



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Διεξαγωγή Μετωπικών Συγκολλήσεων FCAW Διφασικών
Χαλύβων FCA με χρήση του Αυτοματοποιημένου
Συγκολλητικού Βραχίονα IGM RT 330.1 »

Μικερόζης Γρηγόρης

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Ι. Παντελής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διεξαγωγή και εκτενή μελέτη συγκολλήσεων διφασικών (φερριτό-μπαινιτικών) χαλύβων FCA. Οι συγκολλήσεις υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια της αυτοματοποιημένης διάταξης του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, μέσω της μεθόδου σωληνοειδών ηλεκτροδίων FCAW. Η εργασία συνίσταται σε θεωρητικό και πειραματικό μέρος. Το θεωρητικό τμήμα της περιλαμβάνει, διεξοδική παράθεση πληροφοριών για τις συγκολλήσεις τήξης, με ιδιαίτερη εμβάθυνση στις υλοποιούμενες μεθόδους GMAW&FCAW μέσω της αυτοματοποιημένης διάταξης. Επιπροσθέτως, εμπεριέχεται κεφάλαιο αναλυτικής περιγραφής των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των μελετώμενων χαλύβων. Εν συνεχεία, κατατίθεται ένας ολοκληρωμένος και συμπυκνός, λειτουργικός οδηγός εκμάθησης και χρήσης της διάταξης του ρομποτικού βραχίονα του Ε.Ν.Τ. Το πειραματικό τμήμα της διπλωματικής εργασίας διακλαδίζεται σε δυο σκέλη. Το 1^ο σκέλος αφορά την εκτέλεση αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου συγκόλλησης στην επιφάνεια πλακών χαλύβων FCA (*BeadOnPlate welds*) και τη συσχέτιση αυτής, με τις κύριες ενδιαφερόμενες διαδικασίες συγκόλλησης, χάριν παραμετρικής βελτιστοποίησης. Η προαναφερθείσα βελτιστοποίηση ενσωματώνει τη διαδικασία εύρεσης κατάλληλων τιμών των παραμέτρων της συγκόλλησης. Το 2^ο σκέλος αφορά την πραγματοποίηση συγκολλητικών διεργασιών για ελάσματα των εξεταζόμενων χαλύβων με εναπόθεση πολλαπλών περασμάτων. Διατίθενται προς συγκόλληση, δυο σειρές ελασμάτων, με διαστάσεις 220x120x13mm³ και 185x120x13mm³ αντίστοιχα. Το ρόλο του υλικού εναπόθεσης, εκπληρώνει κράμα παρόμοιας χημικής σύστασης με το βασικό μέταλλο, υπό τη μορφή σύρματος, ενώ η διεργασία προστατεύεται με την παροχή αέριου μείγματος Ar-18%CO₂. Και τα δυο σκέλη υπόκεινται σε διαδικασίες μεταλλογραφικής παρατήρησης και ελέγχου μικροσκληρότητας. Εν κατακλείδι, παρατίθενται τα ουσιαστικότερα συναγόμενα συμπεράσματα, εκ της συνολικής πορείας εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

ABSTRACT

The present thesis examines and analyzes thoroughly, the matter of welding of dual phase (ferrite-bainite) FCA steels. The concerned procedures were conducted by means of an automated welding arm, which is in possession of the Shipbuilding Technology Laboratory of N.T.U.A. The implemented process, especially characterized by use of tubular electrodes, is Flux Cored Arc Welding. The structure of the thesis consists of a theoretical and an experimental section. The theoretical part includes a detailed reference, on the matter of fusion welding processes, with particular focusing upon the issue of GMAW & FCAW methods. Furthermore, it embodies a chapter of analytical description of the properties and characteristics of the category of *Fatigue Crack Arrester* steels. Additionally, a complete, concise and functional handbook was written, with the sole purpose of imparting all the existent knowledge, regarding the utilization of the robotic arm. On the contrary, the latter section is separated in two main parts. The first part is related to the execution of individual deposited layers of weld metal (*Bead on Plate welds*) on the surface of FCA steel plates and its role in parametric optimization of the main welding processes. The term parametric optimization incorporates procedures of finding applicable values for the parameters of a welding framework. The second part and the one of utmost importance, delves into the execution of multiple passes welding procedures for the concerning category of steels. The plates to be welded are divided in two segments, according to their dimensions. The role of deposition material is fulfilled by an alloy of congener chemical composition, as that of the parent metal, which is provided through the form of a wire, while the process is protected by a gas mixture of Ar-18% CO₂. Both parts are subjected to metallographic observation and micro-hardness tests. Finally, substantial conclusions, which have arisen through the overall course of research, are notated.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτριο Ι. Παντελή, Καθηγητή του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π για την καθολική του επίβλεψη και καθοδήγηση, επί της εργασίας. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Θεοδώρα Τσιούρβα για τις πολύτιμες συμβουλές της και την υποστήριξή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και ιδιαίτερα τον κύριο Χάρη Ξάνθη για την τεχνική υποστήριξη, που μου παρείχαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. Μέθοδοι Συγκολλήσεως με Τήξη.....	1
1.1 Γενικά Στοιχεία.....	1
1.2 Μέθοδοι Συγκολλήσεως Τόξου.....	2
1.3 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.....	2
1.3.1 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (SMAW).....	3
1.3.1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου.....	3
1.3.1.2 Εκλογή ηλεκτροδίων.....	4
1.3.1.3 Ο ρόλος της επένδυσης των ηλεκτροδίων.....	9
1.3.1.4 Καθορισμός καίριων παραμέτρων της μεθόδου SMAW.....	10
1.3.1.5 Μηχανές Συγκόλλησης.....	13
1.3.1.6 Τυπικά σφάλματα SMAW.....	15
1.3.1.7 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου SMAW.....	16
1.3.2 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (GTAW).....	17
1.3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου.....	17
1.3.2.2 Καθορισμός καίριων παραμέτρων μεθόδου GTAW.....	22
1.3.2.3 Είδη Ηλεκτροδίων.....	24
1.3.2.4 Αέρια Προστασίας μεθόδου GTAW.....	27
1.3.2.5 Τυπικά σφάλματα GTAW.....	30
1.3.2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της μεθόδου GTAW.....	31
1.3.3 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (GMAW).....	32
1.3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου.....	32
1.3.3.2 Μηχανισμοί Μεταφοράς Σταγονιδίων Μετάλλου.....	37
1.3.3.3 Καθορισμός καίριων παραμέτρων της μεθόδου GMAW.....	45
1.3.3.4 Ηλεκτρόδια.....	46
1.3.3.5 Αέρια Προστασίας.....	48
1.3.3.6 Τυπικά Σφάλματα GMAW.....	55
1.3.3.7 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα μεθόδου GMAW.....	58
1.3.4 Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (FCAW).....	58
1.3.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου.....	58
1.3.4.2 Ηλεκτρόδια.....	62
1.3.4.3 Αέρια Προστασίας.....	65
1.3.4.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου FCAW.....	68
1.3.4.5 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW.....	72
1.3.5 Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (SAW).....	72
1.3.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου.....	72
1.3.5.2 Καθορισμός καίριων παραμέτρων μεθόδου SAW.....	74
1.3.5.3 Μέταλλα Προσθήκης.....	76
1.3.5.4 Παραλλαγές Μεθόδου SAW.....	78
1.3.5.5 Τυπικά σφάλματα μεθόδου SAW.....	78
1.3.5.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου SAW.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.Διφασικοί Χάλυβες FCA υψηλής αντοχής σε κόπωση.....	83
2.1. Εισαγωγή.....	83
2.2. Γενικά Χαρακτηριστικά Χαλύβων FCA.....	84
2.2.1. Γενικά Στοιχεία.....	84
2.2.2. Τυποποίηση χαλύβων FCA.....	85
2.2.3. Χημική Σύσταση χαλύβων FCA.....	86
2.2.4. Μηχανικές Ιδιότητες χαλύβων FCA.....	86
2.2.5. Μικροδομή Χαλύβων FCA.....	87
2.3. Συμπεριφορά χαλύβων FCA σε κόπωση.....	88
2.4. Συμπεριφορά χαλύβων FCA σε διάβρωση.....	97
2.5. Εφαρμογές των χαλύβων FCA στη ναυπηγική βιομηχανία.....	99
2.6. Βελτιωτικές τεχνικές κατεργασίας χαλύβων FCA.....	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Προγραμματισμός & Λειτουργία Αυτοματοποιημένης Συγκολλητικής Διάταξης του E.N.T.....	107
3.1. Εισαγωγή.....	107
3.2. Εξοπλισμός Συγκόλλησης.....	107
3.3. Οι Λειτουργικές Συνιστώσες της Αυτοματοποιημένης Διάταξης.....	111
3.3.1. Χειριστήριο εκμάθησης & προγραμματισμού (TeachPendant ITP4).....	111
3.3.1.1. LCD οθόνη του χειριστηρίου εκμάθησης & προγραμματισμού.....	112
3.3.1.2. Κουμπί έκτακτης ανάγκης – Emergency Stop Button.....	113
3.3.1.3. Πλήκτρα τύπου MODE – Mode keys.....	114
3.3.1.4. Πλήκτρα χειροκίνητου ελέγχου – Manual control keys.....	115
3.3.1.5. Πλήκτρα άμεσου ελέγχου – Control keys.....	116
3.3.1.6. Πλήκτρα αύξησης/μείωσης – Inc/Dec keys.....	117
3.3.1.7. Πλήκτρα σελίδων – Page keys.....	117
3.3.1.8. Πλήκτρα επεξεργασίας – Edit keys.....	117
3.3.1.9. Πλήκτρα FUNC, FN και 2nd.....	119
3.3.1.10. Πλήκτρα AUTO.....	120
3.3.1.11. Πλήκτρα ESC, MAIN και SOFTKEYS.....	121
3.3.1.12. Permissive switches - Επιτρεπτικοί διακόπτες.....	122
3.3.2. Εξωτερική Ελεγκτική Μονάδα - External Start/Stop Cassette.....	122
3.3.2.1. General buttons - Γενικά Πλήκτρα.....	123
3.3.2.2. Key operated mode switch - Επιλογέας κατάστασης λειτουργίας.....	124
3.3.2.3. Bypass key switch - Διακόπτης παράκαμψης.....	125
3.3.2.4. Display & Function keys - Οθόνη και πλήκτρα λειτουργίας.....	126
3.3.2.5. Emergency Stop Button - Κουμπί έκτακτης ανάγκης.....	126
3.4. Θεωρία & Στοιχεία προγραμματισμού της Αυτοματοποιημένης Διάταξης..	127
3.4.1. Γενικοί κανόνες λειτουργίας.....	127
3.4.2. Βήματα Μετάβασης & Βήματα Συγκόλλησης.....	128
3.4.2.1. Βήματα Μετάβασης - Transition steps.....	128
3.4.2.2. Βήματα Συγκόλλησης - Welding steps.....	128
3.4.3. Ιεραρχία δομής παραθύρων.....	129
3.4.4. Κύριοι κατάλογοι επιλογής (Μενού).....	130

3.4.4.1.	Το κύριο μενού - Main menu.....	130
3.4.4.2.	Μενού βήματος - Step menu.....	131
3.4.4.3.	Μενού βημάτων JOG - JOG menu.....	132
3.4.4.4.	Μενού βημάτων WORK - WORK menu.....	133
3.4.5.	Προγραμματισμός γραμμικού βήματος συγκόλλησης - Linear WORK step programming.....	136
3.4.6.	Προγραμματισμός γραμμικού κυματοειδούς βήματος συγκόλλησης - Linear Weaving WORK step programming.....	137
3.5.	Συμπτυγμένος Οδηγός Λειτουργίας της Διάταξης, Προγραμματισμού & Εκτέλεσης Συγκολλητικών Ενεργειών.....	140
3.6.	Ακολουθίες Συγκόλλησης - Welding Sequences.....	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.Πειραματική Διαδικασία Συγκολλήσεων Χαλύβων FCA..... 147

4.1.	Εισαγωγή.....	147
4.2.	Σύσταση Μετάλλου Βάσης.....	148
4.3.	Σύσταση Προστιθέμενου Μετάλλου.....	149
4.4.	Εξοπλισμός Συγκόλλησης.....	150
4.5.	Διεξαγωγή αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου (Bead On Plate welds - BoP).....	150
4.5.1.	Παράθεση αποτελεσμάτων.....	150
4.5.2.	Ανάλυση Συμπερασμάτων.....	158
4.5.3.	Προετοιμασία βέλτιστων δοκιμίων.....	165
4.5.4.	Μεταλλογραφική ανάλυση βέλτιστων δοκιμίων.....	168
4.5.5.	Μικρό-σκληρότητα βέλτιστων δοκιμίων.....	174
4.6.	Διεξαγωγή Συγκολλήσεων δοκιμίων FCA.....	180
4.6.1.	Προετοιμασία Δοκιμίων.....	181
4.6.2.	Διαδικασία Συγκόλλησης & Παρατηρήσεις.....	185
4.6.3.	Μεταλλογραφική Παρατήρηση.....	198
4.6.3.1	Προετοιμασία δοκιμίων.....	198
4.6.3.2	Μακροσκοπική παρατήρηση δοκιμίων.....	199
4.6.3.3	Παρατήρηση στο οπτικό στερεοσκόπιο.....	201
4.6.3.4	Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.....	203
4.6.4.	Μελέτη Μικρό-σκληρότητας.....	206
4.6.5.	Συμπεράσματα.....	212

Κεφάλαιο 1^ο

Μέθοδοι Συγκολλήσεως με Τήξη.

1.1 Γενικά Στοιχεία.[4],[6]

Ο όρος *fusion welding* ή αλλιώς συγκόλληση με τήξη, αναφέρεται σε διαδικασίες και μεθόδους συγκόλλησης, κατά τις οποίες προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα, έως ότου να επέλθει σύντηξη. Παράλληλα, δεν απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της υποκείμενης κατηγορίας συγκολλήσεων αποτελούν: α) συγκόλληση με τόξο, β) συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων και γ) συγκόλληση με ακτίνες laser.

Για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς συγκόλλησης τήξεως απαιτείται η ικανοποίηση συγκεκριμένων, κατάλληλων συνθηκών. Η σημαντικότερη αυτών είναι η πρόσδοση θερμότητας στην ένωση, προκειμένου να γίνει δυνατή η συγκόλληση των μετάλλων με σύντηξη. Η θερμότητα αυτή παράγεται, είτε με χημικό τρόπο (φλόγα, εξώθερμη χημική αντίδραση), είτε με ηλεκτρικό τρόπο (ηλεκτρικό τόξο). Η δεύτερη συνθήκη για την ικανοποιητική ένωση δύο επιφανειών είναι η απουσία οξειδίων και λοιπών ακαθαρσιών. Ο καθαρισμός των επιφανειών προγενέστερα της συγκόλλησης, αν και επιβοηθητικός, δεν επαρκεί, συνεπώς είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των αλλοιωμένων, από τις ακαθαρσίες, λεπτών στρωμάτων υλικού από την ίδια τη μέθοδο συγκόλλησης. Η επίτευξη του στόχου προς αυτή την κατεύθυνση γίνεται με τη βοήθεια της χημικής δράσης της σκόνης (flux) ή των εκτοξεύσεων του ηλεκτρικού τόξου (spattering). Η επαναδημιουργία των προαναφερθέντων στρωμάτων είναι δυνατόν να συμβεί μέσω της βοήθειας του ατμοσφαιρικού αέρα και αποτελεί τροχοπέδη στην ολοκλήρωση μιας επιτυχούς ραφής συγκολλήσεως. Για τον έλεγχο της χημικής αυτής αλλοίωσης χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα, όπως αδρανή αέρια ή εξαέρωση της επένδυσης των ηλεκτροδίων, προστατεύοντας το τηγμένο μέταλλο από τον περιβάλλοντα αέρα. Επιπροσθέτως, είναι δυνατή η εκτέλεση της συγκόλλησης σε κενό αέρα. Τέλος, επιβάλλεται ο έλεγχος της μεταλλουργικής αλλοίωσης ,στην οποία υπόκειται η περιοχή της ένωσης, από τις μεταβολές θερμοκρασίας που συνοδεύουν τη διαδικασία συγκόλλησης.

Υφίστανται 3 κύριοι τύποι μεθόδων συγκόλλησης μέσω τήξης:

1. Συγκόλληση Αερίου.

Συγκόλληση οξυγόνου-ακετυλενίου (*Oxyacetylene welding* ,OAW)

2. Συγκόλληση Τόξου

Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (*Shielded Metal Arc Welding* ,SMAW)

Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο (*Gas Metal Arc Welding* ,GMAW)

Συγκόλληση με Σωληνοειδή Ηλεκτρόδια (*Flux Cored Arc Welding* ,FCAW)

Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου (*Gas Tungsten Arc Welding* ,GTAW)

Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (*Submerged Arc Welding* ,SAW)

Συγκόλληση με τη Μέθοδο Electrosлаг (ESW)

Συγκόλληση με Τόξο Πλάσματος (*Plasma Arc Welding* ,PAW)

3. Συγκόλληση Δέσμης Υψηλής Ενεργείας.

Συγκόλληση με Δέσμη Ηλεκτρονίων (*Electron Beam Welding* ,EBW)

Συγκόλληση με Δέσμη Laser (*Laser Beam Welding* ,LBW)

1.2 Μέθοδοι Συγκολλήσεως Τόξου

Η κατηγορία των συγκολλήσεων τόξου βρίσκει ευρεία εφαρμογή στον κλάδο της ναυπηγικής βιομηχανίας. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια ενδελεχής μελέτη των μεθόδων που απαρτίζουν την συγκεκριμένη κατηγορία, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στις μεθόδους GMAW και FCAW, τις οποίες υλοποιεί η αυτοματοποιημένη συγκολλητική διάταξη του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας

1.2.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.[28]

Τα πρώτα ουσιαστικά θεμέλια στην κατεύθυνση της επιστήμης των συγκολλήσεων τέθηκαν περί το τέλος του 19^{ου} αιώνα, όπου αναπτύχθηκαν οι πρώτες διαδικασίες συγκόλλησης αερίου και κοπής (συγκολλήσεις τόξου με τόξο άνθρακα και τόξο μετάλλου). Πιο συγκεκριμένα:

Το 1881 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα εργαστήρια *Cabot* στη Γαλλία η παραγόμενη θερμότητα ενός ηλεκτρικού τόξου για συγκόλληση πλακών από τον Auguste De Meritens.

Το 1885 έλαβε χώρα η έκδοση διπλώματος ευρεσιτεχνίας για συγκόλληση με ηλεκτρόδιο άνθρακα στην Βρετανία και απονεμήθηκε στον Nikolai N. Benardos και ακολούθησε αντίστοιχη έκδοση διπλώματος το 1887 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

Ακολούθως το 1890 απονεμήθηκε στον C.L Coffin δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την χρήση ηλεκτροδίου μετάλλου σε διαδικασία συγκόλλησης τόξου. Ήταν η πρώτη καταγραφή σε διαδικασία συγκόλλησης, κατά την οποία το τηκόμενο ηλεκτρόδιο, μεταφερόμενο μέσω του τόξου, έπαιζε τον ρόλο του προστιθέμενου μετάλλου στα προς ένωση τεμάχια. Πειράματα συγκόλλησης με μεταλλικά ηλεκτρόδια έγιναν για πρώτη φορά το 1892 από τον Slavianoff.

Η πρώτες χρήσεις υπενδεδυμένων ηλεκτροδίων έλαβαν χώρα την περίοδο 1907-1914 στην Σουηδία από τους Kjellberg και την εταιρεία ESAB.

Το 1930 εισάγεται για πρώτη φορά στην βιομηχανία η διαδικασία συγκόλλησης βυθισμένου τόξου (SAW). Επίσης, περί τα τέλη της δεκαετίας του 20' βελτιώθηκε η μέθοδος GTAW από τους Hobart και Devers, οι οποίοι χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά προστασία αερίου με ήλιο και αργό αντίστοιχα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι ρίζες της μεθόδου ανάγονται σε ιδέα του C.L Coffin, η οποία στηρίχτηκε σε ιδέα συγκόλλησης υπό την απουσία οξειδίων. Η μέθοδος τελειοποιήθηκε το 1941 από τον Meredith.

Το 1948 εισήχθη για πρώτη φορά η μέθοδος GMAW. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιούσε το προστατευμένο με αέριο τόξο με τη συνεχή τροφοδότηση ενός αναλίσκόμενου σύρματος ηλεκτροδίου. Η αρχική υλοποίηση της μεθόδου αφορούσε μη σιδηρούχα μέταλλα.

Το 1951 στην Σοβιετική Ένωση αρχίζει να χρησιμοποιείται η μέθοδος Electroslag, η οποία και καθιερώνεται επίσημα το 1958.

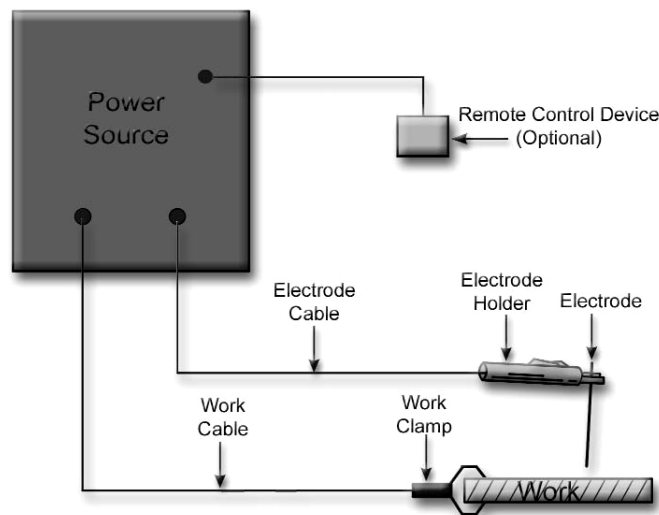
Το 1957 ο Robert F. Gage ανακαλύπτει την μέθοδο συγκόλλησης με τόξο πλάσματος (PAW).

Τέλος, το 1957 αποκαλύπτεται για πρώτη φορά στο κοινό η μέθοδος συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία αναπτύχθηκε στην Γαλλία από τον J.A Stohr.

1.2.2 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (SMAW).

1.2.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου.[6],[8]

Η συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια συνιστά μια μέθοδο συγκόλλησης τόξου, κατά την οποία η συνένωση των προς συγκόλληση τεμαχίων, επιτυγχάνεται μέσω της παραγόμενης θερμότητας ενός ηλεκτρικού τόξου. Το προαναφερθέν τόξο δημιουργείται μέσω του άκρου ενός αναλίσκόμενου επενδεδυμένου ηλεκτροδίου και της επιφάνειας του μετάλλου βάσης. Η μέθοδος αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και υπό την ονομασία «*stick welding*». Μια τυπική συγκολλητική διάταξη SMAW αποτελείται από μια πηγή ισχύος - γεννήτρια, από τους ακροδέκτες της οποίας εξέρχονται δύο καλώδια. Το πρώτο καλώδιο συνδέεται με τη βάση του ηλεκτροδίου, ενώ το δεύτερο συνδέεται με το προς συγκόλληση τεμάχιο. Η βάση του ηλεκτροδίου αποτελείται από έναν μεταλλικό σφιγκτήρα (τσιμπίδα), ηλεκτρικά μονωμένο για λόγους προστασίας του συγκολλητή. Σχηματικά, η γενική μορφή της συγκολλητικής διάταξης δίνεται ως εξής:

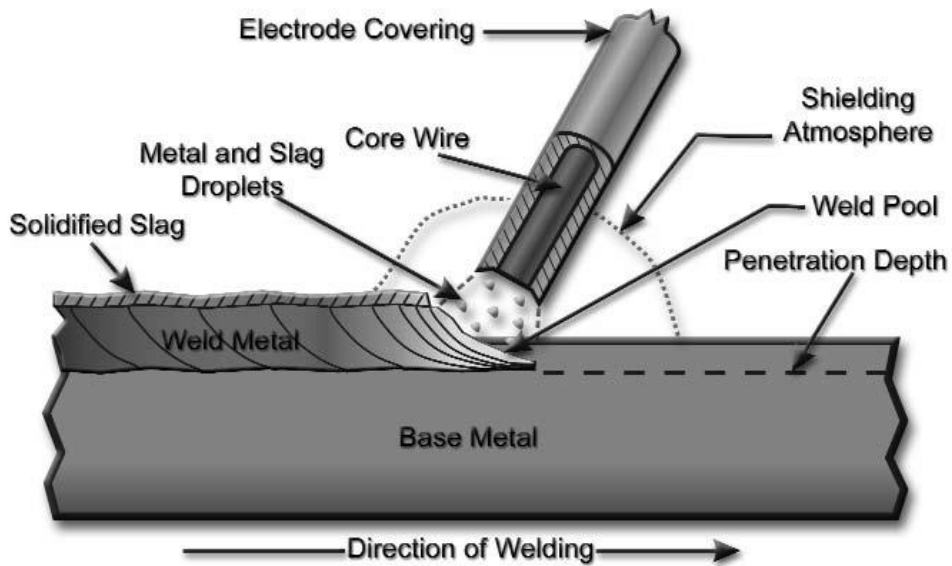


Σχήμα 1.Τυπική συγκολλητική διάταξη SMAW.

Όπως προαναφέραμε, η συγκολλητική διαδικασία ξεκινάει με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του άκρου του ηλεκτροδίου και του δοκιμίου που θέλουμε να συγκολλήσουμε. Η παραγόμενη θερμότητα του τόξου τήκει το άκρο του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου καθώς επίσης και την επιφάνεια του δοκιμίου, την οποία καλύπτει το ηλεκτρικό τόξο.

Πιο συγκεκριμένα, το άκρο του ηλεκτροδίου τήκεται και υπό την μορφή σφαιριδίων μεταφέρεται με συνεχή ροή μέσω του τόξου στο τηγμένο λουτρό, το οποίο στερεοποιείται και διαμορφώνει τη ραφή συγκόλλησης. Η ελαφρύτερη τηγμένη επένδυση στερεοποιείται υπό τη μορφή ενός στρώματος σκουριάς, το οποίο επικάθεται στο ανώτερο στρώμα της ραφής συγκόλλησης. Κατά αυτό τον τρόπο το αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο παίζει τον ρόλο του προστιθέμενου μετάλλου (*filler metal*). Ένα βασικό ζήτημα της παρούσης μεθόδου αποτελεί ο ακριβής καθορισμός τριών μεταβλητών: α) της ταχύτητας κίνησης του ηλεκτροδίου, β) της έντασης του ρεύματος και γ) της τάσης του τόξου. Η διαδικασία ξεκινάει με το τόξο να κινείται κατά μήκος της εκάστοτε επιθυμητής διαδρομής, έχοντας ως προκαθορισμένες τις τρεις ανωτέρω μεταβλητές. Λόγω των ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών, της τάξης των 5000°C, η τήξη του μετάλλου βάσης συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα με την δημιουργία του τόξου.

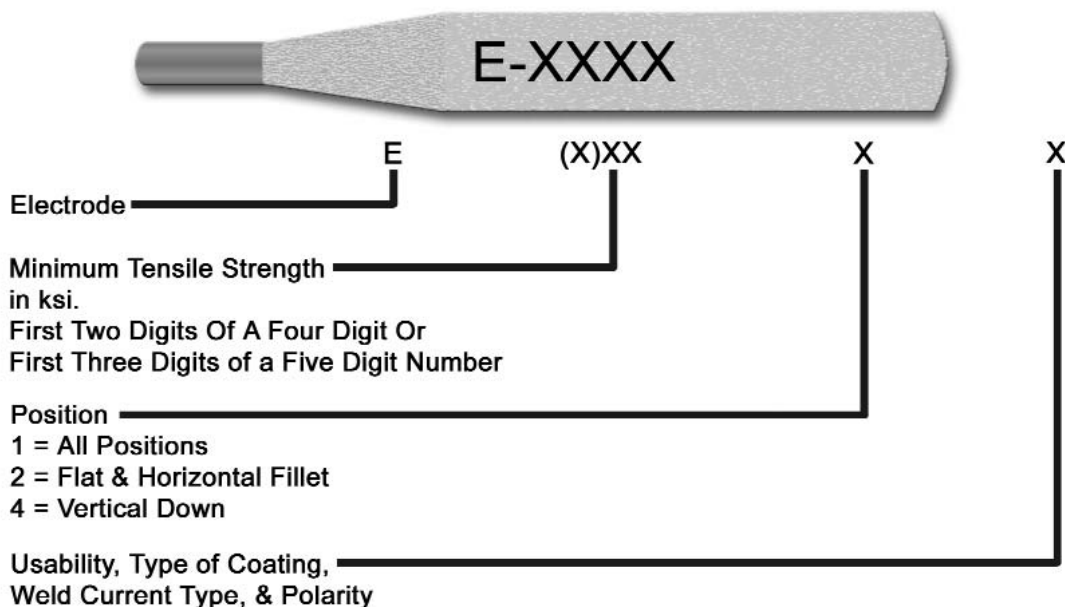
Η διαδικασία της συγκόλλησης SMAW ,δύναται να κατανοηθεί πληρέστερα βάσει του ακόλουθου σχήματος.



Σχήμα 2. Διαδικασία συγκόλλησης SMAW.

1.2.2.2 Εκλογή ηλεκτροδίων. [7],[8],[9],[15],[16]

Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια ταξινομούνται από τους εθνικούς οργανισμούς τυποποίησης ή τα ινστιτούτα συγκόλλησης ανάλογα με την αντοχή τους, το είδος επένδυσης, τα χαρακτηριστικά εφαρμογής, τα στοιχεία κράματος, κλπ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο συμβολισμός της American Welding Society, ο οποίος παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3. Σύστημα κατηγοριοποίησης ηλεκτροδίων κατά την American Welding Society.

όπου:

- Ε το επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.
- (X) XX δύο ή τρία ψηφία, που αντιστοιχούν στην αντοχή εφελκυσμού του προς απόθεση μετάλλου συγκόλλησης σε ksi.
- X παράμετρος που αντιστοιχεί στην θέση συγκόλλησης
 - 1 όλες οι θέσεις
 - 2 επίπεδη και μετωπική
 - 3 επίπεδη
- X παράμετρος που εξαρτάται από το είδος επένδυσης και τις συνθήκες τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος.

Επιπροσθέτως, για το τελευταίο ψηφίο τυποποίησης δίνεται ο ακόλουθος πίνακας κατά τον AWS:

Πίνακας 1. Επεξήγηση των χαρακτηριστικών του τελευταίου ψηφίου κατά τον AWS.

LAST DIGIT	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Power source	(a)	AC or DC electrode positive	AC or DC	AC or DC	AC or DC	DC electrode positive	AC or DC electrode positive	AC or DC	AC or DC electrode positive	AC or DC
Type of coating	(b)	Organic	Rutile*	Rutile*	Rutile*	Low Hydrogen	Low Hydrogen	Mineral	Low Hydrogen	Rutile*
Type of arc	Digging	Digging	Medium	Soft	Soft	Medium	Medium	Soft	Medium	Medium
Penetration	(c)	Deep	Medium	Light	Light	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Iron Powder in Coating	0-10%	None	0-10%	0-10%	30-50%	None	None	50%	30-50%	0-10%

Notes: (a) E-6010 is DC electrode positive; E-6020 is AC or DC
 (b) E-6010 is organic, E-6020 is mineral
 (c) E-6010 is deep penetration; E-6020 is medium penetration

*A hard titanium dioxide coating.

Τα κυριότερα είδη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται με την μέθοδο SMAW δίνονται από τους πίνακες τυποποίησης του AWS.

Πίνακας 2.Είδη επενδεδυμένων ηλεκτροδίων κατά τον AWS.

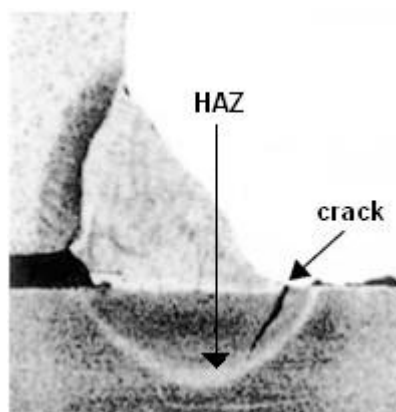
E-60 Series	Type of Coating	Type of Current
E-6010	High cellulose sodium	d.c.r.p
E-6011	High cellulose potassium	d.c.r.p , a.c
E-6012	High titania sodium	d.c.s.p , a.c
E-6013	High titania potassium	d.c.r.p ,d.c.s.p , a.c
E-6019	Iron oxide titania potassium	d.c.r.p ,d.c.s.p , a.c
E-6020	High iron oxide	d.c.s.p , a.c
E-6022	High iron oxide	d.c.r.p ,d.c.s.p , a.c
E-6027	Iron powder, iron oxide	d.c.s.p , a.c
E-70 Series		
E-7014	Iron powder, titania	d.c.r.p ,d.c.s.p , a.c
E-7015	Low hydrogen sodium	d.c.r.p
E-7016	Low hydrogen potassium	d.c.r.p , a.c
E-7018	Iron powder, low hydrogen	d.c.r.p , a.c
E-7024	Iron powder, titania	d.c.r.p ,d.c.s.p , a.c
E-7027	High iron oxide, iron powder	d.c.s.p , a.c
E-7028	Iron powder, low hydrogen	d.c.r.p , a.c
E-7048	Low hydrogen potassium, iron powder	d.c.r.p , a.c

Εμβαθύνοντας, στο ζήτημα των διαφορετικών ειδών ηλεκτροδίων, που παρατίθενται στον πίνακα 2, επισημαίνουμε τις εξής λεπτομέρειες:

a. Ηλεκτρόδια με οργανική επικάλυψη.

Η σύνθεση των ηλεκτροδίων, που φέρουν οργανική επικάλυψη, συνίσταται κατά κύριο λόγο από ένα υψηλό ποσοστό οργανικού υλικού όπως η κυτταρίνη (*cellulose*), η οποία και δίνεται από τον χημικό τύπο $(C_6H_{10}O_5)_n$. Η αποσυντιθέμενη, λόγω της θερμότητας του ηλεκτρικού τόξου, επικάλυψη παράγει ένα μείγμα αερίων υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών, το οποίο προστατεύει το τηγμένο λουτρό από τυχούσες ακαθαρσίες. Ωστόσο, ο άνθρακας που περιέχεται στα αέρια CO και CO₂, πρέπει να ελέγχεται διεξοδικώς, καθώς προκαλεί μείωση της αντοχής σε διάβρωση και τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε περίπτωση συγκολλησεως ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων. Η πλειοψηφία των συγκεκριμένων ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται με συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας, αλλά ένα μικρό ποσοστό χρησιμοποιείται και με εναλλασσόμενο ρεύμα και με συνεχές ανάστροφης πολικότητας. Βρίσκουν κύρια εφαρμογή στην συγκόλληση σωληνώσεων. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ηλεκτροδίων με οργανική επικάλυψη είναι τα εξής:

- Υψηλή προστασία του τηγμένου λουτρού.
- Υψηλά επίπεδα παραγωγής H₂, τα οποία ενισχύουν την πιθανότητα εμφάνισης ρωγματώσεων στην Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (HAZ). Το φαινόμενο παρατηρείται συχνότερα σε περιπτώσεις συγκόλλησης ανθρακούχων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων. Το άνωθεν σφάλμα παρουσιάζεται στο διπλανό Σχήμα, όπως προέκυψε, έπειτα από συγκόλληση με διάταξη SMAW.
- Καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Σταθερό ηλεκτρικό τόξο.
- Βαθεία διείσδυση σε όλες τις θέσεις.
- Κατάλληλη για κατακόρυφες συγκολλήσεις.
- Κατάλληλο για το πρώτο 'πέραςμα' (root pass).
- Λεπτό στρώμα σκουριάς.
- Τραχιά επιφάνεια ραφής συγκολλησεως.



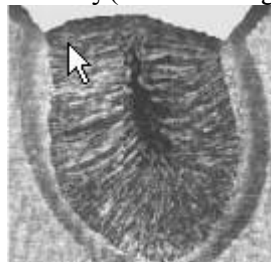
Σχήμα 4. Cold Cracking defect SMAW (Technical Sheet 42, EWF)

b. Ηλεκτρόδια με επικάλυψη ρουτιλίου.

Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου συνίστανται, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%, από διοξείδιο του τιτανίου TiO₂, σε ποσοστό 15% από πυριτικό νάτριο και από σιδηρούχα-μαγγανιούχα ανθρακικά και πυριτικά άλατα. Τα ηλεκτρόδια της παρούσας κατηγορίας, χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις μαλακών χαλύβων και χαλύβων με χαμηλό εμπεριεχόμενο ποσοστό άνθρακα. Συχνά αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως ηλεκτρόδια γενικού σκοπού (*GP electrodes*). Η επένδυση ρουτιλίου χρησιμοποιείται τόσο σε ηλεκτρόδια ωστενιτικών όσο και φερριτικών ανοξειδωτων χαλύβων. Δύναται να χρησιμοποιηθούν επίσης, είτε σε συνεχές είτε σε εναλλασσόμενο ρεύμα.

Τα γενικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της εξεταζόμενης κατηγορίας ηλεκτροδίων είναι:

- Πυκνό στρώμα σκουριάς ,εύκολα αφαιρούμενο.
- Μεσαίας τάξης διείδυση.
- Σταθερό ηλεκτρικό τόξο.
- Εύκολη 'εκκίνηση' του τόξου.
- Καλή όψη ραφής συγκολλήσεως.
- Μικρότερη επιρρέπεια σε εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter) σε σύγκριση με τα οργανικά ηλεκτρόδια.
- Υψηλά επίπεδα παραγωγής υδρογόνου (≥ 15 ml/100 gr εναποτιθέμενου μετάλλου συγκόλλησης). Είναι χαρακτηριστικό, το οποίο δεν μπορεί να εξαλειφθεί, διότι η ύπαρξη υγρασίας στην επένδυση είναι απαραίτητη για την ομαλή εκτέλεση της διαδικασίας.
- Χαμηλή αντίσταση σε ρωγματώσεις (hot cracking).



Σχήμα 5.Hot Cracking defect SMAW, (Technical Sheet 33, EWF)

c. Ηλεκτρόδια με βασική επικάλυψη.

Η επένδυση των βασικών ηλεκτροδίων συνίσταται από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και φθοριούχο ασβέστιο (CaF_2), η οποία αποσυντιθέμενη παράγει CO_2 και ρευστή «βασική» σκουριά CaO . Τα ηλεκτρόδια ανθρακικού ασβεστίου ονομάζονται και ηλεκτρόδια χαμηλού υδρογόνου (*low hydrogen*), διότι η προστασία αερίου, που δημιουργούν για το τηγμένο λουτρό, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Το συγκεκριμένο γεγονός την καθιστά κατάλληλη για συγκόλληση χαλύβων υψηλής αντοχής, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε προσβολή από υδρογόνο (hydrogen cracking). Χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις πολλαπλών 'περασμάτων', ανεξαρτήτως πάχους δοκιμίου και κατευθύνσεως ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αντίθεση με τα ηλεκτρόδια ρουτίλιου, δεν απαιτείται υγρασία, και χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, στεγνά σε όλες τις ενδιαφερόμενες εφαρμογές. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ηλεκτρόδια χαμηλού υδρογόνου θεωρούνται μόνο αυτά, τα οποία έχουν υποστεί τις κατάλληλες διαδικασίες ξήρανσης πρωτύτερα της χρησιμοποίησής τους. Η ξήρανση δρα στη μείωση της περιεκτικότητας του μετάλλου συγκόλλησης σε υδρογόνο, σε επίπεδα χαμηλότερα των 5 ml/100gr εναποτιθέμενου μετάλλου συγκόλλησης.

Βασικά ηλεκτρόδια, τα οποία είναι ελαφρά κραματωμένα, είτε στον πυρήνα, είτε στην επένδυση τους, ανταποκρίνονται σε ένα ευρύτερο πλήθος εφαρμογών από τα αντίστοιχα συμβατικά, όπως συγκολλήσεις σε περιβάλλον πολύ χαμηλών και πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Γενικότερα, βασική επένδυση προτιμάται για συγκολλήσεις ανοξειδωτων χαλύβων, κραμάτων νικελίου, χαλκού και αλουμινίου καθώς και χυτοσιδήρων. Τα γενικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της εξεταζόμενης κατηγορίας ηλεκτροδίων είναι:

- Χαμηλά ποσοστά H₂ στο μέταλλο συγκόλλησης.
- Δυσκολότερη αφαίρεση σκουριάς, συγκρινόμενη με την επένδυση ρουτιλίου.
- Δυσκολότερη εκκίνηση τόξου σε σχέση με τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου.
- Μεγάλη κυρτότητα και τραχύτητα ραφής συγκολλησεως.
- Υψηλή μεταλλουργική ποιότητα.
- Χρησιμοποιούνται σε εναποθέσεις 'ρίζας' για πολύ παχιά ελάσματα.

d. Ηλεκτρόδια με όξινη επικάλυψη.

Τα ηλεκτρόδια με όξινη επικάλυψη χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς τις περασμένες δεκαετίες για συγκολλήσεις, κατά κύριο λόγο, μαλακών χαλύβων ενώ μετέπειτα, αντικαταστάθηκαν από τα ηλεκτρόδια με επικάλυψη ρουτιλίου. Περιέχουν υψηλά ποσοστά οξειδίου του σιδήρου, ενώ στη μικροδομή τους υφίστανται και μικρές περιεκτικότητες μαγγανίου και πυριτίου. Τα όξινα ηλεκτρόδια, χωρίς σκόνη σιδήρου, παρουσιάζουν ευκολότερη έναυση από τα αντίστοιχα βασικά, αλλά δυσκολότερη από τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου. Η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνεται σε μεσαία επίπεδα. Οι προκύπτουσες ραφές συγκολλησεως, επικαλύπτονται από μια στιλπνή και ογκώδη σκουριά, η οποία μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα. Σε μηχανικό επίπεδο, τα ηλεκτρόδια με όξινη επικάλυψη παρουσιάζουν χαμηλότερη τάση διαρροής και αντοχή σε εφελκυσμό αλλά υψηλότερη δυσθραυστότητα συγκρινόμενα με τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου.

Μια παραλλαγή των όξινων ηλεκτροδίων, αποτελούν τα όξινα ηλεκτρόδια υψηλής αποδοτικότητας, τα οποία χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης από τα αντίστοιχα απλά. Οι προσδιδόμενες ιδιότητες του μετάλλου συγκόλλησης παραμένουν ίδιες, με ογκώδη, στιλπνή και εύκολα αφαιρούμενη σκουριά να επικαλύπτει την ραφή και με αντοχή παρόμοια με της κατηγορίας των απλών όξινων ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια υψηλής αποδοτικότητας βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε επίπεδες αυχενικές και κατά συμβολή συγκολλήσεις.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, παρατηρείται η αντικατάσταση των συμβατικών ηλεκτροδίων ρουτιλίου, σε διαδικασίες που αφορούν ανοξειδωτους χάλυβες, από ηλεκτρόδια με διττή, όξινη-ρουτιλίου (*acid-rutile*), επένδυση. Η μικροδομή τους διαμορφώνεται από αυξημένο ποσοστό πυριτίου, βελτιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την συγκολλητική διαδικασία. Η έναυση του τόξου λαμβάνει χώρα γρηγορότερα, μειώνονται τα επίπεδα εκτόξευσης μετάλλου και η σκουριά δύναται να αφαιρεθεί εξίσου εύκολα με τα συμβατικά όξινα ηλεκτρόδια. Μολαταύτα, η χρησιμοποίησή τους εγκυμονεί τον κίνδυνο εμφάνισης πόρων (*Porosity*), γεγονός που μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλες διαδικασίες ξήρανσης. Τέλος, λειτουργούν τόσο με συνεχές, όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα.

e. Ηλεκτρόδια με επικάλυψη μεταλλικής σκόνης.

Το συγκεκριμένο είδος ηλεκτροδίων, εμπεριέχει στην επένδυση του υψηλά ποσοστά σκόνης σιδήρου, η οποία λαμβάνει τον ρόλο επιπρόσθετου μετάλλου συγκόλλησης, κατά τη διαδικασία αποσύνθεσης της επένδυσης. Συνεπώς, η παραγωγικότητα του ηλεκτροδίου βελτιώνεται, εάν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι το προστιθέμενο, εκ της σκόνης, μέταλλο, ανέρχεται στο 75% του βάρους του πυρήνα του ηλεκτροδίου. Χρησιμοποιούνται μόνο σε επίπεδες, οριζόντιες ή κάθετες, συγκολλήσεις. Εν κατακλείδι, η επένδυση για την συγκεκριμένη κατηγορία ηλεκτροδίων, είναι ως επί το πλείστον, βασική ή ρουτιλίου.

1.2.2.3 Ο ρόλος της επένδυσης των ηλεκτροδίων.[6],[7],[9],[10]

Ο πυρήνας του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου αποτελείται είτε από ένα συμπαγές μεταλλικό σύρμα χυτού υλικού, είτε από υλικό μεταλλικού περιβλήματος, στο οποίο εμπεριέχεται ένας συγκεκριμένος αριθμός μεταλλικών σκονών. Το υλικό του πυρήνα, άγει το ηλεκτρικό ρεύμα στο τόξο και αναλαμβάνει τον ρόλο του μετάλλου προσθήκης για την συγκόλληση. Οι κύριοι ρόλοι, που επιτελεί η επένδυση των ηλεκτροδίων στην μέθοδο SMAW είναι οι εξής:

A. Προστασία του τηγμένου λουτρού.

Η επένδυση συνιστά μια ασπίδα ασφαλείας του τηγμένου λουτρού από τον περιβάλλοντα αέρα. Η επένδυση του ηλεκτροδίου αποσυντίθεται με την θερμότητα που παράγεται από το ηλεκτρικό τόξο, παράγοντας αέρια που προστατεύουν το τηκόμενο μέταλλο από τις διάφορες επιμέρους ακαθαρσίες.

B. Συνιστά κύριο μηχανισμό αποξείδωσης.

Τα οξείδια συνιστούν μολυντικό παράγοντα του τηγμένου λουτρού, καθώς η ύπαρξη τους στην τελική μικροδομή της συγκόλλησης, έχει συνήθως αρνητικό αντίκτυπο σε μηχανικό και μεταλλουργικό επίπεδο. Τα παραγόμενα αέρια από την αποσύνθεση της επένδυσης βοηθούν στην απομάκρυνση των μολυντικών στοιχείων από τον αέρα που περιβάλλει τον ηλεκτρικό τόξο, προστατεύοντας κατά αυτό τον τρόπο το τηκόμενο μέταλλο. Επιπροσθέτως, το συμπαγές στρώμα σκουριάς, που δημιουργείται κατά την κίνηση του τόξου, προστατεύει το τηκόμενο μέταλλο από τυχόντα οξειδωτικά στοιχεία.

C. Σταθεροποίηση τόξου.

Το ηλεκτρικό τόξο συνίσταται από ένα ιονισμένο αέριο (πλάσμα), το οποίο άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η επένδυση των ηλεκτροδίων περιέχει "σταθεροποιητές τόξου", οι οποίοι αποσυντιθέμενοι μετατρέπονται σε ιονισμένα αέρια, όπως το οξαλικό κάλιο ($K_2C_2O_4$) και το ανθρακικό λίθιο (Li_2CO_3). Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του τόξου και γίνεται δυνατή η σταθεροποίηση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαπερνά.

D. Προσθήκη μετάλλου.

Προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός εναπόθεσης του μετάλλου συγκόλλησης, η επένδυση πολλών ηλεκτροδίων περιέχει σκόνη σιδήρου. Η συγκεκριμένη σκόνη αποτελεί μια δευτερογενή πηγή μετάλλου προς απόθεση, προστιθέμενη σε αυτή που λαμβάνουμε από τον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Εν συνεχεία, η ύπαρξη της προαναφερθείσας σκόνης κάνει αποδοτικότερη την χρήση της ενέργειας του τόξου. Σκόνες έτερων μεταλλικών στοιχείων χρησιμοποιούνται συχνά για να τροποποιήσουν τις μηχανικές ιδιότητες του προστιθέμενου μετάλλου. Τέλος, η προσθήκη των σκονών σε σχετικά μεγάλες ποσότητες, οδηγεί συνήθως στην αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης του μετάλλου συγκόλλησης και στην αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης.

Τα ηλεκτρόδια που προτιμώνται για την μέθοδο SMAW δύναται να συγκολληθούν τεμάχια ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων, ανοξειδωτων χαλύβων, χυτοσίδηρου, χαλκού, νικελίου καθώς και αλουμινίου για συγκεκριμένες μόνο εφαρμογές. Μέταλλα όπως ψευδάργυρος, κασσίτερος και μόλυβδος δεν συγκολλούνται με την μέθοδο SMAW καθότι δεν ανέχονται την υψηλή θερμότητα του παραγόμενου τόξου της μεθόδου. Επίσης, η μέθοδος SMAW δεν χρησιμοποιείται για μέταλλα όπως το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το ταντάλιο και το νιόβιο, καθώς η προστασία που παρέχεται στην συγκόλληση είναι ανεπαρκής, με αποτέλεσμα τη μόλυνση του τηγμένου λουτρού από ακαθαρσίες.

1.2.2.4 Καθορισμός καίριων παραμέτρων της μεθόδου SMAW. [8],[10],[11],[12]

a. Καθορισμός ρεύματος συγκολλήσεως.

Ο τύπος του ρεύματος συγκολλήσεως στη μέθοδο SMAW, επιλέγεται βάσει της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, του είδους του ηλεκτροδίου, του πάχους των προς συγκόλληση τεμαχίων καθώς και της θέσης της εκάστοτε συγκολλητικής διαδικασίας. Χαμηλές τιμές ρεύματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δυσκολιών κατά την έναυση και την σταθεροποίηση του ηλεκτρικού τόξου. Επιπροσθέτως, το ηλεκτρόδιο τείνει να κολλάει στο τεμάχιο, οδηγώντας σε συγκόλληση μικρής διείσδυσης και προσδίδοντας στρογγυλοποιημένης μορφής όψη ραφής. Στην αντίθετη πλευρά, πολύ υψηλές τιμές ρεύματος, συνοδεύονται με υπερθέρμανση του ηλεκτροδίου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των σφαλμάτων υποκοπής (*undercut*), τρεξίματος μετάλλου (*burn-through*), και εκτοξεύσεων μετάλλου (*spatter*). Ως ιδανική τιμή ρεύματος, αναλογιζομένων των ιδιαιτεροτήτων κάθε διαδικασίας συγκόλλησης, καθίσταται αυτή για την οποία δεν παρουσιάζονται τα ανωτέρω σφάλματα.

Όσον αφορά, λοιπόν, το μέγεθος του ηλεκτροδίου, αυτό ανάγεται στη διάμετρο του σύρματος του πυρήνα. Για λεπτεπίλεπτες διαδικασίες, στις οποίες προτιμάται να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του ηλεκτροδίου, χρησιμοποιούνται μικρά μεγέθη ηλεκτροδίων (1.6mm-2mm) για ρεύματα, που κυμαίνονται στην περιοχή των 25A-40A. Αντιθέτως, για δυσχερέστερες εργασίες, κατά τις οποίες απαιτείται η μέγιστη θερμότητα για επαρκή τήξη, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια μεγαλύτερου μεγέθους (5mm-6.3mm), που ανταποκρίνονται σε ρεύματα της τάξης των 240A-320A. Το συνολικό εύρος των απαιτήσεων ρεύματος καλύπτει την περιοχή των 20A-550A.

Πίνακας 3.Συσχέτιση μεγέθους-ρεύματος ηλεκτροδίου κατά BOC World of Welding.

Μέγεθος ηλεκτροδίου (mm)	Εύρος Ρεύματος (Ampere)
2.5	60-95
3.2	110-130
4.0	140-165
5.0	170-260

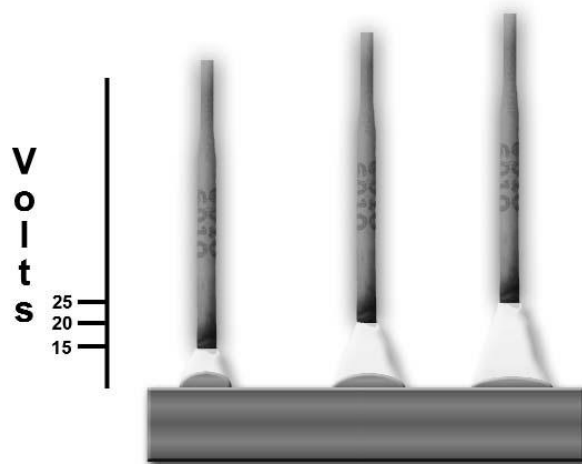
Πίνακας 4.Ενδεικτικές τιμές συσχέτισης πάχους δοκιμίων και μεγέθους ηλεκτροδίου κατά BOC World of Welding.

Μέσο πάχος πλάκας ή τομής	Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ηλεκτροδίου
1.5-2.0 mm	2.5 mm
2.0-5.0 mm	3.2 mm
5.0-8.0 mm	4.0 mm
≥ 8.0 mm	5.0 mm

Εν συνεχεία, στις περιπτώσεις της κατακόρυφης και της οροφιαίας (*overhead*) συγκόλλησης καθίσταται αρκετά χρήσιμη η μείωση της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, σε σχέση με την χρησιμοποιούμενη, στις μετωπικές συγκολλήσεις. Για αυτό το λόγο, συνήθως προτιμάται η διενέργεια της συγκόλλησης σε επίπεδη ή μετωπική θέση. Τα καλύτερα αποτελέσματα αποκτώνται διατηρώντας ένα σταθερό μήκος τόξου, κινώντας το ηλεκτρόδιο με σταθερή ταχύτητα και τροφοδοτώντας με σταθερό ρυθμό το αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο.

b. Καθορισμός τάσης τόξου.

Η επιλεγόμενη τιμή τάσεως τόξου καθορίζεται συναρτήσει του μήκους τόξου (*arc length*) μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται από την διάμετρο του ηλεκτροδίου. Αποτελεί κοινός κανόνας γνώσεως το γεγονός ότι, η αύξηση του μήκους τόξου συνοδεύεται με αύξηση της τάσεως του τόξου συγκόλλησης και αντίστροφα. Στη μέθοδο SMAW, το μέγεθος και το είδος του χρησιμοποιούμενου ηλεκτροδίου, διαμορφώνουν τις απαιτήσεις τάσεως, οι οποίες κυμαίνονται στο εύρος των 16V-40V.



Σχήμα 6.Συσχέτιση τάσεως-μήκους τόξου.(SMAW Welding, Miller, 2013)

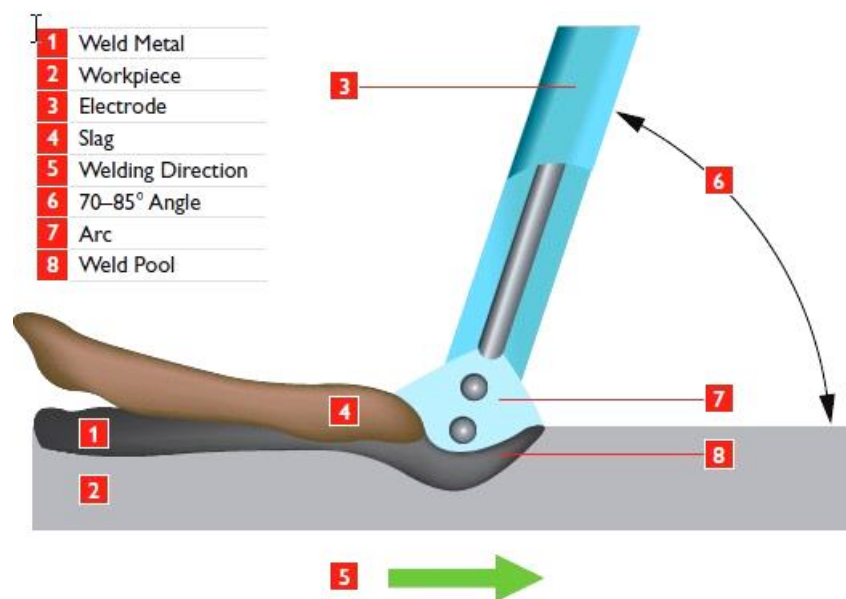
Ο καθορισμός του μήκους τόξου συνιστά κρίσιμο παράγοντα της συγκολλητικής διαδικασίας και ορίζεται ως η μικρότερη δυνατή απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου, για την οποία λαμβάνουμε επιφάνεια συγκόλλησης που πληροί τις εκάστοτε προδιαγραφές. Μεγάλο μήκος τόξου έχει ως αποτέλεσμα, μικρή διείσδυση, εκτοξεύσεις μετάλλου και τραχιά επιφάνεια συγκολλησεως. Σε αντίθεση, υπερβολικά μικρό μήκος τόξου οδηγεί σε πιθανή επαφή του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου και διακοπή της διαδικασίας, καθώς και σε ανομοιομορφία της εναπόθεσης σταγονιδίων μετάλλου και εγκλείσματα σκουριάς.

c. Καθορισμός γωνίας ηλεκτροδίου.

Η γωνία μεταξύ του ακροφυσίου της συγκολλητικής διάταξης και του τεμαχίου αποτελεί καίριο παράγοντα, που εξασφαλίζει μια συνεχή και ομοιόμορφη ροή μετάλλου. Η εσφαλμένη τοποθέτηση του ηλεκτροδίου δύναται να έχει ως αποτέλεσμα εγκλείσματα σκουριάς, ύπαρξη πόρων και σφάλματος υποκοπής. Η γωνία, ουσιαστικά, καθορίζεται από το είδος και το μέγεθος του ηλεκτροδίου, την θέση συγκόλλησης και την μέθοδο σύνδεσης. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, όταν το ηλεκτρόδιο "δείχνει" την κατεύθυνση της συγκόλλησης, η τεχνική συγκόλλησης είναι γνωστή υπό τον όρο *forehand welding*. Όταν το ηλεκτρόδιο "δείχνει" αντίθετα της πορείας συγκολλησεως, η τεχνική συγκόλλησης ονομάζεται *backhand welding*. Τυπικές τιμές γωνίας ηλεκτροδίου για ανθρακούχους χάλυβες και ηλεκτρόδια ιδίου υλικού δίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Σύμφωνα με οδηγίες εγχειριδίου της Miller, η γωνία του ηλεκτροδίου, σε γενικά πλαίσια, θα πρέπει να κυμαίνεται από 10° έως 30°.

Πίνακας 5. Γωνία ηλεκτροδίου συναρτήσει θέσης συγκόλλησης και μεθόδου σύνδεσης (Electrode Orientation in Shielded Metal Arc Welding, Welding Handbook Datasheet 276, 2006).

Joint Type	Welding Position	Travel Angle (Deg)	Welding Technique
Butt	Flat	5–10	Backhand
Butt	Horizontal	5–10	Backhand
Butt	Uphill	5–10	Forehand
Butt	Overhead	5–10	Backhand
Fillet	Horizontal	5–10	Backhand
Fillet	Uphill	5–10	Forehand
Fillet	Overhead	5–10	Backhand



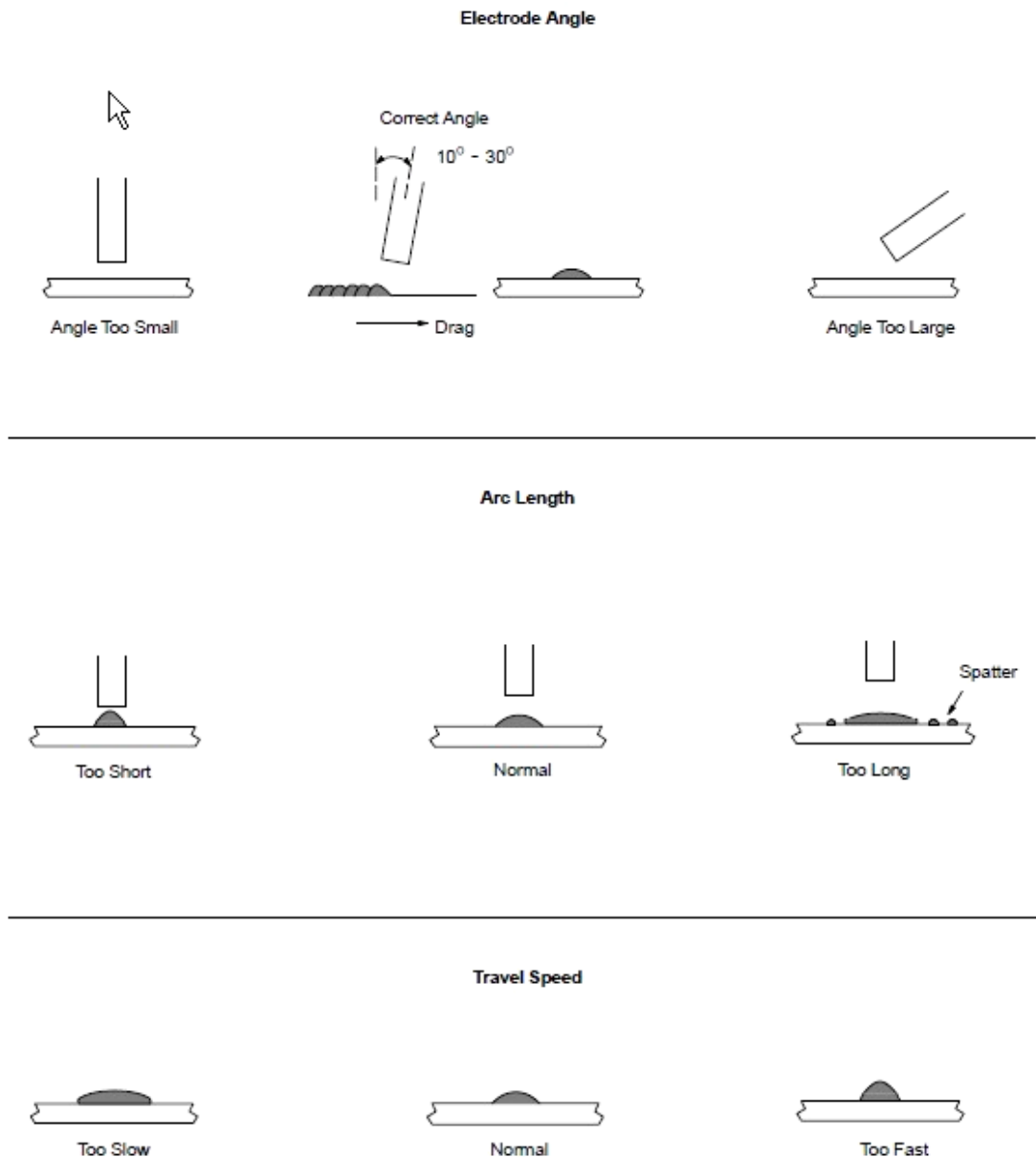
Σχήμα 7. Καθορισμός γωνίας ηλεκτροδίου, (BOC World of Welding, IRPM 2007).

α. Καθορισμός ταχύτητας συγκολλήσεως.

Το ηλεκτρόδιο κινείται κατά μήκος της εκάστοτε συγκολλητικής πορείας με κατάλληλα προκαθορισμένη ταχύτητα. Παράλληλα, υφίσταται σταθερή τροφοδοσία του ηλεκτροδίου για να διατηρείται σταθερό το μήκος τόξου. Η ταχύτητα συγκόλλησης για τις περισσότερες εφαρμογές με SMAW κυμαίνεται στο εύρος των 10-30 cm/min, συναρτήσει πάντα του μεγέθους του ηλεκτροδίου, του μήκους της ραφής και του ρεύματος συγκολλήσεως.

Πολύ υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης έχουν ως αποτέλεσμα ατελή τήξη και μικρή διείσδυση. Αντιθέτως, πολύ χαμηλές ταχύτητες οδηγούν σε αστάθεια του ηλεκτρικού τόξου, σε εγκλείσματα σκουριάς και κακές μηχανικές ιδιότητες για την συγκόλληση.

Εν κατακλείδι, έχοντας καθορίσει τις ανωτέρω παραμέτρους κατά την έναρξη της συγκολλητικής διαδικασίας SMAW, μπορούμε να διαμορφώσουμε μια ραφή καλής ποιότητας (Σχήμα 5) και να προσδώσουμε στα προς συγκόλληση τεμάχια τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.



**Σχήμα 8. Επίδραση παραμέτρων επί της συγκολλητικής διαδικασίας με SMAW,
(Guidelines for SMAW, Miller 2013)**

1.2.2.5 Μηχανές Συγκόλλησης.[5],[6],[9]

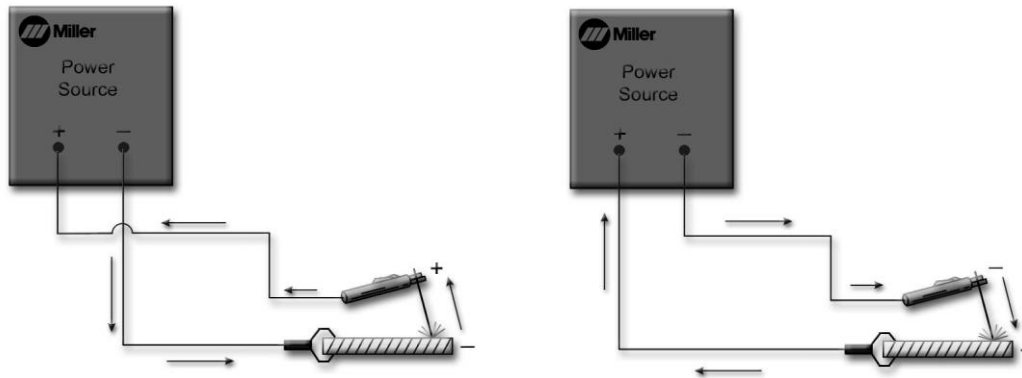
Οι μηχανές συγκόλλησης διακρίνονται σε συνεχούς ρεύματος (D.C) και σε εναλλασσόμενου ρεύματος (A.C). Η ηλεκτρική πηγή ισχύος μπορεί να είναι είτε μετασχηματιστής AC, είτε γεννήτρια D.C. Επιπλέον, σε διαδικασίες της παρούσας μεθόδου προτιμούνται πηγές ισχύος σταθερού ρεύματος με φθίνουσα (*drooping*) χαρακτηριστική καμπύλη. Πηγές ισχύος σταθερής τάσεως δεν ενδείκνυνται.

Το συνεχές ρεύμα είναι η συνηθέστερη επιλογή για την μέθοδο SMAW και χρησιμοποιείται με όλα τα διαθέσιμα είδη ηλεκτροδίων. Η έναυση και διατήρηση ενός σταθερού τόξου επιτελείται ευκολότερα στην περίπτωση συνεχούς ρεύματος και εδώ έγκειται και η κύρια διαφορά με το εναλλασσόμενο ρεύμα: ένας συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτροδίων, μη σιδηρούχων και βασικών (φερριτικού τύπου), δίνουν ασταθές τόξο. Η ροή του ρεύματος σε μια κατεύθυνση παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενα με το εναλλασσόμενο ρεύμα, όπως:

- Μικρότερος αριθμός διακοπών του ηλεκτρικού τόξου.
- Χαμηλότερες εκτοξεύσεις μετάλλου.
- Ευκολότερη έναυση τόξου.
- Καλύτερη προσαρμοστικότητα, όσον αφορά την θέση συγκόλλησης.

Ακολουθώς, οι κατακόρυφες και οροφιαίες συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων γίνονται ευκολότερα με χρήση D.C.

Επιπροσθέτως, η πολικότητα του σταθερού ρεύματος αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό επί της συνολικής διαδικασίας. Όταν το καλώδιο του ηλεκτροδίου, συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη της πηγής ισχύος και το προς συγκόλληση τεμάχιο με τον αρνητικό, τότε στο κύκλωμα εφαρμόζεται ανάστροφη πολικότητα (*reverse polarity, d.c.s.p*). Όταν το καλώδιο του ηλεκτροδίου, συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής ισχύος και το προς συγκόλληση τεμάχιο με τον θετικό, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα με ορθή πολικότητα (*straight polarity, d.c.r.p*). Στη μέθοδο SMAW εφαρμόζεται, ως επί το πλείστον, η συνδεσμολογία d.c.r.p, η οποία παρέχει καλύτερη διείσδυση και καλύτερης ποιότητας ραφή συγκολλήσεως. Χρησιμοποιείται κυρίως με βασικά-χαμηλού υδρογόνου ηλεκτρόδια και για τα περισσότερα μη σιδηρούχα μέταλλα.



Σχήμα 9.d.c.r.p & d.c.s.p (Stick Welding, D.Heide 2001)

Όταν χρησιμοποιείται συνδεσμολογία d.c.s.p, η προκύπτουσα διείσδυση είναι μικρή και η ραφή αποκτά στενή μορφή. Η θερμότητα του τόξου συγκεντρώνεται στη "μύτη" του ηλεκτροδίου, επομένως ο προκύπτων ρυθμός εναπόθεσης είναι υψηλότερος και το τεμάχιο είναι λιγότερο επιρρεπές σε παραμορφώσεις. Χρησιμοποιείται σε ένα μικρό αριθμό εφαρμογών με τη μέθοδο SMAW, ιδιαίτερα για συγκολλήσεις φύλλων μετάλλου και για σκληρού υλικού ηλεκτρόδια, καθώς ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης τρεξίματος μετάλλου (*burn-through*).

Όσον αφορά την περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος, σε περίοδο ενός κύκλου, το ρεύμα "κυλά" σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση κατά το μισό της περιόδου και αντιστρέφεται, ακολουθώντας την ακριβώς αντίθετη διεύθυνση, κατά το υπόλοιπο μισό της περιόδου. Μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, έχει το πλεονέκτημα να αποτελεί την οικονομικότερη λύση της αγοράς για εφαρμογές SMAW. Μολαταύτα, το χαρακτηριστικό της εναλλαγής του ρεύματος έχει ως άμεσο αποτέλεσμα εκτοξεύσεις μετάλλου, ατελή διείσδυση και διακοπές του ηλεκτρικού τόξου. Η μοναδική περίπτωση, που προτιμάται έναντι του συνεχούς ρεύματος, είναι η περίπτωση εμφάνισης του φαινομένου της παρέκκλισης τόξου (*arc blow*). Η παρέκκλιση τόξου αποτελεί ένα φαινόμενο μαγνητισμού του τόξου συγκόλλησης, υπό την επίδραση του οποίου, το τόξο κινείται προς ακανόνιστες διευθύνσεις. Κατά αυτό τον τρόπο παρατηρείται αστάθεια του τόξου, ατελής τήξη και πόροι.

1.2.2.6 Τυπικά σφάλματα SMAW. [10],[14]

Εγκλείσματα σκουριάς (Slag inclusions). Τα εγκλείσματα λαμβάνουν χώρα, όταν σωματίδια σκουριάς εγκλωβίζονται στο μέταλλο συγκόλλησης, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Οφείλονται σε ανομοιομορφίες στην ταχύτητα συγκόλλησης, στην υπάρχουσα σκουριά προηγούμενων περασμάτων,

σε λανθασμένο μέγεθος ηλεκτροδίου κλπ. Μπορούν να αποφευχθούν λαμβάνοντας κατάλληλα μέτρα όπως σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης, αφαίρεση σκουριάς σε κάθε πέρασμα και διατηρώντας το στρώμα σκουριάς πίσω από το τόξο, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί είτε μειώνοντας το μήκος τόξου, είτε τροποποιώντας την γωνία του ηλεκτροδίου.

Πόροι (Porosity). Το σφάλμα των πόρων παρουσιάζεται υπό την μορφή θυλάκων αερίου στο μέταλλο συγκόλλησης, είτε σε μικρές τοπικές συστάδες, είτε καθ' όλο το μήκος της ραφής συγκολλησεως. Οδηγούν σε μείωση της αντοχής της συγκόλλησης. Οφείλονται σε πολύ υψηλές τιμές ρεύματος συγκόλλησης, σε ακαθαρσίες της επιφάνειας του μετάλλου βάσης, σε υψηλά ποσοστά υγρασίας στην επένδυση των ηλεκτροδίων, σε πολύ μικρό μήκος τόξου και σε υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, οι οποίες αποτρέπουν την φυγή των παραγόμενων αερίων. Το παρόν σφάλμα, μπορεί να αποφευχθεί λαμβάνοντας κατάλληλα μέτρα, που αντισταθμίζουν τις ανωτέρω αιτίες. Παραλλαγή του συγκεκριμένου σφάλματος αποτελούν οι πεπλατυσμένοι πόροι (*wormhole porosity*) με την διαφορά ότι παρουσιάζονται υπό την μορφή επιμηκυμένων θυλάκων αερίου.

Ατελής τήξη (Incomplete fusion). Οφείλεται στην αποτυχία του προστιθέμενου μετάλλου να τηγθεί σωστά με το μέταλλο βάσης. Αιτίες εμφάνισης καθίστανται οι εξής :υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, μεγάλη διάμετρος ηλεκτροδίου, χαμηλές τιμές ρεύματος συγκόλλησης, κακή προετοιμασία τεμαχίων. Μέτρα αντιμετώπισης αποτελούν η μείωση της ταχύτητας συγκολλησεως, η αύξηση της τιμής του ρεύματος συγκολλησεως, η καλύτερη προετοιμασία της συμβολής των τεμαχίων και ο σωστότερος προσανατολισμός του ηλεκτροδίου.

Υποκοπή (Undercutting). Ονομάζεται το σφάλμα, κατά το οποίο παρατηρείται μια αυλάκωση του μετάλλου συγκόλλησης στην περιοχή ένωσης του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης. Οδηγεί σε μείωση της αντοχής της συγκόλλησης και στην εμφάνιση ρωγματώσεων. Προκαλείται από υψηλές τιμές ρεύματος συγκόλλησης, μεγάλο μήκος τόξου, υψηλή ταχύτητα σε κίνηση weaving και υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Μέτρα αντιμετώπισης συνιστούν: εκλογή κατάλληλης τιμής ρεύματος συναρτήσει του είδους, του μεγέθους του ηλεκτροδίου και της θέσης συγκόλλησης, εξασφαλίζοντας μικρό μήκος τόξου και κατάλληλη ταχύτητα.

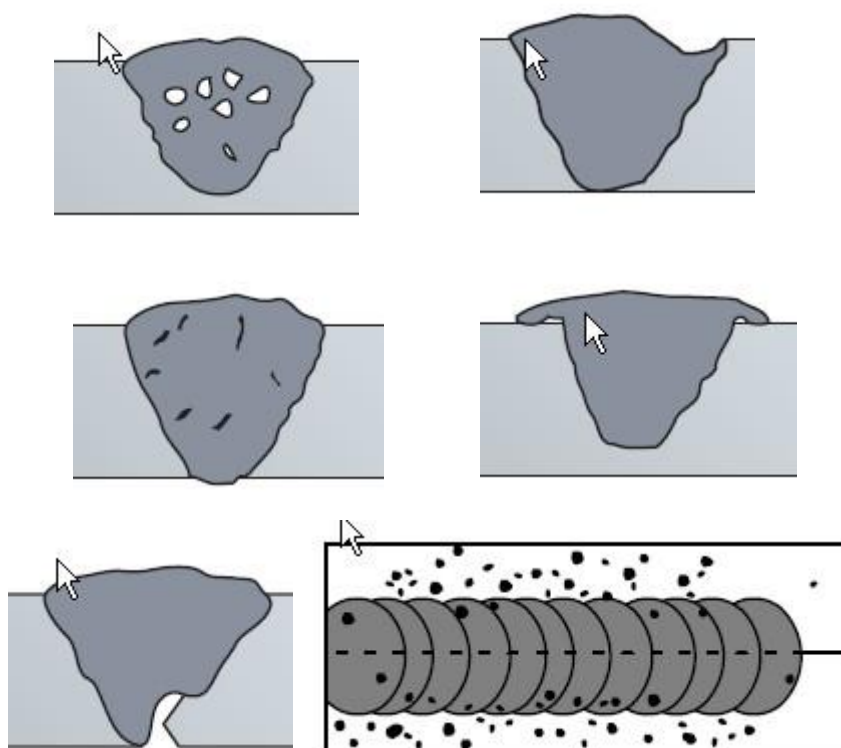
Υπερκάλυψη (Overlapping). Καλείται το σφάλμα, κατά το οποίο παρουσιάζεται υπερκάλυψη της περιοχής ένωσης του προστιθέμενου μετάλλου και του μετάλλου βάσης από μέταλλο συγκολλησεως. Το συγκεκριμένο σφάλμα δύναται να παρουσιάσει μια περιοχή ατελούς τήξης και ταυτόχρονα εγκοπής, που οδηγεί σε εμφάνιση ρωγματώσεων. Οφείλεται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, οι οποίες επιτρέπουν στο τηγμένο λουτρό να "προχωρήσει" ταχύτερα από το ηλεκτρόδιο και σε λανθασμένο προσανατολισμό του ηλεκτροδίου.

Εκτοξεύσεις μετάλλου (Spatter). Δημιουργείται λόγω διασκορπισμού τηκόμενων σωματιδίων μετάλλου και στερεοποίησης αυτών κοντά στη ραφή συγκόλλησης.

Οφείλεται σε πολύ υψηλές τιμές του ρεύματος συναρτήσει με το εκάστοτε ηλεκτρόδιο και σε πολύ μεγάλο μήκος ή τάση τόξου. Διορθώνονται με κατάλληλα μέτρα, που αντισταθμίζουν τις ανωτέρω αιτίες.

Έτερα σφάλματα μικρότερης βαρύτητας, που παρουσιάζονται κατά τη διαδικασία SMAW, αποτελούν τα:

- **Τρέξιμο μετάλλου (burn-through)**, που οφείλεται κατά κύριο λόγο σε υψηλές τιμές ρεύματος συγκολλήσεως.
- **Παραμορφώσεις (Distortion)**, που οφείλονται στην ύπαρξη παραμενουσών τάσεων και οδηγούν σε συστολή του μετάλλου συγκόλλησης.
- **Τροχιές σκουριάς (Wagon tracks)**, αποτελούν εγκλείσματα σκουριάς, που διατρέχουν τον διαμήκη άξονα της ραφής



Σχήμα 10. Παρουσίαση ενδεικτικών σφαλμάτων πόρων, υποκοπή, εγκλεισμάτων, υπερκάλυψης, ατελούς διείσδυσης και εκτοξεύσεων (Guidelines for SMAW, Miller 2013)

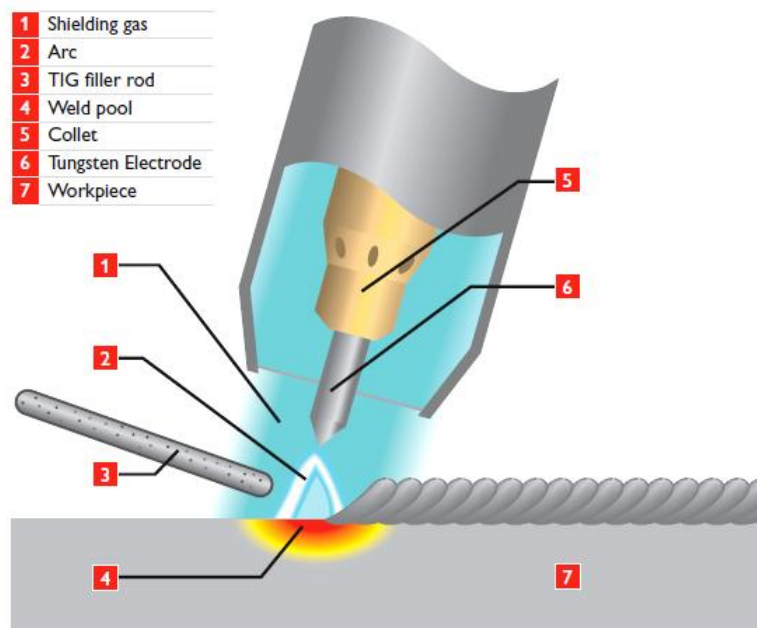
1.2.2.7 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου SMAW.[5],[8],[14]

Σε γενικές γραμμές, ο εξοπλισμός συγκόλλησης είναι απλός, φορητός και πιο οικονομικός σε σχέση με έτερες συγκολλήσεις τόξου. Για αυτό το λόγο και η μέθοδος χρησιμοποιείται σε διαδικασίες συντήρησης και επισκευής. Αντιθέτως, η παραγόμενη προστασία αερίου δεν συνιστά κατάλληλο περιβάλλον για δραστικά μέταλλα όπως το αλουμίνιο και το τιτάνιο. Ο ρυθμός εναπόθεσης μετάλλου περιορίζεται από το γεγονός ότι, η επένδυση των ηλεκτροδίων τείνει να υπερθερμαίνεται και να εξαυλώνεται, όταν χρησιμοποιούνται πολύ υψηλές τιμές ρεύματος. Το περιορισμένο μήκος ηλεκτροδίου ($\approx 35\text{cm}$) απαιτεί συχνή αλλαγή, γεγονός που με τη σειρά του μειώνει τον συνολικό βαθμό παραγωγικότητας της μεθόδου.

1.2.3 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (GTAW).

1.2.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου. [2],[19],[20]

Η μέθοδος Gas Tungsten Arc Welding, γνωστή και υπό την ονομασία TIG (Tungsten Inert Gas), βασίζεται στην δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου, που λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός μη-αναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου (W) και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Εν αντιθέσει με έτερες τεχνικές συγκολλήσεως, το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο δεν τήκεται, γεγονός που οφείλεται, εν μέρει, στο ιδιαίτερα υψηλό σημείο τήξης του βολφραμίου (3410°C). Η εγκλεισμένη υπό το τόξο περιοχή, προστατεύεται από συνεχή παροχή αδρανούς αερίου. Με την βοήθεια του ακροφυσίου συγκολλήσεως, το εκάστοτε αδρανές αέριο μεταφέρεται στην περιοχή του τηγμένου λουτρού, αντικαθιστώντας με αυτό τον τρόπο, τον ατμοσφαιρικό αέρα (Σχήμα 11).



Σχήμα 11. Περιοχή συγκόλλησης. 1) Αδρανές αέριο 2) Τόξο 3) Ράβδος προστιθέμενου μετάλλου 4) Λίμνη συγκόλλησης 5) Τσόκ 6) Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου 7) Τεμάχιο προς συγκόλληση .
(Lincoln Electric 2013)

Τα πιο διαδεδομένα αέρια προστασίας για συγκολλήσεις TIG είναι το αργό (Ar) και το ήλιο (He), με το αργό να προτιμάται στις περισσότερες εφαρμογές έναντι του ήλιου λόγω συμβατότητας και κόστους.

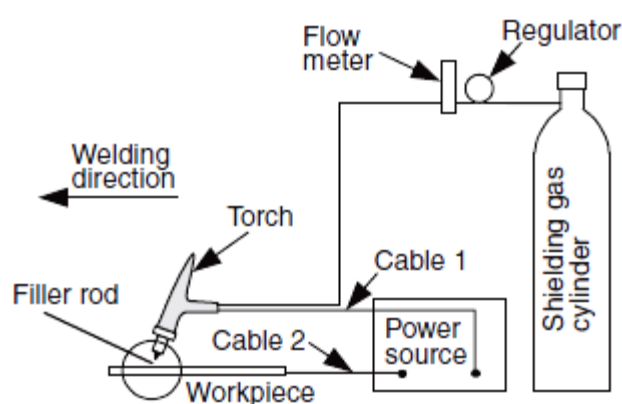
Η διαδικασία της GTAW δύναται να εκτελεστεί είτε με αυτογενή τρόπο, είτε με την παροχή προστιθέμενου μετάλλου στη λίμνη συγκόλλησης με αυτόματο ή χειροκίνητο τρόπο (*wire feed, filler rod*).

Υφίστανται αρκετές παραλλαγές της μεθόδου GTAW, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι η παλμική μέθοδος GTAW (Pulsed GTAW), η μέθοδος GTAW με ύπαρξη προθερμασμένου μετάλλου προσθήκης (Hot-wire GTAW), η σημειακή GTAW (Spot GTAW) και η τροχιακή GTAW (Orbital GTAW).

Όσον αφορά τη συγκολλητική διάταξη, ο πυρσός συγκόλλησης, ο οποίος περικλείει το ηλεκτρόδιο βολφραμίου συνδέεται με την παροχή του αδρανούς αερίου καθώς και με ένα ακροδέκτη της πηγής ισχύος. Το ηλεκτρόδιο έρχεται, περιμετρικά, σε επαφή με ένα υδρόψυκτο χάλκινο σωλήνα (*collet*), τον αγωγό επαφής, ο οποίος συνδέεται με το καλώδιο συγκόλλησης της πηγής ισχύος (*cable 1*). Αυτό συνδράμει

ώστε το ηλεκτρόδιο να τροφοδοτείται συνεχώς με ηλεκτρικό ρεύμα αλλά και να ψύχεται με σκοπό την αποφυγή πιθανής υπερθέρμανσης. Το προς συγκόλληση τεμάχιο συνδέεται με τον δεύτερο ακροδέκτη της πηγής ισχύος μέσω ενός ξεχωριστού καλωδίου (cable 2) (Σχήμα 12).

Ακολουθώς, το αδρανές αέριο τροφοδοτείται στη λίμνη συγκόλλησης διαμέσου του ακροφυσίου του πυρσού, εξασφαλίζοντας την προστασία της από ανεπιθύμητες ακαθαρσίες όπως το οξυγόνο, το υδρογόνο και το άζωτο, στοιχεία που οδηγούν στον σχηματισμό πόρων και εγκλεισμάτων και μειώνουν σημαντικά την αντοχή της συγκόλλησης. Η προστασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι αποτελεσματικότερη στην GTAW συγκριτικά με την SMAW, καθώς το αέριο προστασίας που χρησιμοποιείται είναι κάποιο αδρανές αέριο και επειδή τροφοδοτείται απευθείας στο τηγμένο λουτρό. Σε συγκεκριμένες ειδικές περιπτώσεις κρίνεται επιβεβλημένη η προσθήκη μικρού ποσοστού μη αδρανούς αερίου στο συνολικό μείγμα, ιδιαίτερα κατά την συγκόλληση δραστικών μετάλλων όπως το τιτάνιο.



Σχήμα 12.Τυπική συγκολλητική διάταξη GTAW.

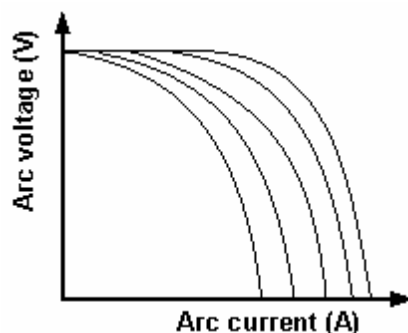
Ο εξοπλισμός μιας συγκολλητικής διάταξης GTAW ,όπως αυτής που παρουσιάζεται στο σχήμα 12, συνίσταται από επιμέρους υποβοηθητικές μονάδες:

a. Μηχανές Συγκόλλησης.

Οι μηχανές συγκόλλησης στην μέθοδο GTAW ,έχουν κατά κύριο λόγο χαρακτηριστική σταθερού ρεύματος με φθίνουσες στατικές καμπύλες ρεύματος-τάσεως. Η λειτουργία της μηχανής συγκολλήσεως με τη βοήθεια ανορθωτή και μετασχηματιστή βασίζεται στην αρχή της μετατροπής του εισερχόμενου ρεύματος A.C σε ρεύμα υψηλότερης συχνότητας, από αυτό που παρέχεται από την κύρια μονάδα. Μετέπειτα, το εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσεως μετασχηματίζεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής τάσεως, καθιστώντας το κατάλληλο για συγκόλληση. Η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα καθίσταται δυνατή για περιπτώσεις σιδηρούχων μετάλλων ενώ με εναλλασσόμενο ρεύμα για χειρωνακτικές συγκολλήσεις μετάλλων όπως τα Al και Mg. Σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες τα Al και Mg δύναται να συγκολληθούν και με συνεχές ρεύμα.

b. Πιστόλι Συγκόλλησης.

