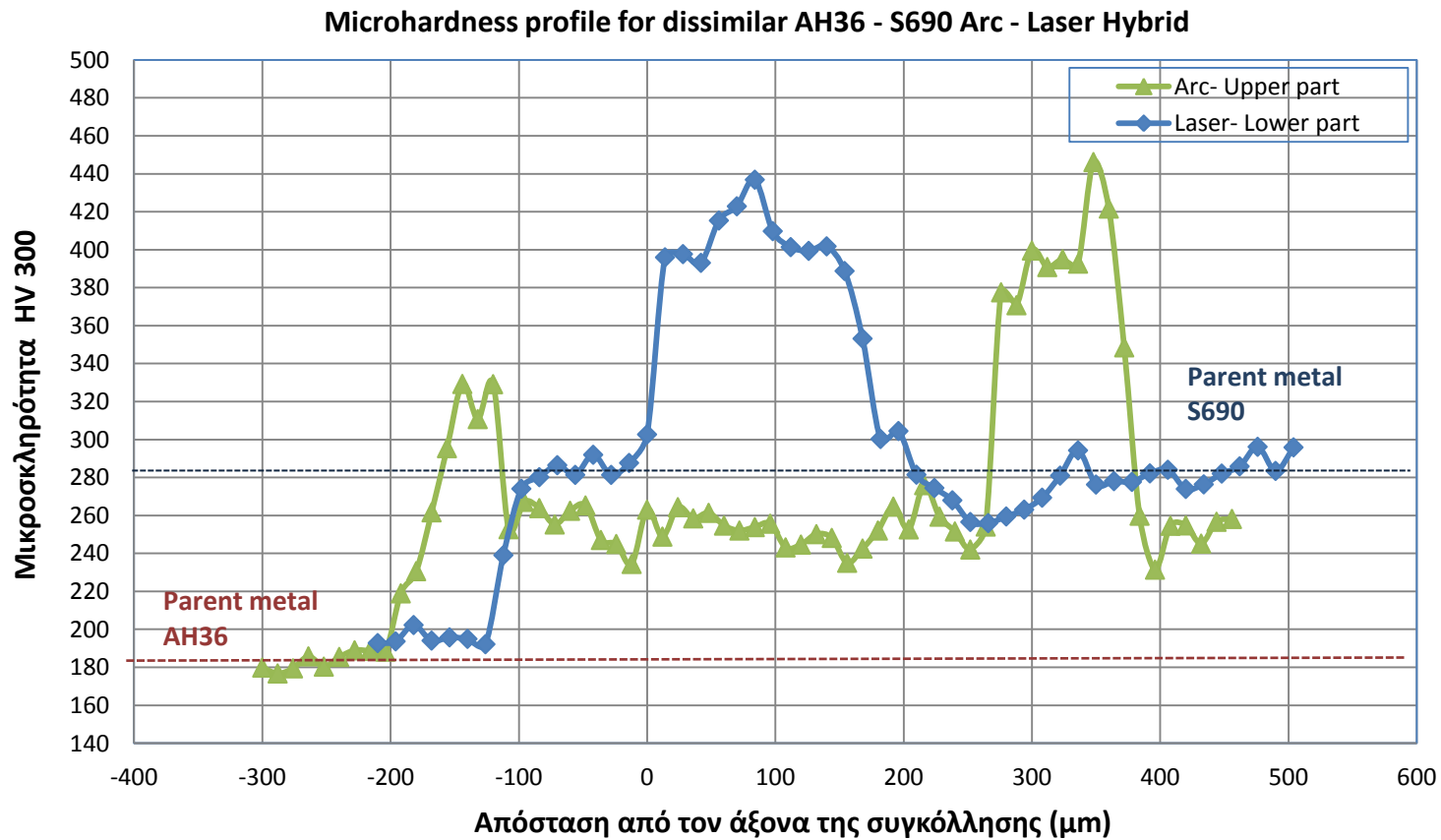
- ✓ Η ζώνη τήξης εμφανίζει χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας (με τιμές που κυμαίνονται στα 250 ± 10 HV) σχετικά με τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες εκατέρωθεν.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του S690 εμφανίζει τις σκληρότερες δομές με τιμές που κυμαίνονται από 360 HV μέχρι και τα 440 HV.
- ✓ Από την πλευρά του AH36, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρουσιάζει τιμές μικροσκληρότητας από 300 HV έως 330 HV, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται όσο πλησιάζει η ζώνη τήξης.
- ✓ Τα μέταλλα βάσης εμφανίζουν τιμές μικροσκληρότητας συμβατές με τη βιβλιογραφία, με τιμές για τον AH36 της τάξης των 180 ± 10 HV, ενώ για τον S690 της τάξης των 260 ± 10 HV.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα μικροσκληρότητας κατά μήκος της Arc Zone

Σύγκριση των μικροσκληροτήτων της Laser και της Arc Zone

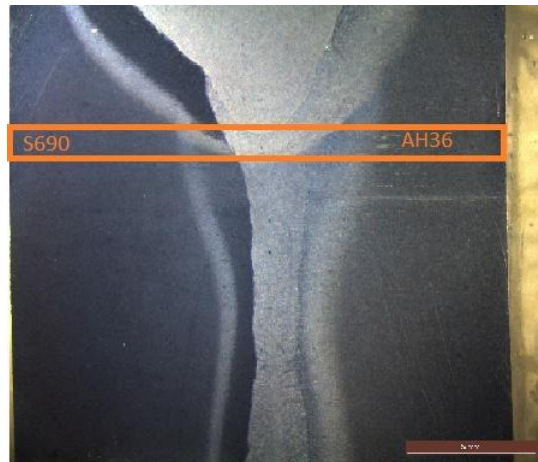
- ✓ Στη περιοχή που εργάζεται Laser εμφανίζονται αυξημένες τιμές μικροσκληρότητας στη ζώνη τήξης (περίπου 420 ± 10 HV), γεγονός που οφείλεται στη ταχεία απόψυξη που υφίσταται. Οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες εκατέρωθεν είναι λιγότερο σκληρές.
- ✓ Αντίθετα, στην περιοχή που εργάζεται το tandem τόξο, οι θερμικά επηρεασμένες ζώνες είναι αυτές που παρουσιάζουν τις σκληρότερες δομές, ενώ η ζώνη τήξης εμφανίζει μειωμένες τιμές μικροσκληρότητας.



Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα μικροσκληρότητας των Laser και Arc Zone

3) Μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της ενδιάμεσης ζώνης, μεταξύ Laser και Arc Zone

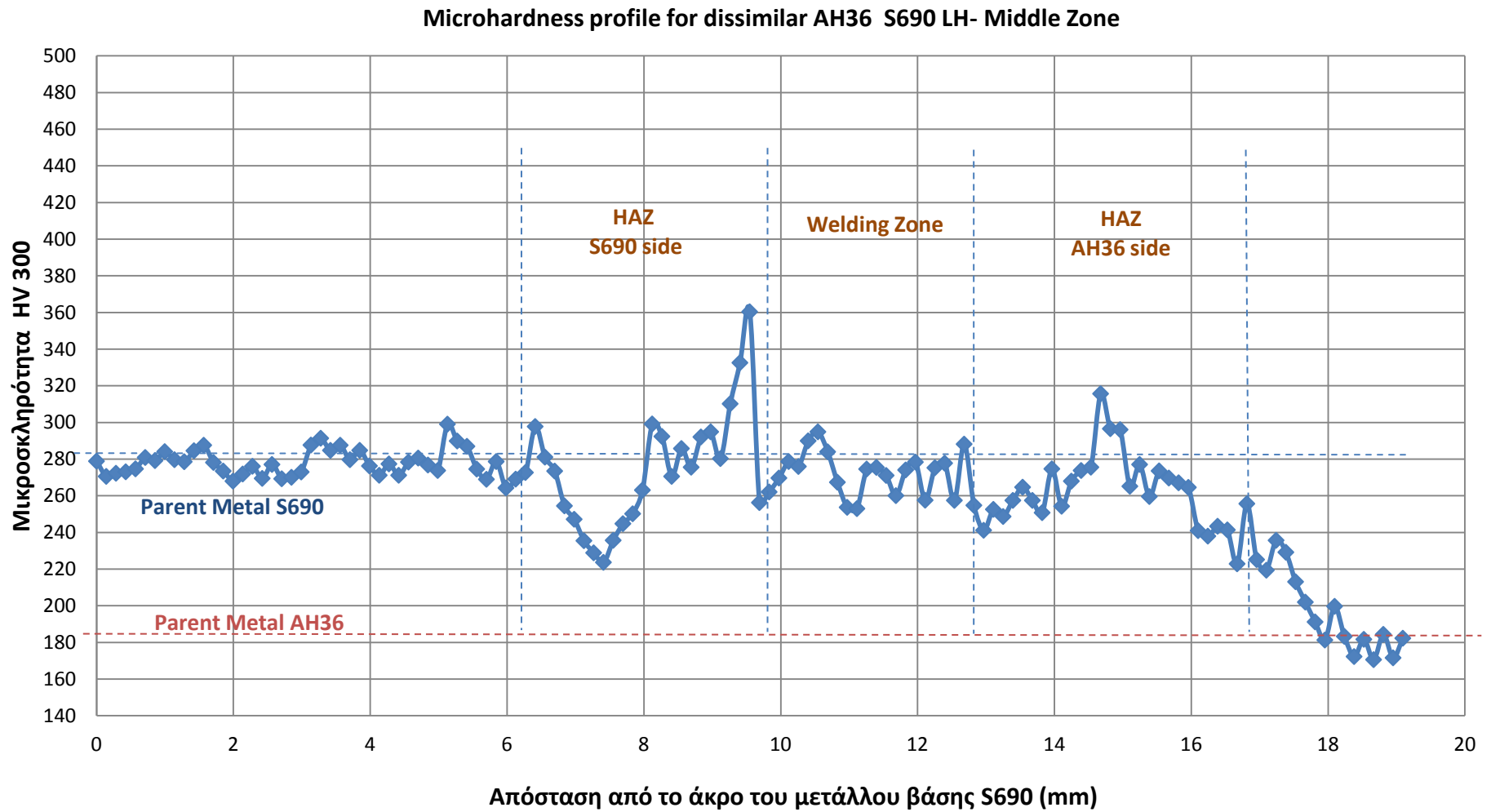
Το μήκος του δοκιμίου είναι 19.09 mm. Η μικροσκληρομέτρηση ξεκινά από τον S690 και διανύει όλη την απόσταση έως τον AH36 **με βήμα $dx=0.142$ mm** (Εικόνα 5.25).



Εικόνα 5.25: Περιοχή όπου έγινε η μικροσκληρομέτρηση κατά μήκος της ενδιάμεσης ζώνης, μεταξύ Laser και Arc Zone

Στο διάγραμμα της μικροσκληρότητας κατά μήκος της ενδιάμεσης ζώνης (Σχήμα 5.4), παρατηρούνται:

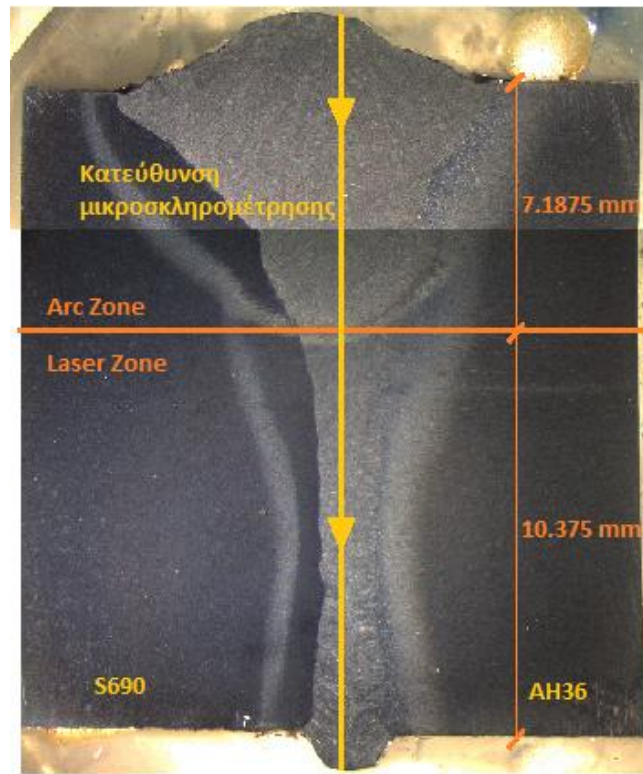
- ✓ Πολύ σκληρές δομές, της τάξης των 290 ± 10 HV στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του S690 και πλησίον του μετάλλου βάσης, και οι οποίες οφείλονται στην ανόπτηση.
- ✓ Στο μέσον της θερμικά επηρεασμένης ζώνης από την πλευρά του S690 σημειώνονται χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας, περίπου 230 ± 10 HV.
- ✓ Όσο η ΘΕΖ πλησιάζει τη ζώνη της συγκόλλησης, η μικροσκληρότητα βαίνει συνεχώς αυξανόμενη, με τιμές που ξεκινούν από 300 HV και φθάνουν έως τα 360 HV.
- ✓ Η ζώνη συγκόλλησης εμφανίζει μικρότερη σκληρότητα από την ΘΕΖ της πλευράς του S690, με τιμές που κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του AH36 εμφανίζει μικροσκληρότητα 250 ± 10 HV πλησίον της ζώνης συγκόλλησης, αυξημένες τιμές της τάξης των 310 ± 10 HV στο μέσον του μήκους της, και μειωμένες τιμές, της τάξης των 230 ± 10 HV όσο πλησιάζει το μέταλλο βάσης AH36.
- ✓ Τα μέταλλα βάσης εμφανίζονται με τιμές μικροσκληρότητας συμβατές με τη βιβλιογραφία, με τιμές για τον AH36 της τάξης των 180 ± 10 HV, ενώ για τον S690 της τάξης των 260 ± 10 HV.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα μικροσκληρότητας κατά μήκος της Ενδιάμεσης Ζώνης

4) Μικροσκληρομέτρηση κατά το ύψος της συγκόλλησης, με αρχή τη ραφή της.

Το πάχος του δοκιμίου (δηλαδή το ύψος της συγκόλλησης) είναι 17.56 mm και το βήμα της μέτρησης είναι $dx=0.118$ mm (Εικόνα 5.26).



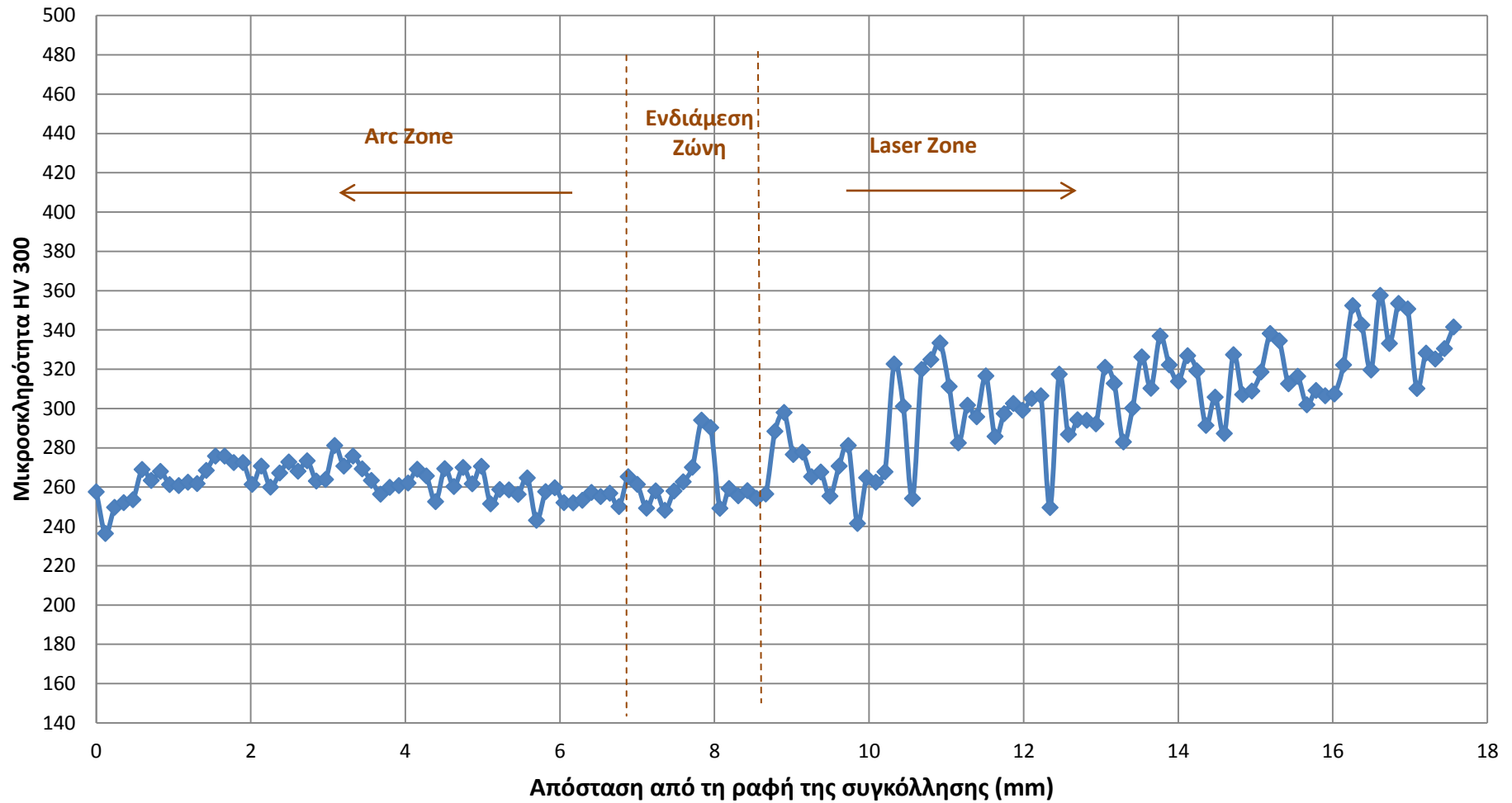
Εικόνα 5.26: Κατεύθυνση μικροσκληρομέτρησης κατά το πάχος του δοκιμίου

Το ύψος του Arc Zone (πρώτο τμήμα της Εικόνας 5.26) είναι 7.1875 mm, ενώ το ύψος της Laser Zone (δεύτερο τμήμα της Εικόνας 5.26) είναι 10.375 mm. Η μέτρηση γίνεται από την κορυφή της συγκόλλησης με κατεύθυνση προς τη ραφή της.

Η παρατήρηση του διαγράμματος της μικροσκληρότητας κατά το ύψος της συγκόλλησης (Σχήμα 5.5), οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Γενικά το Laser εμφανίζει σκληρότερες δομές (280-320 HV) σε σχέση με το tandem τόξο, καθώς υφίσταται ταχύτερη απόψυξη.
- ✓ Η ζώνη του tandem τόξου εμφανίζει χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας, της τάξης των 270 ± 10 HV.
- ✓ Οι τιμές μικροσκληρότητας της ενδιάμεσης ζώνης (μεταξύ του Laser και του Arc) συμφωνούν με την προηγούμενη μέτρηση (Εικόνα 5.10), με τιμές που κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV.

Microhardness profile for dissimilar AH36 S690 LH- Vertical Microhardness

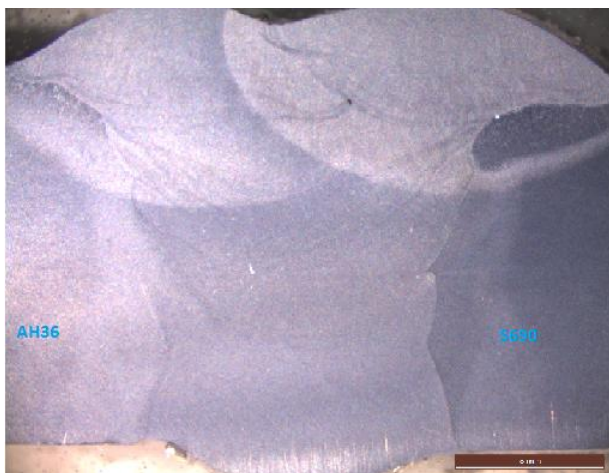


Σχήμα 5.5: Διάγραμμα της καθ' ύψος μικροσκληρότητας

5.3.2 Μικροσκληρομέτρηση της ετερογενούς συγκόλλησης FCAW AH36-S690

Πρόκειται για μετωπική συγκόλληση πλάκας ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής (High Tensile Steel - HTS) AH36 και πλάκας χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloy - HSLA) S690. Το είδος της συγκόλλησης είναι τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων FCAW.

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στα ίδια δοκίμια που έγινε και η μεταλλογραφική μελέτη, ώστε να διακρίνονται οι περιοχές που γίνεται η μέτρηση κάθε φορά (μέταλλο βάσης, ΘΕΖ, ζώνη τήξης). Το μέτωπο της συγκόλλησης φαίνεται στην Εικόνα 5.27:



Εικόνα 5.27: Μέτωπο της συγκόλλησης dissimilar FCAW AH36-S690

- Το πάχος των δύο πλακών που συγκολλήθηκαν (ύψος της συγκόλλησης) είναι 12.5 mm.
- Το πλάτος του δοκιμίου μελέτης (μήκος της συγκόλλησης) είναι 28 mm.

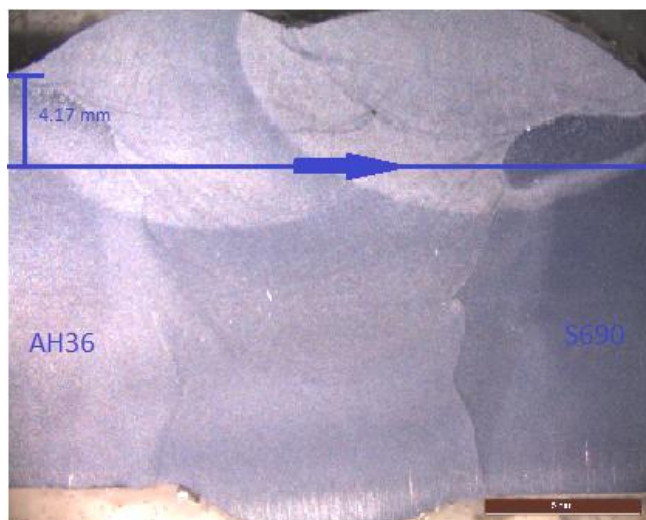
Η μικροσκληρομέτρηση έγινε για τρεις περιοχές:

1. κατά μήκος της συγκόλλησης, στο $\frac{1}{3}$ του πάχους του δοκιμίου (απόσταση μετρημένη από τη ραφή - άνω μέρος της συγκόλλησης)
2. κατά μήκος της συγκόλλησης, στα $\frac{2}{3}$ του πάχους του δοκιμίου (απόσταση επίσης μετρημένη από τη ραφή - άνω μέρος της συγκόλλησης)
3. κατά το ύψος της συγκόλλησης, με αρχή τη ρίζα της.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές που μετρήθηκαν με το μικροσκληρόμετρο για κάθε μία περιοχή, διάγραμμα που αποδίδει σχηματικά τη μεταβολή της σκληρότητας κατά το μήκος (ή το ύψος), καθώς και εικόνα που παρουσιάζει την εκάστοτε μελετώμενη περιοχή.

1) Κατά μήκος της συγκόλλησης, στο $\frac{1}{3}$ του πάχους του δοκιμίου (απόσταση μετρημένη από τη ραφή - άνω μέρος της συγκόλλησης)

Το μήκος του δοκιμίου είναι 28 mm. Η μέτρηση γίνεται σε απόσταση **4.17 mm** κατακόρυφα από την άνω όψη των συγκολλημένων ελασμάτων ($\frac{1}{3}$ του πάχους του δοκιμίου). Ξεκινά οριζόντια από το άκρο του AH36, και διατρέχει όλο το μήκος προχωρώντας **με βήμα $dx=0.179$ mm** έως το άκρο του S690, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.28.

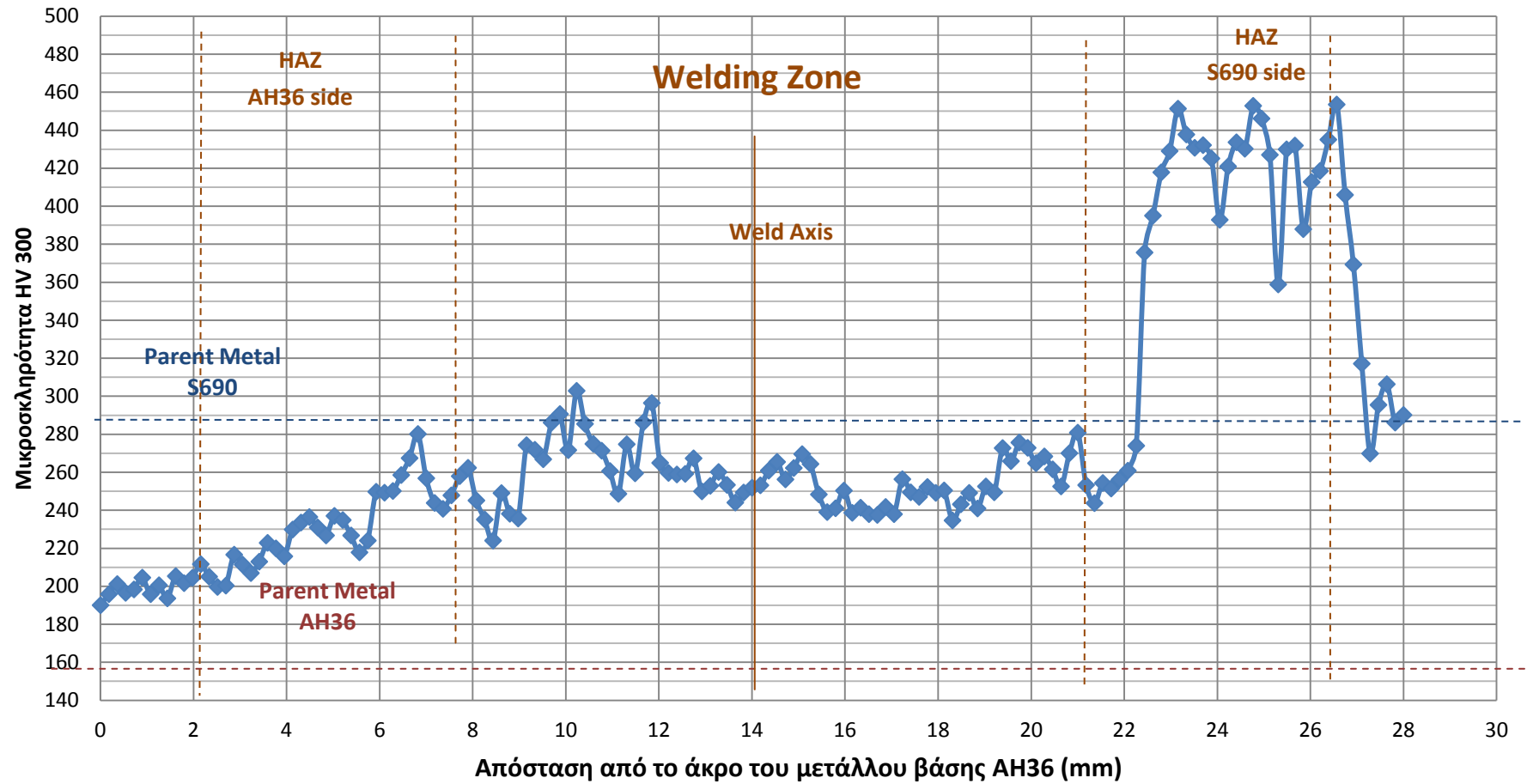


Εικόνα 5.28: Θέση και κατεύθυνση της μικροσκληρομέτρησης FCAW AH36-S690

Η παρατήρηση του διαγράμματος της μικροσκληρότητας που ακολουθεί (Σχήμα 5.6) οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η ζώνη τήξης εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 (6° πάσο), της τάξης των 290 ± 10 HV. Η ζώνη τήξης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 (7° πάσο), παρουσιάζει τιμές μικροσκληρότητας της τάξης των 260 ± 10 HV.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει παρόμοιες τιμές μικροσκληρότητας (240-280 HV) με την ζώνη τήξης.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλές τιμές μικροσκληρότητας, οι οποίες κυμαίνονται στα όρια $400 \div 440$ HV, και αυτή είναι η περιοχή που εμφανίζει τις σκληρότερες δομές της συγκόλλησης FCAW AH36-S690.
- ✓ τα μέταλλα βάσης εμφανίζουν συμβατές με τη βιβλιογραφία τιμές μικροσκληρότητας (για τον AH36 οι τιμές κυμαίνονται στα 180 ± 10 HV, ενώ για τον S690 οι τιμές κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV).

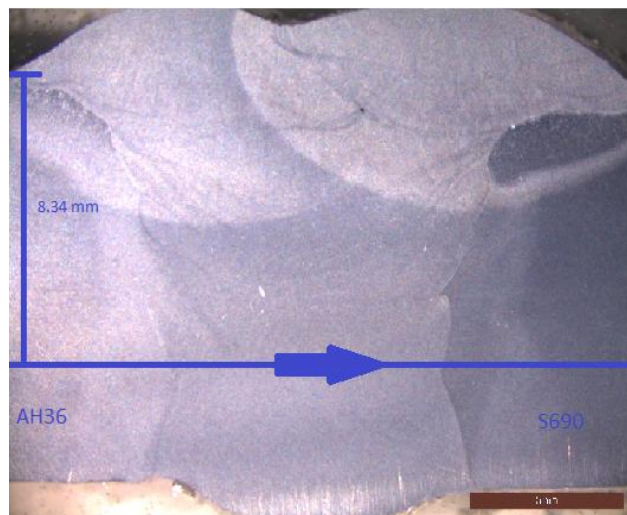
Microhardness profile for dissimilar AH36 S690 FCAW- at 4.17 mm height



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα τιμών μικροσκληρομέτρησης στο 1/3 του πάχους της συγκόλλησης FCAW AH36-S690

2) Κατά μήκος της συγκόλλησης, στα $\frac{2}{3}$ του πάχους του δοκιμίου (απόσταση μετρημένη από τη ραφή - άνω μέρος της συγκόλλησης)

Το μήκος του δοκιμίου είναι 28 mm. Η μέτρηση γίνεται σε απόσταση **8.34 mm** κατακόρυφα από την άνω όψη των συγκολλημένων ελασμάτων ($\frac{2}{3}$ του πάχους του δοκιμίου). Ξεκινά οριζόντια από το άκρο του AH36, και διατρέχει όλο το μήκος προχωρώντας **με βήμα $dx=0.167$ mm** έως το άκρο του S690, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.29.



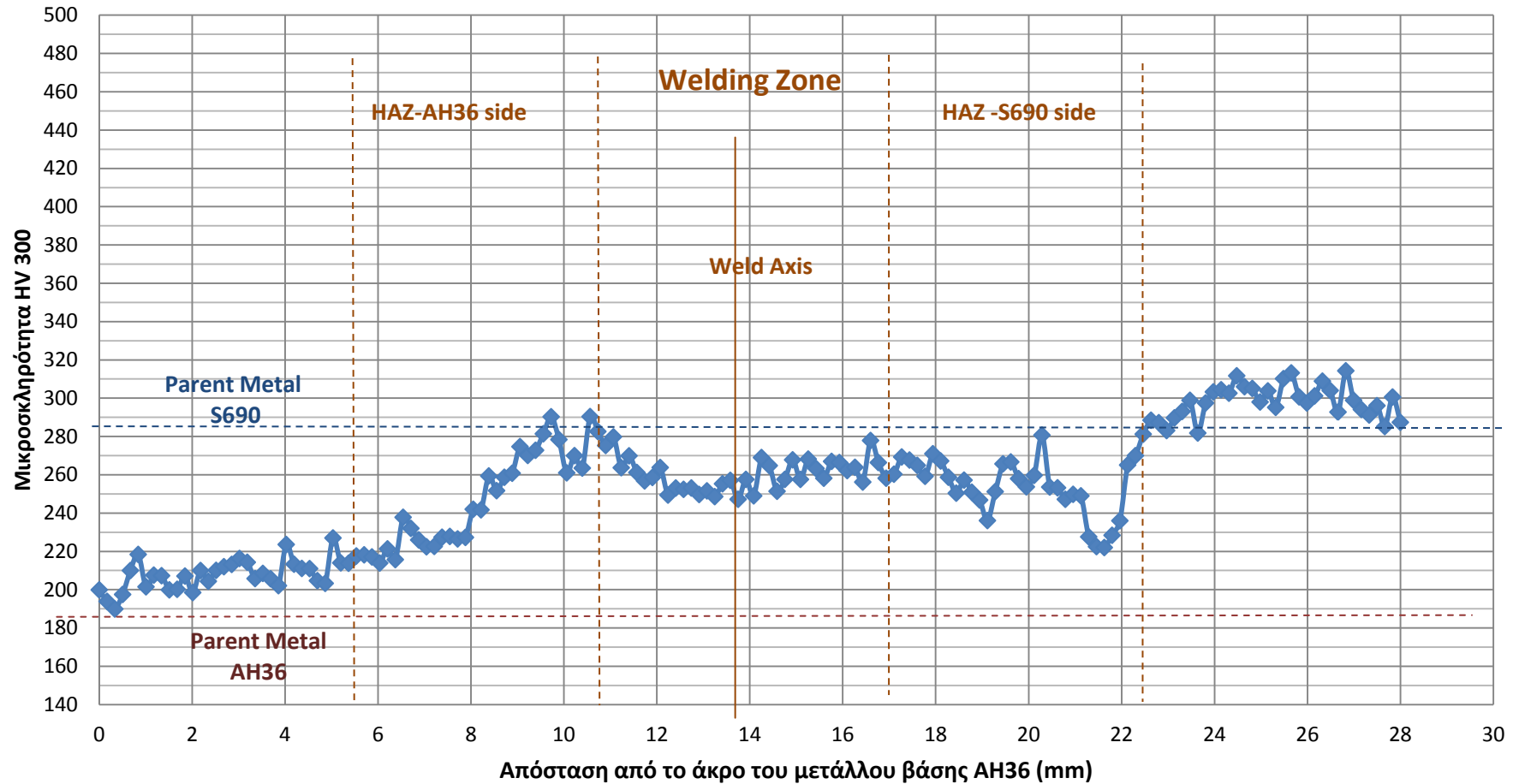
Εικόνα 5.29: Θέση και κατεύθυνση της μικροσκληρομέτρησης

Η παρατήρηση του διαγράμματος της μικροσκληρότητας που ακολουθεί (Σχήμα 5.7) οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

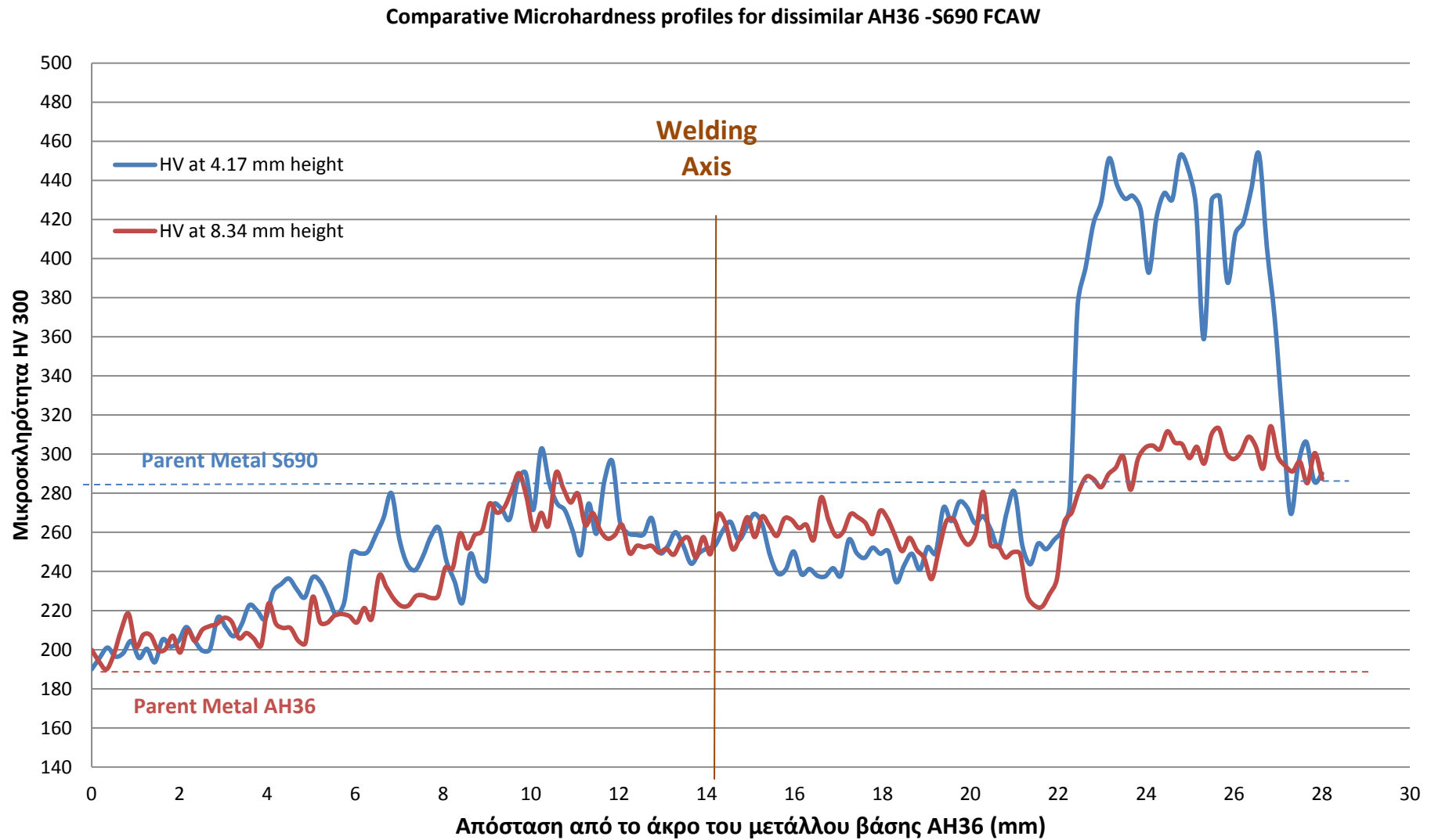
- ✓ Η ζώνη τήξης εμφανίζει τιμές μικροσκληρότητας της τάξης των 260 ± 10 HV. οι τιμές μικροσκληρότητας είναι ελαφρώς αυξημένες στα δύο άκρα της ζώνης τήξης, με τις τιμές μικροσκληρότητας πλησίον των θερμικά επηρεασμένων ζωνών να κυμαίνονται στα 270 ± 10 HV.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει μικροσκληρότητα 280 ± 10 HV στην οριακή περιοχή με την ζώνη τήξης, ενώ κοντά στο μέταλλο βάσης οι τιμές πέφτουν κατακόρυφα έως τα 200 HV.
- ✓ Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει τιμές μικροσκληρότητας παρόμοιες με αυτές της ζώνης τήξης, 260 ± 10 HV. Στην οριακή περιοχή της ΘΕΖ με το μέταλλο βάσης S690 σημειώνεται μείωση της μικροσκληρότητας (230 ± 10 HV).
- ✓ Τα μέταλλα βάσης εμφανίζουν συνήθεις μικροσκληρότητες (για τον AH36 οι τιμές κυμαίνονται στα 180 ± 10 HV, ενώ για τον S690 οι τιμές κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV).