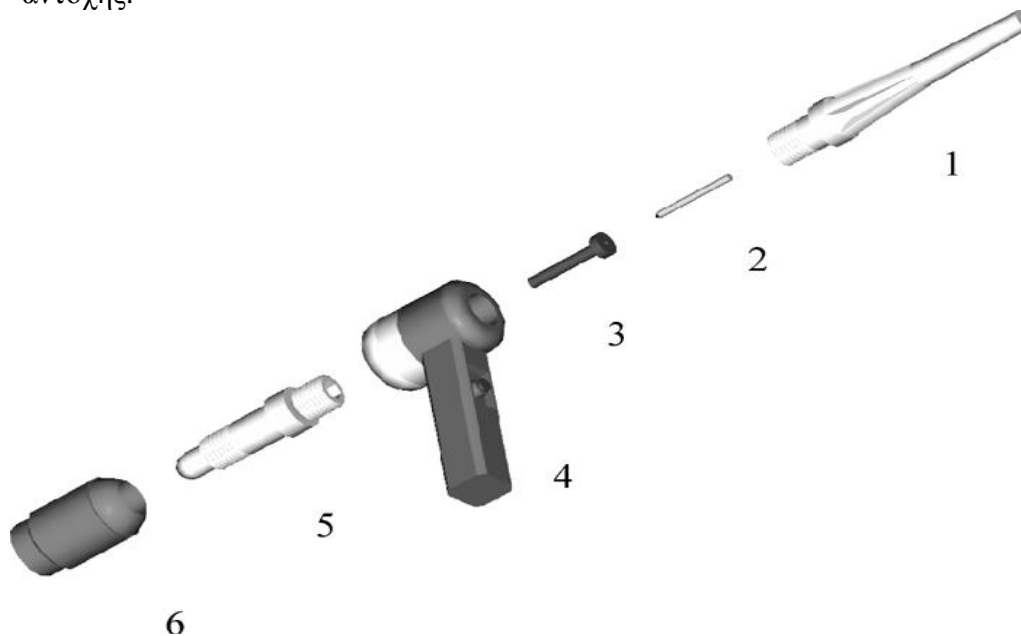
Το πιστόλι συγκολλήσεως συγκρατεί το ηλεκτρόδιο βολφραμίου, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει την παροχή του αδρανούς αερίου στην λίμνη συγκόλλησης. Το μέγεθος του πυρσού συγκόλλησης καθορίζεται από τα φορτία ρεύματος ,για τα οποία σχεδιάζεται να αντέχει και τις απαιτήσεις ψύξεως. Για εντάσεις ρεύματος μέχρι και 200A τα πιστόλια είναι αερόψυκτα, ενώ για εντάσεις του εύρους 200-500A είναι υδρόψυκτα.



Σχήμα 13. Συσχέτιση ρεύματος-τάσεως για μηχανές συγκολλήσεως GTAW.
(Welding Robots Technology Issues and Applications, J Norberto Pires 2006)

Τα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία ενός πιστολιού συγκολλήσεως GTAW είναι τα ακόλουθα:

1. Οπίσθιο κάλυμμα πυρσού συγκόλλησης, το οποίο ασφαρίζει το ηλεκτρόδιο και συσφίγγει τους 2 αγωγούς επαφής.
2. Ηλεκτρόδιο βολφραμίου.
3. Αγωγός επαφής – collet, ο οποίος εισέρχεται στον εξωτερικό αγωγό επαφής και ασφαρίζει το ηλεκτρόδιο με την βοήθεια του οπίσθιου καλύμματος.
4. Λαβή, κατασκευασμένη από κατάλληλα μονωτικό υλικό.
5. Εξωτερικός αγωγός επαφής, ο οποίος ευθυγραμμίζει την πορεία του ηλεκτροδίου μέχρι και το ακροφύσιο .
6. Ακροφύσιο, το οποίο αποτελεί τη γεωμετρική συνέχεια του εξωτερικού αγωγού επαφής και είναι κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό για λόγους θερμικής αντοχής.



Σχήμα 14. Τυπική διάταξη πιστολιού συγκόλλησης GTAW.

c. Ρυθμιστής παροχής αερίου.

Ο ρυθμιστής της παροχής του αδρανούς αερίου αποτελεί μια συσκευή, η οποία έχει ως κύριο στόχο να μειώνει και να διατηρεί τα επίπεδα πίεσης του αερίου στα επιθυμητά, ανεξάρτητα από μεταβολές της πηγής πίεσης. Η μείωση της πίεσης δύναται να επιτευχθεί μονοφασικά ή διφασικά, με την τελευταία περίπτωση να προτιμάται λόγω σταθερότερης ροής.

d. Σύστημα Ψύξης.

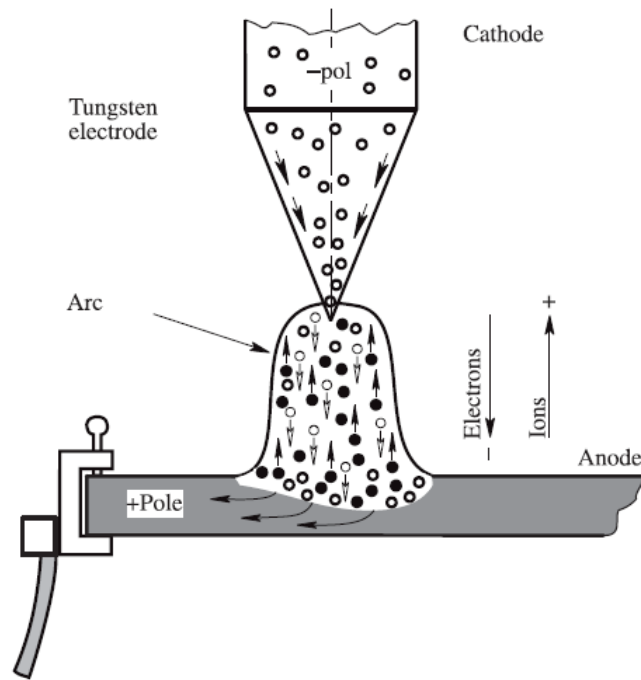
Όπως προαναφέρθηκε, σε υψηλές εντάσεις ρεύματος, κρίνεται προτιμότερη η επιλογή ενός υδρόψυκτου πυρσού συγκόλλησης, όπου το νερό παρέχεται στον πυρσό διαμέσου ενός σωλήνα. Το νερό διατρέχει το πιστόλι συγκόλλησης και ολοκληρώνει τον κύκλο διαμέσου ενός δεύτερου σωλήνα. Εναλλακτικά, το νερό ψύξης μπορεί να παρέχεται μέσω των λεγόμενων "αυτό-διατηρούμενων" συστημάτων. Αποτελούνται από μια δεξαμενή, ένα ηλεκτρικό κινητήρα και μια αντλία πίεσης. Η αντλία βρίσκεται σε αδιάκοπη λειτουργία, ανατροφοδοτώντας συνεχώς το σύστημα με νερό ψύξεως. Σε περίπτωση συνθηκών παγετού, λαμβάνονται μέτρα αντιμετώπισης, όπου το νερό αντικαθίσταται από ένα μείγμα αποσταγμένου νερού και αιθυλενογλυκόλης¹, το οποίο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά λιπαντική ικανότητα λιπαίνοντας επαρκώς την αντλία πίεσης.

Η μέθοδος TIG χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου απαιτείται ακρίβεια και υψηλή ποιότητα συγκόλλησης. Οι κυριότερες εξ' αυτών περιλαμβάνουν συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξείδωτων χαλύβων καθώς και συγκολλήσεις που εμπίπτουν στο πεδίο της κρυογονικής. Η ακρίβεια της μεθόδου εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι, η θερμότητα του τόξου και η παροχή του προστιθέμενου μετάλλου αποτελούν συνιστώσες πλήρως ελέγξιμες. Η συγκεντρωμένη θερμική ενέργεια της μεθόδου GTAW συνδράμει στην αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, η οποία σε συνήθεις περιπτώσεις κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα της τάξεως του 10cm/min. Επιπροσθέτως, βοηθάει στην ελαχιστοποίηση των παραμενουσών τάσεων και στην βελτίωση της μεταλλουργικής ποιότητας της συγκόλλησης.

Θωρώντας το ζήτημα από φυσικής απόψεως, γνωρίζουμε ότι σε συγκολλήσεις GTAW χρησιμοποιείται συνήθως ρεύμα ορθής πολικότητας. Η θεωρία ηλεκτρονίων σημειώνει ότι κατά την έναυση του τόξου τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και τα θετικά φορτισμένα ιόντα μεταναστεύουν από την κάθοδο στην άνοδο και αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν από τον αρνητικό πόλο στον θετικό ενώ τα ιόντα από τον θετικό στον αρνητικό. Κατά αυτόν τον τρόπο, στην εγκλειόμενη περιοχή του τόξου υφίσταται μια "σύγκρουση" φορτισμένων σωματιδίων με άμεσο αποτέλεσμα την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Η ροή των ηλεκτρονίων προς την άνοδο γίνεται με υψηλές ταχύτητες, ένα αντιθέσει με την πορεία των κατιόντων προς την κάθοδο. Συνεπώς, η συνολικά παραγόμενη, εκ του τόξου, θερμική ενέργεια κατανέμεται κατά 30% στο ηλεκτρόδιο και κατά 70% στο προς συγκόλληση τεμάχιο, γεγονός που δικαιολογείται από την υψηλή ταχύτητα πρόσκρουσης των ηλεκτροδίων στον θετικό πόλο (σχήμα 15). Η σταθεροποίηση της κατανομής της θερμικής ενέργειας υποβοηθείται από τον *ιονισμό* του αερίου προστασίας λόγω υπέρθεσης υψηλής συχνότητας τάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα ηλεκτρόνια, τα οποία ελευθερώνονται κατά την διαδικασία ιονισμού διαμορφώνουν έναν αγωγό μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου.

Η έναυση του τόξου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την επαφή του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου με υπέρθεση υψηλής συχνότητας τάσεως. Σε συνεχές ρεύμα, η υπέρθεση διακόπτεται κατά την φάση που ακολουθεί την έναυση του τόξου, ενώ σε εναλλασσόμενο ρεύμα η υπέρθεση διατηρείται ενεργή καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας για λόγους σταθερότητας του ηλεκτρικού τόξου.

¹ Άκυκλη, κορεσμένη, δισθενής αλκοόλη.



Σχήμα 15. Μετανάστευση ηλεκτρονίων και ιόντων σε συγκόλληση GTAW. (GTAW Welding Guide, Lincoln Electric 2006)

Η μέθοδος υπέρθεσης υψηλής συχνότητας τάσεως εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μετάλλων, τα οποία είναι επιρρεπή σε εμφάνιση ακαθαρσιών, όπως τα Al και Mg. Εφαρμόζεται, επίσης, για συγκολλήσεις με συνεχές ρεύμα ανοξειδωτων χαλύβων και ορείχαλκου. Συνεπώς, αποφεύγεται η μόλυνση της λίκμης συγκολλήσεως, εφόσον δεν υφίσταται επαφή ηλεκτροδίου και τεμαχίου. Οι μηχανές συγκόλλησης, που σχεδιάζονται ειδικά για συγκολλήσεις GTAW, έχουν συνήθως ενσωματωμένη μια μονάδα υψηλής συχνότητας, η οποία απαρτίζεται από τα ακόλουθα κατασκευαστικά μέρη: ένα μετασχηματιστή, πυκνωτές και ένα πηνίο σύζευξης για την επαγωγή της υψηλής συχνότητας στο κύκλωμα συγκόλλησης.

Σε περιπτώσεις έναυσης του τόξου, όπου η μέθοδος υπέρθεσης υψηλής συχνότητας τάσεως είτε δεν επιτρέπεται ή αποφεύγεται, χρησιμοποιούνται τεχνικές επαφής (*scratch start, touch start technique*). Το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται με την στιγμιαία επαφή του ηλεκτροδίου στο προς συγκόλληση τεμάχιο και την μετέπειτα απομάκρυνση του. Ιδιαίτερα διαδεδομένη παραλλαγή έναυσης του ηλεκτρικού τόξου αποτελεί ή *Lift Arc* GTAW, όπου κατά την στιγμή επαφής του ηλεκτροδίου με το προς συγκόλληση τεμάχιο το κύκλωμα επιτρέπει ρεύμα χαμηλής έντασης, της τάξεως των 5A-8A, να το διαπεράσει, λόγω δημιουργίας βραχυκυκλώματος. Ακολούθως, το ηλεκτρόδιο ανυψώνεται και το κύκλωμα διαρρέεται από το ρεύμα συγκόλλησης, που καθορίζεται από την πηγή ισχύος.

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος GTAW προτιμάται για συγκολλήσεις σχετικά λεπτών ελασμάτων, της τάξεως των 7mm και κάτω. Επιλέγεται για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, χαλκού, μαγνησίου, νικελίου, τιτανίου, ζirkονίου και υψηλά κραματωμένων χαλύβων καθώς και για όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα και η τάση του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου κυμαίνονται από 50-350A και 10-15V για προστασία με αργό και από 50-350A και 15-25V για προστασία με ήλιο.

1.2.3.2 Καθορισμός καίριων παραμέτρων μεθόδου GTAW.[19],[20],[26],[27]

(a) Ηλεκτρικό ρεύμα.

Το ηλεκτρικό ρεύμα επηρεάζει άμεσα την εκάστοτε συγκολλητική διαδικασία GTAW ως προς την μορφή της ραφής συγκόλλησης, την ταχύτητα συγκόλλησης και την μεταλλουργική ποιότητα της προκύπτουσας συγκόλλησης. Για τις περισσότερες εφαρμογές, πλην αλουμινίου και μαγνησίου, χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας **D.C.E.N** ή **d.c.s.p.** Όσον αφορά, την συνδεσμολογία συνεχούς ρεύματος ορθής πολικότητας, το πιστόλι συγκόλλησης συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής ισχύος, ενώ το προς συγκόλληση τεμάχιο με τον θετικό ακροδέκτη. Κατά την έναυση του τόξου, λαμβάνει χώρα η ροή ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Όπως έχει σημειωθεί κατά το κεφάλαιο 1.2.3.1, για ρεύμα συνεχές ορθής πολικότητας, η θερμότητα εκ του ηλεκτρικού τόξου κατανέμεται κατά 70% στην άνοδο και κατά 30% στην κάθοδο. Αυτό το γεγονός δικαιολογεί την υψηλή διείσδυση και την σχετικά στενή ραφή, που επιτυγχάνεται με D.C.E.N στις GTAW συγκολλήσεις. Η ροή των ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο βολφραμίου στο προς συγκόλληση δοκίμιο, επιτελεί ένα δευτερεύοντα, ψυκτικό ρόλο για το ηλεκτρόδιο, καθ' ότι λαμβάνοντας το μικρότερο ποσοστό της αποδιδόμενης θερμότητας του τόξου, το ηλεκτρόδιο υπόκειται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.16, τα θετικώς φορτισμένα ιόντα αερίου ακολουθούν αντίστροφη πορεία από αυτή των ηλεκτρονίων.

Αντιθέτως, στην συνδεσμολογία συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας **D.C.E.P** ή **d.c.r.p** το πιστόλι συγκολλήσεως συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη της πηγής παροχής ισχύος, ενώ το προς συγκόλληση τεμάχιο με τον αρνητικό ακροδέκτη. Η ροή των ηλεκτρονίων, στην προκείμενη περίπτωση, λαμβάνει χώρα με πορεία από το τεμάχιο προς το ηλεκτρόδιο. Συνάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της κατανεμημένης θερμότητας συγκεντρώνεται στην άκρη του ηλεκτροδίου και το μικρότερο στο προς συγκόλληση τεμάχιο, λαμβάνοντας, κατά αυτόν τον τρόπο συγκολλήσεις χαμηλής διείσδυσης. Επιπροσθέτως, κρίνεται εύλογη η χρησιμοποίηση υδρόψυκτων ηλεκτροδίων μεγαλύτερης διαμέτρου, προκειμένου να αποφεύγονται πιθανά προβλήματα υπερθέρμανσης του ηλεκτροδίου. Τα θετικώς φορτισμένα ιόντα αερίου 'μεταναστεύουν' με πορεία προς το τεμάχιο, όπου και συγκρούονται με αυτό, βοηθώντας στην απομάκρυνση των σχηματιζόμενων στρωμάτων οξειδίων και στην διαμόρφωση μιας καθαρής επιφάνειας ραφής. Επομένως, η συνδεσμολογία D.C.E.P δύναται να χρησιμοποιηθεί για συγκολλήσεις μικρής διείσδυσης λεπτών φύλλων αλουμινίου και μαγνησίου, υλικών με μεγάλη τάση σχηματισμού οξειδίων.

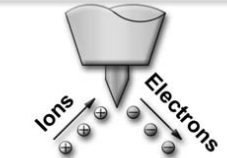


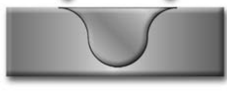


Το γεγονός συγκέντρωσης της θερμότητας στο ηλεκτρόδιο, έχει ως αποτέλεσμα, όπως προαναφέραμε, μικρή διείσδυση συγκόλλησης. Σε συνδυασμό με υλικό όπως το αλουμίνιο, το τόξο δύναται να συμπεριφερθεί ασταθώς, καθώς το αλουμίνιο συνιστά κακό πομπό ηλεκτρονίων. Η καθαρική ιδιότητα της χρήσεως συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας και η υψηλή διείσδυση της χρήσης συνεχούς ρεύματος ορθής πολικότητας αποτελεί χρυσή τομή για περιπτώσεις συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αποτελεί ένα συμβιβασμό μεταξύ των δυο μορφών πολικότητας, υιοθετώντας τα πλεονεκτήματα έκαστης μορφής.

Η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος σε συγκολλήσεις GTAW έχει ως κύρια χαρακτηριστικά μεσαίας τάξεως διείσδυση, η οποία κυμαίνεται ενδιάμεσα των αντίστοιχων σε D.C.E.P και D.C.E.N και αφαίρεση των σχηματιζόμενων στρωμάτων

οξειδίων. Στην προκείμενη περίπτωση το ρεύμα εναλλάσσει συνεχώς την κατεύθυνση με την οποία διαρρέει το κύκλωμα.

Ένας ολοκληρωμένος κύκλος εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελείται, σε θεωρητική βάση, από μισό κύκλο κατά τον οποίο το ηλεκτρόδιο συμπεριφέρεται σαν αρνητικός πόλος και από μισό κύκλο κατά τον οποίο το ηλεκτρόδιο συμπεριφέρεται σαν θετικός πόλος. Κάθε ημικύκλιο είναι ισόχρονο και ισομεγέθες. Για πρακτικές εφαρμογές συγκολλήσεων αλουμινίου με GTAW, όμως, η προαναφερθείσα θεωρία δεν ισχύει απόλυτα, καθώς τα 2 ημικύκλια δεν είναι ισορροπημένα, με το ημικύκλιο, κατά το οποίο το ηλεκτρόδιο συμπεριφέρεται σαν αρνητικός πόλος να αποτελεί μείζονος σημασίας. Ο λόγος αναντιστοιχίας σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο είναι η ύπαρξη οξειδίου του αλουμινίου στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Το σχηματιζόμενο οξείδιο δυσκολεύει την ροή των ηλεκτρονίων από το τεμάχιο στο ηλεκτρόδιο, εν αντιθέσει με την ροή από το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο, η οποία λαμβάνει χώρα αβίαστα. Σαν άμεσο αποτέλεσμα, το κύκλωμα διαρρέεται από υψηλότερες τιμές έντασης ρεύματος στον μισό κύκλο, κατά τον οποίο το ηλεκτρόδιο συμπεριφέρεται σαν αρνητικός πόλος.

Η τεχνολογία τετραγωνικών κυμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος προτιμάται, την σήμερα ημέρα, έναντι των κλασικών ημιτονοειδών κυμάτων καθώς υποβοηθά την ρύθμιση της καθαριστικής ιδιότητας του τόξου και του βάθους διείσδυσης.

Current Type	DCEN	DCEP	AC (Balanced)
Electrode Polarity	Negative	Positive	
Electron and Ion Flow			
Penetration Characteristics			
Oxide Cleaning Action	No	Yes	Yes-Once Every Half Cycle
Heat Balance In The Arc (Approx.)	70% At Work End 30% At Electrode End	30% At Work End 70% At Electrode End	50% At Work End 50% At Electrode End
Penetration	Deep; Narrow	Shallow; Wide	Medium
Electrode Capacity	Excellent 1/8" (3.2mm) 400 A	Poor 1/4" (6.4mm) 120 A	Good 1/8" (3.2mm) 225 A

Σχήμα 16. Χαρακτηριστικά D.C.E.N, D.C.E.P, A.C, Welding Journal, November 2006

(b) Ταχύτητα Συγκόλλησης.

Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης για σταθερές τιμές έντασης ρεύματος και τάσεως τόξου έχει ως άμεση απόρροια την μείωση της αποδιδόμενης θερμότητας. Η ταχύτητα συγκόλλησης δεν επιδρά στην ηλεκτρομαγνητική δύναμη και στην πίεση του τόξου, καθ' όσον εξαρτώνται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Ενδεχόμενη αύξηση της ταχύτητας έχει ως άμεσο επακόλουθο μείωση της επιφάνειας της εγκάρσιας τομής της συγκόλλησης και συνεπώς του βάθους διείσδυσης (D) και του πλάτους της ραφής (W). Επίσης, παρατηρείται μια ελαφρά εξάρτηση του λόγου D/W από την ταχύτητα συγκόλλησης. Σαν γενικό συμπέρασμα, λοιπόν, συνάγεται ότι η ταχύτητα συγκόλλησης δεν επηρεάζει τους μηχανισμούς σχηματισμού της λίμνης συγκόλλησης, παρά μόνο τον όγκο του τηκόμενου υλικού. Οι τυπικές ταχύτητες για

την μέθοδο GTAW κυμαίνονται από 10 έως 50 cm/min, ανάλογα με τα εκάστοτε χαρακτηριστικά ρεύματος, το είδος του υλικού και το πάχος του προς συγκόλληση τεμαχίου.

(c) Μήκος Τόξου.

Η απόσταση μεταξύ του άκρου του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου στην μέθοδο GTAW, κυμαίνεται από 2 έως 5 mm. Σε περίπτωση αύξησης του μήκους τόξου, αυξάνεται και η τάση του τόξου για λόγους σταθερότητας της συγκολλητικής διαδικασίας, ενώ παράλληλα παρατηρείται μείωση της αποδιδόμενης θερμότητας, λόγω απωλειών ακτινοβολίας του τόξου. Συνεπώς, το βάθος διείσδυσης και η επιφάνεια εγκάρσιας τομής του τηκόμενου υλικού μειώνονται με ενδεχόμενη αύξηση του μήκους τόξου.

(d) Μέταλλο Προσθήκης.

Το μέταλλο προσθήκης (filler metal) χρησιμοποιείται ,κατά κύριο λόγο, για περιπτώσεις συγκόλλησης τεμαχίων πάχους 2 mm και άνω. Η συμβατότητα μεταξύ του προστιθέμενου μετάλλου και του μετάλλου βάσης συνιστά ουσιώδη παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας. Επομένως, η χημική σύσταση του μετάλλου προσθήκης θα πρέπει να είναι εγγενής με την αντίστοιχη του μετάλλου βάσης. Η διάμετρος του μετάλλου προσθήκης κυμαίνεται από 1.6 έως 3.2 mm .

(e) Γωνία Ηλεκτροδίου.

Η γωνία του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου επιδρά σημαντικά στο βάθος διείσδυσης και στην τελική μορφή της ραφής συγκόλλησης. Οι συνήθεις τιμές γωνιών κυμαίνονται από 30° έως 120°. Οι μικρότερες γωνίες ενισχύουν την πίεση του τόξου και αυξάνουν το βάθος διείσδυσης. Γωνίες της τάξεως των 60° -120° ενισχύουν την σταθερότητα του τόξου και διαμορφώνουν συγκολλήσεις με επαρκή συντελεστή D/W. Κρίνεται απαραίτητο, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το προστιθέμενο μέταλλο να διατηρείται εντός της περιοχής επίδρασης του αδρανούς αερίου, με άμεσο στόχο την ελαχιστοποίηση κάθε πιθανότητας μόλυνσης της λίμνης συγκολλήσεως.

(f) Διαφοροποιήσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο.

Η συγκεκριμένη υποκατηγορία αναφέρεται στα χαρακτηριστικά συγκόλλησης ανοξείδωτων ωστενιτικών χαλύβων με ταυτόσημη χημική σύνθεση και στις τυχούσες διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται, κάτω από παρόμοιες συνθήκες συγκόλλησης. Οι προαναφερθείσες παρεκκλίσεις στην μορφή της ραφής συγκόλλησης οφείλονται σε διαφορετικές αναλογίες ιχνοστοιχείων, όπως θείο, ασβέστιο και οξυγόνο, στο εκάστοτε τεμάχιο. Επιπροσθέτως, οι διαφοροποιήσεις στο ποσοστό ιχνοστοιχείων επηρεάζουν τις επιφανειακές τάσεις και την ροή του μετάλλου στο τηγμένο λουτρό. Η διαμόρφωση της λίμνης συγκόλλησης επηρεάζεται συνάμα από ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, την πίεση του τόξου και τις δυνάμεις θερμικής διαχυτότητας. Το παρόν πρόβλημα δύναται να εξαλειφθεί με χρήση υψηλότερων τιμών εντάσεως ρεύματος καθώς και με τη χρήση παλλόμενου ρεύματος. Εναλλακτικά, ο συνδυασμός αδρανούς αερίου και επένδυσης ενεργών συστατικών στην επιφάνεια του δοκιμίου, δύναται να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση.

1.2.3.3 Είδη Ηλεκτροδίων.[19],[21],[22],[28]

Το βολφράμιο συνιστά το κύριο κατασκευαστικό υλικό ηλεκτροδίων για τις συγκολλητικές διαδικασίες GTAW. Αποτελεί ένα δύστηκτο υλικό με σημείο τήξης

τους 3410°C. Επίσης, χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμική και ηλεκτρική αντίσταση καθώς και υψηλή σκληρότητα για ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Η κραμάτωση του βολφραμίου με ένα μικρό ποσοστό οξειδίου μετάλλου αυξάνει την αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου, γεγονός που επιτρέπει στο ηλεκτρόδιο να επιδέχεται υψηλότερα ηλεκτρικά φορτία. Τα κραματωμένα ηλεκτρόδια βολφραμίου, συνεπώς, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μεγαλύτερη ικανότητα εκπομπής ηλεκτρονίων και από καλύτερες ιδιότητες έναυσης συγκριτικά, πάντα, με τα ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου. Τα κυριότερα κραματικά οξείδια μετάλλου του βολφραμίου είναι τα εξής:

- Οξείδιο του Θορίου (ThO₂)
- Οξείδιο του Ζιρκονίου (ZrO₂)
- Οξείδιο του Λανθανίου (LaO₂)
- Οξείδιο του Δημητρίου (CeO₂)

Τα ηλεκτρόδια βολφραμίου κατατάσσονται ανάλογα με την χημική τους σύσταση και φέρουν το καθένα ένα ξεχωριστό χρωματικό κώδικα, που έχει συμφωνηθεί βάσει διεθνούς προτυποποίησης κατά τον οργανισμό *American Welding Society*. Όλα τα απαραίτητα στοιχεία κατατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.Χρωματική τυποποίηση ηλεκτροδίων βολφραμίου GTAW. (AWS 1991)

Κατάταξη κατά AWS	Χρώμα	Κραματικό Στοιχείο	Οξείδιο κραμάτωσης	Ονομαστικό ποσοστό βάρους οξειδίου
EWP	Πράσινο	-	-	-
EWCe-2	Πορτοκαλί	Δημήτριο (Ce)	CeO ₂	2
EWLa-1	Μαύρο	Λανθάνιο (La)	La ₂ O ₂	1
EWTh-1	Κίτρινο	Θόριο (Th)	ThO ₂	1
EWTh-2	Κόκκινο	Θόριο (Th)	ThO ₂	2
EWZr-1	Καφέ	Ζιρκόνιο (Zr)	ZrO ₂	0.25
EWG	Γκρι	Μη καθορισμένο	-	-

Τα ηλεκτρόδια ,που διακρίνονται ανωτέρω και βρίσκουν συχνή εφαρμογή, έχουν τις εξής χημικές συστάσεις:

- βολφράμιο με 2% δημήτριο (EWCe-2)
- βολφράμιο με 1% λανθάνιο (EWLa-1)
- βολφράμιο με 1-2% θόριο (EWTh-1, EWTh-2)
- βολφράμιο με ≤ 1% ζιρκόνιο (EWZr-1)
- καθαρό βολφράμιο (EWP)

Τα προαναφερθέντα ηλεκτρόδια διατίθενται σε διαμέτρους που κυμαίνονται από 0.25 mm μέχρι 6.4 mm. Γενικά, ηλεκτρόδια μικρότερων διαμέτρων μεταφέρουν μικρότερα ποσά ενέργειας και επιτρέπουν την εστίαση του τόξου σε μικρότερη περιοχή. Τα ηλεκτρόδια τύπου EWP είναι τα φθηνότερα, ενώ τα θοριομένα τα αποδοτικότερα.

Αναλυτικότερα, ισχύουν τα εξής:

▪ **Ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου (EWP):** Πρόκειται για ηλεκτρόδια με περιεκτικότητα σε βολφράμιο 99.5%, χωρίς την ύπαρξη έτερων κραματικών στοιχείων. Τα ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις εναλλασσόμενου ρεύματος, κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου. Το κυριότερο

προτέρημα τους είναι το γεγονός ότι υποβοηθούν την σταθεροποίηση του τόξου. Όσον αφορά συγκολλήσεις συνεχούς ρεύματος, η ιδιότητα τους να επιδέχονται μικρότερα ηλεκτρικά φορτία έναντι των κραματωμένων ηλεκτροδίων, τα καθιστά λιγότερο αποδοτικά και συνεπώς μη προτιμητέα. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί η αξιόλογη αντίσταση, που παρουσιάζουν, στην απορρόφηση ακαθαρσιών. Στην αντίθετη πλευρά, χαρακτηρίζονται από χειρότερες ιδιότητες έναυσεως, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες, συγκριτικά με κραματωμένα ηλεκτρόδια (Th,Ce,La,Zr) καθώς και από μεγαλύτερη πιθανότητα μεταφοράς σωματιδίων βολφραμίου διαμέσου του τόξου.

▪ **Ηλεκτρόδια βολφραμίου με κραματικό στοιχείο το θόριο (EWTh):** Η παρουσία οξειδίου του θορίου στη χημική σύσταση ενός ηλεκτροδίου βολφραμίου βελτιώνει σημαντικά τις ιδιότητες του. Βρίσκουν απήχηση σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών, λόγω της εξαιρετικής αντοχής τους στην απορρόφηση ακαθαρσιών, της εύκολης έναυσης και της σταθερότητας που παρέχουν στο τόξο. Πιο συγκεκριμένα, το οξείδιο του θορίου ενισχύει την ιδιότητα εκπομπής ηλεκτρονίων του ηλεκτροδίου, με άμεσο αποτέλεσμα καλύτερα χαρακτηριστικά έναυσης του τόξου και υψηλότερη χωρητικότητα ηλεκτρικού φορτίου. Η προσθήκη 1%-2% του συγκεκριμένου κραματικού στοιχείου αυξάνει την μέγιστη χωρητικότητα ηλεκτρικού ρεύματος του ηλεκτροδίου κατά 50% δεδομένου του μεγέθους του και της χρήσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια θορίου, προτιμώνται για εφαρμογές συνεχούς ρεύματος καθώς έχουν την δυνατότητα να διατηρούν την αιχμηρή τους απόληξη κατά την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, εν αντιθέσει με τα EWP, τα οποία λιώνουν και σχηματίζουν σφαιρική απόληξη. Ακολούθως, λαμβάνοντας ως βέβαιο το γεγονός εξασφάλισης υγιεινών συνθηκών εργασίας και ότι το θόριο συνιστά ραδιενεργό στοιχείο, αναπτύχθηκαν ηλεκτρόδια με έτερα κραματικά στοιχεία όπως το λανθάνιο, το δημήτριο, το ύτριο και μείγματα σπάνιων γαιών.

▪ **Ηλεκτρόδια βολφραμίου με κραματικό στοιχείο το ζirkόνιο (EWZr):** Η ύπαρξη οξειδίου του ζirkονίου στη χημική σύσταση ενός ηλεκτροδίου βολφραμίου επιδρά ιδιαίτερα θετικά για τις περιπτώσεις συγκολλήσεων εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό οφείλεται στην εξαιρετική αντοχή, που αναπτύσσουν, έναντι της απορρόφησης ακαθαρσιών και στην καλή συμπεριφορά έναυσεως του τόξου. Κατά την διάρκεια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών, σχηματίζουν ημισφαιρική ή σφαιρική απόληξη, παρομοίως με τα ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου. Επιπροσθέτως, συνδράμουν στη διατήρηση ενός σταθερού τόξου και στην ελαχιστοποίηση εμφάνισης του σφάλματος των εκτοξεύσεων μετάλλου. Η ικανότητα τους να επιδέχονται υψηλά ηλεκτρικά φορτία είναι εφάμιλλη των ηλεκτροδίων θορίου. Σε γενικά πλαίσια, η παρούσα κατηγορία ηλεκτροδίων συνιστάται, ως επί το πλείστον, για συνθήκες συγκόλλησης υψηλών προδιαγραφών και ιδιαίτερα χαμηλών ανοχών ύπαρξης ακαθαρσιών στη λίμνη συγκόλλησης.

▪ **Ηλεκτρόδια βολφραμίου με κραματικό στοιχείο το δημήτριο (EWCe):** Τα κυριότερα προτερήματα της παρούσης κατηγορίας επί των GTAW συγκολλητικών διαδικασιών, αποτελούν τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά έναυσεως που παρουσιάζουν. Καθίστανται κατάλληλα για συγκολλήσεις ανθρακούχων και ανοξείδωτων χαλύβων καθώς και κραμάτων νικελίου και τιτανίου. Βρίσκουν εφαρμογή σε συγκολλήσεις δικτύων σωληνώσεων και εξαιρετικά λεπτών μεταλλικών δοκιμίων. Ο υψηλότερος βαθμός αποδοτικότητας τους παρουσιάζεται για χρήση τους με συνεχές ρεύμα. Η χημική τους σύσταση αποτελείται κατ' ελάχιστον από 97.3% βολφράμιο και από 1.8% έως 2.2% δημήτριο. Υπό περιπτώσεις ταυτόχρονης γείωσης και χρήσης εναλλασσόμενου ρεύματος επιδέχονται 30%-40% υψηλότερα ηλεκτρικά φορτία, εν συγκρίσει με ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου για παρόμοιες συνθήκες.

- **Ηλεκτρόδια βολφραμίου με κραματικό στοιχείο το λανθάνιο (EWLa):** Το λανθάνιο, ως κραματικό στοιχείο, προσφέρει ενισχυτικές ιδιότητες στη συγκολλητική διαδικασία GTAW, παρουσιάζοντας εξαιρετικές ιδιότητες εναύσεως για χαμηλές τιμές ηλεκτρικού ρεύματος, υψηλή διάρκεια ζωής και σταθερότητα τόξου καθώς και χαμηλό ρυθμό αλλοίωσης του άκρου του ηλεκτροδίου. Τα κυριότερα ηλεκτρόδια της κατηγορίας κραματώνονται είτε με 1.5% λανθάνιο (EWLa-1.5) ή με 2% λανθάνιο (EWLa-2). Η δεύτερη υποκατηγορία θεωρείται ανώτερης ποιότητας, καθότι βρίσκει εφαρμογή για περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, όπως για παράδειγμα στην αεροναυπηγική βιομηχανία. Επιπροσθέτως, δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων θορίου. Η ενδιαφερόμενη κατηγορία καθίσταται κατάλληλη για συγκολλήσεις ανθρακούχων και ανοξείδωτων χαλύβων καθώς και κραμάτων νικελίου, τιτανίου και αλουμινίου. Λειτουργούν εξίσου αποδοτικά, είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα ή με συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας, έχοντας όμως πρώτα υποστεί τις κατάλληλες διαδικασίες επεξεργασίας του άκρου του ηλεκτροδίου. Πιο συγκεκριμένα, η επιθυμητή αιχμηρή απόληξη του ηλεκτροδίου και η ιδιότητα της να διατηρείται ανέπαφη σε υψηλές θερμοκρασίες, κατατάσσουν την παρούσα κατηγορία ως μια ενδεδειγμένη λύση για συγκολλήσεις κοινών και ανοξείδωτων χαλύβων. Η τυπική χημική σύσταση των ηλεκτροδίων αποτελείται από 97.3% ή 97.8% βολφράμιο με εμπεριεχόμενο ποσοστό λανθανίου 1.30%-1.70% και 1.8%-2.2% αντίστοιχα.
- **Ηλεκτρόδια EWG:** Η συγκεκριμένη κατηγορία ηλεκτροδίων είναι γνωστή και υπό την ονομασία 'ηλεκτρόδια σπάνιων γαιών'. Η χημική τους σύσταση αποτελείται από ένα συνδυασμό κραματικών στοιχείων όπως το λανθάνιο, το δημήτριο και το ύτριο. Κατά γενική ομολογία, εξασφαλίζουν εξαιρετική σταθερότητα τόξου τόσο για διαδικασίες συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής τους καθίσταται σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των κραματομένων με θόριο ηλεκτροδίων. Αποτελούν πρώτιστη επιλογή για περιπτώσεις υψηλής διάρκειας συγκολλήσεων.

1.2.3.4 Αέρια Προστασίας μεθόδου GTAW.[19],[22],[25],[27]

Μια καίρια παράμετρος, η οποία επηρεάζει ποικιλοτρόπως την συγκολλητική διαδικασία GTAW, συνιστά η επιλογή του αδρανούς αερίου προστασίας. Η χρήση αερίου προστασίας καθίσταται κρίσιμη, υπό την έννοια ότι αποτελεί τροχοπέδη στην μόλυνση της λίμνης συγκολλήσεως, ανατροφοδοτώντας συνεχώς τον περιβάλλοντα αέρα με αδρανές αέριο. Η ύπαρξη ακαθαρσιών στο τηγμένο λουτρό, έχει ως άμεση απόρροια την εμφάνιση πόρων και ρωγματώσεων καθώς και πιθανή τροποποίηση της χημικής σύστασης του τηκόμενου υλικού. Παράλληλα, επιτελεί σημαντικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας και ηλεκτρικού φορτίου, δια μέσω του τόξου, συμβάλλοντας έτσι θετικά επί της σταθερότητας του. Σε γενικότερες γραμμές, αέρια με χαμηλό δυναμικό ιονισμού διευκολύνουν την έναυση του ηλεκτρικού τόξου, ενώ αντίστοιχα αέρια με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιβοηθούν την σταθερότητα του.

Τα κυριότερα αδρανή αέρια, που βρίσκουν εφαρμογή επί της μεθόδου GTAW είναι το αργό (Ar), το ήλιο (He) και συνδυασμός των δυο. Η επιλογή του αδρανούς αερίου συνδέεται άρρηκτα με την συμπεριφορά του τόξου και την μεταλλουργική ποιότητα της συγκόλλησης. Πρωτεύων παράγοντας αποτελεί, επιπλέον, η πυκνότητα του αερίου. Το αργό, όντας κατά πολύ βαρύτερο του ηλίου, έχει την ιδιότητα να επικάθεται πάνω από την περιοχή συγκόλλησης, εν αντιθέσει με το ήλιο, το οποίο τείνει να ανυψωθεί από την εγκλειόμενη περιοχή του τόξου. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο να γίνει λεπτομερής αναφορά στα προαναφερθέντα αδρανή αέρια.

Πίνακας 7.Χαρακτηριστικά αερίων προστασίας, ASM Handbook, Lyttle 2003

Αέριο	Χημικό σύμβολο	Μοριακό βάρος (gr/mol)	Πυκνότητα (gr/L)	Δυναμικό Ιονισμού (eV)
Αργό	Ar	39.95	1.784	15.7
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	44.01	1.978	14.4
Ήλιο	He	4	0.178	24.5
Υδρογόνο	H ₂	2.016	0.090	13.5
Άζωτο	N ₂	28.01	1.25	14.5
Οξυγόνο	O ₂	32.00	1.43	13.2

Το αργό, όπως σημειώνεται και στον ανωτέρω πίνακα, έχει δυναμικό ιονισμού 15.7 eV. Ως δυναμικό ιονισμού ορίζεται η κρίσιμη τιμή τάσης, που απαιτείται, για να ελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο του αερίου, μετατρέποντας το, κατά αυτό τον τρόπο σε φορτισμένο άτομο. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που το χαρακτηρίζει, υφίσταται υψηλή συγκέντρωση ενέργειας στο ηλεκτρικό τόξο, γεγονός που ευνοεί την κατανομή της ενέργειας σε μικρότερη περιοχή. Η απαιτούμενη τάση τόξου για σταθερό μήκος τόξου είναι μικρότερη για το αργό συγκριτικά με το ήλιο. Η θετική επίδραση του αργού διαφαίνεται στην σταθερότητα, που προσδίδει στο τόξο και στην καθαριστική συμπεριφορά, που παρουσιάζει, για ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος εντάσεων ρεύματος. Ακολούθως, χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικό ρυθμό παροχής, παράγοντας που μετράται σε κυβικά πόδια ανά ώρα (CFH) και διαφοροποιείται αναλόγως με την εκάστοτε εφαρμογή. Σημαντικό προτέρημα έναντι του He, επίσης, συνιστά και το κόστος, το οποίο είναι σημαντικά χαμηλότερο. Το αργό εφαρμόζεται σε περιπτώσεις συγκολλήσεων ανθρακούχων, ανοξειδωτων χαλύβων και κραμάτων αλουμινίου μικρού πάχους.

Για την περίπτωση ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων, είναι προτιμητέα η χρήση μίγματος αργού με εμπεριεχόμενο ποσοστό υδρογόνου έως 5%. Η ύπαρξη υδρογόνου αυξάνει την τάση του τόξου και την παραγόμενη θερμότητα, οδηγώντας σε βελτιωμένη διείδυση και εμφάνιση της ραφής συγκολλήσεως. Μείγμα Ar/H₂ δύναται να χρησιμοποιηθεί και για συγκολλήσεις κραμάτων χαλκού και νικελίου.

Αντιθέτως, το ήλιο καταγράφει δυναμικό ιονισμού 24.5 eV παρουσιάζοντας, όμως, εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα. Η κατανομή της ενέργειας του ηλεκτρικού τόξου εκτείνεται για περιοχή μεγαλύτερης επιφάνειας, σε σχέση με το αργό. Εμμέσως έχει ως αποτέλεσμα και συγκολλήσεις υψηλότερης διείδυσης. Η χρησιμοποίηση ηλίου ή μίγματος ηλίου-αργού είναι επιθυμητή για συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων και για απαιτήσεις υψηλής ταχύτητας συγκολλήσεως. Για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου και χαλκού, όπου απαιτείται υψηλή διείδυση, γίνεται συνήθως χρήση 2% θοριομένων ηλεκτροδίων υπό προστασία ηλίου και με ρεύμα ορθής πολικότητας. Οι τυχούσες διαφοροποιήσεις, βέβαια, του μήκους τόξου με αέριο προστασίας το ήλιο, επηρεάζουν σημαντικά την τάση του τόξου και συνεπώς την συνολική πίεση υπό το τόξο. Επομένως, όσον αφορά εφαρμογές συγκολλήσεως με το χέρι, η προστασία ηλίου δεν αποτελεί ουσιαστική λύση. Επιπροσθέτως, υφίσταται σημαντική δυσκολία στην δημιουργία τόξου για ατμόσφαιρα ηλίου και χαμηλές τιμές εντάσεως του ρεύματος ($\leq 150A$). Ο ρυθμός παροχής του ηλίου κυμαίνεται σε επίπεδα διπλάσια ή τριπλάσια από τον αντίστοιχο του αργού, γεγονός που δικαιολογείται από το μικρό βάρος του. Συνεπώς, το κόστος προστασίας με ήλιο ανέρχεται σημαντικά.

Πίνακας 8. Επίδραση αερίων προστασίας στα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. (Miller Electric 2008)

Χαρακτηριστικά	Αργό (Ar)	Ήλιο (He)	Μείγματα Ar/He
Ταχύτητα Συγκόλλησης	Μειωμένες Ταχύτητες	Υψηλότερες Ταχύτητες	Βελτιωμένες Ταχύτητες από 100% Ar
Διείσδυση	Χαμηλότερη Διείσδυση	Υψηλότερη Διείσδυση	Βελτιωμένη Διείσδυση από 100% Ar
Καθαρισμός	Καλή καθαριστική δράση	Μειωμένη καθαριστική δράση	Καθαριστική ιδιότητα πλησιέστερη στο Ar
Έναυση Τόξου	Εύκολη	Δύσκολη	Βελτιωμένη συγκριτικά με 100% He
Σταθερότητα Τόξου	Καλή	Κακή σε χαμηλές εντάσεις	Βελτιωμένη συγκριτικά με 100% He
Κώνος Τόξου	Εστιασμένος	Ασταθής	Περισσότερο εστιασμένος συγκριτικά με He
Τάση Τόξου	Χαμηλότερες Τάσεις	Υψηλότερες Τάσεις	Τάσεις μεταξύ 100% Ar και He
Ρυθμός Παροχής	Χαμηλός Ρυθμός (10-30 CFH)	Υψηλός Ρυθμός	Υψηλότερος συγκριτικά με Ar
Κόστος	Χαμηλό κόστος	Υψηλότερο κόστος από Ar	Υψηλότερο κόστος από Ar

Εναλλακτική πρόταση προστασίας αποτελεί και η εναλλασσόμενη παροχή των αδρανών αερίων Ar και He. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επηρεάζει κάθε πτυχή της συγκολλητικής διαδικασίας. Κύριο μηχανισμό επίδρασης στην λίμνη συγκολλήσεως συνιστά η δυναμική κίνηση της εναλλαγής των αερίων. Εμβαθύνοντας στο ζήτημα λόγω χαρακτηριστικών ιονισμού, το αργό παράγει υψηλότερες πιέσεις τόξου από το ήλιο, διανύοντας το μήκος τόξου. Οι διαφοροποιήσεις της πίεσεως, οδηγούν με τη σειρά τους σε αλλαγές της κίνησης του τηγμένου λουτρού. Ακολούθως, λεπτομερής μελέτη του ηλεκτρικού τόξου αναδεικνύει το γεγονός ότι το υψηλότερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας με πλάσμα αργού, παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση ενέργειας στον πυρήνα του τόξου, εν αντιθέσει με την περίπτωση πλάσματος ηλίου, όπου και παρατηρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη ενέργεια σε όλη την έκταση της δέσμης του τόξου. Ως αποτέλεσμα, κατά την διάρκεια επίδρασης του αργού η θερμοκρασία και η ρευστότητα της λίμνης συγκολλήσεως βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Οι αντίστοιχες παράμετροι κατά την εναλλαγή σε ήλιο αυξάνονται, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τους μηχανισμούς σχηματισμού της. Σε γενικές γραμμές, κάθε κύκλος εναλλαγής αερίου δημιουργεί σπασμωδικές-κρουστικές ωθήσεις πίεσεως, οι οποίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς κίνησης της λίμνης κατά τρόπο όμοιο με τις παλμικές λειτουργίες μιας πηγής ισχύος. Κάθε αέριο συνοδεύεται από ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα ροής, το άθροισμα των οποίων προσδίδει μια συνολική δυναμική δράση στην λίμνη.

Η τεχνική εναλλαγής των αερίων Ar/He ως μεθόδου προστασίας επί της GTAW διαδικασίας παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη σύμφωνα με τον Young H. Chang [2006]. Αρχικά, η εναλλασσόμενη παροχή βοηθά στην αποτροπή σχηματισμού φυσαλίδων υδρογόνου στην συγκόλληση (κυρίως αλουμινίου). Κατά τη διάρκεια στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης, το υδρογόνο έχει την τάση να σχηματίζει φυσαλίδες, οι οποίες εγκλωβίζονται υπό την μορφή πόρων και ενσωματώνονται στην δομή του. Η δυναμική κίνηση της λίμνης συγκολλήσεως συνδράμει στην απελευθέρωση ενός ποσοστού των φυσαλίδων, μειώνοντας συνεπώς και την έκταση του σφάλματος των πόρων. Εν συνεχεία, η εναλλαγή αερίων Ar/He συντελεί στην δημιουργία, μεγάλης

διδυόμενες και πλάτους, ραφών συγκολλήσεως, γεγονός εύλογο δεδομένων των χαρακτηριστικών έκαστου του αερίου (Ar → εγκάρσια τομή nipple type, He → υψηλή & φαρδιά διείσδυση). Τελικώς, λαμβάνουν χώρα συγκολλήσεις χαμηλών εγκαρσίων και διαμήκων παραμορφώσεων, εν αντιθέσει με τις περιπτώσεις όπου το κάθε αέριο επιδρά μεμονωμένα, διότι η εναλλαγή δεν επιτρέπει στο εκάστοτε αέριο να επιδράσει αρνητικά επί της συγκολλητικής ραφής. Αναφορικά: η προστασία αργού προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις λόγω υψηλών απαιτήσεων θερμότητας και αργών ταχυτήτων, ενώ η προστασία Ar + He (1:2) λόγω τόξου υψηλής ενεργείας με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

1.2.3.5 Τυπικά σφάλματα GTAW.[19],[27]

Η μέθοδος GTAW χρησιμοποιείται ευρέως επειδή παρέχει συγκολλήσεις καλής ποιότητας και υψηλής ακρίβειας. Όπως κάθε συγκολλητική διαδικασία όμως, αρκετά συχνά παρουσιάζει προβλήματα, η επίλυση των οποίων εξασφαλίζει τις απαραίτητες προδιαγραφές συγκόλλησης.

Η υπερβολική κατανάλωση κι αλλοίωση του ηλεκτροδίου βολφραμίου συνιστά ένα εκ των κυριότερων προβλημάτων. Το σφάλμα αυτό λαμβάνει χώρα όταν η ροή του αερίου προστασίας είναι ανεπαρκής ή όταν το αέριο περιέχει προσμίξεις O₂, CO₂. Ακολούθως, η χρήση συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας δεν συνιστάται, καθώς αποτελεί αιτία της υπέρμετρης κατανάλωσης του ηλεκτροδίου. Έτερες παράμετροι, που επιδρούν επί του παρόντος σφάλματος, είναι η επιλογή λανθασμένου μεγέθους ηλεκτροδίου και η οξείδωση του βολφραμίου κατά την απόψυξη του μετάλλου. Η κάθε παράμετρος αντιμετωπίζεται και με διαφορετικό τρόπο. Επομένως, για την αποφυγή σφάλματος χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας, επιλέγεται το σωστό μέγεθος ηλεκτροδίου βάσει της τρέχουσας τιμής εντάσεως του ρεύματος και ενδείκνυται αύξηση της παροχής του αερίου προστασίας. Τυπικές τιμές παροχής ορίζονται σε επίπεδα των 15-20 CFH. Τέλος, συνιστάται η διατήρηση της παροχής (χωρίς ανεπιθύμητες προσμίξεις) αερίου προστασίας, για χρονικό διάστημα 10-15 δευτερολέπτων, έπειτα από το σβήσιμο του τόξου.

Εν συνεχεία, τυπικό πρόβλημα αποτελεί η 'μόλυνση' του ηλεκτροδίου, η οποία δύναται να επέλθει είτε με μεταφορά σωματιδίων βολφραμίου στη λίμνη συγκόλλησης ή με επαφή του ηλεκτροδίου στη λίμνη συγκόλλησης. Η παρουσία σφαλμάτων μπορεί να αποφευχθεί με χρήση χαμηλότερων τιμών έντασης ρεύματος και επιλογή ηλεκτροδίων δημητρίου, θορίου και λανθανίου μεγαλύτερης διαμέτρου.

Σημαντικό πρόβλημα των συγκολλήσεων GTAW αποτελεί η δημιουργία πόρων στο μέταλλο συγκόλλησης. Οι πόροι εμφανίζονται με τη μορφή παγιδευμένων αερίων ακαθαρσιών (υδρογόνο, άζωτο κλπ.). Οι βασικοί λόγοι για την παγίδευση αερίων, όπως έχει προαναφερθεί, έχουν σχέση με τη διαδικασία συγκόλλησης και μερικές φορές με την ίδια τη χημική σύσταση του μετάλλου. Είναι συχνό φαινόμενο, χαλαρές συνδέσεις μιας συγκολλητικής διάταξης TIG να ελαττώνουν την αδρανοποίηση της ατμόσφαιρας, επιτρέποντας να παρεισφρήσουν ανεπιθύμητες ουσίες μέσα στη λίμνη συγκόλλησης. Για την αποφυγή, λοιπόν, εμφάνισης πόρων συνιστάται ο προσεκτικός καθαρισμός του μετάλλου βάσης από ακαθαρσίες (βαφές, σκόνη, λάδια) και η χρήση αδρανούς αερίου επί της ραφής για μερικά λεπτά, πριν την έναρξη της συγκόλλησης. Επίσης, κρίνεται αναγκαίος, ο τακτικός έλεγχος των συνδέσεων και των σωληνώσεων της μηχανικής διάταξης για την αποφυγή ενδεχόμενων διαρροών.

Ένα σύνθημα πρόβλημα, κατά την διεκπεραίωση διαδικασιών TIG, τόσο με χρήση συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος, συνιστά η αποσταθεροποίηση

του ηλεκτρικού τόξου. Οι λόγοι δημιουργίας του παρόντος προβλήματος είναι ποικίλοι. Οφείλεται στην ύπαρξη στρώματος ακαθαρσιών στο μέταλλο βάσης και σε επιφάνειες αυξημένης τραχύτητας. Επιπροσθέτως, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο βαθμός καθαρότητας του ηλεκτροδίου. Εάν στο ηλεκτρόδιο έχουν απορροφηθεί ξένα σωματίδια τότε το τόξο παρεκκλίνει και η πορεία του καθίσταται ακανόνιστη. Επιπλέον, το λανθασμένο μήκος τόξου επηρεάζει άμεσα την σταθερότητα του τόξου. Προφανώς, οι λύσεις που ενδείκνυνται για την αντιμετώπιση του προβλήματος συσχετίζονται άμεσα με τις αιτίες που το προκαλούν. Το μέταλλο βάσης θα πρέπει να καθαρίζεται και να λειαίνεται πρότερα της συγκόλλησης. Επίσης, σε περίπτωση 'μόλυνσης' του ηλεκτροδίου, πρέπει να αφαιρείται προσεκτικά ένα τμήμα του (1/2 in) και να ακολουθούν διαδικασίες αναπροσανατολισμού ως προς τη ραφή συγκόλλησης. Σε περίπτωση όπου το πρόβλημα οφείλεται σε λανθασμένο μήκος τόξου, ενδείκνυται η προσαρμογή του άκρου του ηλεκτροδίου σε απόσταση, που θα κυμαίνεται μεταξύ 1/8 in και 1/4 in, από το μέταλλο βάσης.

1.2.3.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της μεθόδου GTAW.[19],[27]

Η διαδικασία GTAW θεωρείται ιδανική για συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων λόγω της περιορισμένης προσδιδόμενης θερμότητας. Ο ρυθμός εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης είναι ανεξάρτητος σε μεγάλο βαθμό από το ρεύμα συγκόλλησης επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο, διακυμάνσεις στο ποσοστό τήξης του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης. Ο έλεγχος της θερμότητας που προσδίδεται στη συγκόλληση, συνεπώς πραγματοποιείται χωρίς τροποποιήσεις του μεγέθους της συγκόλλησης. Η μέθοδος GTAW μπορεί, επιπλέον, να χρησιμοποιηθεί για μετωπικές συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων χωρίς την ύπαρξη μετάλλου προσθήκης (αυτογενής συγκόλληση). Με αφορμή το γεγονός, ότι αποτελεί μια πολύ καθαρή συγκολλητική διαδικασία, η μέθοδος TIG χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις δραστικών μετάλλων, όπως το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το αλουμίνιο και το μαγνήσιο. Η μέθοδος δεν απαιτεί συλλίπασμα, επομένως δεν υφίστανται διαδικασίες αφαίρεσης σκουριάς και συνάμα το σφάλμα εγκλεισμάτων σκουριάς, έπειτα από πολλαπλά περάσματα, δεν αποτελεί πρόβλημα. Επίσης, στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν υφίσταται μεταφορά τηκόμενων σταγονιδίων μετάλλου δια μέσω του τόξου, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται εκτοξεύσεις μετάλλου, γεγονός ιδιαίτερα ευεργετικό για τα συμβαλλόμενα μέρη και την συγκόλληση. Το ηλεκτρικό τόξο της διαδικασίας GTAW εμφανίζει υψηλό βαθμό συγκέντρωσης ενέργειας, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερης έκτασης ΘΕΖ και σε χαμηλότερα ποσοστά παραμορφώσεων. Πέραν των μηδαμινών εκτοξεύσεων, η μέθοδος χαρακτηρίζεται και από πολύ χαμηλά ποσοστά καπνού και αναθυμιάσεων συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Ωστόσο, το βασικό μέταλλο δύναται να περιέχει στοιχεία όπως μόλυβδος και ψευδάργυρος, τα οποία έχουν την τάση να παράγουν αναθυμιάσεις. Για αυτό το λόγο, ο συγκολλητής πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση από τη ραφή συγκόλλησης και παράλληλα να εξασφαλίζεται ο επαρκής εξαερισμός του χώρου. Τέλος, η χρήση αδρανούς αερίου προστασίας συνιστά σημαντικό προσόν καθώς αέρια όπως το αργό και το ήλιο δεν αντιδρούν και δεν ενώνονται με έτερα αέρια. Είναι απολύτως διαφανή παρέχοντας στον συγκολλητή την μέγιστη ορατότητα του τόξου.

Η μέθοδος GTAW παρουσιάζει, βέβαια, και ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Ο ρυθμός εναπόθεσης του μετάλλου συγκόλλησης είναι αρκετά χαμηλός. Οι υψηλές τιμές εντάσεως του ρεύματος μπορεί να προκαλέσουν τήξη του ηλεκτροδίου και να οδηγήσουν στη δημιουργία ψαθυρών εγκλεισμάτων βολφραμίου στο τηγμένο λουτρό. Με χρήση προθερμασμένων μετάλλων προσθήκης, ο ρυθμός εναπόθεσης μπορεί να

βελτιωθεί. Στην διαδικασία GTAW μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ζεστό μέταλλο προσθήκης, το οποίο τροφοδοτείται μέσα και σε επαφή με τη λίκνη συγκόλλησης έτσι ώστε να παραχθεί ωμική θερμότητα μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει (Hot-wire GTAW).

1.2.4 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (GMAW).

1.2.4.1 Γενικά Χαρακτηριστικά της μεθόδου.[28],[30],[31],[32],[36]

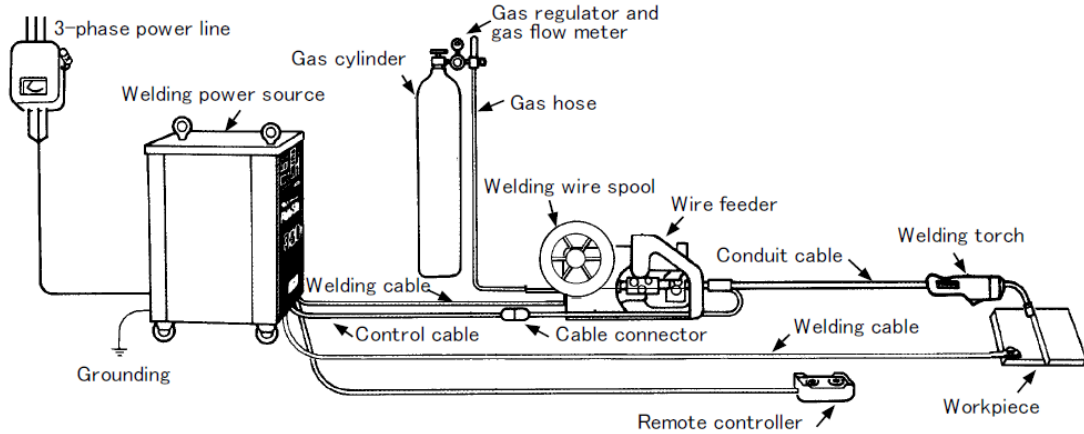
Η συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου βασίζεται στην δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ενός αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου, το οποίο παρέχεται αδιάκοπα στη λίκνη συγκόλλησης, και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Η προσδιδόμενη, εκ του τόξου θερμότητα συνδράμει στη συνένωση των μετάλλων. Η προστασία του τόξου και της λίκνης συγκολλήσεως υλοποιείται με τη βοήθεια αδρανούς αερίου, όπως το αργό ή το ήλιο, γεγονός που αιτιολογεί την έτερη διεθνή ονομασία της διαδικασίας, γνωστή και ως MIG (Metal Inert Gas). Ωστόσο, τη σήμερον ημέρα, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή και μη αδρανή αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) καθώς και μείγματα αδρανών και μη αδρανών αερίων. Επομένως, η ονομασία GMAW καθίσταται καταλληλότερη για τον γενικό προσδιορισμό της μεθόδου. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο συγκόλλησης, όσον αφορά το αλουμίνιο και τα επιμέρους κράματα του. Χρησιμοποιείται, επίσης, για μεγάλο εύρος υλικών όπως ανθρακούχοι & ανοξείδωτοι χάλυβες, μαγνήσιο, χαλκός, νικέλιο, πυρίτιο και σωληνοειδή επιφανειακά κράματα μεταλλικού πυρήνα. Εν αντιθέσει με την gtaw μέθοδο, η χρήση συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας DCEP συνιστάται για την παρούσα μέθοδο, καθώς συνεισφέρει στην σταθερότητα του τόξου, στην ομαλή μεταφορά μετάλλου με χαμηλό ποσοστό εκτοξεύσεων και ικανοποιητική διείδυση. Με τη χρήση συνεχούς ρεύματος ορθής πολικότητας, DCEN, και εναλλασσόμενου ρεύματος η μεταφορά των τηκόμενων σωματιδίων είναι ακανόνιστη και ασταθής. Σε γενικά πλαίσια, δίνεται ξεχωριστή μνεία στη συγκεκριμένη μέθοδο καθώς αποτελεί την μέθοδο, που υλοποιείται (GMAW & FCAW) από την αυτοματοποιημένη διάταξη του εργαστηρίου της Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Η διαδικασία GMAW χρησιμοποιείται σε ποικίλες βιομηχανικές εφαρμογές. Όπως προαναφέρθηκε, δύναται να συγκολλήσει μεγάλο εύρος μεταλλικών υλικών με πάχος που κυμαίνεται από 1-30mm ή και υψηλότερα και για όλες τις συγκολλητικές θέσεις. Αποτελεί μια οικονομική διαδικασία, καθώς προσφέρει υψηλή ταχύτητα και ρυθμό εναπόθεσης τηκόμενου υλικού συγκριτικά με άλλες μεθόδους (πχ η SMAW). Επιπλέον, δεν απαιτεί συχνές διακοπές της διαδικασίας για αλλαγή ηλεκτροδίων. Επιπροσθέτως, συνοδεύεται με ελαχιστοποίηση μετά-συγκολλητικών ενεργειών όπως ο καθαρισμός της επιφανείας συγκόλλησης λόγω μηδαμινού ποσοστού στρωμάτων σκουριάς. Καθιστά τη μέθοδο εύχρηστη και απλοποιημένη για τον συγκολλητή διότι η παροχή του ηλεκτροδίου και η διατήρηση του μήκους τόξου λαμβάνει χώρα με τρόπο αυτοματοποιημένο. Τα σημειωτέα πλεονεκτήματα προσδίδουν υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας της διαδικασίας GMAW σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές συγκολλήσεων.

Μια τυπική διάταξη GMAW συνίσταται από επιμέρους εξαρτήματα, σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα. Τα κυριότερα εξ' αυτών είναι:

- η μηχανή συγκόλλησης.
- το τηλεχειριστήριο.

- η τροφοδοσία ηλεκτροδίου.
- το πιστόλι συγκόλλησης.
- η παροχή αερίου προστασίας και η ρυθμιστική βαλβίδα.
- το ηλεκτρόδιο.
- το ψυκτικό σύστημα του πυρσού συγκόλλησης.



Σχήμα 17.Τυπική διάταξη GMAW, (DAIHEN Corp.)

a. Μηχανές Συγκόλλησης.

Όπως σε κάθε συγκολλητική διαδικασία έτσι και στη GMAW, η κατασκευή των πηγών ισχύος γίνεται με γνώμονα την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού τόξου. Οι κυριότερες κατηγορίες μηχανών συγκόλλησης είναι οι εξής:

- α. Σταθερής τάσεως.
- β. Σταθερού ρεύματος.

Η τελευταία κατηγορία περιορίζεται σε εφαρμογές συγκολλήσεως ελασμάτων αλουμινίου. Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας αντίστοιχης μηχανής δίνεται ακόλουθα:

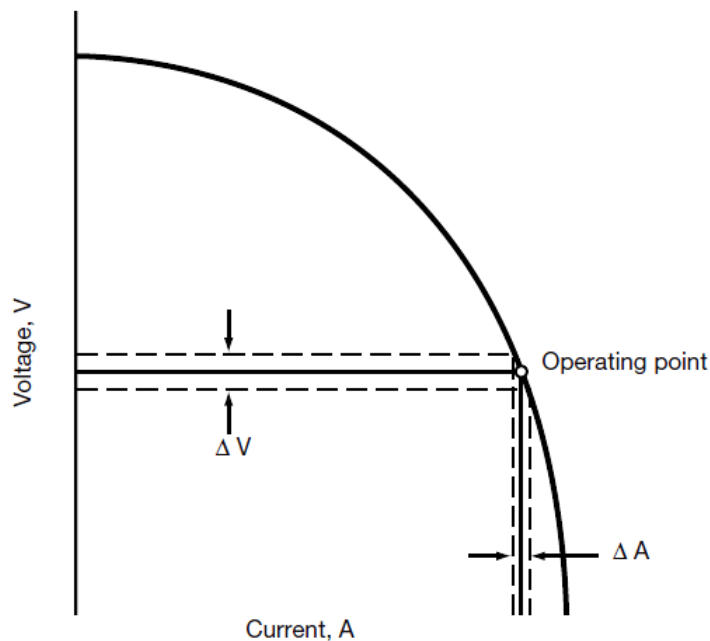


FIGURE 22: CC (Constant Current) Power Source Volt-Amp Characteristics

Σχήμα 18.Χαρακτηριστική καμπύλη μηχανής σταθερού ρεύματος (drooping), Lincoln Electric, 2006

Οι μηχανές σταθερής τάσεως αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση για διαδικασίες GMAW. Η λειτουργία τους βασίζεται στην επίτευξη μιας συγκεκριμένης τάσης τόξου για δεδομένη προκαθορισμένη ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου, η οποία με τη σειρά της δίνεται συναρτήσει της επιλεγόμενης τιμής εντάσεως ρεύματος. Ενδεχόμενη αύξηση του μήκους τόξου οδηγεί σε μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος, απόρροια που εξηγείται από το γεγονός ότι το τόξο λαμβάνει τον ρόλο κυκλώματος σειράς και το μήκος τόξου της αντίστασης στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη δίνεται ως εξής:

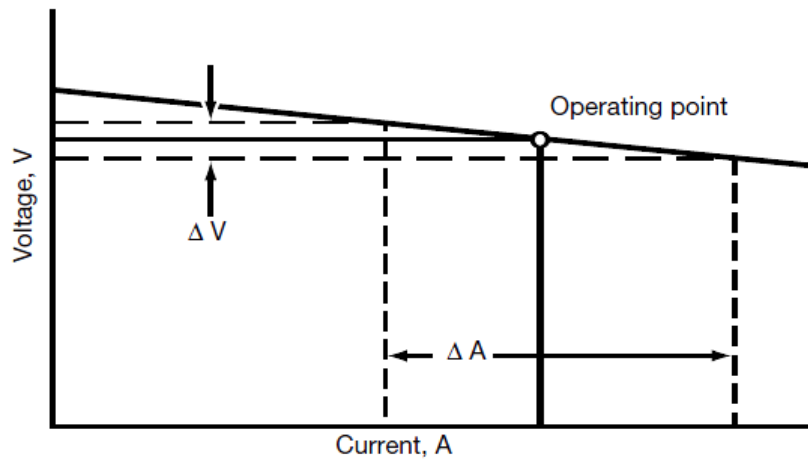
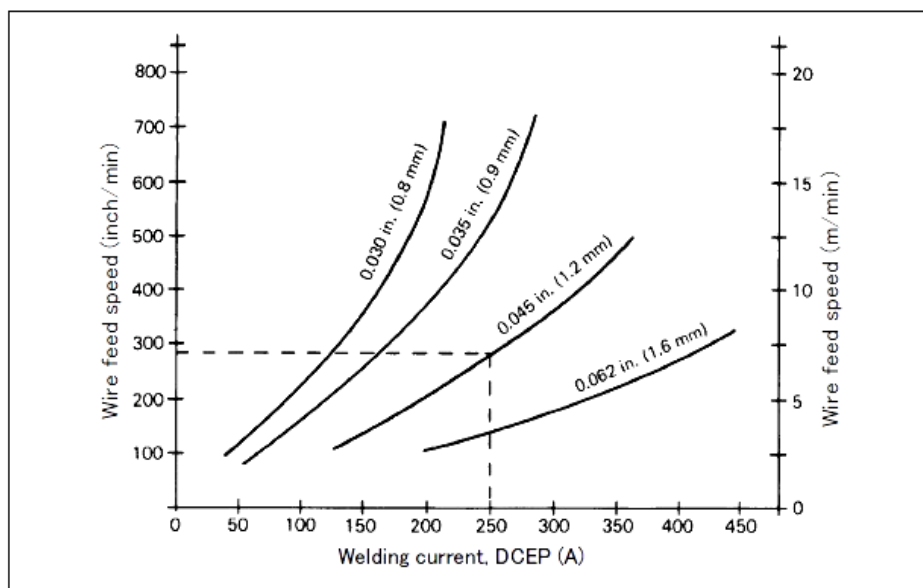


FIGURE 23: CV (Constant Voltage) Power Source Volt-Amp Characteristics

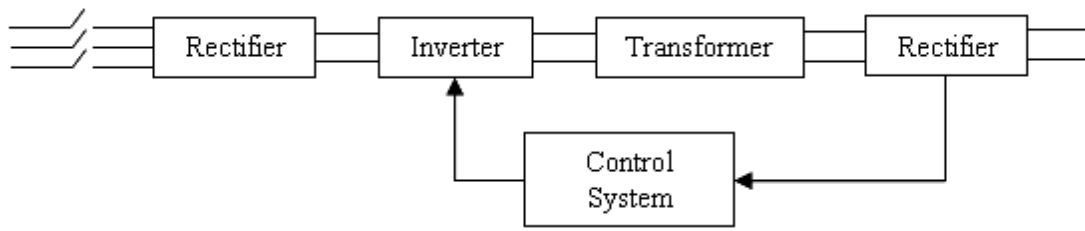
Σχήμα 19.Χαρακτηριστική καμπύλη μηχανής σταθερής τάσεως, Lincoln Electric, 2006

Η αλληλεξάρτηση του ρεύματος της συγκολλητικής διαδικασίας και του ρυθμού παροχής του ηλεκτροδίου εκφράζεται μη γραμμικά. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας παροχής του ηλεκτροδίου επηρεάζουν άμεσα την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το ακόλουθο σχήμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, επιμέρους συνιστώσες όπως το είδος και η διάμετρος του ηλεκτροδίου και η προστασία αερίου επηρεάζουν τη μορφή των καμπυλών του σχήματος 20.



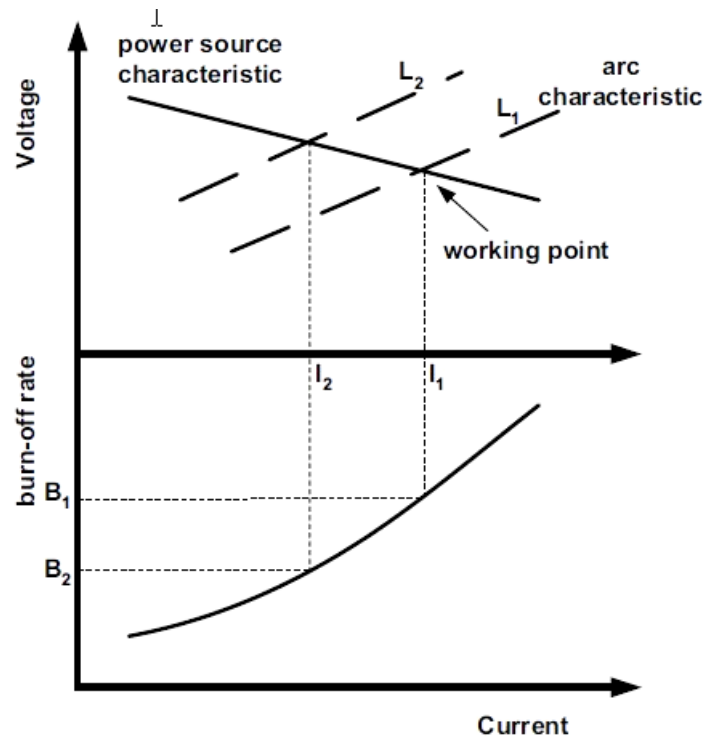
Σχήμα 20.Συσχέτιση ηλεκτρικού ρεύματος και ταχύτητας παροχής ηλεκτροδίου ανθρακούχου χάλυβα.[Kobe steel, 2011].

Όσον αφορά την λειτουργική αρχή των μηχανών συγκόλλησης αυτοματοποιημένων διαδικασιών GMAW, η γενικότερη αντιπροσωπευτική μορφή δομής τους βασίζεται στο εξής πρότυπο (υφίσταται παρουσία ανορθωτή, αναστροφέα και μετασχηματιστή):



Σχήμα 21.Σκαρίφημα της δομής λειτουργίας GMAW μηχανών με παρουσία αναστροφέα (inverter), [J Norberto Pires, 2005].

Οι μηχανές σταθερής τάσεως βρίσκουν και σε αυτή την περίπτωση ευρεία απήχηση. Η σταθεροποίηση της παραμέτρου της τάσεως του τόξου, σε συνδυασμό με σταθερή ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου, καθιστούν εφικτή την αυτόματη προσαρμογή του μήκους τόξου σε ενδεχόμενες διακυμάνσεις της απόστασης μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Η λειτουργική φιλοσοφία αυτής της κατηγορίας μηχανών εκφράζεται υπό το γεγονός ότι τυχούσες διαφοροποιήσεις του μήκους τόξου αντισταθμίζονται από αλλαγή της τιμής εντάσεως του ρεύματος και της αποθετικής συμπεριφοράς του προστιθέμενου μετάλλου. Επίσης, παρουσιάζεται διαγραμματικά η συσχέτιση των παραμέτρων του μήκους τόξου, του ρεύματος και της τάσεως τόξου καθώς και του ρυθμού εναπόθεσης του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 22.Συσχέτιση συγκολλητικών παραμέτρων μηχανής σταθερής τάσεως. [J Norberto Pires, 2005].

Παρατηρείται ότι, αύξηση του μήκους τόξου $L_2 > L_1$ οδηγεί σε αύξηση της τάσης που διαρρέει το κύκλωμα και σε παράλληλη μείωση του ρεύματος συγκόλλησης ($I_1 > I_2$). Κατ' αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζεται μείωση του ρυθμού εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης ($B_1 > B_2$).

Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα των συγκολλητικών μηχανών GMAW, έχουν να επιδείξουν την κατασκευή διατάξεων παλμικού ρεύματος 100-200 PRR (*pulsed repetition rates*) και μηχανών « synergic pulsed GMAW », οι οποίες ελέγχουν τον ρυθμό τήξης του ηλεκτροδίου μέσω μηχανισμών διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών του παλμού (μορφή & συχνότητα).

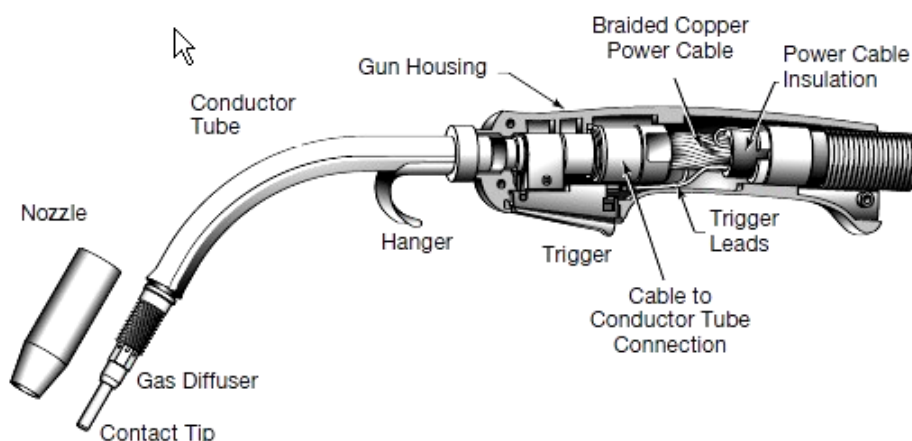
b. Πυρσός Συγκόλλησης.

Η επιλογή πιστολιού συγκόλλησης για διαδικασίες GMAW επιλέγεται βάσει των εξής παραγόντων:

- 1) Τύπος συγκολλητικής διάταξης που διακρίνεται σε ημι-αυτοματοποιημένη, υψηλά αυτοματοποιημένη και πλήρως αυτοματοποιημένη. (semi-automatic, hard automation & robotic automation).
- 2) Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος καθοριζόμενης εκ της εκάστοτε εφαρμογής.
- 3) Είδος προστατευτικού αερίου.
- 4) Κύκλος λειτουργίας του πυρσού.
- 5) Εκλογή αερόψυκτου ή υδρόψυκτου πυρσού συγκόλλησης.

Ο σωστός προσανατολισμός του ηλεκτροδίου και της ροής του αερίου προστασίας αναφορικά με το προς συγκόλληση δοκίμιο, αποτελεί την κυριότερη επιτελούμενη λειτουργία του πυρσού συγκόλλησης. Τα βασικότερα εξαρτήματα του συγκολλητικού πιστολιού είναι:

- Ο αγωγός σωλήνας (contact-conductor tube) βάσει του οποίου η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στο ηλεκτρόδιο καθίσταται δυνατή.
- Το ακροφύσιο (nozzle), το οποίο παρέχει το αέριο προστασίας στο λουτρό της συγκόλλησης.
- Τη λαβή (handle) που εσωκλείει τους σωλήνες ψύξης, τα καλώδια ρεύματος και σημάτων.



Εικόνα 1. Λεπτομερής απεικόνιση πυρσού συγκόλλησης. [Lincoln Electric, 2006]

Απαιτήσεις ρεύματος μικρής εντάσεως και χαμηλού κύκλου εργασιών (έως 60%), συνιστούν αερόψυκτους πυρσούς συγκόλλησης. Αντιθέτως, υψηλοί κύκλοι εργασιών και εντάσεις διαρρέοντος ρεύματος ικανοποιούνται με χρήση υδρόψυκτων πυρσών. Όσον αφορά διαδικασίες υψηλού βαθμού αυτοματοποίησης, η ψύξη του εκάστοτε πυρσού λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια ύδατος. Οι ρομποτικές διατάξεις ενισχύονται

με συστήματα έκτακτης διακοπής εργασιών, σε περίπτωση σύγκρουσης του πυρσού με το προς συγκόλληση τεμάχιο καθώς και συστήματα αυτόματου καθαρισμού.²

γ. Μονάδα Παροχής Ηλεκτροδίου.

Η μονάδα παροχής του ηλεκτροδίου οδηγεί το ηλεκτρόδιο, με τη βοήθεια ενός μηχανισμού ελέγχου και δια μέσω ενός αγωγού-σωλήνα στον πυρσό συγκόλλησης. Η περιγραφόμενη μονάδα συντελείται από ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, δυο ζεύγη τροχών υποβοηθούμενα από ένα σύστημα κοχλιών πίεσης και οδηγών σύρματος και ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Η χρησιμότητα του μηχανισμού έγκειται στο γεγονός της μετάδοσης της μηχανικής ενέργειας και της σωστής καθοδήγησης του ηλεκτροδίου.



Εικόνα 2. Μηχανισμός ελέγχου παροχής ηλεκτροδίου του ρομποτικού βραχίονα του Ε.Ν.Τ.

1.2.4.2 Μηχανισμοί Μεταφοράς Σταγονιδίων Μετάλλου.[30],[31],[32],[40],[41]

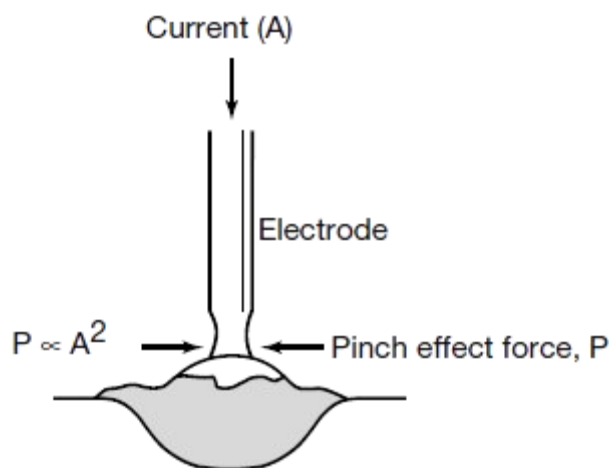
Ο τρόπος μεταφοράς του τηκόμενου μετάλλου από την άκρη του ηλεκτροδίου στη λίμνη συγκόλλησης, καθορίζει ποικιλοτρόπως την διαδικασία. Υφίστανται, τρεις τρόποι μεταφοράς τηγμένου μετάλλου· η μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση, η μεταφορά με σταγόνες και η μεταφορά μέσω σταγονιδίων. Οι τρεις προαναφερθέντες μηχανισμοί επηρεάζονται από παραμέτρους όπως η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, η τάση του τόξου και το είδος του αερίου προστασίας, υπό την προϋπόθεση ότι η σύσταση και το μέγεθος του ηλεκτροδίου καθώς και ο τύπος της πηγής ισχύος παραμένουν αμετάβλητα.

A. Μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση (Short Circuiting Transfer).

Η μεταφορά με βραχυκύκλωση, αλλιώς γνωστή και ως GMAW-S βασίζεται στη συνεχή εναπόθεση μετάλλου ηλεκτροδίου, μέσω επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων. Η έννοια της «βραχυκύκλωσης» ερμηνεύεται ως επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μετάλλου βάσης· επαφή που υφίσταται 90 με 200 φορές το δευτερόλεπτο. Συνιστά μια μέθοδο μεταφοράς χαμηλής θερμικής ισχύος με υψηλό

² Υφίσταται διάταξη πεπιεσμένου αέρα, που απομακρύνει τις εκτοξεύσεις μετάλλου από το ακροφύσιο και με τη βοήθεια συστήματος μεταφοράς ελαίου λιπάνσεως, περιορίζεται η πιθανότητα επανεμφάνισής τους. Δευτερεύουσα περιστροφική διάταξη καθαρίζει το εσωτερικό του ακροφυσίου.

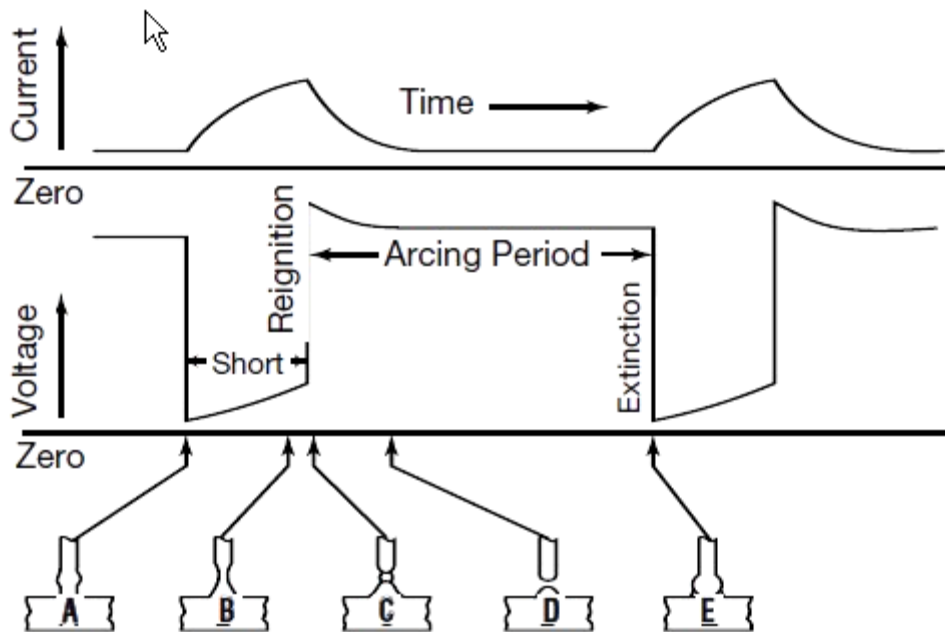
βαθμό προσαρμοστικότητας, όσον αφορά το πάχος και τη θέση της συγκόλλησης. Τα χαρακτηριστικά μεταφοράς, όπως ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου, τάση και ρυθμός εναπόθεσης κυμαίνονται σε μικρότερα επίπεδα από έτερες μεθόδους μεταφοράς. Η μεταφορά ενός τηκόμενου σταγονιδίου ηλεκτροδίου λαμβάνει χώρα κατά την φάση βραχυκύκλωσης ενός κύκλου μεταφοράς, όπου ακολούθως το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Εν συνεχεία, υφίσταται αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της μαγνητικής δύναμης στο άκρο του ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο εγκλείει το ηλεκτρόδιο παρέχει όλη την απαιτούμενη δύναμη για να συμπιέσει το τηκόμενο σταγονίδιο στο άκρο του ηλεκτροδίου (pinch effect).



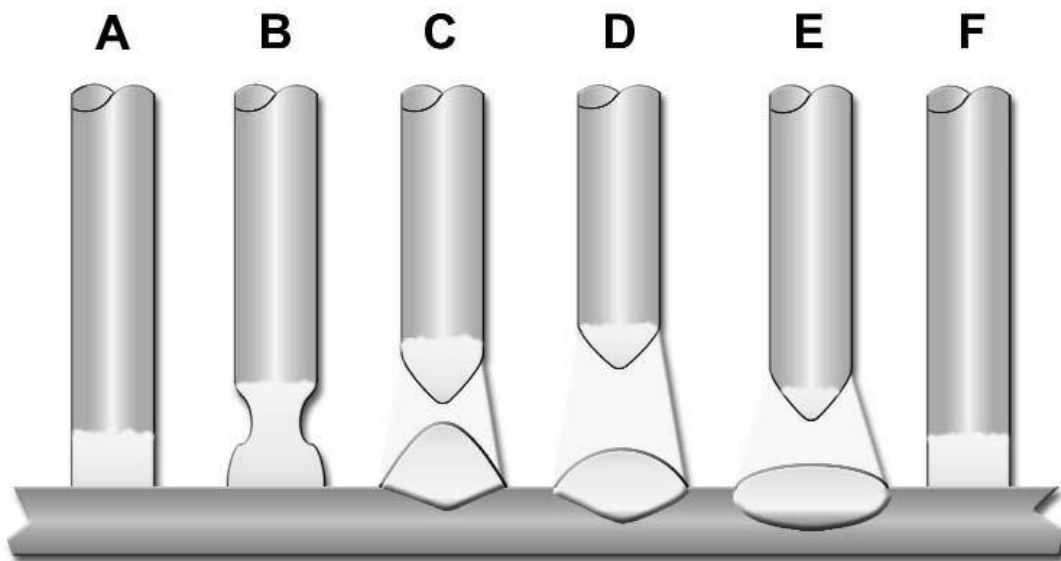
Σχήμα 23. Φαινόμενο συμπίεσης τηκόμενου σταγονιδίου κατά τη μεταφορά με βραχυκύκλωση (Pinch effect) [Lincoln Electric 2006]

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος μεταφοράς πραγματοποιείται σε πέντε στάδια, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 24.