Το Σχήμα 5.8 απεικονίζει τη σύγκριση των μικροσκληροτήτων στα δύο ύψη της συγκόλλησης που προαναφέρθηκαν (4.17 mm και 8.34 mm από τη ραφή της συγκόλλησης).

Microhardness profile for dissimilar AH36 S690 FCAW- at 8.34 mm height



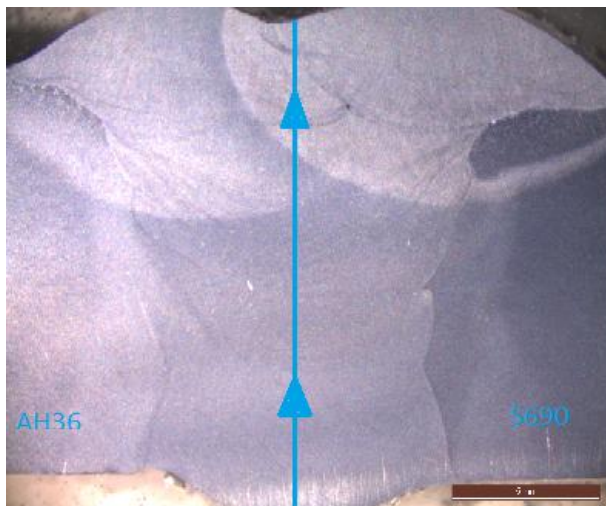
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα τιμών μικροσκληρομέτρησης στα 2/3 του πάχους της συγκόλλησης



Σχήμα 5.8: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μικροσκληρομέτρησης στο $1/3$ και στα $2/3$ του ύψους της συγκόλλησης FCAW AH36-S690

3) Κατά το ύψος της συγκόλλησης, με αρχή τη ρίζα της.

Το πάχος του δοκιμίου (δηλαδή το ύψος της συγκόλλησης) είναι 12.5 mm και το βήμα της μέτρησης είναι $dx=0.135$ mm. Η μέτρηση της μικροσκληρότητας έγινε ξεκινώντας από τη ρίζα της συγκόλλησης και με ανοδική κατεύθυνση (Εικόνα 5.30).

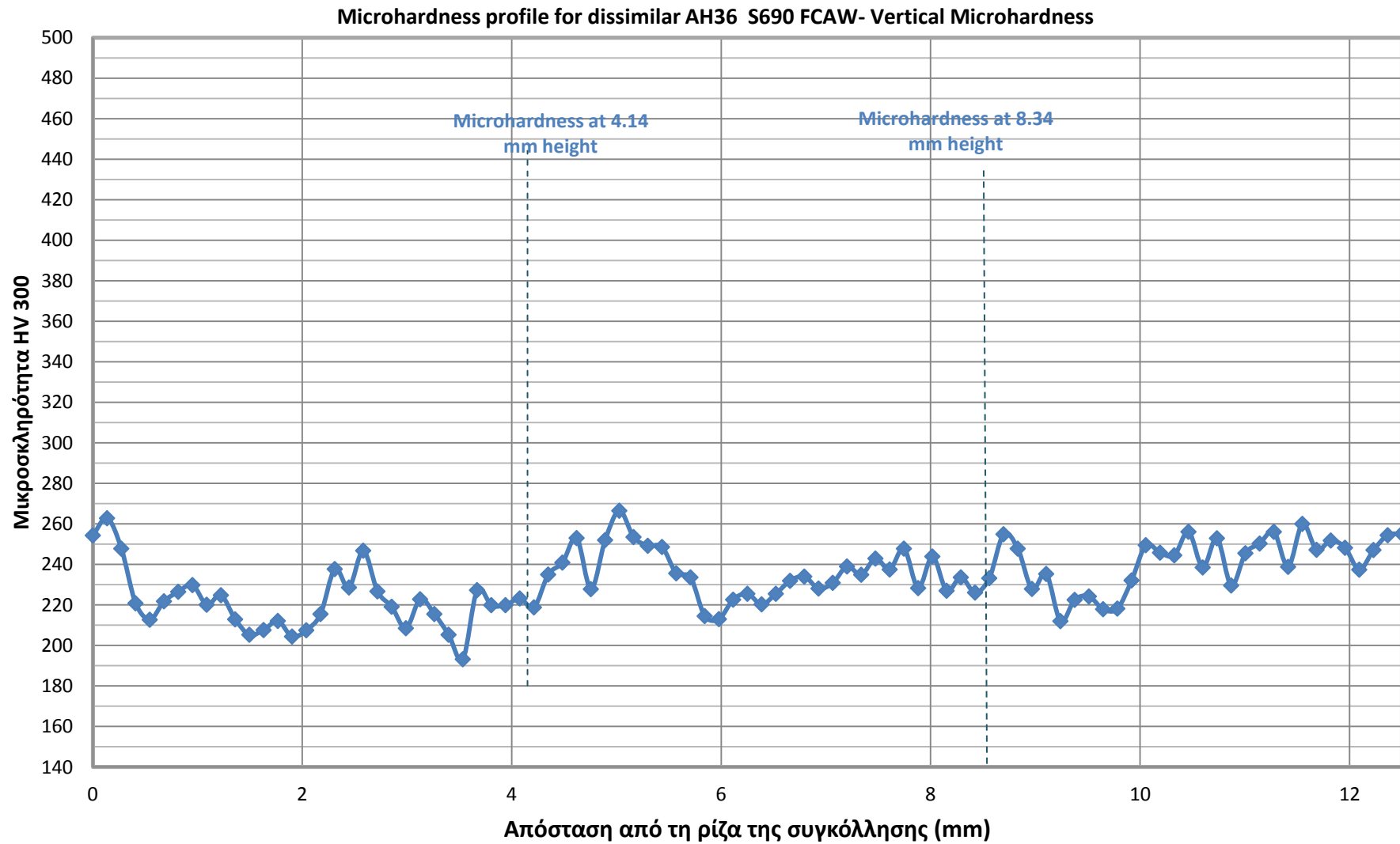


Εικόνα 5.30: Θέση και κατεύθυνση της μικροσκληρομέτρησης

Η καθ' ύψος μικροσκληρομέτρηση στην περίπτωση της συγκόλλησης FCAW AH36-S690, διατρέχει περιοχές που ανήκουν μόνο στη ζώνη τήξης. Οι τιμές μικροσκληρότητας γενικά κυμαίνονται στα 220 ± 10 HV, πλην κάποιων εξαιρέσεων (περιοχές με τιμές μικροσκληρότητας στα 260 ± 10 HV).

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.20), απεικονίζονται οι τιμές σκληρότητας της ζώνης τήξης αναφορικά με το ύψος. Σημειώνονται επίσης και οι μετρήσεις στο $1/3$ και στα $2/3$ του ύψους της συγκόλλησης που προαναφέρθηκαν, και οι οποίες συμφωνούν στις τιμές των μετρήσεων (και στις τρεις περιπτώσεις η μικροσκληρότητα κυμαίνεται στα 260 ± 10 HV).

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές που ελήφθησαν από τη μέτρηση.



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα της καθ' ύψος μικροσκληρότητας με αρχή τη ρίζα και πορεία προς τη ραφή της συγκόλλησης

Πίνακας 5.1: Τιμές μικροσκληρότητας κατά το ύψος της dissimilar FCAW AH36-S690 συγκόλλησης

HV	Απόσταση από τη ρίζα της συγκόλλησης (mm)	HV	Απόσταση από τη ρίζα της συγκόλλησης (mm)
254.3	0.000	220.3	6.386
262.8	0.136	225.5	6.522
247.8	0.272	231.9	6.658
220.8	0.408	234	6.794
212.7	0.543	228.1	6.929
221.8	0.679	230.9	7.065
226.5	0.815	239	7.201
229.8	0.951	234.9	7.337
220.1	1.087	242.9	7.473
224.8	1.223	237.5	7.609
212.9	1.359	247.8	7.745
205.3	1.495	228.3	7.880
207.6	1.630	243.9	8.016
212.1	1.766	227	8.152
204.4	1.902	233.6	8.288
207.5	2.038	226.1	8.424
215.5	2.174	233.2	8.560
237.7	2.310	254.9	8.696
228.6	2.446	247.8	8.832
246.8	2.582	227.9	8.967
226.7	2.717	235.3	9.103
219.1	2.853	212	9.239
208.5	2.989	222.5	9.375
222.8	3.125	224.2	9.511
215.5	3.261	217.9	9.647
205.3	3.397	218.2	9.783
193.2	3.533	232.1	9.919
227.3	3.668	249.5	10.054
219.9	3.804	245.8	10.190
219.9	3.940	244.5	10.326
223.2	4.076	256.1	10.462
218.8	4.212	238.5	10.598
235	4.348	252.9	10.734
240.9	4.484	229.6	10.870
253	4.620	245.5	11.005
227.8	4.755	250.3	11.141
252	4.891	256.1	11.277
266.5	5.027	238.8	11.413
253.5	5.163	260	11.549
249.2	5.299	247.2	11.685
248.6	5.435	251.8	11.821
235.6	5.571	248.2	11.957
233.6	5.707	237.4	12.092
214.5	5.842	247.1	12.228
213	5.978	254.4	12.364
222.6	6.114	255.1	12.500
225.5	6.250		

5.4 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι

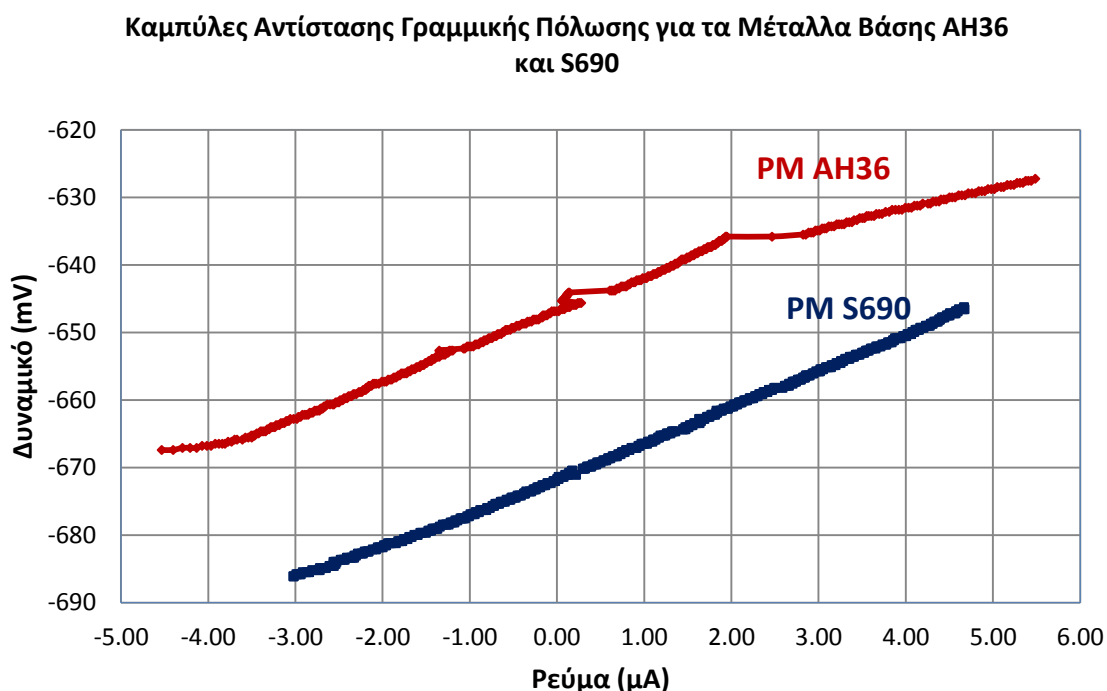
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων, που εφαρμόστηκαν για τους δύο τύπους συγκόλλησης ανόμοιων κραμάτων, υβριδική laser-tandem τόξου και FCAW, καθώς και για τα μέταλλα βάσης AH36 και S690.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται ως εξής: Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων EIS και Tafel των μετάλλων βάσης, ύστερα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου, και ακολουθούν τα αποτελέσματα της FCAW. Οι καμπύλες Tafel χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του δυναμικού διάβρωσης (E_{CORR}) και του ρεύματος διάβρωσης (i_{CORR}), που είναι ανάλογο μέγεθος του ρυθμού διάβρωσης. Οι καμπύλες EIS χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του R_p , δηλαδή της αντίστασης που προβάλλει το εκάστοτε κράμα στη διάβρωση. Στο τέλος της παραγράφου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα, προκειμένου να συγκριθούν.

5.4.1 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για τα Μέταλλα Βάσης

-Μέθοδος Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης (LPR)

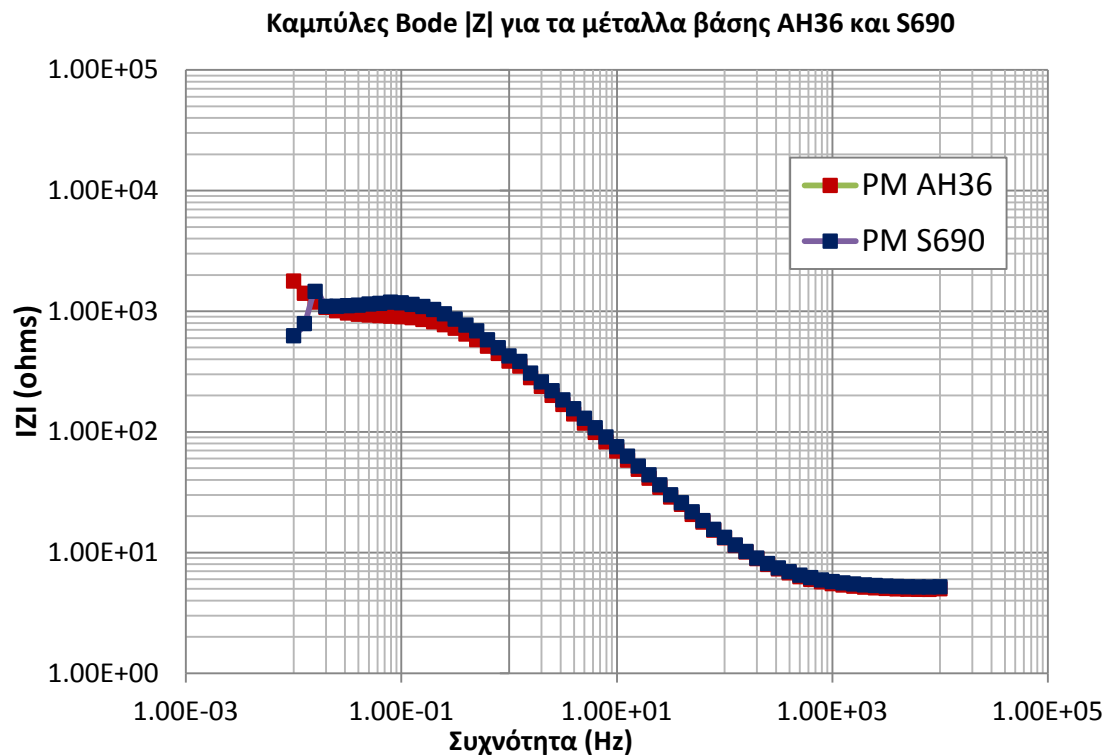
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν μέσω των δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης σε ηλεκτροχημικό κελί με τη μέθοδο Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization Resistance). Αρχικά έγινε προσδιορισμός της καμπύλης ρεύματος-δυναμικού για τα μέταλλα βάσης (Διάγραμμα 5.1). Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε πόλωση $\pm 25mV$.



Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση των δύο μετάλλων βάσης AH36 και S690 με τη μέθοδο LPR

-Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Με τη μέθοδο ηλεκτροχημικής εμπέδησης (EIS) υπολογίζεται η αντίσταση πόλωσης σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Η αντίσταση στην πόλωση είναι παρόμοια για τα δύο μέταλλα βάσης. Για τις καμπύλες των ΑΗ36 και S690 η τιμή της αντίστασης πόλωσης είναι περίπου 1.10^3 Ohms, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.2.



Διάγραμμα 5.2: Αποτελέσματα δοκιμών της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης για τα μέταλλα βάσης ΑΗ36 και S690 των *dissimilar* συγκολλήσεων

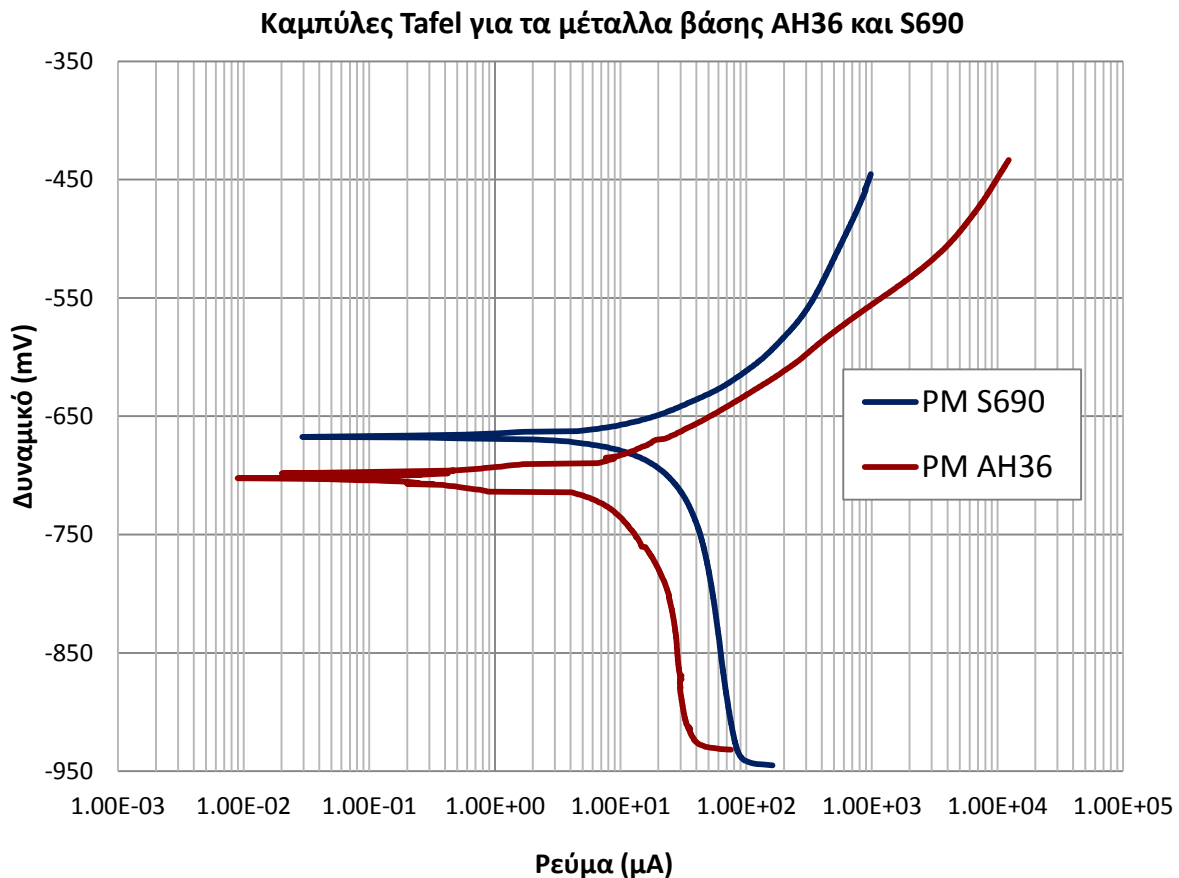
Επίσης, από το Διάγραμμα 5.2, παρατηρείται ότι η αντίσταση πόλωσης του ηλεκτρολύτη R_s ανέρχεται στα 50 Ohms.

- Μέθοδος Προεκβολής Ευθειών Tafel

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία ηλεκτροχημικών μετρήσεων με την μέθοδο προεκβολής των ευθειών Tafel, για τα μέταλλα βάσης AH36 και S690 (Διάγραμμα 5.3).

Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε τάση $\pm 250\text{mV}$. Για τα μέταλλα βάσης προκύπτει:

- για τον HSLA S690: ρεύμα διάβρωσης $i_{\text{corr}}=10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ και δυναμικό $E_{\text{corr}}=-650 \text{mV}$ και
- για τον HSS AH36: ρεύμα διάβρωσης $i_{\text{corr}}=5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ και δυναμικό $E_{\text{corr}}=-700 \text{mV}$.



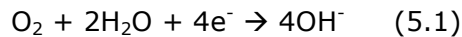
Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση καμπυλών Tafel για τα μέταλλα βάσης AH36 και S690

5.4.2 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για την Υβριδική Συγκόλληση Laser-MAG+Tandem AH36-S690

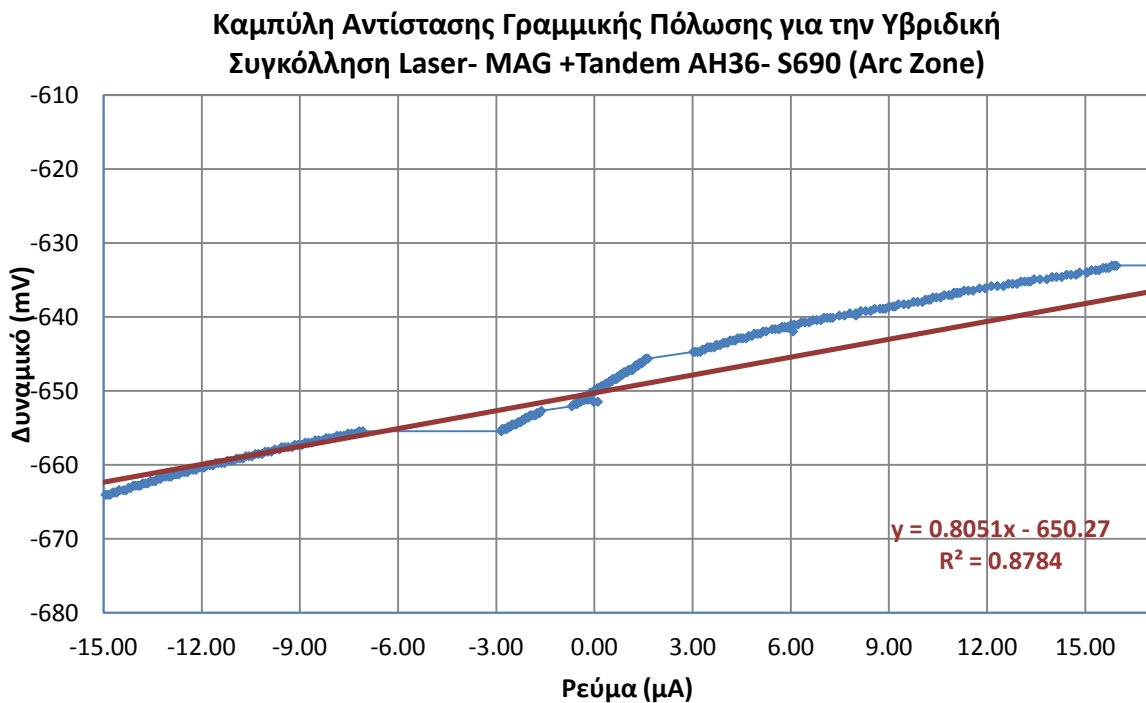
-Μέθοδος Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης (LPR)

Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε πόλωση $\pm 25\text{mV}$. Ο προσδιορισμός της καμπύλης ρεύματος - δυναμικού γίνεται μέσω του Διαγράμματος 5.4, για το ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το tandem τόξο, και μέσω του Διαγράμματος 5.5, για το κατώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser.

Όπως παρατηρείται, οι καμπύλες της γραμμικής πόλωσης δεν χαρακτηρίζονται σε όλη τους την έκταση από γραμμικότητα, και αυτό οφείλεται στο γεγονός της διάλυσης του οξυγόνου στο διάλυμα του ηλεκτροχημικού κελιού, σύμφωνα με την αντίδραση:

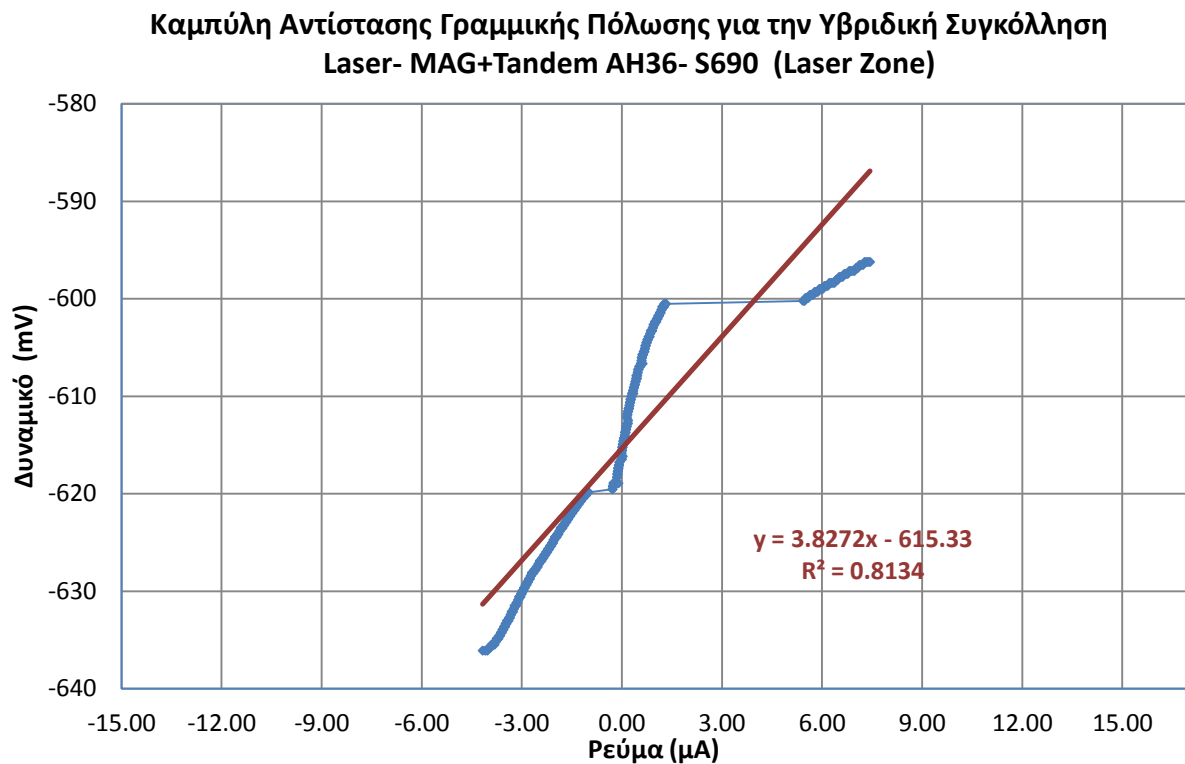


Ανώτερο μέρος της συγκόλλησης (Arc Zone)



Διάγραμμα 5.4: Καμπύλη LPR για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το tandem τόξο

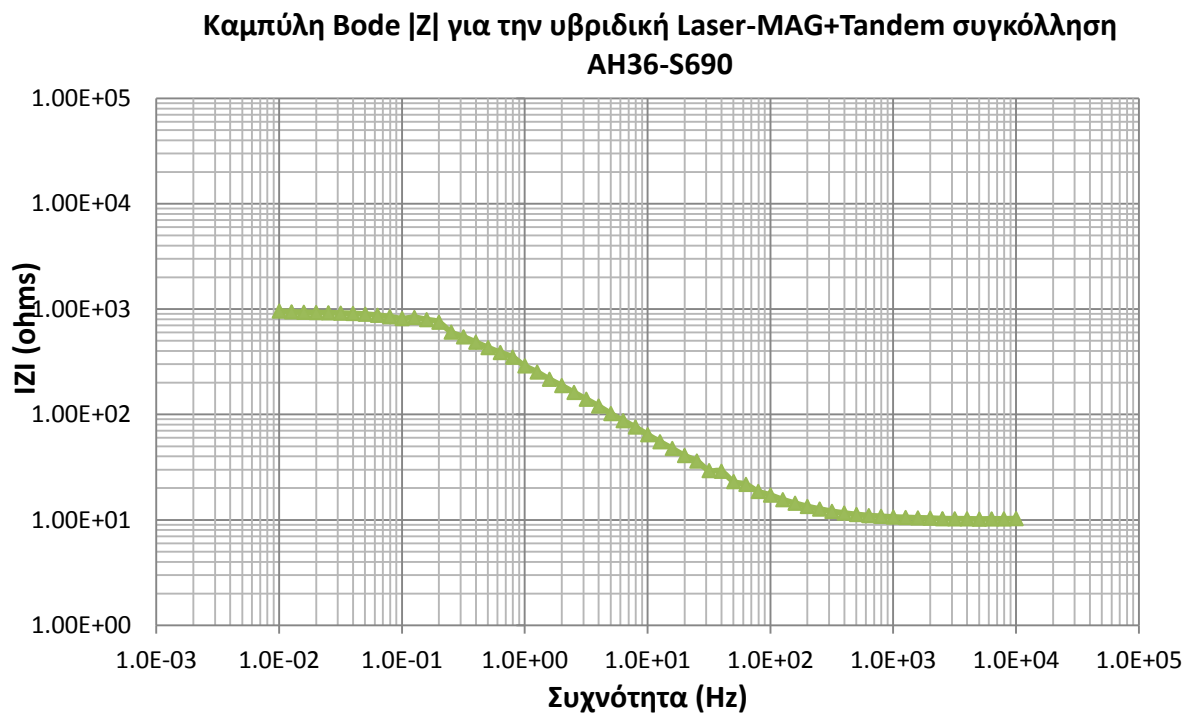
Κατώτερο μέρος της συγκόλλησης (Laser zone)



Διάγραμμα 5.5: Καμπύλη LPR για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser

-Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Η τιμή της αντίστασης πόλωσης είναι $R_p=950\Omega$

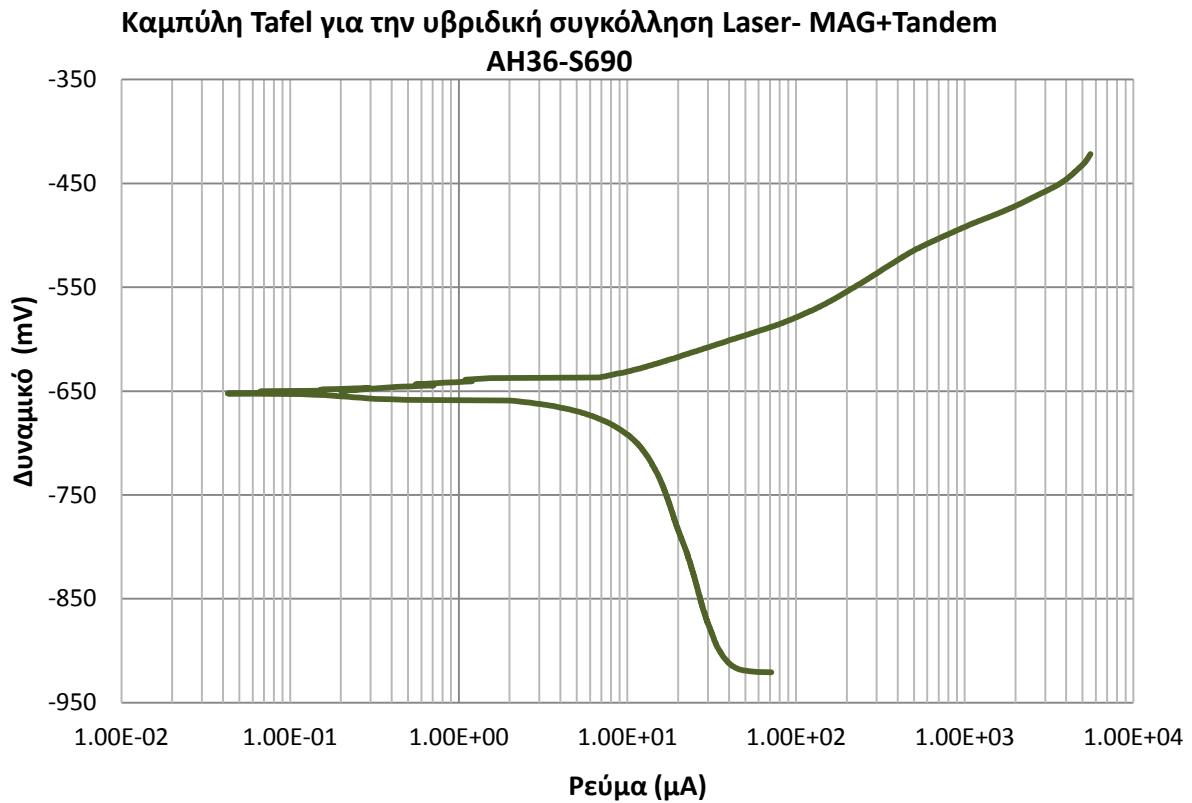


Διάγραμμα 5.6: Αποτελέσματα δοκιμών της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης για την Υβριδική Συγκόλληση Laser-MAG+Tandem AH36-S690

- Μέθοδος προεκβολής ευθειών (Tafel)

Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε τάση $\pm 250\text{mV}$.

Το προκύπτον ρεύμα διάβρωσης για την Υβριδική συγκόλληση Laser-GMA+Tandem AH36-S690 είναι $i_{\text{corr}}=3.5 \mu\text{A}$ ενώ το δυναμικό διάβρωσης είναι $E_{\text{CORR}}=-650 \text{mV}$ (Διάγραμμα 5.7).



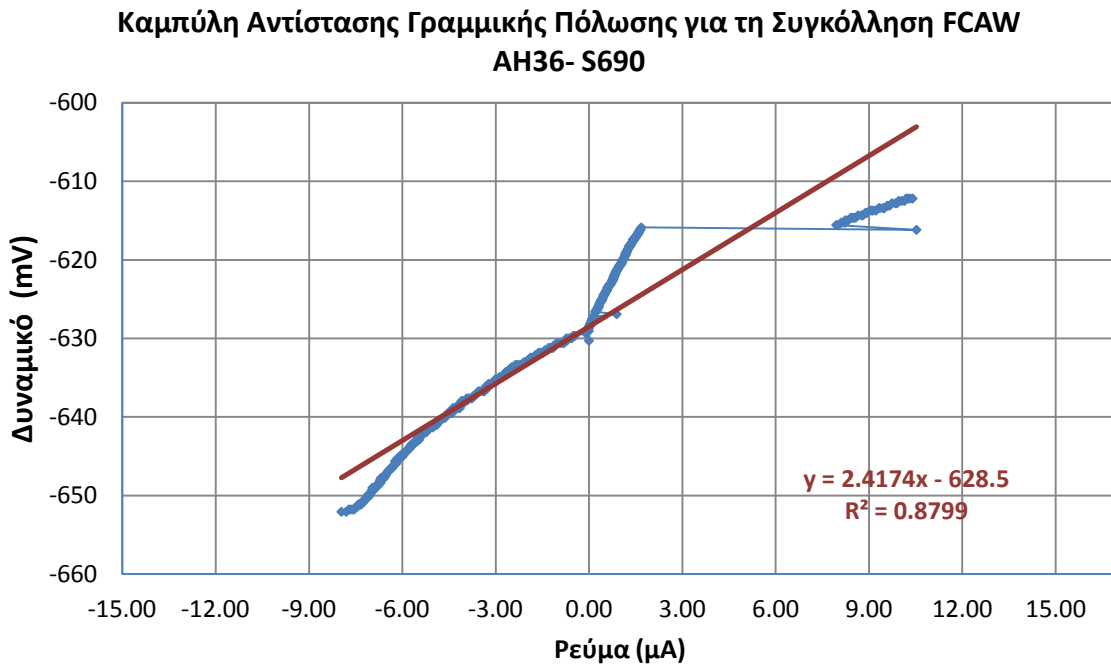
Διάγραμμα 5.7: Καμπύλη Tafel για την Υβριδική Συγκόλληση Laser-MAG+Tandem AH36-S690

5.4.3 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι για την Συγκόλληση FCAW AH36-S690

-Μέθοδος Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης (LPR)

Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε πόλωση $\pm 25\text{mV}$. Ο προσδιορισμός της καμπύλης ρεύματος - δυναμικού γίνεται μέσω του Διαγράμματος 5.8.