- A.** Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Η τάση του τόξου τείνει να μηδενιστεί, ενώ η ένταση του τόξου ανέρχεται. Ο βαθμός αύξησης μέχρι το μέγιστο ρεύμα καθορίζεται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης αυτεπαγωγής.
- B.** Σε ακόλουθο στάδιο, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις επενεργούν ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Σαν άμεση συνέπεια, προκαλείται δημιουργία «λαιμού» στο ηλεκτρόδιο. Η τάση του τόξου παρουσιάζει ισχνή αύξηση, ενώ το ρεύμα συνεχίζει τη διαδρομή μέχρι τη μέγιστη τιμή του.
- C.** Σε αυτή τη φάση, η τηγμένη μεταλλική σταγόνα αποκολλάται από το άκρο του ηλεκτροδίου και το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Οι επιδρούσες δυνάμεις αντίδρασης αποτρέπουν την επανένωση της τηγμένης σταγόνας με το ηλεκτρόδιο.
- D.** Η υψηλή τάση που χαρακτηρίζει την παρούσα φάση, υποδεικνύει την ύπαρξη τόξου. Η ένταση που διαρρέει το κύκλωμα βρίσκεται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Κατά την περίοδο αυτή, λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός νέας σταγόνας 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 επηρεάζεται από το μέγεθος της αυτεπαγωγής και το αέριο προστασίας. Προσθήκη Ar αυξάνει τη συχνότητα βραχυκυκλωμάτων, ενώ παράλληλα μειώνει το μέγεθος των τηκόμενων σταγονιδίων.



Σχήμα 24. Ενδεικτική παρουσίαση σταδίων μεταφοράς μεταλλικών σταγονιδίων με τη μέθοδο βραχυκύκλωσης [Lincoln Electric 2006].



Σχήμα 25. Εναλλακτική παρουσίαση σταδίων μεταφοράς μεταλλικών σταγονιδίων με τη μέθοδο βραχυκύκλωσης [Miller 2012].

Η διαδικασία δύναται να καταστεί πιο κατανοητή με τη βοήθεια του σχήματος 25. Τα επιμέρους στάδια παρατίθενται ως εξής:

- A.** Σε πρώτη φάση (βραχυκύκλωση), γίνεται φυσική επαφή του ηλεκτροδίου και του μετάλλου βάσης. Δεν υφίσταται ηλεκτρικό τόξο.
- B.** Δευτερευόντως, παρουσιάζεται το φαινόμενο δημιουργίας «λαιμού» - pinch effect στο ηλεκτρόδιο.
- C.** Το τηγμένο ηλεκτρόδιο αποκόπτεται από το τηγμένο λουτρό, δημιουργώντας ηλεκτρικό τόξο. Τμήμα του τηγόμενου ηλεκτροδίου εναποτίθεται στο μέταλλο βάσης σχηματίζοντας κατ' επέκταση τη λίμνη συγκόλλησης.

D. Το μήκος τόξου και η αντίστοιχη τάση λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Η παραγόμενη εκ του τόξου θερμότητα οδηγεί σε μια πιο πεπλατυσμένης μορφής λίμνη συγκόλλησης.

E. Η ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου υπερνικά την επίδραση της θερμότητας του τόξου, με αποτέλεσμα το ηλεκτρόδιο να πλησιάζει ξανά το μέταλλο βάσης.

F. Ένας πλήρης κύκλος μεταφοράς με βραχυκύκλωση έρχεται εις πέρας.

Καίριες παράμετροι, οι οποίες συνδράμουν άμεσα στην ομαλή ολοκλήρωση μιας διαδικασίας με μεταφορά με βραχυκύκλωση είναι η διάμετρος του ηλεκτροδίου και η εφαρμοζόμενη προστασία αερίου. Έχει παρατηρηθεί, ότι η μέθοδος υποστηρίζει, σε πλήρη βαθμό, ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.6-1.1 mm υπό την προστασία 100% CO₂ ή και μειγμάτων 75%-80% Ar με 20%-25% CO₂. Υπό προϋποθέσεις, χρησιμοποιείται και τριμερής προστασία αερίου Ar + CO₂ + O₂.

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση.

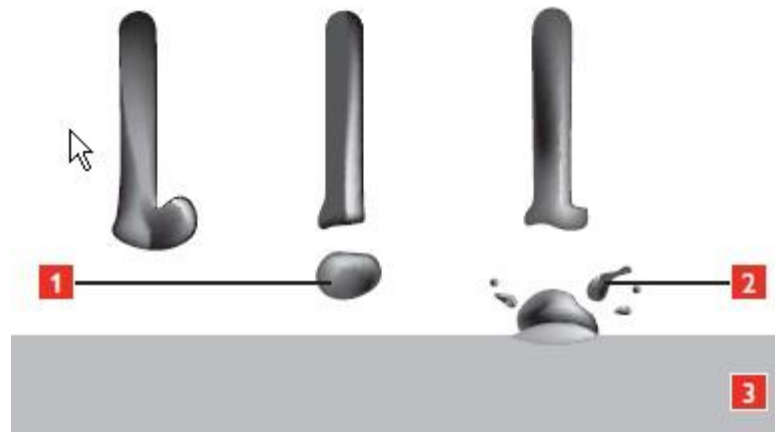
- Ευέλικτη μέθοδος, με δυνατότητα προσαρμοστικότητας σε ποικίλες θέσεις συγκόλλησης όπως επίπεδη, μετωπική, κατακόρυφη και οροφιαία.
- Καθίσταται ιδανική για συγκολλήσεις τεμαχίων χωρίς κατάλληλη προετοιμασία και για εναποθέσεις ρίζας σε εφαρμογές σωληνώσεων.
- Η μικρότερη προσδιδόμενη θερμική ισχύς της μεθόδου, έχει ως άμεση απόρροια χαμηλότερα ποσοστά παραμορφώσεων.
- Υψηλοί βαθμοί απόδοσης ηλεκτροδίου (έως 93%) .

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση.

- Περιορισμός σε εφαρμογές εύρους μικρού πάχους ελασμάτων και σε εναποθέσεις ρίζας παχέων ελασμάτων.
- Ανεπαρκής έλεγχος της συγκολλητικής διαδικασίας δύναται να οδηγήσει σε ατελή τήξη. Σφάλματα υπερκαλύψεων είθισται να συνοδεύουν σφάλματα ατελούς τήξης.
- Ανεπαρκής έλεγχος της συγκολλητικής διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό ποσοστό εκτοξεύσεων μετάλλου και συνεπώς σε αύξηση του κόστους καθαρισμού της συγκόλλησης.
- Για εξωτερικές εργασίες και λόγους απώλειας του αερίου προστασίας, κρίνεται απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα.

B. Μεταφορά με σταγόνες (Globular Transfer).

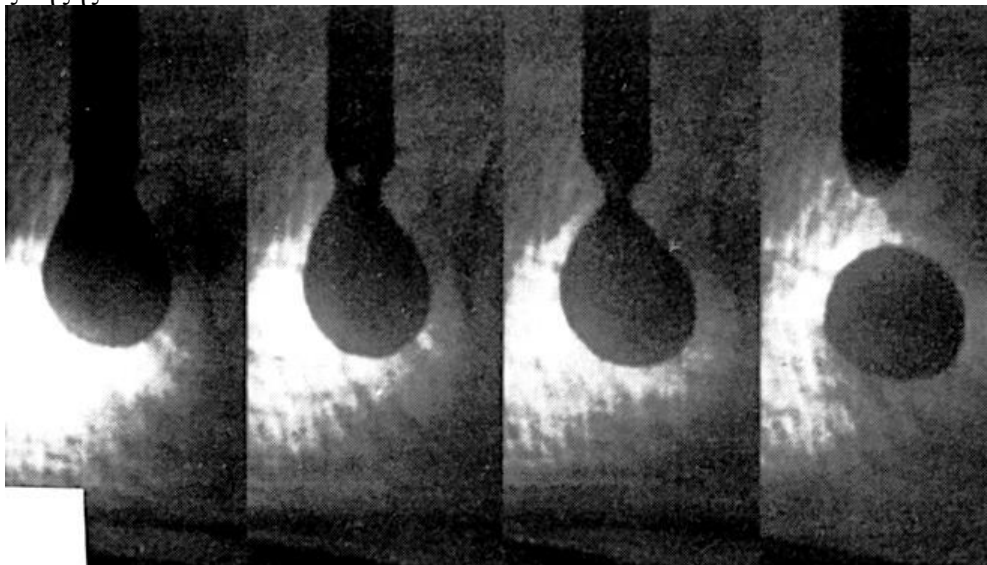
Η μέθοδος μεταφοράς μέσω σταγόνων συνίσταται από τη αδιάκοπη εναπόθεση ηλεκτροδίου στη λίμνη συγκόλλησης, υπό τη μορφή βαρυτικά υποβοηθούμενων σταγόνων. Μεμονωμένες μεταλλικές σταγόνες μεταφέρονται μέσω του τόξου από το ηλεκτρόδιο στη λίμνη συγκόλλησης. Σε γενικότερα πλαίσια, η μεταφορά με σταγόνες αναφέρεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των έτερων δυο μεθόδων μεταφοράς, όπου μεγάλες ανομοιόμορφες σταγόνες μετάλλου αποκόπτονται από την άκρη του ηλεκτροδίου και εισέρχονται στο τηγμένο λουτρό. Η διαδικασία αποκοπής των τηγμένων σταγόνων δεν ακολουθεί την αξονική διεύθυνση του ηλεκτροδίου. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην επίδραση των καθοδικών δυνάμεων αντίδρασης, οι οποίες φέρουν την υπαιτιότητα για την ανοδική περιστρεφόμενη κίνηση των τηγμένων σταγόνων μετάλλου. (Εικόνα 3)



Εικόνα 3.Στάδια μεταφοράς με σταγόνες, [1]σχηματισμός μεταλλικής σταγόνας [2]αποκόλληση από το άκρο του ηλεκτροδίου [3]εισροή σταγόνας στη λίμνη συγκόλλησης [IRPM 2007]

Το μέγεθος των σταγόνων είναι περίπου ίδιο με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου ή και μεγαλύτερο· συνήθως 2-4 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται η μέθοδος μεταφοράς με σταγόνες σε συγκόλληση χάλυβα με ένταση 180A ,τάση 29V και προστασία Ar-2%O₂. Η προστασία αερίου καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη ροή των σωματιδίων προς τη λίμνη συγκόλλησης. Υπό την προστασία CO₂, οι σταγόνες διασκορπίζονται ακανόνιστα. Υπό την προστασία Ar οι σταγόνες εμφανίζουν μειωμένο μέγεθος και τείνουν να μεταφερθούν κατά μια πιο αξονική διεύθυνση. Η μέθοδος μεταφοράς με σταγόνες δεν καθίσταται πάντα ομαλή, με άμεσο αποτέλεσμα η ύπαρξη εκτοξεύσεων μετάλλου να παρατηρείται σε σημαντικά επίπεδα. Οι εκτοξεύσεις προκαλούν παραγωγή καπνού, αν και το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από την μεταφορά των σταγόνων. Ο καπνός περιέχει βλαβερά στοιχεία, όπως Fe, Cr, Ni, Mn, γι' αυτό και κρίνεται επιτακτική η ανάγκη πρόβλεψης του βαθμού έκθεσης των συγκολλητών σε αυτά τα στοιχεία.

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 60' και του 70' η μεταφορά με σταγόνες βρήκε ευρεία απήχηση στην παραγωγή μεταλλικών ελασμάτων. Σε μεγάλες γραμμές παραγωγής, η χρήση μεταφοράς τηγμένου μετάλλου με σταγόνες έχει αντικατασταθεί από πιο σύγχρονες μορφές GMAW, όπως η GMAW-P. Η παλμική GMAW έχει ως αντίκτυπο χαμηλότερα επίπεδα καπνού, ελαχιστοποίηση εκτοξεύσεων κι σφαλμάτων ατελούς τήξης.



Εικόνα 4.Στιγμιότυπα,ανά 3ms, μεταφοράς με σταγόνες σε συγκόλληση GMAW χάλυβα με προστασία Ar-2%O₂ ,ρεύμα 180^A και τάση 29V. [Jones 2003]

Η μεταφορά με σταγόνες συναντάται σε ορθή πολικότητα και μικρές εντάσεις ρεύματος ανεξαρτήτως αερίου προστασίας. Ωστόσο, με CO₂ και He, παρατηρείται σε όλες τις εντάσεις ρεύματος. Όπως προαναφέρθηκε, σε συγκολλήσεις GMAW ανθρακούχων και μικροκραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιείται προστασία CO₂, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα επίπεδα εκτοξεύσεων.

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες.

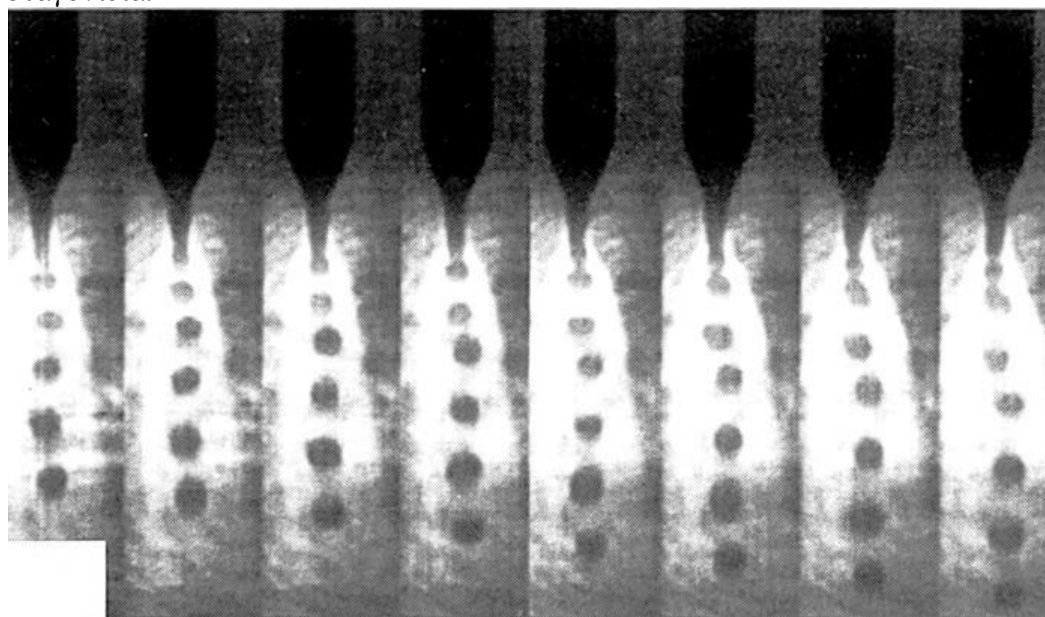
- Χρήση φθηνών αερίων προστασίας όπως CO₂ και μείγματος Ar/ CO₂.
- Πλήρης εναρμόνιση μεθόδου με συγκολλήσεις υψηλών ταχυτήτων.
- Χρήση φθηνών, συμπαγών ή μεταλλικού πυρήνα, ηλεκτροδίων.
- Φθηνός συγκολλητικός εξοπλισμός.

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες.

- Τα υψηλά επίπεδα εκτοξεύσεων μετάλλου, έχουν ως άμεσο αντίκτυπο δαπανηρές διαδικασίες καθαρισμού των μεταλλικών επιφανειών.
- Επιρρεπής μέθοδος σε εμφάνιση σφαλμάτων υπερκάλυψης και ατελούς τήξης, που οδηγεί σε δαπανηρές επιδιορθωτικές διαδικασίες.
- Υπερβολική κυρτότητα ραφής και ελλiptής διαβροχή της βάσης του μετάλλου.
- Το υψηλό ποσοστό εκτοξεύσεων έχει ως επακόλουθο, μείωση της αποδοτικότητας του ηλεκτροδίου στα επίπεδα του 87%-93%.
- Περιορισμός της μεθόδου αναφορικά με τη θέση συγκόλλησης και το πάχος · εφαρμόζεται κυρίως, σε επίπεδες και οριζόντιες αυχενικές συγκολλήσεις και για πάχος ελασμάτων μεγαλύτερο των 3 mm.

C. Μεταφορά με σταγονίδια (Axial Spray Transfer).

Η μέθοδος μεταφοράς μέσω σταγονιδίων αποτελεί την υψηλότερη ενεργειακή μέθοδο εναπόθεσης τηγμένου μετάλλου. Η εναπόθεση συντελείται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, γεγονός που οδηγεί σε αξονική ροή τηγόμενων σταγονιδίων. Μεμονωμένα, μικρού μεγέθους, μεταλλικά σταγονίδια διανύουν το μήκος τόξου υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη συχνότητα και ταχύτητα συγκριτικά με τη μέθοδο μεταφοράς με σταγόνες. Μεταφορά με σταγονίδια.

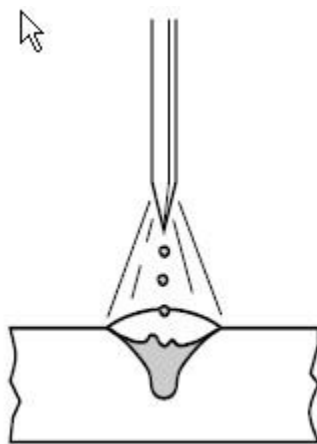


Εικόνα 5.Στιγμιότυπα, ανά $2,5 \cdot 10^{-4}$ s , μεταφοράς με σταγονίδια, σε συγκόλληση χάλυβα για 320A και 29V [Jones 2003].

Η μεταφορά με σταγονίδια επιτυγχάνεται, όταν η τιμή έντασης του διαρρέοντος ρεύματος υπερβεί μια κρίσιμη τιμή μετάβασης (I_{tr}). Η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως η σύσταση του προστιθέμενου μετάλλου, το αέριο προστασίας και η διάμετρος του ηλεκτροδίου. Αύξηση της διαμέτρου ηλεκτροδίου, υπό σταθερή προστασία αερίου απαιτεί υψηλότερη I_{tr} . Αντίστοιχα, αυξομειώσεις του ποσοστού CO_2 στο μείγμα προστασίας επηρεάζουν την τιμή μετάβασης σημαντικά.

Για την επίτευξη μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ποσοτικά, σημαντική ύπαρξη Ar στο περιβάλλον προστασίας. Συνήθως, χρησιμοποιούνται διμερή μείγματα Ar + 1.5% O_2 ή Ar + CO_2 , όπου το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνεται χαμηλότερα από 18%. Τα αέρια προστασίας με υψηλό ποσοστό Ar (έως 95%) δίνουν ένα προφίλ μακρόστενης διείσδυσης στη συγκολλητική ραφή (deep finger-like penetration profile). Αντιθέτως, η ανάμειξη CO_2 , σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% επί του μείγματος προστασίας ελαττώνει την επίδραση του προαναφερθέντος προφίλ, παρέχοντας διείσδυση πιο ομαλοποιημένων χαρακτηριστικών.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου καθορίζεται από το πάχος του ελάσματος, που πρόκειται να συγκολληθεί και από το κατά πόσον είναι δυνατό η συγκόλληση να γίνει σε οριζόντια ή επίπεδη θέση. Η υψηλή ρευστότητα της λίμνης καθιστά ιδανική τη χρήση της μεθόδου για επίπεδες και οριζόντιες θέσεις. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν τα κράματα αλουμινίου, τα οποία λόγω χαμηλής πυκνότητας και υψηλής θερμικής αγωγιμότητας είναι άμεσα συμβατά με την ολοκλήρωση της μεθόδου σε περισσότερες συγκολλητικές θέσεις. Επιπροσθέτως, δύναται να εφαρμοστεί για ελάσματα πάχους μεγαλύτερου των 6 mm. Η διαδικασία συνοδεύεται με την παρουσία σταθερού τόξου και ιδιαίτερα χαμηλού ποσοστού εκτοξεύσεων μετάλλου.



Σχήμα 26. Μηχανισμός μεταφοράς τηγμένου μετάλλου με σταγονίδια
[Lincoln Electric 2006]

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια.

- Υψηλός ρυθμός εναπόθεσης.
- Υψηλή αποδοτικότητα ηλεκτροδίου της τάξεως του 98%.
- Δυνατότητα εφαρμογής μεγάλου εύρους προστιθέμενων μετάλλων και διαμέτρων ηλεκτροδίου.
- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Μικρές απαιτήσεις διαδικασιών καθαρισμού.
- Απουσία εκτοξεύσεων μετάλλου.
- Εξαιρετική τήξη συγκόλλησης.
- Χρήση μεθόδου σε ρομποτικές και αυτοματοποιημένες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια.

- Περιορισμός εφαρμογής της μεθόδου στην οριζόντια και επίπεδη θέση.
- Ανεπιθύμητα επίπεδα παραγωγής καπνού.
- Η υψηλή ακτινοβολούμενη θερμότητα απαιτεί αυστηρά μέτρα προστασίας για τον συγκολλητή.
- Απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα στην περίπτωση εξωτερικών δραστηριοτήτων.
- Η παρουσία Ar στο αέριο προστασίας και το συνεπαγόμενο κόστος κτήσης για τη διαδικασία είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αντίστοιχο αέριο 100% CO₂.

D. Παλμική μεταφορά με σταγονίδια (Pulsed Spray Transfer).

Η παλμική μεταφορά με σταγονίδια αποτελεί μια πλήρως ελεγχόμενη παραλλαγή της μεθόδου μεταφοράς με σταγονίδια. Η μέθοδος, η οποία είναι διεθνώς γνωστή και υπό την ονομασία GMAW-P, βασίζεται στην συνεχή εναλλαγή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ μιας μέγιστης (high peak current) και μιας ελάχιστης τιμής (low background current). Η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται υπό τη μορφή σταγονιδίων και κατά τη χρονική στιγμή που το κύκλωμα διαρρέεται από το ρεύμα μέγιστης εντάσεως.

Η παλμική μέθοδος σταγονιδίων αναπτύχθηκε για δυο ουσιαστικούς λόγους: την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων ατελούς τήξης και τον έλεγχο των εκτοξεύσεων μετάλλου. Η πρωταρχική της εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία στόχευε κυρίως σε συγκολλήσεις τμημάτων γάστρας μικροκραματωμένων χαλύβων υψηλής αντοχής. Διάφοροι λόγοι, που την καθιστούν, προτιμητέα είναι: η υψηλή αποδοτικότητα των ηλεκτροδίων, εν συγκρίσει με τη μέθοδο FCAW και τα χαμηλά ποσοστά υδρογόνου στη μικροδομή των συγκολλήσεων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως, με συμπαγή ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.8-1.6 mm και με ηλεκτρόδια μεταλλικού πυρήνα διαμέτρου 1.1-2.0 mm. Η εφαρμογή της μεθόδου σε ανθρακούχους χάλυβες συνοδεύεται από προστασία αερίου Ar με προσθήκη CO₂ σε επίπεδα, που κυμαίνονται μέχρι 18% επί του μείγματος προστασίας.

Σε επόμενο επίπεδο θεώρησης, αξίζει να αναφερθούμε στο μηχανισμό λειτουργίας της τεχνικής GMAW-P. Το ηλεκτρικό ρεύμα εναλλάσσεται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής, με άμεσο επακόλουθο μια χαμηλότερη σταθμισμένη μέση τιμή ρεύματος, συγκριτικά με την απλή μέθοδο μεταφοράς με σταγονίδια. Ο χρόνος μέσα στον οποίο εξελίσσεται η προαναφερθείσα εναλλαγή ονομάζεται περίοδος ή κύκλος εναλλαγής (Hz) του φαινομένου. Ως συχνότητα ορίζεται ο αριθμός εμφανίσεως της περιόδου για χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου. Η συχνότητα της περιόδου αυξάνεται αναλογικά με τη ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου. Η μέγιστη τιμή ρεύματος υπερβαίνει την τιμή (I_{tr}) μετάβασης, που εμφανίζεται στη μεταφορά σταγονιδίων, ενώ αντίστοιχα η ελάχιστη τιμή ρεύματος κατέρχεται σε επίπεδα τάξης μεγέθους σημαντικά μικρότερα από αυτά που παρουσιάζονται στη μέθοδο βραχυκύκλωσης. Η αποκόλληση του μεταλλικού τηγμένου σταγονιδίου από το ηλεκτρόδιο συμβαίνει κατά τη φάση, που το κύκλωμα διαρρέεται από το ρεύμα μέγιστης έντασης. Η φάση μετάβασης στην ελάχιστη τιμή έντασης είναι αυτή που καθορίζει τη σταθερότητα του τόξου και τον μηχανισμό πρόσδοσης θερμότητας στη συγκόλληση. (Σχ.27)

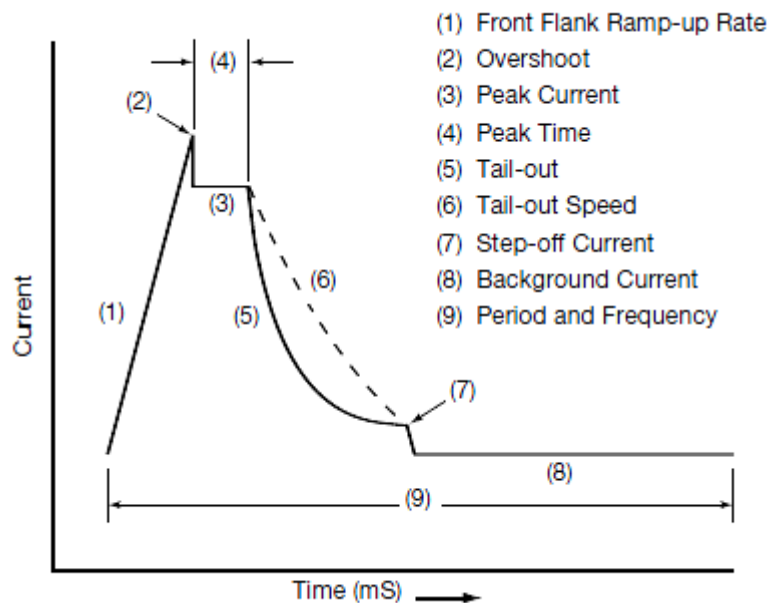
Πλεονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια.

- Μηδαμινά επίπεδα μεταλλικών εκτοξεύσεων.
- Υψηλότερη αντίσταση, συγκριτικά με έτερες μεθόδους μεταφοράς, στην εμφάνιση σφαλμάτων ατελούς τήξης.

- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Δυνατότητα ελέγχου του παραγόμενου ,εκ της συγκόλλησης, καπνού.
- Ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων.
- Προσαρμοστικότητα μεθόδου ως προς όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Χαμηλά ποσοστά προσρόφησης υδρογόνου.
- Περιορισμένη επιρρέπεια σε μαγνητικό φύσημα.
- Καλή απόδοση του μηχανισμού μεταφοράς ακόμη και υπό ελλιπείς συνθήκες προετοιμασίας των δοκιμίων.
- Χαμηλού κόστους, υψηλής αποδοτικότητας ηλεκτρόδια (έως 98%), συγκριτικά με τις μεθόδους SMAW, FCAW και GMAW-S.
- Χρησιμοποιείται σε ρομποτικές και αυτοματοποιημένες εφαρμογές.
- Παροχή δυνατότητας υψηλών ταχυτήτων συγκόλλησης (έως 1.2 m/min).
- Χρησιμοποιείται για υψηλό εύρος πάχους δοκιμίων (0.9-30 mm).

Μειονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια.

- Υψηλό κόστος κτήσης εξοπλισμού, συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους.
- Υψηλό κόστος κτήσης αερίων προστασίας με βάση το Ar, συγκριτικά με το CO₂.
- Υψηλές απαιτήσεις προστασίας για τον συγκολλητή, λόγω αυξημένης ενέργειας τόξου.
- Απαίτηση ανεμοθώρακα για εξωτερικές δραστηριότητες.



Σχήμα 27.Στάδια μηχανισμού GMAW-P [Lincoln Electric 2006]

1.2.4.3 Καθορισμός καίριων παραμέτρων της μεθόδου GMAW. [30],[31],[32]

(1) Ηλεκτρικό ρεύμα.

Η συνδεσμολογία ανάστροφης πολικότητας (DCEP) χρησιμοποιείται κατά κόρον στη μέθοδο GMAW λόγω σταθερότητας ηλεκτρικού τόξου, υψηλού βάθους διείσδυσης, καλής γεωμετρίας ραφή συγκόλλησης και χαμηλού ποσοστού εκτοξεύσεων. Όπως προαναφέρθηκε, ο συνδυασμός χαμηλών χαρακτηριστικών ρεύματος και προστασίας

ενεργών αερίων οδηγεί στη μεταφορά τηγμένου μετάλλου μέσω βραχυκυκλωμάτων. Για τιμές χαρακτηριστικών ρεύματος υψηλότερες από τις αντίστοιχες της μεθόδου βραχυκυκλώσεως, η μεταφορά γίνεται υπό τη μορφή σταγόνων. Για τιμές εντάσεως και τάσεως μεγαλύτερες από αυτές, που παρουσιάζονται στη μέθοδο μεταφοράς με σταγόνες, η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται υπό τη μορφή σταγονιδίων.

(2) Τάση τόξου.

Η τάση τόξου συνδέεται άμεσα με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και με το μήκος τόξου. Ενδεχόμενη αύξηση του μήκους τόξου οδηγεί σε αύξηση της τάσεως. Δευτερευόντως, εξαρτάται από την προστασία αερίου και την προέκταση του ηλεκτροδίου. Η αύξηση της τάσης του τόξου έχει ως αποτέλεσμα πεπλατυσμένες και πιο επίπεδες ραφές συγκόλλησης. Ιδιαίτερα υψηλές τιμές τάσης, έχουν ως αντίκτυπο αστάθεια τόξου, εκτοξεύσεις καθώς και εμφάνιση πόρων και υποκοπής.

(3) Ταχύτητα συγκόλλησης.

Τυχούσα αύξηση επί της ταχύτητας συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση της θερμότητας πρόσδοσης και του ρυθμού εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης. Η αύξηση της ταχύτητας οφείλει να γίνεται μεθοδευμένα και ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι τα όρια πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που επιφέρει είναι δυσδιάκριτα. Σε αρχικό στάδιο, δύναται να αυξήσει τη διείσδυση στο μέταλλο βάσης. Παρόλα αυτά, περαιτέρω στοιχειώδης αύξηση μειώνει το βάθος διείσδυσης και προκαλεί την εμφάνιση σφάλματος υποκοπής.

(4) Προεξοχή ηλεκτροδίου.

Ως προεξοχή ηλεκτροδίου ορίζεται το μήκος ηλεκτροδίου, που προεκτείνεται από το ακροφύσιο του πυρσού συγκόλλησης. Αύξηση της προεξοχής ηλεκτροδίου οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού τήξης του, λόγω φαινομένου Joule. Η τιμή της κυμαίνεται από 5-15 mm για τη μέθοδο μεταφοράς με βραχυκύκλωση και από 15-25 mm για τις έτερες μεθόδους μεταφοράς.

(5) Προστασία αερίου.

Τα αέρια προστασίας επιδρούν και καθορίζουν τη σταθερότητα του τόξου, τη μέθοδο μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, τη γεωμετρία της ραφής συγκόλλησης και το ρυθμό τήξης του μετάλλου. Οι κυριότεροι συνδυασμοί αερίων, που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GMAW είναι καθαρά αέρια, διμερή, τριμερή και σπανιότερα τετραμερή. Τα πιο συνηθισμένα καθαρά αέρια είναι το αργό, το ήλιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Τα Ar-He, ως αδρανή αέρια, χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις ελαφρών κραμάτων, νικελίου και χαλκού. Το CO₂ αποτελεί ένα ενεργό αέριο, που χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις ανθρακούχων χαλύβων.

(6) Διάμετρος ηλεκτροδίου.

Οι διάμετροι ηλεκτροδίων, που βρίσκουν ευρύτερη απήχηση στην μέθοδο GMAW, είναι των 0.8, 1, 1.2, 1.6 mm. Ηλεκτρόδια με διάμετρο μικρότερη των 0.8 mm χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων. Ηλεκτρόδια διαμέτρου 1.2 και 1.6 mm χρησιμοποιούνται, κυρίως, για συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων και για απαιτήσεις υψηλών τιμών ρεύματος.

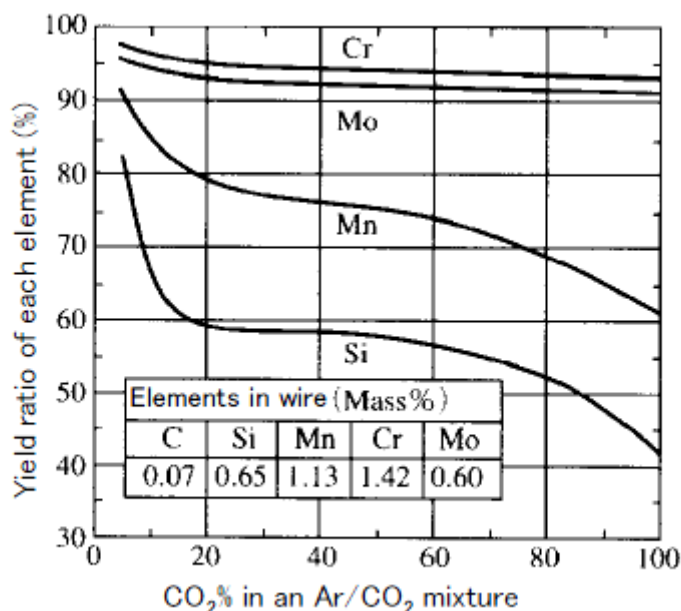
1.2.4.4 Ηλεκτρόδια.[38],[40]

Οι συγκολλήσεις μαλακών χαλύβων και χαλύβων υψηλής αντοχής ενσωματώνουν τη χρήση ηλεκτροδίων δυο τύπων: (α) συμπαγών και (β) με πυρήνα προστατευτικής

σκόνης (flux cored). Στη ναυπηγική βιομηχανία, έχει επικρατήσει η χρησιμοποίηση της δεύτερης κατηγορία ηλεκτροδίων, καθώς προσφέρει υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού με εξαιρετική όψη ραφής και χαμηλά ποσοστά εκτοξεύσεων.

Συμπαγή ηλεκτρόδια.

Η κατασκευή τους καθίσταται εφικτή με μοναδικό κριτήριο τη συμβατότητα με το αέριο προστασίας. Αυτό οφείλεται άρρηκτα στο γεγονός ότι, η συμπεριφορά των χημικών στοιχείων του εναποτιθέμενου μετάλλου επηρεάζεται από τη σύνθεση του αερίου προστασίας, λόγω της χημικής διάδρασης του τηκόμενου μετάλλου και του προστατευτικού αερίου στις υψηλές θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία αποσύνθεσης του CO₂ αποδεδμεύει μόρια οξυγόνου, τα οποία οξειδώνουν το πυρίτιο, το μαγγάνιο και τα επιμέρους κραματικά στοιχεία, που παρέχονται από το ηλεκτρόδιο στη λίμνη συγκόλλησης. Ως αποτέλεσμα, παράγονται οξείδια, όπως SiO₂ και MnO, τα οποία διαχωρίζονται από το τηγμένο μέταλλο, υπό τη μορφή σκουριάς. Ο βαθμός συμπεριφοράς-απόδοσης (yield ratio) των χημικών στοιχείων επηρεάζει ουσιαστικά τις μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου μετάλλου.



Διάγραμμα 1. Συμπεριφορά χημικών στοιχείων ηλεκτροδίου συναρτήσει του CO₂.
[Kobe Steel 2011]

Υφίστανται κατηγορίες ηλεκτροδίων, που διαχωρίζονται ανάλογα με τη δυνατότητα έκθεσης τους σε χαμηλές ή υψηλές τιμές ρεύματος. Η χρήση υψηλών τιμών έντασης σε συνδυασμό με προστασία CO₂, προκαλεί τήξη του ηλεκτροδίου υπό το μηχανισμό μεταφοράς σταγόνων. Αντιστοίχως, η χρήση υψηλών τιμών έντασης σε συνδυασμό με προστασία αερίου 75-80% Ar/20-25% CO₂, προκαλεί τήξη του ηλεκτροδίου υπό το μηχανισμό μεταφοράς σταγονιδίων. Τέλος, χαμηλές κατάλληλες εντάσεις ρεύματος, οδηγούν σε τήξη του ηλεκτροδίου υπό το μηχανισμό μεταφοράς με βραχυκύκλωση.

Ηλεκτρόδια με πυρήνα προστατευτικής σκόνης.

Ο συγκεκριμένος τύπος ηλεκτροδίων κατηγοριοποιείται ως εξής: (α) ηλεκτρόδια ρουτιλίου, (β) βασικά ηλεκτρόδια και (γ) μεταλλικά ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια με πυρήνα προστατευτικής σκόνης συντίθενται από ένα μεταλλικό περίβλημα και από ένα πυρήνα σκόνης, στον οποίο εμπεριέχονται χημικά συστατικά όπως μεταλλική σκόνη (σιδήρου και κραματικών στοιχείων), σταθεροποιητές τόξου, αντιοξειδωτικές

ουσίες και διαμορφωτές σκουριάς. Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου έχουν ως βάση πυρήνα το διοξείδιο του τιτανίου (ρουτίλιο), ενώ τα βασικά φθοριούχο ασβέστη. Η τελευταία κατηγορία έχει ως βασικό συστατικό του πυρήνα, μεταλλική σκόνη, η οποία βοηθά στο σχηματισμό ενός λεπτού στρώματος σκουριάς. Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου έχουν ως πλεονέκτημα την εξαιρετική τους ευχρηστία, ενώ τα βασικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε ρωγματώσεις. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις συγκριτικές ιδιότητες των ηλεκτροδίων.

Πίνακας 9. Συγκριτικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων ηλεκτροδίων. [Kobe Steel 2011]

Συμπεριφορά	Τύπος ηλεκτροδίου		
	Συμπαγές ηλεκτρόδιο	Ρουτιλίου & Βασικά	Μεταλλικά
Ρυθμός εναπόθεσης	Μεγάλος	Μεγαλύτερος	Μέγιστος
Αποδοτικότητα εναπόθεσης	Υψηλότερη (έως 95%)	Υψηλή (έως 88%)	Υψηλότερη (έως 95%)
Πλεονεκτήματα χρήσης	Μικρό ποσοστό σκουριάς	Χαμηλό ποσοστό εκτοξεύσεων	Μικρό ποσοστό σκουριάς
	Οι εκτοξεύσεις εξαρτώνται από τις παραμέτρους συγκόλλησης	Ομαλή όψη ραφής συγκόλλησης	Χαμηλό ποσοστό σκουριάς
Θέσεις συγκόλλησης	Εξάρτηση αναλόγως των παραμέτρων συγκόλλησης	Όλες οι θέσεις συγκόλλησης	Επίπεδες και οριζόντιες αυχενικές συγκολλήσεις

1.2.4.5 Αέρια Προστασίας.[31],[33],[34],[37]

Η κατάλληλη επιλογή του αερίου προστασίας επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της τελικής ραφής συγκόλλησης. Οι παράμετροι, που καθορίζουν την εκάστοτε επιλογή είναι οι εξής:

- Η κραμάτωση του ηλεκτροδίου.
- Οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου μετάλλου.
- Το πάχος υλικού και το είδος συμβολής.
- Η κατάσταση του υλικού, υπό την έννοια παρουσίας υπολειμμάτων σκουριάς και ελαίων καθώς και διαβρωτικών στρωμάτων.
- Η μέθοδος μεταφοράς τηγμένου μετάλλου.
- Η θέση συγκόλλησης.
- Η επιθυμητή διεύθυνση.
- Η τελική επιθυμητή όψη ραφής.
- Το κόστος.

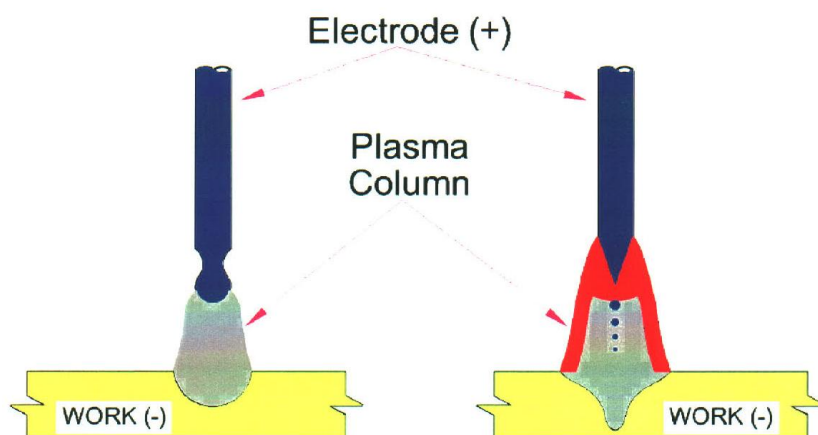
Υπό την επίδραση της θερμότητας του τόξου, τα αέρια προστασίας συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο. Η ροή και το μέγεθος της έντασης του ρεύματος έχουν άμεση επιρροή στη συμπεριφορά του τηγμένου σταγονιδίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο αέριο δύναται να συνδράμει τα μέγιστα σε μια μέθοδο μεταφοράς, αποκλείοντας παράλληλα, αυτή τη μέγιστη συνεισφορά, προς τις έτερες μεθόδους μεταφοράς. Βασικό κριτήριο, προς αυτή την κατεύθυνση, αποτελεί η κατανόηση των ιδιοτήτων του αερίου προστασίας και πιο συγκεκριμένα:

- Το δυναμικό ιονισμού των αερίων συνιστωσών.
- Η θερμική αγωγιμότητα των συνιστωσών του αερίου προστασίας.
- Η χημική αντιδραστικότητα του αερίου με τη λίμνη συγκόλλησης.

Αδρανή αέρια Προστασίας.

Το αργό και το ήλιο, αποτελούν τα κύρια αδρανή αέρια προστασίας στις λίμνης συγκόλλησης. Βασική ιδιότητα στις συνιστά το γεγονός ότι δεν αντιδρούν χημικά με το τηγμένο λουτρό. Προκειμένου ένα αέριο να καταστεί αγωγίμο, δηλαδή πλάσμα, πρέπει να ιονιστεί. Κάθε αέριο απαιτεί διαφορετικά ποσά ενέργειας για να ιονιστεί, με άλλα λόγια κάθε αέριο έχει τη δικιά του ενέργεια ιονισμού. Η ενέργεια ιονισμού για το αργό είναι 15.7 eV, ενώ για το ήλιο 24.5 eV. Καθίσταται εύλογο, λοιπόν, το γεγονός ότι ο ιονισμός του αργού επιτυγχάνεται ευκολότερα, συνοδευόμενος και από καλύτερες ιδιότητες έναυσης τόξου συγκριτικά με το ήλιο.

Η θερμική αγωγιμότητα ορίζεται ως η ικανότητα του αερίου να άγει δια μέσω του θερμική ενέργεια και αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο επιλογής στις αερίου προστασίας. Υψηλά επίπεδα θερμικής αγωγιμότητας, συνεισφέρουν σε μεγαλύτερη αγωγή θερμικής ενέργειας στο στις συγκόλληση τεμάχιο. Το αργό έχει χαμηλότερο ρυθμό θερμικής αγωγιμότητας· έγκειται στο 10% του επιπέδου αγωγιμότητας αερίων στις το ήλιο και το υδρογόνο. Επιπροσθέτως, η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζει τη μορφή του τόξου και τη θερμοκρασιακή κατανομή στις περιοχής δράσης του τόξου. Οι υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας του ηλίου, βοηθούν στην επίτευξη ευρέων προφίλ διείσδυσης με μειωμένο βάθος διείσδυσης. Αντιθέτως, παρατηρείται συχνά, ότι μείγματα αερίου με υψηλά ποσοστά αργού επιτυγχάνουν βαθύτερες διεισδύσεις, μικρότερου πλάτους στο μέταλλο βάσης, γεγονός που δικαιολογείται από στις χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας του αργού. Γεγονός, που στις δικαιολογείται από τη συγκεκριμένη ιδιότητα είναι ότι, η στήλη του πλάσματος υπό την προστασία αργού εκτείνεται περά των ορίων στις τηγμένης άκρης του ηλεκτροδίου καθώς και στις τα πάνω.



Εικόνα 6. Στήλη πλάσματος υπό την προστασία αργού. [Vaidya 2001]

Λογική συνέπεια των άνωθεν καταγεγραμμένων, αποτελεί η δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας για τη θέρμανση πυκνώσεως των ηλεκτρονίων. Η θερμαντική διαδικασία θα τήξει ταχύτατα το ηλεκτρόδιο, ενώ ταυτόχρονα, η παρουσία ισχυρών δυνάμεων Lorentz θα διαμορφώσει μια γρήγορη ροή σταγονιδίων, η κρούση των οποίων, πάνω στο μέταλλο βάσης, θα προκαλέσει διείσδυση υψηλού βάθους στη διεύθυνση ροής των σταγονιδίων. Το αργό υποστηρίζει πλήρως τη μέθοδο μεταφοράς σταγονιδίων, ενώ η παρουσία του αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς στις. Μολαταύτα, η προσθήκη ποσοστού CO₂, υψηλότερη του 15%, οδηγεί σε μεταφορά του τηγμένου υλικού υπό τη μέθοδο σταγόνων. Σε διαδικασίες GMAW ανθρακούχων χαλύβων, η χρησιμοποίηση

μειγμάτων 100% He ή CO₂, δημιουργεί ένα ασταθές τόξο μεταφοράς σταγόνων, που σπάνια εφαρμόζεται στην πράξη. Επίσης, η χρησιμοποίηση καθαρού αργού σε συγκολλήσεις GMAW ανθρακούχων και ανοξείδωτων χαλύβων καθιστά το τόξο σημαντικά ασταθές. Το εναποτιθέμενο μέταλλο διαβρέχει δύσκολα την επιφάνεια του μετάλλου βάσης με αποτέλεσμα την παρουσία ασυνέχειας υλικού επί της συγκολλητικής ραφής. Στοιχειώδεις προσθήκες οξειδωτικών παραγόντων (O₂, CO₂) παρέχουν άμεση σταθεροποίηση του τόξου.

Από την άλλη πλευρά, το ήλιο (He) χρησιμοποιείται σε μείγματα προστασίας για εφαρμογές ανοξείδωτων χαλύβων και κραμάτων αλουμινίου. Η χρήση του σε διμερή μείγματα απαιτεί, συνήθως, αυξήσεις στην τάση τόξου για λόγους σταθερότητας του τόξου. Η προσθήκη He σε αέριο Ar επιδρά ενισχυτικά στις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες του βασικού μετάλλου. Η συγκόλληση παχέων ελασμάτων (άνω των 25 mm) συνιστά συνήθη διαδικασία, στην οποία χρησιμοποιούνται μείγματα Ar/ He.

Εναλλακτική πρόταση προστασίας αποτελεί και η εναλλασσόμενη παροχή των αδρανών αερίων Ar και He. Η συγκεκριμένη τεχνολογία επηρεάζει κάθε πτυχή της συγκολλητικής διαδικασίας. Κύριο μηχανισμό επίδρασης στην λίμνη συγκολλήσεως συνιστά η δυναμική κίνηση της εναλλαγής των αερίων. Εμβαθύνοντας στο ζήτημα: λόγω χαρακτηριστικών ιονισμού, το αργό παράγει υψηλότερες πιέσεις τόξου από το ήλιο, διανύοντας το μήκος τόξου. Οι διαφοροποιήσεις της πίεσεως, οδηγούν με τη σειρά τους σε αλλαγές της κίνησης του τηγμένου λουτρού. Ακολούθως, λεπτομερής μελέτη του ηλεκτρικού τόξου αναδεικνύει το γεγονός ότι το υψηλότερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας με πλάσμα αργού, παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση ενέργειας στον πυρήνα του τόξου, εν αντιθέσει με την περίπτωση πλάσματος ηλίου, όπου και παρατηρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη ενέργεια σε όλη την έκταση της δέσμης του τόξου. Ως αποτέλεσμα, κατά την διάρκεια επίδρασης του αργού η θερμοκρασία και η ρευστότητα της λίμνης συγκολλήσεως βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα. Οι αντίστοιχες παράμετροι κατά την εναλλαγή σε ήλιο αυξάνονται, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τους μηχανισμούς σχηματισμού της. Σε γενικές γραμμές, κάθε κύκλος εναλλαγής αερίου δημιουργεί σπασμωδικές-κρουστικές ωθήσεις πίεσεως, οι οποίες επηρεάζουν τους μηχανισμούς κίνησης της λίμνης κατά τρόπο όμοιο με τις παλμικές λειτουργίες μιας πηγής ισχύος. Κάθε αέριο συνοδεύεται από ένα χαρακτηριστικό διάνυσμα ροής, το άθροισμα των οποίων προσδίδει μια συνολική δυναμική δράση στην λίμνη.

Η τεχνική εναλλαγής των αερίων Ar/He ως μεθόδου προστασίας επί της GMAW διαδικασίας παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη σύμφωνα με τον *Young H.Chang* [2006]. Αρχικά, η εναλλασσόμενη παροχή βοηθά στην αποτροπή σχηματισμού φυσαλίδων υδρογόνου στην συγκόλληση (κυρίως αλουμινίου). Κατά τη διάρκεια στερεοποίησης του μετάλλου συγκόλλησης, το υδρογόνο έχει την τάση να σχηματίζει φυσαλίδες, οι οποίες εγκλωβίζονται υπό την μορφή πόρων και ενσωματώνονται στην δομή του. Η δυναμική κίνηση της λίμνης συγκολλήσεως συνδράμει στην απελευθέρωση ενός ποσοστού των φυσαλίδων, μειώνοντας συνεπώς και την έκταση του σφάλματος των πόρων. Εν συνεχεία, η εναλλαγή αερίων Ar/He συντελεί στην δημιουργία, μεγάλης διεισδύσεως και πλάτους, ραφών συγκολλήσεως, γεγονός εύλογο δεδομένων των χαρακτηριστικών έκαστου του αερίου (Ar → εγκάρσια τομή nipple type, He → υψηλή & φαρδιά διείσδυση). Τελικώς, λαμβάνουν χώρα συγκολλήσεις χαμηλών εγκάρσιων και διαμήκων παραμορφώσεων, εν αντιθέσει με τις περιπτώσεις όπου το κάθε αέριο επιδρά μεμονωμένα, διότι η εναλλαγή δεν επιτρέπει στο εκάστοτε αέριο να επιδράσει αρνητικά επί της συγκολλητικής ραφής. Αναφορικά: η προστασία αργού προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις λόγω υψηλών απαιτήσεων θερμότητας και αργών ταχυτήτων, ενώ η προστασία Ar + He (1:2) λόγω τόξου υψηλής ενεργείας με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Ενεργά αέρια Προστασίας.

Το οξυγόνο, το υδρογόνο, το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα αποτελούν την ομάδα των ενεργών αερίων προστασίας. Η βασική τους ιδιότητα συνίσταται στο ότι, αναμειγνύονται και αντιδρούν χημικά με τη λίμνη συγκόλλησης, παρέχοντας την ίδια στιγμή, επιθυμητές ιδιότητες στο εναποτιθέμενο μέταλλο.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι αδρανές σε θερμοκρασία δωματίου. Υπό την παρουσία πλάσματος τόξου και λίμνης συγκόλλησης είναι ενεργό. Κάτω από την επίδραση της υψηλής ενέργειας του τόξου πλάσματος διασπώνται μόρια CO_2 , σε μια διαδικασία γνωστή ως διάσπαση. Πιο συγκεκριμένα, επιμέρους άτομα C, CO και O_2 απελευθερώνονται από ένα μόριο CO_2 στην ανοδική περιοχή του τόξου. Η καθοδική περιοχή του τόξου, η οποία στις διαδικασίες GMAW ταυτίζεται με το μέταλλο βάσης υφίσταται τη διαδικασία της επανένωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η παρουσία υψηλών επιπέδων ενέργειας καθίσταται υπεύθυνη για τη βαθειά και ευρεία μορφή διεύθυνσης, που χαρακτηρίζει τη χρήση CO_2 . Σταδιακή προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα σε διμερή ή τριμερή μείγματα ενισχύει τις εκπομπές αναθυμιάσεων.

Επιπρόσθετη εμβάθυνση, στα ζητήματα διάσπασης και επανένωσης (dissociation and recombination) δύναται να μας βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση από φυσικής σκοπιάς. Τα ελεύθερα στοιχεία του μορίου CO_2 (C, CO, O_2) αναμειγνύονται με τη λίμνη συγκόλλησης. Το ελεύθερο O_2 αντιδρά χημικά με το πυρίτιο, το μαγγάνιο και τον σίδηρο, προκειμένου να σχηματίσει τα αντίστοιχα οξειδία. Τα προαναφερθέντα, λοιπόν, οξειδία, γνωστά και ως « νησίδες πυριτίου» (silica islands), αρχικά επιπλέουν στη λίμνη συγκόλλησης, ενώ μετέπειτα στερεοποιούνται σε «νησίδες» της τελικής ραφής ή συγκεντρώνονται στη βάση της συγκόλλησης. Τα υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, που αντιστοιχούν σε υψηλό δυναμικό οξειδωσης, αυξάνουν την ποσότητα της σκουριάς που εναποτίθεται πάνω από την τελική ραφή. Αντιθέτως, χαμηλά ποσοστά CO_2 , που αντιστοιχούν σε χαμηλό δυναμικό οξειδωσης, αυξάνουν το υπάρχον ποσοστό των κραματικών στοιχείων πυριτίου και μαγγανίου στη μικροδομή της τελικής συγκόλλησης. Συνάγεται άμεσα, λοιπόν, το συμπέρασμα, ότι ένα χαμηλό δυναμικό οξειδωσης σε διμερές ή τριμερές μείγμα προστασίας αυξάνει το όριο διαρροής και την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό της συγκόλλησης.

Το οξυγόνο (O_2) αποτελεί οξειδωτή, ουσία δηλαδή που αντιδρά με συνιστώσες της λίμνης συγκόλλησης προκειμένου να σχηματίσει οξειδία. Σε μικρές προσθήκες σε μείγματα αργού (1-5%) προσφέρει αρκετά καλή σταθερότητα τόξου και εξαιρετική όψη ραφής. Η χρήση αντιοξειδωτικών στη χημική σύνθεση των μετάλλων προσθήκης, αντισταθμίζει την οξειδωτική επίδραση του οξυγόνου, παρέχοντας χημική ισορροπία στο μείγμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, σε πολλές εφαρμογές καθίσταται συμφέρουσα η αντικατάσταση του CO_2 με O_2 σε μείγματα Ar/ CO_2 . Σύμφωνα με τους *Scott Laymon, Craig Chritz* και *Fred Schweighardt* [Ar/ O_2 Shielding Gases Improve Carbon Steel GMAW, 2010] η χρήση μειγμάτων προστασίας Ar/ O_2 προσφέρει τα εξής, συγκριτικά με τα συμβατικά μείγματα Ar/ CO_2 :

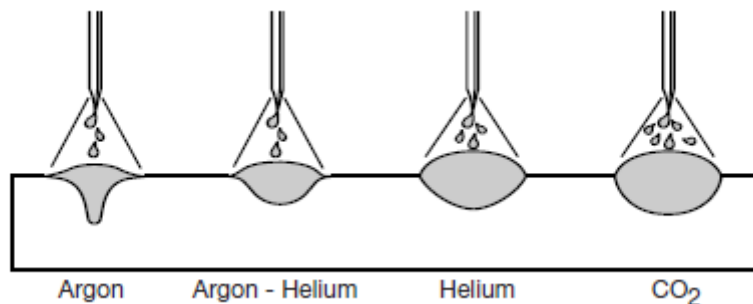
- Μείωση του επιπέδου εκτοξεύσεων και αναθυμιάσεων. Η χρήση μείγματος 95-5% Ar/ O_2 έδωσε υπό-εξαπλάσια επίπεδα αναθυμιάσεων από μείγμα 95-10% Ar/ CO_2 . Η μελέτη διεξήχθη με συμπαγές ηλεκτρόδιο επικάλυψης χαλκού, ενώ η μεταφορά τηγμένου μετάλλου έλαβε χώρα με τη μέθοδο των σταγονιδίων.
- Μείωση μετά-συγκολλητικών διαδικασιών καθαρισμού.
- Επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης.
- Επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης μετάλλου.
- Προσδίδει εξαιρετική όψη ραφής καθώς και καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Χαμηλότερο κόστος.

- Επιτυγχάνεται μεταφορά τηγμένου υλικού με τη μέθοδο των σταγονιδίων για χαμηλότερες τιμές παραμέτρων συγκόλλησης, εν συγκρίσει με μείγμα Ar/ CO₂.

Το υδρογόνο (H₂) χρησιμοποιείται σε μικρά ποσοστά, 1-5%, σε μείγματα αργού για τη προστασία συγκολλητικών διαδικασιών ανοξειδωτων χαλύβων και κραμάτων νικελίου. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του στοιχείου συνδράμει στη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης, διευκολύνοντας τη διαβροχή της βάσης συγκόλλησης και επιτρέποντας υψηλότερες ταχύτητες.

Διμερή μείγματα αερίων προστασίας.

❖ **Ar + He:** Τα διμερή μείγματα αργού-ηλίου χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις κραμάτων νικελίου και αλουμινίου. Ο τύπος μεταφοράς μετάλλου, που υποστηρίζει, είναι με σταγονίδια: παλμικά ή μη. Η προσθήκη ηλίου επιδρά αυξητικά στη ρευστότητα της λίμνης και στο πλάτος της τελικής ραφής. Επίσης, υποστηρίζει τη χρήση υψηλότερων ταχυτήτων. Σε συγκολλήσεις GMAW κραμάτων αλουμινίου, η ύπαρξη ηλίου στο μείγμα προστασίας μειώνει την επίδραση της μακρόστενης (finger-like) διείδυσης, που συναντάται με καθαρό αργό. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται μείωση της εμφάνισης πόρων υδρογόνου, σε συγκολλήσεις αλουμινίου της σειράς 5XXX, οι οποίες χρησιμοποιούν προστιθέμενο μέταλλο αλουμινίου-μαγνησίου. Η χρήση αργού, ωστόσο, υποβοηθά την όλη διαδικασία, παρέχοντας εξαιρετική έναυση τόξου και καθαριστική δράση σε επιφάνειες αλουμινίου. Τα συνηθέστερα μείγματα που παρουσιάζονται σε βιομηχανική εφαρμογή είναι τα ακόλουθα: 75%Ar+25%He και 75%He+25%Ar. Το πρώτο μείγμα χρησιμοποιείται για λόγους ενίσχυσης του προφίλ διείδυσης σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, χαλκού και νικελίου. Η λίμνη συγκόλλησης παρουσιάζει υψηλότερη ρευστότητα, σε σχέση με προστασία καθαρού αργού. Το δεύτερο μείγμα ενισχύει τη θερμική αγωγιμότητα και τη ρευστότητα της λίμνης. Στο σχήμα 28, παρατίθενται τα προφίλ διείδυσεως για διάφορα αέρια.



Σχήμα 28. Προφίλ διείδυσης αναλόγως του αερίου προστασίας.
[Lincoln Electric, 2006]

Σύμφωνα με τον *Young H.Chang* [2006], η εναλλασσόμενη παροχή των Ar και He, συνδράμει στην αποτροπή σχηματισμού φυσαλίδων υδρογόνου στις συγκολλήσεις Al καθώς επίσης, ενισχύει την αντοχή τους και μειώνει τα ποσοστά παραμορφώσεων για τους ανοξειδωτους χάλυβες.

❖ **Ar + CO₂.** Το διμερές μείγμα Ar/ CO₂ αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή για την προστασία συγκολλήσεων ανθρακούχων χαλύβων. Είναι συμβατό και με τις 4 γνωστές μεθόδους μεταφοράς μετάλλου. Δύναται, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και για GMAW-P συγκολλήσεις ανοξειδωτων χαλύβων με ποσοστό CO₂ μικρότερο του 4%. Η προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα στο αργό, εξασφαλίζει σταθερότητα του τόξου και περιορισμό εμφάνισης υποκοπών. Ποσοστό, όμως, της τάξης του 25%, αυξάνει το

ρεύμα μετάβασης ευνοώντας την δημιουργία βαθύτερου προφίλ διείσδυσης αλλά και την εμφάνιση εκτοξεύσεων και ασταθούς τόξου. Ο συνδυασμός, Ar/ CO₂ προτιμάται σε περιπτώσεις όπου, ο σχηματισμός οξειδίων σιδήρου (millscale - FeO) καθίσταται αναπόφευκτος. Όσο αυξάνεται το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα στο μείγμα, αυξάνεται και η προσδιδόμενη θερμότητα και η πιθανότητα εμφάνισης τρεξίματος μετάλλου (burn-through).

Η μέθοδος αζονικής μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια απαιτεί την ύπαρξη CO₂ σε ποσοστά μικρότερα του 18%. Το συγκεκριμένο ποσοστό CO₂, αποτελεί το άνω όριο στη χρήση μίγματος Ar/ CO₂ σε διαδικασίες παλμικής μεταφοράς σταγονιδίων. Όταν τα ποσοστά CO₂ ανέρχονται στην τάξη του 20% και άνω, η μεταφορά δύναται να διεκπεραιωθεί με τη μέθοδο βραχυκυκλώσεως. Τα κυριότερα αέρια μείγματα προστασίας κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο μεταφοράς μετάλλου. Οπότε για τη μέθοδο βραχυκυκλώσεως, ισχύουν τα εξής:

75% Ar + 25% CO₂:

Εμφανίζει μειωμένα επίπεδα εκτοξεύσεων και βελτιωμένη όψη ραφής, σε εφαρμογές κυρίως, ανθρακούχων χαλύβων.

80% Ar + 20% CO₂:

Ευρύτατα γνωστό μείγμα, που ενισχύει τα χαρακτηριστικά του ανώτερου μείγματος.

Η μέθοδος μεταφοράς σταγονιδίων υποστηρίζει τα εξής αέρια μείγματα προστασίας:

98% Ar + 2% CO₂:

Χρησιμοποιείται για παλμική ή μη μεταφορά μετάλλου, με ηλεκτρόδια ανθρακούχων και ανοξειδωτών χαλύβων. Βρίσκει ευρύτατη εφαρμογή σε διαδικασίες συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων ($\leq 3\text{mm}$) και υψηλών ταχυτήτων. Άμεση απόρροια χρήσης του μείγματος είναι η εξαιρετική ρευστότητα της λίμνης.

95% Ar + 5% CO₂:

Χρησιμοποιείται με παλμική μεταφορά σταγονιδίων και με ηλεκτρόδια ανθρακούχων χαλύβων. Η προσθήκη 5% CO₂ προσφέρει υψηλότερη ρευστότητα και ευελιξία με, πιο βαριά ,βιομηχανοποιημένες διαδικασίες.

92% Ar + 8% CO₂:

Χρησιμοποιείται με παλμική ή μη μεταφορά μετάλλου και ηλεκτρόδια ανθρακούχων χαλύβων. Προσφέρει υψηλότερη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης από ότι τα προαναφερθέντα μείγματα.

90% Ar + 10% CO₂:

Χρησιμοποιείται με παλμική ή μη μεταφορά μετάλλου και ηλεκτρόδια ανθρακούχων χαλύβων. Ελαττώνει το φαινόμενο της μακρόστενης διείσδυσης, και συνδράμει στην ελάττωση της κυρτότητας της ραφής.

85% Ar + 15% CO₂:

Το υψηλότερο επίπεδο CO₂ ενισχύει τη σύντηξη των πλευρικών τοιχωμάτων, για ελάσματα ανεξαρτήτου πάχους και υπό τη μέθοδο μεταφοράς σταγονιδίων, παλμικής ή μη. Σε γενικότερα πλαίσια, παρουσιάζει βελτιωμένη διαβροχή της βάσης μετάλλου σε ανθρακούχους χάλυβες με χαμηλά επίπεδα εμφάνισης στρωμάτων σκουριάς.

82% Ar + 18% CO₂:

Αποτελεί το ενεργό όριο του CO₂, για μεταφορά τηγμένου μετάλλου υπό τη μέθοδο σταγονιδίων. Ιδιαίτερα διαδεδομένο μείγμα στην Ευρώπη και χρησιμοποιούμενο για μεγάλο εύρος παχών. Ενισχύει το προφίλ διείσδυσης καθ' όλο το μήκος της ραφής.

❖ **Ar + O₂**: Τα μείγματα αργού-οξυγόνου επιτυγχάνουν μεταφορά με σταγονίδια για χαμηλότερες τιμές ρεύματος συγκριτικά με τα μείγματα Ar/ CO₂. Το μέγεθος των σταγονιδίων είναι μικρότερο και η ρευστότητα της λίμνης μεγαλύτερη. Μείγματα των Ar/O₂ ευνοούν τη χρήση υψηλών ταχυτήτων συγκόλλησης για λεπτά ελάσματα. Το παρόν μείγμα είναι ιδιαίτερα αποδοτικό για συγκολλήσεις κοινών και ανοξειδωτων χαλύβων. Τα κυριότερα μείγματα είναι τα εξής:

99% Ar + 1% O₂:

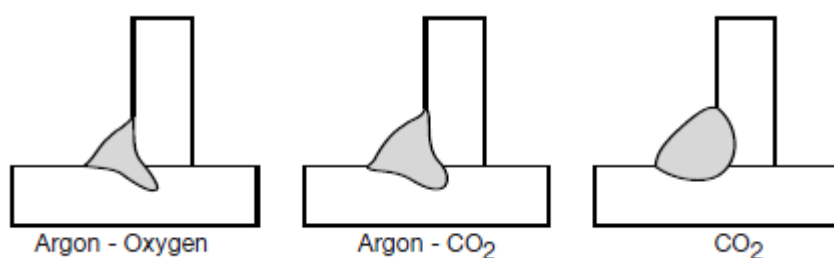
Χρησιμοποιείται για εφαρμογές σε ανοξειδωτο χάλυβα. Η ιδιότητα του οξυγόνου ως σταθεροποιητής τόξου, ενισχύει τη διαδικασία μεταφοράς με σταγονίδια και διατηρεί τη ρευστότητα της λίμνης στα αποδεκτά επίπεδα. Οι συγκολλήσεις των ανοξειδωτων χαλύβων, λαμβάνουν χρώμα γκρι λόγω οξείδωσης του τηγμένου λουτρού.

98% Ar + 2% O₂:

Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κοινών και ανοξειδωτων χαλύβων. Εφαρμόζεται, ως επί το πλείστον, σε διαδικασίες GMAW λεπτών ελασμάτων που απαιτούν υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης είτε με την παλμική μέθοδο μεταφοράς σταγονιδίων ή χωρίς. Οι εναποθέσεις μετάλλου ,σε ανοξειδωτο χάλυβα, έχουν γκρίζο θαμπό χρώμα στην όψη τους. Το συγκεκριμένο μείγμα χρησιμοποιείται, όταν υφίστανται απαιτήσεις για υψηλό επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων σε συνδυασμό με χαμηλού βαθμού κραμάτωσης ηλεκτροδίων κοινού ανθρακούχου χάλυβα.

95% Ar + 5% O₂:

Το παρόν μείγμα εφαρμόζεται σε βαρύτερα τμήματα κοινών χαλύβων. Ουσιαστική προϋπόθεση για επιτυχή διεκπεραίωση της διαδικασίας αποτελεί η απαίτηση καθαρής ,από οξείδια και μολυντικά στοιχεία, επιφάνειας του μετάλλου βάσης.



Σχήμα 29. Προφίλ διείδυσης για προστατευτικά αέρια μείγματα Ar/O₂, Ar/CO₂ και CO₂ .
[Lincoln Electric, 2006]

Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι, το βέλτιστο ποσοστό O₂ ή CO₂ που δύναται να προστεθεί σε αδρανές αέριο εξαρτάται από την καθαρότητα επιφάνειας του μετάλλου βάσης, τη θέση συγκόλλησης, την εφαρμοζόμενη τεχνική και τη χημική σύσταση του βασικού μετάλλου. Τιμές, όπως 2-8% O₂ και 8-10% CO₂ αποτελούν ενδεικτικές τιμές οι οποίες ικανοποιούν μεγάλο εύρος συγκολλητικών παραμέτρων.

Τριμερή μείγματα αερίων προστασίας.

Τα τριμερή μείγματα αερίων προστασίας χρησιμοποιούνται, κυρίως, σε εφαρμογές κοινών και ανοξειδωτων χαλύβων και σπανιότερα, κραμάτων νικελίου. Σε μεταφορά με βραχυκύκλωση, η προσθήκη 40% ήλιου, σε Ar και CO₂ δρα ενισχυτικά στο εύρος του προφίλ διείδυσης. Το ήλιο (He) προσφέρει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα για μεταφορά με βραχυκύκλωση σε εφαρμογές, που αφορούν μέταλλα βάσης κοινών και ανοξειδωτων χαλύβων. Το μεγαλύτερο πλάτος ραφής και η καλύτερη τήξη επί των ορίων της ραφής, μειώνουν σε σημαντικό βαθμό την εμφάνιση σφαλμάτων ατελούς

τήξης. Όσον αφορά εφαρμογές ανοξειδωτων χαλύβων, η χρήση τριμερών μειγμάτων συνιστά συνήθη λύση με ποσοστά προσθήκης ηλίου, που ανέρχονται στο 55% - 90% για μεταφορά μετάλλου με βραχυκύκλωση. Η μείωση των εκτοξεύσεων, η βελτίωση της ρευστότητας της λίμνης και η πλατύτερη μορφή ραφής αποτελούν μερικές από τις επιθυμητές ιδιότητες των συγκεκριμένων τριμερών μειγμάτων.

90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO₂:

Αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή αερίου προστασίας για εφαρμογές ανοξειδωτων χαλύβων και για μεταφορά με βραχυκύκλωση. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του ηλίου προσφέρει εξαιρετική τήξη και μεγάλο πλάτος ραφής. Το παρόν μείγμα έχει προσαρμοστεί να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παλμικής μεταφοράς σταγονιδίων για παχιά ελάσματα (≥ 1.6 mm) ανοξειδωτων ή νικελιούχων χαλύβων.

55% He + 42.5% Ar + 2.5% CO₂:

Το συγκεκριμένο μείγμα παρέχει τόξο χαμηλότερης θερμοκρασίας, συγκριτικά με το πρώτο μείγμα, για παλμική μεταφορά σταγονιδίων. Χρησιμοποιείται, επιπλέον, για εφαρμογές ανοξειδωτων και νικελιούχων χαλύβων για τις περιπτώσεις μεταφοράς με βραχυκύκλωση. Το μικρό ποσοστό He επιτρέπει τη χρήση μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια.

38% He + 65% Ar + 7% CO₂:

Το συγκεκριμένο μείγμα χρησιμοποιείται για εφαρμογές μαλακών καθώς και χαμηλά κραματωμένων χαλύβων με τη μέθοδο μεταφοράς βραχυκύκλωσης. Χρησιμοποιείται, επίσης, για ανοιχτές συγκολλήσεις ρίζας σωληνώσεων. Η θερμική αγωγιμότητα του μείγματος ενισχύει το πλάτος ραφής και ελαττώνει την τάση εμφάνισης σφαλμάτων υπερκάλυψης.

90% Ar + 2% O₂ + 8% CO₂ :

Το παρόν μείγμα δύναται να χρησιμοποιηθεί με όλες τις μεθόδους μεταφοράς πλην της μεθόδου σταγόνων. Το υψηλό ποσοστό αδρανούς αερίου βοηθά στη μείωση της εμφάνισης εκτοξεύσεων.

1.2.4.6 Τυπικά Σφάλματα GMAW.[42]

Αστάθεια έναυσης τόξου (arc start instability): Η μη επιτυχής έναυση τόξου αποτελεί σύνθετο πρόβλημα της μεθόδου GMAW. Η εναπόθεση του μετάλλου δεν καθίσταται εφικτή και παρουσιάζει εκτοξεύσεις. Συνεπώς, η ραφή συγκόλλησης θα παρουσιάσει ανεπαρκές βάθος διείσδυσης με κακή ποιότητα επιφανείας. Η αδυναμία έναυσης του τόξου έχει ως άμεσο αντίκτυπο την επαφή του ηλεκτροδίου με το προς συγκόλληση τεμάχιο. Παράλληλα, το ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα και θερμαίνεται, γεγονός που το καθιστά αναλίσκόμενο. Επομένως, τα αναλίσκόμενα τμήματα ηλεκτροδίου, μεταφέρονται στο τηγμένο λουτρό υπό τη μορφή εκτοξεύσεων.

Εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter): Η πρόκληση εκτοξεύσεων οφείλεται σε ποικίλα αίτια. Το παρόν σφάλμα παρουσιάζεται, υπό την εκτέλεση εργασιών, που χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες παροχής ηλεκτροδίου και υψηλή τάση τόξου. Επίσης, αύξηση της προεξοχής του ηλεκτροδίου συνοδεύεται από αύξηση των εκτοξεύσεων. Έτερη αιτία εκτοξεύσεων συνιστά ο ελλιπής καθαρισμός της επιφανείας του μετάλλου. Η εκάστοτε συγκολλητική επιφάνεια πρέπει να καθαρίζεται από τυχούσες ακαθαρσίες, όπως έλαια, γράσα, υγρασία και στρώματα σκουριάς, πρότερα της συγκολλητικής διαδικασίας. Το σφάλμα των εκτοξεύσεων δύναται να παρουσιαστεί κι υπό τη δράση ανεπαρκούς παροχής αερίου προστασίας.

Πόροι (Porosity): Ακόλουθο σημαντικό σφάλμα των διαδικασιών GMAW αποτελεί η δημιουργία πόρων στο εσωτερικό, κυρίως, των τελικών ραφών. Η εμφάνιση των πόρων γίνεται με τη μορφή παγιδευμένων αέριων ακαθαρσιών (H₂, N₂, κτλ.).

Η κατεξοχήν αιτία δημιουργίας πόρων είναι η ανεπαρκής κάλυψη της λίμνης από το αέριο μείγμα προστασίας. Η διατήρηση της παροχής αερίου σε αποδεκτά-επιθυμητά επίπεδα, ο συχνός καθαρισμός του ακροφυσίου, ο συνεχής έλεγχος διαρροών και η κατάλληλη τοποθέτηση του ακροφυσίου, ως προς το τεμάχιο, αποτελούν ουσιαστικά διορθωτικά μέτρα για την αποφυγή πορώδους συγκόλλησης. Επιπροσθέτως, η επιλογή αερίου ακατάλληλου και ασύμβατου με τις επιδιωκόμενες συνθήκες συγκόλλησης (είδος υλικού, πάχος υλικού κτλ.) οδηγεί στην δημιουργία πορώδους. Όμοια με πριν, η επιφάνεια πρέπει να καθαρίζεται από ακαθαρσίες, προγενέστερα της διαδικασίας συγκόλλησης, διότι μπορεί να αποτελέσει αιτία σχηματισμού πορώδους. Η χρήση ηλεκτροδίων με υψηλή περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικές συνιστώσες καθίσταται άμεσα αποτελεσματική.

Ατελής τήξη (Incomplete fusion): Η ατελής τήξη αποτελεί υφιστάμενο σφάλμα μιας διαδικασίας GMAW. Ορίζεται ως η αδυναμία πλήρους σύντηξης του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης και οφείλεται σε ακαθαρσίες της επιφανείας καθώς και σε ανεπαρκή προσδιδόμενη θερμότητα. Η διόρθωση αυτών, δύναται να επέλθει με προγενέστερο καθαρισμό της επιφανείας, επιλογή υψηλότερης τάσης και πιο σωστής ρύθμισης της ταχύτητας παροχής ηλεκτροδίου. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής συγκόλλησης, καθορίζει, επίσης, άμεσα την ποιότητα της τελικής ραφής.

Ατελής διείσδυση (Lack of penetration): Ορίζεται ως ανεπαρκής βαθμός τήξης και σύνδεσης μεταξύ του μετάλλου βάσης και του προστιθέμενου μετάλλου. Σημαντική αιτία σφάλματος αποτελεί η ακατάλληλη προετοιμασία της συμβολής συγκόλλησης και η λανθασμένη εφαρμοζόμενη τεχνική. 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. Η διατήρηση σωστών παραμέτρων, όπως γωνίας πυρσού και προεξοχής ηλεκτροδίου, αποτελεί ένα μέτρο αποφυγής ατελούς διείσδυσης. Η προετοιμασία της διάταξης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται πρόσβαση στην βάση της συμβολής, ικανοποιητική προέκταση ηλεκτροδίου και κατάλληλα χαρακτηριστικά τόξου. Τέλος, η επιλογή υψηλότερων τιμών τάσεως και ταχύτητας παροχής ηλεκτροδίου καθώς και χαμηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης συμβάλλει στην αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας και συνεπώς στην αποφυγή σφαλμάτων ατελούς τήξης.

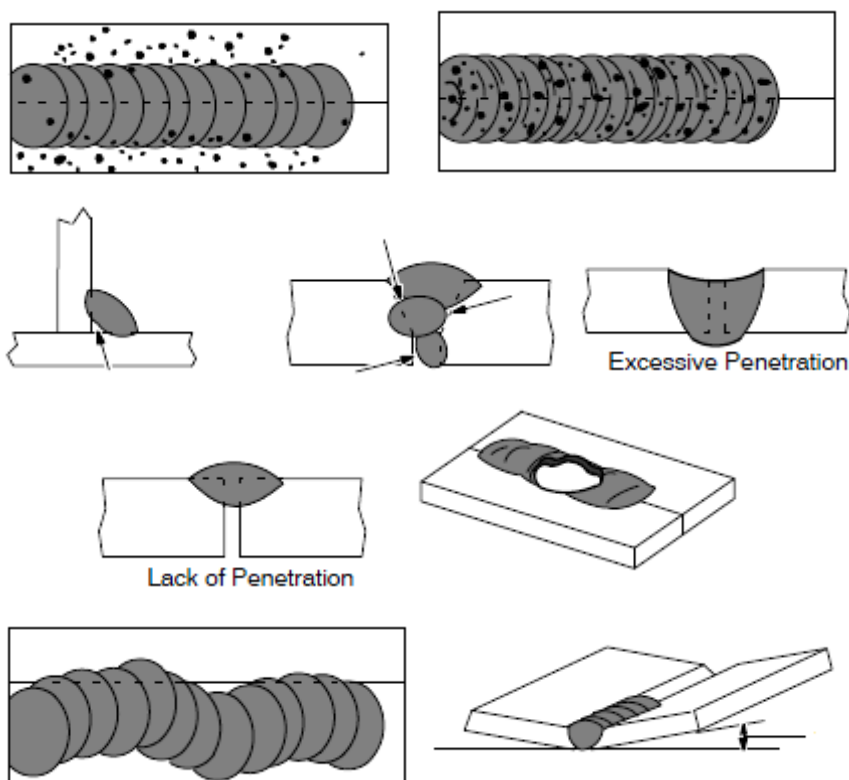
Υπερβολική διείσδυση (Excessive penetration): Παρουσιάζεται σε περιπτώσεις υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Αντιμετωπίζεται με εξασφάλιση χαμηλότερων τιμών τάσης και ταχυτήτων παροχής ηλεκτροδίου και υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης.

Επιμέρους σφάλματα της μεθόδου GMAW αποτελούν: το τρέξιμο μετάλλου (burn through), η ανώμαλη επιφάνεια όψης της ραφής και οι παραμορφώσεις. Το τρέξιμο μετάλλου αναφέρεται σε ασυνέχειες υλικού επί της ραφής, υπό τη μορφή τρυπών και λόγω υπερβολικής τήξης του μετάλλου συγκόλλησης. Βασική αιτία αποτελεί η υπερβολική πρόσδοση θερμότητας. Η ανώμαλη επιφάνεια όψης ραφής προκύπτει όταν το μέταλλο συγκόλλησης δεν είναι παράλληλο στην κεντρική γραμμή συγκόλλησης και δεν καλύπτει όλη τη ραφή. Συνήθως, το πρόβλημα οφείλεται σε μεγάλη προέκταση του ηλεκτροδίου ή σε κίνηση του πιστολιού λόγω αστάθειας του συγκολλητή κατά την χειροκίνητη συγκόλληση. Ακόμη, η εφαρμογή μεγάλων

ταχυτήτων κατά την συγκόλληση μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση υποκοπών, μεγάλης κυρτότητας και ανεπαρκούς πλάτους ραφής.

Οι παραμορφώσεις προκαλούνται από τη συστολή του μετάλλου συγκόλλησης, η οποία αναγκάζει σε κίνηση το μέταλλο βάσης. Η υπερβολική πρόσδοση θερμότητας συνιστά τον κύριο λόγο εμφάνισης παραμορφώσεων. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η πάκτωση του μετάλλου βάσης κατά τη συγκόλληση και η δημιουργία πόντας, μιας ή περισσοτέρων, κατά μήκος της ραφής, προγενέστερα του περάσματος ρίζας. Επίσης προτιμάται η επιλογή μικρότερων τάσεων τόξου και ταχυτήτων παροχής ηλεκτροδίου καθώς και η εξασφάλιση μεγαλύτερων ταχυτήτων συγκόλλησης.

Η εμφάνιση υπερκαλύψεων κατά την συγκόλληση μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ποιότητα και την αντοχή της. Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η γωνία του πυρσού και η ταχύτητα παροχής προστιθέμενου μετάλλου. Οι υπερκαλύψεις (cold laps or overlaps) προκύπτουν, όταν το τόξο αδυνατεί να τήξει επαρκώς το μέταλλο βάσης. Σε αυτή την περίπτωση, η τηγμένη λίμνη συγκόλλησης ρέει προς το ανέπαφο μέταλλο βάσης και το υπερκαλύπτει, χωρίς να προκληθεί συγκόλληση. Το φαινόμενο εκδηλώνεται συνήθως σε περιπτώσεις, που η λίμνη συγκόλλησης, καταλαμβάνει πολύ μεγάλη επιφάνεια. Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα, συνιστάται αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης ή ελάττωση της ταχύτητας παροχής προστιθέμενου μετάλλου, ώστε να περιοριστεί η έκταση της λίμνης συγκόλλησης.



Εικόνα 7.Εικονική παρουσίαση των σφαλμάτων εκτοξεύσεων, πόρων, ατελούς τήξης, ατελούς και υπερβολικής διείσδυσης, τρεξίματος μετάλλου, ανώμαλης επιφάνειας όψης ραφής και παραμορφώσεων [Miller 2012]

1.2.4.7 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα μεθόδου GMAW.[6],[31],[32]

Όπως η μέθοδος GTAW, έτσι και η GMAW αποτελεί αρκετά καθαρή διεργασία, όταν χρησιμοποιείται με προστασία αδρανούς αερίου. Το κυριότερο πλεονέκτημα της GMAW έναντι της GTAW είναι ο υψηλότερος ρυθμός εναπόθεσης υλικού, ιδιότητα που επιτρέπει τη συγκόλληση παχέων ελασμάτων σε υψηλές ταχύτητες. Ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού δύναται να αυξηθεί ,περαιτέρω, με τις τεχνικές διπλού πυρσού ή διπλού ηλεκτροδίου (dual torch or twin wire). Σημαντικός περιορισμός της μεθόδου, αποτελεί η απαίτηση διατήρησης σταθερού και μικρού τόξου, η οποία δυσχεραίνεται από τα ογκώδη, χρησιμοποιούμενα πιστόλια της GMAW. Σε γενικότερα πλαίσια, τα πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της μεθόδου παρατίθενται αντιστοίχως κάτωθεν:

- Δυνατότητα συγκόλλησης ιδιαίτερα υψηλού εύρους, είδους και πάχους υλικών.
- Τα επιμέρους εξαρτήματα του εξοπλισμού μιας διάταξης GMAW, είναι άμεσα διαθέσιμα και οικονομικώς προσιτά.
- Η μέθοδος παρουσιάζει υψηλότερη αποδοτικότητα ηλεκτροδίων, συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους συγκόλλησης. (93-98%)
- Συμβατή με ημι-αυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων.
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Συνοδεύεται από εξαιρετική όψη ραφής.
- Παρουσιάζει χαμηλά ποσοστά υδρογόνου επί της μικροδομής της συγκόλλησης. Μικρότερα της τάξης των 5mL/100g .
- Παρουσιάζει χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων και στρωμάτων σκουριάς, τα οποία με τη σειρά τους καθιστούν τις διαδικασίες καθαρισμού άμεσα ολοκληρώσιμες.
- Χαμηλότερο επίπεδο αναθυμιάσεων σχετικά με τις SMAW και FCAW.

Στην αντίθετη πλευρά,

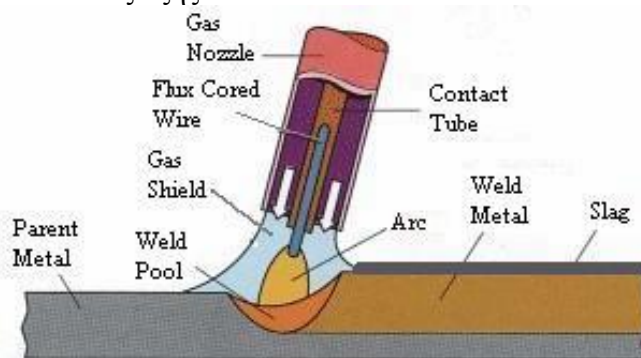
- Η χαμηλότερη προσδιδόμενη θερμότητα, επί της μεθόδου μεταφοράς μετάλλου με βραχυκύκλωση, περιορίζει την εφαρμογή της σε λεπτά ελάσματα.
- Η υψηλότερη προσδιδόμενη θερμότητα, επί της μεθόδου μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια, περιορίζει την εφαρμογή της σε παχιά ελάσματα.
- Η υψηλότερη προσδιδόμενη θερμότητα, επί της μεθόδου μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια, περιορίζει την εφαρμογή της σε επίπεδες και οριζόντιες συγκολλητικές θέσεις.
- Η χρήση αέριων μειγμάτων προστασίας, με βάση το αργό, καθίσταται δαπανηρή σε σχέση με 100% CO₂, για τις μεθόδους παλμικής και μη μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια.

1.2.5 Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (FCAW).

1.2.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου. [2], [4],[6],[44],[49],[50]

Η μέθοδος FCAW αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου GMAW, με τις 2 διαδικασίες να παρουσιάζουν ποικίλα πανομοιότυπα χαρακτηριστικά, αλλά και συγκεκριμένες θεμελιώδεις διαφορές. Η εκάστοτε διεργασία FCAW εκμεταλλεύεται τη θερμότητα, όπως όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι, ενός ηλεκτρικού τόξου, προκειμένου να γίνει η συνένωση της συμβολής ενός μετάλλου βάσης και ενός μετάλλου προσθήκης. Το

ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός, συνεχώς, τροφοδοτούμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Στην περιοχή του τόξου δύναται να παρέχεται αέριο μείγμα για λόγους προστασίας της λίμνης συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Ειδοποιός διαφορά της μεθόδου FCAW συνιστά η χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων με πυρήνα προστατευτικής σκόνης. Η σκόνη πυρήνα επιτελεί διάφορες λειτουργίες όπως αποξείδωση, κραμάτωση και σχηματισμό προστατευτικών στρωμάτων οξειδίων (σκουριάς). Δευτερεύουσα διαφορά αποτελεί και το γεγονός ότι, η σκόνη εγκλείεται από ένα μεταλλικό περίβλημα και δεν περικλείει ένα μεταλλικό πυρήνα γεγονός, που ευνοεί τη μηχανοποίηση της συγκολλητικής διαδικασίας με την εφαρμογή συνεχούς τροφοδοσίας ηλεκτροδίου. Το μέταλλο συγκόλλησης προστατεύεται τόσο από τη σκόνη, όσο και από το επιλεγόμενο αέριο μέσο. Η περιοχή συγκόλλησης δύναται να αναπαρασταθεί εικονικά ως εξής:



Εικόνα 8. Περιοχή συγκόλλησης FCAW. [EWF 2007]

Η μέθοδος FCAW είναι απολύτως συμβατή με ημιαυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η συγκολλητική διάταξη του E.N.T, που αποτελεί πλήρως αυτοματοποιημένο μέσο, υλοποιεί τη μέθοδο FCAW στο πειραματικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η μεταφορά του μετάλλου επέρχεται όπως και στη μέθοδο GMAW με τις μεθόδους:

- Βραχυκύκλωσης (Short-circuiting).
- Σταγόνων (Globular).
- Σταγονιδίων (Axial Spray).