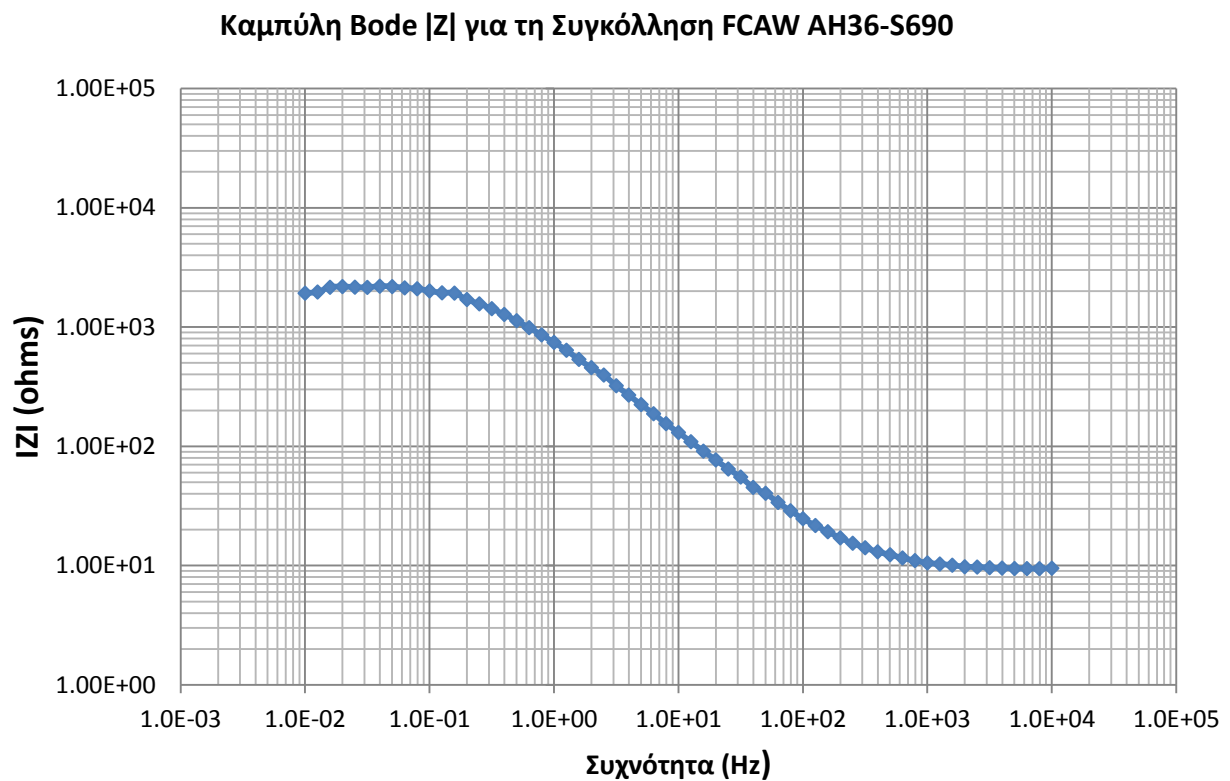
Όπως παρατηρείται, η καμπύλη της γραμμικής πόλωσης δεν χαρακτηρίζεται σε όλη της την έκταση από γραμμικότητα, και αυτό οφείλεται στο γεγονός της διάλυσης του οξυγόνου στο διάλυμα του ηλεκτροχημικού κελιού, σύμφωνα με την αντίδραση 5.1 της παραγράφου 5.4.2.



Διάγραμμα 5.8: Καμπύλη LPR για την συγκόλληση FCAW ανόμοιων κραμάτων AH36-S690

- Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Η τιμή της αντίστασης πόλωσης είναι $R_p=2000$ Ohms.

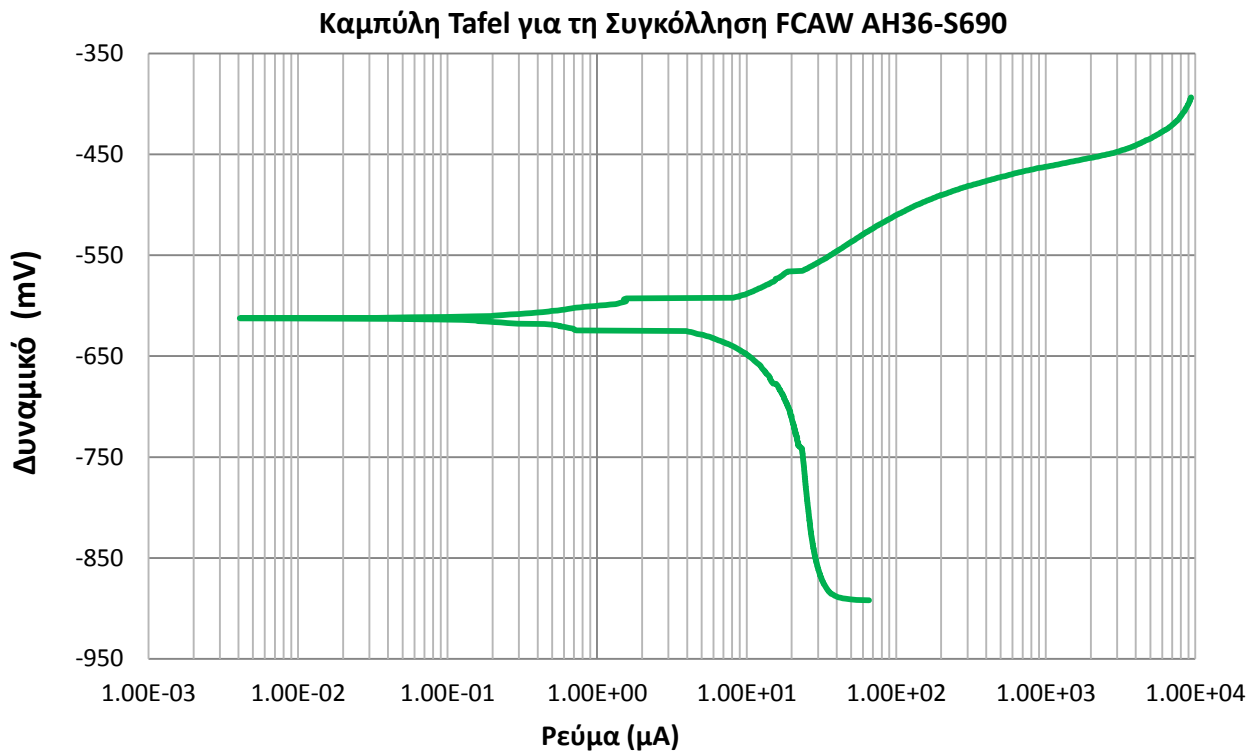


Διάγραμμα 5.9: Αποτελέσματα δοκιμών της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης για την συγκόλληση FCAW ανόμοιων κραμάτων AH36-S690

- Μέθοδος προεκβολής ευθειών (Tafel)

Για την εκτέλεση του πειράματος εφαρμόστηκε τάση $\pm 250\text{mV}$.

Το προκύπτον ρεύμα διάβρωσης για την Υβριδική συγκόλληση Laser-GMA+Tandem AH36-S690 είναι $i_{\text{CORR}}=2.5 \mu\text{A}$ ενώ το δυναμικό διάβρωσης είναι $E_{\text{CORR}}=-600 \text{mV}$ (Διάγραμμα 5.10).



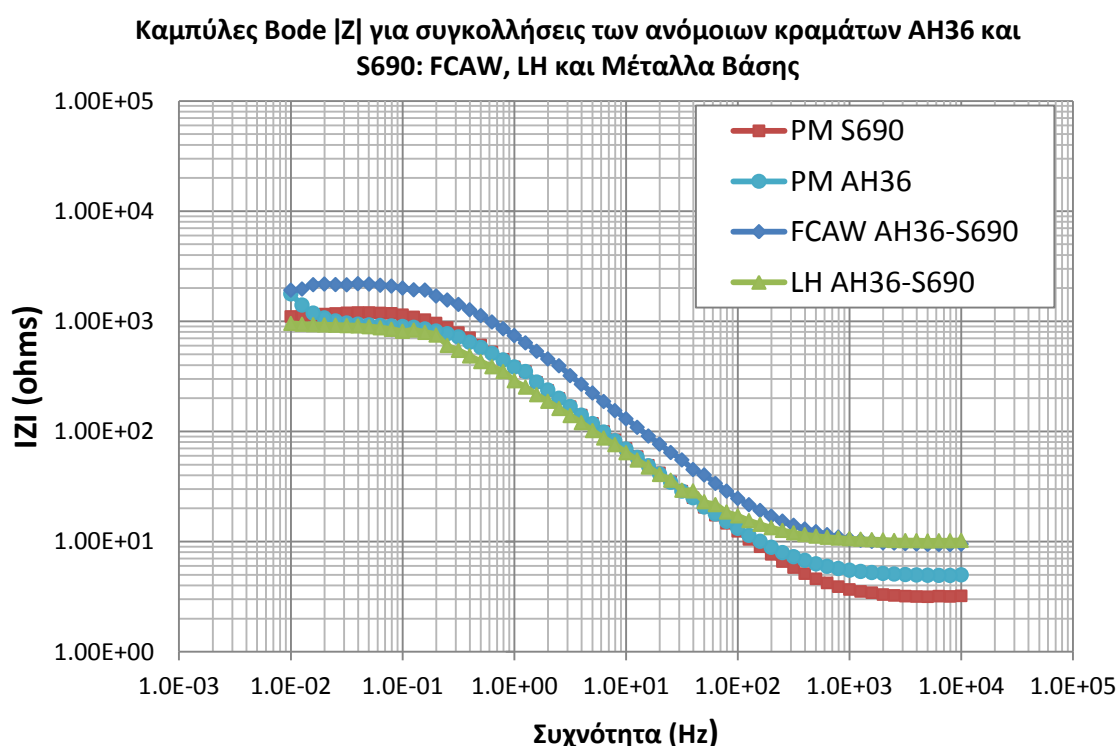
Διάγραμμα 5.10: Καμπύλη Tafel για την συγκόλληση FCAW ανόμοιων κραμάτων AH36-S690

5.4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ηλεκτροχημικών μεθόδων

- Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Στο Διάγραμμα 5.11 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των καμπυλών Tafel για τις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων AH36 και S690 που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική, με τις μεθόδους υβριδικής συγκόλλησης laser-GMA+tandem και της FCAW. Παρατίθενται επίσης και οι καμπύλες των βασικών μετάλλων, προς καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων της EIS οδηγεί στο συμπέρασμα πως η συγκόλληση FCAW AH36-S690 εμφανίζει την υψηλότερη αντίσταση πόλωσης (αν και οι διαφορές με τα υπόλοιπα διαγράμματα δεν είναι σημαντικές). Παρόλα αυτά, η FCAW AH36-S690 εμφανίζει τη μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση σχετικά με την υβριδική συγκόλληση laser-GMA+tandem και τα δύο μέταλλα βάσης AH36 και S690.



Διάγραμμα 5.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών της Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης για τις συγκολλήσεις υβριδική laser- τόξου (LH) και FCAW, καθώς και τα μέταλλα βάσης AH36 και S690

- Μέθοδος προεκβολής ευθειών (Tafel)

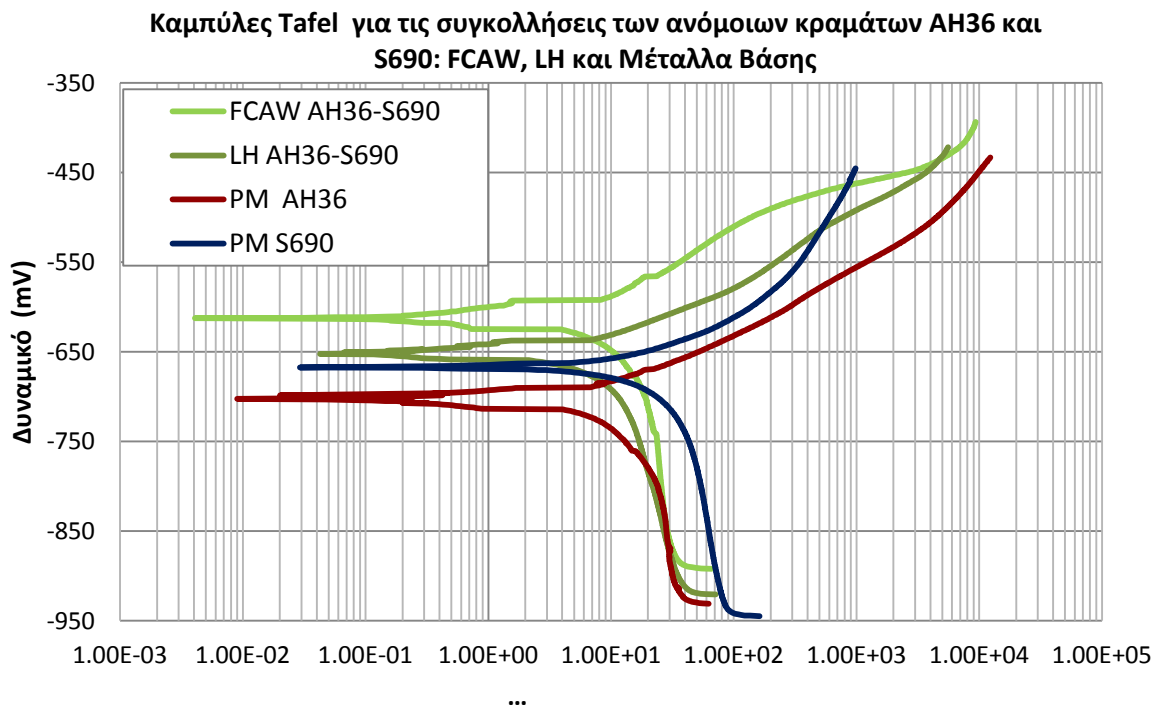
Παρακάτω (Διάγραμμα 5.12) παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των καμπυλών Tafel για τις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων AH36 και S690 που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική, με τις μεθόδους υβριδικής συγκόλλησης laser-GMA+tandem και της FCAW. Παρατίθενται επίσης και οι καμπύλες των βασικών μετάλλων, προς καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Η σύγκριση των καμπυλών οδηγεί στο συμπέρασμα πως η συγκόλληση FCAW AH36-S690 παρουσιάζει τη χαμηλότερη επιδεκτικότητα σε διάβρωση (εξαιτίας του δυναμικού διάβρωσης E_{CORR} περίπου ίσο με -600 mV), ενώ υψηλότερη επιδεκτικότητα στη διάβρωση εμφανίζει το μέταλλο βάσης AH36, με δυναμικό διάβρωσης E_{CORR} περίπου ίσο με -700 mV.

Οι υπόλοιπες τεχνικές συγκόλλησης, ως προς τα δυναμικά διάβρωσής τους, κυμαίνονται στα όρια των δύο παραπάνω ακραίων καμπυλών.

Όσον αφορά στο ρεύμα διάβρωσης, δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των τεχνικών συγκολλήσεων και των μετάλλων βάσης (σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται στα $2.5 \div 10 \mu A$). Αυτό σημαίνει πως παρουσιάζουν και παρόμοιο ρυθμό διάβρωσης.

Η μορφή του καθοδικού μέρους όλων των καμπυλών οφείλεται στο φαινόμενο της διάχυσης του οξυγόνου.



Διάγραμμα 5.12: Σύγκριση καμπυλών Tafel για τις συγκολλήσεις υβριδική laser- τόξου (LH) και FCAW, καθώς και τα μέταλλα βάσης AH36 και S690

Τα αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν για τα μέταλλα βάσης και τις ετερογενείς συγκολλήσεις που μελετήθηκαν, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Συγκριτικά αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων EIS και Tafel

	R_p (Ohms)	i_{CORR} ($\mu A/cm^2$)	E_{CORR} (mV)
Μέταλλο βάσης AH36	1000	2	-700
Μέταλλο βάσης S690	1000	10	-650
Υβριδική συγκόλληση laser- τόξου AH36- S690	950	3.5	-650
FCAW συγκόλληση AH36- S690	2000	2.5	-600

Όπως έχει αναφερθεί και στη θεωρία της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, το ρεύμα διάβρωσης είναι ανάλογο του ρυθμού διάβρωσης, δηλαδή:

$$i_{CORR} = f(\text{Corrosion Rate})$$

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση, όσο αυξάνεται το ρεύμα διάβρωσης, τόσο περισσότερο αυξάνεται ο ρυθμός διάβρωσης.

Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση πόλωσης (ή αλλιώς αντίσταση σε διάβρωση, R_p), είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο του i_{CORR} , και η αύξηση του ενός προφανώς συνεπάγεται τη μείωση του άλλου.

Μελετώντας τα στοιχεία του Πίνακα 5.2, παρατηρούνται τα εξής:

- Μέσω των καμπυλών EIS, οι τιμές της αντίστασης πόλωσης σε διάβρωση για τις ετερογενείς συγκολλήσεις κατατάσσονται σε στη φθίνουσα σειρά:

$$R_{p,FCAW} > R_{p,LH}$$

Δηλαδή η συγκόλληση FCAW AH36-S690 παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση σχετικά με τα υπόλοιπα μελετώμενα δοκίμια.

- Έτσι, αναμένεται οι ρυθμοί διάβρωσης (και κατ'έπекταση των i_{CORR}), να ακολουθούν ακριβώς την αντίθετη φορά. Πράγματι, τα i_{CORR} που προέκυψαν από τις καμπύλες Tafel, κατατάσσονται στη φθίνουσα σειρά:

$$i_{CORR,LH} > i_{CORR,FCAW}$$

γεγονός που επιβεβαιώνει τις μετρήσεις.

- Τα δυναμικά διάβρωσης ακολουθούν τη σειρά του i_{CORR} ,

$$E_{CORR,LH} > E_{CORR,FCAW}$$

5.5 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης

Οι συνθήκες του θαλάμου θεωρείται ότι προσεγγίζουν σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό τις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος. Στα πλαίσια του προγράμματος MOSAIC, χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι που συνδυάζουν την υγρασία, την ξηρασία αλλά και την αλατονέφωση, σε κυκλικές περιόδους προκαθορισμένης διάρκειας.

Οι δοκιμές στο θάλαμο αλατονέφωσης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14993 (2001) "Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, "dry" and "wet" conditions".

Οι σημαντικότερες παράμετροι της διαδικασίας είναι:

- Συνολικός χρόνος πειράματος: 90 κύκλοι (30 ημέρες)
- Μονάδα χρόνου: 15 κύκλοι (5 ημέρες)
- Περίοδος και συνθήκες ενός κύκλου έκθεσης: 8 ώρες, με τις εξής εναλλαγές:
 - Αλατονέφωση: 2 ώρες, $35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, με διάλυμα $50\text{g/l}\pm 5\text{g/l}$ NaCl
 - Συνθήκες ξήρανσης: 4 ώρες, $60^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, $<30\%$ RH
 - Συνθήκες υγρασίας: 2 ώρες $50^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, $>90\%$ RH

Πριν την έκθεση κάθε ενός δοκιμίου στο θάλαμο, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αμμοβολή, καθαρισμό με απιονισμένο νερό και αιθανόλη, ξήρανση σε θερμό αέρα και ζύγισμα. Επίσης, κάθε δοκίμιο καλύφθηκε με μονωτική ταινία, ώστε να είναι εκτεθειμένο ένα μέρος της επιφάνειάς του στη διάβρωση, καθώς και για να μην επεκταθεί η διάβρωση.

Οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης έγιναν μέσω των πειραμάτων του θαλάμου αλατονέφωσης, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 – Πειραματικές Μέθοδοι.

Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα - Συζήτηση

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των 24 δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα του θαλάμου αλατονέφωσης στις τρεις φάσεις:

- πριν την τοποθέτησή τους στο θάλαμο αλατονέφωσης (Εικόνα 5.31α)
- μετά την απομάκρυνσή τους από αυτόν (Εικόνα 5.31β) και
- μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης (Εικόνα 5.31γ)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (τυχαίο δοκίμιο)



Εικόνα 5.31 α): Επιφάνεια του δοκιμίου έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.31 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.31 γ): Δοκίμιο μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

5.5.1 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμίων μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο αλατονέφωσης

Παρατηρώντας τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο θάλαμο αρχικά διακρίνουμε ότι από τους 15 πρώτους κύκλους έκθεσης, που αντιστοιχούν σε 5 ημέρες, ολόκληρη η επιφάνεια των δοκιμίων έχει καλυφθεί από το προϊόν της διάβρωσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μέχρι και τις 20 μέρες το προϊόν αυτό είναι πορτοκαλί χρώματος (Εικόνες 5.2-5.34 β) και Εικόνες 5.39-5.41 β)) και από τους 75 μέχρι τους 90 κύκλους έκθεσης γίνεται σκούρο καφέ (Εικόνες 5.36-5.38 β)). Έτσι, συμπεραίνουμε κάποια αλλαγή στη χημική σύσταση του προϊόντος διάβρωσης όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης, τόσο για τα Regular δοκίμια όσο και για τα Interval.

Πιο συγκεκριμένα, στους 15 κύκλους έκθεσης προκύπτει διάβρωση σε όλη την επιφάνεια, πορτοκαλί χρώματος, όπου ανά διαστήματα εμφανίζονται σημεία ανοιχτότερου χρώματος τα οποία περιβάλλονται από γκριζωπό περίγραμμα.

Στους 30 κύκλους έκθεσης, τα εντοπισμένα αυτά σημεία αρχίζουν να πληθαίνουν, αυξάνεται σημαντικά η διάμετρός τους, ενώ καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του δοκιμίου.

Μετά από 45 κύκλους έκθεσης στον θάλαμο (ισοδυναμεί με 15 ημέρες), τα εντοπισμένα αυτά σημεία έχουν καλύψει σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια των δοκιμίων ενώ παράλληλα αρχίζει η δημιουργία μικρών κρατήρων, οι οποίοι διαρρηγνύονται πρώτα στα Interval δοκίμια.

Μετά το πέρας των 60 κύκλων, το προϊόν της διάβρωσης έχει αλλάξει εμφανώς το χρώμα του σε σκούρο καφέ, κυρίως στα Interval δοκίμια (παραδείγματος χάριν στο IA7* Interval δοκίμιο που παρέμεινε στο θάλαμο για 75 κύκλους – Εικόνα 5.38 β)), ενώ ο αριθμός των κρατήρων έχει αυξηθεί σημαντικά και ο αριθμός αυτών που έχουν διαρρηχθεί.

Στους 75 και 90 κύκλους, παρατηρείται η συνένωση των μικρών κρατήρων σε μεγαλύτερους όπου η διάρρηξη τους αποκαλύπτει τα επάλληλα στρώματα των προϊόντων της διάβρωσης. Τα ανώτερα στρώματα των προϊόντων διάβρωσης είναι εύθραυστα και απομακρύνονται εύκολα από την επιφάνεια.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν από την αρχή στο θάλαμο (Regular) με αυτά που τοποθετήθηκαν μεταγενέστερα ανάλογα με το πρόγραμμα (Interval), καταλήγουμε ότι για τον ίδιο χρόνο παραμονής το φαινόμενο εξελίσσεται εντονότερα στα Interval δοκίμια κυρίως στους πρώτους 45 κύκλους, ενώ για μεγαλύτερη παραμονή ο ρυθμός διάβρωσης συγκλίνει και συνήθως τα Regular δοκίμια παρουσιάζουν ελαφρά μεγαλύτερες τιμές.

5.5.2 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμίων μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

Η απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης από την επιφάνεια των δοκιμίων αποκαλύπτει τη μορφολογία της διάβρωσης η οποία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος του χάλυβα. Έτσι, για τον ΑΗ36 παρατηρείται διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion), οι οποίοι εξελίσσονται κυρίως κατά το πλάτος ενώ παρατηρείται η ύπαρξη χαμηλού βάθους διάβρωσης (το φαινόμενο γίνεται πιο σαφές με την παρατήρηση του μετάλλου βάσης ΑΗ36 Εικόνες 5.52-5.53 γ)). Αντίθετα, στον S690 παρατηρείται διάβρωση βελονισμών οι οποίοι παρουσιάζουν μικρή διάμετρο αλλά αρκετά μεγαλύτερο βάθος (Εικόνες 5.54-5.55 γ)). Άρα, είναι πιθανό στον S690 η εξέλιξη του φαινομένου είναι πιο επικίνδυνη.

Ταυτόχρονα, μετά τον καθαρισμό των regular δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι για μικρό διάστημα έκθεσης (μέχρι 60 κύκλους έκθεσης) στο θάλαμο αλατονέφωσης ο S690 δίνει επιφάνεια κιτρινωπού χρώματος (όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.32-5.34 γ)). Με την παραμονή των δοκιμίων στο θάλαμο για περισσότερους από 60 κύκλους, η επιφάνεια του S690 αποκτά μαύρο χρώμα (Εικόνες 5.36-5.38 γ)). Τα interval δοκίμια, μετά τον καθαρισμό τους, αποκαλύπτουν μαύρη επιφάνεια του S690 ήδη από τους 30 κύκλους έκθεσης (Εικόνες 5.40-5.41 γ)). Αντίθετα, ο ΑΗ36 δίνει επιφάνεια λευκού χρώματος.

Παράλληλα, παρατηρείται προσβολή και στη γραμμή της συγκόλλησης, και στις δύο ετερογενείς συγκολλήσεις, το οποίο διακρίνεται εύκολα λόγω του πιο σκούρου χρώματος. Οι συγκολλήσεις FCAW S690-ΑΗ36 και Υβριδική laser-tandem τόξου ξεκινούν να διαβρώνονται ήδη από τους 30 κύκλους έκθεσης στο θάλαμο (regular δοκίμια- Εικόνες 5.44-5.48 γ)), και από τους 75 κύκλους στα interval δοκίμια (Εικόνα 5.51 γ)).

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι για μικρά διαστήματα παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης τα προϊόντα της διάβρωσης απομακρύνονταν με ευκολία, ενώ όταν αυξήθηκε ο χρόνος παραμονής αυξήθηκε και η δυσκολία καθαρισμού των δοκιμίων. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής τα προϊόντα της διάβρωσης εμφανίζουν ισχυρότερη συνάφεια με το υπόστρωμα, εξαιτίας και της προκύπτουσας μορφολογίας της επιφάνειας.

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης για 15 κύκλους χρειάστηκαν περίπου 5 ώρες στο διάλυμα για να καθαρίσουν εντελώς, σε αντίθεση με αυτά που εκτέθηκαν για 90 κύκλους, τα οποία παρέμειναν στο διάλυμα έως και 24 ώρες. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι τα προϊόντα διάβρωσης του ΑΗ36 καθαρίστηκαν πιο εύκολα κάτι που πιθανότατα οφείλεται στο χαμηλό βάθος των προϊόντων αυτών.

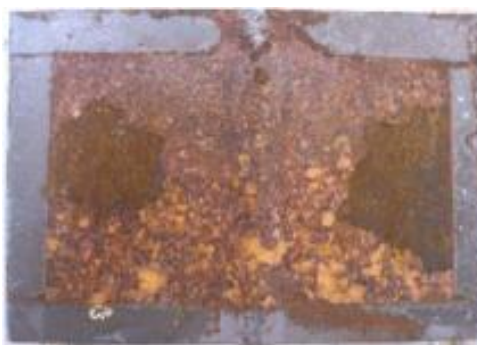
5.5.3 Δοκίμια ανόμοιων κραμάτων AH36-S690 με υβριδική συγκόλληση laser – GMA+tandem τόξου.

Αριστερά της συγκόλλησης έχουμε μέταλλο βάσης AH36 και δεξιά αυτής μέταλλο βάσης S690.

ΙΑ1 (5 ΗΜΕΡΕΣ- 15 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.32 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ1 έπειτα από την αμμοβολή



Εικόνα 5.32 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ1 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.32 γ): Δοκίμιο ΙΑ1 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

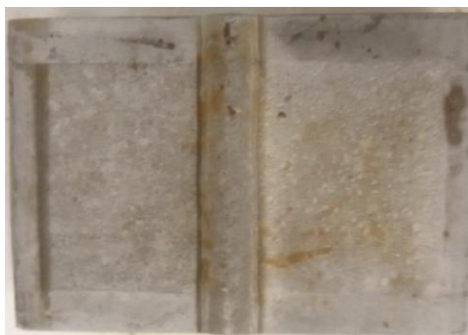
ΙΑ2 (10 ΗΜΕΡΕΣ- 30 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.33 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.33 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.33 γ): Δοκίμιο ΙΑ2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ3 (15 ΗΜΕΡΕΣ- 45 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.34 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ3 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.34 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ3 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.34 γ): Δοκίμιο ΙΑ3 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ4 (20 ΗΜΕΡΕΣ- 60 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.35 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ4 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης

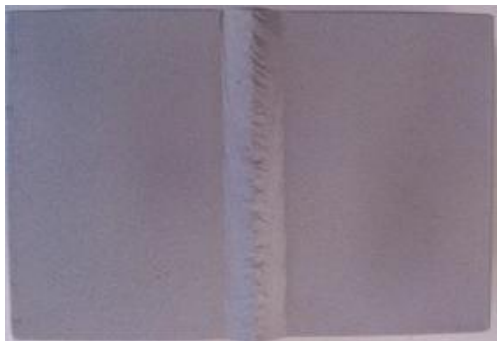


Εικόνα 5.35 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ4 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.35 γ): Δοκίμιο IA4 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

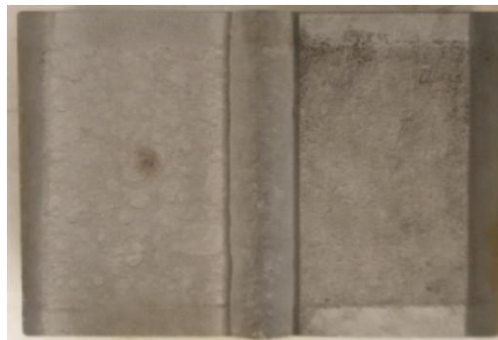
IA5* (25 ΗΜΕΡΕΣ- 75 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.36 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IA5* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.36 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IA5* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.36 γ): Δοκίμιο IA5* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ6 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.37 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ6 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.37 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ6 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.37 γ): Δοκίμιο ΙΑ6 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ7* (25 ΗΜΕΡΕΣ- 75 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.38 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ7* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.38 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ7* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης

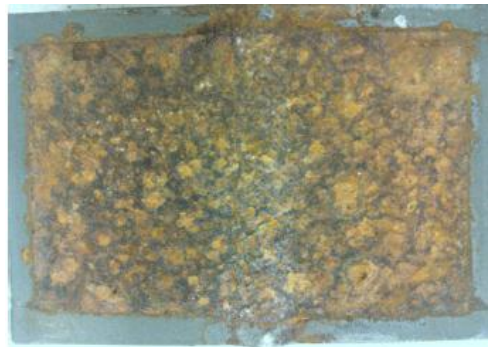


Εικόνα 5.38 γ): Δοκίμιο IA7* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IA8* (20 ΗΜΕΡΕΣ- 60 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.39 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IA8* (interval) έπειτα από την αμβολογή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.39 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IA8* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.39 γ): Δοκίμιο IA8* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ9* (15 ΗΜΕΡΕΣ- 45 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.40 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ9* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.40 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ9* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.40 γ): Δοκίμιο ΙΑ9* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ10* (10 ΗΜΕΡΕΣ- 30 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.41 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ10* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.41 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ10* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.41 γ): Δοκίμιο IA10* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IA11* (5 ΗΜΕΡΕΣ- 15 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.42 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IA11* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.42 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IA11* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης

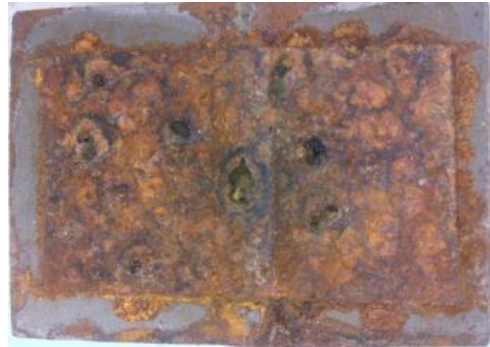


Εικόνα 5.42 γ): Δοκίμιο IA11* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

ΙΑ12 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.43 α): Επιφάνεια του δοκιμίου ΙΑ12 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.43 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου ΙΑ12 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.43 γ): Δοκίμιο ΙΑ12 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

5.5.4 Δοκίμια ανόμοιων κραμάτων AH36-S690 με συγκόλληση FCAW

Αριστερά της συγκόλλησης έχουμε parent metal AH36 και δεξιά αυτής parent metal S690.

IIB1 (10 ΗΜΕΡΕΣ- 30 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.44 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIB1 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.44 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIB1 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.44 γ): Δοκίμιο IIB1 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IIB2 (15 ΗΜΕΡΕΣ- 45 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.45 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIB2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.45 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIB2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.45 γ): Δοκίμιο IIB2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IIB3 (20 ΗΜΕΡΕΣ- 60 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.46 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIB3 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.46 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIB3 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.46 γ): Δοκίμιο IIB3 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IIIB2 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.47 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIIB2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.47 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIIB2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.47 γ): Δοκίμιο IIIB2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IVB3 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.48 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IVB3 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.48 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IVB3 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.48 γ): Δοκίμιο IVB3 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

III B3* (25 ΗΜΕΡΕΣ- 75 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.49 α): Επιφάνεια του δοκιμίου III B3* (interval) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.49 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου III B3* (interval) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.49 γ): Δοκίμιο III B3* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IVB1* (20 ΗΜΕΡΕΣ- 60 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.50 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IVB1* (*interval*) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.50 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IVB1* (*interval*) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.50 γ): Δοκίμιο IVB1* (*interval*) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IVB2* (15 ΗΜΕΡΕΣ- 45 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.51 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IVB2* (*interval*) έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.51 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IVB2* (*interval*) μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.51 γ): Δοκίμιο IVB2* (interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

5.5.5 Δοκίμια μετάλλου βάσης ΑΗ36
IIA2 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.52 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIA2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.52 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIA2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.52 γ): Δοκίμιο IIA2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IIA1 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.53 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIA1 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.53 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIA1 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.53 γ): Δοκίμιο IIA1 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

5.5.6 Δοκίμια μετάλλου βάσης S690

IIC2 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.54 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IIC2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.54 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IIC2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.54 γ): Δοκίμιο IIC2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

IVC2 (30 ΗΜΕΡΕΣ- 90 ΚΥΚΛΟΙ ΕΚΘΕΣΗΣ)



Εικόνα 5.55 α): Επιφάνεια του δοκιμίου IVC2 έπειτα από την αμμοβολή, και πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.55 β): Διαβρωμένη επιφάνεια δοκιμίου IVC2 μετά την έξοδό του από τον θάλαμο αλατονέφωσης



Εικόνα 5.55 γ): Δοκίμιο IVC2 μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

5.6 Μετρήσεις απώλειας βάρους

Οι πειραματικές μετρήσεις, όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, οδήγησαν σε αποτελέσματα σχετικά με την απώλεια βάρους των δοκιμίων. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων και το βάθος της διάβρωσης. Ειδικότερα, σύμφωνα με το ASTM G31-72, ισχύει ο τύπος:

Ρυθμός διάβρωσης

$$\text{Corrosion Rate} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (5.2)$$

Επιπλέον σύμφωνα με το ISO 14993 το βάθος της διάβρωσης μπορεί να υπολογισθεί συνάρτηση της μεταβολής της μάζας. Δηλαδή:

Βάθος Διάβρωσης

$$\text{Corrosion Depth} = \frac{W}{A \times D} \quad (5.3)$$

Όπου:

K: σταθερά (ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης), ίση με 8.76×10^4 για υπολογισμό σε mm/year

W: η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A: η επιφάνεια έκθεσης (cm^2) (με ακρίβεια 0.01 cm^2). Η επιφάνεια έκθεσης υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο, θεωρώντας το παραλληλόγραμμο με πλευρές ίσες με το μέσο όρο των δύο πλευρών.

T: χρόνος έκθεσης σε ώρες

D: πυκνότητα του χάλυβα ίση με 7.86 g/cm^3

Ακολουθούν οι εξισώσεις με τις οποίες έγιναν οι υπολογισμοί καθώς και οι συγκεντρωτικοί πίνακες με όλα τα στοιχεία για το κάθε δοκίμιο αλλά και τα τελικά αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο το αρχικό βάρος, το τελικό βάρος, η απώλεια βάρους που προκύπτει σε g, ο χρόνος έκθεσης σε ώρες, κύκλους και ημέρες, η εκτεθειμένη επιφάνεια σε cm^2 , καθώς και το βάθος και ο ρυθμός διάβρωσης που προκύπτουν.