Η σκόνη του πυρήνα σχηματίζει ένα τηγμένο στρώμα σκουριάς με την έναυση του τόξου. Το τόξο προστατεύεται από ένα αέριο μέσο που παράγεται κατά τη διαδικασία αποσύνθεσης της σκόνης. Υφίσταται, επίσης, η δυνατότητα παροχής προστατευτικού αερίου από εξωτερική πηγή, όταν κρίνεται σκόπιμο.

Η χρήση συνεχούς ρεύματος καθίσταται μονόδρομος για μια διαδικασία FCAW. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται μηχανές συγκόλλησης συνεχούς ρεύματος και σταθερής τάσης³ με χαρακτηριστικά εξαγωγής υψηλότερα, συγκριτικά με τη μέθοδο GMAW. Για ημι-αυτοματοποιημένες διαδικασίες, συνήθεις τιμές έντασης ρεύματος θεωρούνται τιμές, που κυμαίνονται στην περιοχή των 400-600A, ενώ οι αντίστοιχες εντάσεις ανέρχονται, ακόμη και στην τιμή των 1000A, για τις περιπτώσεις μηχανών συγκόλλησης πλήρως αυτοματοποιημένων διατάξεων. Η τροφοδοσία ηλεκτροδίου γίνεται με τη βοήθεια «κουλούρας» σύρματος, με σκοπό να αποφευχθεί ενδεχόμενη σύγκρουση του ηλεκτροδίου με το προς συγκόλληση τεμάχιο. Τέλος, οι υδρόψυκτοι πυρσοί χρησιμοποιούνται για τις περιπτώσεις συγκολλήσεων με απαιτήσεις ρεύματος υψηλότερες των 300A και προστασία μειγμάτων αερίου με βάση το αργό.

Με γνώμονα τη προστασία αερίου, όπως προαναφέραμε, η διαδικασία δύναται να επιτευχθεί με δυο τρόπους ως εξής:

³ Κυρίως, μηχανές συγκόλλησης σταθερής τάσεως με κλίση (slope) και έλεγχο επαγωγής. (Σχήμα 19)

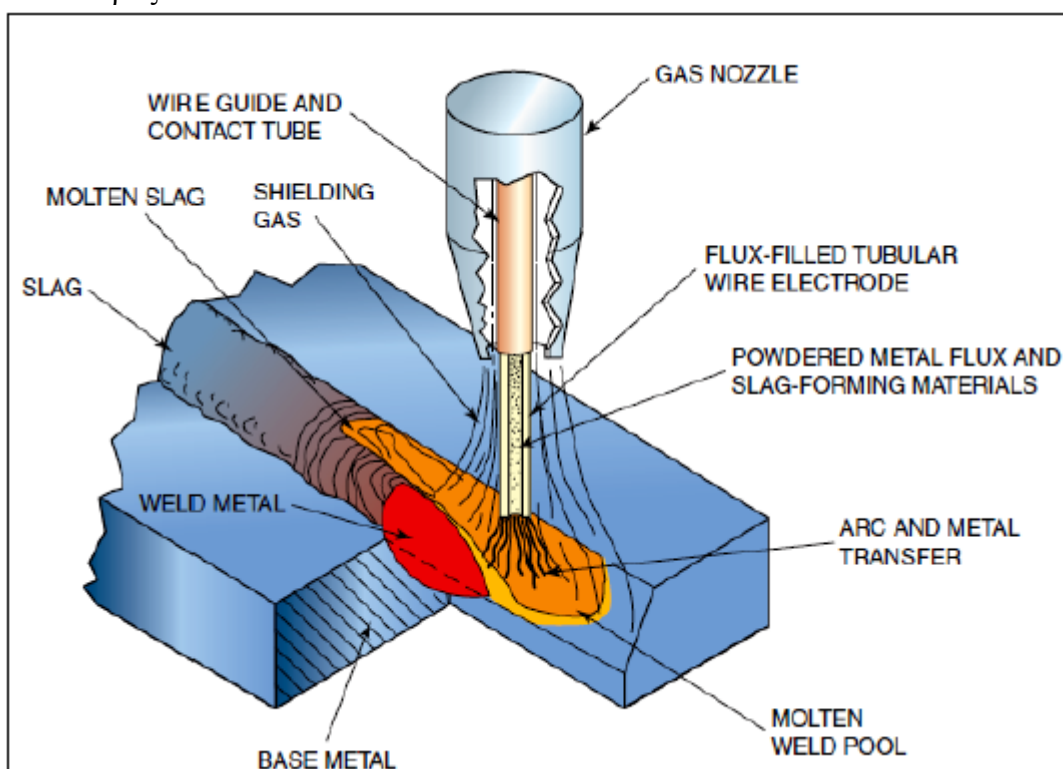
- Με επιπρόσθετη εξωτερική παροχή αερίου προστασίας.
- Με παραγωγή προστατευτικού αερίου από την αποσύνθεση συνιστωσών της σκόνης του ηλεκτροδίου.

Τα προστατευόμενα σύρματα ηλεκτροδίων είναι διαθέσιμα με ενίσχυση ρουτιλίου ή φθοριούχου ασβέστη, ενώ τα αυτό-προστατευόμενα έχουν, ως επί το πλείστον, σκόνη βασικού τύπου. Το είδος της προστατευτικής σκόνης καθορίζει μονοσήμαντα, τον τρόπο συμπεριφοράς του ηλεκτροδίου, τις αποκτηθείσες ιδιότητες της συγκόλλησης και τις συμβατές εφαρμογές.

Η πρώτη παραλλαγή είναι γνωστή ως, μέθοδος FCAW με χρήση προστατευτικού αερίου ή FCAW-G (Gas shielded FCAW). Υφίσταται, λοιπόν, χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων με πυρήνα προστατευτικής σκόνης και προστασία αερίου, δηλαδή διπλή προστασία. Σε ένα σωληνοειδές ηλεκτρόδιο, που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές της FCAW-G, το μεταλλικό περίβλημα είναι λεπτότερο από το αντίστοιχο ενός αυτό-προστατευόμενου σωληνοειδούς ηλεκτροδίου. Επιπλέον, η επιφάνεια του μεταλλικού περιβλήματος είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη ενός συμπαγούς MIG ηλεκτροδίου. Αυτή η ιδιότητα του σωληνοειδούς ηλεκτροδίου δικαιολογεί την υψηλή ηλεκτρική αντίσταση τους και κατ' επέκταση τις εξαιρετικές ιδιότητες τους. Επίσης, η συγκεκριμένη παραλλαγή συνοδεύεται από υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης υλικού. Η συγκεκριμένη ιδιότητα δικαιολογείται με τον εξής ακόλουθο τρόπο: εάν ένα συμπαγές ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται με ένταση 250A, ένα σωληνοειδές ηλεκτρόδιο ίδιας διαμέτρου και σταθερών συγκολλητικών παραμέτρων, θα χρησιμοποιηθεί για εντάσεις αρκετά χαμηλότερες των 250A. Ο νόμος του Ohm επιβεβαιώνει το άνωθεν γεγονός, καθώς σημειώνει ότι μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης, υπό σταθερή τάση, ακολουθείται από μείωση της τιμής έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Επαναφορά, λοιπόν, στην τιμή των 250A δύναται να επέλθει με αύξηση της ταχύτητας παροχής του ηλεκτροδίου, που ισοδυναμεί με αύξηση της παρεχόμενης ποσότητας μετάλλου συγκόλλησης, στη λίμνη συγκόλλησης. Επιπροσθέτως, συνηθίζεται η μέθοδος G-FCAW να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερο μήκος τόξου από τη συμβατική μέθοδο συμπαγών ηλεκτροδίων. Συνεπώς, υφίσταται αύξηση της θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση, που συνοδεύεται από μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος. Μολαταύτα, χρειάζεται να αναφερθεί ότι, έρευνες έχουν συνάγει πως, αύξηση του μήκους τόξου οδηγεί σε αύξηση της προσρόφησης υδρογόνου και αζώτου στη λίμνη συγκόλλησης, γεγονός που επιδρά ποικιλοτρόπως στην ποιότητα της συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια της συγκεκριμένης παραλλαγής παρουσιάζουν αποδοτικότητα της τάξης του 75-85%. Μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η θωράκιση της, για τις περιπτώσεις διακοπής παροχής του αερίου προστασίας από τον άνεμο. Γενικότερα, η FCAW-G χρησιμοποιείται για στενές συμβολές, για μικρές γωνίες λοξοτομών και για στενά ανοίγματα ρίζας. Η γωνία συμβολής των προς συγκόλληση τεμαχίων, καθίσταται κατάλληλη, όταν μπορεί να γίνεται προσιτή για την εκάστοτε προέκταση ηλεκτροδίου και το εκάστοτε ακροφύσιο. Οι απαιτήσεις προστασίας για απάνεμες διαδικασίες, κυμαίνονται στα επίπεδα των 30-40 ft³/h (14-19 L/min), ενώ αντιθέτως η απαίτηση παροχής όγκου ανέρχεται στα 55 ft³/h (26 L/min).

Εν αντιθέσει, η δεύτερη παραλλαγή χρησιμοποιείται με προστασία αερίου, η οποία παρέχεται από την αποσύνθεση συγκεκριμένων συστατικών μερών της σκόνης, που περιέχεται στον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Είναι διεθνώς γνωστή υπό την ονομασία S-FCAW (Self-shielded FCAW) ή αυτό-προστατευόμενη συγκόλληση σωληνοειδών ηλεκτροδίων. Η παραγόμενη θερμότητα του τόξου τήκει το ηλεκτρόδιο, ενώ η σκόνη αποσυντιθέμενη λαμβάνει το ρόλο προστασίας της λίμνης και σχηματισμού ουσιών αποξείδωσης και διαμορφωτών νιτριδίου. Η αυτό-προστατευόμενη μέθοδος FCAW-S χρησιμοποιείται κυρίως, σε κατασκευές εξωτερικού χώρου, όπου η παρουσία ανέμων

επηρεάζει την παροχή προστατευτικού αερίου. Η αποδοτικότητα των ηλεκτροδίων κυμαίνεται στην τάξη του 65%. Η χρήση της αυτό-προστατευόμενης FCAW καθιστά το κέλυφος του ακροφυσίου μη αναγκαίο για τη διαδικασία. Ωστόσο, προτιμάται για τις περιπτώσεις μεγάλων προεξοχών ηλεκτροδίου, η χρήση διάταξης προέκτασης του ακροφυσίου, προκειμένου να επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης. Σε γενικά πλαίσια, η αυτό-προστατευόμενη μέθοδος παρέχει συγκολλήσεις όπου οι εναποθέσεις μετάλλου χαρακτηρίζονται από χαμηλή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα συγκριτικά με τη μέθοδο FCAW με χρήση προστατευτικού αερίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, το επίπεδο των αντιοξειδωτικών παραγόντων, όπως τα Al και Ti, στην πρώτη μέθοδο είναι υψηλότερο, με αποτέλεσμα να ευνοείται ο σχηματισμός μπαινιτικής δομής και να επηρεάζεται άμεσα η σκληρότητα της συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια της αυτό-προστατευόμενης μεθόδου χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές ενίσχυσης της σκληρότητας επιφανειών με επικάλυψη καρβιδίων βολφραμίου (hardfacing). Η FCAW-S επιτυγχάνει μικρότερη διείσδυση από την FCAW-G, γεγονός που καθιστά εύλογη τη χρήση της μεθόδου με μεγαλύτερες γωνίες συμβολής. Στις περιπτώσεις επίπεδων συγκολλήσεων χωρίς επικαλύπτρα, οφείλει να δίνεται σημαντική προσοχή στο βαθμό τήξης και διείσδυσης στη ρίζα. Ομοίως, σε συγκολλήσεις με επικαλύπτρα το άνοιγμα στη ρίζα οφείλει να είναι επαρκές προκειμένου να ευνοεί τέλεια τήξη. Για τις περιπτώσεις κατακόρυφων συγκολλήσεων παχέων ελασμάτων ($\geq 19\text{mm}$), η ρίζα προτιμάται να εναποτίθεται με φορά προς τα κάτω (downhill), όταν συνοδεύεται από απουσία επικαλύπτρας και με φορά προς τα άνω, όταν χρησιμοποιείται με τη βοήθεια επικαλύπτρας.

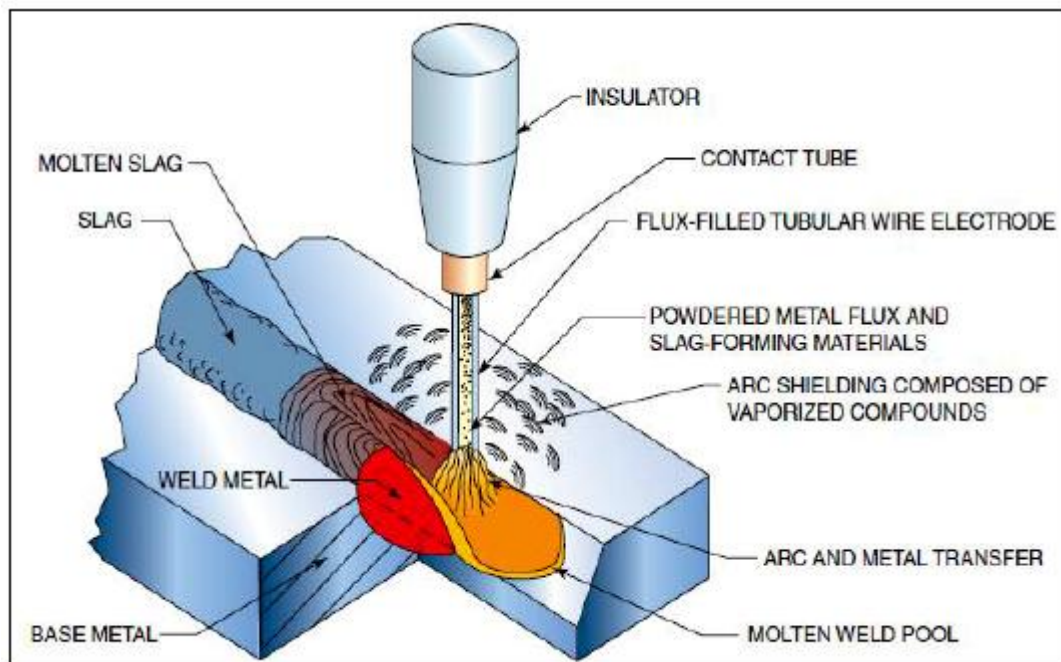


Εικόνα 9. FCAW με προστασία αερίου (Gas shielded FCAW)
[Jeffus & Bower 2009]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της αυτό-προστατευόμενης μεθόδου σωληνοειδών ηλεκτροδίων συνοψίζονται ως εξής:

- Ο ρυθμός εναπόθεσης μετάλλου είναι τέσσερις φορές υψηλότερος από τον αντίστοιχο της μεθόδου SMAW για τις ίδιες συγκολλητικές παραμέτρους.

- Εμφανίζει ιδιαίτερα χαμηλό επίπεδο ρωγματώσεων για συνήθεις διαδικασίες συγκολλήσεων, μέτρια κραματομένων χαλύβων.
- Παρουσιάζει υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας για ημι-αυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες καθώς και για μεγάλο εύρος προϊόντων.



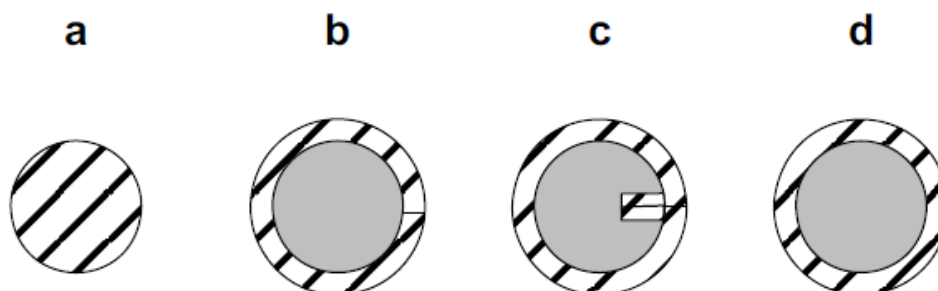
Εικόνα 10.Αυτο-προστατευόμενη μέθοδος FCAW (Self shielded FCAW)
[Jeffus & Bower 2009]

Ακολουθώς, αναλογιζόμενοι την επίδραση των επιμέρους παραμέτρων ισχύουν τα εξής: αύξηση της έντασης του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης μετάλλου και της διείδυσης. Αντιθέτως, χαμηλές τιμές ρεύματος συνοδεύονται από αυξημένο ποσοστό εκτοξεύσεων και μεταφορά μετάλλου υπό τη μορφή ευμεγεθών σταγόνων. Ομοίως, αύξηση της τάσης τόξου έχει ως αντίκτυπο πλατιά κι ακανόνιστη όψη ραφής καθώς και εκτεταμένη εμφάνιση εκτοξεύσεων μετάλλου. Συνηθισμένο σφάλμα της FCAW- S, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με υψηλές τιμές τάσεων, συνιστά η υψηλή προσρόφηση αζώτου στη μικροδομή της συγκόλλησης. Οι χαμηλές τιμές τάσεων, συνήθως αποφεύγονται, καθώς συνοδεύονται από αντίστοιχα χαμηλό βάθος διείδυσης. Η προεξοχή του ηλεκτροδίου οφείλει να διατηρείται σε βέλτιστο μήκος, χάριν σταθερότητας του τόξου και απουσίας εκτοξεύσεων. Όσον αφορά την ταχύτητα συγκόλλησης, μικρές τιμές οδηγούν στην εμφάνιση τρεξίματος μετάλλου σε λεπτά ελάσματα, λόγω υπερθέρμανσης του μετάλλου βάσης. Οι παραμορφώσεις, επίσης, οφείλουν την εμφάνιση τους σε χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Απεναντίας οι ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες επιδρούν αρνητικά, στην όψη της ραφής και στο βάθος διείδυσης. Η βέλτιστη γωνία ηλεκτροδίου, αναφορικά με τη διεύθυνση της ραφής, κυμαίνεται μεταξύ 5° - 15° για τη μέθοδο FCAW με προστασία αερίου και 20° - 45° για την αυτό-προστατευόμενη μέθοδο σωληνοειδών ηλεκτροδίων.

1.2.5.2 Ηλεκτρόδια.[47],[49],[50],[51],[52],[53],[54]

Η παρούσα μέθοδος ενσωματώνει στη διαδικασία συγκόλλησης τη χρησιμοποίηση σωληνοειδών ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από μεταλλικό, κυλινδρικό εξωτερικό περίβλημα, παρόμοιας χημικής σύστασης με του μετάλλου βάσης και από πυρήνα προστατευτικής σκόνης. Η σύσταση της σκόνης εξαρτάται από παράγοντες

όπως η κατηγοριοποίηση του ηλεκτροδίου και οι προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια παρουσιάζουν πολλαπλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα συμπαγή. Τα κυριότερα εξ' αυτών είναι: υψηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης εξαιτίας της υψηλότερης πυκνότητας ρεύματος των σωληνοειδών ηλεκτροδίων, η προσθήκη κραματικών στοιχείων δια μέσω της σκόνης, προστασία της λίκνης με τη συνδρομή των σχηματιζόμενων στρωμάτων οξειδίων (σκουριάς), ενισχυμένη σταθερότητα του τόξου, μεγαλύτερη ανοχή σε επιφάνειες μετάλλου βάσης με παρουσία ακαθαρσιών και εν τέλει, απαίτηση για λιγότερο εξειδικευμένο προσωπικό. Η διαδικασία χημικής αποσύνθεσης της προστατευτικής σκόνης δρα αντιοξειδωτικά και καθαριστικά για την εναπόθεση του μετάλλου συγκόλλησης. Ο σχηματισμός προστατευτικών στρωμάτων οξειδίων της λίκνης συγκόλλησης ακολουθεί τη διαδικασία χημικής αποσύνθεσης και λαμβάνει χώρα με τη στερεοποίηση του λουτρού συγκόλλησης. Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια επιτυγχάνουν ελαχιστοποίηση των επιπέδων (spatter) εκτοξεύσεων και βελτιωμένη όψη ραφής, καθ' όλο το μήκος της, λόγω σταθερότητας τόξου και συστατικών μερών της σκόνης του πυρήνα, αντίστοιχα. Εύλογα, λοιπόν, οδηγούν σε συγκολλήσεις μικρότερου πορώδους.



Σχήμα 10.Εγκάρσιες τομές συνήθων σωληνοειδών ηλεκτροδίων - a) συμπαγές ηλεκτρόδιο, b, c, d) σωληνοειδή ηλεκτρόδια [Pires 2005].

Εν κατακλείδι, παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά σε συγκολλήσεις χαλύβδινων σωληνώσεων 360°.

Οι σημαντικότεροι περιορισμοί στη χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων έγκεινται στο υψηλό ποσοστό των παραγόμενων αναθυμιάσεων, οι οποίες θεωρούνται τοξικές, καθώς και στην ανάγκη αφαίρεσης των στρωμάτων σκουριάς για τις περιπτώσεις πολλαπλών περασμάτων. Επιπροσθέτως, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος από τα αντίστοιχα συμπαγή, γεγονός όμως, που αντισταθμίζεται από τη μείωση εργατικού κόστους, λόγω υψηλότερων ρυθμών τήξης των σωληνοειδών ηλεκτροδίων.

Η σκόνη των ηλεκτροδίων είναι στεγανά κλεισμένη στο εσωτερικό τους. Ένας τρόπος παραγωγής τους, περιλαμβάνει πρώτα την δημιουργία ενός λεπτού ελάσματος σε σχήμα U. Έπειτα, μετρημένη ποσότητα σκόνης διοχετεύεται στο διαμορφωμένο μέταλλο και συμπιέζεται. Εν συνέχεια, το έλασμα σχήματος U περνάει από μία σειρά ραούλων προκειμένου να πάρει το τελικό του σχήμα και η σκόνη να σφραγιστεί στο εσωτερικό του. Μία δεύτερη μέθοδος παραγωγής σωληνοειδών ηλεκτροδίων ξεκινά με σωλήνα χωρίς ραφές. Ο σωλήνας έχει, συνήθως, διάμετρο 2.54 cm (1 in). Το ένα άκρο του σωλήνα είναι σφραγισμένο, ενώ η σκόνη διοχετεύεται από το ανοιχτό άκρο. Ο σωλήνας υφίσταται ταλαντώσεις κατά το γέμισμα, προκειμένου να εξασφαλιστεί 100% πληρότητα με σκόνη. Μόλις ο σωλήνας γεμίσει, σφραγίζεται το ανοιχτό άκρο

και όλο το σύστημα διέρχεται από μία σειρά ραούλων με σκοπό να πάρει το τελικό του σχήμα.

Και στις δύο μεθόδους παραγωγής σωληνοειδών ηλεκτροδίων, το έλασμα και ο σωλήνας, κατασκευάζονται από το ενδιαφερόμενο κράμα. Επίσης, και στις δύο περιπτώσεις, η σκόνη σφραγίζεται στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου. Η στεγανοποίηση της σκόνης συμβάλλει στην πιο ομαλή και σταθερή λειτουργία του ηλεκτροδίου. Τα ηλεκτρόδια διατίθενται σε διαμέτρους από 0.8mm έως 3.9mm. Τα μικρότερα είναι πολύ πιο ακριβά λόγω του ότι η διαδικασία γέμισης των ηλεκτροδίων με σκόνη είναι ακριβότερη στις μικρότερες διαμέτρους. Τα ηλεκτρόδια μεγαλύτερης διαμέτρου παράγουν πολύ μεγάλες ραφές, που δεν μπορούν να ελεγχθούν σε όλες τις θέσεις.

Τα κυριότερα στοιχεία του πυρήνα και οι λειτουργίες, που επιτελούν, παρατίθενται ακολούθως:

- ❖ Το τιτάνιο (Ti), το πυρίτιο (Si), το αλουμίνιο (Al) και το ζirkόνιο (Zr) αποτελούν στοιχεία του πυρήνα, που δρουν ενάντια στην οξειδωση. Λαμβάνουν, δηλαδή, να διαδραματίζουν το ρόλο της αποξειδωσης της λίμνης συγκόλλησης.
- ❖ Το ασβέστιο (Ca) είναι υπεύθυνο για την προστασία της λίμνης και το σχηματισμό του στρώματος σκουριάς.
- ❖ Ο άνθρακας (C) ενισχύει την αντοχή και τη σκληρότητα της ραφής συγκόλλησης.
- ❖ Η ύπαρξη χρωμίου (Cr) συνοδεύεται από το προσδιδόμενο χαρακτηριστικό της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση.
- ❖ Ο σίδηρος (Fe) αποτελεί δευτερεύουσα πηγή εναπόθεσης μετάλλου.
- ❖ Το μαγγάνιο (Mn) επιδρά κυρίως ως αντιοξειδωτική ουσία και αποτελεί τροχοπέδη στη ψαθυρή θραύση μετάλλων, κατά τη διενέργεια θερμικών κατεργασιών (hot shortness), όπως η έλαση.
- ❖ Το μολυβδαίνιο (Mo) και το νικέλιο (Ni) συνδράμουν ως προστιθέμενα κραματικά στοιχεία.
- ❖ Το νάτριο (Na) και το κάλιο (K) επενεργούν κυρίως ως σταθεροποιητές τόξου και δευτερεύοντως, ως διαμορφωτές σκουριάς.

Η προστατευτική σκόνη που χρησιμοποιείται στην μέθοδο FCAW έχει ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες και στόχους με την σκόνη των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της μεθόδου SMAW. Δηλαδή, παρέχει στην συγκόλληση τα παρακάτω:

- ❖ Αποξειδωτικά μέσα (deoxidizers), τα οποία ενώνονται με το ελεύθερο οξυγόνο από την διάσπαση του CO₂ και σχηματίζουν αβλαβείς ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές είτε γίνονται μέρος της προστατευτικής σκουριάς και επιπλέουν ή σχηματίζουν πολύ μικρά εγκλείσματα. Σε κάθε περίπτωση, η δέσμευση του οξυγόνου με αυτόν τον τρόπο, ελαττώνει την εμφάνιση πόρων και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.
- ❖ Διαμορφωτές σκουριάς (slag formers), οι οποίοι 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.
- ❖ Στοιχεία βελτίωσης ροής (fluxing agents), τα οποία αυξάνουν τη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης και ευνοούν την κίνηση της προς τις παρειές, ώστε να μην δημιουργούνται σφάλματα υποκοπών.
- ❖ 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 διείδυση, η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου καθώς και το παραγόμενο ποσοστό εκτοξεύσεων.

- ❖ *Κραματικά στοιχεία (alloying elements)*, 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.
- ❖ *Αέρια προστασία (shielding gas)*, η οποία εξασφαλίζεται από την ατμοποίηση των συστατικών μερών της σκόνης. Με την διαδικασία ατμοποίησης δημιουργείται νέφος προστασίας ,μεγάλου όγκου, που προστατεύει τη συγκόλληση από τυχούσα οξείδωση.

Η τυποποίηση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων ,κατά AWS, για τις συγκολλήσεις ανθρακο-μαγγανιούχων χαλύβων κατατίθεται με τη βοήθεια του εξής ορισμού:

E x x T - πχ E 5 0 T - 8

όπου:

- Το πρώτο γράμμα E υποδεικνύει την ύπαρξη ηλεκτροδίου.
- Στη δεύτερη θέση εισάγεται αριθμός, που υποδηλώνει την αντοχή του ηλεκτροδίου σε εφελκυσμό, σε ksi, εφόσον πολλαπλασιαστεί με ένα παράγοντα x10.
- Στην τρίτη θέση εισάγεται είτε η αριθμητική τιμή 0 ή η αριθμητική τιμή 1, προς υπόδειξη της θέσης συγκόλλησης, με την οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρόδιο. Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε επίπεδες και οριζόντιες θέσεις, ενώ η τιμή 1 αντικατοπτρίζει όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Το γράμμα T υποδεικνύει σωληνοειδές ηλεκτρόδιο.
- Το τελευταίο ψηφίο υποδηλώνει τη συγκολλητικότητα και τη ικανότητα απόδοσης. Στο άνωθεν παράδειγμα, το τελευταίο ψηφίο υποδηλώνει την υψηλή αντίσταση σε ρωγματώσεις και υψηλή σκληρότητα εγκοπών στους -15°C .

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.

1.2.5.3 Αέρια Προστασίας,[46],[47],48]

Η μέθοδος σωληνοειδών ηλεκτροδίων με χρήση προστατευτικού αερίου FCAW-G αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη συγκολλητική διαδικασία στη ναυπηγική, και όχι μόνο, βιομηχανία. Τα κυριότερα μείγματα προστατευτικού αερίου που εφαρμόζονται επί της μεθόδου είναι: 100% CO_2 και μείγματα Ar/CO_2 με αναλογίες 75%-82% και 18%-25% αντίστοιχα. Το εκάστοτε αέριο προστασίας εξέρχεται του ακροφυσίου και εκτοπίζει τον ατμοσφαιρικό αέρα, δημιουργώντας ένα στρώμα προστασίας πάνω από τη λίμνη συγκόλλησης.

Αέρια ,όπως το CO_2 και το Ar , αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο όταν εκτίθενται στη θερμότητα, που παράγεται εκ του τόξου συγκόλλησης. Κρίνεται επιβεβλημένη, λοιπόν, η παράθεση αυτών των διαφορών και ο βαθμός επίδρασης τους στο μέταλλο εναπόθεσης και τις ιδιότητες του.

Το δυναμικό ιονισμού μας υποδεικνύει το απαιτούμενο ποσό ενέργειας, προκειμένου να ιονιστεί το αέριο, καθιστώντας το, επομένως, ηλεκτρικά αγωγίμο.Όσο χαμηλότερο είναι το δυναμικό ιονισμού, τόσο ευκολότερα λαμβάνει χώρα η έναυση του τόξου και η διατήρηση της σταθερότητας του. Το δυναμικό ιονισμού για το CO_2 είναι 14.4 eV, ενώ για το Ar 15.7 eV. Συνεπώς, το CO_2 προτιμάται για καλύτερη έναυση τόξου.

Η θερμική αγωγιμότητα ενός αερίου συνιστά τη δυνατότητα του να άγει δια μέσω του ίδιου θερμική ενέργεια. Η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζει ,πρωτίστως, τη μέθοδο μεταφοράς τηγμένου μετάλλου και δευτερευόντως τη μορφή του τόξου, τη διεύθυνση και την κατανομή της θερμοκρασίας στη περιοχή επίδρασης του τόξου. Το διοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και από το αργό αλλά και από μείγματα Ar/CO₂.

Ο βαθμός αντίδρασης αναφέρεται ,στο κατά πόσο ένα προστατευτικό αέριο, αντιδρά χημικά με τη λίμνη συγκόλλησης. Τα αδρανή ή ευγενή αέρια παρουσιάζουν μηδενικό βαθμό αντίδρασης, καθώς δεν αντιδρούν με κανένα στοιχείο του τηγμένου λουτρού. Τα ενεργά αέρια, αντιθέτως, αντιδρούν χημικά με στοιχεία της λίμνης. Το αργό είναι αδρανές αέριο. Το CO₂ σε θερμοκρασία δωματίου είναι αδρανές, επίσης. Ωστόσο υπό την επίδραση του πλάσματος τόξου, το CO₂ διασπάται σχηματίζοντας μονοξείδιο του άνθρακα, δι-ατομικό και μονό-ατομικό οξυγόνο. Επομένως, το διοξείδιο του άνθρακα καθίσταται αυτόματα ενεργό αέριο, σχηματίζοντας οξείδια και επιτρέποντας χημικές αντιδράσεις των ελεύθερων ατόμων οξυγόνου με στοιχεία της λίμνης συγκόλλησης. Ένα μείγμα Ar/CO₂ είναι ενεργό μείγμα, αλλά παρουσιάζει μικρότερο βαθμό χημικής αντίδρασης από το CO₂.

Τα αδρανή αέρια, δεν αποτελούν λύση προστασίας για τις διαδικασίες FCAW-G φερριτικών ή σιδηρούχων μετάλλων βάσης όπως οι μαλακοί χάλυβες, οι ανοξείδωτοι και οι μικρό-κραματωμένοι. Η χρήση καθαρού αργού στην προστασία συγκόλλησης μαλακών χαλύβων οδηγεί σε ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά όπως, υπερβολικό μήκος τόξου και πρόωρη τήξη του εξωτερικού περιβλήματος χαλύβδινων ηλεκτροδίων. Η δημιουργία ενός ευρέος και ασταθούς τόξου οδηγεί σε υπερβολική συσσώρευση του μετάλλου συγκόλλησης στη ραφή. Συνάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι ένα μείγμα αδρανούς και ενεργού αερίου αποτελεί τη βέλτιστη λύση προστασίας.

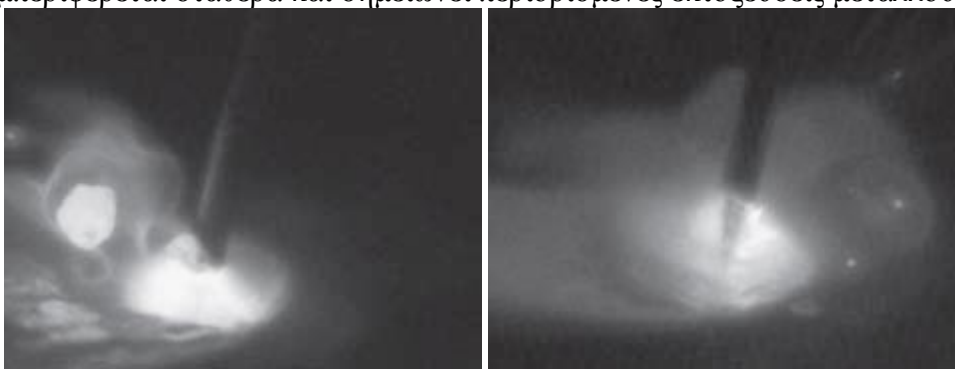
Τα πλέον συνήθη μείγματα προστασίας για εφαρμογές κοινών χαλύβων είναι 75%-25% Ar/CO₂ και 80%-20% Ar/CO₂. Μια λιγότερο διαδεδομένη λύση προστασίας αποτελεί το μείγμα 90%-10% Ar/CO₂. Η μείωση του ποσοστού του Ar σε επίπεδα χαμηλότερα του 75% σημειώνει μειωμένη επίδραση στα χαρακτηριστικά του τόξου, διατηρώντας παράλληλα το κόστος κτήσης του αερίου σε υψηλά επίπεδα, λόγω της υπάρχουσας επιβάρυνσης κόστους του Ar. Μολαταύτα, η χρήση μειγμάτων Ar/CO₂ παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη παραγωγή αναθυμιάσεων από την καθαρή χρήση CO₂.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης, και λόγω του ενεργού χαρακτήρα του CO₂, σημειώνονται πολύ υψηλότερα επίπεδα ανάκτησης κραματικών στοιχείων του ηλεκτροδίου στο μέταλλο συγκόλλησης, με χρήση μείγματος Ar/CO₂. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το CO₂ αντιδρά με κραματικά στοιχεία προκειμένου να σχηματίσει οξείδια, τα οποία σε συνδυασμό με εμπεριεχόμενα οξείδια της σκόνης δημιουργούν το προστατευτικό στρώμα σκουριάς. Ακολουθώς, η σκόνη του πυρήνα περιέχει αντιδρώντα στοιχεία, όπως το μαγγάνιο και το πυρίτιο, τα οποία δρουν και ως αποξειδωτικά μέσα. Ένα τμήμα αυτών των στοιχείων αντιδρά ή οξειδώνεται με τα ελεύθερα άτομα οξυγόνου, που προκύπτουν από τη διάσπαση του CO₂, καταλήγοντας έτσι στο στρώμα σκουριάς και όχι στο μέταλλο συγκόλλησης. Επομένως, υψηλότερα ποσοστά Mn και Si, υπό την προστασία Ar/CO₂, οδηγούν σε μεγαλύτερη προσθήκη αυτών των κραματικών στοιχείων στη δομή του μετάλλου συγκόλλησης. Η ύπαρξη των στοιχείων Mn και Si στη δομή του εναποτιθέμενου μετάλλου επιδρά θετικά στην αντοχή της συγκόλλησης, ενώ παράλληλα μειώνει την επιδεχόμενη επιμήκυνση της. Η χρήση μείγματος Ar/CO₂ έναντι CO₂ αυξάνει τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το όριο διαρροής της συγκόλλησης κατά 7-10 ksi, ενώ μειώνει την επιμήκυνση κατά ποσοστό της τάξεως του 2% [Myers 2010]. Αξίζει να αναφερθεί ότι, αύξηση του % Ar

στο μείγμα προστασίας αυξάνει την αντοχή της συγκόλλησης και παράλληλα καθιστά την ολκιμότητα της ιδιαίτερα χαμηλή. Ανάμεσα σε ένα εύρος μελετώμενων Ar/CO₂ συνθέσεων, βρέθηκε ότι το μείγμα 75%-25% αποτελεί την πιο οικονομική λύση για την προστασία μαλακών χαλύβων, λόγω υψηλής αποδοτικότητας τόξου και ρυθμού εναπόθεσης [Gadallah 2011]. Επομένως, συνοδεύεται από μείωση των περασμάτων και του χρόνου συγκόλλησης.

Επιπροσθέτως, η επιλογή ενός αερίου προστασίας καθορίζεται άμεσα και από το κόστος κτήσης του. Ένα αέριο 100% CO₂ προτιμάται έναντι μείγματος Ar/CO₂, λόγω μικρότερου κόστους. Το διοξείδιο του άνθρακα κοστίζει λιγότερο, διότι συλλέγεται μέσω οικονομικότερων διαδικασιών από άφθονες και εύκολα προσβάσιμες πηγές ανά τον κόσμο. Συνήθης πηγή CO₂ για τη βιομηχανία συγκολλήσεων συνιστά η διάσπαση και επεξεργασία του φυσικού αερίου. Απεναντίας, το αργό συλλέγεται μόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας συντελείται από ποσοστό μικρότερο του 1% από αργό. Συνεπώς είναι εύλογο το γεγονός ότι, για να συλλεχθεί μια σημαντική ποσότητα αργού, θα πρέπει πρότερα να έχει συλλεχθεί μια τεράστια ποσότητα αέρα.

Επίσης, η σύγκριση διαφορετικών αερίων για χρήση με πανομοιότυπα ηλεκτρόδια εμφανίζει ότι τα μείγματα Ar/CO₂ παρουσιάζουν σταθερότερο τόξο και μικρότερα επίπεδα εκτοξεύσεων από το καθαρό CO₂. Η συγκεκριμένη παράμετρος καθιστά το μείγμα Ar/CO₂ άμεσα προτιμητέο στους συγκολλητές. Η μεταφορά μετάλλου σε ένα τόξο με προστασία CO₂ γίνεται υπό τη μορφή ευμεγεθών σταγόνων, μεγαλύτερων από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Κατά αυτόν τον τρόπο, το τόξο συμπεριφέρεται ασταθώς, με πιο ακανόνιστη συμπεριφορά και με εκτεταμένα επίπεδα εκτοξεύσεων. Η μεταφορά μετάλλου σε τόξο με προστασία Ar/CO₂ γίνεται υπό τη μορφή μικρών σταγονιδίων, συνήθως μικρότερων της διαμέτρου του ηλεκτροδίου. Το τόξο, λοιπόν, συμπεριφέρεται σταθερά και σημειώνει περιορισμένες εκτοξεύσεις μετάλλου.



Εικόνα 11. α) Συγκόλληση FCAW-G με χρήση CO₂. β) Συγκόλληση FCAW-G με χρήση μείγματος Ar/CO₂. [Myers 2010]

Ένα έτερο πλεονέκτημα του Ar/CO₂ έναντι του CO₂ αποτελεί το γεγονός ότι, τείνει να διατηρήσει την περιοχή της συγκόλλησης πιο ζεστή κ' πιο ρευστή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του μείγματος. Συνεπώς, η διαβροχή της περιοχής συγκόλλησης καθίσταται πληρέστερη και ευκολότερη. Κάποιοι κατασκευαστές θεωρούν ότι, η χρήση μειγμάτων Ar/CO₂ βοηθά περισσότερο, τους μη πεπειραμένους συγκολλητές, στον έλεγχο του τόξου.

Στην αντίθετη πλευρά, η προσθήκη Ar στο μείγμα προστασίας συνοδεύεται από υψηλά επίπεδα ακτινοβολούμενης θερμότητας για τον συγκολλητή. Το συγκεκριμένο γεγονός καθιστά τη διαδικασία συγκόλλησης δυσχερέστερη. Προτάσσεται, επίσης, κι η απαίτηση για μεγαλύτερα πιστόλια συγκόλλησης ή πιο δαπανηρό ετήσιο σχεδιασμό αντικατάστασης πυρσού και αναλώσιμων.

Η προστασία CO₂ προσδίδει υψηλή διείδυση. Κραματικά στοιχεία, όπως τα Cr, Ni, Mo δεν επηρεάζονται από την οξειδωτική ατμόσφαιρα προστασίας του CO₂ καθώς

αποξειδωτικά μέσα, όπως Al,Ti,Zr,Si προστίθενται συνήθως στη σκόνη του πυρήνα και την αντισταθμίζουν. Το επίπεδο οξειδωτικών μέσων του ηλεκτροδίου διατηρείται υψηλά, με σκοπό την αποφυγή σχηματισμού CO και δημιουργίας πόρων στο μέταλλο εναπόθεσης. Επίσης, η ολκιμότητα και η σκληρότητα του μετάλλου βελτιώνονται με προστασία CO₂. Η προσθήκη αργού σε αέριο CO₂ επαναφέρει σε μέτρια επίπεδα τη επιτευχθείσα διείσδυση.

Περνώντας σε επόμενο επίπεδο θεώρησης του ζητήματος και αναλογιζόμενοι την επίδραση του εκάστοτε προστατευτικού αερίου στην ποιότητα της συγκόλλησης παραθέτουμε τα ακόλουθα γεγονότα. Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε η ρευστότητα της λίμνης και η διαβροχή της ραφής βελτιώνονται σημαντικά με τη χρήση μείγματος Ar/CO₂. Επιπλέον, οι περιορισμένες εκτοξεύσεις μετάλλου της προστασίας Ar/CO₂ ενισχύουν την ποιότητα της συγκόλλησης και ελαχιστοποιούν τις απαιτήσεις κόστους και χρόνου μετά-συγκολλητικών ενεργειών. Τα χαμηλότερα επίπεδα εκτοξεύσεων μεταφράζονται, επίσης, και υπό τη μορφή χαμηλότερου κόστους μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου της συγκόλλησης. Σε περίπτωση ύπαρξης εκτοξεύσεων απαιτείται η ανάγκη αφαίρεσης τους από την επιφάνεια της συγκόλλησης, για να διασφαλιστεί ο κατάλληλος και ενδεδειγμένος έλεγχος της ραφής, πχ με εξοπλισμό υπερήχων.

Ένα τελικό ζήτημα συνιστά η επιρρέπεια του αερίου προστασίας στη δημιουργία επιφανειακών σημαδιών της ραφής (worm tracks ή gas marks ή chicken scratch). Το συγκεκριμένο σφάλμα προκαλείται από διασπώμενα αέρια στο μέταλλο συγκόλλησης τα οποία διαφεύγουν της στερεοποίησης της λίμνης, αλλά παγιδεύονται κάτω από το στερεοποιημένο στρώμα σκουριάς. Τα μείγματα Ar/CO₂ παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιρρέπεια στο παρόν σφάλμα από ότι τα αντίστοιχα καθαρού CO₂. Η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου με τη μέθοδο σταγονιδίων αυξάνει τη συνολική επιφάνεια υλικού και συνεπώς, τα επίπεδα των διασπώμενων αερίων στο μέταλλο συγκόλλησης.

Σε γενικότερα πλαίσια, η χρήση καθαρού CO₂ προτιμάται για τις περιπτώσεις επίπεδων και οριζόντιων συγκολλήσεων με υψηλές απαιτήσεις εναποθέσεως. Ομοίως στη ναυπηγική βιομηχανία προτιμάται η χρήση CO₂ ,διότι τα χαρακτηριστικά τόξου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία στη γόμωση του μετάλλου βάσης. Αντιθέτως, στη βιομηχανία πλωτών κατασκευών, όπου συνηθίζονται περάσματα σε συμβολές τύπου T, Y και K και όπου απαιτείται ομαλή όψη ραφής, η χρήση Ar/CO₂ προτιμάται.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, μείγματα προστασίας Ar/O₂ βρίσκουν περιορισμένη εφαρμογή σε συγκολλήσεις FCAW ανθρακούχων χαλύβων. Βέβαια, μείγματα όπως το 95%-5% Ar/O₂ προϋποθέτουν καθαρή επιφάνεια μετάλλου βάσης καθώς, επίσης και απουσία ακαθαρσιών.

Εν κατακλείδι, η επιλογή αερίου προστασίας για εφαρμογές FCAW καθορίζεται όχι αποκλειστικά από το κόστος κτήσης, αλλά και από την επιδιωκόμενη ποιότητα και παραγωγικότητα των ενδιαφερόμενων διαδικασιών.

1.2.5.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου FCAW.[28],[51],[52]

Η εμφάνιση πόρων αποτελεί σύνηθες σφάλμα της μεθόδου FCAW. Ως αιτιολογία εμφάνισης υφίστανται ποικίλοι λόγοι, όπως η ανεπαρκής ή υπερβολική παροχή ροής αερίου προστασίας, η υπερβολική τιμή τάσεως τόξου, ακραίες τιμές προεξοχής του ηλεκτροδίου και της ταχύτητας καθώς και η ύπαρξη ακαθαρσιών στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης και του ηλεκτροδίου. Η εξασφάλιση μη εμφάνισης πόρων γίνεται με τη βοήθεια συγκεκριμένων διορθωτικών μέτρων. Η εναπόθεση εκτοξεύσεων επί του ακροφυσίου της συγκολλητικής διάταξης, δύναται να μειώνει την παροχή του αερίου προστασίας στη λίμνη, επομένως συνιστάται ο συχνός καθαρισμός του ακροφυσίου του πυρσού συγκόλλησης. Αντιθέτως, η μείωση των πολύ υψηλών παροχών βοηθά στην ομαλοποίηση της ροής του αερίου και συνεπώς στην καλύτερη προστασία της

λίμνης συγκόλλησης. Επιπροσθέτως, οι τιμές παραμέτρων όπως η τάση, η ταχύτητα και η προεξοχή ηλεκτροδίου θα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά ή μέσα επίπεδα, αναλόγως των ενδιαφερόμενων εφαρμογών. Επίσης, απαιτείται συνεχής καθαρισμός της συμβολής της συγκόλλησης από σκόνη, έλαια και άλλες ενδεχόμενες ακαθαρσίες. Συνηθίζεται σε πολλές περιπτώσεις η ενσωμάτωση ειδικών διαδικασιών θέρμανσης και αποθήκευσης των ηλεκτροδίων, με σκοπό τον περιορισμό της έκθεσης τους στην ατμοσφαιρική υγρασία. Ωστόσο, η θέρμανση ηλεκτροδίων κυτταρίνης και ρουτιλίου σε θερμοκρασίες της τάξης των 450°C και άνω, αυξάνει την τάση προσρόφησης H₂ στη μικροδομή της συγκόλλησης και την πιθανότητα σχηματισμού πόρων. Συνεπώς, για αυτοματοποιημένες διαδικασίες FCAW, η καθολική απουσία υγρασίας, τόσο από το αέριο προστασίας όσο και από το ηλεκτρόδιο, συνδράμει σε χαμηλά ποσοστά H₂ και στην αποφυγή δημιουργίας πορώδους. Σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, έχει παρατηρηθεί ότι προσθήκη O₂ στο μείγμα προστασίας οδηγεί σε ελαττωμένο H₂ ποσοστό και σε μειωμένο αριθμό πόρων.

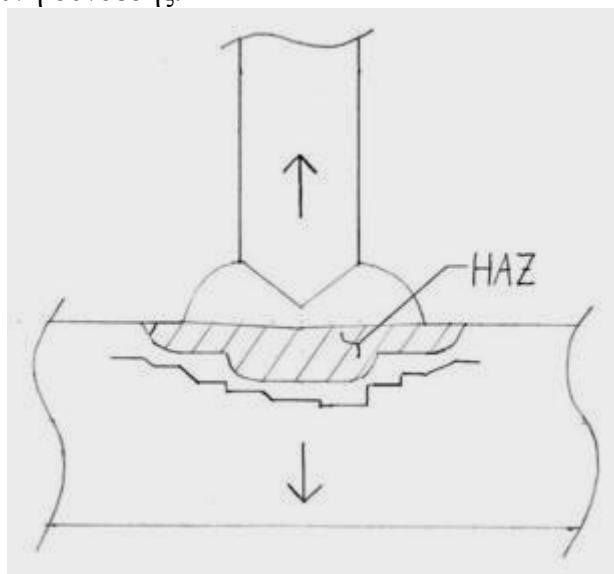
Ένα έτερο σφάλμα της μεθόδου αποτελεί η ατελής τήξη ή διείσδυση του μετάλλου συγκόλλησης. Οι κυριότεροι λόγοι, που το καθιστούν υπαρκτό, είναι η ακατάλληλη προετοιμασία των προς συγκόλληση τεμαχίων, ο ακατάλληλος προσανατολισμός του ακροφυσίου καθώς και η χρήση λανθασμένων παραμέτρων. Τα διορθωτικά μέτρα, τα οποία λαμβάνονται, είναι η προσεκτική προετοιμασία της ρίζας της συγκόλλησης, ο ακριβής προσανατολισμός του πυρσού, κατά πλήρη αντιστοιχία με τη διεύθυνση της ραφής συγκόλλησης και η χρήση των σωστών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης, της προεξοχής ηλεκτροδίου, του μεγέθους ηλεκτροδίου και αύξηση της έντασης του ρεύματος, αποτελούν τροχοπέδη στην εμφάνιση ατελούς τήξης και διείσδυσης.

Ακολουθως, ένα ιδιαίτερα σοβαρό σφάλμα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η εμφάνιση ρωγματώσεων στο μέταλλο συγκόλλησης. Καίριος λόγος δημιουργίας των ρωγμών, συνιστά, συνήθως, ο περιορισμός των βαθμών ελευθερίας (πχ πάκτωση) των προς συγκόλληση τεμαχίων. Συνηθίζεται, στις περισσότερες εφαρμογές, η πάκτωση του ενός εκ των δυο τεμαχίων, έτσι ώστε η συγκόλληση να μπορεί να παραλαμβάνει ελεύθερα παραμορφώσεις, που προκύπτουν από συστολικές δυνάμεις του μετάλλου συγκόλλησης. Επιπλέον, διαδικασίες προθέρμανσης του μετάλλου συνδράμουν στην αποφυγή ρωγματώσεων. Η χρήση λανθασμένων ηλεκτροδίων, όσον αφορά τη χημική συμβατότητα τους με το μέταλλο βάσης, αποτελεί κύρια αιτία εμφάνισης ρωγμών. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται η αντικατάστασή τους από ηλεκτρόδια με επαρκές ποσοστό αποξειδωτικών μέσων, για την κατάλληλη αντιμετώπιση του σφάλματος. Ο σωστός χειρισμός των διαδικασιών κατασκευής και συντήρησης ηλεκτροδίων αποτελεί μια αναγκαία συνθήκη για την αποφυγή υγρασίας, η οποία θεωρείται υπεύθυνη πολλές φορές για το σχηματισμό και τη διάδοση ρωγμών υδρογόνου στις συγκολλήσεις. Η υγρασία έχει αποδειχθεί επίσης ότι, αποτελεί αιτία σχάσεως κατά φυλλώσεις⁴. [Kiefer 1996]

Μια παρεμφερής, σημαντική αιτία ρωγμών, γνωστή τα τελευταία 50 χρόνια, είναι η ύπαρξη διάχυτου αερίου υδρογόνου στη μικροδομή της συγκόλλησης. Οι επιμέρους ρωγμές, που λαμβάνουν χώρα στις συμβολές συγκολλήσεων, ταξινομούνται, ανάλογα με τις διεργασίες και συνθήκες συγκόλλησης, σε ψυχρές και θερμές ρωγμές. Οι εν θερμώ ρωγματώσεις (hot cracking), οι οποίες ουσιαστικά είναι ρωγματώσεις της

⁴ Σχάση κατά φυλλώσεις (lamellar tearing) χαλύβδινων κατασκευών, είναι ο αποχωρισμός του βασικού μετάλλου, κυρίως σε επίπεδα παράλληλα προς την κατεύθυνση εξέλασης του ελάσματος, που οφείλεται στις υψηλές παραμορφώσεις κατά την έννοια του πάχους. Οι παραμορφώσεις αυτές προέρχονται από τη συστολή του μετάλλου συγκόλλησης, περιορισμό ή και συνδυασμό των δυο. [Παπάζογλου 1995]

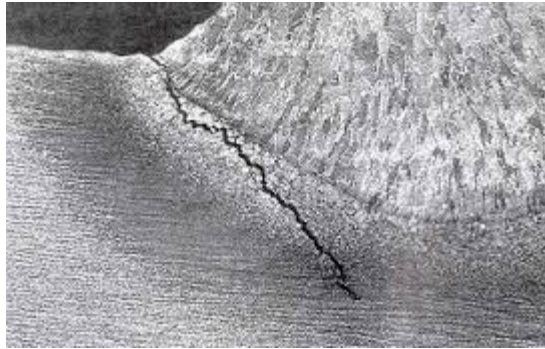
διαδικασίας στερεοποίησης και υγροποίησης, είναι το σημαντικότερο σφάλμα, άμεσα συνδεδεμένο με τη ζώνη σύνδεσης.



Εικόνα 12.Εμφάνιση σχάσεως κατά φυλλώσεις στο μέταλλο βάσης.

Ως αιτία εμφάνισής τους, θεωρείται ο συνδυασμός υγροποίησης των ορίων των κόκκων και των εφαρμοζόμενων τάσεων, προκληθέντων από τη θερμική συστολή της διαδικασίας στερεοποίησης της συγκόλλησης. Από την άλλη πλευρά, η εμφάνιση, εν ψυχρώ, ρωγματώσεων στις συγκολλήσεις δύναται να ελαχιστοποιηθεί με συνεχή έλεγχο της σκληρότητας της και μείωση του διαχεόμενου ποσοστού υδρογόνου στη μικροδομή της. Η ελάττωση της σκληρότητας της ΘΕΖ συνιστά μια μέθοδο ελέγχου των ρωγματώσεων λόγω υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος της σκληρότητας επιτυγχάνεται με περιορισμό, της ευαίσθητης σε ρωγμές, μαρτενιτικής δομής, δια μέσω αργών διαδικασιών απόψυξης. Όσο υψηλότερη είναι η προθέρμανση, που συνοδεύει τις διαδικασίες απόψυξης, τόσο μεγαλύτερη η αύξηση του οφέλους της διάχυσης του υδρογόνου μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης. Ένα τυπικό παράδειγμα ψυχρής ρωγμής, αποτελεί η εγκάρσια ρωγμή (transverse crack), η οποία εμφανίζεται κάθετα στον άξονα της ραφής για θερμοκρασίες χαμηλότερες των 200°C. Η ρωγμή παρουσιάζεται, είτε αμέσως μετά την ψύξη ή σε μια χρονική περίοδο μερικών ωρών. Η καθυστέρηση εξαρτάται από τον τύπο του χάλυβα, το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και το εμπεριεχόμενο ποσοστό υδρογόνου στη μικροδομή της συγκόλλησης. Γενικότερα, οι εν ψυχρώ ρωγμές προκαλούνται από την πεπλεγμένη αλληλεπίδραση της παροχής του διαχεόμενου υδρογόνου, των παραμενουσών τάσεων εφελκυσμού και της εκάστοτε επιρρεπούς μικροδομής. Αυτή η μορφή ρωγμής συναντάται κυρίως, σε συγκολλήσεις ελασμάτων με πάχος έως 10 mm. Ωστόσο, σε συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων (≥ 50 mm), οι ραφές υπόκεινται σε ταχύτερες αποψύξεις, συνοδευόμενες παράλληλα και από υψηλότερες καταπονήσεις. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι, η υγρασία και η μόλυνση του προστατευτικού αερίου από τυχούσες διαρροές της διάταξης ή του συστήματος παροχής αερίου, αποτελούν αιτίες δημιουργίας ψυχρών ρωγμών, λόγω διαχέοντος ποσοστού υδρογόνου. Έρευνες έδειξαν ότι, προσθήκη O_2 στο μείγμα προστασίας οδηγεί σε αύξηση προσρόφησης H_2 στη μικροδομή της συγκόλλησης και αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης ρωγμών [Kiefer 1996].

Εμβαθύνοντας περαιτέρω στο ζήτημα: το επίπεδο διαχέοντος υδρογόνου στη ραφή και η αλληλεξάρτησή του με τη δημιουργία ρωγμών, επηρεάζονται από διακυμάνσεις των συγκολλητικών παραμέτρων.



Εικόνα 13. Εν ψυχρώ ρωγή λόγω διαχεόμενου υδρογόνου [EWF 2006]

Διαφοροποιήσεις στην ένταση ρεύματος, επιδρούν στο συνολικό ποσοστό υδρογόνου για τις περιπτώσεις χαλύβων. Βεβαίως, προσθήκη 2% Al μειώνει τα επίπεδα υδρογόνου με αύξηση του ρεύματος. Η λεπτομέρεια αυτή έχει σημασία για τις αυτό-προστατευόμενες εφαρμογές, καθώς τα ηλεκτρόδια της S-FCAW περιέχουν στο πυρήνα 1% Al και συνεπώς αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο από τα ηλεκτρόδια της μεθόδου FCAW με προστασία αερίου. Σε γενικότερα πλαίσια, έχει τεκμηριωθεί η επίδραση συγκολλητικών παραμέτρων όπως η ένταση ρεύματος, η τάση τόξου και η προέκταση του ηλεκτροδίου επί του προσροφόμενου ποσοστού H_2 στη συγκόλληση [Kobe steel 2011]. Επιπλέον, το επίπεδο H_2 παραμένει ανεπηρέαστο για παροχή αερίων της τάξης του 20-35 L/min. Ο *J.H.Kiefer* στο άρθρο του «Effects of moisture contamination and welding parameters on diffusible hydrogen» σημείωσε αύξηση του υδρογόνου κατά 5mL/100g για αύξηση του ρεύματος και της τάσης, ενώ κατέγραψε σημαντική πτώση του εμπεριεχόμενου H_2 για αύξηση του μήκους τόξου. Το ποσοστό H_2 παρέμεινε αναλλοίωτο για διαφοροποιήσεις της ταχύτητας.

Επίσης, ένας δευτερεύων παράγοντας δημιουργίας ρωγμών λόγω προσροφόμενου ποσοστού H_2 συνιστά η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα που περικλείει την περιοχή του τόξου. Μελέτες απέδειξαν τον άμεσο συσχετισμό της αύξησης του περιεχόμενου H_2 με αύξηση της υγρασίας του περιβάλλοντα αέρα [Levchenko 1996]. Η ποσότητα H_2 στο μέταλλο της συγκόλλησης, δεν παρουσίασε ιδιαίτερη αύξηση με αύξηση της υγρασίας, μόνο για αέρια προστασία CO_2 . Το υδρογόνο, το οποίο διασπάται σε μια χαλύβδινη μήτρα είναι διαχεόμενο. Ως άμεσο επακόλουθο επέρχεται, πολλές φορές, ψαθυρή θραύση λόγω υδρογόνου. Συνοψίζοντας όλα τα ανωτέρω, η ύπαρξη H_2 στο μέταλλο συγκόλλησης για τη διαδικασία FCAW προέρχεται από:

- 1) Υγρασία της σκόνης πυρήνα.
- 2) Υγρασία στο αέριο προστασίας καθώς και στον περιβάλλοντα, του τόξου, αέρα.
- 3) Οργανικές ουσίες της σκόνης του πυρήνα.
- 4) Εμπεριεχόμενο υδρογόνο των ηλεκτροδίων.
- 5) Εξωτερικά υδρογονούχα υλικά, όπως έλαια και βαφές.

Εν τέλει, όπως έχει προαναφερθεί, ένα σύνηθες σφάλμα της μεθόδου FCAW είναι η δημιουργία επιφανειακών σημαδιών της ραφής (worm tracks ή gas marks ή chicken scratch). Το συγκεκριμένο σφάλμα προκαλείται από διασπώμενα αέρια στο μέταλλο συγκόλλησης τα οποία διαφεύγουν της στερεοποίησης της λίμνης, αλλά παγιδεύονται κάτω από το στερεοποιημένο στρώμα σκουριάς. Το φαινόμενο εκδηλώνεται ως μια γραμμική επιφάνεια κενών, κοντά στην κεντρική γραμμή συγκόλλησης, παράλληλα με την επιφάνεια ραφής.



Εικόνα 14. Σφάλμα γραμμικής ένωσης πόρων, γνωστό και ως «worm tracks»
[ESAB 2013]

1.2.5.5 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW.[6],[50]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου FCAW αποτελεί, η ιδιαίτερα υψηλή παραγωγικότητα της. Με την παρούσα μέθοδο δύναται να επιτευχθούν πολύ υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης καθώς και υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης μετάλλου. Οι ρυθμοί εναπόθεσης υλικού, πχ συγκριτικά με τη μέθοδο SMAW, κυμαίνονται σε τετραπλάσια επίπεδα. Η μέθοδος FCAW είναι περισσότερο επιεικής σε σφάλματα ανομοιογένειας υλικού κατά την εναπόθεση από τη μέθοδο GMAW. Επιπλέον, αποτελεί πιο ευέλικτη μέθοδο και παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό προσαρμοστικότητας, σε σύγκριση με τη μέθοδο SAW. Ο υψηλός βαθμός προσδιδόμενης ενέργειας εξασφαλίζει πολύ μεγάλο βάθος διείσδυσης, εξαιρετικό βαθμό τήξης, κατά τη διαμήκη αλλά και την εγκάρσια διεύθυνση της ραφής, μικρό αριθμό παρουσιαζόμενων σφαλμάτων καθώς και ομαλή όψη ραφής. Η παραλλαγή της αυτό-προστατευόμενης FCAW, καθιστά την παρούσα μέθοδο ιδανική για συγκολλήσεις εξωτερικών χώρων. Η απόδοση των ηλεκτροδίων είναι πολύ υψηλή (πάνω από 90%) και το μέταλλο συγκόλλησης φέρει πολύ μικρά ποσοστά υδρογόνου.

Εν αντιθέσει, τα κυριότερα μειονεκτήματα αφορούν το κόστος του εξοπλισμού και των σωληνοειδών ηλεκτροδίων, το οποίο κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από της μεθόδου GMAW. Επιπροσθέτως, η μέθοδος παρουσιάζει, ιδιαίτερα υψηλά, επίπεδα αναθυμιάσεων, τα οποία υπόκεινται σε κατάλληλες διαδικασίες εξάτμισης. Η FCAW θεωρείται ότι αποτελεί λιγότερο ιδανική μέθοδο για τις περιπτώσεις εφαρμογών, που απαιτούν βαφή. Επιπλέον, απαιτείται περισσότερος χρόνος για την ολοκλήρωση των εργασιών, ιδιαίτερα για τις εφαρμογές πολλαπλών περασμάτων, λόγω της συνεχούς αφαίρεσης των στρωμάτων σκουριάς, έπειτα από κάθε πέρασμα. Τέλος, παρατηρείται σε πολλές περιπτώσεις, ακανόνιστη παροχή ηλεκτροδίου.

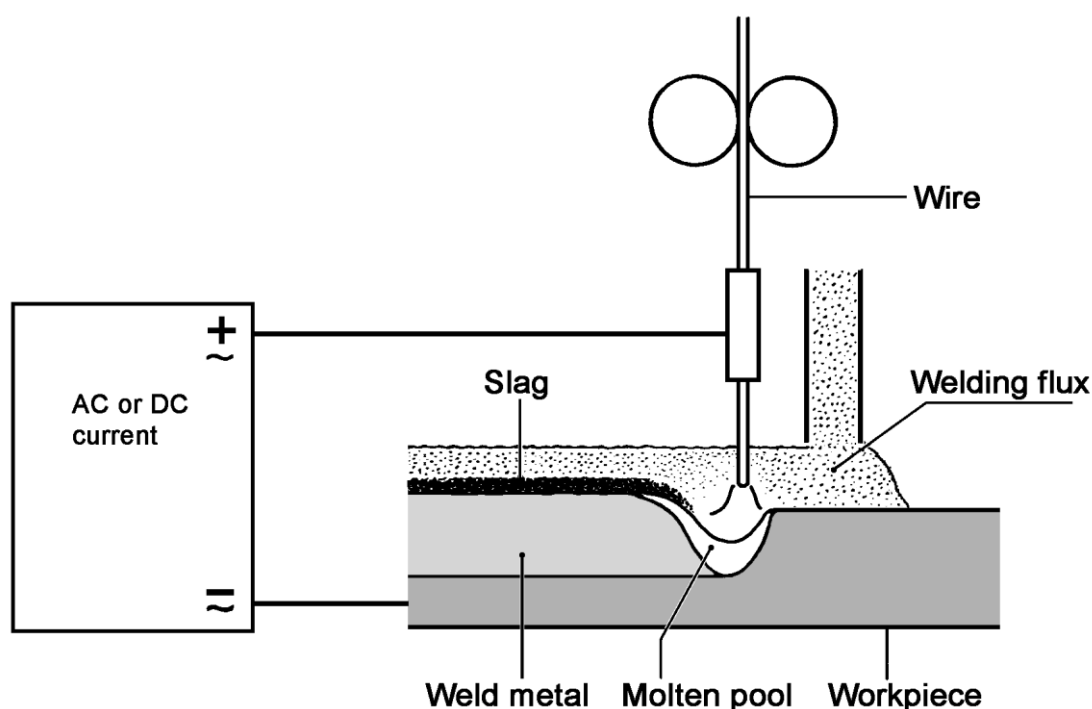
1.2.6 Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (SAW).

1.2.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά της μεθόδου.[6],[57],[58]

Η μέθοδος συγκόλλησης βυθισμένου τόξου δύναται να εφαρμοστεί σε ένα πλήθος τεμαχίων. Η μέθοδος καθίσταται άμεσα λειτουργική στη ναυπηγική βιομηχανία, διότι προτιμάται για περιπτώσεις συγκόλλησης μετωπικών και αυχενικών συμβολών. Ο βαθμός αποδοτικότητας της μεθόδου αυξάνεται, εάν η συμβολή πληρωθεί με όσο το δυνατόν, λιγότερα περάσματα. Αρκεί, βέβαια, να αναφερθεί ότι αυτό εξαρτάται από το είδος και το πάχος του υλικού. Παραδειγματικά, μαλακοί χάλυβες πάχους έως 12

mm συγκολλούνται με μονά περάσματα. Δε θα δοθεί ιδιαίτερη έκταση στην παρούσα διαδικασία, καθώς παρουσιάζει το μικρότερο βαθμό συγγένειας με τη ενδιαφερόμενη μέθοδο FCAW.

Στη μέθοδο βυθισμένου τόξου η απαιτούμενη θερμότητα, προς τήξη του μετάλλου παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο, το οποίο δημιουργείται μεταξύ ενός αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Το μέταλλο προσθήκης είναι ένα μη επικαλυμμένο, συνεχώς τροφοδοτούμενο σύρμα ηλεκτροδίου, το οποίο παρέχεται στη συμβολή, σε συνδυασμό με μια ροή λεπτόκοκκης σκόνης. Συνεπώς, η άκρη του ηλεκτροδίου, το τόξο και η περιοχή συγκόλλησης καλύπτονται από στρώμα κοκκώδους σκόνης. Η προαναφερθείσα σκόνη τροφοδοτείται στη λίμνη, μέσω ενός συστήματος χοάνης-σωλήνα. Ο σωλήνας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής της σκόνης και διατηρείται, συνέχεια, μπροστά από τη ζώνη συγκολλήσεως. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι, υφίσταται απαίτηση επαρκούς παροχής σκόνης μπροστά από το τόξο.



Σχήμα 11. Σχηματική αναπαράσταση της περιοχής συγκόλλησης της διαδικασίας SAW. [ESAB 2008]

Ο χαρακτηρισμός «βυθισμένη» χρησιμοποιείται, διότι τόσο το τηγμένο μέταλλο όσο και το τόξο καλύπτονται από ένα πέπλο εύτηκτης κοκκώδους σκόνης. Η ηλεκτρική αντίσταση του ηλεκτροδίου, οφείλει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, προκειμένου να επιτευχθεί συγκόλληση υψηλής εντάσεως ρεύματος. Συνεπώς, το ηλεκτρικό ρεύμα παρέχεται στο ηλεκτρόδιο, μέσω επαφών, οι οποίες βρίσκονται οριακά πάνω από την περιοχή του τόξου. Η περιοχή του τόξου εγκλείεται σε μια κοιλότητα, η οποία είναι γεμάτη με αέριο και ατμούς μετάλλων. Το μέγεθος αυτής της κοιλότητας οριοθετείται από το άτηκτο βασικό μέταλλο και το τηγμένο μέταλλο συγκόλλησης.

Η παραγόμενη θερμότητα τήκει την άκρη του ηλεκτροδίου και τις προσκείμενες ακμές των τεμαχίων, δημιουργώντας καθ' αυτό τον τρόπο τη λίμνη συγκόλλησης. Η λίμνη διατηρεί την υγροποιημένη της κατάσταση και παρουσιάζει τυρβώδη ροή. Το παρόν γεγονός βοηθά στην απομάκρυνση ενδεχόμενων φυσαλίδων ή σκουριάς, μέσω της επιφάνειας της λίμνης. Η σκόνη, ακολούθως, παρέχει ολοκληρωτική προστασία της ζώνης συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Παρουσιάζει εξαιρετική θερμό-

μονωτική ιδιότητα, μειώνοντας έτσι τις απώλειες θερμότητας μέσω του τόξου. Ως εκ τούτου, διατίθεται περισσότερη ενέργεια στη διαδικασία συγκόλλησης συγκριτικά με τις μεθόδους εκτεθειμένου τόξου. Άρα ο θερμικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα και ο ρυθμός συγκόλλησης είναι ταχύτερος. Έχει παρατηρηθεί, ότι η θερμική απόδοση της μεθόδου SAW κυμαίνεται στα επίπεδα του 90%, έναντι 75% που χαρακτηρίζει τη μέθοδο SMAW. Η μέθοδος SAW εξασφαλίζει υψηλά ποσά προσδιδόμενης θερμότητας, ενώ συνάμα παρουσιάζει αργότερες και σταθερότερες διαδικασίες στερεοποίησης και απόψυξης.

Η μέθοδος βυθισμένου τόξου ενσωματώνει τη χρήση πηγών ισχύος (DC) συνεχούς ρεύματος σταθερής τάσεως ή ρεύματος, καθώς και (AC) εναλλασσόμενου σταθερού ρεύματος. Βέβαια, η κύρια απαίτηση, που πρέπει να πληροί η εκάστοτε συγκολλητική μηχανή SAW, είναι η εξασφάλιση υψηλών εντάσεων ρεύματος σε υψηλό εργασιακό κύκλο. Το συνεχές ρεύμα συνδράμει θετικά στην έναυση του τόξου. Η συνδεσμολογία ανάστροφης πολικότητας ενισχύει τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της ραφής, ενώ η συνδεσμολογία ορθής πολικότητας επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης υλικού με χαμηλή διείσδυση. Ενισχυτικό πλεονέκτημα μηχανών συνεχούς ρεύματος συνιστά η συμβατότητα τους με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης κι η ικανότητα συγκόλλησης δύσκολων συμβολών σε υψηλές ταχύτητες. Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος προτιμώνται για τις περιπτώσεις, όπου απαιτούνται μεγάλες διάμετροι ηλεκτροδίων (>4mm). Η μηχανή ισχύος, στις συγκολλήσεις SAW, συνηθίζεται να λειτουργεί στο 100% του κύκλου εργασίας και όχι στο 60% όπως στη μέθοδο SMAW. Το εύρος των εφαρμοζόμενων ρευμάτων της μεθόδου κυμαίνεται από 200-1400A. Η έναυση του τόξου καθίσταται δύσκολη, πολλές φορές, λόγω της προστασίας της σκόνης· ωστόσο, έχουν υιοθετηθεί αρκετές τεχνικές έναυσης όπως η τεχνική τηγμένης σκόνης (molten flux) και η τεχνική υπέρθεσης συχνότητας (high frequency).

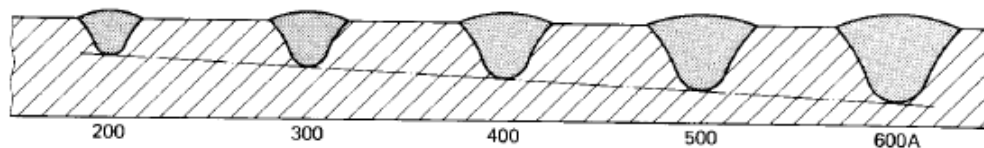
Η ποιότητα του εναποτιθέμενου μετάλλου καθορίζεται από το είδος της σκόνης, το ηλεκτρόδιο, το ρεύμα συγκόλλησης, την τάση του τόξου και το ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας. Επομένως, οι κύριες παράμετροι της μεθόδου είναι:

- Η ένταση ρεύματος και η τάση του τόξου.
- Η ταχύτητα συγκόλλησης και η προεξοχή ηλεκτροδίου.
- Η προετοιμασία της συμβολής των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Το είδος του ηλεκτροδίου
- Ο προσανατολισμός του ακροφυσίου.

1.2.6.2 Καθορισμός καίριων παραμέτρων μεθόδου SAW.[56],[59],[60]

(a) Ηλεκτρικό ρεύμα.

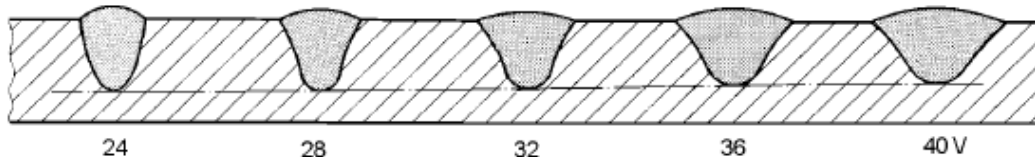
Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο, όσον αφορά το βαθμό διείσδυσης. Η επιλογή της τιμής έντασης εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος και τον τύπο ης συμβολής. Επιπλέον, παρουσιάζει μηδαμινή επίδραση επί του πλάτους της ραφής. Υψηλές τιμές ρεύματος δύνανται να οδηγήσουν σε (burn through) εμφάνιση τρεξίματος μετάλλου, ενώ στον αντίποδα, χαμηλές τιμές άγουν σε μικρή επιτευχθείσα διείσδυση και σε ύπαρξη σφαλμάτων στη ρίζα. Αύξηση της εντάσεως ρεύματος ισοδυναμεί με αύξηση της τροφοδοσίας προστιθέμενου μετάλλου και συνεπώς με αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης.



Σχήμα 12.Αλληλεξάρτηση ρεύματος-διείσδυσης. [ESAB 2008]

(b) Τάση τόξου.

Η τάση του τόξου αποτελεί καθοριστική παράμετρο για τη μορφή και το πλάτος του τόξου. Επίσης, επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό από την ένταση, τη διείσδυση. Υψηλές τιμές τάσεως σε συνδυασμό με συμβολή τύπου **I**, δίνουν ως αποτέλεσμα πλατιά όψη ραφής. Αντίστοιχα σε αυχενικές συμβολές, τύπου **V** και **X** λαμβάνουμε ως αποτέλεσμα κοίλες συγκολλήσεις με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης υποκοπής και δύσκολα αφαιρούμενου στρώματος σκουριάς. Αφετέρου, χαμηλές τιμές τάσεως τόξου σε συμβολές **I**, **V**, **X** και αυχενικές, δίνουν υψηλής κυρτότητας ραφή.



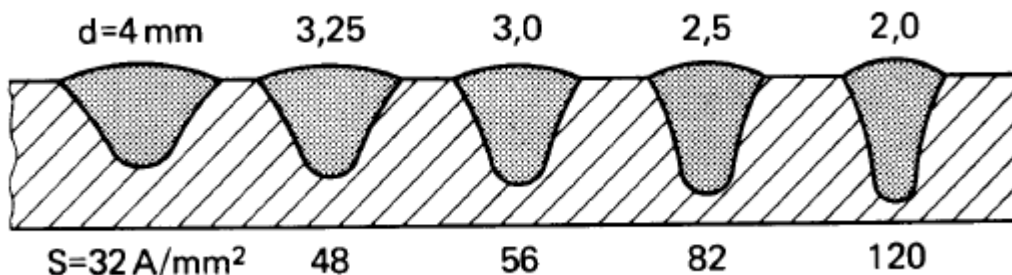
Σχήμα 13. Αλληλεξάρτηση τάσεως-εγκάρσιας τομής συγκόλλησης [ESAB 2008]

(c) Ταχύτητα συγκόλλησης.

Η ταχύτητα επηρεάζει τη διείσδυση του μετάλλου συγκόλλησης. Ενδεχόμενη αύξηση της ταχύτητας ισοδυναμεί με μείωση της διείσδυσης και με στενότερη όψη ραφής. Αντίστοιχα, μείωση της ταχύτητας, οδηγεί σε αύξηση της διείσδυσης και σε πλατύτερη όψη ραφής. Ωστόσο, μείωση της ταχύτητας σε επίπεδα της τάξης των 20-25 cm/min μπορεί να έχει ανεπιθύμητα αποτελέσματα στη συγκόλληση, δηλαδή να οδηγεί σε μείωση της διείσδυσης, καθώς το τόξο αδυνατεί να μεταδώσει στο μέταλλο βάση θερμική ενέργεια λόγω υπερβολικής έκτασης της λίμνης συγκόλλησης.

(d) Διάμετρος ηλεκτροδίου.

Αλλαγή του μεγέθους του ηλεκτροδίου, ισοδυναμεί με μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος. Υψηλότερη διάμετρος ηλεκτροδίου αντιστοιχεί σε μείωση της διείσδυσης καθώς επίσης και στην εμφάνιση τρεξίματος μετάλλου στη ρίζα της συγκόλλησης. Επιπλέον, η έναυση του τόξου καθίσταται δυσχερέστερη και η σταθερότητα τόξου επηρεάζεται δυσμενώς.

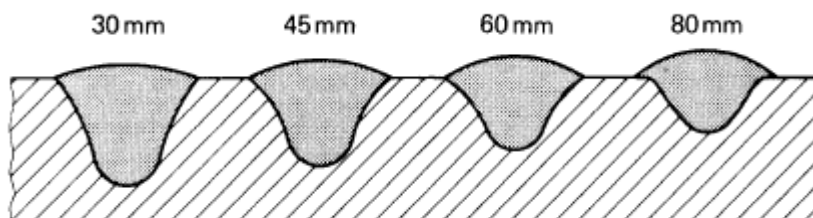


Σχήμα 14. Η επίδραση διαφορετικής διαμέτρου ηλεκτροδίου για σταθερό ρεύμα. [ESAB 2008]

(e) Προεξοχή ηλεκτροδίου.

Η προεξοχή του ηλεκτροδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο, η οποία αφορά το βαθμό θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση της άκρης του ηλεκτροδίου. Η προεξοχή επηρεάζει άμεσα, επίσης τη διείσδυση. Μικρή προεξοχή συνεπάγεται μικρή ποσότητα προσδιδόμενης θερμότητας και υψηλή διείσδυση. Όσο αυξάνεται, η θερμοκρασία του

ηλεκτροδίου ανέρχεται και το ποσοστό διείσδυσης μειώνεται. Σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται υπερβολική προεξοχή ηλεκτροδίου. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν εφαρμογές επένδυσης μετάλλου ή με υψηλή απαίτηση εναποτιθέμενου μετάλλου. Η υπερβολική προεξοχή συντελεί σε αυξημένους ρυθμούς εναπόθεσης έως και 50%. Τυπικές τιμές προεξοχής, θεωρούνται τιμές των 20-25 mm.



Σχήμα 15. Η διείσδυση συναρτήσει της μειούμενης προεξοχής ηλεκτροδίου [ESAB 2008]

(f) Προσανατολισμός ακροφυσίου.

Η γωνία μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου καθορίζει την όψη της ραφής και την επιτευχθείσα διείσδυση. Η forehand τεχνική εξασφαλίζει πλατιά όψη ραφής, χαμηλής κυρτότητας και με χαμηλή διείσδυση. Επιπλέον, η τάση εμφάνισης υποκοπής διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Η backhand τεχνική εμφανίζει τάση υποκοπής υψηλών επιπέδων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει υψηλή διείσδυση και στενή, υψηλής κυρτότητας, όψη ραφής. Τέλος, η κατακόρυφη τεχνική παρουσιάζει χαρακτηριστικά ενδιάμεσων σταθμών.

1.2.6.3 Μέταλλα Προσθήκης.[58],[61]

Το προστιθέμενο μέταλλο υπεισέρχεται στη μέθοδο SAW υπό τη μορφή σκόνης κι ηλεκτροδίων. Τελευταία, χρησιμοποιείται, όλο με πιο αυξανόμενο ρυθμό, σιδηρούχος σκόνη ως μέσο προσθήκης μετάλλου.

Ηλεκτρόδια

Το σύρμα ηλεκτροδίου, συνήθως, επιχαλκώνεται, με σκοπό τη διασφάλιση σωστής μεταφοράς ρεύματος σε αυτό από τις επαφές. Τα ηλεκτρόδια, συνηθίζεται να είναι συμπαγούς ή σωληνοειδούς μορφής. Στην περίπτωση συμπαγών, η εγκάρσια τομή τους έχει στρογγυλή ή ορθογώνια μορφή. Η κύρια εφαρμογή συμπαγών ηλεκτροδίων έγκειται στην επένδυση μετάλλων (cladding) και δευτερευόντως σε συγκολλήσεις. Ομοίως, τα σωληνοειδή βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην επένδυση μετάλλου, καθώς τα επιθυμητά κραματικά στοιχεία εγκλείονται στο εσωτερικό του πυρήνα. Οι κύριες λειτουργίες του ηλεκτροδίου είναι να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα στο τόξο και η παροχή προστιθέμενου μετάλλου στη συμβολή. Οι πιο συνηθισμένες τιμές διαμέτρου των ηλεκτροδίων κυμαίνονται από 1.6-6.4 mm.

Σκόνη

Η σύνθεση της εκάστοτε σκόνης, έχει βελτιστοποιηθεί για χρήση, σε συνδυασμό με ηλεκτρόδια ποικίλων μεταλλουργικών χαρακτηριστικών. Ο συνδυασμός εκφράζεται μέσω τριών τρόπων: με παροχή κραματικών στοιχείων δια μέσω του ηλεκτροδίου, με παροχή κραματικών στοιχείων δια μέσω της σκόνης καθώς και συνδυασμό των δύο. Οι σκόνες ταξινομούνται σε 3 περαιτέρω κατηγορίες:

- Τηκόμενες (fused).
- Συμπυκνωμένες (sintered).
- Συσσωρευμένες (agglomerated).

Μια τηκόμενη σκόνη είναι ομογενής· με άλλα λόγια, οι ουσίες της σκόνης έχουν τηχθεί και έχουν σχηματίσει μια υαλώδους υφής, ουσία, η οποία μετέπειτα έχει υποστεί κατεργασία για να καταστεί σκόνη κατάλληλου μεγέθους κόκκου. Οι σκόνες συμπυκνωμένης μορφής έχουν παραχθεί από τη συμπύκνωση επιμέρους συνιστωσών με σκοπό τη δημιουργία μικρών τμημάτων (blocks). Τα τμήματα αυτά, συνθλίβονται και μετέπειτα, ταξινομούνται. Τέλος, οι συσσωρευμένες σκόνες έχουν παραχθεί από διεργασίες έλασης των επιμέρους συστατικών μερών, στις οποίες χρησιμοποιείται υδρύαλος, ως προσθετικό μέσο. Το προκύπτον προϊόν αποξηραίνεται σε θερμοκρασία 800-900°C και μετέπειτα ταξινομείται. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 10. Συγκριτικά χαρακτηριστικά σκόνων SAW [ESAB 2008]

Είδος σκόνης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Τηκόμενη (<i>fused</i>)	Μη υγροσκοπική	Μη ενσωμάτωση κραματικών στοιχείων όπως Cr και Ni, στη σκόνη
	Υψηλή αντοχή κόκκου	Υψηλή ειδική πυκνότητα
Συμπυκνωμένες (<i>sintered</i>)	Σχετικά χαμηλή υγροσκοπικότητα	Μη ενσωμάτωση κραματικών στοιχείων στη σκόνη
	Σχετικά χαμηλή πυκνότητα	Σχετικά χαμηλή αντοχή κόκκου
Συσσωρευμένες (<i>agglomerated</i>)	Ενσωμάτωση κραματικών στοιχείων όπως Cr και Ni, στη σκόνη	Υγροσκοπική
	Χαμηλή ειδική πυκνότητα	Σχετικά χαμηλή αντοχή κόκκου

Από άποψη χημικής συνθέσεως, οι σκόνες διακρίνονται ως εξής:

- Όξινες και ουδέτερες σκόνες.
- Βασικές σκόνες.
- Υψηλά βασικές σκόνες.
- Ειδικές σκόνες.

Η πρώτη κατηγορία χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκολλητικές ιδιότητες και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Οι συγκεκριμένες σκόνες είναι κραματωμένες με στοιχεία καθώς προορίζονται για χρήση με μη κραματωμένα ηλεκτρόδια. Συνιστούν ευπροσάρμοστη ομάδα σκόνων, όσον αφορά τη συμβατότητα τους με AC και DC. Η επακόλουθη κατηγορία χαρακτηρίζεται από καλές συγκολλητικές και μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, παρουσιάζουν συμβατότητα με κραματωμένα και μη ηλεκτρόδια. Οι υψηλά βασικές σκόνες εμφανίζουν καλά χαρακτηριστικά συγκόλλησης. Συνήθως, χρησιμοποιούνται με ρεύμα DC⁺. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, πχ χρησιμοποιούνται σε υλικά LPG, τα οποία έχουν απαιτήσεις δυσθραυστότητας για τους -55 °C. Εν τέλει, προορίζονται αυστηρά για χρήση με κραματωμένα ηλεκτρόδια.

Σκόνη σιδήρου

Για λόγους αύξησης της παραγωγικότητας συγκολλήσεων παχέων ελασμάτων (> 20mm), χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια, η προσθήκη συστατικών μερών υπό τη μορφή κρύων υλικών, όπως για παράδειγμα σκόνη σιδήρου. Για ίδια προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, η προσθήκη σκόνης σιδήρου οδηγεί σε μικρότερη ΘΕΖ από ότι η συμβατική μέθοδος SAW. Η προσδιδόμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους,

μειώνεται αναλογικά με την αύξηση της ποσότητας της σκόνης σιδήρου. Η μέθοδος παρουσιάζει αύξηση της παραγωγικότητας κατά 50%, γεγονός που ερμηνεύεται υπό μειωμένο εργατικό κόστος. Η χρησιμοποίηση της σκόνης σιδήρου επί της μεθόδου, καθιστά αναγκαία τη χρήση επικαλύπτρας για την αποφυγή σφαλμάτων της ρίζας. Το κύριο κραματικό στοιχείο της σκόνης είναι το μαγγάνιο, το οποίο εμπεριέχεται σε ποσοστό 1,8% και σπανιότερα το νικέλιο.