Πίνακας 5.3: Μετρήσεις απώλειας βάρους των δοκιμών μετά τη διεξαγωγή του πειράματος του θαλάμου αλατονέφωση

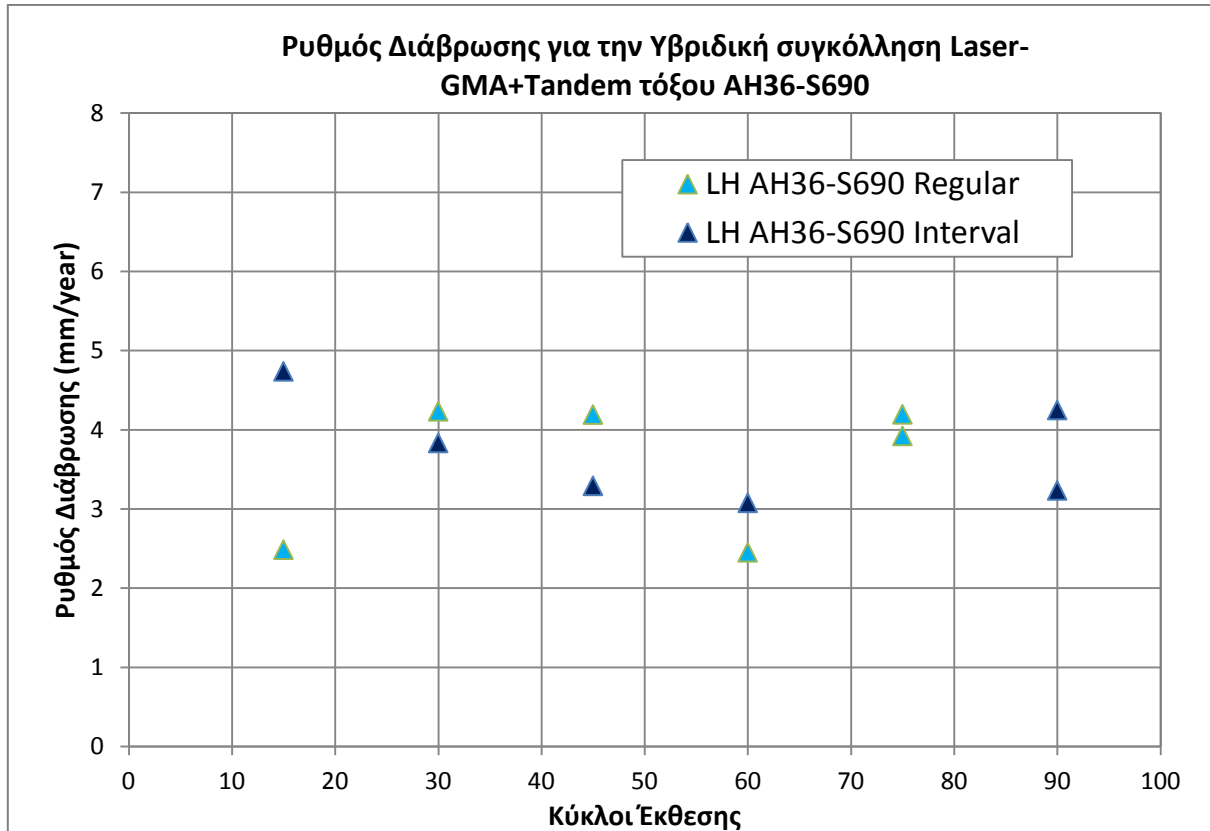
	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Regular/ Interval	ΒΑΡΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ (gr)	ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ Α (cm ²)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ (hours)	ΚΥΚΛΟΙ	ΗΜΕΡΕΣ	ΒΑΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ (gr)	ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (gr)	ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (%)	ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (μm)	ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (mm/year)
Δοκίμια με υβριδική συγκόλληση laser-GMA+tandem τόξου	IA1	r	1062.2	45.067	120	15	5	1059.9	2.3	0.217	64.931	4.740
	IA2	r	1041	46.003	240	30	10	1037.2	3.8	0.365	105.093	3.836
	IA3	r	1007.1	45.107	360	45	15	1002.3	4.8	0.477	135.386	3.294
	IA4	r	1002.3	49.761	480	60	20	995.7	6.6	0.658	168.747	3.080
	IA6	r	1029.7	49.150	720	90	30	1016.2	13.5	1.311	349.449	4.252
	IA12	r	1008.3	48.308	720	90	30	998.2	10.1	1.002	266.002	3.236
	IA5*	i	938.3	44.698	600	75	25	928.2	10.1	1.076	287.485	4.197
	IA7*	i	1026.6	48.272	600	75	25	1016.4	10.2	0.994	268.833	3.925
	IA8*	i	1055.1	52.962	480	60	20	1049.5	5.6	0.531	134.524	2.455
	IA9*	i	1066.3	50.930	360	45	15	1059.4	6.9	0.647	172.367	4.194
	IA10*	i	1029.9	50.435	240	30	10	1025.3	4.6	0.447	116.039	4.235
IA11*	i	1065.5	52.256	120	15	5	1064.1	1.4	0.131	34.085	2.488	
Δοκίμια με FCAW συγκόλληση	IIB1	r	752.2	31.136	240	30	10	748	4.2	0.558	171.618	6.264
	IIB2	r	749.9	49.078	360	45	15	743.2	6.7	0.893	173.688	4.226
	IIB3	r	738.6	47.638	480	60	20	730.1	8.5	1.151	227.011	4.143
	IIIB2	r	712.1	46.673	720	90	30	701.3	10.8	1.517	294.397	3.582
	IVB3	r	711.7	44.083	720	90	30	699.7	12	1.686	346.326	4.214
	IIIB3*	i	736.1	48.496	600	75	25	723.8	12.3	1.671	322.683	4.711
	IVB1*	i	720.5	50.776	480	60	20	710.9	9.6	1.332	240.542	4.390
	IVB2*	i	710.2	48.772	360	45	15	701.5	8.7	1.225	226.948	5.522
PM AH36	IIA1	r	752.8	48.361	720	90	30	742.1	10.7	1.421	281.491	3.425
	IIA2	r	726.3	39.967	720	90	30	716.2	10.1	1.391	321.509	3.912
PM S690	IIIC2	r	660.6	40.360	720	90	30	652.7	7.9	1.196	249.030	3.030
	IVC2	r	697.2	51.767	720	90	30	685.5	11.7	1.678	287.547	3.498

5.6.1 Διαγράμματα Απώλειας Βάρους

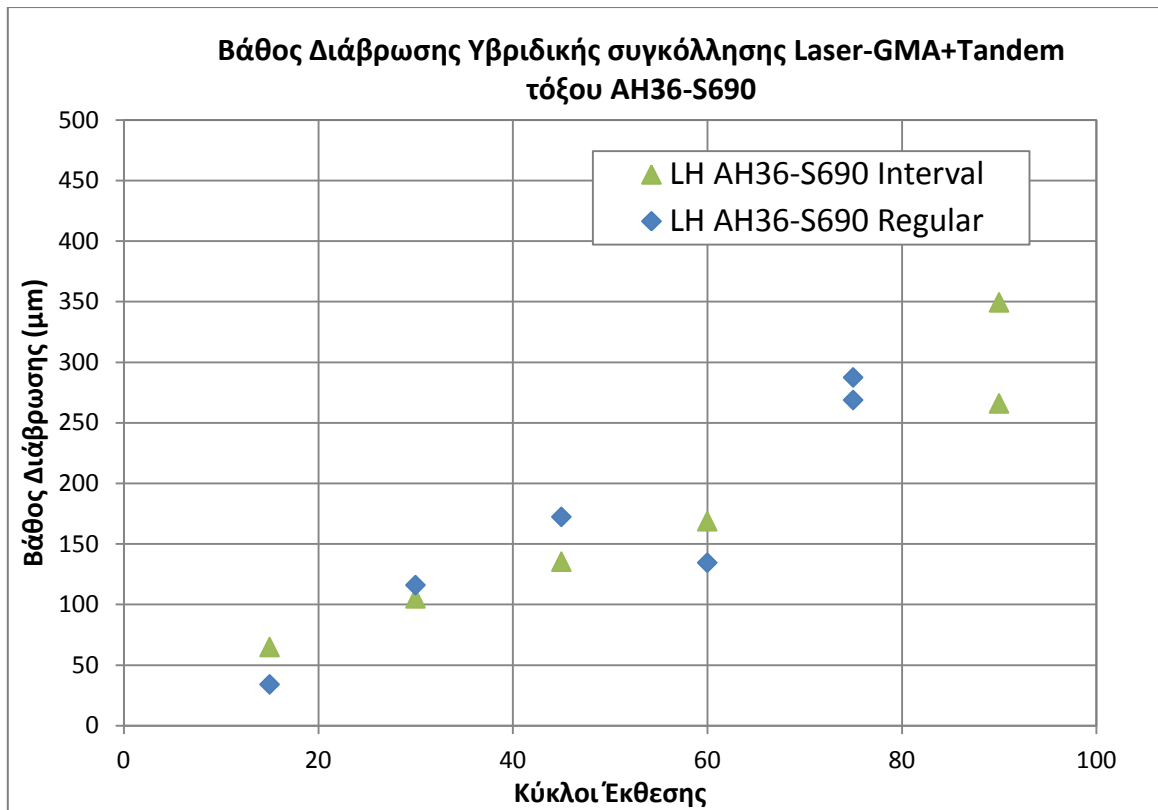
Στα διαγράμματα απώλειας βάρους παρουσιάζονται ο ρυθμός και το βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης. Τα κυριότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται στα συγκριτικά διαγράμματα (Διαγράμματα 5.17 και 5.28)

5.6.1.1 Διαγράμματα της Υβριδικής laser-GMA+tandem τόξου συγκόλλησης AH36-S690

Στα Διαγράμματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης για τα δοκίμια της Υβριδικής laser-GMA+tandem τόξου συγκόλλησης AH36-S690 για τα interval και τα regular δοκίμια.



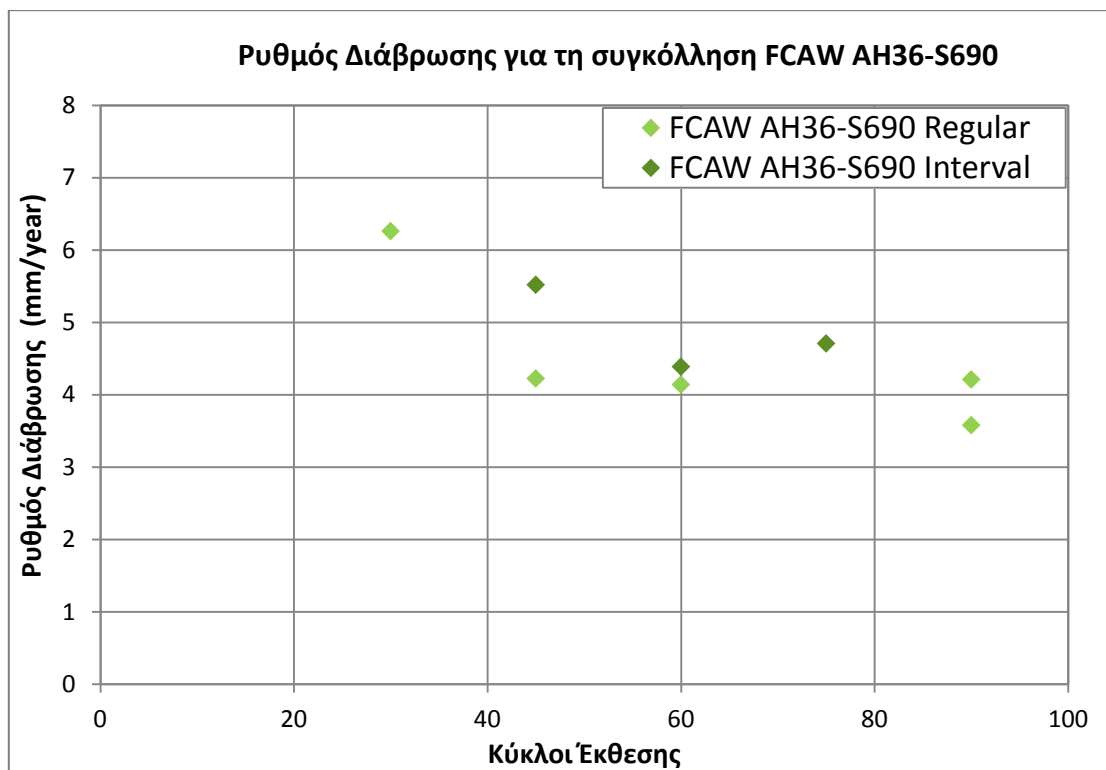
Διάγραμμα 5.13: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την Υβριδική laser-GMA+tandem τόξου συγκόλληση AH36-S690



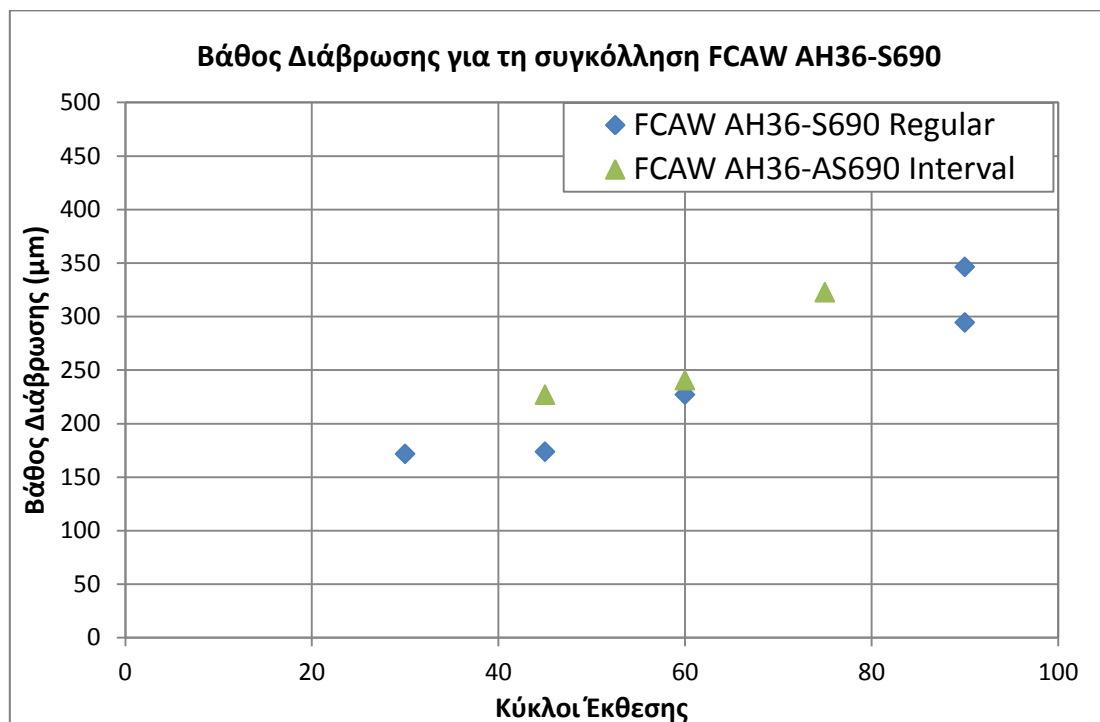
Διάγραμμα 5.14: Βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την Υβριδική laser-GMA+tandem τόξου συγκόλληση AH36-S690

5.6.1.2 Διαγράμματα της FCAW συγκόλλησης AH36-S690

Στα Διαγράμματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης για τα δοκίμια της FCAW συγκόλλησης AH36-S690 για τα interval και τα regular δοκίμια.



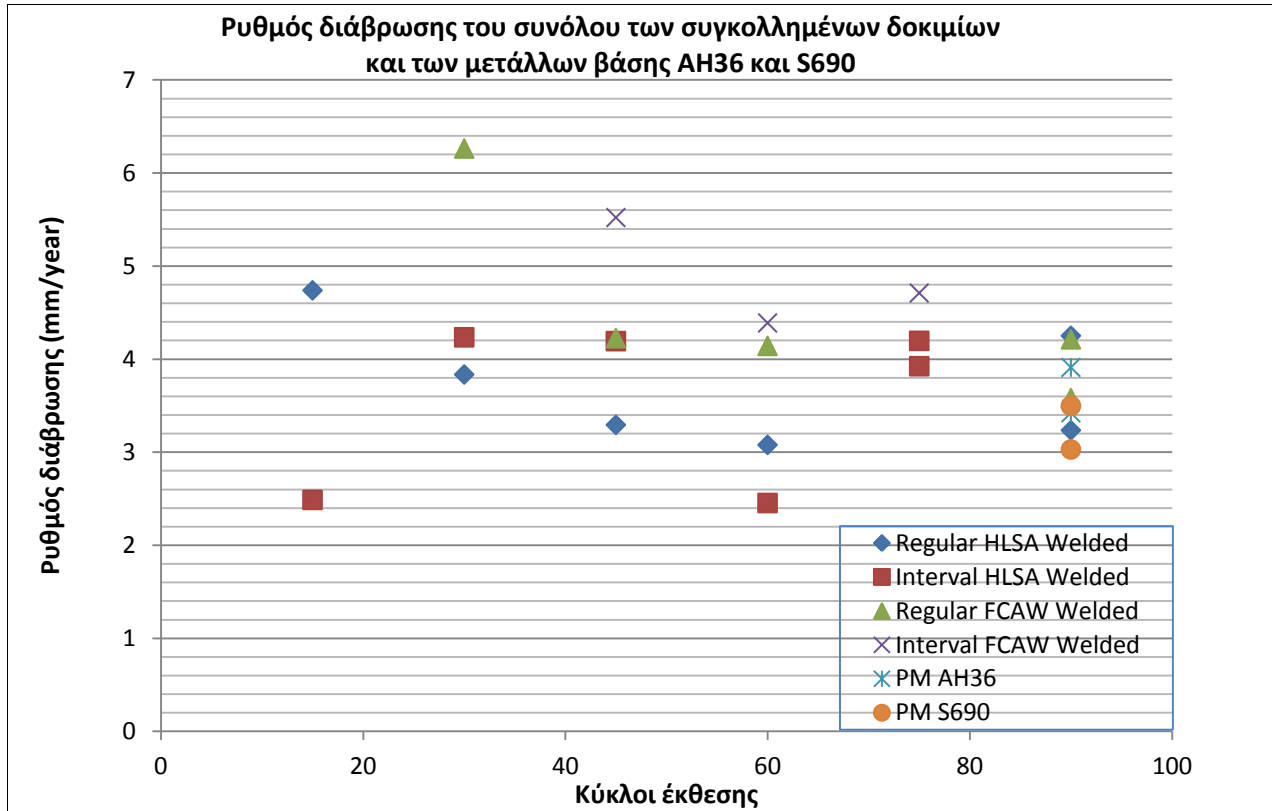
Διάγραμμα 5.15: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την FCAW συγκόλληση AH36-S690



Διάγραμμα 5.16: Βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης για την FCAW συγκόλληση AH36-S690

5.6.2 Συγκριτικά διαγράμματα για το ρυθμό διάβρωσης

Παρακάτω παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα (Διάγραμμα 5.17) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των ρυθμών διάβρωσης που παρουσίασαν όλα τα δοκίμια στις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης.