1.2.6.4 Παραλλαγές Μεθόδου SAW. [2],[6],[58]

Οι κυριότερες παραλλαγές της μεθόδου SAW είναι οι εξής:

- **Μέθοδος μονού ηλεκτροδίου - Single wire welding** .Αποτελεί την μέθοδο, βάσει της οποίας, υπήρξε η εξέλιξη των παραλλαγών. Υλοποιείται από ηλεκτρόδια διαμέτρου 1.2-6 mm και για ρεύματα της κλίμακας 120-1500A.
- **Συγκόλληση διπλού τόξου - Twin arc welding** . Αποτελεί ιδιαίτερα γνωστή μέθοδο, λόγω της υψηλής παραγωγικότητας, που παρέχει. Μια αυτόματη δί-τοξη μηχανή συγκόλλησης μπορεί να προκύψει από μια απλή μηχανή με τροφοδοσία 2 συρμάτων. Οι ρυθμοί εναπόθεσης της μεθόδου αυξάνονται κατά 40% συγκριτικά με τη συμβατική μέθοδο. Τα συνήθη μεγέθη κυμαίνονται από 2-3 mm, και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε 8 mm.
- **Διατεταγμένη συγκόλληση - Tandem welding** . Στην παρούσα μέθοδο, κάθε ηλεκτρόδιο συνδέεται με ξεχωριστή μονάδα ισχύος. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια διαμέτρου 3-4 mm και χρησιμοποιείται, κατά κόρον, σε συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων.
- **Συγκόλληση λωρίδας - Strip welding** . Αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου απλού ηλεκτροδίου με τη μόνη διαφορά ότι, το ηλεκτρόδιο έχει τη μορφή λωρίδας διαστάσεων 0.5x60 mm και 0.5x100 mm. Η διείδυση ,που παρέχεται κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ η προσδιδόμενη όψη ραφής είναι πλατιά και λεία.
- **Μέθοδος στενού διακένου - Narrow gap welding** . Είναι η πιο διαδεδομένη παραλλαγή συγκόλλησης παχέων ελασμάτων. Υλοποιείται επιτυχώς από τη SAW και προσφέρει αυξημένη παραγωγικότητα μέσω ελαχιστοποίησης του εργασιακού χρόνου. Παρουσιάζει χαμηλό ποσοστό εκτοξεύσεων και επαρκή χαρακτηριστικά όψης ραφής. Η μέθοδος διάκενου αποτελεί την ευρύτερα εφαρμοζόμενη μέθοδο περιμετρικών συγκολλήσεων σε πλοία μεταφοράς υγρού φορτίου. Το εύρος του διάκενου κυμαίνεται από 15-22 mm και οι συνηθέστερες διάμετροι ηλεκτροδίων της μεθόδου κυμαίνονται μεταξύ 3.2-5 mm.

1.2.6.5 Τυπικά σφάλματα μεθόδου SAW.[56],[58]

Τα σφάλματα ρίζας αποτελούν μια από τις συνηθέστερες κατηγορίες σφαλμάτων στη SAW. Με τον όρο σφάλμα ρίζας, εννοούμε κυρίως την ανεπαρκή διείδυση του μετάλλου συγκόλλησης στη συμβολή. Η ένταση του ρεύματος είναι η παράμετρος, που επηρεάζει περισσότερο τη διείδυση, εφόσον όμως η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από 15m/h . Τα διορθωτικά μέτρα, τα οποία λαμβάνονται, είναι η προσεκτική προετοιμασία της ρίζας της συγκόλλησης, ο ακριβής προσανατολισμός του πυρσού, κατά πλήρη αντιστοιχία με τη διεύθυνση της ραφής συγκόλλησης και η χρήση των σωστών παραμέτρων. Επίσης, αποτελεσματικό μέτρο αποτελεί η μικρή προεξοχή του ηλεκτροδίου καθώς και η εναλλαγή της πολικότητας του ηλεκτροδίου σε θετική.

Ακολουθως, συχνά εμφανιζόμενο σφάλμα αποτελούν οι εν θερμώ ρωγματώσεις. Εμφανίζονται, τόσο σε αυχενικές, όσο και σε μετωπικές συγκολλήσεις. Λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία 1200 °C και συνήθως οφείλονται σε φαινόμενου διαχωρισμού

κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Συνεπώς, οδηγούν στη συγκέντρωση άνθρακα και θείου κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης, γεγονός που ερμηνεύεται ως χαμηλή αντοχή για τη συγκεκριμένη περιοχή. Το παρόν σφάλμα αποτρέπεται με διαδικασίες απόψυξης της λίμνης από τη ρίζα στην επιφάνεια, με σκοπό η ανάπτυξη κρυστάλλων να συμβεί διαγώνια και με φορά προς την επιφάνεια. Για τις περιπτώσεις παχέων ελασμάτων, οι εν θερμώ ρωγματώσεις συμβαίνουν, όταν οι ρυθμοί απόψυξης είναι γρήγοροι. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με διαδικασίες προθέρμανσης, έτσι ώστε να επιτευχθούν αργότεροι ρυθμοί απόψυξης. Επιπλέον, προτιμώνται αργές ταχύτητες συγκόλλησης και χαμηλές τιμές τάσεως τόξου.

Επιπροσθέτως, σημαντικό σφάλμα συντελεί η ανάπτυξη πόρων. Προκύπτουν από τις διασπάσεις αερίων κατά τη διάρκεια στερεοποίησης. Η αποφυγή πορώδους μπορεί να αποφευχθεί με προσεκτική εναπόθεση των πολλαπλών περασμάτων καθώς και με ενδελεχή καθαρισμό των τεμαχίων από ακαθαρσίες. Επίσης, αύξηση της τάσης τόξου και μείωση της ταχύτητας και της έντασης ρεύματος, μπορούν να οδηγήσουν σε ελαχιστοποίηση της εμφάνισης πόρων

Επιπλέον σύνηθες σφάλμα χειρωνακτικών εργασιών SAW συνιστά το έγκλεισμα σκουριάς. Τα εγκλείσματα σκουριάς κάνουν, σπανιότερα, την εμφάνιση τους και σε αυτοματοποιημένες συγκολλήσεις SAW. Παρουσιάζονται μεταξύ άμεσα διαδοχικών περασμάτων σε συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων. Επομένως, απαιτείται προσεκτική αφαίρεση των στρωμάτων σκουριάς, πρότερα κάθε περάσματος.

Επίσης, η παρουσία υποκοπής συνιστά ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό συγκόλλησης εμφανιζόμενο κυρίως, όταν εφαρμόζονται υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Μείωση της τάσεως τόξου και της ταχύτητας συγκόλλησης βοηθάει στην αντιμετώπιση της παρούσης κατηγορίας σφαλμάτων. Διορθωτικό μέτρο αποτελεί επίσης και η αλλαγή της πολικότητας του ηλεκτροδίου σε αρνητική για την περίπτωση, όπου εφαρμόζεται θετική πολικότητα.

Ιδιαίτερο σφάλμα της SAW αποτελεί και η δημιουργία άνισων ραφών, κυρίως σε περιπτώσεις ρεύματος 1100A και άνω. Ο λόγος ύπαρξης τους έγκειται στο γεγονός ότι το τόξο διεισδύει στο στρώμα σκόνης, με αποτέλεσμα το στρώμα της τηγμένης σκουριάς να παρουσιάζει ανομοιόμορφο πάχος.

1.2.6.6 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου SAW.[6],[58]

Η μέθοδος SAW έχει ως άμεσο πλεονέκτημα την υψηλή ποιότητα του μετάλλου συγκόλλησης και την ομοιόμορφη και λεία όψη ραφής. Σε γενικότερες γραμμές, οι ρυθμοί εναπόθεσης, η αποδοτικότητα της εναπόθεσης και η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα. Επιπροσθέτως, το επίπεδο των παραγόμενων αναθυμιάσεων διατηρείται μηδαμινό, με άμεσο συμφέρον υγείας για τον συγκολλητή. Η SAW θεωρείται εξαιρετικά αποδοτική μέθοδος, η οποία δύναται να υλοποιηθεί από σχεδόν όλα τα σιδηρούχα μέταλλα. Χάλυβες ανθρακούχοι, ανοξείδωτοι και χαμηλά κραματωμένοι, με πάχος έως 12 mm μπορούν να συγκολληθούν με ένα πέρασμα. Εν αντιθέσει, παχύτερες εγκάρσιες τομές απαιτούν πολλαπλά περάσματα. Ακολούθως, αξίζει να αναφερθεί, ότι η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ανεκτική σε ανεπαρκή καθαρισμό και προετοιμασία της συμβολής συγκόλλησης.

Από την αντίθετη πλευρά, ο κύριος περιορισμός της μεθόδου αφορά την ευχέρεια εναλλαγής θέσεως συγκόλλησης. Λόγω ύπαρξης της κοκκώδους σκόνης προστασίας, η μόνη έμπρακτη θέση για τη μέθοδο SAW είναι η επίπεδη ή η κεκλιμένη της κατά γωνίας 15° . Σαν περιορισμός θεωρείται η μη συμβατότητα της με ένα μεγάλο εύρος μη σιδηρούχων κραμάτων. Τέλος, μειονέκτημα αποτελεί η εμφάνιση υπολειμμάτων σκουριάς και σκόνης στο μέταλλο συγκόλλησης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές απαιτήσεως πολλαπλών περασμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.

- [1] Β.Ι Παπάζογλου, 1995, *Ναυπηγική Τεχνολογία (Σημειώσεις)*, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π .
- [2] Β.Ι Παπάζογλου, 1994, *Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων (Σημειώσεις)*, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π .
- [3] Γ.Δ Χρυσουλάκης Δ.Ι Παντελής, 2007, *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [4] Γ.Ν Χαϊδεμενόπουλος, 2010, *Εισαγωγή στις συγκολλήσεις*, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] American welding society, 2003, *Welding Processes*, Welding Technology and design, Miami, AWS.
- [6] American welding society, 2003, *Fusion welding Processes*, Miami, AWS.
- [7] European federation for welding, joining and cutting, 2010, *Manual metal arc welding – Types of electrodes*, EWF, Porto Salvo.
- [8] Miller Electric, 2013, *Guidelines for Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois.
- [9] WWS, 2006, *an introduction to Manual Metal Arc (MMA) “Stick” Welding*, WWS, Hertfordshire.
- [10] Lincoln Electric, 2008, *SMAW: Facilitator’s guide*, Lincoln Electric, Cleveland.
- [11] American welding society, 2005, *Electrode Orientation in Shielded Metal Arc Welding*, Welding Handbook vol.2 9th edition, AWS, Miami.
- [12] Welding Journal, 2009, *SMAW Best Practices*, AWS, Miami.
- [13] P.G.H Pistorius, S. Liu, 1997, *Changes In Metal Transfer Behavior during Shielded Metal Arc Welding*, Welding Journal, Miami.
- [14] BOC, 2007, *Fundamentals of Manual Metal Arc (MMA) Welding*, Section 8, BOC.
- [15] W.F Savage, E.F Nippes, E.S. Szekeres, 1976, *Hydrogen Induced Cold cracking in Low Alloy Steel*, Welding Journal, Miami.
- [16] Wilhelmsen Ships Service, 2000, *Welding Issues: Hydrogen Cracking – Cold Cracks (Hydrogen embrittlement)*, Wilhelmsen Maritime Services, Lysaker.
- [17] European federation for welding, joining and cutting, 2007, *Cold Cracking*, EWF, Porto Salvo.
- [18] C. Rossellini, L. Jarvis, 2011, *The keyhole TIG welding process: a valid alternative for valuable metal joints*, Taylor & Francis, London.
- [19] Miller Electric, 2013, *Guidelines for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois.
- [20] WWS, 2006, *An introduction to TIG Welding*, WWS, Hertfordshire.
- [21] Joshua Sprinkle, 2010, *Tips for Preparing & Selecting Tungsten Electrodes*, Welding Journal, Miami.
- [22] John Luck, 2010, *Tips to Improve GTAW Arc Starts*, Welding Journal, Miami.
- [23] Brent Williams, 2006, *Understanding AC GTAW Balance Control*, Welding Journal, Miami.

- [24] Richard Sutherlin, 2007, *The Welding of Titanium and its alloys*, Welding Journal, Miami.
- [25] Young H. Chang, 2006, *Improve GMAW and GTAW with Alternating Shield Gases*, Welding Journal, Miami.
- [26] G. J. Zhang, S.B Chen, L. Wu, 2005, *Intelligent Control of Pulsed GTAW with Filler Metal*, Welding Journal, Miami.
- [27] BOC, 2007, *GTAW (TIG) Welding*, Section 4, BOC.
- [28] J. Norberto Pires, Altino Loureiro, Gunnar Bolsmjo, 2006, *Welding Robots: Technology, System Issues and Applications*, Springer – Verlag publications, London.
- [29] M.J Kang, Y. Kim, S. Ahn, S.Rhee, 2003, *Spatter Rate Estimation in the Short-Circuit Transfer Region of GMAW*, Welding Journal, Miami.
- [30] Kobe Steel Ltd., 2011, *Essential Factors in Gas Metal Arc Welding 4th edition*, Kobe Steel Ltd., Tokyo.
- [31] Lincoln Electric, 2006, *GMAW Welding Guide: Carbon, Low Alloy, Stainless Steels and Aluminium*, Lincoln Electric, Cleveland.
- [32] Miller Electric, 2013, *Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois.
- [33] Richard Green, 2010, *Reducing Gas Surges Improves GMAW Profitability*, Welding Journal, Miami.
- [34] V. V. Vaidya, 2002, *Theory and Practice of Shielding Gas Mixtures for Semi-automatic welds*, Welding Journal, Miami.
- [35] S. Subramaniam, D. R. White, J. E. Jones, D. W. Lyons, 1999, *Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW*, Welding Journal, Miami.
- [36] Andy Monk, 2010, *Air vs. Water Cooled: Which GMAW Gun Type Is Right for Your Application?*, Welding Journal, Miami.
- [37] Scott Laymon, Craig Chritz, Fred Schweighardt, 2010, *Argon/Oxygen Shielding Gases Improve Carbon Steel GMAW*, Welding Journal, Miami.
- [38] K. H. Li, Y. M. Zhang, 2008, *Double Electrode GMAW Part I: The Process*, Welding Journal, Miami.
- [39] L. O. Vilarinho, A. S. Nascimento, D. B. Fernandes, C. A. M. Mota, 2009, *Methodology for Parameter Calculation in VP-GMAW*, Welding Journal, Miami.
- [40] BOC, 2007, *GMAW (MIG)/ FCAW*, Section 4, BOC.
- [41] Y. S. Kim, T. W. Eagar, 1993, *Metal Transfer In Pulsed Current Gas Metal Arc Welding*, Welding Journal, Miami.
- [42] B. Morrett and B. Giese, 2006, *Troubleshooting the GMAW Process*, Welding Journal, Miami.
- [43] H. R. Ghazvinloo, A. Honarbakhsh Raoyf, 2010, *Effect of Gas Shielded Flux Cored Arc Welding Parameters on Weld Width and Tensile Properties of Weld Metal In Low Carbon Steel*, Journal of Applied Sciences, Iran.
- [44] European federation for welding, joining and cutting, 2007, *Flux Cored Arc Welding*, EWF, Porto Salvo.

- [45] H. W. Lee, S. W. Kang, J. U. Park, 2001, *Fatigue Strength Depending on Position of Transverse Cracks in FCAW Process*, Welding Research: supplement to the Welding Journal, Miami.
- [46] Praxair Technology, 1998, *Shielding Gases: Selection Manual*, Praxair Technology, Danbury.
- [47] Ramy Gadallah, Raouf Fahmy, Tarek Khalifa, Alber Sadek, 2012, *Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel*, International Journal of Engineering and Technology Innovation, vol. 2, Cairo.
- [48] Tom Myers, 2010, *Choosing a Shielding Gas for FCAW*, Welding Journal, Miami.
- [49] L. Jefus, L. Bower, 2009, *Welding Skills: Processes and Practices for Entry Level Welders 1st edition*, Delmar Cengage Learning, London.
- [50] American welding society, 2006, *FCAW Best Practices*, Welding Handbook 9th edition vol.2, part 1, Welding Journal, Miami.
- [51] J. H. Kiefer, 1995, *Bead Tempering Effects on FCAW Heat-Affected Zone Hardness*, Welding Research Supplement, Welding Journal, Miami.
- [52] J. H. Kiefer, 1996, *Effects of Moisture Contamination and Welding Parameters on Diffusible Hydrogen*, Welding Research Supplement, Welding Journal, Miami.
- [53] H. W. Lee, S. W. Kang, D. S. Um, 1998, *A Study on Transverse Weld Cracks in Thick Steel Plate with the FCAW Process*, Welding Research Supplement, Welding Journal, Miami.
- [54] D. D. Harwig, D. P. Longenecker, J. H. Cruz, 1999, *Effects of Welding Parameters and Electrode Atmospheric Exposure on the Diffusible Hydrogen Content of Gas Shielded Flux Cored Arc Welds*, Welding Research Supplement, Welding Journal, Miami.
- [55] E. S. Surian, N. M. Ramini De Rissone, H. G. Svoboda, R. Rep, and L. A. De Vedia, 2010, *SMAW, FCAW, and SAW High-Strength Ferritic Deposits: The Challenge Is Tensile Properties*, Welding Journal, Miami.
- [56] ISF Welding and Joining Institute, 2005, *Submerged Arc Welding*, ISF, Aachen.
- [57] BOC, 2007, *Submerged Arc Welding (SAW)*, Section 4, BOC.
- [58] ESAB, 2008, *Submerged Arc Welding*, ESAB, Stockholm.
- [59] N. B. Mostafa, M. N. Khajavi, 2006, *Optimization of Welding Parameters for Weld Penetration in FCAW Volume 16, Issue 1-2*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Iran.
- [60] V. Vasantha Kumar, N. Murugan, 2011, *Effect of FCAW Process Parameters on Weld Bead Geometry in Stainless Steel Cladding*, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 10, No.9, USA.
- [61] K. Packard, 2010, *Selecting SAW Consumables for Low-Alloy Steels*, Welding Journal, Miami.

Κεφάλαιο 2^ο

'' Διφασικοί Χάλυβες FCA Υψηλής Αντοχής σε

Κόπωση ''

2.1. Εισαγωγή. [1],[2],[13]

Όταν ένα υλικό υπόκειται σε εναλλασσόμενη, περιοδική και συνεχή καταπόνηση, καθίσταται δυνατή η δημιουργία θραύσης του, έπειτα από ένα συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών. Ο αριθμός των επιδεχόμενων εναλλαγών αυξάνεται, ευλόγως, για μείωση της επιβαλλόμενης τάσης. Για τη ναυπηγική βιομηχανία, δυο κύριοι τύποι θραύσεως από κόπωση παρουσιάζουν ενδιαφέρον:

(a) Κόπωση υψηλής συχνότητας-χαμηλής τάσης (High cycle-low stress fatigue).

(b) Κόπωση χαμηλής συχνότητας-υψηλής τάσης (Low cycle-high stress fatigue).

Ο πρώτος τύπος κόπωσης χαρακτηρίζει κυρίως, στοιχεία κατασκευής, που υπόκεινται σε γρήγορη εναλλαγή φορτίων πχ. (περιοχές κοντά στην έλικα ή στο στροφαλοφόρο άξονα), ενώ ο δεύτερος χαρακτηρίζει περιοχές, κοντά σε ασυνέχειες της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους.

Η θραύση λόγω κόπωσης, χαρακτηρίζεται από τα εξής 3 στάδια [1]:

I. Έναρξη της ρωγμής - Fatigue crack initiation.

Η έναρξη της ρωγμής συνήθως λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της κατασκευής. Είναι το στάδιο, κατά το οποίο αναπτύσσεται ,λόγω κόπωσης, κάποιο ελάττωμα, που θα μπορούσε ενδεχομένως να εξαλειφθεί με κατάλληλη κατεργασία.

II. Διάδοση της ρωγμής μέσω ταινιών ολίσθησης - Fatigue crack propagation.

Η ,αρχικά παρουσιαζόμενη, μικρή ρωγμή αυξάνει το μέγεθος της, με κάθε εναλλαγή του φορτίου, μέσω των κρυσταλλογραφικών επιπέδων μέγιστης διατμητικής τάσης. Το στάδιο αυτό καλείται και στάδιο I ανάπτυξης της ρωγμής.

III. Διάδοση ρωγμής μέσω των επιπέδων της μέγιστης εφελκυστικής τάσης.

Περιλαμβάνει την επέκταση της ρωγμής του προηγούμενου σταδίου κάθετα στον άξονα εφαρμογής της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. (Στάδιο II)

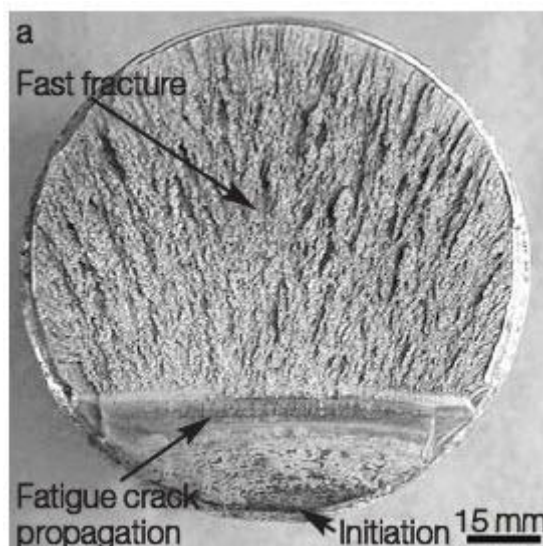
IV. Τελικό στάδιο αστοχίας - Fatigue fracture.

Καθώς η ρωγμή διαδίδεται, η τάση στην εναπομένουσα εγκάρσια τομή αυξάνει,οπότε υφίσταται παράλληλη αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Η τελική θραύση επέρχεται, είτε με ψαθυρό τρόπο, όπου το μέγεθος της ρωγμής φτάνει στην κρίσιμη τιμή του για τις επικρατούσες συνθήκες και γεωμετρία, είτε με όλκιμο τρόπο, όπου η τοπική τάση ξεπερνά το όριο θραύσης.

Η μορφολογία μιας τυπικής επιφάνειας θραύσης από κόπωση διέπεται από κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η περιοχή, γύρω από την έναρξη της ρωγμής, είναι λεία, ιδιότητα που οφείλεται στο γεγονός ότι, οι δυο παρειές της ρωγμής τρίβονται, σε κάθε εναλλαγή φορτίου, μεταξύ τους.Λεπτομερέστερη εξέταση οδηγεί σε ανακάλυψη ομόκεντρων κύκλων (striations), γύρω από τον πυρήνα της ρωγμής, και ακτινικών γραμμών, που ξεκινούν από τον πυρήνα. Όσον αφορά το τελικό στάδιο της θραύσης, η μορφή της επιφάνειας εξαρτάται από το αν θραύεται με ψαθυρό ή όλκιμο τρόπο, και η επιφάνεια λαμβάνει κρυσταλλική ή ινώδη υφή, αντίστοιχα.(εικόνα 2.1)

Οι ρωγμές, οι οποίες οφείλονται σε φορτίσεις κόπωσης, αποτελούν ένα, εκ των σημαντικότερων προβλημάτων αστοχίας της γάστρας του πλοίου. Η κατανόηση των

ιδιοτήτων των ρωγμών συντελεί ουσιώδες βήμα, στην αντιμετώπιση της εμφάνισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Η διαπίστωση της ύπαρξης ρωγμής (του σταδίου της έναρξης), είναι ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα για συγκολλητές κατασκευές υψηλού βαθμού πολυπλοκότητας, όπως η γάστρα του πλοίου. Επομένως, έγινε συντεταγμένη προσπάθεια επίλυσης του ζητήματος προς δυο καίριες κατευθύνσεις. Η μία αφορούσε τη μείωση των τάσεων κρίσιμων κατασκευαστικών στοιχείων, κατά τη φάση μελέτης και λεπτομερούς σχεδίασης του πλοίου. Η έτερη κατεύθυνση αφορούσε την εισαγωγή νέων βιομηχανοποιημένων υλικών, τα οποία θα παρουσίαζαν εξαιρετική αντίσταση σε ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης.



Εικόνα 2.15 Απεικόνιση των σταδίων ψαθυρής θραύσης
(1)Έναρξη ρωγμής-Initiation, (2)Διάδοση ρωγμής-Propagation, (3)Θραύση υλικού - Fracture

2.2. Γενικά Χαρακτηριστικά Χαλύβων FCA.

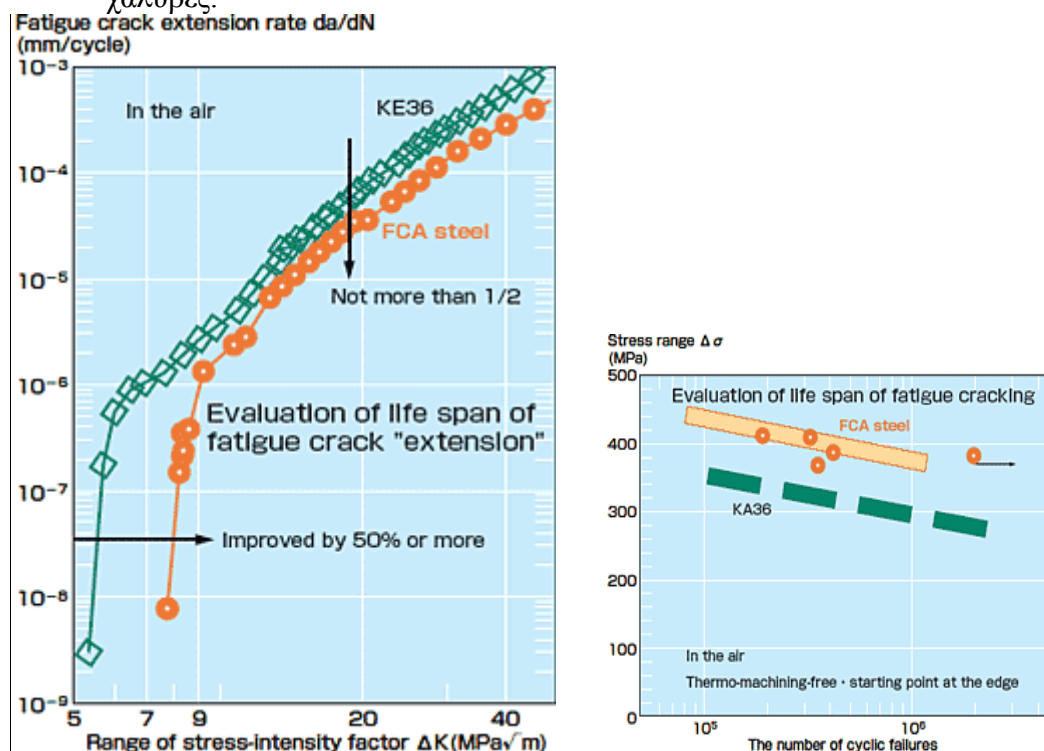
2.2.1. Γενικά Στοιχεία.[4],[5],[8]

Το έτος 2001, η βιομηχανία μετάλλου Sumitomo Metal Industries Ltd. ανέπτυξε ένα καινούριο είδος χάλυβα, με βελτιωμένη αντίσταση σε έναρξη ρωγμών κόπωσης, και βελτιωμένη αντίσταση στην ανάπτυξη και διάδοση *crack growth life* των ρωγμών κόπωσης συγκολλητών κατασκευών. Ο συγκεκριμένος χάλυβας έλαβε την ονομασία FCA, ή αλλιώς, Fatigue Crack Arrester. Επιτρέπει υψηλότερη διάρκεια ζωής υλικού σε καταπονήσεις κόπωσης, τόσο για ελάσματα βασικού μετάλλου, όσο για συμβολές συγκολλημένων ελασμάτων. Η οικογένεια των FCA χαλύβων είναι πλέον, αποδεκτή οικογένεια υλικών από νηογνώμονες, όπως οι NK, ABS, LRS και DNV και έχει εφαρμοστεί στην κατασκευή τουλάχιστον 60 πλοίων. Επιπροσθέτως, εταιρείες όπως η Kawasaki Heavy Industries (KHI), έχουν υλοποιήσει, πλήρως, τη χρήση χαλύβων FCA δεύτερης γενιάς (FCA-W) σε πλοία LNG μεταφοράς υγροποιημένου αερίου. [4] Πειραματικές εκθέσεις υποστηρίζουν ότι, η χρήση χαλύβων FCA για την κατασκευή καίριων στοιχείων του πλοίου, καθίσταται άμεσα αποτελεσματική, καθώς επιδέχονται υψηλές τάσεις λόγω φορτίσεων κυματισμού, οδηγώντας παράλληλα σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (3x) υπό κόπωση. Ένας παράγοντας, ο οποίος δύναται να συνεισφέρει θετικά στην αύξηση αντοχής σε κόπωση των χαλύβων FCA, είναι και η κατεργασία υπερηχητικής κρούσης (Ultrasonic Impact Treatment ή Ultrasonic Peening). Η θεωρία που αφορά το συγκεκριμένο εδάφιο, παρατίθεται εκτενώς σε ακόλουθη παράγραφο.

Οι χάλυβες FCA αναπτύχθηκαν, όπως προαναφέρθηκε, ως πρακτικά υλικά, που παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση σε θραύση, λόγω κοπώσεως. Υλοποιήθηκαν, μέσω ρύθμισης της επιθυμητής χημικής σύστασης και εφαρμογής θερμό-μηχανικών διαδικασιών ελέγχου TMCP (Thermo-mechanical control processes). Η εφαρμογή των διαδικασιών TMCP συνδράμει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χάλυβων FCA, χωρίς παράλληλα να υφίσταται υποβάθμιση της ικανότητας συγκολλητότητας τους, συγκριτικά με τους συμβατικούς χάλυβες. Επιπλέον, η χρήση TMCP χάλυβων κατέστησε εφικτή τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, την αύξηση της ταχύτητας, καθώς και αύξηση της προσδιδόμενης θερμικής ισχύος, κατά τη φάση της συγκόλλησης λόγω καλύτερης συγκολλητότητας και σκληρότητας της ΘΕΖ. Παρόλο που θεωρείται ανθρακούχος χάλυβας, η μικροδομή του είναι σύνθετη και συνιστά την κύρια αιτία μείωσης της ταχύτητας διάδοσης της ρωγμής.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των χάλυβων FCA, αναφορικά με τις καταπονήσεις της κόπωσης, είναι τα εξής:

- (1) Η έναρξη ρωγμών κοπώσεως, ελέγχεται καλύτερα συγκριτικά με συμβατικούς χάλυβες.
- (2) Σε περίπτωση έναρξης της ρωγμής, η μικροδομή του υλικού αντιστέκεται στη διάδοση της και διακόπτει την ανάπτυξη της.
- (3) Σαν συνέπεια των ανωτέρω, η διάρκεια ζωής της εκάστοτε κατασκευής σε κύκλους λειτουργίας, επιμηκύνεται.
- (4) Παρουσιάζει ιδίου ή υψηλότερου επιπέδου, ιδιότητες (πχ. συγκολλητότητα, κατεργασιμότητα, αντίσταση σε διάβρωση, κλπ) συγκριτικά με συμβατικούς χάλυβες.



Εικόνες 16.2 και 2.3 Απεικόνιση διαφοροποίησης των ιδιοτήτων κόπωσης για χάλυβες FCA KA36 και KE36.

2.2.2. Τυποποίηση χάλυβων FCA. [8],[9]

Η οικογένεια χάλυβων FCA κατηγοριοποιείται στους χάλυβες υψηλής αντοχής. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση, τους κατατάσσει στους ανθρακό-μαγγανιούχους, λόγω του υψηλού φερόμενου ποσοστού μαγγανίου στη μικροδομή τους. Επιπλέον, βάσει

των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, κατηγοριοποιούνται στις οικογένειες χαλύβων 490N,520N,570N και 590N. Μια συνοπτική κατηγοριοποίηση τους, με γνώμονα τα διεθνή πρότυπα τυποποίησης, παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.11 Ονοματολογία χαλύβων FCA συναρτήσει διεθνών προτύπων τυποποίησης.

ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ			
JIS		ASTM	Ship Classification Society
JIS G 3106	SM490	A572	A32,36,40
	SM490Y	A573	D32,36,40
	SM520	A572 Gr.60/65	A43/D43
	SM570	A678 Gr.C/D A841	A47/D47 E47
JIS G 3114	SMA490W	A242 Type2	-
		A588	-
	SMA570W	-	-

Λόγω του γεγονότος ότι, οι χάλυβες FCA αποτελούν νέα, αναπτυσσόμενη ομάδα βιομηχανικών χαλύβων και λόγω μη εκτεταμένης ερευνητικής μελέτης, δεν υφίσταται πλούσια διαθέσιμη βιβλιογραφία.

2.2.3. Χημική Σύσταση χαλύβων FCA. [4],[5],[6]

Η τυπική σύσταση (% κ.β) των χαλύβων FCA, παρατίθεται με τη βοήθεια του πίνακα, που ακολουθεί:

Πίνακας 2.12 Χημική Σύσταση χάλυβα FCA.

Χημική Σύσταση Χαλύβων FCA								
Στοιχείο	C	Si	Mn	P	S	P _{cm}	C _{eq}	έτερα στοιχεία
Σύσταση (% κ.β)	0.04	0.42	1.50	0.009	0.002	0.139	0.325	Cr,Nb,Al,Ti

Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη μικροδομή του βασικού μετάλλου συμπεριλαμβάνονται και μικρότερες ποσότητες των στοιχείων Cr, Nb, Al, V, Mo και Ti, μερικές εκ των οποίων, υπεισέρχονται στον υπολογισμό των P_{cm} και C_{eq} :

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

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

Σε γενικά πλαίσια, η χημική σύσταση της συγκεκριμένης οικογένειας χαλύβων δεν είναι εξειδικευμένη, με εξαίρεση το χαμηλό ποσοστό άνθρακα στη μικροδομή τους, συγκριτικά με τους συμβατικούς χάλυβες. Η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει, ότι το ποσοστό του άνθρακα στη μικροδομή των χαλύβων FCA, δύναται να κυμαίνεται από 0.04-0.06%, το ποσοστό πυριτίου από 0.42-0.44 και το μαγγάνιο από 1.48-1.55.

2.2.4. Μηχανικές Ιδιότητες χαλύβων FCA. [4],[5],[6]

Η οικογένεια των χαλύβων FCA παρουσιάζει, ισοδύναμες ή καλύτερες, μηχανικές ιδιότητες από τους συμβατικούς χάλυβες. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι ελαφρά υψηλότερη, από αυτή των συμβατικών χαλύβων. Μολαταύτα, το εύρος αντοχής τους εμπίπτει εντός των συνήθων ορίων. Επιπροσθέτως, ιδιότητες όπως η δυσθραυστότητα και η συγκολλητότητα, που παρουσιάζουν, κυμαίνονται σε ισοδύναμα επίπεδα με τα

αντίστοιχα των συμβατικών χαλύβων. Οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες των FCA χαλύβων κατατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.13 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων FCA, συναρτήσει του πάχους από την κατασκευάστρια εταιρεία Sumitomo Metal Industries.

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

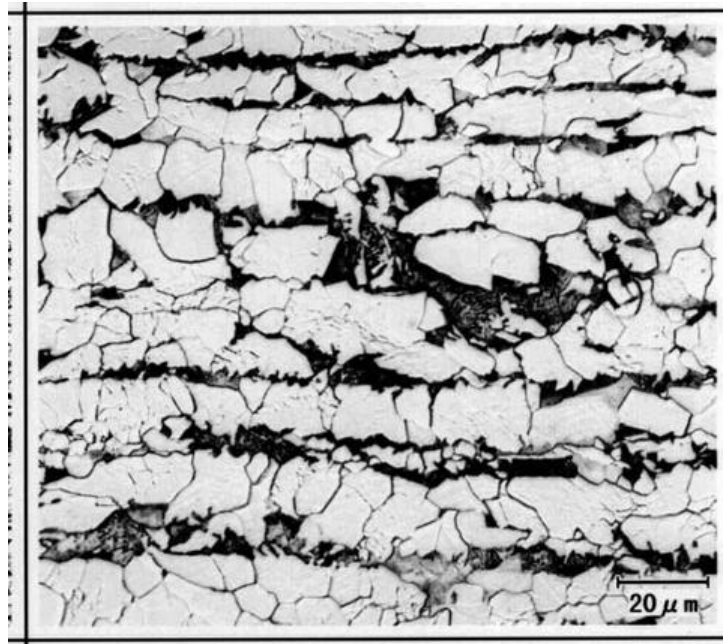
Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες, σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες χαλύβων FCA, οι οποίοι έχουν συγκολληθεί. Ο ακόλουθος πίνακας πληροφορεί τον αναγνώστη ως εξής:

Πίνακας 2.14 Μηχανικές ιδιότητες συγκολλημένων χαλύβων FCA από την κατασκευάστρια εταιρεία Sumitomo Metal Industries.

Μηχανικές Ιδιότητες συγκολλημένων χαλύβων FCA					
Μέθοδος Συγκόλλησης	Προσδιδόμενη ενέργεια (kJ/mm)	Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm ²)	Δυσθραυστότητα σε -20°C vE(J)		
			Μέταλλο Βάσης	Μέταλλο Εναπόθεσης	ΘΕΖ
GMAW	0.5	583	63	72	115
FCB	15	530	137	118	70
SAW	5	584	107	210	226
SAW	5	631	150	176	211
GMAW	1	680	103	195	236
SAW	5	625	117	153	123

2.2.5. Μικροδομή Χαλύβων FCA. [4],[5]

Η μικροδομή των χαλύβων FCA είναι διφασική (**dual phase**), αποτελούμενη από εναλλαγές στρώσεων φερρίτη και μπαινίτη. Ο φερρίτης (ferrite) αποτελεί τη μαλακή φάση, ενώ ο μπαινίτης (bainite) τη σκληρότερη. Η διφασική δομή τους δικαιολογεί το χαμηλό λόγο ορίου διαρροής/αντοχή σε εφελκυσμό. Η ύπαρξη της διφασικής δομής συνιστά πλεονέκτημα των χαλύβων FCA για τη συμπεριφορά τους σε κόπωση και αναλύεται εκτενώς σε ακόλουθο κεφάλαιο. Οι ακόλουθες, παρατιθέμενες εικόνες δίνουν μια τυπική μορφή μικροδομής των ενδιαφερόμενων χαλύβων, εν συγκρίσει με τους συμβατικούς. Η άσπρη περιοχή της εικόνας 2.4 καλύπτεται από φερρίτη, ενώ οι γκριζωπές περιοχές αντικατοπτρίζουν την ύπαρξη του μπαινίτη.



Εικόνα 2.17 Μικροδομή φερρίτη και περλίτη, συμβατικού χάλυβα KA36.



Εικόνα 2.18 Μικροδομή φερρίτη και μπαινίτη χάλυβα FCA.

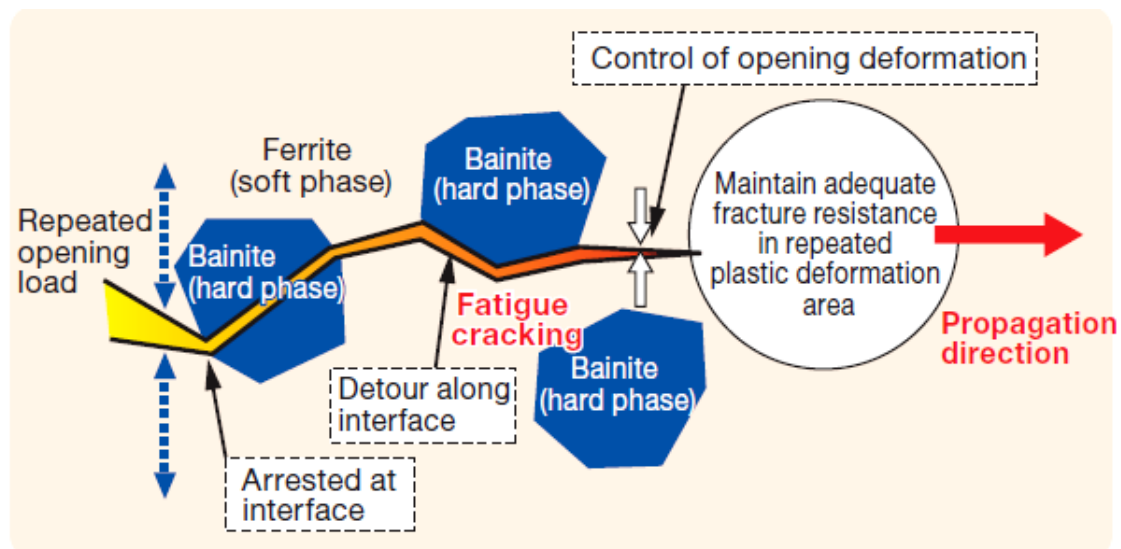
2.3. Συμπεριφορά χαλύβων FCA σε κόπωση. [4],[5],[6],[8],[10]

Η οικογένεια χαλύβων FCA, η οποία εμπίπτει στην κατηγορία των TMCP χαλύβων προσφέρει βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση, συγκριτικά με συμβατικούς χάλυβες. Το παρόν γεγονός οφείλεται, εν μέρει, στην εξευγενισμένη διαφασική μικροδομή φερρίτη και μπαινίτη, την οποία παρουσιάζουν. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μικροδομής των χαλύβων, θερμό-μηχανικών διαδικασιών ελέγχου επιτυγχάνεται, μέσω θερμής έλασης (**hot rolling**) στη μη επανακρυσταλλοποιημένη θερμοκρασιακή περιοχή και επακόλουθης επιταχυνόμενης ψύξης.

Η βελτιστοποίηση της μικροδομής των χαλύβων FCA, έχει ως άμεσο αντίκτυπο την εξαιρετική συμπεριφορά τους στην αντίσταση ανάπτυξης ρωγματώσεων, λόγω

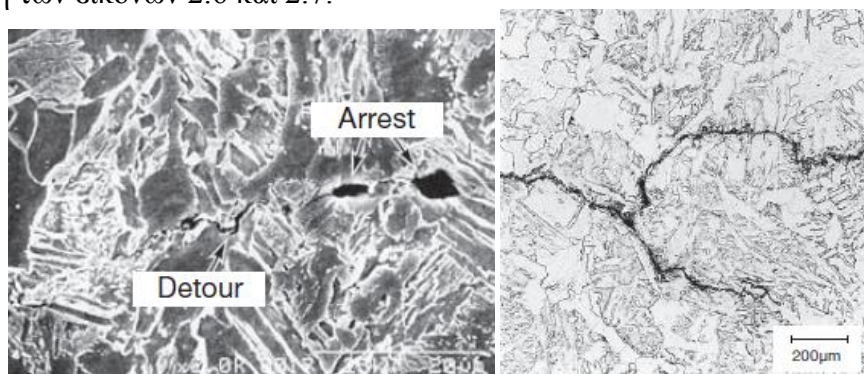
κόπωσης και στη συνολικότερα, ενισχυμένη αντοχή κοπώσεως τόσο στον αέρα, όσο και σε θαλασσινό νερό. Ο μηχανισμός, που υποστηρίζει τη συγκεκριμένη συμπεριφορά αναλύεται ακολούθως, ως εξής:

Η εναλλαγή των στρώσεων της σκληρής φάσης της μικροδομής (**μπαινίτης**), με τις στρώσεις μαλακής φάσης (**φερρίτης**), καθορίζει άμεσα τη συμπεριφορά του υλικού στην ενδεχόμενη ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης. Ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής λόγω κόπωσης (*fatigue crack growth rate*) μειώνεται δραστικά, όταν η ρωγμή συναντά την επιφάνεια των στρωμάτων μπαινίτη. Με άλλα λόγια, η ανάπτυξη της ρωγμής κόπωσης εμποδίζεται κατά το τελικό στάδιο της διαδικασίας "προχώρησης" της ρωγμής από ένα στρώμα φερρίτη σε ένα στρώμα μπαινίτη. Σε γενικότερα πλαίσια, ο μηχανισμός βελτίωσης της συμπεριφοράς κοπώσεως των χαλύβων FCA, χαρακτηρίζεται κυρίως από λοξοδρόμηση και εμπόδιση της ρωγμής, κατά μήκος της διεύθυνσης, στην οποία αναπτύσσεται. Προς διασαφήνιση αυτής της συμπεριφοράς, παρατίθεται η ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.19 Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού συμπεριφοράς χαλύβων FCA στην ανάπτυξη ρωγμής λόγω κόπωσης. [Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 2012]

Η λειτουργία του συγκεκριμένου μηχανισμού, διασαφηνίζεται ,περαιτέρω, με παράθεση των εικόνων 2.6 και 2.7.



Εικόνες 2.20 & 2.7 Απεικόνιση μηχανισμού λοξοδρόμησης και εγκλωβισμού (Detour & arrest) ρωγμών κοπώσεως. [Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 2012]

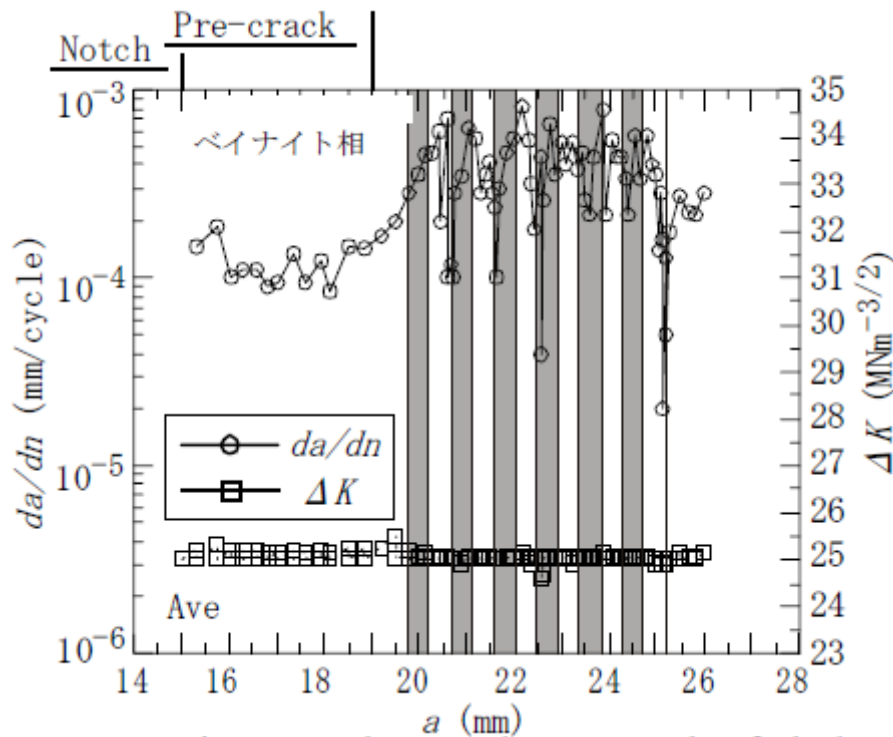
Η διάδοση της ρωγμής ενισχύεται από την ύπαρξη της εκάστοτε φερριτικής δομής, που συναντάται στη διεύθυνση ανάπτυξης της, ενώ είτε εμποδίζεται ή εγκλωβίζεται υπό την περίπτωση συνάντησης της με στρώμα μπαινιτικής δομής. Η διερεύνηση της παρούσης συμπεριφοράς εκτιμήθηκε, βάσει αποτελεσμάτων πειραματικών εκθέσεων

[4]. Πιο συγκεκριμένα, προετοιμάστηκαν πλάκες φερριτικής και μπαινιτικής δομής, οι οποίες κατεργάστηκαν, ώστε να αποκτήσουν πάχος 1mm. Έπειτα από διαδικασίες θερμής έλασης και σφυρηλάτησης, ένα επικολλημένο υλικό δώδεκα στρωμάτων θερμάνθηκε στους 900°C για 30 λεπτά, και αποψύχθηκε με νερό μέχρι τους 25°C. Τις θερμικές κατεργασίες διαδέχτηκε ο υπολογισμός της μικροσκληρότητας των πλακών, κατά Vickers, όπου στα φερριτικά στρώματα μετρήθηκε 151 HV, ενώ στα μπαινιτικά στρώματα ανήλθε στην τιμή των 210 HV. Η χημική σύσταση των πλακών φερρίτη (α) και μπαινίτη (β) παρατίθεται στον πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.15 Χημική σύσταση (% κ.β) δοκιμών φερρίτη και μπαινίτη.

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr
(α)	<0.01	0.25	-	-	-	-
(β)	0.12	0.25	0.75	0.35	0.15	0.5

Από το προκύπτον υλικό δημιουργήθηκαν προ-ρωματωμένα δοκίμια πάχους 5mm. Ο συντελεστής εντατικής κατάστασης στην άκρη της ρωγμής κόπωσης, διατηρήθηκε σταθερός στα 25 MPa·m^{1/2}, μέσω υπολογισμού του μήκους ρωγμάτωσης. Τα κύρια πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής κόπωσης κατατίθενται στο σχήμα 2.1. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προαναφερθέντος σχήματος διαπιστώνεται ότι, ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής μειώνεται δραστικά, κατά τη φάση μετάβασης, από τα φερριτικά στρώματα στα μπαινιτικά.

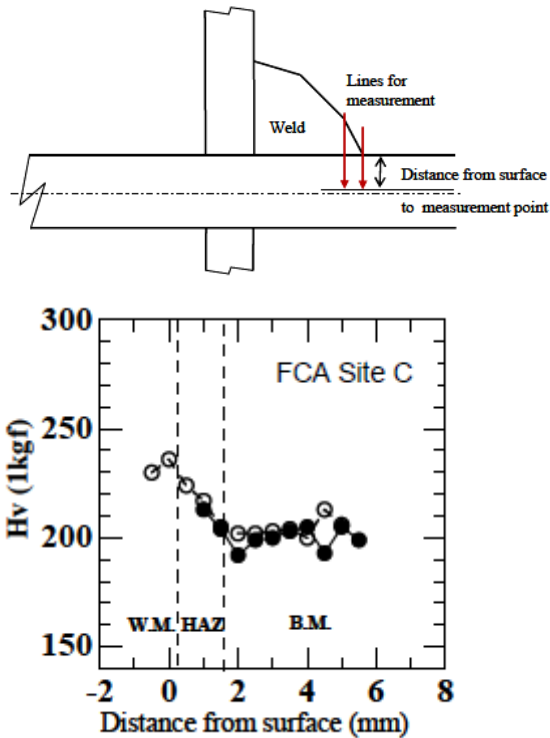


Σχήμα 2.16 Πειραματικά αποτελέσματα ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης. [ICOMAE 2003]

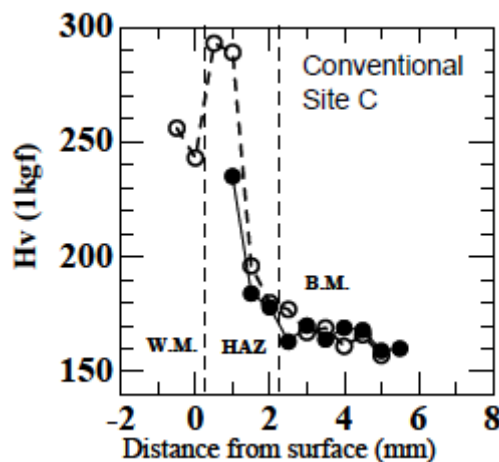
Παρόλο, που υφίσταται ισχνή επιτάχυνση της ανάπτυξης ρωγμής στη μετάβαση από τα μπαινιτικά στα φερριτικά στρώματα, η καθολική συμπεριφορά του υλικού χαρακτηρίζεται, ως επί το πλείστον, από ένα μηχανισμό επιβράδυνσης της ανάπτυξης ρωγμής, κατά τη μετάβαση από ένα μαλακό υλικό σε ένα σκληρότερο. Οι χάλυβες FCA παρουσιάζουν πλεονέκτημα στην ανάπτυξη ρωγματώσεων κόπωσης, λόγω της

διφασικής τους μικροδομής, λειτουργώντας υπό παρόμοιο μηχανισμό με αυτόν, που παρατέθηκε ανωτέρω.

Επιπροσθέτως, ένας λειτουργικός μηχανισμός των χαλύβων FCA, που συνδράμει στη βελτίωση της συμπεριφοράς τους σε κόπωση, είναι η αποφυγή της δημιουργίας φαινομένων εγκοπής του υλικού (material notch effect), λόγω ομοιογενούς κατανομής σκληρότητας. Μια εγκοπή υλικού δύναται, πολύ πιθανόν, να συμβεί σε περιοχές με απότομη μεταβολή της σκληρότητας.



Σχήμα 2.17 Κατανομή σκληρότητας συγκολλημένων χαλύβων FCA. [TSCF 2010]



Σχήμα 2.18 Σύγκριση κατανομών σκληρότητας χαλύβων FCA και συμβατικών χαλύβων. [TSCF 2010]

Οι χάλυβες FCA εμφανίζουν υψηλή αντίσταση σε έναρξη ρωγμών κοπώσεως, λόγω της κατάλληλης μικροδομής της ΘΕΖ μιας συγκόλλησης.

Εμβαθύνοντας στο ζήτημα της βελτίωσης της συμπεριφοράς των χαλύβων FCA σε κόπωση, αξίζει να αναφερθεί ότι, ενδεχόμενη κυκλική παραμόρφωση τους μεταβάλλει τις τάσεις στην άκρη της ρωγμής, επιδρώντας, εν τέλει, ενισχυτικά στην αντοχή τους

σε κόπωση. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι τα υλικά δύνανται να μαλακώσουν ή να σκληρύνουν, έπειτα από κυκλική παραμόρφωση. Οι ανοπτημένοι με εξομάλυνση χάλυβες, συνήθως, σκληραίνουν με κυκλική παραμόρφωση, ενώ αντιθέτως χάλυβες όπως ο KA36 διατηρούν ίδια επίπεδα σκληρότητας. Γενικά, το φαινόμενο της κυκλικής παραμόρφωσης, το οποίο καθιστά το υλικό μαλακότερο, επηρεάζει την κατανομή των τάσεων στην άκρη της ρωγμής κοπώσεως. Στην περίπτωση των FCA, η σκληρότητα στην άκρη της ρωγμής μειώνεται σημαντικά. Αποτελέσματα τεχνικών εκθέσεων απέδειξαν [4], επίσης, υψηλή μείωση της τάσεως στην άκρη της ρωγμής, κάτω από συνθήκες κυκλικής κόπωσης. Διαπιστώθηκε, επιπλέον, ότι στην άκρη της ρωγμής υφίστανται εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις, της τάξεως του ορίου διαρροής, κατά τη φάση φορτίσεως και θλιπτικές παραμένουσες τάσεις, κατά τη φάση αποφορτίσεως. Η προαναφερθείσα εναλλαγή τάσεων διαμορφώνει μια μαλακή κυκλική περιοχή κατά μήκος της διεύθυνσης ανάπτυξης των ρωγμών κοπώσεως. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά κυκλικού μαλακώματος επιφέρει μικρές παραμορφώσεις στην περιοχή της άκρης της ρωγμής κοπώσεως, βελτιώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο, την αντοχή θραύσεως σε κόπωση των χάλυβων FCA. Συνεπώς, εάν εξετάσουμε το ζήτημα συνολικά, επέρχεται βελτίωση της αντίστασης ανάπτυξης ρωγμών σε κόπωση.

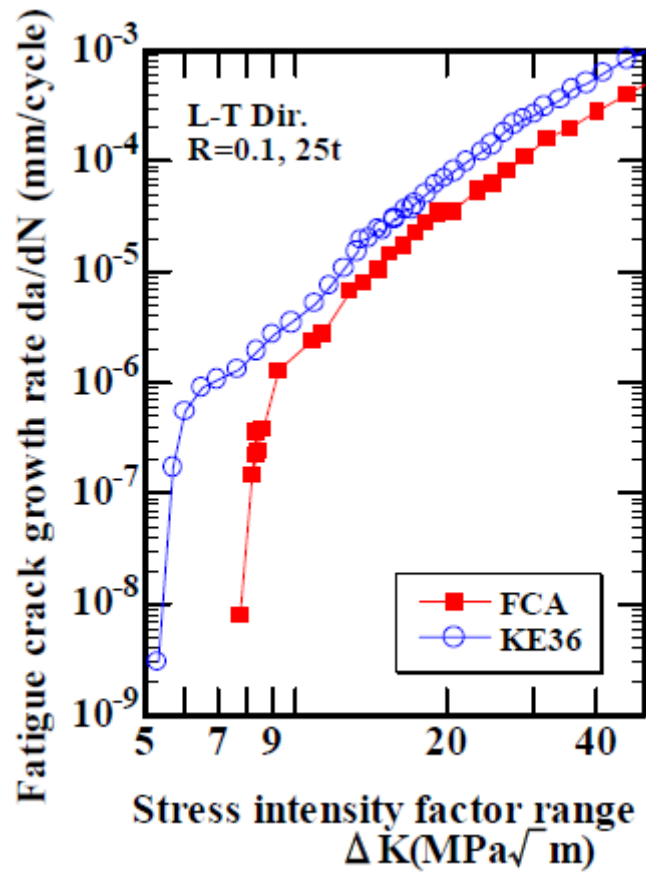
Σύγκριση συμπεριφοράς κοπώσεως με συμβατικούς χάλυβες.

Έχοντας, πλέον, παραθέσει μια πλήρη επεξήγηση του μηχανισμού συμπεριφοράς των χάλυβων FCA σε καταπονήσεις κόπωσης, αξίζει να κατατεθούν οι επιμέρους διαφοροποιήσεις, που παρουσιάζουν στις καίριες ιδιότητες κοπώσεως, συγκριτικά με τους συμβατικούς χάλυβες. Η εμφάνιση αστοχιών, λόγω κόπωσης, στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου έκρινε επιβεβλημένη την, εκ νέου δημιουργία ανθεκτικότερων υλικών και την ποσοτικοποίηση της διαφοράς τους, συγκριτικά με τα υπάρχοντα. Οι χάλυβες FCA φέρουν διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά κοπώσεως, γεγονός που έχει αποτελέσει αντικείμενο ερευνητικής μελέτης.

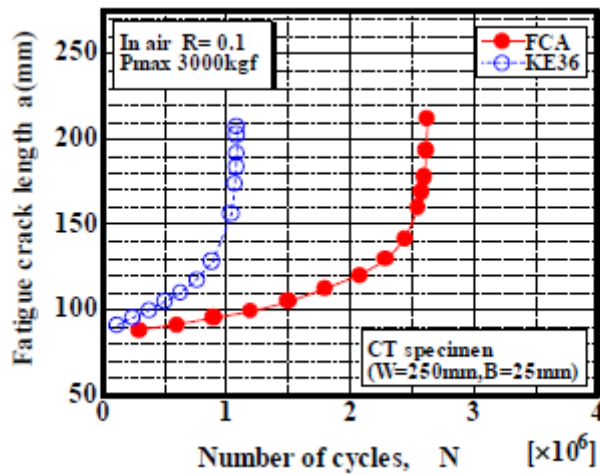
Αναλυτικότερα, ποικίλες πειραματικές εκθέσεις [4],[5] μελέτησαν τη συμπεριφορά κοπώσεως δοκιμίων FCA και την αντιπαραθέσαν με την αντίστοιχη, δοκιμίων από συμβατικούς χάλυβες. Χρησιμοποιήθηκαν προ-ρωγματωμένα και μη ρωγματωμένα δοκίμια FCA. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκαν συγκολλημένα δοκίμια τριών τύπων συνδέσεως. Οι συνθήκες συγκόλλησης δίνονται στον κάτωθι πίνακα. Το περιβάλλον των δοκιμών κοπώσεως αποτέλεσε ο ατμοσφαιρικός αέρας και συνθετικό θαλασσινό νερό. Επιπλέον, επιλέχθηκε αξονικός τύπος φόρτισης των δοκιμίων.

Πίνακας 2.16 Συνθήκες συγκόλλησης δοκιμίων FCA. [ICOMAE 2003]

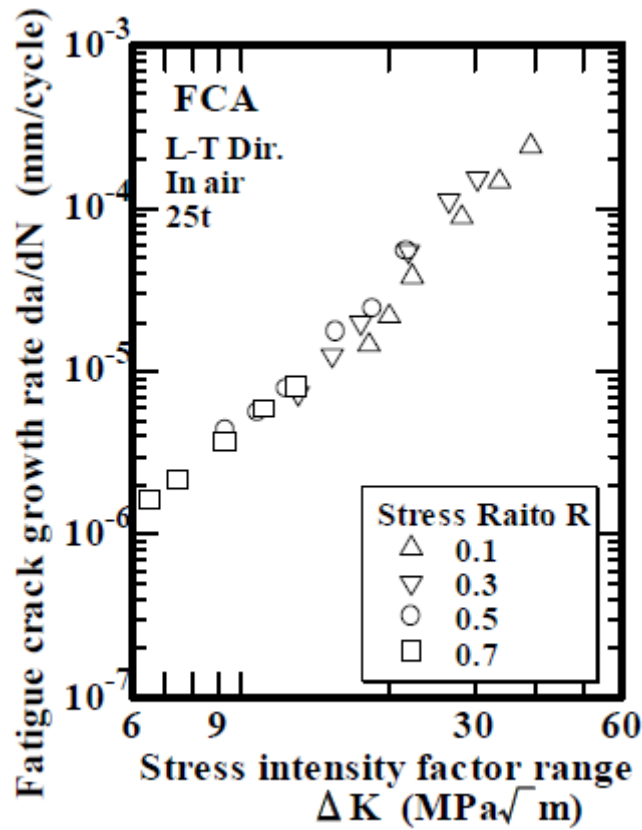
Μέθοδος Συγκόλλησης	GMAW
Αέριο προστασίας	CO ₂
Ηλεκτρόδιο	DW-100 Φ1.4
Ένταση ρεύματος	270A
Τάση τόξου	28V
Ταχύτητα συγκόλλησης	30cm/min
Ρυθμός παροχής αερίου	25L/min
Μήκος ραφής	6-8 mm



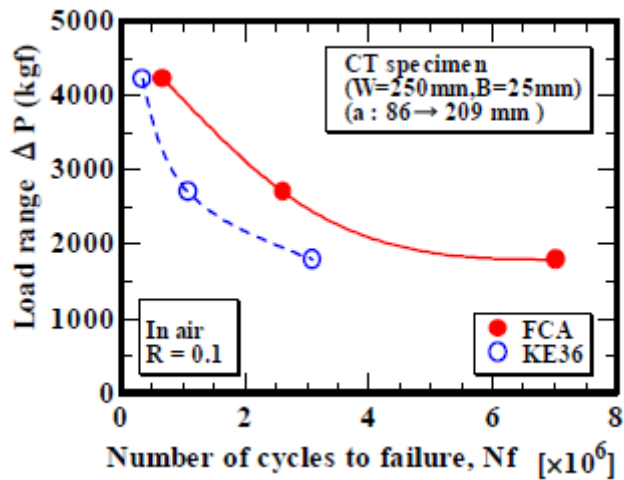
Σχήμα 2.19 Ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής κοπώσεως προ-ρωγματωμένων δοκιμίων, κανονικών διαστάσεων, συναρτήσει του εύρους συντελεστή εντατικής καταστάσεως ΔK για $R=0.1$ και περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. [ICOMAE 2003]



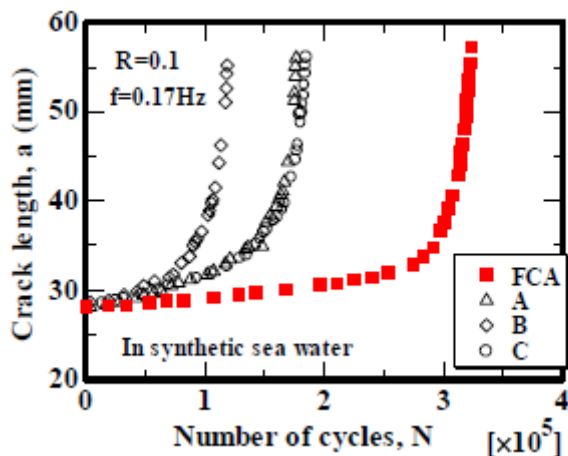
Σχήμα 2.20 Ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής κοπώσεως προ-ρωγματωμένων δοκιμίων, υψηλών διαστάσεων, συναρτήσει του εύρους συντελεστή εντατικής καταστάσεως ΔK για $R=0.1$ και περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. [ICOMAE 2003]



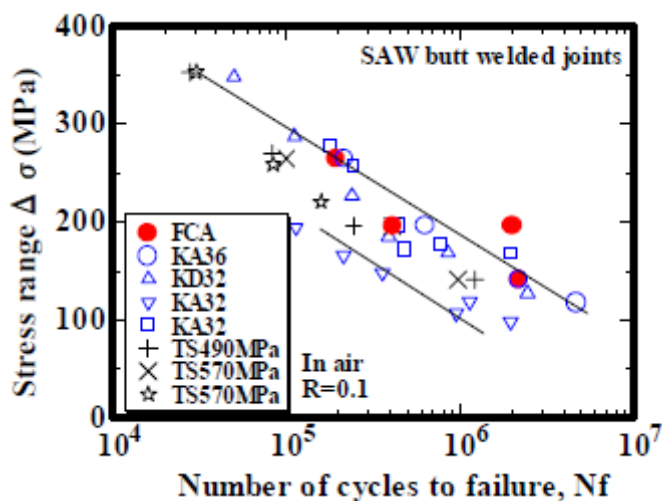
Σχήμα 2.21 Ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής κοπώσεως προ-ρωγματωμένων δοκιμών, κανονικών διαστάσεων, συναρτήσει του εύρους συντελεστή εντατικής καταστάσεως ΔK για υψηλούς λόγους φόρτισης και περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. [ICOMAE 2003]



Σχήμα 2.22 Διάρκεια ζωής μέχρι θραύση λόγω κοπώσεως για προ-ρωγματωμένα δοκίμια υψηλών διαστάσεων, συναρτήσει ενός εύρους φόρτισης και για περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. [ICOMAE 2003]



Σχήμα 2.23 Συγκριτικές καμπύλες της διάρκειας ζωής, συναρτήσει του μήκους ρωγμής κόπωσης για R=0.1 και περιβάλλον συνθετικού θαλασσινού νερού. [ICOMAE 2003]

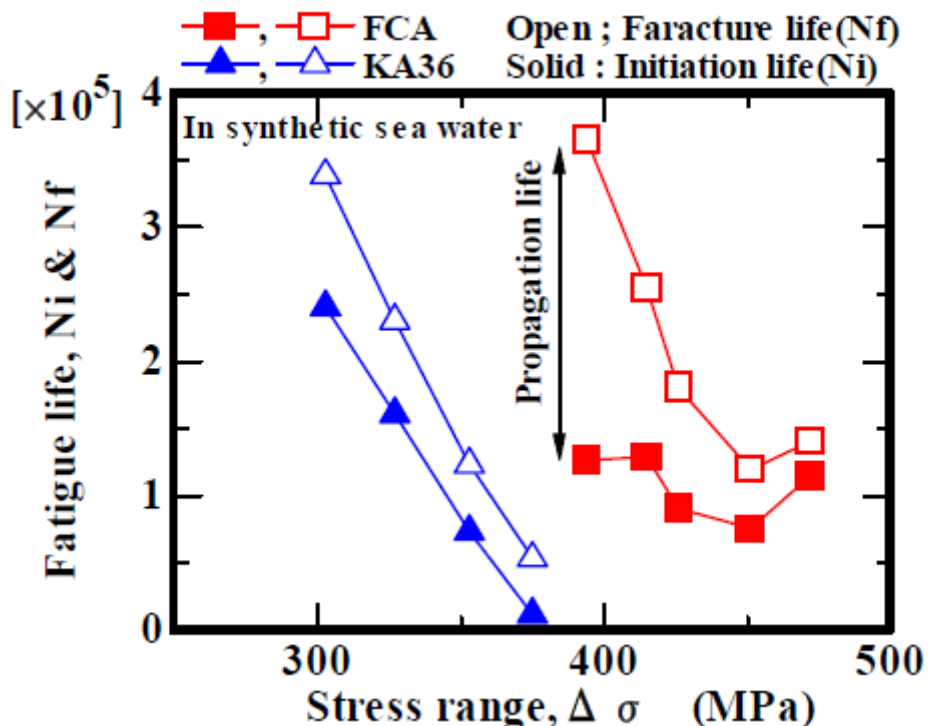


Σχήμα 2.24 Διάρκεια ζωής σε κόπωση, συγκολλημένων δοκιμών FCA, συναρτήσει του εύρους τάσεως για R=0.1. [ICOMAE 2003]

Όσον αφορά τις κρίσιμες ιδιότητες κόπωσης των δοκιμών FCA, όλες οι απαραίτητες πληροφορίες παρατίθενται στα σχήματα 2.4-2.9. Βάσει του σχήματος 2.4 συνάγεται το συμπέρασμα, ότι οι χάλυβες FCA εμφανίζουν πλεονέκτημα στο ρυθμό ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης για ένα μεγάλο εύρος της τιμής της παραμέτρου ΔK. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κατώφλι διάδοσης αυξάνεται σχεδόν κατά 50%. Ακολούθως, με τη βοήθεια του διαγράμματος 2.5 κατανοούμε ότι, ο χάλυβας FCA παρουσιάζει 3 φορές σχεδόν, υψηλότερη διάρκεια ζωής από τον KE36 για δεδομένο μήκος ρωγμής. Το σχήμα 2.6 παρουσιάζει το ρυθμό ανάπτυξης της ρωγμής χαλύβδινων δοκιμών FCA για υψηλούς λόγους φόρτισης. Με τη βοήθεια του σχήματος 2.7 παρατηρούμε ότι ο χάλυβας FCA παρουσιάζει υπερδιπλάσια διάρκεια ζωής για δεδομένο εύρος φόρτισης εν συγκρίσει με τον KE36, επιβεβαιώνοντας ξανά την ανώτερη συμπεριφορά των χαλύβων FCA σε κόπωση. Ομοίως, βάσει του 2.8, κατανοείται η σαφώς βελτιωμένη συμπεριφορά των FCA σε περιβάλλον συνθετικού θαλασσινού νερού. Το σχήμα 2.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για μετωπικές επίπεδες ραφές. Η αντοχή των συμβολών FCA εμπίπτει στο ανώτερο τμήμα της ζώνης δεδομένων των

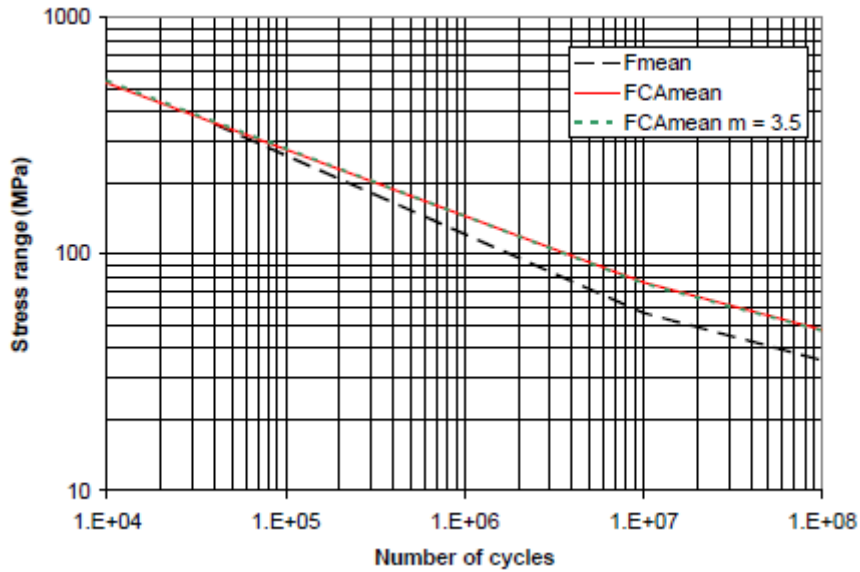
συμβατικών χαλύβων. Η έναρξη της ρωγμής κοπώσεως ξεκινά από τη βάση (toe) της συγκόλλησης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Στο σχήμα 2.10 παρατίθεται ο συσχετισμός στοιχείων διάρκειας ζωής σε κόπωση και εύρους τάσεως. Τα στοιχεία αφορούν, τόσο τους συνολικούς κύκλους ζωής μέχρι να επέλθει θραύση, όσο και τους συνολικούς κύκλους μέχρι να υπάρξει έναρξη της ρωγμής. Συνάγεται άμεσα το συμπέρασμα ότι, η διάρκεια ζωής της ανάπτυξης - διάδοσης της ρωγμής, είναι σημαντικά μεγαλύτερη για τους χάλυβες FCA. Επίσης, η έναρξης της ρωγμής συμβαίνει σε υψηλότερους κύκλους ζωής και για μεγαλύτερο εύρος επιβαλλόμενων τάσεων. Αυτά είναι τα ίδια χαρακτηριστικά, που εξασφαλίζουν υψηλότερη διάρκεια ζωής έναρξης & διάδοσης της ρωγμής σε διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 2.25 Συγκριτικά στοιχεία διάρκειας ζωής και θραύσης για συνθετικό θαλασσινό νερό. [ICOMAE 2003]

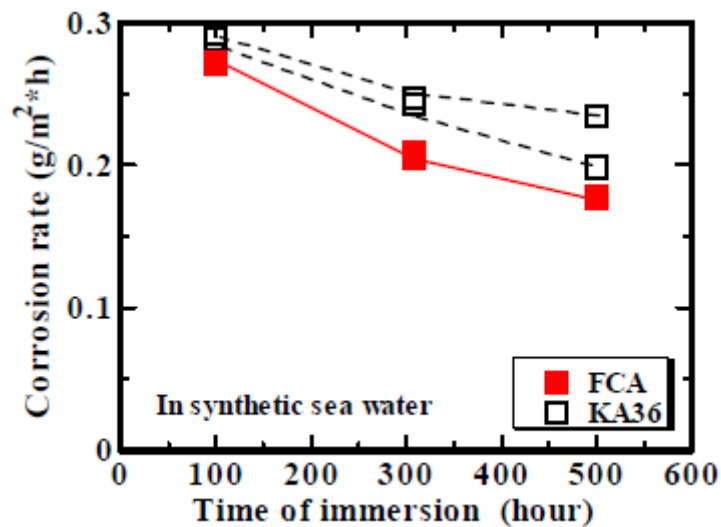
Η διαφορά της κλίσης των καμπυλών S-N για συμβατικούς και FCA χάλυβες είναι ξεκάθαρη, με τη βοήθεια του σχήματος 2.11. Οι διαφορές μεταξύ των συμβατικών και FCA χάλυβων είναι ασήμαντου μεγέθους για το αριστερό τμήμα του σχήματος, το οποίο αντικατοπτρίζει την ολιγοκυκλική περιοχή κοπώσεως. Εν αντιθέσει, οι χάλυβες FCA παρουσιάζουν, σημαντικά, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση για τυπικές φορτίσεις κυματισμού και για περιπτώσεις που αφορούν το δεξί τμήμα του κάτωθι σχήματος. Το συγκεκριμένο γεγονός επιδεικνύει ότι, η χρήση των χάλυβων FCA καθίσταται ιδιαίτερως χρήσιμη για κατασκευαστικές λεπτομέρειες της γάστρας, που συνδέονται άρρηκτα με τις δυναμικές καταπονήσεις λόγω κυματισμών. Αξίζει να επισημανθεί ότι, για κατασκευές, που υπόκεινται σε φορτίσεις κυματισμών, η περιοχή που επιδρά σημαντικότερα σε αστοχία λόγω κόπωσης, είναι αυτή που κυμαίνεται από 10^6 - 10^8 κύκλους ζωής.



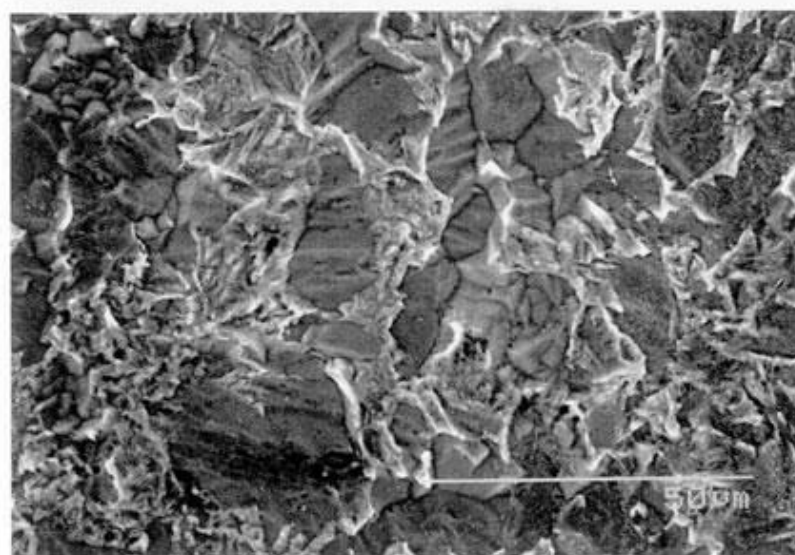
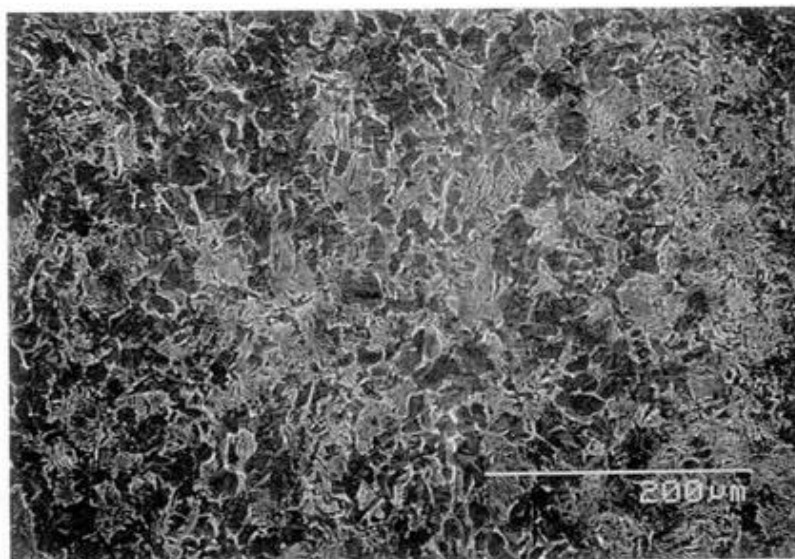
Σχήμα 2.26 Μέσες σταθμισμένες, συγκριτικές καμπύλες S-N. [Noboru Konda 2012]

2.4. Συμπεριφορά χαλύβων FCA σε διάβρωση.[5]

Οι μηχανικές ιδιότητες της οικογένειας των χαλύβων FCA είναι ισοδύναμες ή και καλύτερες των συμβατικών. Δεν θα μπορούσε να αποτελέσει εξαίρεση η συμπεριφορά που παρουσιάζουν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Λεπτομερέστερα, οι FCA εμφανίζουν βελτιωμένη αντοχή σε διάβρωση, λόγω χαμηλότερων ρυθμών διάβρωσης και λόγω καλύτερης ομοιογένειας της κατανομής διαβρωτικών απωλειών. Προς αποσαφήνιση των ανωτέρω, παρατίθενται το σχήμα 2.12 και οι εικόνες 2.8-2.11. Συγκεκριμένα, ο χάλυβας FCA παρουσιάζει, στο εξεταζόμενο εύρος ωρών, 20%-30% χαμηλότερο ρυθμό διάβρωσης, συγκριτικά με τον KA36. Οι εικόνες 2.10-2.11 αποδεικνύουν την καλύτερη ομοιομορφία δομής και συμπεριφορά κατανομής απωλειών, εξαιτίας της διάβρωσης. Η διάβρωση λαμβάνει χώρα με ομοιόμορφο τρόπο, λόγω της διφασικής μικροδομής φερρίτη και μπαινίτη, εν αντιθέσει με τους συμβατικούς χάλυβες, όπου η διάβρωση επενεργεί με μη ομοιόμορφο πάνω στη φερριτό-περλιτική μικροδομή.



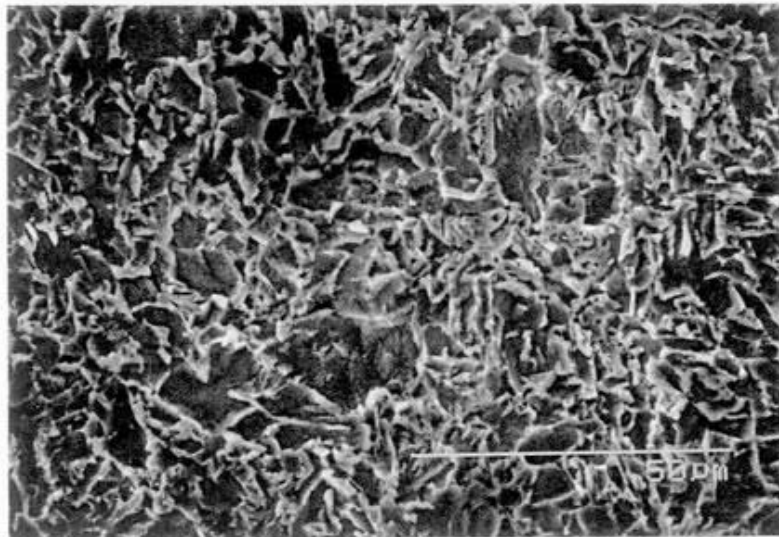
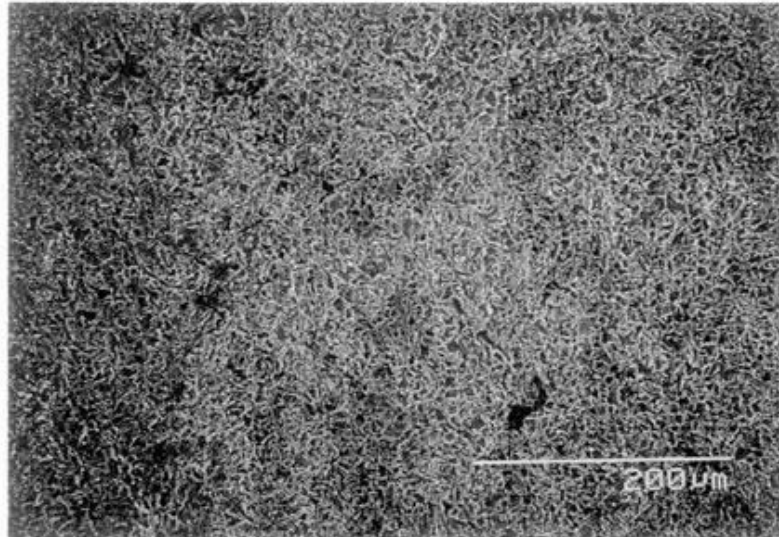
Σχήμα 2.27 Συγκριτικοί ρυθμοί διάβρωσης για ένα εύρος ωρών βύθισης σε διαβρωτικό περιβάλλον συνθετικού θαλασσινού νερού. [ICOMAE 2003]



Εικόνες 2.8 και 2.9 Επιφάνειες διάβρωσης χάλυβα KA36. [ICOMAE 2003]

Σε γενικά πλαίσια, η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής σε θαλασσινό νερό, μέχρι να επέλθει θραύση λόγω κόπωσης, διαχωρίζεται με γνώμονα τη χημική αποικοδόμηση των επιφανειών των υλικών, στα εξής στάδια:

- (1) Έναρξη βελονοειδούς διάβρωσης (*Pitting Corrosion*), έως ότου να επέλθει κορεσμός της ανάπτυξης των βελονισμών.
- (2) Το χρονικό διάστημα, το οποίο μεσολαβεί, μεταξύ του κορεσμού ανάπτυξης των βελονισμών και της έναρξης ρωγμής κοπώσεως από ένα βελονισμό.
- (3) Το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης ρωγμής κοπώσεως, σε διαβρωτικό περιβάλλον, μέχρι και τη φάση ανάπτυξης της ρωγμής στο στάδιο επέκτασης της ρωγμής σε μια επιμέρους μικρή περιοχή της μικροδομής.
- (4) Αφορά τη χρονική διάρκεια, που μεσολαβεί από τη διάδοση της ρωγμής μέχρι την τελική θραύση του υλικού.



7

Εικόνες 2.10 & 2.11 Επιφάνειες διάβρωσης χάλυβα FCA. [ICOMAE 2003]

2.5. Εφαρμογές των χαλύβων FCA στη ναυπηγική βιομηχανία. [7],[8],[10]

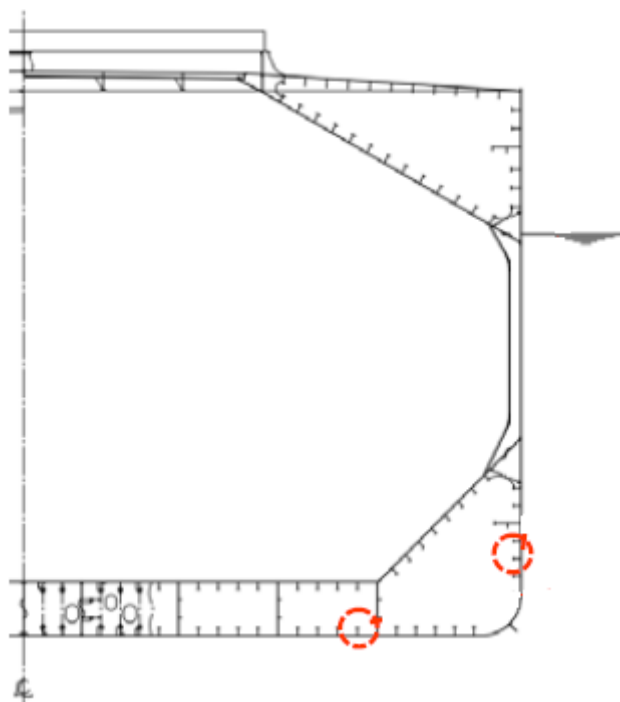
Η οικογένεια των FCA κατηγοριοποιείται ως οικογένεια χαλύβων υψηλής αντοχής σε κόπωση (*fatigue resistant*). Επιπροσθέτως, αποτιμάται για τη συνεισφορά της, στην υψηλότερη λειτουργική ζωή των ναυπηγικών κατασκευών, στο χαμηλότερο βάρος, που εκτιμάται ότι προσφέρει και στην μείωση των εκπομπών CO₂. Τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα, καθιστούν τους χάλυβες FCA άμεσα προτιμητέους στην ανέγερση νέων κατασκευών. Η πρώτη εφαρμογή έλαβε χώρα το 2003, όταν η κατασκευάστρια εταιρεία MitsubishiHeavyIndustries χρησιμοποίησε χάλυβα FCA για κατασκευαστικά στοιχεία του διπύθμενου ενός πλοίου μεταφοράς LPG (double bottom floors). Εν έτει 2004, η εταιρεία Mitsui Engineering & Shipbuilding κατασκεύασε ένα πλοίο χύδην φορτίου (*cape size bulk carrier*) εφαρμόζοντας FCA, σε ποικίλες κατασκευαστικές λεπτομέρειες της γάστρας. Ομοίως το 2007, κατασκεύασε ένα μεταλλευματοφόρο πλοίο, μήκους 340m και πλάτους 60m, όπου η αντίσταση σε κόπωση των επιμέρους κατασκευαστικών λεπτομερειών, ενισχύθηκε με χρήση της μεθόδου UIP. Επιπλέον,

FCA χάλυβες έχουν εφαρμοστεί στο κάλυμμα των δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG.

Εμβαθύνοντας στο ζήτημα εφαρμογών των FCA υλικών, ποικίλες μελέτες έχουν διεξαχθεί, από κατασκευάστριες εταιρίες (Kawasaki, Mitsui, Sumitomo), αναφορικά με το δομικό σχεδιασμό κατασκευαστικών στοιχείων της γάστρας. Οι συγκεκριμένες μελέτες καταθέτουν την αποτελεσματική επίδραση της εφαρμογής FCA, από άποψη σχεδιασμού κόπωσης. Ακριβέστερα έχουν προταθεί τα εξής:

Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικό τοιχώματος για πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην (cape size bulk carrier).

Επιλέχθηκε η εφαρμογή ενός διαμήκου ενισχυτικού πυθμένα τύπου **T** διαστάσεων 350x125x10/21 mm και ενός διαμήκου ενισχυτικού πλευρικού τοιχώματος τύπου **T** με πανομοιότυπες διαστάσεις. Οι διαστάσεις, που επιλέχτηκαν, είχαν ήδη ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των κανονισμών κόπωσης του CSR. Τα αποτελέσματα των ερευνών, έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση των FCA-W ενισχυτικών βελτιώθηκε κατά 2.3 φορές περισσότερο. Η κατασκευαστική βελτιστοποίηση των ενισχυτικών δύναται να επιτευχθεί, λοιπόν, με χρήση χάλυβα FCA-W.

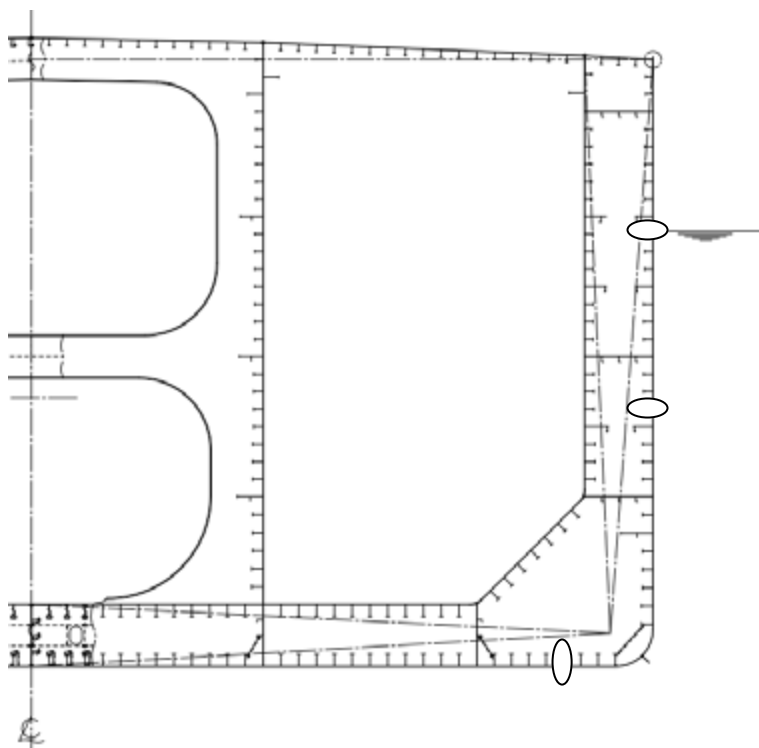


Σχήμα 2.28 Εφαρμογή ενισχυτικών FCA-W σε πυθμένα και πλευρικό τοίχωμα της γάστρας Cape size bulk carrier. [TSCF 2010]

Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικού τοιχώματος για δεξαμενόπλοιο αργού πετρελαίου (VLCC).

Επιλέχθηκε η εφαρμογή ενός διαμήκου ενισχυτικού πυθμένα τύπου **T** διαστάσεων 600x200x13/19 mm, ενός διαμήκου ενισχυτικού πλευρικού τοιχώματος τύπου **T** και διαστάσεων 500x150x11/22 mm στο ύψος του βυθίσματος για κανονική κατάσταση φόρτωσης έρματος και ενός διαμήκου ενισχυτικού πλευρικού τοιχώματος τύπου **T** διαστάσεων 450x150x11/16 mm στο ύψος του βυθίσματος για την κατάσταση FLD. Παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της διάρκειας ζωής κόπωσης των ενισχυτικών FCA-W, κατά παράγοντα της τάξης του 2.5-2.8. Σε γενικές γραμμές, η διάρκεια ζωής

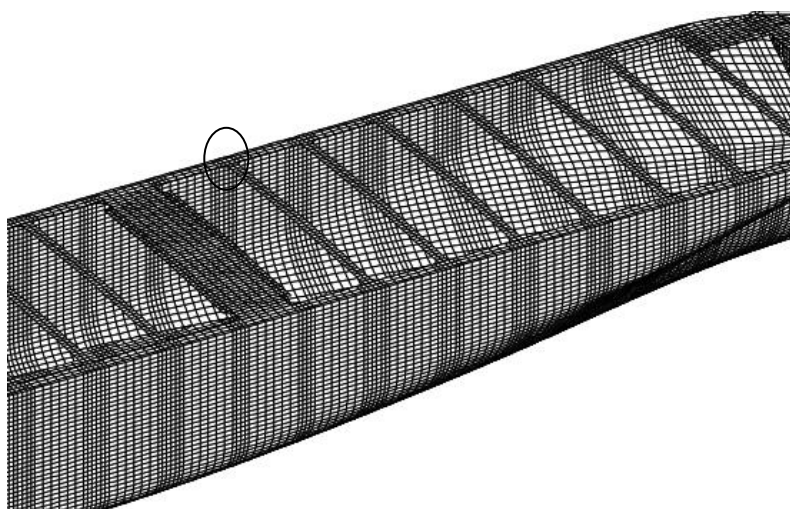
των ενισχυτικών FCA-W παρουσιάζει σημαντική περίσσεια, εξεταζόμενη υπό τους κανονισμούς CSR.



Σχήμα 2.29 Εφαρμογή ενισχυτικών FCA-W σε πυθμένα και πλευρικό τοίχωμα της γάστρας VLCC. [TCSF 2010]

Γωνίες υδατοστεγών καλυμμάτων κωτών φορτίου (hatch corners) για πλοίο μεταφοράς τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων.

Η εκτίμηση της υψηλότερης διάρκειας ζωής σε κόπωση του χάλυβα FCA-W έγινε με τη βοήθεια των κανονισμών του αμερικανικού νηογνώμονα ABS. Παρατηρήθηκε βελτίωση της συμπεριφοράς του FCA-W σε κόπωση, της τάξεως του 1.8, βάσει του σχήματος 2.11. Όπως παρατίθεται στο σχήμα 2.15



Σχήμα 2.30 Εφαρμογή FCA-W στα hatch corners πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. [TCSF 2010]

Δευτερεύουσες και όχι τόσο εκτεταμένες εφαρμογές των χαλύβων FCA αποτελούν οι εξής:

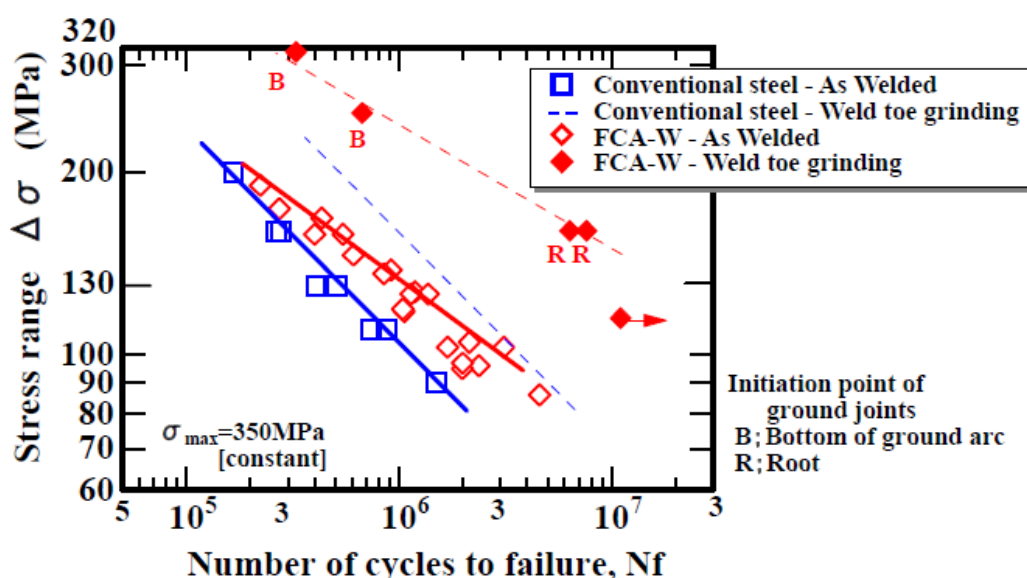
- Στις αρμογές του εσωτερικού ελάσματος πυθμένα και του ελάσματος hopper σε πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην.
- Στα καλύμματα των υδατοστεγών κυτών φορτίου, πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην.
- Σε εγκάρσιες πτυχωτές φρακτές πλοίων Ro/ Ro
- Στις αρμογές κυρίου καταστρώματος και δεξαμενών των πλοίων LNG. Στο παρόν σημείο της γάστρας παρουσιάζεται υψηλή συγκέντρωση τάσεων, λόγω δυναμικών καταπονήσεων με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η στιβαρότητα του υλικού της περιοχής. Η χρήση χαλύβων FCA επιτρέπει υψηλότερες τάσεις και επομένως μειώνει τη προαναφερθείσα συγκέντρωση τάσεων, εξασφαλίζοντας υψηλότερη αντοχή σε κόπωση.

2.6. Βελτιωτικές τεχνικές κατεργασίας χαλύβων FCA. [11],[12]

Υφίστανται τεχνικές κατεργασίας, η συνδρομή των οποίων, καθιστά δυνατή τη βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση των εκάστοτε χαλύβων. Οι χάλυβες FCA δεν αποτελούν εξαίρεση σε αυτή την ιδιότητα. Αποτελούν μετά-συγκολλητικές τεχνικές και διαχωρίζονται στις εξής κύριες κατηγορίες:

- ❖ TIG dressing.
- ❖ Toe grinding.
- ❖ Ultrasonic Peening.

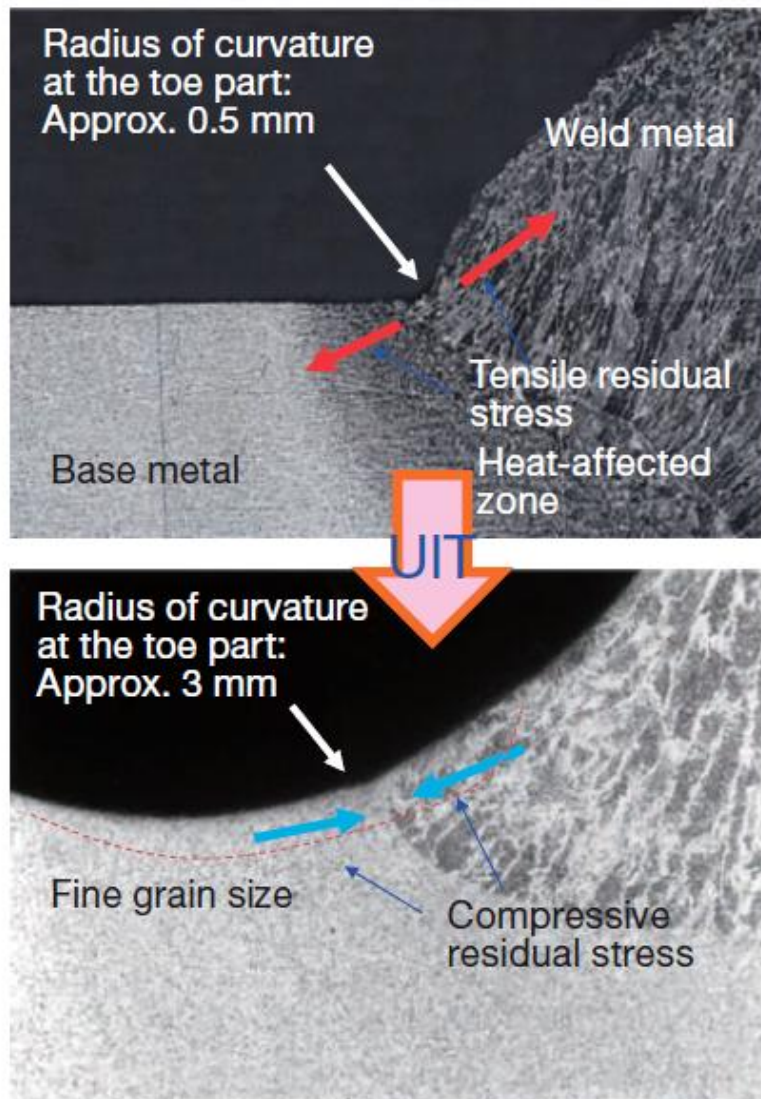
Οι μέθοδοι λείανσης βάσεως συγκολλητικής ραφής (toe grinding) και υπερηχητικής κρούσης (UP ή Ultrasonic Peening) εμφανίζουν την υψηλότερη εφαρμοσιμότητα για τις περιπτώσεις κατεργασίας της ενδιαφερόμενης ομάδας χαλύβων.



Σχήμα 2.31 Συγκριτική συμπεριφορά συγκολλημένων χαλύβων πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου toe grinding. [TSCF 2010]

Το σχήμα 2.16 απεικονίζει την ολική διάρκεια ζωής σε κόπωση συγκολλημένων συμβολών συμβατικών και FCA χαλύβων. Η διάρκεια ζωής κοπώσεως των χαλύβων FCA, έπειτα από κατεργασία της βάσης της ραφής συγκόλλησης υπερδιπλασιάστηκε συγκριτικά με την αντίστοιχη των συμβατικών χαλύβων. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι η συνδυασμένη εφαρμογή υλικού FCA και μετά-συγκολλητικής κατεργασίας toe grinding, επιδέχεται ,σημαντικά, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση, από ότι η μεμονωμένη εφαρμογή υλικού FCA.

Η έτερη κατεργασία βελτίωσης της συμπεριφοράς κοπώσεως των FCA ονομάζεται μέθοδος υπερηχητικής κρούσης (*Ultrasonic Peening, Ultrasonic Impact Treatment* ή *UP*). Η μέθοδος επιδρά αυξητικά στη διάρκεια της ζωής κοπώσεως μέσω μηχανισμού εισαγωγής θλιπτικών παραμενουσών τάσεων στα επιφανειακά στρώματα της ραφής συγκόλλησης. Το συγκεκριμένο γεγονός έχει ως άμεσο αντίκτυπο, την μείωση της συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή της βάσης της ραφής συγκόλλησης (toe) και την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος του υλικού. Επίσης, παρατηρείται εκλέπτυνση των κόκκων της κατεργασμένης επιφάνειας. Σχηματικά, η ραφή λαμβάνει υψηλή κοιλότητα στο σημείο της βάσης της, βελτιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη γεωμετρία της.

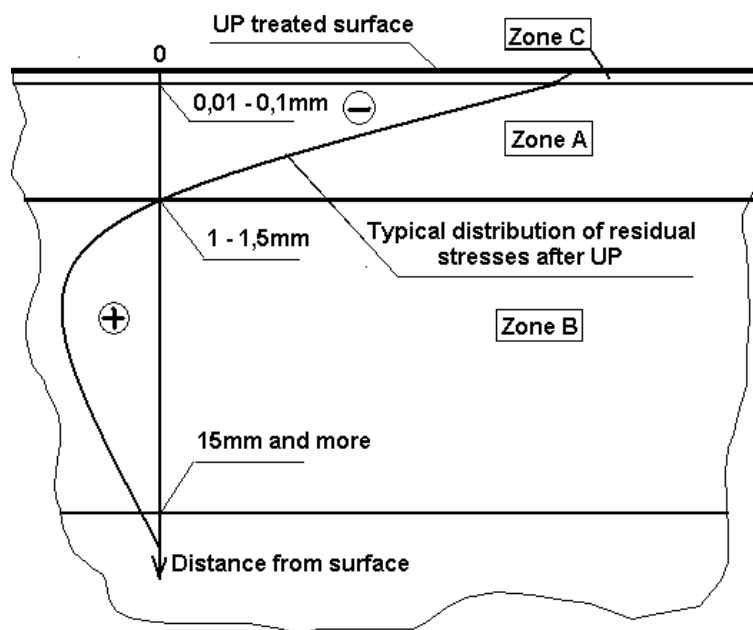


Σχήμα 2.32 Επίδραση μεθόδου UP στη συγκέντρωση τάσεων και τη γεωμετρία της βάσης της ραφής. [TSCF 2010]



Εικόνα 2.12 Εφαρμογή μεθόδου UP σε αυχενική συγκόλληση.
[Nippon Steel & Sumitomo Metal 2012]

Η ακτίνα της κοιλότητας, που προκαλεί στη βάση της ραφής η κατεργασία UP, κυμαίνεται από 2-7 mm, ενώ το βάθος μέχρι το οποίο επενεργεί από 0.2-0.5 mm. Μια τυπική κατανομή των παραμενουσών τάσεων, στην εγκάρσια τομή ενός υλικού μετά από υποβολή σε κατεργασία υπερηχητικής κρούσης φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 2.33 Κατανομή παραμενουσών τάσεων στην εγκάρσια τομή ενός υλικού.
[Kudryavtsev 2004]

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ζωνών της παρατιθέμενης εγκάρσιας τομής, δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά επιμέρους ζωνών κατεργασμένων από UP υλικών. [Kudryavtsev 2004]

Ζώνη	Περιγραφή ζώνης	Βάθος ζώνης από την επιφάνεια (mm)	Επιβελτιωμένα χαρακτηριστικά
A	Περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης και θλιπτικών παραμενουσών τάσεων	1-1.5 mm	Κόπωση, διάβρωση, φθορά και παραμόρφωση
B	Περιοχή χαλάρωσης παραμενουσών τάσεων	15mm και άνω	Παραμόρφωση, διάδοση ρωγμής
C	Ζώνη ναοκρυσταλλοποίησης	0.01-0.1 mm	Διάβρωση, φθορά, κόπωση σε υψηλές θερμοκρασίες

Η εφαρμογή της μεθόδου UP στη βάση της συγκόλλησης είναι ισοδύναμα αποδοτική με την αντίστοιχη της μεθόδου λείανσης, όσον αφορά τη συμπεριφορά και διάρκεια ζωής σε κόπωση. Συνιστάται η εφαρμογή της μεθόδου σε συγκολλητικές συμβολές του ανωτέρου καταστρώματος πλοίων LNG και μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, οι οποίες είναι συνεχώς εκτεθειμένες στην επίδραση εφελκυστικών καμπτικών ροπών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.

- [1] Γ.Δ Χρυσουλάκης Δ.Ι Παντελής, 2007, *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [2] Β.Ι Παπάζογλου, 1995, *Ναυπηγική Τεχνολογία (Σημειώσεις)*, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π .
- [3] Β.Ι Παπάζογλου, 1994, *Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων (Σημειώσεις)*, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π .
- [4] Noboru K., Akinori I., Kazushige A., Yukichi T., Takumi Y., Lotsberg I., 2010, *A Proposed Design S-N Curve for Steels with Improved Fatigue Resistance (FCA steels)*, Tokyo.
- [5] Noboru K., Kazushige A., Kazuhiro H., Eiichi W., Masuo T., Hiroshige K., et al. ,2003, *Development of structural steel with superior resistance against fatigue crack growth*, Cancun, Mexico, ASME.
- [6] Tokuriki T., Mori T., Noboru K., Nishio M., 2011, *Fatigue crack propagation rate and fatigue strength of FCA steel.* , Tokyo.
- [7] Komizo Y., 2007, *Status & Prospects of Shipbuilding Steel and Its Weldability.* , Osaka, Joining and Welding Research Institute.
- [8] Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2012, *Fatigue Solutions of Nippon Steel & Sumitomo Metal.* , Tokyo, Nippon Steel & Sumitomo Metal.
- [9] JFE Steel Corporation, 2012, *Steel Plates.* , Japan, JFE Steel Corporation.
- [10] Yukichi T., Shimoda T., Junya H., Noriaki S., Deguchi T., Koshio K., 2010, *Application of the Latest Technologies to Fatigue Strength Improvement.* , Tokyo, Japan.
- [11] Kudryavtsev J., Kleinman J., Prokopenko G., Knysh V., Gimbrede L., 2004, *Effect of Ultrasonic Peening on Microhardness and Residual Stress in Materials and Welded Elements.* , Ontario, Canada, Integrity Testing Laboratory Inc.
- [12] Schipperen I., Andric J., Brennan D., Caprace J. D., Chou C. M., Gordo J., et al., 2012, *MATERIALS AND FABRICATION TECHNOLOGY.* , 114-122, Rostock, Germany, Schibautechnische Gesellschaft.
- [13] Τσούβαλης Ν. ,2010, *Θραύση από Κόπωση*, Αθήνα, Ε.Μ.Π Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 3^ο

Προγραμματισμός & Λειτουργία Αυτοματοποιημένης Συγκολλητικής Διάταξης του Ε.Ν.Τ .

3.1. Εισαγωγή.

Θεμελιώδες κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας, αποτέλεσε η μελέτη του εγχειριδίου λειτουργίας της αυτοματοποιημένης διάταξης, που υλοποιείται από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π . Συνεπώς, κατέστη άμεσα εφικτή η κατανόηση των βασικών λειτουργιών της, καθώς και η εμβάθυνση σε δευτερεύουσες, επιμέρους και περισσότερο εξειδικευμένες λειτουργίες, που επιτελεί. Ως αποτέλεσμα, υπήρξε μια ενδελεχής και συντεταγμένη προσπάθεια καταγραφής, των βημάτων μιας διαδικασίας επίπεδης συγκόλλησης. Ιδιάζουσα προσοχή δόθηκε στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της ρομποτικής διάταξης και στη παράθεση αυτής, με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών της εκάστοτε συγκολλητικής πορείας. Οι υποστηριζόμενες, εκ της αυτοματοποιημένης διάταξης, μέθοδοι συγκόλλησης τόξου είναι οι GasMetalArcWelding (GMAW) και FluxCoredArcWelding (FCAW). Στην προκείμενη περίπτωση, υφίσταται εφαρμογή της μεθόδου σωληνοειδών ηλεκτροδίων με προστασία αερίου.

Σε ακόλουθα εδάφια, γίνεται λεπτομερής αναφορά των επιμέρους συστημάτων, που απαρτίζουν τον εξοπλισμό συγκόλλησης, των κυριότερων χαρακτηριστικών τους και της λειτουργικής σημασίας τους, επί του συνόλου της διάταξης. Επιπλέον, γίνεται πλήρης και εκτεταμένη επεξήγηση των προγραμματιστικών εντολών, του μηχανισμού ενσωμάτωσης τους στη δομή ενός προγράμματος, καθώς και της ολοκληρωμένης κατασκευής και παρουσίασης ενός προγράμματος προσομοίωσης συγκόλλησης. Εν τέλει, κατατίθενται συμπυκνμένες οδηγίες άμεσου χειρισμού της αυτοματοποιημένης διάταξης, μέσω προγραμμάτων μεμονωμένων ενεργειών ή πολύπλοκων ακολουθιών συγκόλλησης.

3.2. Εξοπλισμός Συγκόλλησης.

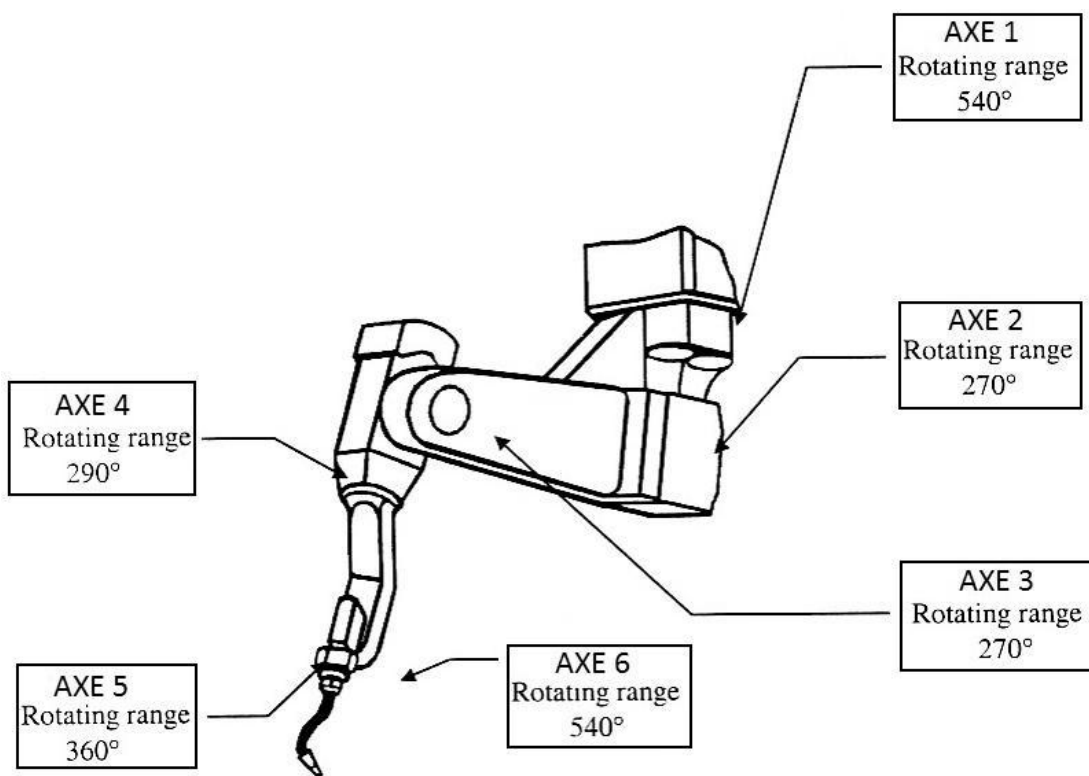
Η αυτοματοποιημένη διάταξη του Ε.Ν.Τ έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία IGM Robotersysteme[®] και υλοποιείται, υπό τη μορφή ενός ρομποτικού βραχίονα 6 βαθμών ελευθερίας (Εικόνα 1). Οι προαναφερθέντες βαθμοί ελευθερίας επιτρέπουν, γραμμικές και μη, κινήσεις στο χώρο, κατά τους άξονες x, y, z (Σχήμα 3.1). Ο συγκολλητικός εξοπλισμός, που συνοδεύει το βραχίονα αποτελείται από τις εξής συνιστώσες:

- ❖ Τη μηχανή συγκόλλησης – παροχής ισχύος.
- ❖ Το μηχανισμό τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου.
- ❖ Το μηχανισμό παροχής προστατευτικού αερίου.

Η μηχανή συγκόλλησης GMAW εξασφαλίζει την τροφοδοσία του συστήματος με τις απαιτούμενες τιμές έντασης και τάσεως ρεύματος. Είναι το μοντέλο TPS330[®] του οίκου Fronius[®] με μέγιστη ονομαστική ισχύ 380Α. Συνεπώς, ο βραχίονας εξοπλίζεται με υδρόψυκτο πυρσό συγκόλλησης, για λόγους αποφυγής υπερθέρμανσης.



Εικόνα 21. Ρομποτικός βραχίονας της IGM Robotersysteme για συγκόλληση FCAW χαλύβδινων ελασμάτων.



Σχήμα 3.34 Σκαρίφημα των 6 αξόνων κίνησης του ρομποτικού βραχίονα. [IGM Robotersysteme]

Η μονάδα ψύξης βρίσκεται στη μηχανή συγκόλλησης και διατρέχει όλη τη διαδρομή από τη μηχανή έως και το ακροφύσιο του πυρσού συγκόλλησης. Η μηχανή ισχύος απεικονίζεται στις εικόνες 3.2 και 3.3.

Εγκατεστημένος στο ρομποτικό βραχίονα βρίσκεται ο μηχανισμός τροφοδοσίας σύρματος, ο οποίος παρέχει αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο στην περιοχή συγκόλλησης με σταθερή ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από την επιλεγόμενη τιμή έντασης ρεύματος. Ο μηχανισμός αποτελείται από σύστημα ραούλων, για σταθεροποίηση της διεύθυνσης παροχής του ηλεκτροδίου στη λίμνη.

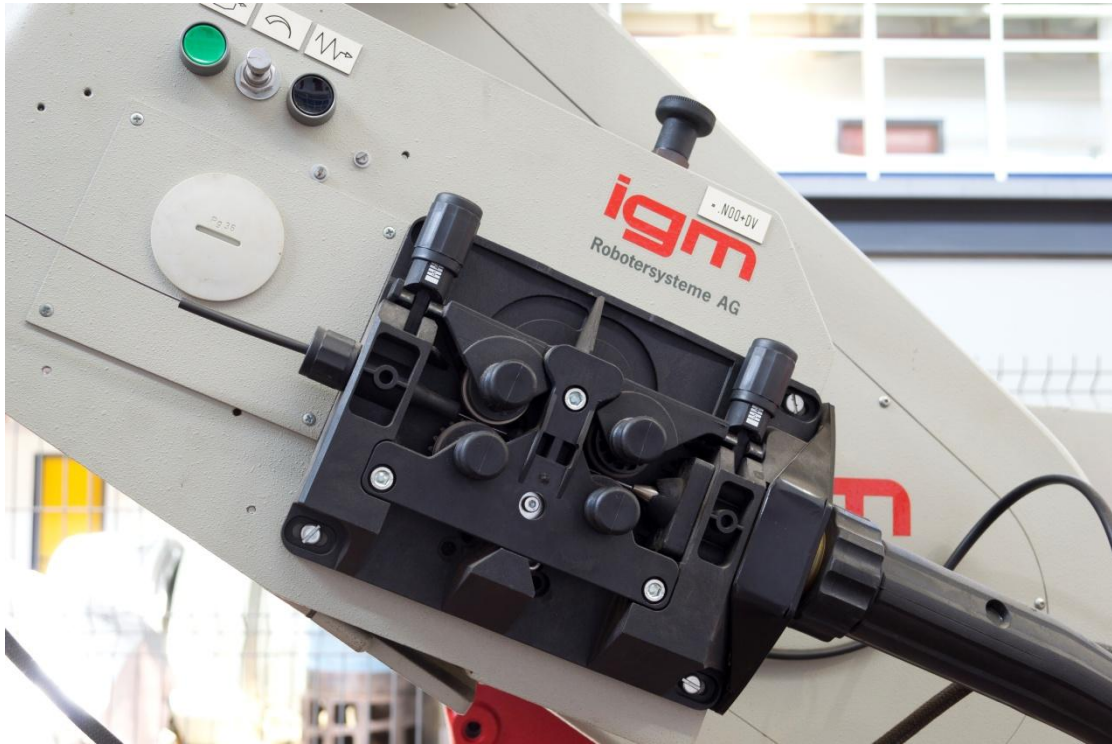
Τέλος, το προστατευτικό αέριο παρέχεται στη λίμνη συγκόλλησης, από διάταξη κυλίνδρου υψηλής πίεσης, αφότου πρώτα διέλθει από μηχανισμό ορισμού της τιμής πίεσεως και τροφοδοσίας. Η σύσταση του παρεχόμενου μείγματος είναι 82% - 18% Ar/CO₂ και διέπεται από την προτυποποίηση EN439-M21. Ο κύλινδρος παροχής και ο ελεγκτικός μηχανισμός πίεσης και παροχής απεικονίζονται στις φωτογραφίες 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.



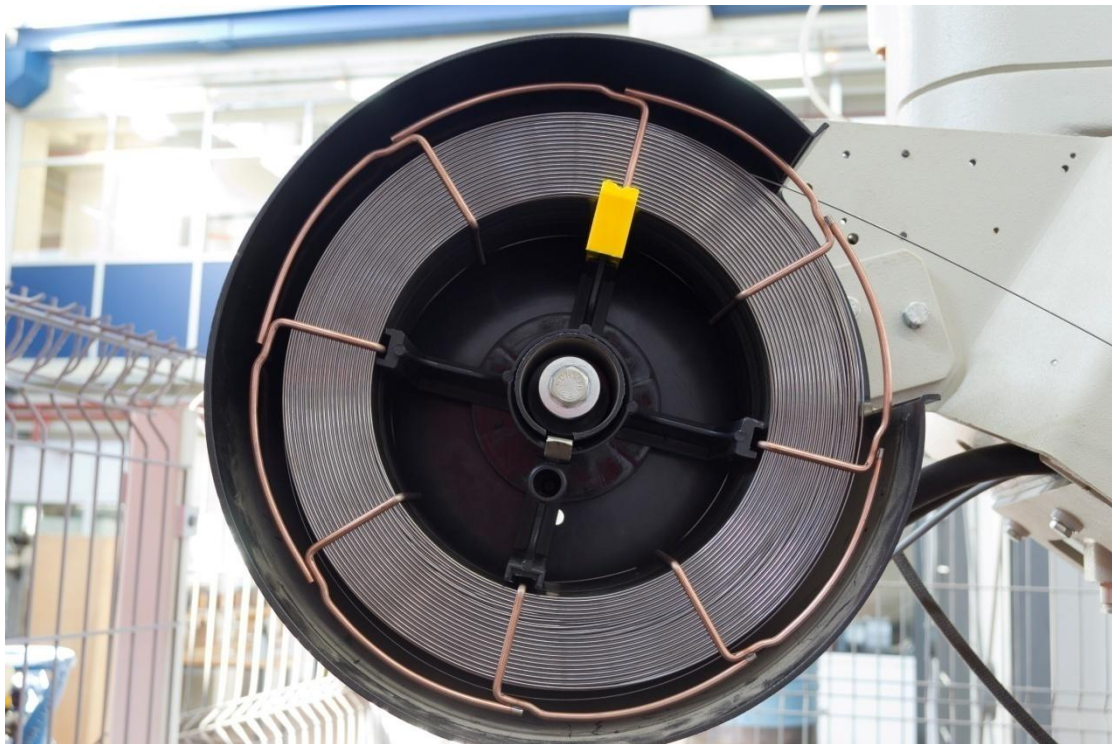
Εικόνες 3.2 , 3.3 Μηχανή συγκόλλησης σταθερής τάσης TPS330 του οίκου Fronius® και κύλινδρος, υψηλής πίεσης, παροχής αερίου προστασίας.



Εικόνα 22.4 Ρυθμιστικός μηχανισμός παροχής και πίεσης αερίου προστασίας.



Εικόνα 3.5 Σύστημα τροφοδοτικών ραούλων του ηλεκτροδίου.



Εικόνα 3.6 Κουλούρα τροφοδοσίας σύρματος ηλεκτροδίου

3.3. Οι Λειτουργικές Συνιστώσες της Αυτοματοποιημένης Διάταξης.

3.3.1. Χειριστήριο εκμάθησης & προγραμματισμού (TeachPendant ITP4).

Τα βήματα πορείας, που απαιτούνται για τη διαμόρφωση και ολοκλήρωση μιας συγκολλητικής διαδικασίας, ορίζονται εξ' ολοκλήρου μέσω της διάταξης του χειριστηρίου εκμάθησης και προγραμματισμού—*Teach Pendant*, το οποίο παρατίθεται εικονικά ακολούθως.



Εικόνα 3.7 Απεικόνιση του χειριστηρίου προγραμματισμού ITP4 του ρομποτικού βραχίονα του E.N.T.

Το χειριστήριο εκμάθησης & προγραμματισμού αποτελεί μια χειροκίνητη συσκευή, η οποία επιτελεί το ρόλο της κύριας προγραμματιστικής μονάδας, λειτουργώντας υπό τη λογική προγραμματισμού μεμονωμένων βημάτων (**step programs, step by step programming**). Λεπτομερέστερα, το teach pendant δύναται να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των επιμέρους αξόνων της αυτοματοποιημένης διάταξης, καθώς και για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση συνιστωσών, που την απαρτίζουν, όπως πχ. της μηχανής συγκόλλησης και των διάφορων αισθητήρων της. Περαιτέρω εμβάθυνση σε ζητήματα κίνησης των αξόνων, θα δοθεί σε ακόλουθα εδάφια. Επιπροσθέτως, μέσω των καταλόγων επιλογής, τους οποίους προσφέρει το χειριστήριο προγραμματισμού & εκμάθησης, ρυθμίζονται και καταχωρούνται οι τιμές των καίριων παραμέτρων της εκάστοτε διαδικασίας συγκόλλησης. Οι προαναφερθείσες παράμετροι αφορούν την ταχύτητα συγκόλλησης, την ένταση του διαρρέοντος ρεύματος, την τάση του τόξου, την ύπαρξη ή μη παλμικού ρεύματος, το μήκος τόξου, το είδος κίνησης του πυρσού συγκόλλησης (γραμμική, κυματοειδής, κυκλική κυματοειδής κίνηση κλπ.) καθώς και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της κάθε μορφής κίνησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η είσοδος και καταχώρηση προγραμματιστικών εντολών και παραμέτρων γίνεται με τη συνδρομή των πλήκτρων επιλογής (keys) του χειριστηρίου.

3.3.1.1. LCD οθόνη του χειριστηρίου εκμάθησης & προγραμματισμού.

Η οθόνη LCD του χειριστηρίου προγραμματισμού & εκμάθησης χρησιμοποιείται από την αυτοματοποιημένη διάταξη για οπτική επικοινωνία με το χειριστή και για πιο άμεσο έλεγχο της συνολικής διαδικασίας. Η επικοινωνία καθίσταται εφικτή, υπό τη μορφή συγκεκριμένων καταλόγων επιλογής (**menus**) καθώς και μηνυμάτων, τα οποία πληροφορούν το χειριστή για τις εν εξελίξει δραστηριότητες και για παρουσιαζόμενα σφάλματα της αυτοματοποιημένης διάταξης. Επομένως, η LCD οθόνη χωρίζεται σε ετερομερείς περιοχές, άμεσα συνδεδεμένες με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά επιλογής τους (**menus**), οι οποίες αναφέρονται ως πεδία (**fields**). Η διασαφήνιση των πεδίων γίνεται με τη βοήθεια της εικόνας 3.8 .

Work field:

Αποτελεί, συνήθως, το μεγαλύτερο πεδίο της οθόνης, στο οποίο παρουσιάζονται τα ενδιαφερόμενα στοιχεία του πεδίου (**menu items**) και οι τιμές που αυτά λαμβάνουν. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, ταυτίζονται με τις παραμέτρους μιας συγκολλητικής διαδικασίας (πχ. ταχύτητα, καθυστέρηση), αποτελούν τμήμα του εν ενεργεία πεδίου και δίνουν τη δυνατότητα καταχώρησης και τροποποίησης των ενδιαφερόμενων τιμών. Στην περίπτωση της εικόνας 3.8 παρουσιάζονται τα στοιχεία ενός JOG⁵ μενού και το αντίστοιχο πεδίο εκτέλεσης.

Menu page field:

Κάθε ένα από τα μενού (JOG, WORK, AUX) αποτελείται από σελίδες (**menu pages**). Η επιλογή της εκάστοτε απαιτούμενης σελίδας γίνεται με τη βοήθεια των πλήκτρων σελίδας (**page key**) (3.3.1.7), τα οποία βρίσκονται ακριβώς πάνω από την οθόνη κ' λαμβάνουν τιμές από 1 έως 8. Οι επιμέρους σελίδες, σχετικά με την εικόνα 3.8 είναι οι BAS, FUNC, SCTX και COO. Κατόπιν επιλογής του ενδιαφερόμενου πλήκτρου σελίδας (page key), παρατηρείται ενεργοποίηση και επισήμανση με μαύρο χρώμα της σελίδας που αντιστοιχεί στο προαναφερθέν page key.

Menu title field:

Εφόσον έχουμε δημιουργήσει ένα καινούριο πρόγραμμα ή έχουμε ενεργοποιήσει ένα ήδη υπάρχον και αποθηκευμένο πρόγραμμα, το συγκεκριμένο πεδίο καταγράφει το όνομα της διάταξης, το όνομα του ενεργοποιημένου προγράμματος, το πλήθος των βημάτων, που περιέχει το πρόγραμμα καθώς και τον αριθμό του τρέχοντος βήματος, που φαίνεται στο work field. Στο παρόν παράδειγμα, παρουσιάζεται το βήμα 0 του προγράμματος ggg. Ο αριθμός 0 οφείλεται στο γεγονός, ότι δεν έχει ολοκληρωθεί και αποθηκευθεί ακόμη το πρώτο βήμα προγραμματισμού.

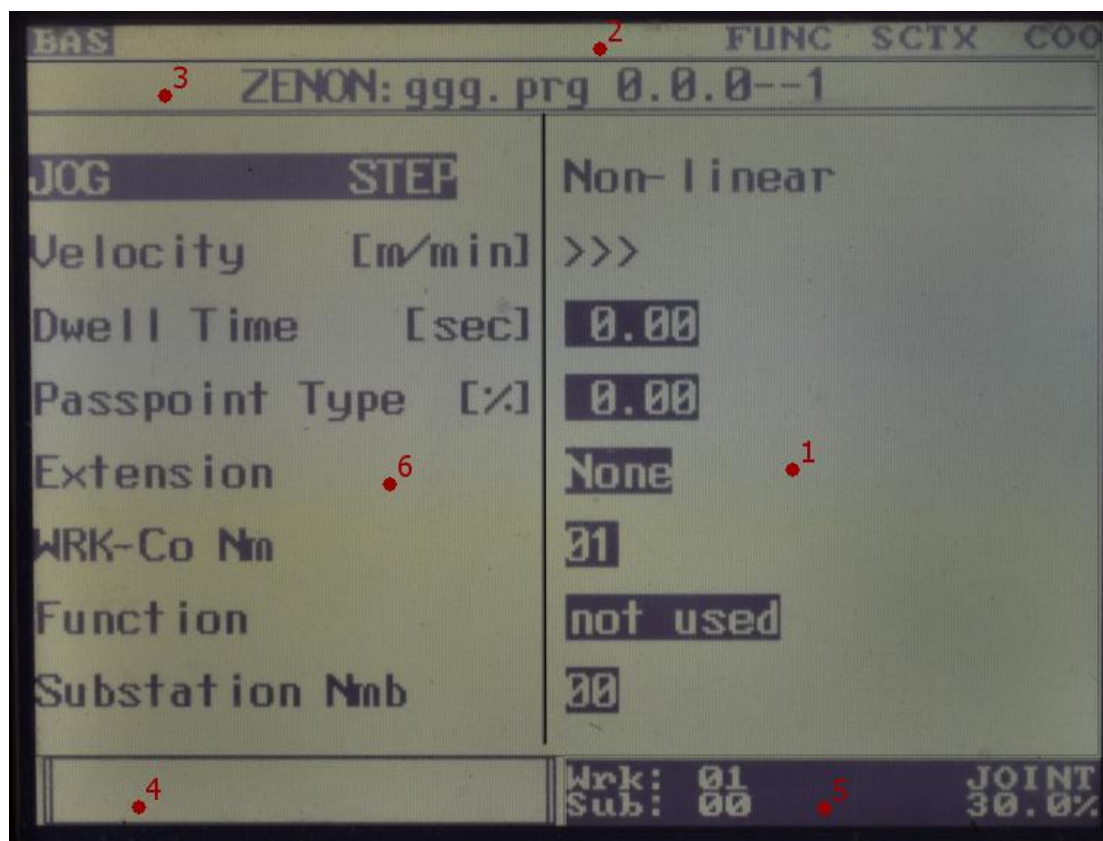
Edit field:

Κάθε φορά, που εισάγεται μια αλφαριθμητική τιμή από το teach pendant, το αντίστοιχο γράμμα ή αριθμός, εμφανίζεται στο συγκεκριμένο πεδίο. Επίσης, το πεδίο χρησιμοποιείται και σαν προσωρινή μνήμη στοιχείων (τιμές παραμέτρων, όνομα του προγράμματος), προτού αυτά εισαχθούν ως στοιχεία του πεδίου (menu items) με τη βοήθεια των αντίστοιχων πλήκτρων (**soft keys** /3.3.1.11). Τα soft keys βρίσκονται αριστερά και δεξιά της οθόνης και αριθμούν από το 1 έως το 8.

⁵ Προγραμματιστικά βήματα, κατά τα οποία δεν συντελείται συγκόλληση. Στην ουσία αποτελούν βήματα προσέγγισης της αρχικής θέσης συγκόλλησης και απομάκρυνσης από την τελική θέση συγκόλλησης.

Status field:

Το συγκεκριμένο πεδίο, υποδεικνύει τον τρόπο κίνησης, με τον οποίο ο χειριστής επιλέγει να μετατοπίσει τον πυρσό συγκόλλησης (JOINT, WORLD, WORK, TOOL). Η μορφή κίνησης επιλέγεται από τα πλήκτρα με την αντίστοιχη ονομασία. Επιπλέον, παρατίθεται η ταχύτητα των κινήσεων, αναφορικά με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα, το ενεργοποιημένο σύστημα συντεταγμένων και ο επιλεγθείς υποσταθμός.



Εικόνα 3.8 Απεικόνιση των επιμέρους περιοχών της οθόνης του teach pendant σε JOG μενού. (1) Work field (2) Menu Page field (3) Menu title field (4) Edit field (5) Status field (6) Menu Items

3.3.1.2. Κουμπι έκτακτης ανάγκης – Emergency Stop Button.

Το πλήκτρο έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ανάγκης, όπου απαιτείται άμεση ακινητοποίηση των αξόνων και διακοπή εκτέλεσης του τρέχοντος προγράμματος. Με το πάτημα του συγκεκριμένου πλήκτρου, υφίσταται ακαριαία απενεργοποίηση των οδηγών (**drives**) της διάταξης, με άλλα λόγια των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, που καθίστανται υπεύθυνα για την μετάδοση των σημάτων κίνησης των αξόνων. Η πίεση του πλήκτρου συνοδεύεται από αυτόματο κλείδωμα. Προκειμένου, λοιπόν, να απελευθερωθεί το κουμπι και να μπορέσουν οι οδηγοί να ενεργοποιηθούν ξανά, απαιτείται ταυτόχρονη περιστροφή και τράβηγμα (turn-pull) του πλήκτρου. Τότε, μόνο, μπορούμε μέσω του πλήκτρου **Drives** (3.3.1.5) του teach pendant ή του πλήκτρου **Drives On** της εξωτερικής μονάδας (Start/Stop Cassette/3.3.2) να ενεργοποιήσουμε πάλι τους οδηγούς της διάταξης και να συνεχίσουμε την εκτέλεση του προγράμματος. Στην εικόνα 3.7 παρατηρούμε το πλήκτρο έκτακτης ανάγκης στην άνω δεξιά γωνία του χειριστηρίου εκμάθησης και προγραμματισμού.

3.3.1.3. Πλήκτρα τύπου MODE – Mode keys.

Τα πλήκτρα της κατηγορίας Mode χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τον τρόπο κίνησης των αξόνων της αυτοματοποιημένης διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, κινήσεις μεμονωμένων αξόνων, συνδυαζόμενες κινήσεις πολλαπλών αξόνων, γραμμικές και μη, καθορίζονται από την επιλογή 4 διαφορετικών τρόπων κίνησης, που παρέχει η κατηγορία των πλήκτρων Mode. Κάθε τρόπος κίνησης επιλέγεται από το αντίστοιχο πλήκτρο **Joint**, **World**, **Tool**, **Work**. Ο τρόπος κίνησης, που επιλέγεται, αναγράφεται πάντα στο πεδίο κατάστασης (Status field) της οθόνης. Τα προαναφερθέντα τέσσερα πλήκτρα βρίσκονται στη δεξιά κάτω περιοχή του teach pendant. Εμβαθύνοντας, στους 4 διαφορετικούς τρόπους κίνησης των αξόνων του ρομποτικού βραχίονα, ισχύουν τα εξής:

Joint key/mode – Πλήκτρο Joint:

Το συγκεκριμένο πλήκτρο επιτρέπει την ανεξάρτητη κίνηση, ενός και μόνο, άξονα με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (manual control keys). Η κίνηση των αξόνων εκφράζεται υπό τη μορφή περιστροφής τους μέχρι τις μέγιστες επιτρεπόμενες γωνίες του καθένα (Σχήμα 3.1). Συνεπώς, η κίνηση, η οποία θα εκτελεστεί έχοντας το συγκεκριμένο πλήκτρο ενεργοποιημένο, θα είναι μη γραμμική, ενώ παράλληλα ο προσανατολισμός του ακροφυσίου συγκόλλησης θα μεταβάλλεται στο χώρο. Αξίζει να τονιστεί ότι, κάθε ένας από τους έξι άξονες, έχει το δικό του αντίστοιχο (manual control key) πλήκτρο χειροκίνητου ελέγχου.

World key/mode – Πλήκτρο World:

Με την ενεργοποίηση του συγκεκριμένου πλήκτρου, επέρχεται γραμμική κίνηση του ρομποτικού βραχίονα στο χώρο, η οποία συνδυάζει κινήσεις, περισσότερων του ενός, αξόνων. Υπό τον παρόντα τρόπο κίνησης, επιτρέπεται η μετατόπιση του πυρσού συγκόλλησης κατά τις x, y, z διευθύνσεις, χωρίς την αλλαγή του προσανατολισμού του και με τη συνδρομή των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου 1, 2, 3. Τα συγκεκριμένα πλήκτρα αντιστοιχούν στους άξονες 1, 2 και 3 της αυτοματοποιημένης διάταξης. Ωστόσο, σε περίπτωση που επιθυμούμε αλλαγή του προσανατολισμού του πυρσού συγκόλλησης, μπορούμε να το επιτύχουμε με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου 4, 5 και 6. Η αλλαγή του προσανατολισμού του πυρσού, για τη συγκεκριμένη μορφή κίνησης, αφήνει ανεπηρέαστη τη θέση του TCP⁶. Σε περίπτωση γραμμικού τρόπου κίνησης, ο βραχίονας μετακινεί το σημείο TCP σε ένα ευθύγραμμο τμήμα, που ορίζεται από το αρχικό και τελικό σημείο μετάβασης και που έχει βέβαια προγραμματιστεί ως βήμα διαδικασίας. Στην περίπτωση, μη γραμμικού τρόπου κίνησης, ο βραχίονας μετακινεί το TCP κατά τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δυο σημείων μετάβασης.

Tool key/mode – Πλήκτρο Tool:

Η ενεργοποίηση του συγκεκριμένου πλήκτρου, επιτρέπει κινήσεις των αξόνων κατά τρόπο παρόμοιο με το πλήκτρο World. Το σύστημα συντεταγμένων και κατ' επέκταση, η κίνηση του πυρσού κατά μήκος των διευθύνσεων x, y, z καθορίζεται από τον προσανατολισμό του πυρσού συγκόλλησης. Επιπλέον, η κίνηση σε Tool mode, επιτρέπει την ταυτόχρονη μετακίνηση πολλαπλών αξόνων με σκοπό την εξασφάλιση γραμμικότητας.

⁶ Ως TCP (Tool Center Point) ορίζεται ένα μαθηματικά υπολογισμένο σημείο, το οποίο προκύπτει βάσει συγκεκριμένων παραμέτρων των αξόνων κίνησης, συνυπολογίζοντας και την προεξοχή του ηλεκτροδίου. Ο υπολογισμός του σημείου καθίσταται δυνατός, αν και μόνο αν οι άξονες της διάταξης έχουν καλιμπραριστεί.

Work key/mode – Πλήκτρο Work:

Η ενεργοποίηση του συγκεκριμένου πλήκτρου αφορά την επιλογή ενός συστήματος συντεταγμένων, που καθορίζεται είτε από τον χειριστή ή από την κατασκευάστρια εταιρεία. Ο συγκεκριμένος τύπος συστήματος συντεταγμένων καλείται εξωτερικός και χρησιμοποιείται σε παράλληλη εφαρμογή με εξωτερικούς άξονες.

3.3.1.4. Πλήκτρα χειροκίνητου ελέγχου – Manual control keys.

Η συγκεκριμένη ομάδα πλήκτρων τοποθετείται στην άνω και κάτω δεξιά περιοχή του teach pendant, ενώ επίσης συνοδεύεται από μια σχηματική αναπαράσταση του ρομποτικού βραχίονα (εικόνα 3.7). Ο ρόλος, που επιτελούν, είναι η περιστροφή ή η μετακίνηση των αξόνων της διάταξης. Κάθε ένα από αυτά, χωρίζεται σε 2 τμήματα, τα οποία ανταποκρίνονται σε ελαφρά πίεση και καθορίζουν τις κινήσεις του εκάστοτε άξονα (πάνω κάτω, δεξιά-αριστερά κλπ.). Τα πλήκτρα χειροκίνητου ελέγχου είναι 12 (E1,E2,E3,X,Y,Z,1,2,3,4,5,6), εκ των οποίων τα 6 υλοποιούνται στις διαδικασίες συγκόλλησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Τα πλήκτρα E1,E2,E3 αφορούν στον έλεγχο εξωτερικών αξόνων, οι οποίοι δεν υλοποιούνται από την διάταξη του E.N.T .Ομοίως, τα πλήκτρα X,Y,Z που χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση των παγκόσμιων αξόνων, δεν βρίσκουν άμεση εφαρμογή καθώς δεν υλοποιούνται από την διάταξη του E.N.T . Η χρησιμοποίηση των X,Y,Z υφίστανται μόνο στην περίπτωση, όπου οι ρομποτικοί άξονες ενσωματώνονται πάνω σε παγκόσμιους άξονες. Συνεπώς, από τη στιγμή που ο ρομποτικός βραχίονας είναι πακτωμένος, οι παγκόσμιοι άξονες παρουσιάζουν μηδενική υπόσταση για της συγκολλήσεις του E.N.T. Επομένως, τα πλήκτρα, που υπόκεινται σε ουσιαστική χρήση είναι τα πλήκτρα χειροκίνητου ελέγχου 1,2,3,4,5,6. Συγκεκριμένα, ισχύουν τα εξής:

Πλήκτρο 1:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 1 είτε αριστερά είτε δεξιά, όταν ο επιλεγθείς τρόπος κίνησης είναι σε Joint mode. Επίσης, μετακινεί γραμμικά τον πυρσό συγκόλλησης κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y για World mode.

Πλήκτρο 2:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 2 πάνω ή κάτω, για επιλεγόμενο τρόπο κίνησης σε Joint mode, ενώ μετακινεί γραμμικά τον πυρσό συγκόλλησης, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Z σε World mode.

Πλήκτρο 3:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 3 πάνω ή κάτω, για επιλεγόμενο τρόπο κίνησης σε Joint mode, ενώ μετακινεί γραμμικά τον πυρσό συγκόλλησης, διατηρώντας τον προσανατολισμό του, κατά τη διαμήκη διεύθυνση X σε World mode.

Πλήκτρο 4:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 4 αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα σε Joint mode, ή προσανατολίζει τον πυρσό κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y σε World mode.

Πλήκτρο 5:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 5 πάνω ή κάτω σε Joint mode, ή προσανατολίζει τον πυρσό κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Z σε World mode.

Πλήκτρο 6:

Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 6 αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα σε Joint mode, ή περιστρέφει τον πυρσό γύρω από το σημείο TCP σε World mode.

3.3.1.5. Πλήκτρα άμεσου ελέγχου - Control keys.

Τα πλήκτρα άμεσου ελέγχου παρέχουν τη δυνατότητα στο χειριστή να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί συγκεκριμένες εξειδικευμένες λειτουργίες της αυτοματοποιημένης διάταξης. Κάθε πλήκτρο έχει μια ενσωματωμένη λυχνία LED, η οποία φωτίζεται όταν η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ενεργή. Ακολούθως, αξίζει να αναφερθεί ότι τα πλήκτρα ελέγχου λειτουργούν σε *toggle mode*, γεγονός που μεταφράζεται στο ότι κάθε φορά που πιέζονται, η κατάσταση τους εναλλάσσεται από ενεργή σε ανενεργή και αντίστροφα. Τα συγκεκριμένα πλήκτρα έχουν τις ονομασίες **DRIVES**, **ROB**, **PROC**, **SYNC**, **SENSOR**. Οι λειτουργίες DRIVES και PROC συνιστούν υψίστης σημασίας λειτουργίες για τον προγραμματισμό & την υλοποίηση των συγκολλητικών διαδικασιών. Αντιθέτως, οι υπόλοιπες λειτουργίες δεν υλοποιούνται άμεσα από την τωρινή μορφή της αυτοματοποιημένης διάταξης. Λεπτομερέστερα, ισχύουν τα εξής:

Λειτουργία DRIVES:

Το πλήκτρο DRIVES είναι αναμμένο, όταν οι οδηγοί (drives) της αυτοματοποιημένης εγκατάστασης είναι ενεργοί. Με άλλα λόγια, όταν επιτρέπεται η κίνηση των αξόνων της διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε περιπτώσεις επαφής του ακροφυσίου με την τράπεζα ή έτερες επιφάνειες, χρήσης του πλήκτρου έκτακτης ανάγκης και ανοίγματος της πόρτας του προστατευτικού κιγκλιδώματος του βραχίονα, υφίσταται αυτόματα απενεργοποίηση των οδηγών. Συνεπώς το πλήκτρο DRIVES σβήνει, ειδοποιώντας μας ότι οι οδηγοί απενεργοποιήθηκαν. Προκειμένου, λοιπόν, να ενεργοποιηθούν ξανά απαιτείται η πίεση του πλήκτρου STOP του teach pendant, στη δεξιά κάτω περιοχή του, και η επακόλουθη πίεση του πλήκτρου DRIVES.

Λειτουργία PROC:

Η λειτουργία PROC (Process on/off) είναι, ιδιαίτερα, σημαντική για την ολοκλήρωση μιας συγκολλητικής διαδικασίας. Όταν η λυχνία της λειτουργίας PROC είναι σβηστή, δεν δύναται να πραγματοποιηθεί συγκόλληση. Εφόσον, λοιπόν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία προγραμματισμού των βημάτων συγκόλλησης και επιθυμούμε να "τρέξουμε" μια προσομοίωση αυτής, φροντίζουμε να απενεργοποιήσουμε τη λειτουργία PROC. Όταν, πλέον, ύστερα από το πέρας της προσομοίωσης της διαδικασίας, παρατηρήσουμε ότι η πορεία συγκόλλησης βαίνει επιτυχώς, φροντίζουμε να ενεργοποιήσουμε τη λειτουργία PROC. Συνίσταται η λειτουργία PROC να είναι ανενεργή κατά τη διάρκεια προγραμματισμού για λόγους ασφαλείας. Η ενεργοποίηση του θα πρέπει να γίνεται, μόνο μετά από επαλήθευση επιτυχούς αποπεράτωσης της διαδικασίας συγκόλλησης.

Λειτουργία SYNC:

Δίνει τη δυνατότητα στην αυτοματοποιημένη διάταξη να εκτελέσει ένα πρόγραμμα σε συγχρονισμό με δεύτερο πρόγραμμα έτερης αυτοματοποιημένης διάταξης.

Λειτουργία SENSOR:

Δίνει τη δυνατότητα σε αισθητήριους μηχανισμούς της αυτοματοποιημένης διάταξης να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν (Gas nozzle sensor, Arc seam sensor).

Λειτουργία ROB:

Λειτουργία, που δεν διατίθεται για τη διάταξη IGM Robotersysteme® RT330.1 .

3.3.1.6. Πλήκτρα αύξησης/μείωσης – Inc/Dec keys.

Η συγκεκριμένη κατηγορία πλήκτρων βρίσκεται άνωθεν και διαγωνίως δεξιά της οθόνης (πάνω από τα πλήκτρα FUNC3& FUNC4) και αποτελείται από πλήκτρα, που καλύπτουν πολλαπλές χρήσεις και για ποικίλες αντιμετωπιζόμενες καταστάσεις, όπως:

Ρύθμιση της ταχύτητας σε manual mode: Σε γενικότερα πλαίσια, υφίστανται τρεις τρόποι λειτουργίας της διάταξης, οι οποίοι καθορίζονται από την εξωτερική μονάδα ελέγχου (Start/Stop Cassette). Αυτοί οι τρόποι είναι οι εξής: manual mode, test mode, automatic mode και αναλύονται εκτενώς σε ακόλουθο εδάφιο(3.3.2). Συνεπώς, σε manual mode, οι άξονες κινούνται με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου σε μια προκαθορισμένη ταχύτητα. Πιέζοντας, λοιπόν, τα πλήκτρα INC/DEC, αυτή η προκαθορισμένη ταχύτητα των ρομποτικών αξόνων μεταβάλλεται είτε αυξητικά ή μειωτικά. Η ταχύτητα αναγράφεται στο πεδίο κατάστασης (status field) σαν επί τοις εκατό ποσοστό της μέγιστης δυνατής ταχύτητας. Υφίστανται 8 διαφορετικές κλίμακες ταχύτητας (2%, 5%, 10%, 18%, 30%, 50%, 75%, 100%), οι οποίες επιλέγονται από το χειριστή βάσει των απαιτήσεων της εκάστοτε διαδικασίας.

Επέκταση των πλήκτρων σελίδας (Page keys):

Στο πεδίο του menu page, υπάρχουν το πολύ 8 σελίδες διαθέσιμες προς επιλογή. Η επιλογή τους γίνεται με τη βοήθεια των αντίστοιχων πλήκτρων σελίδας (page key), τα οποία αριθμούν από το 1 έως το 8 και βρίσκονται ακριβώς πάνω από την οθόνη LCD. Σε συγκεκριμένα μενού, όμως, διατίθενται πάνω από 8 σελίδες (πχ. στον κατάλογο του σκληρού δίσκου). Επομένως, πιέζοντας το INC εμφανίζονται οι επόμενες 8 προς επιλογή σελίδες και αντίστοιχα με το DEC επανερχόμαστε πάλι στις αρχικές 8.

Εισαγωγή αρνητικής τιμής:

Σε περίπτωση εισαγωγής αρνητικής τιμής παραμέτρου, χρειάζεται πρώτα να εισαχθεί το αρνητικό πρόσημο της τιμής. Αυτό επιτυγχάνεται με πίεση του πλήκτρου 2nd, ακολουθούμενο από το πλήκτρο DEC.

3.3.1.7. Πλήκτρα σελίδων – Page keys.

Όπως έχει προαναφερθεί, τα πλήκτρα σελίδων αριθμούν από **Pg1** έως **Pg8**, βοηθούν στην επιλογή σελίδων εντός του τρέχοντος μενού και τοποθετούνται ακριβώς πάνω από τη οθόνη (εικόνα 3.7). Η εφαρμογή τους θα φανεί, λεπτομερέστερα, σε ακόλουθο εδάφιο.

3.3.1.8. Πλήκτρα επεξεργασίας – Edit keys.

Τα πλήκτρα επεξεργασίας βρίσκονται στην περιοχή, ακριβώς κάτω από την οθόνη LCD του teach pendant. Βρίσκουν ευρεία εφαρμογή κατά τις διαδικασίες δημιουργίας σύνταξης και τροποποίησης των προγραμμάτων. Επιπλέον, επιτρέπουν τη διαχείριση υπαρχόντων προγραμμάτων, υπό την έννοια εισαγωγής νέων βημάτων, διόρθωσης και διαγραφής αυτών. Τα πλήκτρα, που συντελούν την παρούσα ομάδα είναι τα **STEP-**, **STEP+**, **GET STEP**, **JOG/WORK/AUX**, **DEL**, **INS**, **CORR**, **ADD**.

Πλήκτρα STEP-, STEP+, GET STEP:

Εμφανίζουν στην οθόνη τα επιθυμητά βήματα του τρέχοντος προγράμματος, χωρίς να χρειάζεται να εκτελεστούν. Το πλήκτρο STEP- μας οδηγεί στο προηγούμενο βήμα του προγράμματος, ενώ αντιθέτως το πλήκτρο STEP+ μας οδηγεί στην εμφάνιση του επόμενου βήματος. Τέλος, το πλήκτρο GET STEP εμφανίζει ένα εκ των βημάτων του προγράμματος, όποιο θέλουμε εμείς να εμφανίσουμε. Προκειμένου, λοιπόν, να

εμφανίσουμε ένα συγκεκριμένο βήμα, πληκτρολογούμε τον αριθμό του βήματος, ο οποίος εμφανίζεται στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field) και έπειτα πιέζουμε το πλήκτρο GET STEP. Η εισαγωγή του αριθμού 2 και ακολούθα, η πίεση του πλήκτρου GET STEP θα εμφανίσει στην οθόνη το κύριο βήμα 2. Η εισαγωγή του αριθμού 5.3 σε συνδυασμό με την πίεση του GET STEP θα εμφανίσει στην οθόνη το υπό-βήμα 3 του κύριου βήματος 5.

Πλήκτρο DEL:

Πιέζοντας το πλήκτρο DEL, το βήμα προγράμματος, το οποίο εμφανίζεται εκείνη τη στιγμή στην οθόνη, διαγράφεται. Βέβαια, διαγραφή βήματος μπορεί να γίνει, και αν πρώτα εισάγουμε στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field) τον αριθμό του βήματος, που επιθυμούμε να διαγραφεί και έπειτα πιέσουμε το πλήκτρο DEL. Ο αριθμός του βήματος στο πεδίο επεξεργασίας έχει προτεραιότητα. Με άλλα λόγια, αν και μόνο αν, το πεδίο επεξεργασίας δεν περιέχει έγκυρο αριθμό, διαγράφεται το εμφανιζόμενο βήμα στην οθόνη.

Πλήκτρο INS:

Με την πίεση του πλήκτρου INS, οι εμφανιζόμενες, στην οθόνη, πληροφορίες ενός βήματος, χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ενός νέου βήματος στο πρόγραμμα. Το καινούριο βήμα, μαζί με όλες τις παραμέτρους και τη θέση του TCP, εισάγεται αμέσως μετά από το τρέχον βήμα της οθόνης LCD και μόνο αν το πεδίο επεξεργασίας είναι άδειο. Οι αρχικές πληροφορίες, βάσει των οποίων δημιουργήθηκε το καινούριο βήμα, ούτε χάνονται ούτε τροποποιούνται. Στην περίπτωση εισαγωγής ενός έγκυρου αριθμού βήματος, το καινούριο βήμα θα εισαχθεί ως το ακόλουθο βήμα του αριθμού που πληκτρολογήθηκε.

Πλήκτρο CORR:

Πιέζοντας το πλήκτρο CORR, όλες οι αρχικές πληροφορίες του τρέχοντος βήματος τροποποιούνται και διατηρούν τις τιμές, οι οποίες εμφανίζονται εκείνη τη στιγμή στην οθόνη. Αξίζει να αναφερθεί ότι, με την πίεση του CORR, η τρέχουσα θέση του TCP λαμβάνεται ως η καινούρια θέση TCP για το συγκεκριμένο βήμα. Σε περίπτωση, που είναι επιθυμητή η διόρθωση των παραμέτρων, χωρίς όμως την αλλαγή που αφορά το TCP, μπορούμε να πιέσουμε το πλήκτρο FN και έπειτα το πλήκτρο CORR.

Πλήκτρο ADD:

Ένα έτερο σημαντικό πλήκτρο αποτελεί το πλήκτρο ADD. Πατώντας το, όλες οι πληροφορίες του τρέχοντος βήματος, συμπεριλαμβανομένων των τιμών παραμέτρων, του είδους βήματος, του συστήματος συντεταγμένων και της θέσης του σημείου TCP χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός καινούριου βήματος. Το καινούριο βήμα προστίθεται ως το τελευταίο βήμα στη σειρά βημάτων, που απαρτίζουν το πρόγραμμα ενώ το πλήθος των προγραμματιζόμενων βημάτων αυξάνεται κατά 1. Επιπροσθέτως, το παρόν πλήκτρο, χρησιμοποιείται συχνά και ως πλήκτρο επιβεβαίωσης ενεργειών. Κατά τη διάρκεια επικοινωνίας της διάταξης με το χειριστή μέσω της οθόνης, κρίνεται συχνά επιβεβλημένη η πίεση του πλήκτρου ADD για την έναρξη της προτεινόμενης ενέργειας· πχ. κατά τη φόρτωση προγραμμάτων, το πλήκτρο ADD χρησιμοποιείται ως μέσο εισαγωγής εντολών επιβεβαίωσης.

Πλήκτρο JOG/WORK/AUX:

Το παρόν πλήκτρο συνιστά, ένα εκ των σημαντικότερων πλήκτρων, για τη διαδικασία δημιουργίας προγραμμάτων. Χρησιμοποιείται για να καθορίσει το είδος του τρέχοντος βήματος (JOG, WORK, AUX). Διαδοχικές πιέσεις του πλήκτρου εναλλάσσουν τις επιλογές JOG, WORK, δίνοντας στο συγκολλητή την ευχέρεια επιλογής του είδους

βήματος. Ο προγραμματισμός, αντιθέτως ενός βήματος AUX προϋποθέτει την πίεση του πλήκτρου FN, πρότερα του πλήκτρου JOG/WORK/AUX. Το πλήκτρο JOG / WORK / AUX επιτελεί συγκεκριμένες βασικές λειτουργίες:

- 1) Κατά τη διαδικασία δημιουργίας ενός προγράμματος και εφόσον έχουμε εισάγει τις αρχικές πληροφορίες, που απαιτούνται (πχ. το όνομα του προγράμματος), το παρόν πλήκτρο πιέζεται πρώτο, με σκοπό να ξεκινήσει ο προγραμματισμός των επιμέρους βημάτων και ο βραχίονας να κινηθεί προς τις ενδεχόμενες θέσεις συγκόλλησης. Η πίεση του πλήκτρου είναι υποχρεωτική, διότι με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται δίαυλος επικοινωνίας μεταξύ του χειριστή και της διάταξης και η διάταξη κατανοεί ότι, βρίσκεται πλέον σε θέση έναρξης εργασιών. Επίσης, οποιαδήποτε προσπάθεια εισαγωγής και αποθήκευσης δεδομένων γίνει (ADD key), χωρίς το πλήκτρο JOG / WORK / AUX να έχει πατηθεί, θα οδηγήσει σε εμφάνιση μηνυμάτων σφάλματος στην οθόνη.
- 2) Ο αυτοματοποιημένος βραχίονας δύναται να εκτελέσει δυο τύπων βήματα. Η πρώτη κατηγορία βημάτων είναι τα βήματα μετάβασης (**transition steps** ή **JOG steps**), ενώ η δεύτερη τα βήματα εργασίας ή βήματα διαδικασίας (**WORK steps**). Τα βήματα μετάβασης, είναι βήματα κατά τα οποία δεν εκτελείται καμία συγκόλληση. Αποτελούν βήματα, κατά τα οποία ο βραχίονας κινείται προς την αρχική θέση συγκόλλησης και απομακρύνεται από την τελική θέση συγκόλλησης. Η εκτέλεση αυτών των βημάτων, δύναται να επέλθει, είτε γραμμικά ή μη γραμμικά και με ταχύτητα επιλεγόμενη από το χρήστη, που κυμαίνεται από 0-200 m/min. Από την άλλη πλευρά, τα βήματα εργασίας αποτελούν βήματα, κατά την εκτέλεση των οποίων λαμβάνει χώρα συγκόλληση. Επηρεάζονται, εύλογα, από μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων από ότι τα JOG steps, όπως για παράδειγμα ένταση ρεύματος, διόρθωση τάσης τόξου, ύπαρξη η μη παλμικού ρεύματος, οι οποίες ρυθμίζονται και αποθηκεύονται από το χρήστη μέσω του teach pendant. Σε επερχόμενα εδάφια, γίνεται εκτενέστερη αναφορά σε αυτές τις οικογένειες βημάτων.

3.3.1.9. Πλήκτρα FUNC, FN και 2nd .

FUNC πλήκτρα:

Το χειριστήριο εκμάθησης και προγραμματισμού της αυτοματοποιημένης διάταξης περιέχει 4 λειτουργικά πλήκτρα (**FUNC keys**), τα οποία αριθμούν από το 1 έως το 4. Βρίσκονται στην πάνω περιοχή του teach pendant, εκατέρωθεν της οθόνης. Ισχύει ότι, το πλήκτρο FUNC1 δεν χρησιμοποιείται σε καμία λειτουργία. Το FUNC2 πλήκτρο, χρησιμοποιείται ως πλήκτρο συντόμευσης (quick key), για την αποθήκευση των τρεχόντων προγραμμάτων στο σκληρό δίσκο. Ακολούθως, το πλήκτρο FUNC3 ενεργοποιεί το λεγόμενο local manip menu, το οποίο διαμορφώνεται από έναν αριθμό υπό-μενού, που χρησιμοποιούνται για εργασίες του εν ενεργεία προγράμματος. Τέλος, το σημαντικότερο όλων είναι το πλήκτρο FUNC4, το οποίο διαθέτει τις εξής 5 σελίδες που επιλέγονται μέσω των page keys (3.3.1.7):

CTX page – Σελίδα περιεχομένων (Context page). Παρουσιάζει τις ρυθμίσεις του εν ενεργεία προγράμματος, όπως για παράδειγμα το όνομα του προγράμματος.

CAL page – Χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση των επιμέρους αξόνων.

I/O page – Περιέχει λειτουργίες δημιουργίας, αποθήκευσης, φόρτωσης κ' διαγραφής προγραμμάτων. Αποτελεί τη προκαθορισμένα εμφανιζόμενη σελίδα με την πίεση του πλήκτρου FUNC4.

AUX page - Παρέχει ποικίλες βοηθητικές λειτουργίες.

SET page - Χρησιμοποιείται για ειδικές ρυθμίσεις παραμέτρων της διάταξης, όπως διαμόρφωση αξόνων, συγχρονισμός εξωτερικών αξόνων κλπ.

Πλήκτρα FN & 2nd :

Το αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο του teach pendant περιέχει τα πλήκτρα FN και 2nd. Ο ρόλος τους είναι να παρέχουν στα απλά πλήκτρα του αλφαριθμητικού πληκτρολογίου, στο πλήκτρο παροχής ηλεκτροδίου (**WIRE FEED key**) και στα πλήκτρα επεξεργασίας (**Edit keys**) μια επιπρόσθετη λειτουργία. Με άλλα λόγια, επιτελούν το ρόλο πλήκτρων συντομεύσεων (**Short cuts**). Οι συντομεύσεις είναι απαραίτητες στην λειτουργία της αυτοματοποιημένης διάταξης, καθώς επισπεύδουν και καθιστούν αποδοτικότερες τις διαδικασίες προγραμματισμού. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα πλήκτρα συνοδεύονται από μια ενσωματωμένη λυχνία LED, η οποία φωτίζει, όταν το εκάστοτε πλήκτρο είναι ενεργοποιημένο. Η λυχνία παραμένει φωτεινή, ώσπου να πιεστεί το επακόλουθο πλήκτρο, οπότε και σβήνει, πληροφορώντας μας ότι η λειτουργία των πλήκτρων FN και 2nd κατέστη ανενεργή. Ακολουθεί πίνακας με τις σημαντικότερες συντομεύσεις:

Πίνακας 3.18 Επεξήγηση της λειτουργίας των κυριότερων συντομεύσεων των πλήκτρων FN και 2nd.

Συντόμευση	Λειτουργία
FN + A	Βαθμονόμηση ενός μεμονωμένου άξονα. Πριν την πίεση του συνδυασμού FN + A, πρέπει να εισαχθεί ο αριθμός του αντίστοιχου άξονα στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field).
FN + C	Βαθμονόμηση όλων των αξόνων. Βήμα, που εκτελείται, απαραίτητα, πρώτο κατά τη διαδικασία προγραμματισμού βημάτων.
FN + G	Βαθμονόμηση όλων των παγκόσμιων αξόνων.
FN + K	Έναρξη ελέγχου του τρέχοντος προγράμματος.
FN + Q	Δημιουργία προγράμματος διόρθωσης του σημείου TCP.
2nd + A	Εμφανίζει τα προγράμματα της μνήμης του συστήματος και χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση προγραμμάτων.
2nd + D	Χρησιμεύει στη διαγραφή προγραμμάτων.
2nd + L	Χρησιμεύει στη φόρτωση προγραμμάτων από το σκληρό δίσκο και τη δισκέτα (floppy disk).
2nd + N	Χρησιμεύει στη δημιουργία ενός νέου προγράμματος.
2nd + S	Ανοίγει το υπό-μενού αποθήκευσης προγραμμάτων είτε στο σκληρό δίσκο ή στη δισκέτα
2nd + DEC key	Εισαγωγή αρνητικής τιμής.
2nd + WIRE FEED key	Ρύθμιση φωτεινότητας της οθόνης.

3.3.1.10. Πλήκτρα AUTO.

Τα πλήκτρα AUTO βρίσκονται ακριβώς αριστερά των πλήκτρων MODE (εικόνα 3.7) και χρησιμοποιούνται, κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων και επίσης, κατά την περιήγηση του χρήστη εντός των προγραμματισθέντων βημάτων. Η συγκεκριμένη ομάδα πλήκτρων απαρτίζεται από τα **STOP**, **START**, **GOTO STEP** και **SINGLE STEP**. Πιο συγκεκριμένα, ισχύουν τα εξής:

Πλήκτρο START:

Το τρέχον και πρόσφατα διαμορφωθέν, πρόγραμμα ξεκινά να εκτελείται με την πίεση του πλήκτρου START. Η εκτέλεση ξεκινά από το βήμα, που εμφανίζεται στην οθόνη, τη στιγμή πίεσης του πλήκτρου ή από τον αριθμό βήματος, που έχουμε εισάγει στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field). Όταν απαιτείται εκτέλεση του προγράμματος από την αρχή, είναι απαραίτητο η οθόνη να εμφανίζει το βήμα με αριθμό 2 ή να εισαχθεί στο πεδίο επεξεργασίας ο αριθμός του πρώτου βήματος του συγκεκριμένου προγράμματος. Επομένως, αξίζει να αναφερθεί ότι σε όλα τα προγράμματα που δημιουργούνται, το πρώτο βήμα ταυτίζεται πάντα με το βήμα αριθμού 2· η αρίθμηση βημάτων ξεκινάει πάντα από το 2. Με την πίεση του πλήκτρου START, η διάταξη εκτελεί αυτόματα ένα πρόγραμμα ελέγχου, αναλύοντας τη σύνταξη του προγράμματος και εμφανίζοντας στο χρήστη πολλαπλά διαδοχικά μηνύματα, που επιβεβαιώνουν ή όχι την ορθή 'δόμηση' του προγράμματος. Αν ο έλεγχος προκύψει επιτυχής, ξεκινά αυτόματα η εκτέλεση του προγράμματος. Το πρόγραμμα σταματάει/ διακόπτεται μόνο υπό τις εξής περιπτώσεις:

1. Μετά την εκτέλεση του τελευταίου βήματος του προγράμματος.
2. Με πίεση του πλήκτρου STOP.
3. Με πίεση του πλήκτρου έκτακτης ανάγκης.
4. Με άνοιγμα της πόρτας του προστατευτικού κιγκλιδώματος.
5. Με εμφάνιση σφάλματος, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος.

Πλήκτρο STOP:

Το συγκεκριμένο πλήκτρο χρησιμοποιείται για τη διακοπή εκτέλεσης προγραμμάτων. Κατά τη διακοπή του προγράμματος, η αυτοματοποιημένη διάταξη, δημιουργεί ένα προσωρινό βήμα, το οποίο χρησιμεύει στην αποθήκευση της θέσης του TCP εκείνη τη στιγμή. Με πίεση του πλήκτρου START, το πρόγραμμα συνεχίζει να εκτελείται από το σημείο, που είχε διακοπεί και το προσωρινό βήμα διαγράφεται αυτόματα. Επίσης, αν για οποιοδήποτε λόγο απενεργοποιηθούν οι οδηγοί της διάταξης, και επιθυμούμε την ενεργοποίησή τους από το teach pendant, πρέπει πρώτα να πιέσουμε το πλήκτρο STOP και μετέπειτα το πλήκτρο DRIVES (3.3.1.5).

Πλήκτρο GOTO STEP:

Το συγκεκριμένο πλήκτρο βοηθάει στη μετακίνηση του σημείου TCP, στη θέση, που έχει προγραμματιστεί, για το τρέχον βήμα της οθόνης, είτε για το βήμα, του οποίου ο αριθμός έχει εισαχθεί στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field).

Πλήκτρο SINGLE STEP:

Με την πίεση του πλήκτρου SINGLE STEP, η διάταξη εκτελεί πάντα το επακόλουθο βήμα του προγράμματος, είτε αυτό είναι κύριο βήμα, είτε υπό-βήμα. Σε περίπτωση κυκλικών συγκολλήσεων, η χρήση του πλήκτρου SINGLE STEP για μετακίνηση του TCP από ένα σημείο του κύκλου στο επόμενο, πρέπει να αποφεύγεται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, η διάταξη θα επιλέξει το συντομότερο δρόμο από το ένα βήμα στο άλλο, ο οποίος δεν θα είναι κυκλικός, και η πιθανότητα σύγκρουσης του βραχίονα με το προς συγκόλληση τεμάχιο είναι ιδιαίτερα υψηλή.

3.3.1.11. Πλήκτρα ESC, MAIN και SOFTKEYS

Πλήκτρο ESC:

Το πλήκτρο ESC χρησιμοποιείται, κυρίως, για την έξοδο από τα διάφορα επίπεδα των εκάστοτε υπό-μενού. Ωστόσο, όταν στην οθόνη παρουσιάζεται σελίδα από μενού JOG, WORK ή AUX, τότε η έξοδος επιτυγχάνεται μόνο, με πίεση του πλήκτρου

MAIN του teach pendant. Δευτερευόντως, χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των σφαλμάτων, που παρουσιάζονται στην οθόνη του teach pendant.

Πλήκτρο MAIN:

Με την πίεση του πλήκτρου MAIN επέρχεται άμεση έξοδος από όλα τα μενού και από τα περισσότερα των υπό-μενού. Εάν το κύριο μενού (main menu), εμφανίζεται στην οθόνη LCD, τότε οι άξονες της διάταξης είναι απενεργοποιημένοι.

Πλήκτρα SOFTKEYS:

Το χειριστήριο προγραμματισμού με 16 πλήκτρα softkeys, τα οποία τοποθετούνται εκατέρωθεν της οθόνης σε δύο ομάδες των 8 πλήκτρων. Ο αριθμός 8 καθορίζεται από το μέγιστο αριθμό στοιχείων πεδίου (menu items), που εμφανίζονται στο εργασιακό πεδίο (work field) ενός μενού. Η συγκεκριμένη ομάδα πλήκτρων χρησιμοποιείται για τον τονισμό ενός στοιχείου πεδίου, για τη μεταφορά των περιεχομένων, που εισάγουμε στο πεδίο επεξεργασίας του ,αντίστοιχα ενδιαφερόμενου, στοιχείου πεδίου (πχ. εισαγωγή τιμών παραμέτρων) και για την επιλογή συγκεκριμένων υπό-μενού.

3.3.1.12. Permissive switches - Επιτρεπτικοί διακόπτες.

Όπως έχει προαναφερθεί και όπως θα αναλυθεί εκτενώς και σε ακόλουθο εδάφιο, ένα πρόγραμμα συγκόλλησης δύναται να εκτελεστεί είτε σε manual mode, είτε σε test mode, ή σε automatic mode. Η επιλογή του τρόπου εκτέλεσης επιτυγχάνεται μέσω του επιλογέα (M, A, T, S / 3.3.2), που βρίσκεται στην εξωτερική ελεγκτική μονάδα (Start/Stop Cassette). Για λόγους ασφαλείας, ένα νέο πρόγραμμα εκτελείται πάντα σε manual mode, λόγω χαμηλότερης ταχύτητας των αξόνων. Προκειμένου, λοιπόν, να εκτελεστεί σε πλήρη ταχύτητα, ο επιλογέας θα πρέπει να βρίσκεται στη θέση T (test) ή στη θέση A (automatic). Σε κατάσταση test mode, η λογική ασφαλείας (security logic) δεν είναι ενεργοποιημένη. Οι οδηγοί μπορούν να ενεργοποιηθούν και να παραμείνουν σε ενεργή κατάσταση, διατηρώντας έναν ,εκ των δυο διακοπών, συνεχόμενα πιεσμένο. Αν κατά την εκτέλεση του προγράμματος, αφήσουμε τον επιτρεπτικό διακόπτη, οι οδηγοί απενεργοποιούνται και συνεπώς το πρόγραμμα διακόπτεται.

3.3.2. Εξωτερική Ελεγκτική Μονάδα - External Start/Stop Cassette.

Η εξωτερική ελεγκτική μονάδα της αυτοματοποιημένης διάταξης, αποτελεί τη διεπαφή του χρήστη για τη λογική ασφαλείας και είναι ανεξάρτητη από το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα. Ο εκάστοτε χρήστης πληροφορείται, δια μέσου της ενσωματωμένης οθόνης LED της μονάδας, με μηνύματα σφαλμάτων, τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη λογική ασφαλείας της διάταξης. Η εξωτερική ελεγκτική μονάδα διαχωρίζεται στα εξής επιμέρους στοιχεία:

- Τα γενικά κουμπιά (General buttons).
- Τον επιλογέα διαφορετικών τρόπων λειτουργίας (key operated mode switch).
- Το διακόπτη παράκαμψης (bypass key switch) για απενεργοποίηση συγκεκριμένων συσκευών προστασίας.
- Τα πλήκτρα λειτουργίας (Function keys).
- Το πλήκτρο έκτακτης ανάγκης (Emergency Stop button).
- Την LED οθόνη επικοινωνίας.



Εικόνα 3.9 Εξωτερική ελεγκτική μονάδα - External Start/Stop Cassette.

3.3.2.1. General buttons - Γενικά Πλήκτρα.

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται τα κουμπιά **Drives On**, **Drives Off**, **STOP** και **START1** έως **START6**. Ισχύουν τα εξής:

- Το κουμπί Drives On χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση των οδηγών (drives) της διάταξης, υπό την προϋπόθεση ότι, δεν υφίσταται κατάσταση σφάλματος στη λογική ασφαλείας του ρομποτικού βραχίονα.
- Το κουμπί Drives Off χρησιμοποιείται για άμεση απενεργοποίηση των οδηγών.
- Η πίεση του STOP διακόπτει την εκτέλεση του τρέχοντος προγράμματος. Η θέση του TCP διατηρείται σταθερή στη θέση, που έχει διακοπεί το πρόγραμμα και παραμένει σε αυτή, εφόσον οι οδηγοί βρίσκονται σε λειτουργία. Επιπροσθέτως, το παρόν κουμπί χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κουμπί Drives Off, ως κουμπί γενικής επαναφοράς
- Έκαστο των κουμπιών START1 έως START6, συνδράμει άμεσα στην εκκίνηση ενός προγράμματος συγκόλλησης, το οποίο έχει ρυθμιστεί να εκτελείται με την πίεση του συγκεκριμένου κουμπιού. Επί της ουσίας, δηλαδή, τα κουμπιά START1 έως START6, αποτελούν δευτερεύουσες, εξωτερικές επιλογές (**external starts**) για την ενεργοποίηση εκτέλεσης ενός προγράμματος. Υφίσταται, λοιπόν, η δυνατότητα να δημιουργήσουμε μέχρι 6 προγράμματα, τα οποία μπορούμε να ενεργοποιήσουμε απευθείας από την εξωτερική ελεγκτική μονάδα με τη βοήθεια των συγκεκριμένων κουμπιών.

3.3.2.2. Key operated mode switch - Επιλογέας κατάστασης λειτουργίας.

Ο συγκεκριμένος επιλογέας χαρακτηρίζεται από τις ενδείξεις M, T, A και S. Η κύρια χρήση του έγκειται στην επιλογή του τρόπου λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα. Με τη βοήθεια ενός κλειδιού, επιλέγεται ένας εκ των M, T, A τρόπων λειτουργίας (**working modes**), καθώς η επιλογή S δεν υλοποιείται από την αυτοματοποιημένη διάταξη. Μια συνοπτική περιγραφή των τρόπων λειτουργίας δίδεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 19. Συνοπτική περιγραφή των τρόπων λειτουργίας (**working modes**) της διάταξης.