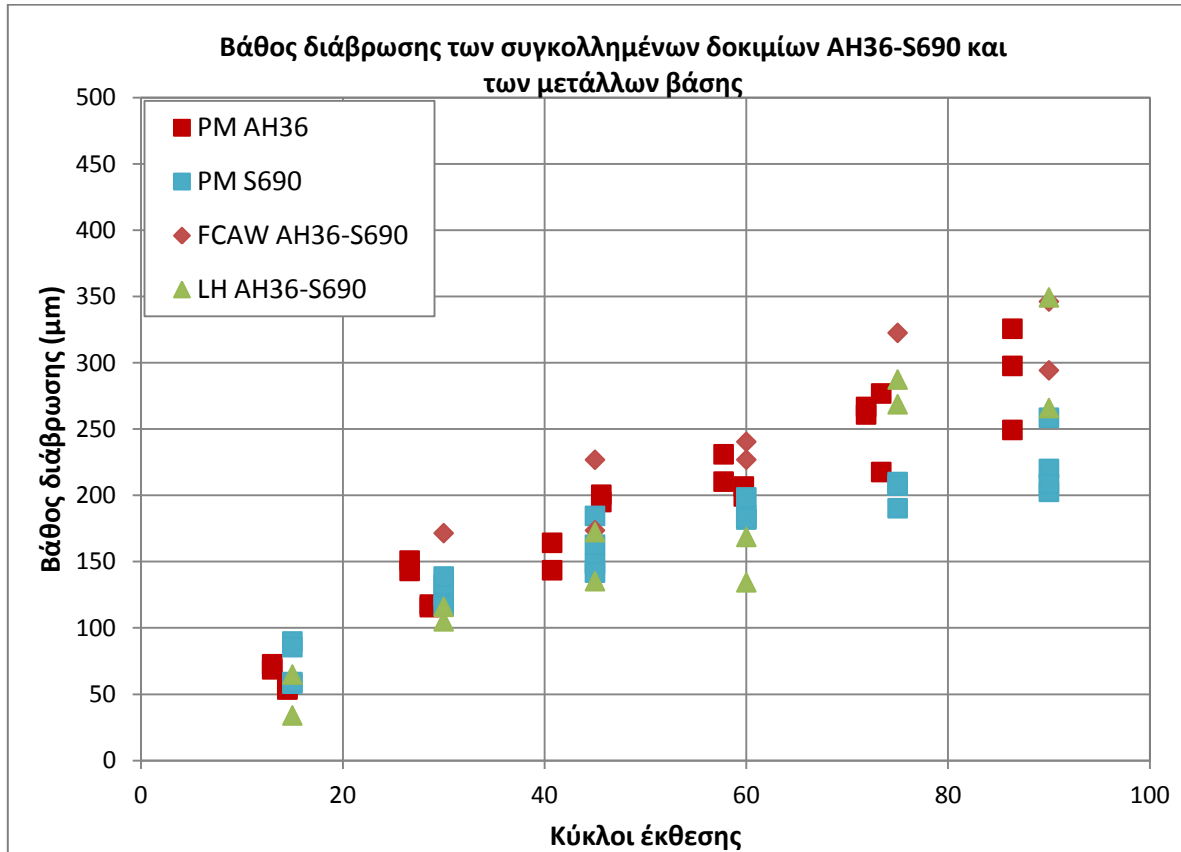
Διάγραμμα 5.17: Συγκριτικό διάγραμμα του ρυθμού διάβρωσης για τις δυο συγκολλήσεις και για τα μέταλλα βάσης AH36 και S690

Από το διάγραμμα σύγκρισης όλων των δοκιμίων για το ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων κυμαίνεται μεταξύ 2.5-3.9 $mm/year$. Πιο συγκεκριμένα, για τη συγκόλληση FCAW AH36-S690 η μέγιστη τιμή είναι 6.264 $mm/year$ ενώ η ελάχιστη είναι 3.582 $mm/year$ και ο μέσος όρος για ολόκληρο το διάστημα έκθεσης προκύπτει 3.661 $\pm 1.204 mm/year$. Αντίστοιχα για την Υβριδική laser-GMA+tandem τόξου συγκόλληση AH36-S690 η μέγιστη τιμή ανέρχεται στα η μέγιστη τιμή είναι 4.74 $mm/year$ ενώ η ελάχιστη είναι 2.455 $mm/year$ και ο μέσος όρος για ολόκληρο το διάστημα έκθεσης προκύπτει 4.632 $\pm 1.302 mm/year$.
- Για χρόνους έκθεσης από 5 έως 15 ημέρες παρατηρούνται γενικά υψηλότεροι ρυθμοί διάβρωσης στα Interval δοκίμια ενώ από 20 έως 30 ημέρες οι τιμές συγκλίνουν και τα Regular παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές.
- Επιπλέον, είναι προφανές ότι όσο αυξάνονται οι κύκλοι έκθεσης ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται, έτσι στις 10 ημέρες (30 κύκλους) ο μέσος όρος για όλα τα δοκίμια είναι περίπου 4.778 $mm/year$ ενώ στις 30 ημέρες (90 κύκλοι) ο ρυθμός έχει μειωθεί στα 3.821 $mm/year$.
- Τέλος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια της FCAW AH36-S690 συγκόλλησης παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης σε όλα τα στάδια της παραμονής τους στο θάλαμο.

- Όσον αφορά στα μέταλλα βάσης AH36 και S690, παρέμειναν στο θάλαμο για 30 ημέρες (90 κύκλοι), και ο ρυθμός διάβρωσής τους είναι κατά μέσο όρο:
 - Για τον AH36 $\sim 3.668 \text{ mm/year}$
 - Για τον S690 $\sim 3.264 \text{ mm/year}$

Παρακάτω παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα (Διάγραμμα 5.18) και συγκρίνονται τα αποτελέσματα του βάθους διάβρωσης που παρουσίασε κάθε ένα δοκίμιο στις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης.



Διάγραμμα 5.18: Συγκριτικό διάγραμμα του βάθους διάβρωσης για τις δυο συγκολλήσεις

Από το διάγραμμα σύγκρισης όλων των δοκιμών για το βάθος διάβρωσης συναρτήσε των κύκλων έκθεσης προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Το βάθος διάβρωσης των δοκιμών κυμαίνεται μεταξύ 34.085-349.449 μm. Πιο συγκεκριμένα, για τη συγκόλληση FCAW AH36-S690 ο μέσος όρος για το σύνολο των κύκλων έκθεσης υπολογίζεται στα 250.402 μm ενώ την Υβριδική laser-GMA+tandem τόξου συγκόλληση AH36-S690 είναι 175.245 μm.
- Για μικρούς χρόνους έκθεσης παρατηρείται σαφέστατα μικρότερο βάθος διάβρωσης το οποίο αυξάνεται με την αύξηση των κύκλων, έτσι στις 5 ημέρες (15 κύκλους) το βάθος διάβρωσης είναι κατά μέσο όρο στα 49.508 μm ενώ στις 30 ημέρες (90 κύκλοι) το βάθος διάβρωσης αυξάνεται στα 314.04 μm κατά μέσο όρο.
- Τέλος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια της συγκόλλησης FCAW AH36-S690 παρουσιάζουν μεγαλύτερο βάθος διάβρωσης σε σχέση με τα δοκίμια της Υβριδικής laser-GMA+tandem τόξου συγκόλλησης AH36-S690 σε όλα τα στάδια της παραμονής τους στο θάλαμο.
- Όσον αφορά στα μέταλλα βάσης AH36 και S690, παρέμειναν στο θάλαμο για 30 ημέρες (90 κύκλοι), και το βάθος διάβρωσής τους είναι κατά μέσο όρο: για τον AH36 $\sim 301.5 \text{ μm}$ και για τον S690 $\sim 268.3 \text{ μm}$.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μικροδομή συγκολλήσεων τόξου και υβριδικών συγκολλήσεων laser – τόξου, χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 και χάλυβα υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης (HSLA, S690), καθώς και η συμπεριφορά τους σε διάβρωση. Η μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης έγινε τόσο με ηλεκτροχημικές μεθόδους όσο και με την έκθεσή τους σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Για την ολοκληρωμένη μελέτη των συγκολλήσεων αυτών εφαρμόστηκαν και άλλες πειραματικές μέθοδοι. Έτσι, για τη μελέτη της μικροδομής των μετάλλων βάσης και των συγκολλημένων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η Οπτική Μικροσκοπία (παρατήρηση μέσω στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου) καθώς και η Μικροσκοπική Μέτρηση. Τα συμπεράσματα τα οποία εξαγονται από την παρούσα εργασία είναι τα εξής:

6.1 Συμπεράσματα ως προς τις ιδιότητες των υλικών

Σχετικά με τα μέταλλα βάσης:

- Το μέταλλο βάσης AH36 παρουσιάζει φερριτο-περλιτική δομή, προσανατολισμένη λόγω έλασης ενώ στον S690 παρατηρείται δομή αποτελούμενη από περλίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη από επαναφορά.

Σχετικά με την Υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690:

- Η Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη από την πλευρά του AH36 παρουσιάζει κυρίως μπαινιτική δομή αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη. Όσο η περιοχή της ΘΕΖ πλησιάζει στην ζώνη τήξης, παρατηρείται μεγέθυνση των κόκκων, που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής. Ωστόσο η φερριτοπερλιτική δομή του AH36 δεν δημιουργεί τόσο μεγάλες διαφορές στο μέγεθος των κόκκων.
- Η περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη, καθώς και μπαινίτη.
- Η ΘΕΖ αποτελείται από μία σκουρόχρωμη και μία ανοικτόχρωμη περιοχή. Η σκουρόχρωμη περιοχή οφείλεται στη μεγέθυνση των κόκκων του S690 λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας (πλησιέστερα στη ζώνη τήξης), με αποτέλεσμα χονδρόκοκκη δομή. Η ανοικτόχρωμη περιοχή χαρακτηρίζεται από λεπτούς κόκκους, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας εκεί δεν είναι τόσο ισχυρή ώστε να επηρεάσει τους κόκκους της.
- Η ζώνη τήξης στην Laser Zone, δηλαδή στη περιοχή όπου εργάζεται το laser, παρουσιάζει αξονική δένδριτική δομή στο μέσον της ζώνης τήξης, και κιονοειδή δένδριτική δομή εκατέρωθεν του κέντρου της. Οι δένδριτες αναπτύσσονται κάθετα στις ισόθερμες. Η μορφή αυτή είναι τυπική της ταχείας απόψυξης της ζώνης του laser.
- Η ζώνη τήξης στην Arc Zone, δηλαδή στην περιοχή που εργάζεται το tandem τόξο (άνωτερο μέρος της υβριδικής συγκόλλησης), η ζώνη της συγκόλλησης παρουσιάζει φερριτο-μπαινιτική μικροδομή. Οι κόκκοι είναι διαμήκεις δένδριτικοί, και έχουν χαρακτηριστική μορφολογία ταχείας στερεοποίησης.

Σχετικά με τη συγκόλληση FCAW AH36-S690:

- Η περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται από φερρίτη, καθώς και μπαινίτη από επαναφορά.
- Η περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36 παρουσιάζει μικροδομή που αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, αλλά και μικρό ποσοστό φερρίτη.

- Η μικροδομή της ζώνης τήξης παρουσιάζει φερριτο-μπαινιτική μικροδομή, με μεγαλύτερο ποσοστό φερρίτη στη σύστασή της. Η ποσότητα του φερρίτη είναι ο λόγος της μειωμένης σκληρότητας της περιοχής. Οι κόκκοι έχουν χαρακτηριστική μορφή δενδριτών, κάτι το οποίο οφείλεται στη γρήγορη απόψυξη κατά τη συγκόλληση.

6.2 Συμπεράσματα ως προς τις μικροσκληρότητες των μετώπων των δοκιμών

Σχετικά με τα μέταλλα βάσης:

- Η μέση σκληρότητα του AH36 ανέρχεται στα 180 Vickers ενώ S690 παρουσιάζει σαφώς υψηλότερη σκληρότητα, 280 Vickers.

Σχετικά με την Υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690:

- Στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το τόξο, μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας παρουσιάζει η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του S690 (420 ± 10 HV). Από την πλευρά του AH36, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρουσιάζει τιμές μικροσκληρότητας από 300 HV έως 330 HV, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται πλησιέστερα στη ζώνη τήξης. Χαμηλότερες τιμές σκληρότητας, σε σχέση με τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες εκατέρωθεν, παρουσιάζει η ζώνη τήξης 250 ± 10 HV.
- Στο κατώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser, μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας παρουσιάζει η ζώνη τήξης (400 ± 10 HV), ενώ πιο χαμηλότερες παρουσιάζει η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690 (255 ± 10 HV), και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του AH36 (280 ± 10 HV).

Σχετικά με τη συγκόλληση FCAW AH36-S690:

- Μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας παρουσιάζει η περιοχή μεταξύ της ζώνης τήξης και της ΘΕΖ από την πλευρά του S690 (420 ± 10 HV), και για αυτό οφείλεται η μικροδομή της που περιλαμβάνει από μαρτενσίτη από επαναφορά, παραμένοντα ωστενίτη, φερρίτη και μπαινίτη. Οι ΘΕΖ εκατέρωθεν της ζώνης τήξης, αλλά και η ζώνη τήξης εμφανίζουν μικροσκληρότητες, της τάξης των 290 ± 10 HV.

Σχετικά με τις δύο μεθόδους συγκόλλησης AH36-S690:

- Μικροσκληρότητα Ζώνης τήξης

Η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690, στο κατώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser, εμφανίζει τη ζώνη τήξης με τις μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας (400 ± 10 HV). Τόσο η συγκόλληση FCAW AH36-S690 (μικροσκληρότητα 290 ± 10 HV), όσο και η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης (μικροσκληρότητα 250 ± 10 HV), εμφανίζουν μικρότερες τιμές σκληρότητας στις ζώνες τήξης τους.

- Μικροσκληρότητα της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης S690

Η συγκόλληση FCAW AH36-S690 και η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το τόξο, εμφανίζουν ίσες τιμές σκληρότητας (420 ± 10 HV) στη ΘΕΖ από την πλευρά του S690. Σαφώς μικρότερες τιμές παρουσιάζει η ΘΕΖ από την πλευρά του S690 στο κατώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το laser (255 ± 10 HV).

- Μικροσκληρότητα της ΘΕΖ από την πλευρά του μετάλλου βάσης AH36

Οι τιμές της μικροσκληρότητας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την πλευρά του AH36 παρουσιάζουν μικρή απόκλιση στις δύο μεθόδους συγκόλλησης, και γενικά κυμαίνονται στα 280 ± 10 HV. Μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας, από 300 HV έως 330 HV, παρουσιάζει η ΘΕΖ του AH36 στο ανώτερο μέρος της συγκόλλησης, όπου εργάζεται το τόξο.

6.3 Συμπεράσματα ως προς την ηλεκτροχημική διάβρωση των δοκιμίων

- Για τα μέταλλα βάσης προκύπτει $i_{\text{corr}} \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον S690 και $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ για τον AH36. Το δυναμικό είναι $\sim -700\text{mV}$ για τον AH36 και -650mV για τον S690.
- Για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 η τιμή του i_{corr} είναι $\sim 3.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ενώ το δυναμικό είναι $\sim -650\text{mV}$.
- Για τη συγκόλληση FCAW AH36-S690 το i_{corr} είναι περίπου $2.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ενώ το δυναμικό είναι $\sim -600\text{mV}$.

Σχετικά με τις δύο μεθόδους συγκόλλησης AH36-S690:

- Η συγκόλληση FCAW AH36-S690 εμφανίζει τη μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση ($R_p=2000$ Ohms) και η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 τη χαμηλότερη ($R_p=950$ Ohms). Τα μέταλλα βάσης εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές.
- Αντίθετα, η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου AH36-S690 εμφανίζει μεγαλύτερη τάση για διάβρωση ($i_{\text{corr}} \sim 3.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) από την συγκόλληση FCAW AH36-S690 ($i_{\text{corr}} \sim 2.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

6.4 Συμπεράσματα ως προς τις δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης

Σχετικά με τα μέταλλα βάσης:

- Ο ρυθμός διάβρωσης για το μέταλλο βάσης AH36 προκύπτει κατά μέσο όρο $3.67 \text{ mm}/\text{year}$ και το βάθος της διάβρωσης ύστερα από 90 κύκλους έκθεσης στις συνθήκες αλατονέφωσης προκύπτει κατά μέσο όρο $301.5 \mu\text{m}$.
- Ο ρυθμός διάβρωσης για το μέταλλο βάσης S690 προκύπτει κατά μέσο όρο $3.27 \text{ mm}/\text{year}$ και το βάθος της διάβρωσης ύστερα από 90 κύκλους έκθεσης στις συνθήκες αλατονέφωσης προκύπτει κατά μέσο όρο $268.3 \mu\text{m}$.

Σχετικά με τις δύο μεθόδους συγκόλλησης AH36-S690:

- Ο μέσος όρος του ρυθμού διάβρωσης της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου AH36-S690 για ολόκληρο το διάστημα έκθεσης προκύπτει $3.661 \pm 1.079 \text{ mm}/\text{year}$ ενώ για τη συγκόλληση FCAW AH36-S690 ο μέσος όρος $4.632 \pm 1.45 \text{ mm}/\text{year}$.
- Ελαφρώς υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης εμφανίζουν τα regular δοκίμια ανεξαρτήτως των κύκλων έκθεσης, με μέσο όρο $4.079 \text{ mm}/\text{year}$, ενώ τα interval δοκίμια εμφανίζουν μέσο όρο $4.013 \text{ mm}/\text{year}$. Παρόλα αυτά, όσο αυξάνεται το διάστημα έκθεσης ο ρυθμός διάβρωσης μεταξύ interval και regular συγκλίνει. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται τα δοκίμια, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και σταθεροποιείται από τους 30 κύκλους και μετά.
- Το βάθος της διάβρωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στο θάλαμο αλατονέφωσης και ανέρχεται σε $4.25 \text{ mm}/\text{year}$ μετά από 90 κύκλους γήρανσης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