Τρόπος Λειτουργίας	Εφαρμογή	Χαρακτηριστικά ασφαλείας
M MANUAL	Δημιουργία κι αποθήκευση ενός προγράμματος βημάτων (προσομοίωση)	Η λογική ασφαλείας είναι απενεργοποιημένη. Το πρόγραμμα εκτελείται με μειωμένη ταχύτητα
T TEST	Εκτέλεση ενός προγράμματος βημάτων (βελτιστοποίηση)	Η λογική ασφαλείας είναι απενεργοποιημένη. Το πρόγραμμα εκτελείται σε πλήρη ταχύτητα, εάν ένας από τους επιτρεπτικούς διακόπτες (3.3.1.12) κρατείται συνεχόμενα πιεσμένος
A AUTOMATIC	Τελική εκτέλεση προγράμματος	Η λογική ασφαλείας είναι ενεργοποιημένη. Το πρόγραμμα εκτελείται με κανονική και πλήρη ταχύτητα

i. Manual mode:

Στον συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας (work mode), ο χρήστης δύναται να βρίσκεται εντός της περιοχής του προστατευτικού κιγκλιδώματος, και να προγραμματίζει με τη βοήθεια του χειριστηρίου εκμάθησης. Τα προγράμματα, που εκτελούνται σε manual mode, εκτελούνται αυτόματα σε χαμηλότερη ταχύτητα από τα test & automatic mode. Ωστόσο, η μείωση της ταχύτητας δεν επηρεάζει βήματα εργασίας (work steps 3.3.1.8), κατά τα οποία εκτελείται συγκόλληση, παρά μόνο βήματα προγραμμάτων, τα οποία δεν έχουν ειδικές απαιτήσεις ταχύτητας (non linear JOG steps). Σε όλα τα βήματα, πλην των non linear JOG steps, απαιτείται η εισαγωγή τιμής ταχύτητας. Οπότε σε manual mode, όλα τα βήματα, πλην των non linear JOG steps, θα "τρέξουν" με την ταχύτητα, που έχει πρότερα επιλεγθεί. Για τα non linear JOG steps, η διάταξη, αυτόματα, επιλέγει κίνηση των επιμέρους αξόνων με μειωμένη ταχύτητα.

ii. Test mode:

Η εκτέλεση ενός προγράμματος σε test mode προϋποθέτει την επιτυχή δημιουργία και εκτέλεση του προγράμματος (προσομοίωση) σε manual mode. Εφόσον, πληρείται η συγκεκριμένη προϋπόθεση, το πρόγραμμα πρέπει να εκτελεστεί και σε κανονική ταχύτητα λειτουργίας. Πιθανότατα, ο χρήστης να απαιτείται να βρίσκεται εντός του προστατευτικού κιγκλιδώματος, για λόγους βελτιστοποίησης της συγκολλητικής πορείας. Επομένως, η διάταξη οφείλει να τεθεί σε test mode. Όπως προαναφέρθηκε, οι οδηγοί ενεργοποιούνται και διατηρούνται ενεργοί με το συνεχές πάτημα ενός, εκ

των δυο επιτρεπτικών διακοπών (3.3.1.12). Εάν, λοιπόν, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος, προκύψει πρόβλημα ή σφάλμα στη διαδικασία, η απελευθέρωση του προαναφερθέντος διακόπτη, θα βοηθήσει στην άμεση διακοπή του προγράμματος και στη προσωρινή διακοπή λειτουργίας των οδηγών της διάταξης.

iii. Automatic mode:

Απαραίτητη προϋπόθεση εκτέλεσης ενός προγράμματος σε automatic mode, συνιστά η επιτυχής εκτέλεση του, στους δυο προγενέστερους τρόπους λειτουργίας (manual & test mode). Αν ο συγκεκριμένος τρόπος καταστεί ενεργοποιηθείς, ενεργοποιείται και η λογική ασφαλείας της διάταξης. Το πρόγραμμα, πλέον, εκτελείται σε πλήρη ταχύτητα εργασιών. Σε περίπτωση παρουσίας αντικειμένου, εντός του προστατευτικού κιγκλιδώματος, οι οδηγοί απενεργοποιούνται αυτόματα συνοδευόμενοι από διακοπή του προγράμματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τα κουμπιά START1 έως START6 της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας είναι λειτουργικά, μόνο σε automatic mode.

3.3.2.3. Bypass key switch - Διακόπτης παράκαμψης.

Ο συγκεκριμένος διακόπτης αποτελείται από 3 θέσεις επιλογών με τις ενδείξεις **0**, **I** και **II**. Ο επιτελούμενος ρόλος κάθε θέσης αφορά την απενεργοποίηση συγκεκριμένων συσκευών ασφαλείας της αυτοματοποιημένης διάταξης. Η θέση **I** σχετίζεται με την απενεργοποίηση παραμέτρων του hardware της διάταξης, ενώ η θέση **II** σχετίζεται με την απενεργοποίηση λειτουργικών παραμέτρων του πυρσού συγκόλλησης. Η επιλογή καθίσταται εφικτή με την εισαγωγή κλειδιού.

Θέση I:

Σε γενικότερα πλαίσια, τα όρια του λογισμικού (software limits), καθορίζονται κατά τη διάρκεια κατασκευής και συναρμολόγησης της αυτοματοποιημένης διάταξης. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι κατασκευασμένο, έτσι ώστε να επιτρέπει στους άξονες του ρομποτικού βραχίονα να έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος κινήσεων στο χώρο. Σε πολλές περιπτώσεις, παρατηρείται υπέρβαση αυτού του εύρους, λόγω λανθασμένων κινήσεων, γεγονός, που συνοδεύεται από απενεργοποίηση των drives και εμφάνιση μηνυμάτων σφάλματος στην οθόνη του teach pendant. Υπό κανονικές συνθήκες, τα όρια του hardware⁷ τμήματος της διάταξης, δε θα πρέπει να ξεπερνιούνται. Ωστόσο, αν τύχει και ξεπεραστούν, λόγω ενδεχόμενης εσφαλμένης λειτουργίας συστήματος, οι οδηγοί απενεργοποιούνται ακαριαία. Προκειμένου να ενεργοποιήσουμε τους οδηγούς και να επαναφέρουμε τον ενδιαφερόμενο άξονα στην περιοχή επιτρεπτού εύρους του, χρησιμοποιούμε τη λειτουργία του διακόπτη **I**. Η συγκεκριμένη ενέργεια συντελείται ως εξής: Μετακινούμε το διακόπτη στη θέση **I**⁸, ενώ ταυτόχρονα μετακινούμε τον ενδιαφερόμενο άξονα, εντός της επιτρεπόμενης περιοχής κινήσεων με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (3.3.1.4).

Θέση II:

Για την αποφυγή ζημίας του πυρσού συγκόλλησης, σε περίπτωση σύγκρουσης με το προς συγκόλληση τεμάχιο, έχει ενσωματωθεί στην άρμωση του πυρσού μια γέφυρα αντίστασης. Κατά τη στιγμή ενδεχόμενης επαφής του πυρσού με το τεμάχιο, η πίεση στην άρμωση του πυρσού, θα μεταβάλλει την αντίσταση, την οποία υπολογίζει η

⁷ Επί της ουσίας εννοούνται οι άξονες του βραχίονα και τα όρια κίνησης και περιστροφής του καθενός.

⁸ προσοχή! ο διακόπτης δεν κλειδώνει στις θέσεις I και II, πρέπει να συγκρατείται χειροκίνητα στη θέση του, για όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

προαναφερθείσα γέφυρα και οι οδηγοί θα απενεργοποιηθούν ακαριαία από τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα. Η συγκεκριμένη δικλείδα ασφαλείας απενεργοποιείται με τη βοήθεια της λειτουργίας της θέσης II.

3.3.2.4. **Display & Function keys - Οθόνη και πλήκτρα λειτουργίας.**

Η οθόνη της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας ενημερώνει τον εκάστοτε χειριστή για την κατάσταση λειτουργίας των οδηγών και για σφάλματα, που αφορούν ζητήματα λογικής ασφαλείας. Ακολουθώντας, τα λειτουργικά κλειδιά F1-F6, δίνουν τη δυνατότητα στο χειριστή να αναλύσει τη συνολική κατάσταση της ρομποτικής διάταξης, μέσω ενεργοποίησης συγκεκριμένων μενού και υπό-μενού. Κάθε ένα, εκ των λειτουργικών πλήκτρων, έχει μια ενσωματωμένη λυχνία LED στην αριστερή άνω γωνία του, που μας πληροφορεί για την κατάσταση του πλήκτρου. Όταν η λυχνία είναι σβηστή, το πλήκτρο δεν είναι ενεργοποιημένο και δεν επιτελείται καμία λειτουργία. Όταν είναι αναμμένο, είναι διαθέσιμο κάποιο συγκεκριμένο υπό-μενού. Όταν αναβοσβήνει, το υπό-μενού διατίθεται με επιπρόσθετες σελίδες. Πιο συγκεκριμένα:

Πίνακας 20. Λειτουργίες των F1-F6 Function keys.

Πλήκτρο	Λειτουργία
F1	Μενού βοήθειας
F2	Μενού συντήρησης
F3-F4	Σελιδοποίηση & εμφάνιση μηνυμάτων κατάστασης και σφαλμάτων
F5	Στατιστικό μενού
F6	Επιστροφή στο κύριο μενού

3.3.2.5. **Emergency Stop Button - Κουμπί έκτακτης ανάγκης.**

Το κουμπί έκτακτης ανάγκης, χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον, για την ακαριαία διακοπή της τρέχουσας διαδικασίας. Αυτόματο επακόλουθο της πίεσης του πλήκτρου συνιστά η απενεργοποίηση των οδηγών της διάταξης. Το κουμπί παραμένει κλειδωμένο, όταν βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση και δύναται να απελευθερωθεί με ταυτόχρονη περιστροφή και τράβηγμα (pull turn). Τοποθετείται στη δεξιά κάτω περιοχή της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας.

Όσον αφορά τώρα, τη λογική ασφαλείας (**security logic**), όλα τα στοιχεία ασφαλείας όπως τα πλήκτρα έκτακτης ανάγκης, οι διακόπτες ορίων του hardware τμήματος της διάταξης κλπ. συνδέονται δια μέσου ενός κυκλώματος ασφαλείας, που βρίσκεται στον εγκέφαλο της διάταξης. Η χρήση έκαστου στοιχείου ασφαλείας απαιτεί συγκεκριμένες ενέργειες για επαναφορά των οδηγών σε ενεργή κατάσταση. Ακριβέστερα:

- A. Η πίεση του κουμπιού έκτακτης ανάγκης απενεργοποιεί ακαριαία τους οδηγούς και προκειμένου να επανέλθει το σύστημα στην αρχική-ενεργή κατάσταση απαιτείται:
1. Απελευθέρωση του κουμπιού έκτακτης ανάγκης.
 2. Κατανόηση του εμφανιζόμενου μηνύματος σφάλματος της οθόνης και συνεχής πίεση του κουμπιού STOP για μερικά δευτερόλεπτα.
 3. Ενεργοποίηση των οδηγών με τη βοήθεια του κουμπιού Drives On.

- B.** Σε περίπτωση αδυναμίας εκτέλεσης του προγράμματος, η οποία οφείλεται στο σύστημα ελέγχου της διάταξης (πχ. ένδειξη **watchdog rechner** της οθόνης της εξωτερικής μονάδας) απαιτούνται οι εξής ενέργειες:
1. Πίεση του κουμπιού Drives Off.
 2. Κατανόηση του εμφανιζόμενου μηνύματος σφάλματος της οθόνης και συνεχής πίεση του κουμπιού STOP για μερικά δευτερόλεπτα.
 3. Ενεργοποίηση των οδηγών με τη βοήθεια του κουμπιού Drives On.
- C.** Σε πιθανή περίπτωση υπέρβασης των ορίων των hardware συσκευών της διάταξης, η επαναφορά των οδηγών δύναται να επέλθει ως εξής:
1. Παράκαμψη των επιτρεπόμενων ορίων με τη βοήθεια του διακόπτη (3.3.2.3) παράκαμψης, ο οποίος τοποθετείται στη θέση **I**.
 2. Κατανόηση του εμφανιζόμενου μηνύματος σφάλματος της οθόνης και συνεχής πίεση του κουμπιού STOP για μερικά δευτερόλεπτα.
 3. Ενεργοποίηση των οδηγών με τη βοήθεια του κουμπιού Drives On.

3.4. Θεωρία & Στοιχεία προγραμματισμού της Αυτοματοποιημένης Διάταξης.

3.4.1. Γενικοί κανόνες λειτουργίας.

Κατά τη διάρκεια δημιουργίας και εκτέλεσης των προγραμμάτων συγκόλλησης, ο εκάστοτε χειριστής, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του κάποιους βασικούς κανόνες, οι οποίοι εξασφαλίζουν ομαλή, ασφαλή και επιτυχή αποπεράτωση συγκολλήσεων. Πιο συγκεκριμένα:

- Η πίεση ενός πλήκτρου του χειριστηρίου εκμάθησης & προγραμματισμού και η κατανόηση της εισχώρησης εντολής από τη διάταξη, πραγματοποιείται υπό τη μορφή ακουστικού ή οπτικού σήματος. Η πίεση κάθε πλήκτρου του pendant, συνοδεύεται από ένα συγκεκριμένο ήχο, ο οποίος υποδηλώνει ότι η εντολή έχει ληφθεί από τον έλεγχο της διάταξης. Επιπροσθέτως, η οθόνη πληροφορεί το χρήστη για περαιτέρω ενέργειες, που πρέπει να ληφθούν σε κάθε βήμα και για το κάθε ενδεχόμενο πλήκτρο.
- Η πρώτη εκτέλεση, όλων των νέων προγραμμάτων, θα πρέπει να γίνεται σε **M** manual mode, όπου οι επιμέρους άξονες κινούνται με μειωμένη ταχύτητα για λόγους ασφαλείας.
- Όπως έχει πρότερα τονιστεί, η πίεση του πλήκτρου **PROC** (3.3.1.5), καθιστά ενεργή ή ανενεργή τη μονάδα ισχύος της συγκόλλησης. Όταν η λυχνία του PROC είναι αναμμένη, εξασφαλίζεται η επικοινωνία μεταξύ του ελέγχου της διάταξης και της μονάδας παροχής ισχύος και δύναται να γίνει συγκόλληση τεμαχίων. Αντιθέτως, όταν είναι σβηστή, δεν υφίσταται επικοινωνία και δεν επιτυγχάνεται συγκόλληση. Κατά την εκκίνηση του συστήματος, το πλήκτρο PROC είναι πάντα ενεργοποιημένο. Επομένως, συνιστάται η απενεργοποίηση του, κατά τη διάρκεια δημιουργίας ενός προγράμματος για λόγους αποφυγής ατυχημάτων. Όταν πλέον, το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί χωρίς σφάλματα σε **M** mode, μπορούμε να ενεργοποιήσουμε το PROC.
- Η ενεργοποίηση των οδηγών, μετά από ενδεχόμενη απενεργοποίηση απαιτεί την πίεση συγκεκριμένων πλήκτρων, (STOP, Drives On, Drives Off) είτε της

εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας ή του teach pendant (3.3.1.2 & 3.3.2.5) με τη σειρά, που έχει παρατεθεί στα ανωτέρω εδάφια.

3.4.2. Βήματα Μετάβασης & Βήματα Συγκόλλησης.

Η κίνηση των αξόνων της αυτοματοποιημένης διάταξης για την αποπεράτωση μιας συγκολλητικής διαδικασίας αναλύεται σε βήματα. Κάθε επιμέρους κίνηση των αξόνων μεταφράζεται υπό τη μορφή ενός βήματος της συγκολλητικής πορείας. Τα βήματα αυτά, δύναται να είναι δυο τύπων: βήματα μετάβασης (transition steps), ή βήματα συγκόλλησης (welding steps). Τα βήματα μετάβασης είναι πάντα **JOG steps** (3.3.1.8), ενώ τα βήματα συγκόλλησης είναι πάντα **WORK steps**. Η διαδρομή, που ακολουθεί το σημείο TCP όταν εκτελεί ένα βήμα, ξεκινά από την τελική θέση του προηγούμενου βήματος. Η συγκεκριμένη θέση, προφανώς, ταυτίζεται με την αρχική θέση (start position) του τρέχοντος βήματος, ενώ αντίστοιχα η τελική θέση (target position) του τρέχοντος βήματος θα ταυτίζεται με την αρχική του επόμενου βήματος.

3.4.2.1. Βήματα Μετάβασης - Transition steps.

Τα βήματα μετάβασης, αλλιώς γνωστά και ως **JOG steps**, χρησιμοποιούνται για τη μετάβαση του ρομποτικού βραχίονα στην αρχική θέση της ραφής συγκόλλησης καθώς και για την απομάκρυνση του από την τελική θέση της ραφής συγκόλλησης. Ο όρος βήματα μετάβασης, υποδηλώνει το γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης τους δεν λαμβάνει χώρα καμία συγκόλληση. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια δημιουργίας βημάτων μετάβασης, δεν υπεισέρχεται καμία παράμετρος συγκόλλησης. Ωστόσο, τα βήματα JOG μπορούν να προγραμματιστούν, ώστε να εκτελεστούν είτε γραμμικά (linear) ή μη γραμμικά (non-linear). Η γραμμική κίνηση τους, περιλαμβάνει τη κίνηση πολλαπλών αξόνων, ενώ η μη γραμμική τη κίνηση ενός μεμονωμένου άξονα.

Σε γραμμική κίνηση, η αυτοματοποιημένη διάταξη μετατοπίζει τη θέση του σημείου TCP, στη διεύθυνση ενός ευθύγραμμου τμήματος, το οποίο ορίζεται από δυο μεταβατικά σημεία. Τα σημεία αυτά ορίζουν, ουσιαστικά, την εκτέλεση ενός JOG βήματος. Η ταχύτητα κίνησης⁹ του TCP, ορίζεται εντός της σελίδας του JOG βήματος, που προγραμματίζουμε μέσω της οθόνης του teach pendant. Η γραμμική κίνηση του TCP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βήματα JOG και για βήματα WORK.

Όσον αφορά την εκτέλεση μη γραμμικής κίνησης, η διάταξη μετακινεί το σημείο TCP επιλέγοντας τη συντομότερη πιθανή διαδρομή μεταξύ δυο μεταβατικών σημείων. Επομένως, το TCP θα κινηθεί από την αρχική στην τελική θέση συγκόλλησης σε μια καμπύλη γραμμή. Ο χρήστης δεν μπορεί να ορίσει ταχύτητα σε μη γραμμικά βήματα JOG, καθώς η διάταξη μετακινεί αυτόματα το ρομποτικό βραχίονα με τη δυνατότερη πιθανή ταχύτητα. Σε manual mode, ο ρομποτικός βραχίονας κινείται προσεγγιστικά με την υπό-διπλάσια ταχύτητα από ότι σε automatic mode.

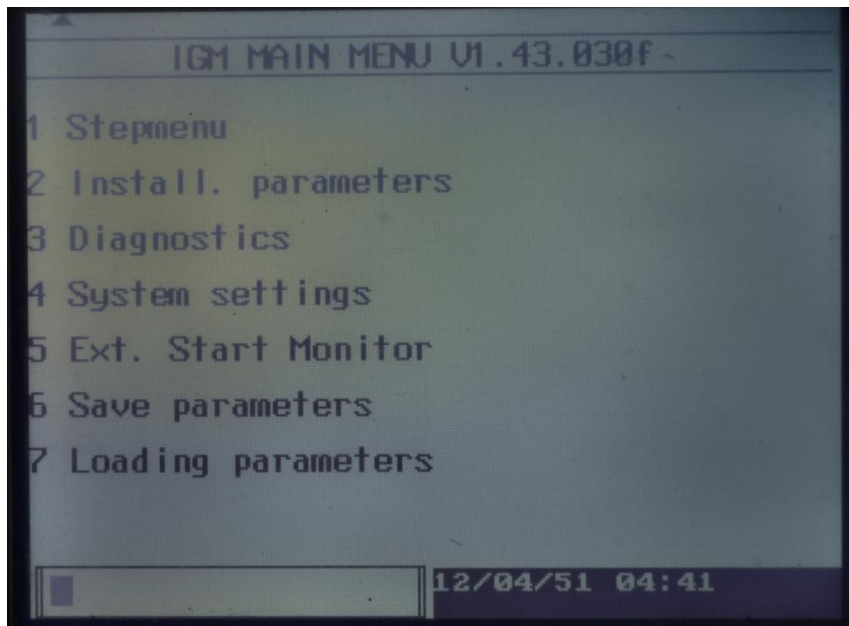
3.4.2.2. Βήματα Συγκόλλησης - Welding steps.

Τα βήματα συγκόλλησης είναι αλλιώς γνωστά ως **WORK steps**. Τα WORK steps διαχωρίζονται σε γραμμικά (linear) και κυκλικά (circular). Η ειδοποιός διαφορά, σε σχέση με τα JOG steps, έγκειται στο γεγονός ότι η διάταξη εκτελεί πάντα συγκόλληση όταν εκτελείται WORK step. Επιπλέον, σε βήματα συγκόλλησης εισάγονται πάντα οι τιμές παραμέτρων, όπως η ένταση του διαρρέοντος ηλεκτρικού ρεύματος, η διόρθωση του μήκους τόξου κλπ. Η εισαγωγή των παραμέτρων γίνεται πάντα στην τελική θέση της ραφής συγκόλλησης.

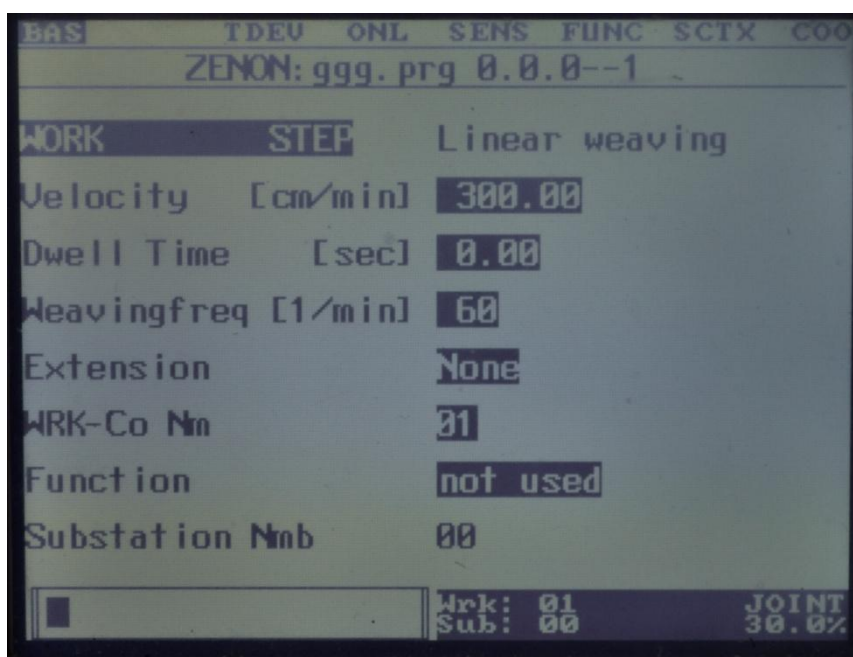
⁹ Μέγιστη δυνατή ταχύτητα 200m/min.

3.4.3. Ιεραρχία δομής παραθύρων.

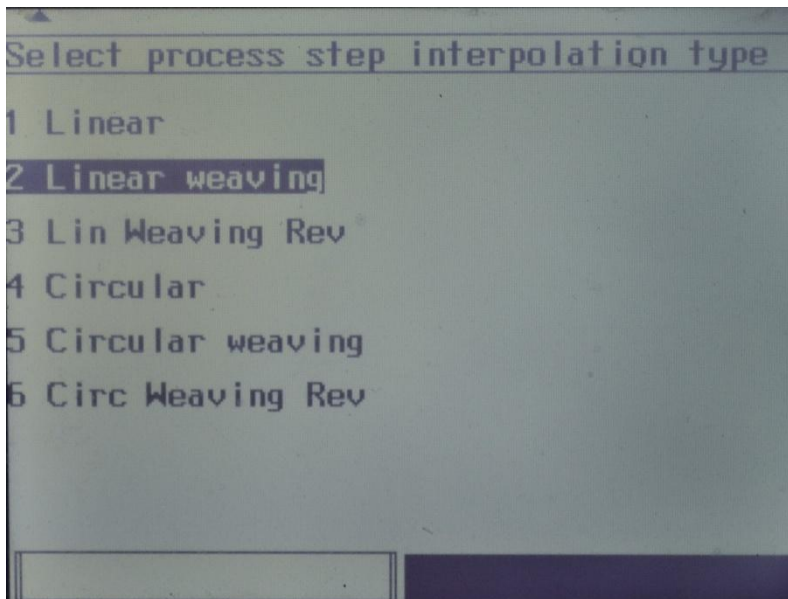
Ο όρος "ιεραρχία δομής παραθύρων" χρησιμοποιείται για να περιγράψει με πλήρη τρόπο, τις διαφορετικές μορφές καταλόγων επιλογής (menu), τους οποίους δύναται να συναντήσει ο χρήστης του teach pendant. Ο όρος διασαφηνίζεται με καλύτερο τρόπο, υπό το εξής παράδειγμα 3 επιπέδων:



Εικόνα 3.10 Κύριο μενού της διάταξης IGM - Επίπεδο 1^ο.



Εικόνα 3.11 Μενού βήματος WORK, σελίδα BAS - Επίπεδο 2^ο.



Εικόνα 3.12 Υπό-μενού του μενού βήματος WORK- Επίπεδο 3°.

Η ενεργοποίηση των επιμέρους υπό-μενού, όπως πχ. του παραδείγματος της εικόνας 3.12, γίνεται με τη βοήθεια των αντίστοιχων **softkeys** (3.3.1.11), ή με τα πλήκτρα FUNC3 και FUNC4 (3.3.1.9). Με τη βοήθεια, σε ακόλουθη φάση του πλήκτρου ESC, η διάταξη επαναφέρει στην οθόνη του teach pendant, το αμέσως προηγούμενο μενού. Η διαδικασία συνεχίζεται, μέχρι να επανέλθουμε σε μενού βήματος JOG, WORK ή AUX. Η επαναφορά στο κύριο-αρχικό μενού επιτυγχάνεται αποκλειστικά, με πίεση του πλήκτρου MAIN MENU του teach pendant.

3.4.4. Κύριοι κατάλογοι επιλογής (Μενού).

3.4.4.1. Το κύριο μενού - Main menu.

Κατά την εκκίνηση λειτουργίας της αυτοματοποιημένης διάταξης, το πρώτο μενού, το οποίο εμφανίζεται στην οθόνη του χειριστηρίου προγραμματισμού είναι αυτό της εικόνας 3.10 . Ο συγκεκριμένος κατάλογος επιλογών αποτελεί την εναρκτήρια θέση για οποιαδήποτε προγραμματιστική ενέργεια, που ακολουθεί. Ο κατάλογος καλείται, ανά πάσα στιγμή, στην οθόνη του teach pendant με τη βοήθεια του πλήκτρου MAIN MENU. Το παρόν μενού περιέχει τις εξής επιλογές:

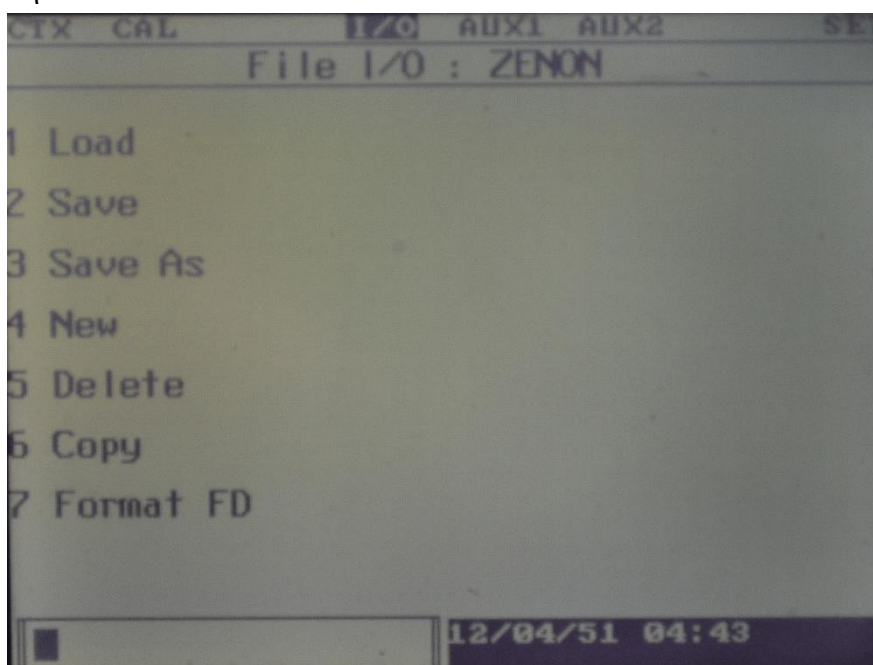
1. **Step Menu:** Ενεργοποιεί τα μενού βήματος (step menu/εικόνα 3.11), ενώ δίνει παράλληλα τη δυνατότητα στο χρήστη να ξεκινήσει τον προγραμματισμό της διάταξης. Η κίνηση των επιμέρους αξόνων μπορεί να επιτευχθεί ,μόνο, μετά από ενεργοποίηση του συγκεκριμένου μενού.
2. **Installation Parameters:** Η πρόσβαση στο συγκεκριμένο μενού απαιτεί κωδικό. Το μενού δεν παρουσιάζει χρησιμότητα για τη λειτουργία της διάταξης.
3. **Diagnose:** Μενού ανάλυσης της κατάστασης και των προβλημάτων της διάταξης.
4. **System Utilities:** Καθορισμός γλώσσας, χρόνου και εισαγωγή κωδικού.
5. **Ext. Start Monitor:** Παρουσιάζει προκαθορισμένες ρυθμίσεις για εξωτερικούς άξονες.
6. **Save Parameter:** Αποθηκεύει τρέχουσες παραμέτρους της διάταξης, στο σκληρό δίσκο.
7. **Load Parameter:** Φορτώνει παραμέτρους του σκληρού δίσκου, στη προσωρινή μνήμη συστήματος.

Σε γενικά πλαίσια, από τις ανωτέρω επιλογές, χρησιμότητα για τον εκάστοτε χρήστη, παρουσιάζει μόνο η επιλογή Step menu. Οι υπόλοιπες αφορούν κυρίως, εκπαιδευμένο προσωπικό συντήρησης του εξοπλισμού και δεν σχετίζονται με άμεσες διαδικασίες δημιουργίας προγραμμάτων συγκόλλησης.

3.4.4.2. Μενού βήματος - Step menu.

Service menu: Το συγκεκριμένο μενού χρησιμοποιείται, όταν δεν έχει ενεργοποιηθεί κανένα πρόγραμμα. Επιλέγοντας το step menu, δηλαδή και χωρίς κανένα πρόγραμμα εν ενεργεία εμφανίζεται το παρόν μενού. Επιμέρους ενέργειες, όπως βαθμονόμηση των αξόνων και δημιουργία προγραμμάτων, ενεργοποιούνται εφόσον έχουμε πρώτα επιλέξει το συγκεκριμένο μενού.

Station menu: Έχοντας ακολουθήσει την επιλογή *step menu* του *main menu*, και πιέζοντας το πλήκτρο FUNC4, ο χρήστης εισάγεται στο **station menu**. Αποτελείται από διάφορες σελίδες, οι οποίες μπορούν να επιλεγούν με τη βοήθεια των πλήκτρων σελίδας (3.3.1.7) από το πεδίο menu page field (3.3.1.1). Πιο αναλυτικά, παρατίθεται η ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 3.13 Σελίδα I/O του Station menu.

Όπως παρατηρείται, το station menu αποτελείται από τις σελίδες **CTX**, **CAL**, **I/O**, **AUX1**, **AUX2** και **SET**. Η εκάστοτε επιλεγμένη σελίδα του μενού, επισημαίνεται με μαύρο χρώμα. Όλες οι σελίδες, πλην της **I/O**, παρουσιάζουν μηδαμινή χρησιμότητα για τις συγκολλητικές διαδικασίες. Συνοπτικά, ισχύουν οι παρατιθέμενες πληροφορίες του εδάφιου 3.3.1.9. Συγκεκριμένα για την σελίδα I/O ισχύουν:

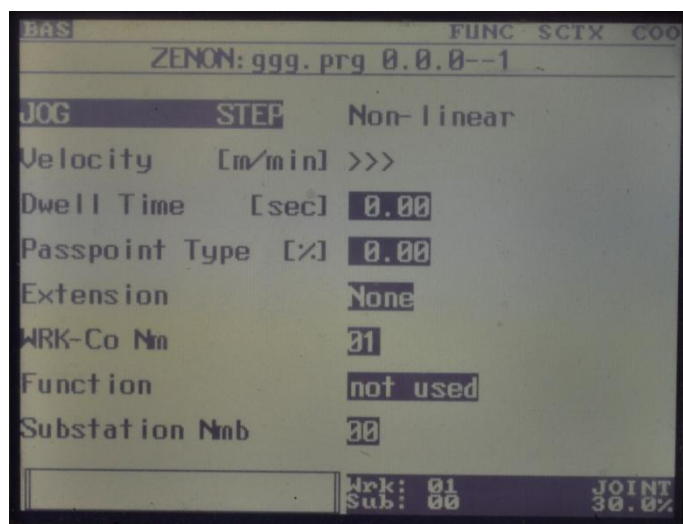
Σελίδα I/O: Η σελίδα I/O (File In-Out) του μενού FUNC4 ενεργοποιείται από το πλήκτρο σελίδας 4. Περιέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες, που αφορούν φόρτωση μεταφορά, αποθήκευση και διαγραφή αρχείων από και προς το σκληρό δίσκο και την προσωρινή μνήμη. Η αποθήκευση των προγραμμάτων καθίσταται αναγκαία, λόγω απώλειας δεδομένων, σε περίπτωση ηλεκτρικής βλάβης. Οι επιλογές, που παρέχει η συγκεκριμένη σελίδα είναι: (εικόνα 3.13)

1. **Load:** Η συγκεκριμένη εντολή φορτώνει ένα πρόγραμμα από το σκληρό δίσκο ή τη δισκέτα στη μνήμη του συστήματος. Η διαδικασία συντομεύεται με τη βοήθεια του συνδυασμού 2nd + L.
2. **Save:** Αποθηκεύει ένα πρόγραμμα από τη μνήμη συστήματος στο σκληρό δίσκο ή τη δισκέτα. Η συντόμευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με το συνδυασμό 2nd + S. Το πλήκτρο FUNC2 αποθηκεύει το τρέχον πρόγραμμα **μόνο** στο σκληρό δίσκο.
3. **Save As:** Αποθηκεύει ένα πρόγραμμα με διαφορετικό όνομα στο σκληρό δίσκο ή τη δισκέτα. Επιτυγχάνεται με εισαγωγή του ονόματος του τρέχοντος προγράμματος στο πεδίο επεξεργασίας (edit field) και με την επακόλουθη πίεση του πλήκτρου FUNC2.
4. **New:** Ξεκινά τη δημιουργία νέου προγράμματος. Η συντόμευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με το συνδυασμό 2nd + N.
5. **Delete:** Διαγράφει ένα πρόγραμμα είτε από τη μνήμη, είτε από το σκληρό δίσκο ή από τη δισκέτα. Η συντόμευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με το συνδυασμό 2nd + D.
6. **Copy:** Αντιγράφει ένα πρόγραμμα. Η επιλογή δεν είναι διαθέσιμη για την έκδοση λογισμικού της παρούσης αυτοματοποιημένης διάταξης.
7. **Format:** Διαμορφώνει τη δισκέτα και διαγράφει όλες τις υπάρχουσες πληροφορίες, που εμπεριέχονται σε αυτή.

Η επιλογή της κάθε ενέργειας επιτυγχάνεται με το αντίστοιχο soft key (3.3.1.11). Με τη βοήθεια μηνυμάτων, το teach pendant πληροφορεί το χρήστη για τις απαραίτητες ενέργειες, που πρέπει να εκτελεστούν. Ωστόσο σε περιπτώσεις φόρτωσης, διαγραφής και αποθήκευσης προγράμματος, προϋποτίθεται η επισήμανση του ονόματος του προγράμματος με το αντίστοιχο soft key.

3.4.4.3. Μενού βημάτων JOG - JOG menu.

Όπως έχει αναφερθεί στα εδάφια 3.3.1.8 και 3.4.2.1 ,κατά την εκτέλεση των JOG βημάτων δεν λαμβάνει χώρα καμία συγκόλληση. Το JOG menu αποτελείται από 4 σελίδες (BAS, FUNC, SCTX και COO), κάθε μια από τις οποίες επιλέγεται από ένα αντίστοιχο πλήκτρο σελίδας (3.3.1.7). Η ακόλουθη εικόνα 3.14 απεικονίζει τη μορφή του JOG menu:



Εικόνα 3.14 Απεικόνιση του JOG menu.

Μέσω της σελίδας BAS του JOG menu, μπορούμε να προγραμματίσουμε γραμμικά ή μη γραμμικά βήματα JOG. Η αντίστοιχη θεωρία έχει παρατεθεί αναλυτικά στο εδάφιο 3.4.2.1 . Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι σελίδες FUNC, SCTX και COO δε χρήζουν

τροποποίησης από το χρήστη στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Τα στοιχεία επιλογής (menu items) του μενού JOG, τα οποία φαίνονται και στην εικόνα 3.14 επιτελούν τις εξής λειτουργίες:

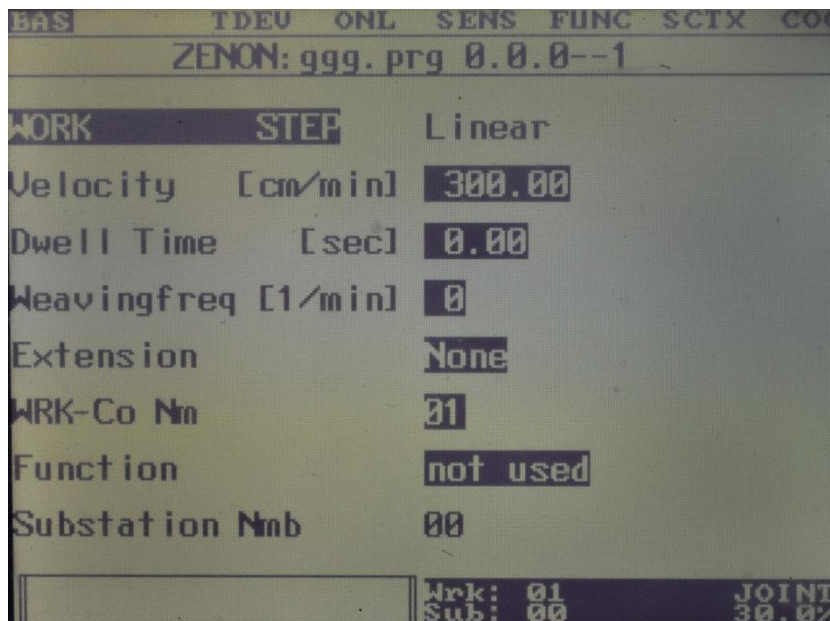
- 1. JOG step:** Επιλογή γραμμικής ή μη γραμμικής κίνησης του πυρσού συγκόλλησης με τη βοήθεια του soft key 1. Μεταξύ 2 μεταβατικών σημείων, το πιστόλι κινείται γραμμικά για τη επιλογή *Linear*, ενώ διαγράφει τη συντομότερη διαδρομή για την επιλογή *Non-Linear*.
- 2. Velocity:** Η ταχύτητα κίνησης των αξόνων, για μη γραμμικά βήματα JOG, δε μπορεί να προγραμματιστεί. Ωστόσο, η ταχύτητα εκτέλεσης των μη γραμμικών κινήσεων δύναται να ρυθμιστεί σε αργή (manual mode) ή σε κανονική (automatic mode) με τη βοήθεια του διακόπτη επιλογής λειτουργίας της εξωτερικής μονάδας (3.3.2.2). Αντιθέτως, η ταχύτητα των γραμμικών βημάτων JOG μπορεί, εύκολα, να προγραμματιστεί με τη βοήθεια του soft key 2. Εισάγουμε την επιθυμητή ταχύτητα στο πεδίο επεξεργασίας (edit field)· μέχρι 200 m/min· και έπειτα με τη βοήθεια του soft key 2, καταχωρούμε την τιμή στο menu item 2, δηλαδή το στοιχείο velocity.
- 3. Dwell time:** Ως χρόνος καθυστέρησης ορίζεται, ο χρόνος κατά τον οποίο το TCP, καθυστερεί στο αρχικό μεταβατικό σημείο του ενδιαφερόμενου βήματος JOG, ως ότου να μετακινηθεί στο τελικό μεταβατικό σημείο του. Ο χρόνος εισάγεται σε μονάδες δευτερολέπτων από το πληκτρολόγιο του teach pendant και με τη βοήθεια του soft key 3, η τιμή καταχωρείται στο menu item 3, δηλαδή το στοιχείο dwell time.
- 4. Passpoint type:** Η τεχνική Passpoint χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό ομαλότερων κινήσεων των αξόνων και συντομότερων χρόνων μετάβασης για JOG βήματα. Επιτυγχάνεται μέσω μιας λογικής, συνύφανσης, του τελικού σημείου του τρέχοντος βήματος JOG και του αρχικού σημείου του ακόλουθου βήματος JOG.
- 5. Extension:** Οι επεκτάσεις αποτελούν υπό-μενού του μενού JOG. Η συγκεκριμένη εντολή ενεργοποιείται με πίεση του soft key 5. Παρέχουν εναλλακτικές λειτουργίες εντός του μενού JOG. Η προκαθορισμένη τιμή του παρόντος στοιχείου πεδίου είναι **None**. Από το συγκεκριμένο υπό-μενού, μπορούμε να εισάγουμε weaving points, reference points, συγκολλητικές ακολουθίες (WeldSequDef) κλπ. στοιχεία, που θα αναφερθούν σε ακόλουθες παραγράφους.
- 6. Function & Substation Nmb:** Λειτουργίες, οι οποίες δεν τροποποιούνται από τον χρήστη στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

3.4.4.4. Μενού βημάτων WORK - WORK menu.

Τα βήματα WORK συνοδεύονται πάντα από εκτέλεση συγκολλητικής διαδικασίας. Σε αντίθεση με τα μη γραμμικά βήματα μετάβασης, τα βήματα συγκόλλησης είναι είτε γραμμικά ή κυκλικά. Επομένως, συνάγεται ότι το σημείο TCP, θα κινείται είτε σε γραμμική διαδρομή ή σε κυκλική. Το πεδίο menu page field του Work menu, περιέχει 7 σελίδες, η διαμόρφωση των οποίων, αναλύεται εκτενέστερα με τη βοήθεια της 3.15 εικόνας. Εισαγωγική θεωρία έχει παρατεθεί στο κεφάλαιο 3.4.2.2 .

A. Σελίδα BAS του WORK menu:

Ενεργοποιείται με τη βοήθεια του πλήκτρου σελίδας Page key 1 από το Work menu.



Εικόνα 3.15 Σελίδα BAS του WORK menu.

Τα στοιχεία επιλογής της ανωτέρω εικόνας αναλύονται ως εξής:

1. **WORK step:** Το συγκεκριμένο στοιχείο της σελίδας BAS, δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή να επιλέξει το είδος του βήματος WORK. Με άλλα λόγια, επιλέγει αν το βήμα συγκόλλησης θα εκτελεστεί γραμμικά, γραμμικά κυματοειδή, κυκλικά, κυκλικά κυματοειδή κλπ. Συγκεκριμένα, οι επιλογές που περιέχει είναι:
 - **Linear:** Ένα γραμμικό βήμα συγκόλλησης είναι ένα βήμα, που εκτελείται σε ευθύγραμμη ραφή από ένα καθορισμένο σημείο έναρξης, σε ένα καθορισμένο τελικό σημείο. Για τον προγραμματισμό ενός τέτοιου βήματος, απαιτείται επίσης η εισαγωγή παραμέτρων συγκόλλησης από τη σελίδα TDEV του Work menu.
 - **Linear Weaving:** Η γραμμικά κυματοειδής κίνηση χαρακτηρίζεται από εγκάρσια ταλάντωση του σημείου TCP¹⁰, εκατέρωθεν μιας διαμήκου γραμμικής ραφής. Πέραν των παραμέτρων συγκόλλησης, οι οποίες πρέπει να εισαχθούν στη σελίδα TDEV, εισάγονται τουλάχιστον 2 σημεία κυματοειδούς κίνησης **weaving points**, καθώς και η συχνότητα ταλάντωσης της κυματοειδούς κίνησης. Επιπρόσθετη εμβάθυνση, θα παρατεθεί σε ακόλουθο κεφάλαιο.
 - **Linear Weaving Reverse:** Η συγκεκριμένη εντολή χρησιμοποιείται για βήματα εκτέλεσης με περισσότερα από 2 σημεία κυματοειδούς κίνησης (**weaving points**).
 - **Circular:** Η συγκεκριμένη επέκταση χρησιμοποιείται για βήματα συγκόλλησης, στα οποία η ραφή, έχει κυκλική διεύθυνση. Η κυκλική διεύθυνση μεταφράζεται είτε υπό τη μορφή πλήρους κύκλου, είτε υπό τη μορφή ημικυκλίου ή υπό τη μορφή οποιουδήποτε κυκλικού τόξου. Για πλήρη κύκλο, απαιτείται καταχώρηση ενός εναρκτήριου σημείου θέσης και 3 ακόμη σημείων θέσης, πάνω στην τροχιά του κύκλου. Για οποιαδήποτε άλλη μορφή κυκλικού τόξου, απαιτούνται, τουλάχιστον, ένα εναρκτήριο σημείο θέσης και 2 σημεία θέσης, πάνω στην τροχιά του κύκλου.
 - **Circular Weaving:** Λειτουργία παρόμοια με την απλή weaving, με μόνη διαφορά ότι εκτελείται σε κυκλική διεύθυνση.
 - **Circular Weaving Reverse:** Λειτουργία παρόμοια με την αντίστοιχη γραμμική, με τη μόνη διαφορά, ότι εκτελείται σε κυκλική διεύθυνση.

¹⁰ Ουσιαστικά, του πυρσού συγκόλλησης.

2. **Velocity:** Η ταχύτητα του TCP, όταν εκτελείται το βήμα συγκόλλησης, σε cm/min. Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα, που μπορεί να επιδεχθεί ως τιμή εισχώρησης είναι 999 cm/min. Η ταχύτητα εισάγεται μέσω του πληκτρολογίου, στο πεδίο επεξεργασίας και καταχωρείται στο στοιχείο velocity με τη βοήθεια του soft key 2.
3. **Dwell time:** Εφόσον ο πυρσός μετακινηθεί στην αρχική θέση της συγκολλητικής ραφής, θα καθυστερήσει για το χρονικό διάστημα, που του έχουμε εισάγει. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου καθυστέρησης, το ρομπότ θα εκτελεί συγκόλληση **σημειακά**. Εφόσον, λοιπόν, επέλθει αυτό το χρονικό διάστημα καθυστέρησης, θα συνεχίσει να συγκολλά, μετακινούμενο όμως, παράλληλα κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης και προς το τελικό σημείο, που την ορίζει.
4. **Weaving frequency:** Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει τη συχνότητα, με την οποία ταλαντώνεται ο βραχίονας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα έστω ότι ορίζουμε δυο σημεία κυματοειδούς κίνησης, τα σημεία 1 και 2. Η παράμετρος εκφράζει το πόσες φορές, εντός ενός λεπτού, το TCP μετακινείται από το σημείο κυματοειδούς κίνησης 1 στο επόμενο σημείο κυματοειδούς κίνησης 1.
5. **Extension:** Η ενεργοποίηση αυτού του υπό-μενού επιτυγχάνεται με πίεση του πλήκτρου soft key 5 της σελίδας BAS. Οι επιλογές, που παρέχονται αφορούν την εκτέλεση συγκολλητικών ακολουθιών (**Welding Sequences**) και είναι οι εξής:
 - **None:** Καμία επέκταση.
 - **Multilayer Root:** Αφορά το πρωταρχικό πέρασμα (ρίζα) για συγκολλήσεις με πολλαπλά περάσματα.
 - **Cover Pass:** Αφορά τα περάσματα επικάλυψης (cover passes) συγκολλήσεων πολλαπλών περασμάτων.
 - **Cover Pass Reverse:** Αφορά τον προγραμματισμό περάσματος επικάλυψης, για συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων. Το τρέχον πέρασμα, θα εκτελεστεί με αντίθετη κατεύθυνση.
 - **Welding Seq Call:** Αφορά την κλήση μιας ακολουθίας συγκολλήσεων από ένα πρόγραμμα βιβλιοθήκης.¹¹
6. **Work Coordinate Number:** Αφορά την επιλογή συγκεκριμένου συστήματος συντεταγμένων. Παρουσιάζει μηδαμινή χρησιμότητα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
7. **Substation Nmb & Function:** Επιπρόσθετες, βοηθητικές λειτουργίες με ελάχιστη χρησιμότητα στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας (πχ. εισαγωγή πλάτους ταλάντωσης σημείων κυματοειδούς κίνησης).

B. Σελίδα TDEV του WORK menu:

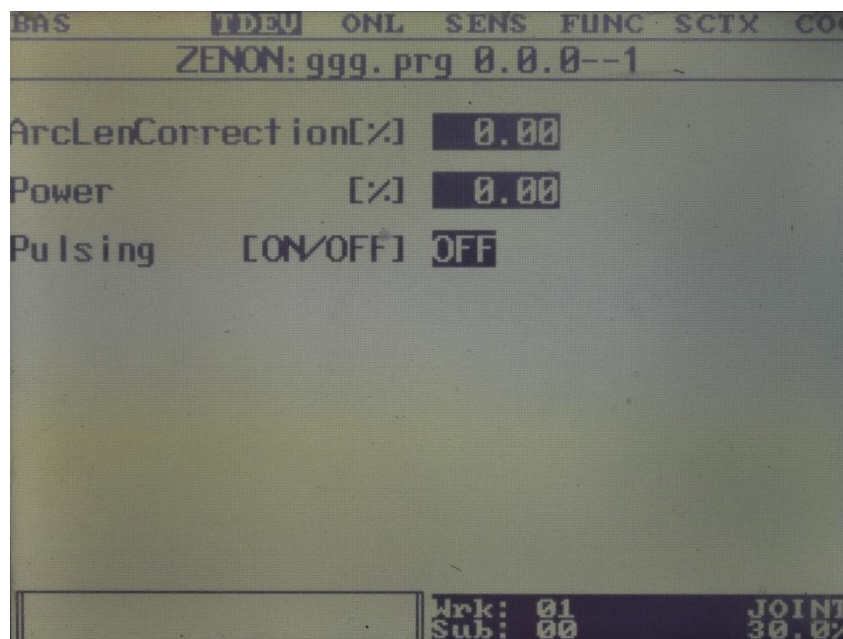
Η σελίδα του TDEV (Technology Device) menu, χρησιμοποιείται για την εισαγωγή παραμέτρων, απαραίτητων για κάθε συγκολλητική διαδικασία. Η παρούσα σελίδα, δύναται να διαφέρει για διαφορετικές μηχανές παροχής ισχύος. Όπως διαφαίνεται και στην εικόνα 3.16, οι κυριότερες συνιστώσες της σελίδας είναι οι εξής:

Arc Length Correction (%): Βοηθά στη διόρθωση της τάσης τόξου, διατηρώντας την ίδια ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου. Ο διορθωτικός συντελεστής, εισάγεται σε % ποσοστό. Το μέγιστο εισαχθέν ποσοστό ανέρχεται στο 20%.

Power: Καθορίζει την ισχύ συγκόλλησης, ως ποσοστό της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος, που μπορεί να παρέχει η εκάστοτε μηχανή συγκόλλησης. Ο καθορισμός της ισχύος, καθορίζει αυτόματα και την τάση τόξου και την παροχή ηλεκτροδίου.

¹¹ Προγράμματα με επέκταση lib. Πχ. test.lib

Pulsing [ON/OFF]: Ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί, τη λειτουργία παλμικού τρόπου συγκόλλησης.



Εικόνα 3.16 Σελίδα TDEV του WORK menu.

3.4.5. Προγραμματισμός γραμμικού βήματος συγκόλλησης - Linear WORK step programming.

Το παρατιθέμενο υποκεφάλαιο εξηγεί, πλήρως, τη διαδικασία δημιουργίας και αποθήκευσης ενός βήματος συγκόλλησης, εντός της δομής ενός προγράμματος. Τα πρώτα βήματα ενός προγράμματος, είναι πάντα βήματα μετάβασης (transition steps - JOG steps)· γεγονός εύλογο, εφόσον ο βραχίονας πρέπει να οδηγηθεί με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (3.3.1.4) στην επιθυμητή αρχική θέση της ραφής συγκόλλησης. Συνεπώς, αφότου αποθηκεύσουμε, με τη βοήθεια του πλήκτρου ADD (3.3.1.8), τα αρχικά βήματα μετάβασης ακολουθούμε την εξής διαδικασία ενεργειών:

- I. Πιέζουμε το πλήκτρο JOG/WORK/AUX του χειριστηρίου εκμάθησης (pendant), με σκοπό να αλλάξουμε τον τύπο του προγραμματισθέντος βήματος, από JOG step σε WORK step. Φροντίζουμε να επιβεβαιώσουμε, οπτικά, την αλλαγή του τύπου βήματος, μέσω του στοιχείου επιλογής 1 (menu item 1), της σελίδας του WORK menu.
- II. Με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (manual control keys/3.3.1.4) κινούμε τους επιμέρους άξονες, έτσι ώστε ο βραχίονας να μετακινηθεί, μέχρι την τελική θέση της ραφής συγκόλλησης. Όπως έχει προαναφερθεί, τα βήματα WORK εκτελούνται μόνο γραμμικά ή σε κυκλική διεύθυνση. Οπότε άσχετα με την επιλογή του τρόπου κίνησης των αξόνων (**Joint** ή **World**), ο οποίος καθορίζεται από τα πλήκτρα τύπου MODE (3.3.1.3), ο βραχίονας θα κινηθεί γραμμικά! στη διεύθυνση που ορίζουν τα σημεία αρχικής και τελικής θέσης του πυρσού συγκόλλησης.
- III. Εισάγεται η επιθυμητή ταχύτητα συγκόλλησης (velocity) σε cm/min, το χρονικό διάστημα καθυστέρησης (dwell time) σε sec και πιθανώς η επέκταση (extension) του βήματος, η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για τη διαμόρφωση ακολουθιών συγκόλλησης (Welding Sequence). Η εισαγωγή των τιμών γίνεται στο πεδίο επεξεργασίας (edit field) με τη βοήθεια του πληκτρολογίου του χειριστηρίου

εκμάθησης και προγραμματισμού. Η καταχώρηση των τιμών επιτυγχάνεται με την πίεση του αντίστοιχου soft key της οθόνης.

- IV. Με πίεση, ακολούθως, του πλήκτρου σελίδας 3 (page key 3/3.3.1.7) εισερχόμαστε στη σελίδα TDEV, προκειμένου να καθορίσουμε τις συγκολλητικές παραμέτρους του βήματος. Επομένως, εισάγουμε στο πεδίο επεξεργασίας την τιμή του ρεύματος συγκόλλησης, ως ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος της μηχανής και την καταχωρούμε με την πίεση του πλήκτρου soft key 2. Ομοίως πράττουμε και για την τάση τόξου και την ενεργοποίηση της παλμικής λειτουργίας συγκόλλησης. Η καταχώρηση των τιμών, αυτών των παραμέτρων, γίνεται με χρήση των πλήκτρων soft key 1 και soft key 3 αντίστοιχα. Πιέζουμε το πλήκτρο σελίδας 1 (Page key 1) και επανερχόμαστε στην αρχική σελίδα BAS του Work menu.
- V. Τέλος, έχοντας πρότερα ελέγξει τη συνολική διαμόρφωση του βήματος, πιέζουμε το πλήκτρο ADD, για να καταχωρήσουμε - αποθηκεύσουμε το βήμα στη δομή του τρέχοντος προγράμματος.

Με παρόμοιο τρόπο, μπορούμε να προγραμματίσουμε πολλαπλά διαδοχικά βήματα γραμμικής συγκόλλησης.

3.4.6. Προγραμματισμός γραμμικού κυματοειδούς βήματος συγκόλλησης - Linear Weaving WORK step programming.

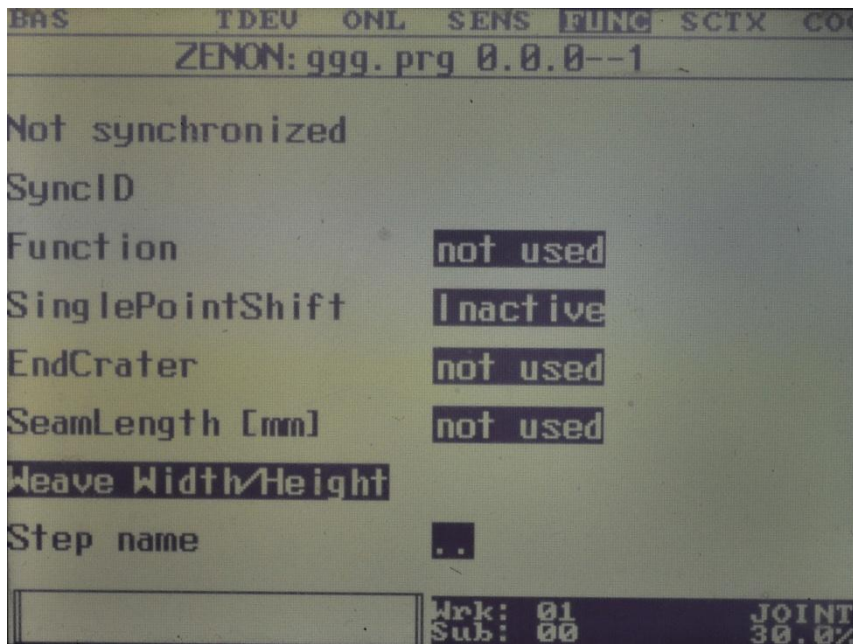
Το παρατιθέμενο εδάφιο αναλύει, σε πλήρη βαθμό, τη διαδικασία δημιουργίας κι ενσωμάτωσης στη δομή ενός τρέχοντος προγράμματος, ενός κυματοειδούς βήματος συγκόλλησης. Η λειτουργία της κυματοειδούς κίνησης, συσχετίζει την εγκάρσια ταλάντωση του πυρσού συγκόλλησης μεταξύ προγραμματισθέντων σημείων της κυματοειδούς κίνησης (**weaving points**), με την ταυτόχρονη μετακίνηση του πυρσού κατά την έννοια της διαμήκου διεύθυνσης της ραφής συγκόλλησης. Με άλλα λόγια, ο πυρσός ταλαντώνεται, λόγω 2-4 weaving points, εκατέρωθεν της κύριας διεύθυνσης της ραφής συγκόλλησης.

Επιπροσθέτως, απαιτείται ο καθορισμός του αριθμού, του ύψους και του πλάτους των σημείων κυματοειδούς κίνησης. Συνεπώς, αφότου αποθηκεύσουμε τα αρχικά βήματα μετάβασης, που χρησιμεύουν στη μετακίνηση του πιστολιού στην αρχική θέση της ραφής συγκόλλησης, ακολουθούμε την εξής διαδικασία ενεργειών:

- I. Το ουσιαστικότερο βήμα στην εκτέλεση μιας κυματοειδούς κίνησης συγκόλλησης, αποτελεί ο προγραμματισμός των weaving points. Τα προαναφερθέντα σημεία, προγραμματίζονται ως δευτερεύοντα βήματα (**sub steps**) στο εναρκτήριο σημείο της ραφής συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, στη σελίδα BAS του JOG μενού (εικόνα 3.14), πιέζουμε το soft key 1, και ενεργοποιούμε τη λειτουργία Linear για το JOG βήμα. Κατ' αυτό τον τρόπο, ορίζουμε γραμμική κίνηση του TCP από την αρχική θέση συγκόλλησης προς το πρώτο weaving point. Επιπλέον, με πίεση του soft key 5, για το στοιχείο (menu item) Extension, μπορούμε να επιλέξουμε μια επιπρόσθετη λειτουργία για το τρέχον βήμα. Από το υπό-μενού, που εμφανίζεται μας ενδιαφέρει η δεύτερη επιλογή, που αναγράφει **Weaving Point**. Επιλέγοντας την, λοιπόν, με τη βοήθεια του soft key 2, το υπό μενού εξαφανίζεται και επανερχόμαστε στην αρχική σελίδα BAS του JOG μενού (εικόνα 3.14). Η πίεση του πλήκτρου **ADD** θα εισάγει στη δομή του προγράμματος το συγκεκριμένο **JOG sub step**. Η διάταξη, έχει πλέον κατανοήσει, από το χρήστη και υπό τη μορφή υπό-βήματος, την εισαγωγή ενός σημείου κυματοειδούς κίνησης. Η παρατιθέμενη διαδικασία εκτελείται ισάριθμες φορές με τον αριθμό των weaving points. Πχ. για συγκόλληση με 2 σημεία κυματοειδούς κίνησης, η ανωτέρω ακολουθία ενεργειών

- θα εκτελεστεί συνολικά 2 φορές. Θα προστεθούν, δηλαδή, 2 JOG υπό- βήματα στη δομή του τρέχοντος προγράμματος.
- II. Έπειτα, πιέζουμε το πλήκτρο JOG/WORK/AUX του χειριστηρίου εκμάθησης (pendant), με σκοπό να αλλάξουμε τον τύπο του προγραμματισθέντος βήματος, από JOG step σε WORK step. Σε αυτή τη φάση, επιθυμούμε τον προγραμματισμό του βήματος εκτέλεσης της κυματοειδούς κίνησης του πυρσού. Φροντίζουμε να επιβεβαιώσουμε, οπτικά, την αλλαγή του τύπου βήματος, μέσω του στοιχείου επιλογής 1 (menu item 1), της σελίδας του WORK menu.
 - III. Με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (manual control keys/3.3.1.4) κινούμε τους επιμέρους άξονες, έτσι ώστε ο βραχίονας να μετακινηθεί, μέχρι την τελική θέση της ραφής συγκόλλησης. Τα βήματα WORK κυματοειδούς κίνησης, εκτελούνται είτε γραμμικά (linear weaving) ή κυκλικά (Circular weaving). Οπότε άσχετα με την επιλογή του τρόπου κίνησης των αξόνων (**Joint** ή **World**), ο οποίος καθορίζεται από τα πλήκτρα τύπου MODE (3.3.1.3), πρέπει να λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι, ο βραχίονας θα κινηθεί γραμμικά! στη διεύθυνση της ραφής, που του έχουμε ορίσει.
 - IV. Ακολουθώντας, πιέζοντας το πλήκτρο soft key 1, για το στοιχείο WORK step εμφανίζεται το υπό-μενού της εικόνας 3.12. Από τις παρεχόμενες επιλογές, μας ενδιαφέρει η δεύτερη στη σειρά, η οποία αναγράφει **Linear weaving**. Προσοχή! η συγκεκριμένη επιλογή συντελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση, εκ μέρους της διάταξης, του προγραμματισμού μιας κυματοειδούς κίνησης. Χωρίς τη συγκεκριμένη επιλογή ενεργοποιημένη, δεν δύναται να εκτελεστεί κυματοειδής κίνηση. Οπότε, την ενεργοποιούμε με τη βοήθεια του πλήκτρου soft key 2.
 - V. Εισάγεται η επιθυμητή ταχύτητα συγκόλλησης (velocity) σε cm/min, το χρονικό διάστημα καθυστέρησης (dwell time) σε sec και πιθανώς η επέκταση (extension) του βήματος, η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για τη διαμόρφωση ακολουθιών συγκόλλησης (Welding Sequence). Η εισαγωγή των τιμών γίνεται στο πεδίο επεξεργασίας (edit field) με τη βοήθεια του πληκτρολογίου του χειριστηρίου εκμάθησης και προγραμματισμού. Η καταχώρηση των τιμών επιτυγχάνεται με την πίεση του αντίστοιχου soft key της οθόνης. Μια ουσιαστική διαφορά με το αντίστοιχο στάδιο της διαδικασίας ενός απλού γραμμικού βήματος συγκόλλησης, έγκειται στην ύπαρξη της παραμέτρου της συχνότητας κυματοειδούς κίνησης (**Weaving Frequency**). Όπως έχει σημειωθεί και στο κεφάλαιο 3.4.4.4, η παράμετρος εκφράζει το πόσες φορές, εντός ενός λεπτού, το TCP μετακινείται από το σημείο κυματοειδούς κίνησης 1 στο επόμενο σημείο κυματοειδούς κίνησης 1. Εισάγουμε την επιθυμητή τιμή με το πληκτρολόγιο στο πεδίο επεξεργασίας και την καταχωρούμε με τη βοήθεια του soft key 4.
 - VI. Ομοίως με την § 3.4.5, με πίεση, του πλήκτρου σελίδας 3 (page key 3/3.3.1.7) εισερχόμαστε στη σελίδα TDEV, προκειμένου να καθορίσουμε τις συγκολλητικές παραμέτρους του βήματος. Επομένως, εισάγουμε στο πεδίο επεξεργασίας την τιμή του ρεύματος συγκόλλησης, ως ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος της μηχανής και την καταχωρούμε με την πίεση του πλήκτρου soft key 2. Πράττουμε με τον ίδιο τρόπο, για τις παραμέτρους της τάσεως τόξου και της ενεργοποίησης της παλμικής λειτουργίας συγκόλλησης. Η καταχώρηση των τιμών, αυτών των παραμέτρων, γίνεται με χρήση των πλήκτρων soft key 1 και soft key 3 αντίστοιχα. Πιέζουμε το πλήκτρο σελίδας 1 (Page key 1) και επανερχόμαστε στην αρχική σελίδα BAS του Work menu.
 - VI. Έχοντας, πρότερα, ελέγξει τη συνολική διαμόρφωση του βήματος, πιέζουμε το πλήκτρο ADD, για να καταχωρήσουμε - αποθηκεύσουμε το βήμα στη δομή του τρέχοντος προγράμματος.

VII. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εισαγωγή τιμών κάποιων πιο εξειδικευμένων παραμέτρων της κυματοειδούς κίνησης. Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 3.17, επιλέγεται η σελίδα FUNC του WORK menu με τη βοήθεια του πλήκτρου σελίδας page key 6. Ακολούθως, επιλεγούμε με πίεση του πλήκτρου soft key 7 την εντολή **Weave Width/Height**. Στο υπό-μενού, που εμφανίζεται, ο χειριστής καλείται να εισάγει το ύψος, το πλάτος και τον αριθμό των σημείων της κυματοειδούς κίνησης. Το ύψος μετράται από το σημείο TCP κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, που ορίζει με το προς συγκόλληση τεμάχιο το πιστόλι. Το πλάτος της κυματοειδούς κίνησης, νοείται ως κάθετο στη διεύθυνση της ραφής συγκόλλησης. Επομένως, εισάγονται οι τιμές του συνολικού πλάτους της κυματοειδούς κίνησης, του ύψους της και του αριθμού των σημείων, που την χαρακτηρίζουν και πιέζεται το πλήκτρο CORR. Η εντολή CORR (3.3.1.8) αποθηκεύει, ουσιαστικά, τα σημεία κυματοειδούς κίνησης πληροφορώντας παράλληλα τον έλεγχο της διάταξης με τα τελευταία απαιτούμενα στοιχεία, που χρειάζονται για να οριστεί μια πλήρης και επιτυχημένη κυματοειδής συγκόλληση. Το συγκεκριμένο στάδιο πρέπει να εκτελείται πάντα, ως ακόλουθο του βήματος VI. Αξίζει να επισημανθεί ότι, χωρίς την εισαγωγή τιμών για τις παραμέτρους του στοιχείου Weave Width/Height της σελίδας FUNC, δεν δύναται να εκτελεστεί κυματοειδής κίνηση.



Εικόνα 3.17 Σελίδα FUNC του WORK menu.

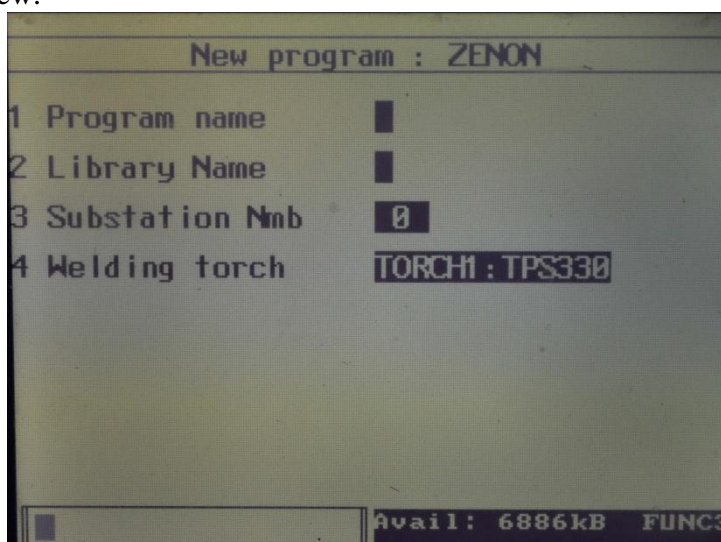
Εν ολίγοις, η διαδικασία προγραμματισμού μιας γραμμικής κυματοειδούς κίνησης της αυτοματοποιημένης διάταξης, παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό πολυπλοκότητας συγκριτικά με την απλή γραμμική κίνηση. Πέραν του προγραμματισθέντος βήματος εκτέλεσης, απαιτείται και προγενέστερη ορθή σύνταξη και αποθήκευση μεταβατικών βημάτων (transition steps), που αντιστοιχούν στον αριθμό των επιλεγόμενων σημείων κυματοειδούς κίνησης.

Οι γραμμικές κυματοειδείς κινήσεις παρουσιάζουν εξαιρετική χρησιμότητα στις συγκολλητικές διαδικασίες, καθώς απλοποιούν την πορεία διαδικασιών και αυξάνουν το βαθμό παραγωγικότητάς τους. Επιπρόσθετη ανάλυση, παρέχεται σε κεφάλαια του πειραματικού τμήματος της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

3.5. Συμπυγμένος Οδηγός Λειτουργίας της Διάταξης, Προγραμματισμού & Εκτέλεσης Συγκολλητικών Ενεργειών.

Στα προηγούμενα κεφάλαια, κατατέθηκε διεξοδική περιγραφή των λειτουργικών συνιστωσών, που απαρτίζουν την αυτοματοποιημένη διάταξη και των ειδικευμένων λειτουργιών, που κάθε μία επιτελεί. Επιπροσθέτως, παρατέθηκε η αρμόζουσα θεωρία προγραμματισμού των επιμέρους βημάτων ενός τρέχοντος προγράμματος. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται το συγκερασμό των προαναφερθέντων εννοιών, στοιχείων διάταξης, δομής & θεωρίας προγραμματισμού, με σκοπό τη διατύπωση ενός πλήρους οδηγού λειτουργίας του ρομποτικού βραχίονα IGM RT330.1 του E.N.T. Συνεπώς, μια ολοκληρωμένη και ,ορθώς, συντεταγμένη συγκολλητική διαδικασία απαιτεί τις εξής ενέργειες από τον εκάστοτε χειριστή του συστήματος:

1. Εκκίνηση της αυτοματοποιημένης διάταξης, θέτοντας τον διακόπτη της καμπίνας ελέγχου στην ενεργή θέση **I**. Αναμονή μερικών λεπτών, ώσπου να καταστεί εφικτή και ολοκληρωτέα η επικοινωνία του ελέγχου της διάταξης με το teach pendant και να φωτιστεί η οθόνη LED του χειριστηρίου εκμάθησης και προγραμματισμού.
2. Στην αρχική παρουσιαζόμενη σελίδα του κύριου μενού (εικόνα 3.10), επιλέγουμε το στοιχείο Sterpmenu με τη βοήθεια του αριστερού soft key 1. Μετέπειτα, πιέζουμε το πλήκτρο FUNC4 και παρουσιάζεται στην οθόνη η προκαθορισμένη σελίδα I/O του Station menu, όπως αυτή διαφαίνεται στην εικόνα 3.13. Σε αυτό το σημείο, ο χειριστής της διάταξης έχει τη δυνατότητα είτε να "φορτώσει" ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα από το σκληρό δίσκο¹² στη μνήμη του συστήματος, ή να δημιουργήσει ένα καινούριο πρόγραμμα.
3. Επιλέγουμε να δημιουργήσουμε ένα καινούριο πρόγραμμα. Από τη σελίδα I/O του Station menu και πιέζοντας το softkey 4 ενεργοποιούμε την εντολή **New**. Η εικόνα 3.18 απεικονίζει το υπό-μενού, που εμφανίζεται ακολούθως της ενεργοποίησης της επιλογής New.



Εικόνα 3.18 Υπό-μενού εισαγωγής ονόματος του προγράμματος.

¹² Είτε εναλλακτικά από τη δισκέτα (floppy disk).

Με τη βοήθεια του αλφαριθμητικού πληκτρολογίου, εισάγουμε το επιθυμητό όνομα του προγράμματος στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field) του pendant και το καταχωρούμε,πιέζοντας το softkey 1. Η δημιουργία του τρέχοντος προγράμματος πραγματοποιείται με πίεση του πλήκτρου **ADD**.

4. Σε ακόλουθη φάση, επιλέγουμε να ενεργοποιήσουμε τους οδηγούς της διάταξης. Η ενεργοποίηση τους επιτυγχάνεται, είτε μέσω του χειριστηρίου εκμάθησης, ή μέσω της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας. Εάν επιλέξουμε να τους ενεργοποιήσουμε από το teach pendant, πρέπει να πιέσουμε το πλήκτρο **DRIVES** (3.3.1.5) και να παρατηρήσουμε ότι, η αντίστοιχη λυχνία ενεργοποίησης του πλήκτρου ανάβει. Σε περίπτωση ενεργοποίησης τους από την εξωτερική μονάδα (Start/Stop Cassette), πρέπει να πιέσουμε το πλήκτρο **DRIVES ON**. Σε ενδεχόμενο απενεργοποίησης των οδηγών, αξίζει να ληφθεί υπόψη ότι, πρέπει πριν το πλήκτρο **DRIVES ON** να έχει πατηθεί συνεχόμενα το πλήκτρο **STOP**, προκειμένου ο έλεγχος της μονάδας να κατανοήσει το σφάλμα απενεργοποίησης των οδηγών. Και στις 2 περιπτώσεις, η ενεργοποίηση των οδηγών συνοδεύεται από ένα χαρακτηριστικό ήχο εκκίνησης, που προέρχεται από την καμπίνα ελέγχου. Στο συγκεκριμένο σημείο, πρέπει να επισημανθεί ότι, ο επιλογέας κατάστασης λειτουργίας (3.3.2.2) τοποθετείται στη θέση **M** (Manual mode).
5. Έχοντας εκκινήσει τη διαδικασία δημιουργίας προγράμματος με την αποθήκευση του ονόματος, επόμενο θεμελιώδες βήμα αποτελεί, η βαθμονόμηση (**calibration**) των αξόνων της αυτοματοποιημένης διάταξης. Η συντόμευση αυτής της ενέργειας επιτυγχάνεται με την πίεση του συνδυασμού των πλήκτρων **FN + C** του pendant. Ο χρήστης ενημερώνεται για την επιτυχή βαθμονόμηση των αξόνων από μήνυμα, που εμφανίζεται στην οθόνη του pendant.
6. Με ενεργοποίηση των drives και επιτυχή βαθμονόμηση των αξόνων,είμαστε πλέον έτοιμοι για τον προγραμματισμό, των πρωταρχικών βημάτων, του συγκεκριμένου προγράμματος. Συνεπώς, πιέζουμε το πλήκτρο **JOG/WORK/AUX** με σκοπό, να εισαχθούμε στο **JOG menu** (3.4.4.3) και να ξεκινήσει η μετακίνηση των αξόνων.
7. Με χρήση των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (3.3.1.4), ο χειριστής μετακινεί το βραχίονα στην αρχική θέση της ραφής της συγκόλλησης. Σε περίπτωση μη εκτέλεσης του βήματος 5 της διαδικασίας, η πίεση οποιουδήποτε πλήκτρου χειροκίνητου ελέγχου, θα συνοδευθεί από την εμφάνιση του μηνύματος *''axes not calibrated''* και από αδυναμία κίνησης των αξόνων. Επομένως, με τη βοήθεια των manualcontrolkeys, άρχεται η διαδικασία προγραμματισμού του προσανατολισμού (μήκος τόξου, γωνία του πυρσού με το επίπεδο συγκόλλησης) του πυρσού στη θέση εκκίνησης της συγκόλλησης. Αξίζει να επισημανθεί ότι, σε αυτή τη φάση ο χρήστης ορίζει και τον τρόπο κίνησης των βημάτων μετάβασης του βραχίονα με τη βοήθεια των πλήκτρων Joint, World, Tool, Work (3.3.1.3). Εφόσον, το ακροφύσιο της διάταξης, βρίσκεται πλέον στην επιθυμητή αρχική θέση συγκόλλησης, πιέζεται το πλήκτρο **ADD** για αποθήκευση του βήματος **JOG** στη δομή του προγράμματος. Η μετάβαση του βραχίονα από τη θέση βαθμονόμησης στην αρχική θέση της συγκόλλησης, δύναται να επιτευχθεί με ,περισσότερα του ενός, **JOG** βημάτων.
8. Με δεδομένη την αρχική θέση συγκόλλησης, ακολουθεί η **διαδικασία δημιουργίας κι αποθήκευσης** του βήματος συγκόλλησης (**WORK step**). Στο παρόν βήμα, θα οριστούν : η τελική θέση συγκόλλησης και όλες οι απαραίτητες

συγκολλητικές παράμετροι. Αρχικά πιέζουμε το πλήκτρο **JOG/WORK/AUX** του teach pendant, για να κατανοήσει ο έλεγχος της διάταξης την εναλλαγή του βήματος, σε WORK step και να εμφανίσει στην οθόνη του pendant το Work menu (εικόνα 3.15). Ο προγραμματισμός του τρέχοντος βήματος, γίνεται βάσει των λεπτομερών οδηγιών, που παρατίθενται στα κεφάλαια §3.4.5 και §3.4.6. Η επιλογή του είδους κίνησης του πυρσού για το βήμα συγκόλλησης, καθορίζεται συναρτήσει των απαιτήσεων της εκάστοτε συγκολλητικής ραφής. Όπως έχει προαναφερθεί, τα βήματα WORK εκτελούνται πάντα γραμμικά ή σε κυκλική διεύθυνση, συνεπώς θα πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί για το τρέχον βήμα η επιλογή World των πλήκτρων MODE. Εφόσον έχει συνταχθεί ορθώς και βήμα-βήμα η διαδικασία των §3.4.5 και §3.4.6, πιέζεται το πλήκτρο ADD για αποθήκευση του βήματος συγκόλλησης. Πολλαπλά διαδοχικά βήματα εκτέλεσης, δύναται να προγραμματιστούν, αναλόγως των υπαρχουσών απαιτήσεων.

9. Δεδομένου ότι, υφίσταται περίπτωση συγκόλλησης μονού περάσματος, τη σύνταξη του βήματος συγκόλλησης, ακολουθεί η **διαδικασία απομάκρυνσης** του πυρσού από την τελική θέση συγκόλλησης. Η απομάκρυνση συντελείται, προκειμένου να καθαριστεί η συγκόλληση από στρώματα σκουριάς, τα οποία εναποτίθενται, να εξεταστεί οπτικά και για λόγους ασφαλείας του χειριστή. Πιέζουμε, λοιπόν, ξανά το πλήκτρο JOG/WORK/AUX για να γίνει εναλλαγή του βήματος σε JOG step, κι αντίστοιχη μετάβαση του WORK menu σε JOG menu. Ακολούθως, με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου, ο βραχίονας μετακινείται σε μια επιθυμητή τελική θέση μακριά από τη ραφή συγκόλλησης. Η κίνηση απομάκρυνσης, εφόσον προγραμματίζεται σε JOG step, δύναται να επιτευχθεί, είτε σε Joint mode ή σε World mode. Επομένως, όταν το σημείο TCP, λάβει την απαιτούμενη τελική θέση, πιέζεται το πλήκτρο ADD και το βήμα αποθηκεύεται στη δομή του προγράμματος.
10. Η διαδικασία προγραμματισμού, έχει πλέον, ολοκληρωθεί σε πρωτογενές στάδιο. Συνοπτικά, διαμορφώσαμε ένα πρόγραμμα, κατά το οποίο, ο βραχίονας κινήθηκε από τη θέση βαθμονόμησης στην αρχική θέση της συγκόλλησης, πραγματοποίησε συγκόλληση μέχρι και την τελική θέση συγκόλλησης και εν τέλει απομακρύνθηκε μέχρι μια τυχαία τελική θέση. Το ακόλουθο βήμα αποτελεί η **‘προσομοίωση’** του προγράμματος και ο **έλεγχος ορθότητας της σύνταξης** του. Η επίτευξη αυτού του στόχου επιτυγχάνεται με εκτέλεση του προγράμματος σε **M** manual mode (3.3.2.2). Η οθόνη του pendant εμφανίζει την τρέχουσα στιγμή το τελευταίο βήμα, το οποίο προγραμματίστηκε (βήμα 9). Για να εκτελεστεί το πρόγραμμα, η οθόνη θα πρέπει να εμφανίζει το πρώτο συνταχθέν βήμα (βήμα 7). Το λογισμικό του pendant της διάταξης IGM RT330.1 αναγνωρίζει & θεωρεί ως πρώτο βήμα ενός προγράμματος το βήμα 2, πάντα.¹³ Με πίεση του συνδυασμού 2 + GET STEP, το πρόγραμμα μεταβαίνει στο πρώτο βήμα του και με πίεση του πλήκτρου START, εκτελείται. Μεταξύ της πίεσης του START και της εκτέλεσης του προγράμματος μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα 1-2 δευτερολέπτων, κατά το οποίο η σύνταξη του τρέχοντος προγράμματος ελέγχεται για σφάλματα. Σε περίπτωση απουσίας σφαλμάτων, η διαδικασία προσομοίωσης της συγκόλλησης ξεκινά να εκτελείται.

¹³ Το πρώτο συνταχθέν βήμα, δηλαδή, αντιστοιχίζεται στον αριθμό βήματος 2, αυτόματα από τη διάταξη.

11. Δεδομένης της επιτυχούς ολοκλήρωσης του βήματος 10, ενεργοποιούμε τη μηχανή συγκόλλησης της διάταξης, θέτοντας το διακόπτη λειτουργίας στη θέση **I**.
12. Ανοίγεται η παροχή προστατευτικού αερίου, η οποία είναι συνδεδεμένη με τη διάταξη, από τον κύλινδρο υψηλής πίεσης παροχής αερίου Ar + CO₂. Κρίνεται απαραίτητη, σε αυτό το στάδιο, η αποσυμπίεση της διάταξης με τη συνδρομή του πράσινου κουμπιού αποσυμπίεσης στην 'πλάτη' της μηχανής ισχύος. Επιπλέον, μέσω του ρυθμιστικού μηχανισμού παροχής και πίεσης προστατευτικού αερίου, επιλέγεται η επιθυμητή τιμή παροχής του, σε l/min.
13. Συνίσταται σε αυτή τη φάση, η αλλαγή του τρόπου λειτουργίας των αξόνων της διάταξης σε **A** (automatic), από τον επιλογέα λειτουργίας (**key operated mode switch**/3.3.2.2) της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας (Start/Stop Cassette). Κατά τη μετάβαση από **M** mode σε **A** mode, οι drives απενεργοποιούνται αυτόματα. Η ενεργοποίηση τους γίνεται, ως γνωστόν, με τη βοήθεια του πλήκτρου **DRIVES** του χειριστηρίου εκμάθησης ή μέσω του πλήκτρου **DRIVES ON** της εξωτερικής ελεγκτικής μονάδας.
14. Απαραίτητο ακόλουθο βήμα αποτελεί η ενεργοποίηση του πλήκτρου **PROC**. Σε περίπτωση μη ενεργοποίησης του, δεν συντελείται συγκόλληση. (3.3.1.5)
15. Λόγω εκτέλεσης του βήματος 10, η οθόνη του χειριστηρίου εκμάθησης (teach pendant) και προγραμματισμού, παρουσιάζει το τελευταίο βήμα του τρέχοντος προγράμματος. Επαναπληκτρολογούμε, λοιπόν, το συνδυασμό 2 + GET STEP, προκειμένου να μεταβούμε στο πρώτο βήμα του προγράμματος και πιέζουμε το πλήκτρο **START**. Η συγκόλληση, πλέον, εκτελείται κανονικά με παρουσία τόξου και εναπόθεση υλικού στη συμβολή των τεμαχίων και με γρηγορότερη, λόγω **A** mode, ταχύτητα των επιμέρους αξόνων. Λόγω υψηλής ακτινοβολίας του τόξου, απαιτούνται μέτρα ασφαλείας για τον εκάστοτε χειριστή, οποίος κατά το παρόν βήμα, οφείλει να φορά προστατευτική μάσκα.

3.6. Ακολουθίες Συγκόλλησης - Welding Sequences.

Οι ακολουθίες συγκόλλησης αποτελούν, μια ιδιαίτερα, σημαντική λειτουργική δυνατότητα, την οποία προσφέρει η αυτοματοποιημένη διάταξη του E.N.T. Αφορά, κυρίως, συγκολλητικές διαδικασίες πολλαπλών περασμάτων (**Multilayers**) GMAW διαδικασιών. Το παρόν υπό-κεφάλαιο εμπίπτει εκτός της περιοχής χρησιμότητας της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται όμως, χάριν επέκτασης των γνώσεων λειτουργίας της διάταξης.

Οι ακολουθίες συγκόλλησης είναι κανονικά προγράμματα, δομημένα από βήματα μετάβασης και εκτέλεσης, τα οποία όμως προγραμματίζονται πάντα με επέκταση **.lib**. Υφίστανται 3 τύποι συγκολλητικών ακολουθιών, συναρτήσει της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν:

- Single paths - Μεμονωμένες διαδρομές.
- Single paths with weaving - Μεμονωμένες κυματοειδείς διαδρομές.
- Multilayers - Πολλαπλά περάσματα.

Η 3^η κατηγορία αποτελεί την ουσιαστικότερη των τριών προαναφερθέντων, καθότι εμπίπτει στο πεδίο ποικίλων βιομηχανικών εφαρμογών. Οι συγκολλητικές ακολουθίες GMAW, βελτιστοποιούν την παραγωγικότητα της διάταξης, καθώς επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση του χρόνου μεταξύ πολλαπλών διαδοχικών περασμάτων.

Όσον αφορά τη **multilayers** λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα, χρησιμοποιείται για να ορίσει τα πολλαπλά συγκολλητικά επίπεδα μιας ραφής συγκόλλησης, μιας, με άλλα λόγια, προκαθορισμένης συμβολής τεμαχίων. Το πρώτο πέραςμα καλείται **root**, ή αλλιώς *ρίζα*, ενώ τα εναπομείναντα περάσματα καλούνται **cover passes**, ή αλλιώς *περάσματα επικάλυψης*. Η ρίζα & τα περάσματα επικάλυψης μπορούν να εκτελεστούν και με τη λειτουργία κυματοειδούς κίνησης.

Η λειτουργία multilayers των ακολουθιών συγκόλλησης δύναται να διασαφηνιστεί με καλύτερο τρόπο, με την παράθεση ενός παραδείγματος δημιουργίας προγράμματος τριών συγκολλητικών περασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, θα δημιουργήσουμε ένα πρόγραμμα, το οποίο θα εκτελεί συγκόλληση ρίζας (*root*) κυματοειδούς κίνησης με 2 σημεία weaving points και δυο απλών, επακόλουθων περασμάτων επικάλυψης (*cover passes*). Η διαδικασία εκτέλεσης ενεργειών έχει ως εξής:

1. Έχοντας εκκινήσει την αυτοματοποιημένη διάταξη (βήμα1/§3.5) και επιλέξει την επιλογή **Step menu** (βήμα2/§3.5) του εμφανιζόμενου κύριου μενού, πιέζουμε το πλήκτρο FUNC4. Εμφανίζεται, στην οθόνη του χειριστηρίου εκμάθησης, η σελίδα I/O του Station menu, όπως αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 3.13. Επιλέγουμε να δημιουργήσουμε ένα καινούριο πρόγραμμα, ενεργοποιώντας την εντολή **New** με πίεση του soft key 4. Με τη βοήθεια του αλφαριθμητικού πληκτρολογίου, εισάγουμε το επιθυμητό όνομα του προγράμματος στο πεδίο επεξεργασίας (Edit field) του pendant και το καταχωρούμε, πιέζοντας το softkey 1. Προσοχή! το όνομα του προγράμματος θα πρέπει να καταχωρηθεί υπό τη μορφή **'name'.lib** στο στοιχείο πεδίου 1. Οι ακολουθίες συγκόλλησης αναγνωρίζονται από τον έλεγχο της διάταξης και μπορούν να εκτελεστούν, μόνο αν το όνομα συνοδεύεται από την επέκταση **.lib**. Η δημιουργία του τρέχοντος προγράμματος πραγματοποιείται με πίεση του πλήκτρου **ADD**.
2. Θεωρώντας ότι πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις του §3.5 (ενεργοποίηση οδηγών, βαθμονόμηση αξόνων), ο χειριστής πιέζει το πλήκτρο **JOG/WORK/AUX**, για να εισέλθει στη σελίδα BAS του Jog menu. Ο χρήστης πρέπει σε αυτό το σημείο να εισάγει το όνομα της ακολουθίας. Αυτό επιτυγχάνεται με πίεση του page key2 για εισαγωγή στη σελίδα MLY του Jog menu. Η συγκεκριμένη σελίδα προσφέρει την επιλογή **Welding Sequence Name**. Πληκτρολογούμε το επιθυμητό όνομα και με το αριστερό softkey 1, το καταχωρούμε. Πληκτρολογούμε και πάλι το page key2 και επανερχόμαστε στη σελίδα BAS του Jog menu.
3. Ο έλεγχος της διάταξης πρέπει να κατανοήσει με κάποιο τρόπο την εισαγωγή της συγκολλητικής ακολουθίας στο πρόγραμμα. Αυτό πραγματοποιείται ως εξής: Η σελίδα BAS του Jog menu, προσφέρει την επιλογή **Extension** (menu item 5). Με πίεση του softkey5, την ενεργοποιούμε και εμφανίζεται ένα υπό-μενού επιλογών (Selection Jog-Step Extensions). Στην προκειμένη περίπτωση, μας ενδιαφέρει η επιλογή **WeldSeqDef**, την οποία ενεργοποιούμε με πίεση του softkey5. Συνεπώς, η σελίδα BAS του Jog menu θα πρέπει, πλέον, δίπλα στο στοιχείο Extension να έχει έντονα γραμμοσκιασμένη την επιλογή WeldSeqDef: 'όνομα ακολουθίας'.
4. Είμαστε έτοιμοι, σε αυτή τη φάση, να μετακινήσουμε το βραχίονα στην αρχική θέση της ραφής συγκόλλησης. Με τη βοήθεια των manual control keys, άρχεται η διαδικασία προγραμματισμού του προσανατολισμού (μήκος τόξου, γωνία του πυρσού με το επίπεδο συγκόλλησης) του πυρσού προς τη θέση εκκίνησης της συγκόλλησης. Εφόσον, το ακροφύσιο της διάταξης, βρίσκεται στην επιθυμητή

- αρχική θέση συγκόλλησης, πιέζεται το πλήκτρο ADD του pendant για αποθήκευση του βήματος JOG στη δομή του προγράμματος.
5. Δεδομένης της αρχικής θέσης συγκόλλησης, ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας κι αποθήκευσης των μεταβατικών βημάτων (n weaving points = n Jog steps) κυματοειδούς κίνησης της ρίζας συγκόλλησης. Η ρίζα θα πραγματοποιηθεί με κυματοειδή κίνηση δύο weaving points. Καθίσταται απαραίτητη, λοιπόν η εισαγωγή αυτών των σημείων και η κατανόηση της εισαγωγής από τον έλεγχο της διάταξης, βάσει της αντίστοιχης θεωρίας (**βήμα I/§3.4.6**).
 6. Ακολούθως, κατατίθεται η διαδικασία δημιουργίας κι αποθήκευσης του βήματος συγκόλλησης (WORK step). Αρχικά πιέζουμε το πλήκτρο **JOG/WORK/AUX** του teach pendant, για να κατανοήσει ο έλεγχος της διάταξης την εναλλαγή του βήματος, σε WORK step και να εμφανίσει στην οθόνη του pendant το Work menu (εικόνα 3.15). Με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου (manual control keys/3.3.1.4) κινούμε τους επιμέρους άξονες, ώστε ο βραχίονας να μετακινηθεί, μέχρι την τελική θέση της ραφής συγκόλλησης. Ακολούθως, πιέζοντας το πλήκτρο soft key 1, για το στοιχείο WORK step εμφανίζεται το υπό-μενού της εικόνας 3.12. Από τις παρεχόμενες επιλογές, μας ενδιαφέρει η δεύτερη στη σειρά, η οποία αναγράφει **Linear weaving**. Όπως έχει προαναφερθεί, η συγκεκριμένη επιλογή συντελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την κατανόηση, εκ μέρους της διάταξης, του προγραμματισμού μιας κυματοειδούς κίνησης, η οποία δεν δύναται να εκτελεστεί χωρίς τη συγκεκριμένη επιλογή ενεργοποιημένη. Επιπλέον, εισάγεται η επιθυμητή ταχύτητα συγκόλλησης (velocity) σε cm/min & η χρονική καθυστέρηση (dwell time) σε sec και η συχνότητα ταλάντωσης της κυματοειδούς κίνησης σε 1/min (βήμα V/§3.4.6). Ειδοποιός διαφορά με παρόμοια βήματα συγκόλλησης, αποτελεί η εισαγωγή επέκτασης για τη ρίζα της συγκόλλησης. Ενεργοποιώντας την επιλογή Extension της σελίδας BAS του Jog menu, εμφανίζεται ένα υπό-μενού επιλογών (Selection WORK step extensions), από το οποίο μας ενδιαφέρει η **Multilayer Root** επιλογή. Την ενεργοποιούμε, μέσω του softkey2, και επανερχόμαστε στη σελίδα BAS.
 7. Ακολούθως, με πίεση, του πλήκτρου σελίδας 3 (page key 3/3.3.1.7) εισερχόμαστε στη σελίδα TDEV, προκειμένου να καθορίσουμε τις συγκολλητικές παραμέτρους του βήματος. Εισάγουμε στο πεδίο επεξεργασίας (edit field) την τιμή του ρεύματος συγκόλλησης, ως ποσοστό της μέγιστης ονομαστικής ισχύος της μηχανής και την καταχωρούμε με την πίεση του πλήκτρου soft key 2. Πράττουμε με τον ίδιο τρόπο, για τις παραμέτρους της τάσεως τόξου και της ενεργοποίησης της παλμικής λειτουργίας συγκόλλησης. Η καταχώρηση των τιμών, αυτών των παραμέτρων, γίνεται με χρήση των πλήκτρων soft key 1 και soft key 3, αντίστοιχα. Πιέζουμε το πλήκτρο σελίδας 1 (Page key 1) και επανερχόμαστε στην αρχική σελίδα BAS του Work menu. Έχοντας, ελέγξει τη δομή του βήματος ρίζας, πιέζουμε το πλήκτρο ADD, για να αποθηκεύσουμε το βήμα στο τρέχον πρόγραμμα.
 8. Η διαδικασία δημιουργίας του βήματος ρίζας συγκόλλησης ολοκληρώνεται με την εισαγωγή του ύψους, του πλάτους και του αριθμού των σημείων της κυματοειδούς κίνησης. Η ακολουθία ενεργειών πραγματοποιείται βάσει της αντίστοιχης θεωρίας. (βήμα VII/§3.4.6)
 9. Ένα έτερο ιδιαίτον στοιχείο των συγκολλητικών ακολουθιών, αποτελεί σε αυτή τη φάση ο ορισμός ενός σημείου αναφοράς (**reference point**). Το συγκεκριμένο σημείο συνδράμει άμεσα στην κατανόηση, εκ μέρους του ελέγχου της διάταξης, της εκτέλεσης των επιμέρους περασμάτων επικάλυψης, πάνω στην διεύθυνση της ρίζας της συγκόλλησης επακριβώς. Σε προηγούμενο βήμα, έχει οριστεί πλήρως η πορεία συγκόλλησης της ρίζας, μέσω αρχικής και τελικής θέσης. Η τελική θέση

συγκόλλησης σε συνδυασμό με το σημείο αναφοράς, καθορίζουν στην ουσία την πορεία συγκόλλησης των περασμάτων επικάλυψης. Με άλλα λόγια, το σημείο αναφοράς επιτελεί το ρόλο της αρχικής θέσης συγκόλλησης για τα cover passes. Η εισαγωγή του reference point επιτυγχάνεται ως εξής: Με τη βοήθεια του πλήκτρου JOG/WORK/AUX του pendant, αλλάζουμε τον τύπο του προγραμματισθέντος βήματος, από WORK step σε JOG step. Με πίεση των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου, μετακινούμε το βραχίονα στην επιθυμητή θέση, που θα αντιστοιχεί με τη θέση του σημείου αναφοράς. Με πίεση του softkey5, ενεργοποιούμε το στοιχείο Extension και εμφανίζεται ένα υπό-μενού επιλογών. Η εισαγωγή της επέκτασης **reference point** κατοχυρώνεται με τη βοήθεια του softkey6. Εφόσον, το ακροφύσιο, βρίσκεται πλέον στην επιθυμητή θέση του σημείου αναφοράς, πιέζεται το πλήκτρο ADD για αποθήκευση του βήματος JOG στη δομή του προγράμματος.

10. Απομένει η δημιουργία και αποθήκευση των ακόλουθων 2 cover passes, για τα οποία απαιτείται μόνο η εισαγωγή συγκολλητικών παραμέτρων. Δε χρειάζεται να μετακινηθεί ο πυρσός, προκειμένου να οριστεί η τελική θέση των συγκολλήσεων και αυτό οφείλεται στο γεγονός της αποθήκευσης του σημείου αναφοράς, το οποίο επιτελεί ακριβώς αυτή τη λειτουργία. Επομένως, πιέζεται το πλήκτρο JOG/WORK/AUX με σκοπό να προγραμματιστούν τα βήματα συγκόλλησης των περασμάτων επικάλυψης. Εμφανίζεται, λοιπόν, η σελίδα BAS του WORK menu. Πρωταρχική έγνοια αποτελεί η δήλωση **Cover pass** στο στοιχείο **Extension** του WORK menu. Η συγκεκριμένη ενέργεια επιτυγχάνεται, με τη βοήθεια του softkey5 για επιλογή του στοιχείου Extension και με επακόλουθη πίεση του softkey3, για καταχώρηση της επέκτασης Cover pass στο στοιχείο Extension της σελίδας bas του Work menu.
11. Ακολουθεί η εισαγωγή και καταχώρηση των τιμών των παραμέτρων συγκόλλησης βάσει της αντίστοιχης θεωρίας (**βήμα III&IV/§3.4.5**). Ακολουθώντας, πιέζουμε το πλήκτρο ADD, για αποθηκεύσουμε τα πρώτο πέραςμα επικάλυψης στη δομή του προγράμματος. Εάν οι συνθήκες συγκόλλησης, είναι πανομοιότυπες για τα δυο cover passes, το πλήκτρο ADD πιέζεται διαδοχικά 2 φορές. Εάν οι συνθήκες του δεύτερου περάσματος, τροποποιηθούν σχετικά με το πρώτο, ακολουθείται εκ νέου η διαδικασία του βήματος 10 και αποθηκεύεται και το δεύτερο cover pass.
12. Εν κατακλείδι, ακολουθεί η διαδικασία απομάκρυνσης του πυρσού από την τελική θέση συγκόλλησης. Η απομάκρυνση συντελείται, προκειμένου να καθαριστεί η συγκόλληση από στρώματα σκουριάς, τα οποία εναποτίθενται, να εξεταστεί οπτικά και για λόγους ασφαλείας του χειριστή. Πιέζουμε, λοιπόν, ξανά το πλήκτρο JOG/WORK/AUX για να γίνει εναλλαγή του βήματος σε JOG step, κι αντίστοιχη μετάβαση του WORK menu σε JOG menu. Ακολουθώντας, με τη βοήθεια των πλήκτρων χειροκίνητου ελέγχου, ο βραχίονας μετακινείται σε μια επιθυμητή τελική θέση μακριά από τη ραφή συγκόλλησης. Η κίνηση απομάκρυνσης, εφόσον προγραμματίζεται σε JOG step, δύναται να επιτευχθεί, είτε σε Joint mode ή σε World mode. Επομένως, όταν το σημείο TCP, λάβει την απαιτούμενη τελική θέση, πιέζεται το πλήκτρο ADD και το βήμα αποθηκεύεται στη δομή του προγράμματος.

Οι ακολουθίες συγκόλλησης, προσφέρουν και έτερες λειτουργικές επιλογές μέσω των επιμέρους υπό-μενού (Cover pass Reverse, Mirroring, Jog Intermediate steps κλπ). Η μελέτη, εμβάθυνση και επεξήγηση των συγκεκριμένων συνιστωσών κρίθηκε περιττή για τις πραγματευόμενες εφαρμογές της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, αποτελεί εν δυνάμει πεδίο μελέτης για επερχόμενες διπλωματικές εργασίες.

Κεφάλαιο 4^ο

'' Πειραματική Διαδικασία Συγκολλήσεων

Χαλύβων FCA. ''

4.1. Εισαγωγή.

Πέραν της εκμάθησης λειτουργίας της αυτοματοποιημένης διάταξης του E.N.T, θεμελιώδης, συμπληρωματικός στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε, η επιτυχής διεξαγωγή συγκολλήσεων, ελασμάτων φερριτό-μπαϊνιτικών χαλύβων FCA (Fatigue Crack Arrester). Οι συγκολλητικές διαδικασίες υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου συγκόλλησης τήξεως σωληνοειδών ηλεκτροδίων FCAW. Τα ελάσματα διαστάσεων $480 \times 380 \times 13 \text{ mm}^3$ επέστησαν διαδικασίες κοπής, λοξοτομής και αμμοβολής, προτού συγκολληθούν. Εν τέλει, πραγματοποιήθηκαν 5 συγκολλήσεις για ελάσματα διαστάσεων των οικογενειών $375 \times 115 \times 13 \text{ mm}^3$, $185 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$ και $220 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$, εκ των οποίων οι 2 εμπίπτουν στη πρώτη οικογένεια, οι άλλες 2 στη δεύτερη και η τελευταία στη 3^η οικογένεια διαστάσεων. Το ρόλο του εναποτιθέμενου μετάλλου επιτέλεσε σύρμα ηλεκτροδίου, παρόμοιας χημικής σύστασης με το μέταλλο βάσης και διαμέτρου 1.2mm. Η προστασία της συγκολλητικής ραφής επετεύχθη με τη βοήθεια προστατευτικού αερίου μείγματος $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$. Επιπροσθέτως, επιλέχθηκε ανάστροφη πολικότητα ρεύματος για βελτιωμένα χαρακτηριστικά ραφής.

Ο συγκολλητικός εξοπλισμός FCAW συνδέθηκε, σε παραλληλία με τη ρομποτική διάταξη και κατέστη χρηστικός μέσω αυτής. Καίρια πλεονεκτήματα του βραχίονα, αποτελούν η σταθερή ταχύτητα πυρσού & το σταθερό μήκος τόξου, κατά τη διάρκεια της πορείας συγκόλλησης. Μια επιτυχής συγκόλληση προϋποθέτει την ορθή επιλογή τιμών των παραμέτρων, που τη χαρακτηρίζουν. Αυτές οι παράμετροι, αφορούν κυρίως την ένταση ρεύματος, την τάση τόξου, το μήκος τόξου, τη γωνία του ακροφυσίου, την ταχύτητα συγκόλλησης κλπ. Συνεπώς, οι διαδικασίες συγκόλλησης διαδέχονται μια περίοδο παραμετρικής βελτιστοποίησης, στην οποία μέσω πειραματικών διεξαγωγών, επιλέγεται η αποδοτικότερη καθολική λύση πορείας ενεργειών. Στην παρούσα περίπτωση, πραγματοποιήθηκε, ένα συγκεκριμένο πλήθος, αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων συγκόλλησης (**bead on plate welds**) πάνω στην επιφάνεια πλακών FCA. Η προαναφερθείσα διαδικασία αποσκοπεί στη μελέτη και επιλογή των καταλλήλων τιμών των παραμέτρων συγκόλλησης, με γνώμονα την ικανοποιητική όψη της ραφής, το βάθος διείσδυσης και την απουσία τυπικών σφαλμάτων. Επιπλέον, περιλήφθηκε η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων, τόσο σε γραμμικές κινήσεις (linear), όσο και σε κυματοειδείς (weaving). Η χρήση κυματοειδούς κίνησης εφαρμόζεται, κυρίως, σε περάσματα επικάλυψης (cover passes), λόγω επαρκούς γεμίσματος και κυρτότητας της προκύπτουσας ραφής. Δευτερευόντως, χρησιμοποιείται και σε περάσματα ρίζας, (root) λόγω της ικανοποιητικής ενίσχυσης, που προσφέρει.

Οι συγκολλήσεις διεξήχθησαν με πολλαπλά περάσματα: συγκεκριμένα, 6 η κάθε μια και με τη βοήθεια κεραμικής επικάλυπτρας, για ικανοποιητική ενίσχυση και ομαλή όψη ραφής. Τα πολλαπλά περάσματα αποτελούν μονόδρομο για συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων, καθώς προσδίδουν στη συμβολή, ομοιογενή κατανομή της θερμότητας και χαμηλότερες αποκτώμενες παραμορφώσεις.

Επακόλουθο απαραίτητο βήμα, συνετέλεσε η μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων χαλύβδινων δοκιμίων FCA και η μελέτη της μικροσκληρότητας τους. Πιο

συγκεκριμένα, σε πρωτογενές στάδιο, μελετήθηκε η μεταλλογραφία των βέλτιστων ελασμάτων, από τις στρώσεις των bead on plate welds, προκειμένου να παρατηρηθεί η μεταλλογραφική δομή τους, το επιτευχθέν βάθος διείσδυσης καθώς κι η ενδεχόμενη ύπαρξη σφαλμάτων. Δευτερευόντως, μελετήθηκε η μεταλλογραφική δομή εγκάρσιων τομών των συγκολλητικών ραφών και ελέγχθηκε η ύπαρξη ή μη σφαλμάτων. Τέλος, υπολογίστηκε η μικροσκληρότητα των βέλτιστων χαλύβδινων δοκιμίων σε όλες τις ενδιαφερόμενες ζώνες (ΘΕΖ, ζώνη σύνδεσης, ζώνη τήξης) κατά μήκος και καθ' ύψος.

4.2. Σύσταση Μετάλλου Βάσης.

Ως μέταλλο βάσης στις διαδικασίες συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε χάλυβας FCA (Fatigue Crack Arrestor). Παρουσιάζει βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση, συγκριτικά με τους συμβατικούς χάλυβες. Η ονοματολογία του συγκεκριμένου υλικού, με βάση το πρότυπο JIS (Japan Industrial Standards) G 3106 ποικίλει, ανάλογα με την εκάστοτε μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, ως εξής:

- SM490
- SM490Y
- SM520
- SM570

ενώ, βάσει του προτύπου JIS G 3114, η ονοματολογία καθίσταται ως εξής:

- SMA490W
- SMA570W

Η συγκεκριμένη οικογένεια χαλύβων προτυποποιείται και κατά ASTM ως ακολούθως

- A572
- A573
- A572 Gr.60/65
- A678 Gr.C/D
- A242 Type2 ή A588

Η τυπική σύσταση (% κ.β) του βασικού μετάλλου κατατίθεται στον ακόλουθο πίνακα

Πίνακας 5.21 Σύσταση Βασικού Μετάλλου φερριτό-μπαϊνιτικού χάλυβα FCA A572.

Σύσταση Βασικού Μετάλλου							
Στοιχείο	C	Si	Mn	P	S	P _{cm}	C _{eq}
Σύσταση (% κ.β)	0.04	0.42	1.50	0.009	0.002	0.139	0.325

Αξίζει να αναφερθεί ότι, στη μικροδομή του βασικού μετάλλου συμπεριλαμβάνονται και μικρότερες ποσότητες των στοιχείων Cr, Nb, Al, V, Mo και Ti, μερικές εκ των οποίων, υπεισέρχονται στον υπολογισμό των P_{cm} και C_{eq} :

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

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

Στον πίνακα 5.2 παρατίθενται πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος A572 και για ένα εύρος παχών, σε βιομηχανικά παραχθέντα ελάσματα:

Πίνακας 5.22 Μηχανικές Ιδιότητες φερριτό-μπαϊνιτικού χάλυβα FCA A572.

Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλου Βάσης				
Πάχος (mm)	Όριο Διαρροής (N/mm ²)	Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm ²)	Επιμήκυνση %	Δυσθραυστότητα σε -40°C (J)
9	425	604	18	231
25	486	599	23	348
50	469	576	25	395
80	433	571	27	331

4.3. Σύσταση Προστιθέμενου Μετάλλου.

Το αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο της μεθόδου FCAW, τροφοδοτείται στη ραφή της συγκόλλησης υπό τη μορφή σύρματος. Η επιλογή του έγινε, βάσει του καταλόγου της εταιρείας Bohler (Bohler *Ti-52 W-FD*). Η ονομασία του προστιθέμενου μετάλλου με βάση την τυποποίηση EN 758 είναι: T 46 4 P M 1 H10, ενώ βάσει της τυποποίησης κατά AWS A5.20-05 είναι: E71T-1CJH8. Ο πυρήνας του σωληνοειδούς ηλεκτροδίου συνίσταται από σκόνη ρουτιλίου (TiO₂), διαμορφώνοντας ένα στρώμα σκουριάς, το οποίο αφαιρείται εύκολα. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το ηλεκτρόδιο παρουσιάζει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων με ικανοποιητικής όψης ραφή. Η τυπική σύσταση του προστιθέμενου μετάλλου (%κ.β) δίνεται ως εξής:

Πίνακας 5.23 Χημική σύσταση (%κ.β) του προστιθέμενου μετάλλου.

Σύσταση Προστιθέμενου Μετάλλου			
Στοιχείο	C	Si	Mn
Σύσταση (% κ.β)	0,05	0,5	1,3

Η επιλογή του προαναφερθέντος ηλεκτροδίου έγινε με κριτήριο, τη χημική σύσταση του μετάλλου βάσης. Το προστιθέμενο μέταλλο και το βασικό μέταλλο, θα πρέπει να παρουσιάζουν παρόμοια χημική σύσταση. Στην προκειμένη περίπτωση, το μέταλλο προσθήκης εμφανίζει, σχεδόν, πανομοιότυπα επίπεδα άνθρακα και μαγγανίου με το μέταλλο βάσης, ενώ υφίσταται μια μικρή απόκλιση από το εμπριεχόμενο ποσοστό του πυριτίου. Το E71T-1CJH8 αποτέλεσε την εγγύτερη, από άποψη συμβατότητας, λύση προστιθέμενου μετάλλου. Οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες του ηλεκτροδίου δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.24 Μηχανικές Ιδιότητες Προστιθέμενου Μετάλλου για προστασία αερίου μείγματος Ar+15-25% CO₂ και 100% CO₂ (*).

Μηχανικές Ιδιότητες Προστιθέμενου Μετάλλου				
Όριο Διαρροής (N/mm ²)	Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm ²)	Επιμήκυνση %	Δυσθραυστότητα σε +20°C (J)	Δυσθραυστότητα σε -20°C (J)
520	580	24	140	110
480	540	25	130	100

Παρατηρούμε, ότι το ηλεκτρόδιο δύναται να χρησιμοποιηθεί, εξίσου με αέριο μείγμα Ar + 15-25% CO₂ αλλά και με 100% CO₂. Για την διεξαγωγή των συγκολλήσεων της παρούσης διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε αέριο μείγμα Ar + 18% CO₂.

4.4. Εξοπλισμός Συγκόλλησης.

Όλα τα απαραίτητα στοιχεία γνώσεων και θεωρίας, που αφορούν το συγκολλητικό εξοπλισμό της αυτοματοποιημένης διάταξης IGM Robotersysteme® RT330.1 του E.N.T, παρατίθενται με εκτενή περιγραφή στην §3.2 του 3^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.5. Διεξαγωγή αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου (Bead On Plate welds - BoP).

4.5.1. Παράθεση αποτελεσμάτων.

Η επιτυχής διεξαγωγή μιας μετωπικής συγκόλλησης προϋποθέτει την εναρμόνιση του εκάστοτε χειριστή της διάταξης, με το χαρακτήρα και τις επιδράσεις, της κάθε συγκολλητικής παραμέτρου, που διέπει τη διαδικασία. Η αναγνώριση παραμέτρων κι η περαιτέρω εμπάθυνση γνώσεων γύρω από αυτές, συντελεί το πιο ουσιώδες βήμα στην εκπόνηση μιας συγκολλητικής διαδικασίας. Στην περίπτωση της προκείμενης διπλωματικής εργασίας, το συγκεκριμένο ρόλο αναλαμβάνει η διαδικασία αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων προστιθέμενου μετάλλου (Bead On Plate welds) πάνω στην επιφάνεια πλακών FCA. Για την ακρίβεια, αποκτά διττή σημασία, διότι συνεισφέρει, επιπλέον, στην κατανόηση, εκ μέρους του χειριστή, των λειτουργιών της διάταξης.

Οι παράμετροι, που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής:

- Η ένταση του διαρρέοντος ρεύματος **I**, ως επί τοις εκατό ποσοστό της μέγιστης τιμής ρεύματος, που δύναται να παρέχει η μηχανή συγκόλλησης. Η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος της μηχανής Fronius TPS 330 ανέρχεται στα 330A.
- Η τάση του τόξου συγκόλλησης **V**, η οποία καθορίζεται αυτόματα συναρτήσει της επιλεγόμενης τιμής έντασης ρεύματος. Αύξηση της έντασης του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση της τάσεως τόξου, ενώ αντίστοιχα, υφίσταται μείωση της τάσης, όταν επιλέγεται μικρότερη τιμή έντασης ρεύματος. Ωστόσο, η τιμή της **V** δύναται να τροποποιηθεί ,μέσω της επιλογής *Arc Length Correction* του υπομενού TDEV του χειριστηρίου εκμάθησης.
- Η ταχύτητα συγκόλλησης **V_a**, σε cm/min. Ουσιαστικά, αποτελεί την ταχύτητα με την οποία ο κινούμενος βραχίονας εναποθέτει υλικό στη ραφή συγκόλλησης. Οι τυπικές τιμές ταχύτητας ποικίλουν ανάλογα με το πάχος,το είδος και την εφαρμογή του εκάστοτε υλικού. Στη συγκεκριμένη εργασία,οι τυπικές ταχύτητες κυμαίνονται από 25-40 cm/min.
- Το μήκος τόξου (arc length) **A.L**, το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του προς συγκόλληση τεμαχίου και του τηκόμενου ηλεκτροδίου. Οι διακυμάνσεις του μήκους τόξου επηρεάζουν την τάση **V**. Αύξηση του μήκους τόξου, υπό σταθερή ένταση ρεύματος, οδηγεί σε αύξηση της τάσης τόξου και ομοίως αντίστροφα.
- Η γωνία του ακροφυσίου της διάταξης **φ**, ως προς την κατακόρυφο της διεύθυνσης συγκόλλησης. Οι βέλτιστες τιμές γωνίας για τη μέθοδο FCAW, οι οποίες συνιστώνται από τη διεθνή βιβλιογραφία, κυμαίνονται από 10°-20°.
- Η θέση προσανατολισμού του ακροφυσίου ως προς την κατεύθυνση συγκόλλησης. Όταν το ακροφύσιο “δείχνει” τη φορά συγκόλλησης, η εφαρμοζόμενη τεχνική ονομάζεται *forehand*, ενώ όταν ο προσανατολισμός του ακροφυσίου αντιτίθεται στη φορά συγκόλλησης ονομάζεται *backhand*. Κάθε μια τεχνική αντικατοπτρίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ραφής για τις μεθόδους GMAW/FCAW. Η πρώτη παρουσιάζει φαρδύτερες ραφές με χαμηλή διείδυση, ενώ η δεύτερη στενές ραφές με υψηλότερη αποκτώμενη διείδυση.

Εν τέλει, υφίστανται παράμετροι, όπως η προστασία αερίου, το πλάτος κυματοειδούς κίνησης και η συχνότητα κυματοειδούς κίνησης. Το προστατευτικό αέριο μείγμα, που πλαισιώνει τις διαδικασίες συγκόλλησης είναι 82% - 18% Ar-CO₂, υπό το πρότυπο EN439-M21. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται μείγματα Ar-O₂, Ar-He, καθαρού Ar ή CO₂ καθώς και τριμερή μείγματα. Το πλάτος και η συχνότητα κυματοειδούς κίνησης αφορούν αποκλειστικά τις γραμμικές κυματοειδείς αποθέσεις μετάλλου της διάταξης.

Διεξήχθησαν συνολικά 108 αποθέσεις στρώσεως μετάλλου προσθήκης (beads on plate) · είτε απλές γραμμικές ή γραμμικές κυματοειδείς. Παράλληλα, μελετήθηκε η μορφή των αποκτώμενων ραφών. Απώτερος σκοπός της διαδικασίας αποτέλεσε, η κατανόηση της επίδρασης των ανωτέρω παραμέτρων και της αλληλεξάρτησης τους, η βελτιστοποίηση τους και η τελική εκτέλεση 2 ραφών, μιας απλής γραμμικής και μιας γραμμικής κυματοειδούς, βάσει των βέλτιστων παραμέτρων. Οι παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν τις βέλτιστες ραφές παρατίθενται σε ακόλουθο πίνακα. Επιπροσθέτως, παρατίθεται και ένας σημαντικός αριθμός αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων (BoP) υλικού, όπως προέκυψε κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 4.25 Παράμετροι βέλτιστων συγκολλητικών ραφών.

Βέλτιστες Ραφές Συγκόλλησης						
Bead on Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Συχνότητα κυματοειδούς κίνησης (1/min)
Linear	72.5% (198-200)	30.5 (+1% a.l.c)	30	1.7	15°	-
Linear Weaving	80% (213)	31.8	25	1.8	15°	90

Οι βέλτιστες ραφές συγκόλλησης διενεργήθηκαν μέσω της τεχνικής *forehand*. Αξίζει να επισημανθεί ότι, η παροχή του προστατευτικού αερίου καθίσταται ίση με 23 lt/min, βάσει της ενδείξεως του ρυθμιστικού μηχανισμού παροχής. Μολαταύτα, στη συγκεκριμένη τιμή προσυπολογίζονται και οι απώλειες παροχής αερίου λόγω της διανυόμενης διαδρομής του, από τον κύλινδρο υψηλής πίεσης μέχρι το ακροφύσιο. Η πραγματική τιμή, που μετράται στην έξοδο του ακροφυσίου είναι ίση με 20 lt/min.

Επιπλέον, παρατηρείται με τη συνδρομή των πινάκων 4.6-4.11 η απομόνωση κάθε καίριας παραμέτρου, προς εξέταση και ανάλυση της. Οι ραφές 1A-5A του πίνακα 4.6 μελετούν την επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης, υπό σταθερές συνθήκες. Ομοίως και οι 6A-8A, με μόνη διαφορά τη μικρότερη επιλεγμένη ένταση ρεύματος. Οι ραφές 1B-3B του πίνακα 4.7 μελετούν την επίδραση των επιλογών προστασίας, τις οποίες προσφέρει η μηχανή συγκόλλησης. Ακολούθως, οι 4B-8B αντικατοπτρίζουν τη μελέτη της επίδρασης της γωνίας του ακροφυσίου καθώς και της επιλεγόμενης τεχνικής (*fore - back*). Ο πίνακας 4.10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μελέτης της επίδρασης του μήκους τόξου στις ραφές. Επίσης, αναλύεται εκτενώς η επιλογή A.L.C, βάσει της οποίας τροποποιείται η τάση του τόξου και περιγράφεται η επίδραση της στις ραφές. Τέλος, παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα των γραμμικών κυματοειδών ραφών συγκόλλησης. Παρατηρείται, η καίρια επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης και της συχνότητας κυματοειδούς κίνησης επί της μορφής της ραφής.

Πίνακας 4.26 Παράμετροι γραμμικών αποθέσεων στρώσεως μετάλλου προσθήκης (Πλάκα Α).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥ (BeadOnPlates)						
Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Παρατηρήσεις
1A	60% (192-200)	25.7	30	1.5	18°	-
2A	60% (192-200)	25.7	35	1.5	18°	-
3A	60% (192-200)	25.7	40	1.5	18°	-
4A	60% (192-200)	25.7	45	1.5	18°	-
5A	60% (192-200)	25.7	50	1.5	18°	-
6A	55% (180-185)	25.2	30	1.5	18°	-
7A	55% (180-185)	25.2	40	1.5	18°	-
8A	55% (180-185)	25.2	50	1.5	18°	-

Πίνακας 4.27 Παράμετροι γραμμικών αποθέσεων στρώσεως μετάλλου προσθήκης (Πλάκα Β).

Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Παρατηρήσεις
1B	65% (195-202)	26.8	30	1.75	18°	82%-18% Ar-CO ₂
2B	65% (190-200)	26.8	30	1.75	18°	100% CO ₂
3B	65% (192-200)	26.8	30	1.75	18°	Χωρίς προστασία.
4B	60% (192-195)	25.8	40	1.55	0°	-
5B	60% (192-195)	25.8	40	1.55	10°	<i>backhand</i>
6B	60% (192-195)	25.8	40	1.55	20°	<i>backhand</i>
7B	60% (192-195)	25.8	40	1.55	10°	<i>forehand</i>
8B	60% (192-195)	25.8	40	1.55	20°	<i>forehand</i>
9B	70% (185-190)	29.2	45	1.75	15°	<i>forehand (82-18%)</i>
10B	70% (185-190)	29.2	45	1.75	15°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
11B	70% (185-190)	29.5	45	1.75	15°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
12B	70% (185-190)	29.5	45	1.75	15°	<i>forehand (97-3%)</i>

Πίνακας 4.28 Παράμετροι γραμμικών αποθέσεων στρώσεως μετάλλου προσθήκης (Πλάκα C).

Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Παρατηρήσεις
1C	65% (200-203)	26.8	35	1.6	12.5°	<i>forehand (82-18%)</i>
2C	65% (200-203)	26.8	35	1.6	12.5°	<i>backhand (82-18%)</i>
3C	70% (205-212)	29	35	1.6	12.5°	<i>forehand (82-18%)</i>
4C	70% (205-212)	29	35	1.6	12.5°	<i>backhand (82-18%)</i>
5C	70% (196-198)	29.5	35	1.6	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
6C	70% (196-198)	29.5	35	1.6	12.5°	<i>backhand (100% CO₂)</i>
7C	70% (196-198)	29.5	35	1.6	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
8C	70% (196-198)	29	35	1.6	12.5°	<i>forehand (82-18%)</i>
9C	70% (196-198)	29	35	1.6	12.5°	<i>forehand (82-18%)</i>

Πίνακας 4.29 Παράμετροι γραμμικών αποθέσεων στρώσεως μετάλλου προσθήκης (Πλάκα Α).

Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Παρατηρήσεις
9A	70% (196-198)	29.5	35	1.5	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
10A	70% (185-188)	30	35	1.8	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
11A	75% (195-200)	30.9	35	1.8	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
12A	74% (196-198)	31.6 (3% a.l.c)	35	1.8	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
13A	74% (196-198)	29 (-3% a.l.c)	35	1.8	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
14A	78% (196-200)	30.2 (-5% a.l.c)	35	1.8	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
15A	78% (190-194)	29-30 (-10% a.l.c)	35	2.2	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
16A	83% (203-208)	34 (-15% a.l.c)	35	2.5	12.5°	<i>forehand (100% CO₂)</i>
17A	83% (203-208)	35 (-8% a.l.c)	35	2.5	12.5°	<i>forehand</i>

Πίνακας 4.30 Παράμετροι γραμμικών αποθέσεων στρώσεως μετάλλου προσθήκης (Πλάκα Β).

Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Παρατηρήσεις
13B	70% (200-205)	29.5	35	1.5	12.5°	<i>forehand</i>
14B	77.5% (195-198)	31.5	35	2	12.5°	<i>forehand</i>
15B	80% (200-205)	32-35 (-5% a.l.c)	35	2	12.5°	<i>forehand</i>
16B	84% (200-205)	40-60 (-0.5% a.l.c)	35	2.5	12.5°	<i>forehand</i>
17B	84% (200-205)	35 (-15% a.l.c)	35	2.5	12.5°	<i>forehand</i>
18B	84% (200-205)	35.5 (10% a.l.c)	35	2.5	12.5°	<i>forehand</i>
19B	65% (175-178)	26.8	35	1.6	12.5°	<i>forehand</i>
20B	70% (192-196)	29.5	35	1.6	12.5°	<i>forehand</i>
21B	75% (198-200)	30.5	35	1.6	12.5°	<i>forehand</i>
22B	80% (205-210)	32.5	35	1.6	12.5°	<i>forehand</i>
23B	70% (190-193)	30.2	35	1.7	15°	<i>forehand</i>
24B	70% (190-193)	30.2	35	1.7	20°	<i>forehand</i>

Πίνακας 4.31 Παράμετροι γραμμικών κυματοειδών αποθέσεων προστιθέμενου μετάλλου σε πλάκες χάλυβα FCA.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥ (Linear Weaving BeadOnPlate)						
Bead On Plate	I (Ampere)	V (Volts)	V _a (cm/min)	Arc Length (cm)	φ (deg)	Συχνότητα κυματοειδούς κίνηση (1/min)
1	67.5% (195)	29.2	30	1.7	15°	60
2	67.5% (195)	29.2	30	1.7	15°	90
3	67.5% (195)	29.2	30	1.7	15°	120
4	68% (195)	29.5	25	1.7	15°	75
5	70% (198)	30.2	30	1.7	15°	90
6	70% (198)	30.8	30	1.8	0°	90
7	75% (205)	31.2	25	1.8	17.5°	90
8	75% (205)	31.2	30	1.8	17.5°	90
9	75% (205)	31.2	20	1.8	17.5°	90
10	75% (205)	31.2	20	1.8	17.5°	90
11	80% (213)	31.8	25	1.8	17.5°	90
12	85% (222)	32.9	30	1.8	17.5°	90

Η διεξαγωγή των bead on plate (BoP) έλαβε χώρα, πάνω σε επιφάνειες, που είτε είχαν υποστεί αμμοβολή (*sand blasting*) ή όχι. Η αμμοβολή συνιστά μια κατεργασία της επιφανείας του μετάλλου, η οποία βελτιώνει την ποιότητα της και την απαλλάσσει από τυχόν ακαθαρσίες, έλαια και ανεπιθύμητες αποθέσεις. Η εναπόθεση υλικού συγκόλλησης πάνω στις πλάκες FCA προϋποθέτει την ύπαρξη μιας αμμοβολημένης επιφανείας, προκειμένου η τήξη του προστιθέμενου μετάλλου και η ροή της λίμνης συγκόλλησης να καταστεί συνεχής και χωρίς εμπόδια κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης. Στην αντίθετη περίπτωση, ενδεχόμενες ακαθαρσίες της επιφανείας δύναται να αναμειχθούν με το μέταλλο συγκόλλησης, εντός της λίμνης, και να αλλοιώσουν τη μικροδομή του, επηρεάζοντας επομένως και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης αρνητικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι αποθέσεις των μεμονωμένων στρώσεων, που έγιναν χωρίς πρότερη εφαρμογή αμμοβολής στην επιφάνεια πλακών, παρουσιάζουν μηδαμινή διαφοροποίηση στην όψη ραφής από τις αντίστοιχες, που έγιναν με εφαρμογή αμμοβολής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υψηλή ανοχή και την υψηλή λειτουργικότητα της μεθόδου FCAW στην ύπαρξη ακαθαρσιών.

Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε σε διάταξη κλειστού τύπου του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

4.5.2. Ανάλυση Συμπερασμάτων.

Η πορεία εκπόνησης των αποθέσεων μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου βοήθησε στην κατανόηση των χαρακτηριστικών των συγκολλητικών παραμέτρων καθώς και στην επίδραση έκαστης στην όψη της ραφής. Τα κυριότερα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν για τις γραμμικές αποθέσεις είναι τα εξής:

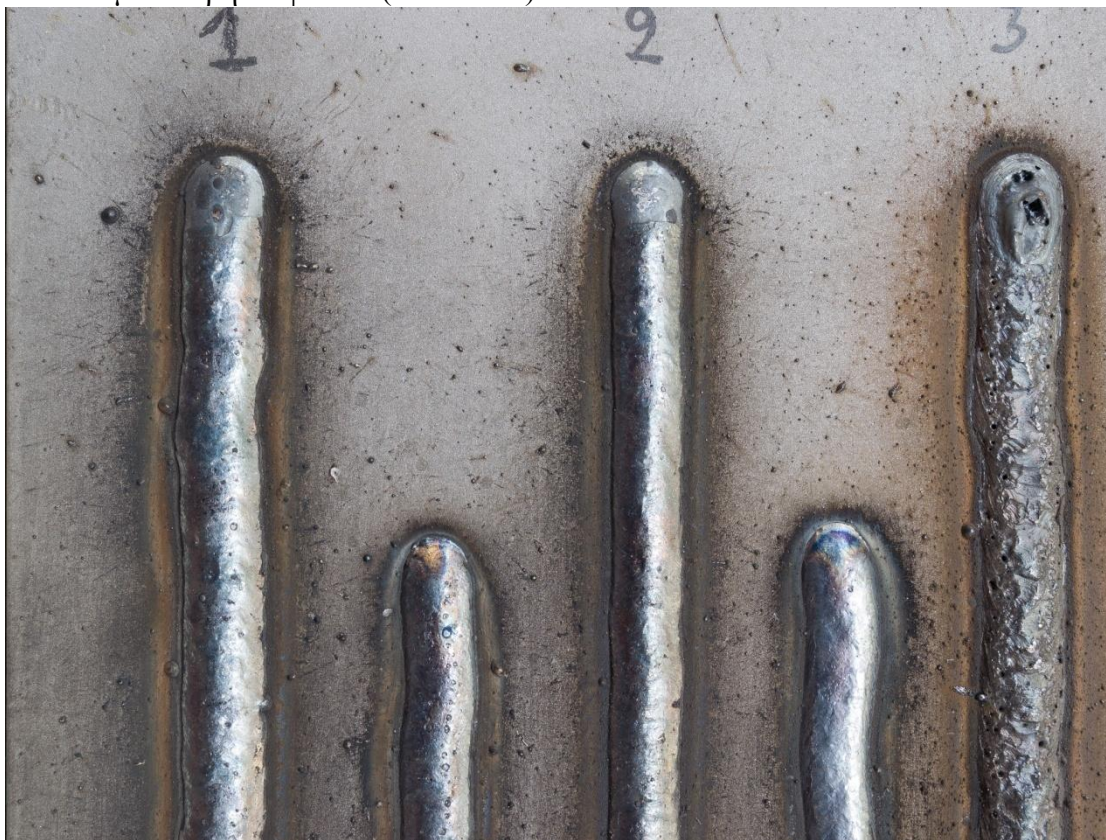
- (1) Η ταχύτητα συγκόλλησης, υπό σταθερές τις έτερες παραμέτρους, επηρεάζει μονοσήμαντα το πλάτος της αποκτωμένης ραφής. Χαμηλές ταχύτητες (της τάξεως των 30 cm/min) δίνουν υψηλότερο πλάτος ραφής από μέσες ταχύτητες (της τάξεως των 40-50 cm/min).



Εικόνα 4.23 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στη μορφή της προκύπτουσας ραφής. Παρουσιάζονται οι 8 ραφές της πλάκας A, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στον πίνακα 4.6.

Η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στο πλάτος ραφής είναι εύλογη. Για την ίδια ένταση ρεύματος, γεγονός που μεταφράζεται σε ίδια ποσότητα εναποτιθέμενου & τηκόμενου υλικού, ο βραχίονας διανύει το μήκος ραφής με υψηλότερη ταχύτητα με άλλα λόγια, σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Άρα, η διάχυση του υλικού εγκαρσώς και εκατέρωθεν της διεύθυνσης συγκόλλησης λαμβάνει μικρότερη έκταση. Η διαφορά του πλάτους ραφής παρατηρείται στις ραφές 1-5 της εικόνας 4.1, όπου η ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνεται βαθμιαία και σταθερά, κατά 5 cm/min, και από 30-50 cm/min. Ομοίως, παρατηρείται και στις ραφές 6-8, όπου η μόνη διαφορά με τις 5 πρώτες ραφές έγκειται στη μικρότερη επιλεγόμενη (κατά 5%) ένταση ρεύματος. Οι παράμετροι, που αφορούν τις ραφές 1 έως 8, παρατίθενται στον πίνακα 4.6 .

- (2) Οι επιλογές προστασίας, τις οποίες παρέχει η μηχανή συγκόλλησης αφορούν τα ποσοστά των μερών του αερίου μείγματος προστασίας. Υφίστανται οι εξής τρεις: 82%-18% Ar-CO₂, 97%-3% Ar-CO₂ και 100% CO₂. Οι επιλογές αυτές φαινομενικά δεν επηρεάζουν τη μορφή συγκόλλησης, καθώς η διάταξη της παροχής του αερίου δεν εσωκλείει μηχανισμό επακριβούς διαχωρισμού του. Επομένως, δύναται να παρέχει αποκλειστικά αέριο μείγμα 82%-18% Ar-CO₂, ανεξάρτητα από την επιλογή προστασίας του χρήστη από τη μηχανή παροχής ισχύος. Ωστόσο, η μορφή των ραφών 1B-2B αποδεικνύει το αντίθετο (εικόνα 4.2). Η επιλογή του 82%-18% Ar-CO₂ είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερο πλάτος ραφής,ελαφρά μεγαλύτερη κυρτότητα καθώς και ασταθέστερο τόξο (**ραφή 1**), συγκριτικά με την επιλογή 100% CO₂ (**ραφή 2**). Η ομαλότητα επιφανείας της ραφής κυμαίνεται σε παρόμοια επίπεδα, με τη ραφή 2 να παρουσιάζει ελαφρά ομαλότερη επιφάνεια (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.24 Επίδραση επιλογών προστασίας της μηχανής συγκόλλησης στην όψη ραφής. Τα χαρακτηριστικά των ενδιαφερόμενων ραφών 1,2,3 παρατίθενται στον πίνακα 4.7 για τις ονομασίες 1B,2B,3B αντίστοιχα.



Εικόνα 4.25 Επίδραση επιλογών προστασίας σε ομαλότητα επιφανείας ραφής, σταθερότητα τόξου και ύπαρξη επιφανειακών σφαλμάτων. Οι ενδιαφερόμενες ραφές 1,2,3 παρατίθενται στον πίνακα 4.7 υπό τις ονομασίες 1B,2B,3B .

Επιπροσθέτως, μελετήθηκε και η περίπτωση της S-FCAW ραφής, δηλαδή της αυτό-προστατευόμενης ραφής συγκόλλησης FCAW (**ραφή 3**). Αρκεί να υπενθυμίσουμε, ότι η αυτό-προστατευόμενη μέθοδος καθίσταται εφικτή, μόνο, υπό την προστασία της σκόνης του πυρήνα του ηλεκτροδίου και χωρίς την ενισχυτική προστασία του αερίου μείγματος. Συνεπώς, αφότου απενεργοποιήσαμε την παροχή του αερίου, διεξαγάγαμε την τρίτη ραφή. Συνάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι, η μεμονωμένη προστασία του πυρήνα κρίνεται πλήρως ανεπαρκής στις απαιτήσεις όψεως της ραφής. Παρατηρείται σημαντική ύπαρξη επιφανειακών πόρων και υψηλή τραχύτητα επιφανείας, οπότε η προστασία αερίου μείγματος κρίνεται επιβεβλημένη. Οι παράμετροι των ραφών 1B-3B παρατίθενται στον πίνακα 4.7 .

- (3) Η τεχνική συγκόλλησης, *forehand* ή *backhand*, η οποία επιλέγεται για τη διεξαγωγή μιας ραφής, συνδράμει ποικιλοτρόπως στη διαμόρφωση της όψης της. Διαπιστώθηκε ότι, η πρόσθια τεχνική δίνει ομαλότερη επιφάνεια ραφής και παρέχει σταθερότερο τόξο συγκόλλησης. Επιπλέον, ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακών πόρων, εν συγκρίσει με την τεχνική *back hand*. Η ακόλουθη εικόνα απεικονίζει τα ανωτέρω πλεονεκτήματα.



Εικόνα 4.26 Επίδραση forehand και backhand τεχνικής στην όψη της ραφής. Η παράθεση των ενδιαφερόμενων χαρακτηριστικών των ραφών 5,6,7,8 γίνεται στον πίνακα 4.7, υπό τις ονομασίες 5B,6B,7B,8B.

Οι ραφές 5B-6B της εικόνας 4.4 έχουν εκτελεστεί με εφαρμογή της τεχνικής backhand, ενώ οι 7B-8B με την πρόσθια τεχνική. Παρατηρείται, εμφανώς, η ύπαρξη των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών της πρόσθιας τεχνικής, όπως και το χαμηλότερο επίπεδο εκτοξεύσεων μετάλλου (spatter). Οι παράμετροι των συγκεκριμένων ραφών παρατίθενται στον πίνακα 4.7 .

- (4) Καίρια παράμετρος, η οποία χρήζει άμεσης διερεύνησης αποτελεί και η γωνία που σχηματίζει το ακροφύσιο με τη διεύθυνση συγκόλλησης. Μελετήθηκαν γωνίες 70° , 80° και 90° . Εξ' αρχής η μελέτη περιορίστηκε σε αυτές τις γωνίες, καθότι συνιστώνται ως το βέλτιστο εύρος γωνιών από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η ραφή 4B έχει διεξαχθεί υπό γωνία 90° , η ραφή 5B υπό γωνία 80° , ενώ η 6B υπό γωνία 70° . Ομοίως, οι ραφές 7B και 8B υπό γωνίες 80° και 70° αντίστοιχα. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η γωνία των 90° παρουσιάζει το λιγότερο σταθερό τόξο. Αντιθέτως, οι γωνίες των 70° και 80° παρουσιάζουν κατανομή απόθεσης υλικού υπό σταθερότερο τόξο, συγκριτικά με την κατακόρυφη γωνία. Η γωνία των 80° έχει ως αποτέλεσμα, ραφή ελαφρά υψηλότερου πλάτους από την 70°

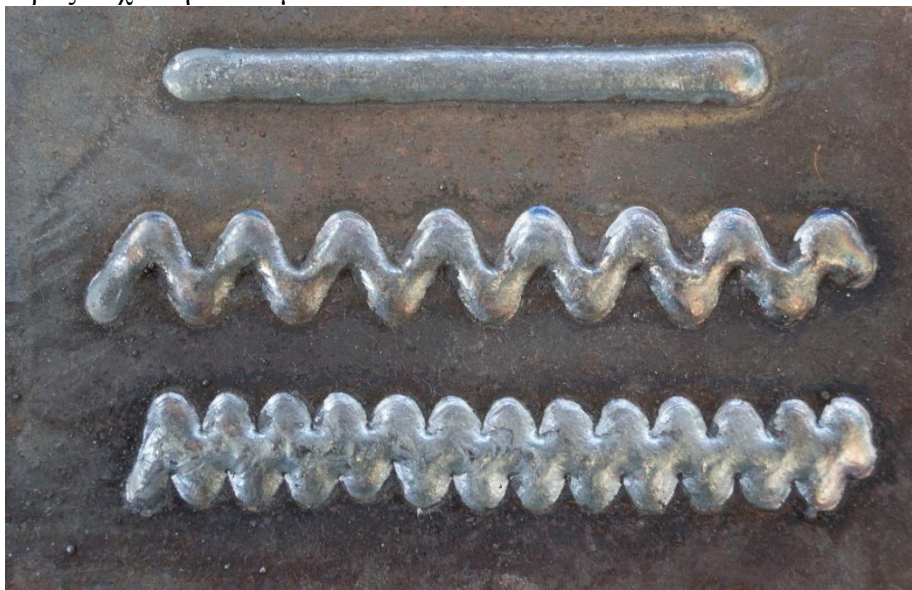
ενώ, όσον αφορά την ομαλότητα της επιφανείας παρουσιάζουν και οι 2 εξίσου καλά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, οι ραφές των 80° εμφανίζουν χαμηλότερη ακτίνα καμπυλότητας από τις αντίστοιχες των 70° . Σε γενικά πλαίσια, οι γωνίες των 70° & 80° παρουσιάζουν αμφοτέρως καλά χαρακτηριστικά όψης ραφής, γεγονός που τις καθιστά άμεσα εφαρμόσιμες. Κατά τη διάρκεια διαδικασίας βελτιστοποίησης, διεξήχθη ένας σημαντικός αριθμός ραφών υπό γωνίες, που εμπίπτουν στο εύρος των 70° - 80° . (πίνακες 4.6-4.11)

- (5) Ακόλουθη ουσιαστική παράμετρος συνιστά η απόσταση του ακροφυσίου από το προς συγκόλλησης τεμαχίο. Μελετήθηκε ένα εύρος αποστάσεων από 10-25 mm. Η κατανόηση της παρούσας συνιστώσας είναι αλληλένδετη με τις παραμέτρους **V** και **I**. Πιο συγκεκριμένα, αρκεί να θεωρήσουμε ότι η απόσταση παίζει τον ρόλο σειριακής αντίστασης. Όταν αυξάνεται η απόσταση υπό σταθερή ένταση ρεύματος, αυξάνεται και η τάση τόξου. Αντίστροφα, όταν υφίσταται μείωση της απόστασης, υπό τη συνθήκη σταθερής έντασης ρεύματος, μειώνεται και η τάση του τόξου. Έχει αναφερθεί, ότι η ένταση του ρεύματος εισάγεται ως ποσοστό της μέγιστης ισχύος της μηχανής συγκόλλησης. Πρέπει, λοιπόν, να προσεχθεί ότι για τις περιπτώσεις διαφορετικών αποστάσεων, ακόμη και αν διατηρήσουμε ίδιο το ποσοστό, το οποίο εκφράζει την ένταση του ρεύματος, υφίσταται αλλαγή της έντασης, ανάλογη της μεταβολής της απόστασης. Πχ οι ραφές 9A-10A του πίνακα 4.9 είναι σχεδόν πανομοιότυπες με τη μόνη διαφορά να έγκειται στην υψηλότερη απόσταση (κατά 0.3cm) της ραφής 10A. Για το ίδιο ποσοστό εντάσεως (70%), το διαρρέον ρεύμα της ραφής 9A ανήλθε στα 196A, ενώ η τιμή ρεύματος, που καταγράφηκε για την ραφή 10A ήταν 185A. Συνοπτικά, ισχύει ότι, αύξηση της απόστασης ακροφυσίου-τεμαχίου συνδράμει σε μείωση του ρεύματος και αύξηση της τάσης. Μείωση της απόστασης έχει ως επακόλουθο αύξηση της έντασης ρεύματος και μείωση της τάσης τόξου. Επιπλέον, υπό σταθερή απόσταση, αύξηση του ποσοστού, που εκφράζει το **I** ισοδυναμεί με ταυτόχρονη αύξηση του **V** και αντίστροφα. Όσον αφορά την όψη της ραφής, αυξημένες τιμές της τάσεως τόξου (30-35V) προσδίδουν πλατύτερες ραφές, χαμηλότερης ακτίνας κυρτότητας, από ότι τάσεις μικρότερες των 30V. Η δυνατότητα A.L.C (arc length correction), που παρέχει η αυτοματοποιημένη διάταξη, βοηθά στην τροποποίηση της τάσης τόξου κατά τον επιθυμητό τρόπο. Η εισχώρηση των τιμών A.L.C κυμαίνεται στο εύρος του -20% έως +20%.

Συναφή συμπεράσματα προέκυψαν και για τις γραμμικές κυματοειδείς αποθέσεις των μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου συγκόλλησης, εκ των οποίων οι σημαντικότερες καταγράφονται ως εξής:

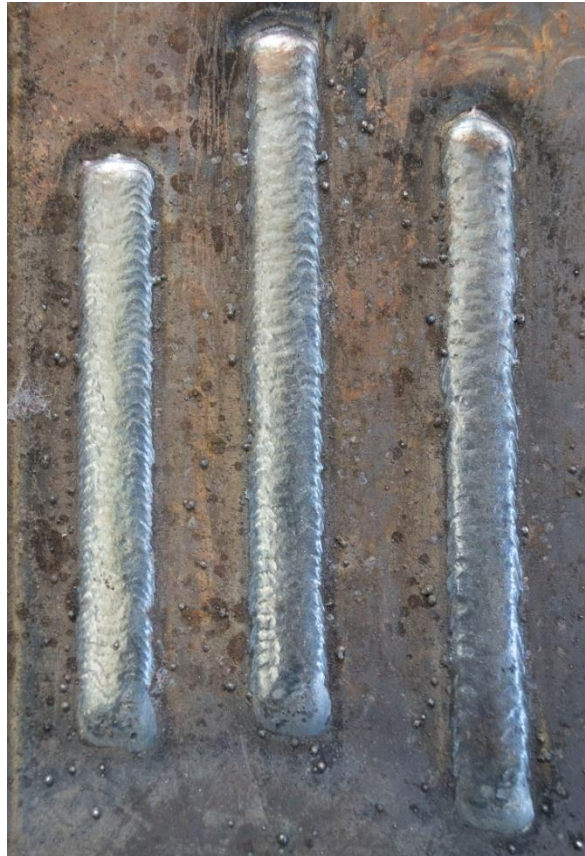
- (1) Η χρήση της κυματοειδούς κίνησης του πυρσού της συγκόλλησης απαιτεί, συνήθως, μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης, εν συγκρίσει με τη γραμμική κίνηση εναπόθεσης υλικού. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ιδιότητα εξαρτάται και διαμορφώνεται, εν μέρει, από την επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, όπως το πλάτος και η συχνότητα της κυματοειδούς κίνησης. Διαπιστώθηκε ότι, το πλάτος κυματοειδούς κίνησης είναι αλληλένδετο με την εκλεγόμενη ταχύτητα υπό την ακόλουθη έννοια. Για ίδιο επιλεγόμενο πλάτος, μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης εξασφαλίζουν καλύτερη διαβροχή της περιοχής της συμβολής κι η προκύπτουσα ραφή χαρακτηρίζεται από καλύτερη ομαλότητα.

- (2) Όσον αφορά τη συχνότητα κυματοειδούς κίνησης, καθορίζει πόσες φορές το λεπτό, ο πυρσός διέρχεται από το πρώτο ορισμένο σημείο της κυματοειδούς κίνησης. Η συγκεκριμένη συνιστώσα επηρεάζει σημαντικά την εναπόθεση του υλικού. Συνάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι υφίσταται ένα βέλτιστο εύρος τιμών συχνοτήτων, εντός του οποίου η εναπόθεση του υλικού κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, αναφορικά με την ποιότητα της όψης της ραφής. Για την ακρίβεια, μελετήθηκε ένα φάσμα τιμών συχνοτήτων από 0.25Hz έως 2.5 Hz. Όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα, συχνότητες της τάξης των 0.25-0.45 Hz έδωσαν ελλιπή εναπόθεση για τις ενδιαφερόμενες ταχύτητες των 30-50 cm/min. Προφανώς, το παρόν πρόβλημα δύναται να επιλυθεί με χαμηλότερες ταχύτητες. Ωστόσο, ελάττωση της ταχύτητας στο επίπεδο των 10-15 cm/min, αναδύει έτερα προβλήματα, όπως υπερβολική προσδιδόμενη θερμότητα στη συγκόλληση και υψηλές παραμορφώσεις. Διαπιστώθηκε ότι, για ένα μέσο ενδιαφερόμενο εύρος ταχυτήτων των 30-40 cm/min, το βέλτιστο εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 1-2 Hz.



Εικόνα 4.27 Κυματοειδείς αποθέσεις πλάτους 15mm για συχνότητα 0.25Hz (μεσαία ραφή) και 0.42Hz (κάτω ραφή).

- Παρατηρούμε την αλλαγή της μορφολογίας στην άκρη της συγκολλητικής ραφής για αύξηση της συχνότητας κυματοειδούς κίνησης (εικόνα 4.6). Όσο αυξάνεται, η όψη της ραφής στα άκρα της ενισχύεται, καθώς η απόσταση των διαδοχικών διακυμάνσεων της εναπόθεσης μειώνεται, με άμεσο αποτέλεσμα η κατανομή του μετάλλου εναπόθεσης να καθίσταται περισσότερο ομοιόμορφη.
- (3) Με εξεταζόμενη την παράμετρο της *forehand* ή *backhand* τεχνικής, αξίζει να σημειώσουμε ότι, έδωσαν σχετικά όμοιες ραφές, με την πρόσθια τεχνική να δίνει ομαλότερη επιφάνεια ραφής και την οπίσθια τεχνική ραφές υψηλότερου πλάτους και μεγαλύτερης κυρτότητας. Για του λόγου το αληθές παρατίθεται η εικόνα 4.7.
- (4) Παράμετροι όπως το ρεύμα, η τάση τόξου, η απόσταση ακροφυσίου και προς συγκόλληση τεμαχίου και η γωνία ακροφυσίου επιδρούν κατά πανομοιότυπο τρόπο με τον αντίστοιχο, που έχει παρατεθεί για την απλή γραμμική κίνηση του πυρσού.



Εικόνα 4.28 Όψη ραφής κυματοειδών αποθέσεων συχνότητας 2Hz, 1.5Hz και 1Hz (αριστερά προς δεξιά).



Εικόνα 4.29 Εναποθέσεις κυματοειδών κινήσεων με πρόσθια (F) και οπίσθια (B) τεχνική.

Σε γενικά πλαίσια, παρατηρήθηκε η ύπαρξη εκτοξεύσεων (spatter) και επιφανειακών πόρων σε ορισμένες, εκ των ραφών μεμονωμένων στρώσεων μετάλλου εναπόθεσης. Σταδιακά, σημειώθηκε σημαντική ελαχιστοποίηση των προαναφερθέντων σφαλμάτων λόγω της παραμετρικής βελτιστοποίησης, που έλαβε χώρα. Η γενεσιουργός αιτία της ελαχιστοποίησης των συγκεκριμένων σφαλμάτων είναι η αύξηση της παροχής προστατευτικού αερίου στη λίμνη συγκόλλησης από 18 lt/min σε 23 lt/min καθώς κι η χρήση των κατάλληλων ταχυτήτων συγκόλλησης. Παρατηρήθηκε ότι, για ταχύτητες άνω των 45 cm/min, το φαινόμενο των εκτοξεύσεων ενισχύεται σημαντικά, ενώ για ταχύτητες της τάξεως των 30-40 cm/min υφίσταται αξιοσημείωτη μείωση του επιπέδου εκτοξεύσεων. Σημαντική παράμετρος αποτελεί, επίσης, και ο ενδεδειγμένος καθαρισμός του ακροφυσίου συγκόλλησης από εκτοξεύσεις, που έχουν επικαθήσει στην εσωτερική επιφάνεια του. Συνίσταται τακτικός καθαρισμός του ακροφυσίου του βραχίονα, μέσω του προγράμματος *clean*, το οποίο έχει αποθηκευτεί στο σκληρό δίσκο της αυτοματοποιημένης διάταξης και δύναται να φορτωθεί, ανά πάσα στιγμή με τη βοήθεια του χειριστηρίου εκμάθησης και προγραμματισμού.

4.5.3. Προετοιμασία βέλτιστων δοκιμίων.

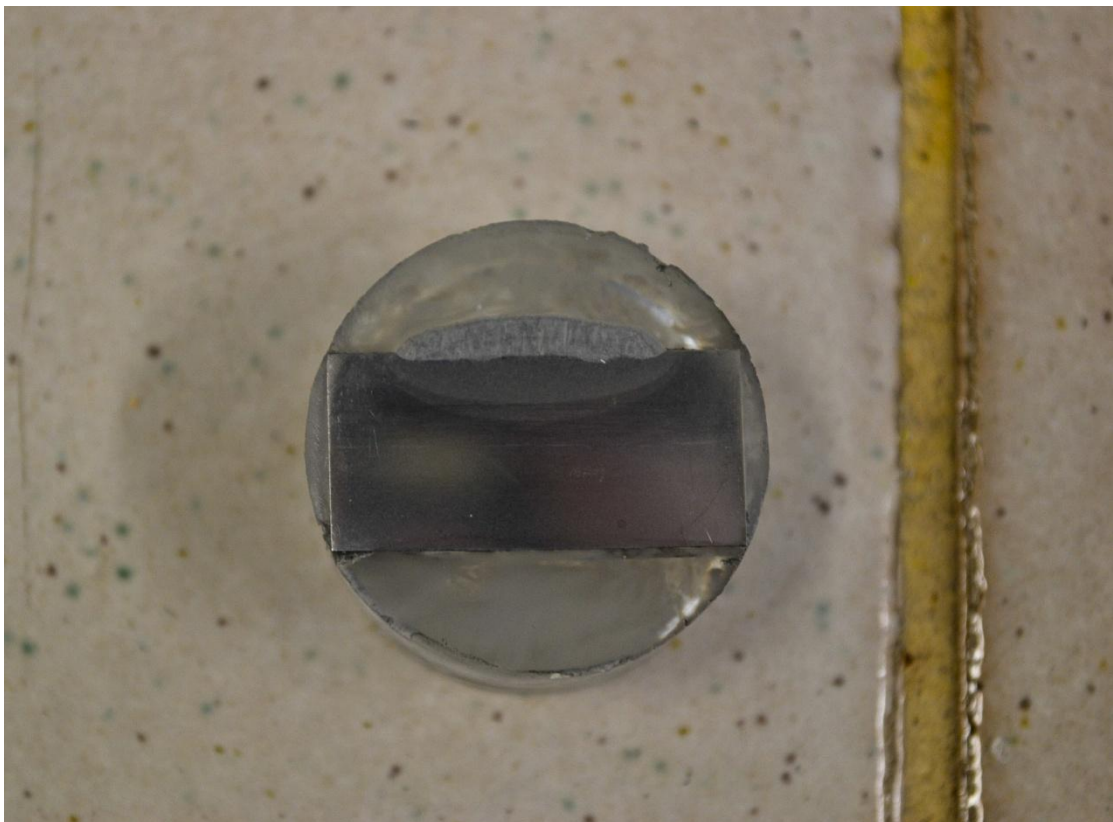
Αρχικά, υφίστανται διαδικασίες κοπής εγκαρσίων τομών των βέλτιστων ραφών συγκόλλησης με τη βοήθεια δισκοτόμου. Πιο συγκεκριμένα, κόπηκαν δυο δοκίμια μήκους 27mm και πλάτους 14mm, εκ των οποίων το ένα προήλθε από τη γραμμική ραφή εναπόθεσης υλικού και το δεύτερο από τη γραμμική κυματοειδή εναπόθεση του μετάλλου συγκόλλησης. Τα συγκολλητικά χαρακτηριστικά των ραφών δίνονται στον πίνακα 4.5. Την κοπή διαδέχεται ο εγκιβωτισμός των βέλτιστων δοκιμίων. Ο εγκιβωτισμός επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση ενός κατάλληλου μείγματος ρητίνης (εποξειδικής) και σκληρυντικής ουσίας, το οποίο στερεοποιείται γύρω από το κάθε δοκίμιο, αφήνοντας ακάλυπτη μόνο την υπό εξέταση επιφάνεια. Η σύσταση του μείγματος ακολουθεί την αναλογία (κατ 'όγκο) 15:2 ml ρητίνης και σκληρυντικής ουσίας, αντίστοιχα. Η διαδικασία του εγκιβωτισμού έως την πλήρη στερεοποίηση του μείγματος διήρκεσε 24 ώρες. Έπειτα, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια του εγκιβωτισμού, καθαρίστηκαν προσεχτικά με απιονισμένο νερό και αιθανόλη για την απομάκρυνση ελαίων και ακαθαρσιών και προετοιμάστηκαν για λείανση. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η προς εξέταση επιφάνεια καθαρίζεται από ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες και πριν τη διαδικασία εγκιβωτισμού, με σκοπό την καλύτερη πρόσφυση του μείγματος πάνω στο δοκίμιο. Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια απεικονίζονται κάτωθεν.

❖ Λείανση.

Η διαδικασία της λείανσης των βέλτιστων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, του οίκου Struers, φθίνουσας σειράς τραχύτητας: P# 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1200, 2400 και 4000 grit. Τα χαρτιά χρησιμοποιούνται μεταβατικά, από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο, ενώ το εκάστοτε χαρτί τοποθετείται σε λειαντική μηχανή του οίκου Struers. Η συγκεκριμένη μηχανή φέρει περιστρεφόμενο δίσκο, πάνω στον οποίο τοποθετούνται τα λειαντικά χαρτιά, ο οποίος προσφέρει επιλογές περιστροφικών ταχυτήτων του εύρους 0-500 rpm. Ταχύτητες της τάξης των 250 rpm θεωρήθηκαν κατάλληλες για τις βέλτιστες εγκάρσιες τομές. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λείανσης παρέχεται τροφοδοσία νερού στο δίσκο, η οποία βοηθά στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων μετάλλου, ρητίνης ή λειαντικού χαρτιού από τη διεπιφάνεια επαφής. Η λείανση δύναται να γίνει είτε μηχανικά ή χειρωνακτικά και προϋποθέτει την επιβολή σταθερής πίεσης πάνω στο δοκίμιο, που επικάθεται στον περιστρεφόμενο δίσκο. Ο χρόνος λείανσης του εκάστοτε δοκιμίου δε συνίσταται να είναι μικρότερος των 3 λεπτών, αλλά ούτε και μεγαλύτερος των 5 λεπτών.



Εικόνα 4.30 Εγκιβωτισμένη εγκάρσια τομή γραμμικής εναπόθεσης μεμονωμένης στρώσης μετάλλου Linear Bead On Plate.



Εικόνα 4.31 Εγκιβωτισμένη εγκάρσια τομή γραμμικής κυματοειδούς εναπόθεσης μεμονωμένης στρώσης μετάλλου Linear Weaving BoP.

Σκοπός της λείανσης είναι η εξάλειψη ενδεχόμενων επιφανειακών ανωμαλιών, που φέρει η επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου, προκειμένου αυτή να καταστεί λεία κι καθαρή. Συνεπώς, κάθε φορά πρέπει να εξαλείφονται οι γραμμές του προηγούμενου χαρτιού, να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η επιφάνεια να διατηρείται επίπεδη, ενώ μετά τη λείανση με το χαρτί P# 4000 η επιφάνεια πρέπει να αποτελείται από ιδιαίτερα εκλεπτυσμένες γραμμές καθώς επίσης, να παρουσιάζει ένα στοιχειώδη καθρεπτισμό. Βέβαια είναι πιθανό, η κυκλική χρήση των λειαντικών χαρτιών να εφαρμοστεί παραπάνω από μια φορά, λόγω ύπαρξης ατελειών της επιφάνειας του δοκιμίου. Εφόσον οι διαδικασίες λείανσης ολοκληρωθούν, τα δοκίμια είναι έτοιμα να στιλβωθούν.

❖ Στίλβωση.

Σκοπός της στίλβωσης συνιστά η εξάλειψη των λειαντικών γραμμών, προκειμένου η επιφάνεια του δοκιμίου να αποκτήσει όψη καθρέπτη. Η επίτευξη της διαδικασίας της στίλβωσης, δηλαδή, έχει ως άμεσο αντίκτυπο μια γυαλιστερή επιφάνεια καθρέπτη. Η στίλβωση πραγματοποιείται σε υφασμάτινους, βελούδινους δίσκους, οι οποίοι με τη σειρά τους προσαρμόζονται πάνω σε βάσεις των περιστροφικών διατάξεων του οίκου Struers. Κατά την περιστροφή των δοκιμίων απλώνεται στους δίσκους ειδική πάστα οξειδίων· κυρίως αλούμινα. Παράλληλα, υφίσταται τροφοδοσία νερού, η οποία βοηθά στην απομάκρυνση υπολειμμάτων μεταλλικής φύσεως και πάστας από την επιφάνεια του δοκιμίου. Η στίλβωση πραγματοποιείται, γενικότερα, σε υψηλότερες στροφές της μηχανής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν 300-350 rpm. Κατά τρόπο όμοιο με τη διαδικασία της λείανσης, χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικά είδη βελούδινων δίσκων, όπου ο έκαστος δίσκος φέρει διαφορετικό μέγεθος λειαντικών σωματιδίων. Η στίλβωση πραγματοποιείται σε δυο στάδια, όσον αφορά τη χρησιμοποιούμενη πάστα οξειδίων. Σε πρώτη φάση, χρησιμοποιείται αλούμινα 1μm, ενώ δευτερευόντως 0.1μm αλούμινα, εξασφαλίζοντας, κατά αυτόν τον τρόπο, ισότιμη τραχύτητα στην τελική στιλβωμένη επιφάνεια.

❖ Χημική προσβολή.

Το στάδιο της χημικής προσβολής είναι απαραίτητο προκειμένου να αποκαλυφθεί η μικροδομή του εξεταζόμενου υλικού στο μικροσκόπιο. Ανάλογα με το ποιες φάσεις προσβάλλει το αντιδραστήριο, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης μικροδομής. Για την σωστή χρήση του αντιδραστήριου απαιτείται γνώση της σύστασης του, του τρόπου χρήσης του, καθώς και των προφυλάξεων που πρέπει να λαμβάνονται. Επίσης, πρέπει να γνωρίζουμε ποιες φάσεις προσβάλλει και πως αυτές χρωματίζονται μετά την χημική προσβολή.

Η χημική προσβολή των βέλτιστων δοκιμίων μεμονωμένων αποθέσεων, έγινε με τη βοήθεια του μείγματος *Nital*. Για την προκειμένη περίπτωση, χαλύβων FCA και μετάλλου εναπόθεσης παρόμοιας χημικής συστάσεως, επιλέχθηκε το προαναφερθέν μείγμα, βάσει του εγχειριδίου «*A metallographer's guide*». Το χημικό αντιδραστήριο *Nital* αποτελείται από τις εξής δυο συνιστώσες:

- Καθαρή Αιθανόλη C₂H₆O.
- Νιτρικό Οξύ HNO₃.

και για αναλογία (%100 κατ' όγκο) 98-2 ml, αντίστοιχα. Εναλλακτική πρόταση για την αναλογία μείγματος αποτελεί η 96-4 ml. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε η πρώτη προτεινόμενη αναλογία.

Επομένως, το χημικό αντιδραστήριο αναδεύεται για τρία λεπτά, προκειμένου να ομογενοποιηθεί η σύσταση του. Τα δοκίμια συγκρατούνται από μεταλλική τσιμπίδα, εμβαπτίζονται στο γυάλινο δοχείο που περιέχει το αντιδραστήριο και παραμένουν για

25 δευτερόλεπτα, μέχρι ότου να εμφανιστεί η μικροδομή των μετάλλων. Στο χρόνο αυτό προστίθεται ,επίσης, το χρονικό διάστημα επίδρασης του αντιδραστηρίου, που μεσολαβεί από την απομάκρυνση του δοκιμίου από το δοχείο, μέχρι τον καθαρισμό του δοκιμίου με αποσταγμένο νερό. Ο συνολικός χρόνος επίδρασης επί του δοκιμίου θεωρείται, λοιπόν, ίσος με 30 δευτερόλεπτα. Όντως, οι εικόνες 4.8-4.9 επιβεβαιώνουν την επιτυχή χημική προσβολή&ανάδειξη της μικροδομής των ενδιαφερόμενων μερών των υπό εξέταση δοκιμίων. Παρατηρούνται, ευδιάκριτα πλέον, οι περιοχές μετάλλου συγκόλλησης, μετάλλου βάσης καθώς και των επιμέρους ζωνών συγκόλλησης. Όπως προαναφέραμε, τα δοκίμια ξεπλένονται σε αποσταγμένο νερό και στεγνώνονται με την βοήθεια στεγνωτήρα για περίπου 1 λεπτό. Εν τέλει, τα δοκίμια δύνανται να υποστούν μεταλλογραφική μελέτη. Αξίζει να επισημανθούν τα εξής στοιχεία για τη χημική προσβολή τους:

- Για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα προσβολής του δοκιμίου, υφίσταται μεγαλύτερη διακριτικότητα του μετάλλου βάσης, αλλά υπάρχει κίνδυνος να «καεί» το μέταλλο συγκόλλησης γεγονός, που καθιστά αδύνατη την παρατήρηση του.
- Μικρότερης διάρκειας προσβολή κάνει ορατό το μέταλλο συγκόλλησης αλλά όχι και το μέταλλο βάσης.
- Το αντιδραστήριο, που χρησιμοποιήθηκε, δεν είναι ιδιαίτερα δραστικό διάλυμα, διότι η συνιστώσα , που επικρατεί σε αυτό είναι η αιθανόλη.

4.5.4. Μεταλλογραφική ανάλυση βέλτιστων δοκιμίων.

Οι εγκάρσιες τομές των βέλτιστων δοκιμίων, έπειτα από τη χημική προσβολή την οποία υπέστησαν, οδηγήθηκαν στο στερεοσκόπιο καθώς και στο οπτικό μικροσκόπιο του οίκου *Leica* ,προκειμένου να παρατηρηθεί η μικροδομή του βασικού μετάλλου, του μετάλλου συγκόλλησης και των επιμέρους ζωνών συγκόλλησης. Το στερεοσκόπιο διαθέτει φακούς μεγέθυνσης x0.63, x0.8, x1, x1.25, x1.6, x2, x2.5, x3.2 και x4. Εν αντιθέσει, το οπτικό μικροσκόπιο διαθέτει φακούς μεγέθυνσης x10, x20, x50 κι x100.

Οι εικόνες 4.10&4.11 παρουσιάζουν ευδιάκριτα τη ζώνη τήξης, το βασικό μέταλλο και τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ).

➤ Μέταλλο Βάσης.

Στο βασικό μέταλλο παρατηρήθηκε φερριτική μήτρα, η οποία διαφαίνεται στις εικόνες 4.12 & 4.13, υπό τη μορφή λευκών περιοχών. Εντός της φερριτικής μήτρας, εγκλείονται οι περιοχές μπαινίτη (μαύρες περιοχές). Παρατηρήθηκε, επίσης, ύπαρξη διδυμών.

➤ Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη.

Στη ΘΕΖ παρατηρείται ενίσχυση της φάσεως του μπαινίτη & περιορισμός της φάσης του φερρίτη· γεγονός εύλογο, καθώς η μέση σκληρότητα της ΘΕΖ είναι υψηλότερη της αντίστοιχης του μετάλλου βάσης.

➤ Ζώνη Τήξης.

Όμοια με τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, στη ζώνη τήξης παρατηρείται περαιτέρω αύξηση της μπαινιτικής φάσης, γεγονός που διαφαίνεται συγκριτικά και στις εικόνες 4.14 και 4.16. Η αύξηση της μπαινιτικής φάσης επιβεβαιώνεται και από αντίστοιχη αύξηση στη σκληρότητα της ζώνης τήξεως.

➤ Ζώνη σύνδεσης.

Η ζώνη σύνδεσης αποτελεί μεταβατική ζώνη μεταξύ της ζώνης τήξης και της ΘΕΖ. Επί της παρούσης ζώνης παρατηρείται η εμφάνιση της δομής Widmanstätten, δηλαδή εμφάνιση φερρίτη βελονοειδούς μορφής. Η παρουσία του φερρίτη Widmanstätten

οδηγεί συνήθως σε μείωση της δυσθραυστότητας, η οποία μπορεί να διαπιστωθεί όμως μόνο με δοκιμή Charpy.



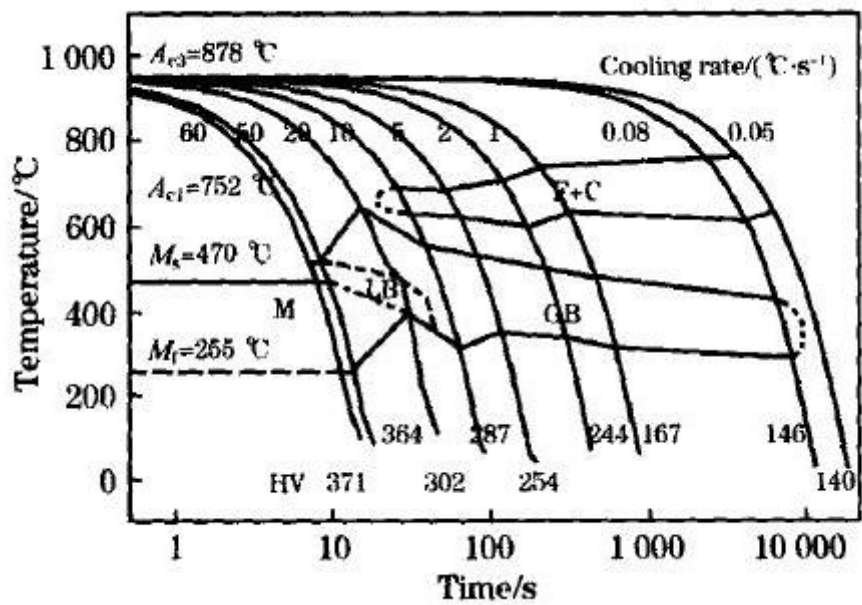
Εικόνα 4.32 Απεικόνιση ,μέσω στερεοσκοπίου, των ζωνών συγκόλλησης της εγκάρσιας τομής της απλής γραμμικής εναπόθεσης μετάλλου BoP.

Σε γενικότερα πλαίσια, η ύπαρξη της φερριτικής και μπαινιτικής δομής της συγκεκριμένης κατηγορίας χαλύβων σε όλες τις μεταλλουργικές ζώνες, δύναται να επιβεβαιωθεί και από διαγράμματα CCT για ULCB (*Ultra Low Carbon Bainitic steels*) χάλυβες, παρόμοιας χημικής σύστασης με την αντίστοιχη των FCA.

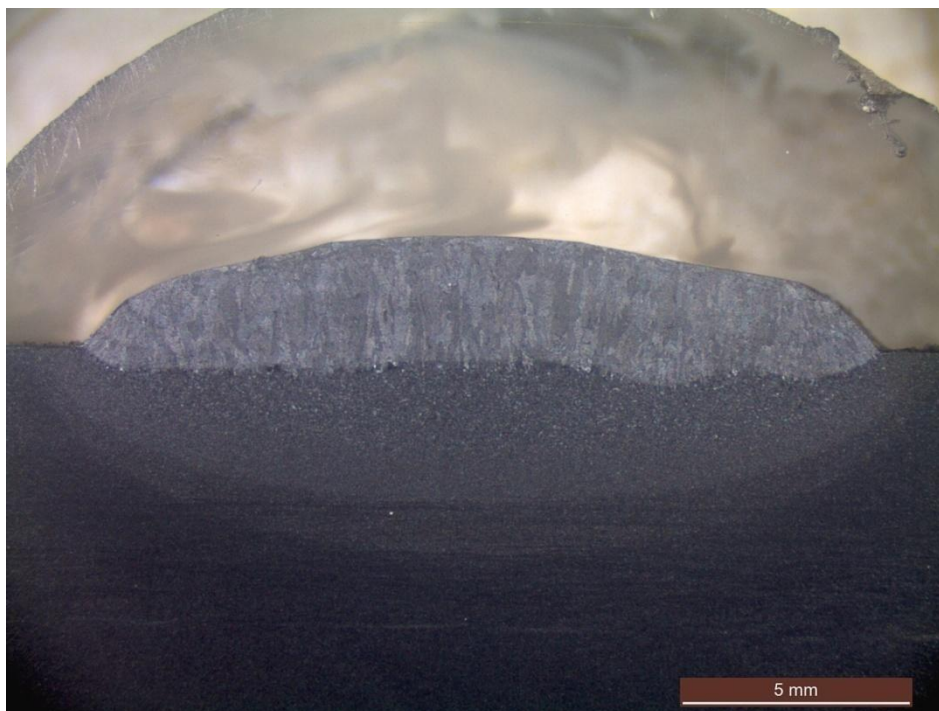
Πίνακας 4.32 Χημική σύσταση ULCB χάλυβα, σε επίπεδα παρόμοια των χαλύβων FCA.

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	V	N	Al
0.048	0.25	1.6	< 0.008	< 0.002	0.12	2.1	0.09	0.03	0.02

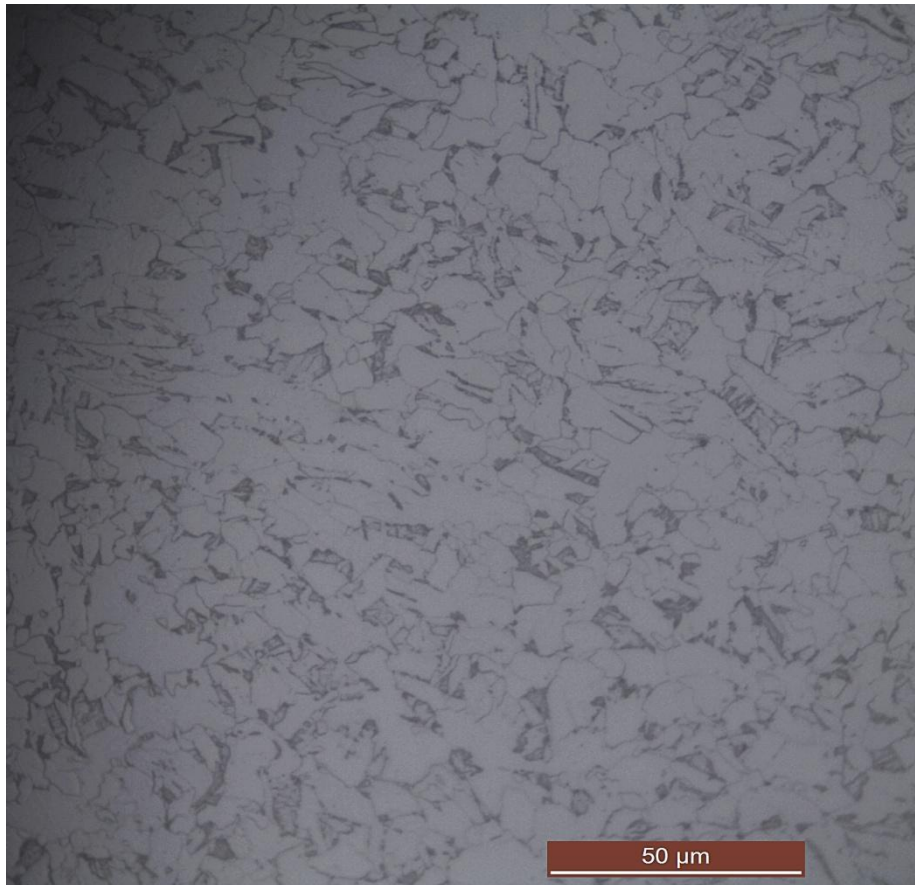
Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη των δοκιμών γραμμικής και γραμμικής κυματοειδούς ραφής παρουσιάζει μέσες μικροσκληρότητες των 201.5 HV_{0.3} και 227.2 HV_{0.3}. Εν αντιθέσει η ζώνη τήξης των δυο βέλτιστων δοκιμών σημειώνει μέσες σκληρότητες της τάξης των 238.8 HV_{0.3} και 227.2 HV_{0.3} αντίστοιχα. Οι αποκλίσεις κυμαίνονται εντός των ορίων του αποδεκτού πειραματικού σφάλματος (≤ 8%). Συνεπώς, βάσει του σχήματος 4.1, για τις μετρούμενες μικρόσκληρότητες ζωνών, παρατηρούμε ότι η αποκτώμενη μικροδομή των χαλύβων FCA αποτελείται από φερριτική και μπαινιτική φάση.



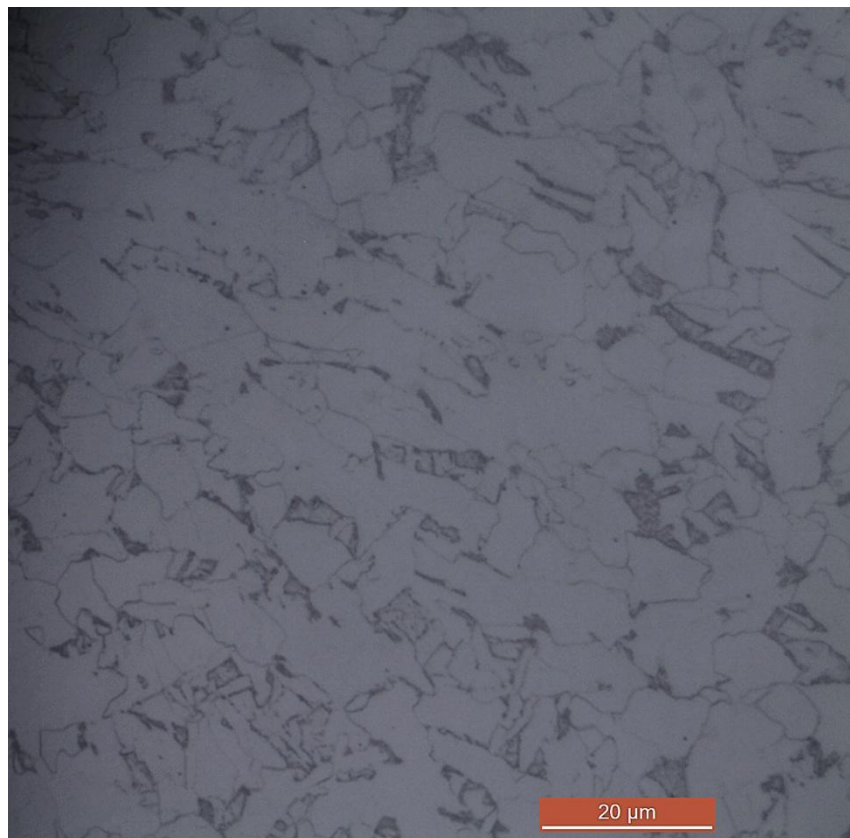
Σχήμα 4.35 Διάγραμμα CCT Χάλυβα ULCB με χημική σύσταση παρατιθέμενη στον πίνακα 4.12 .



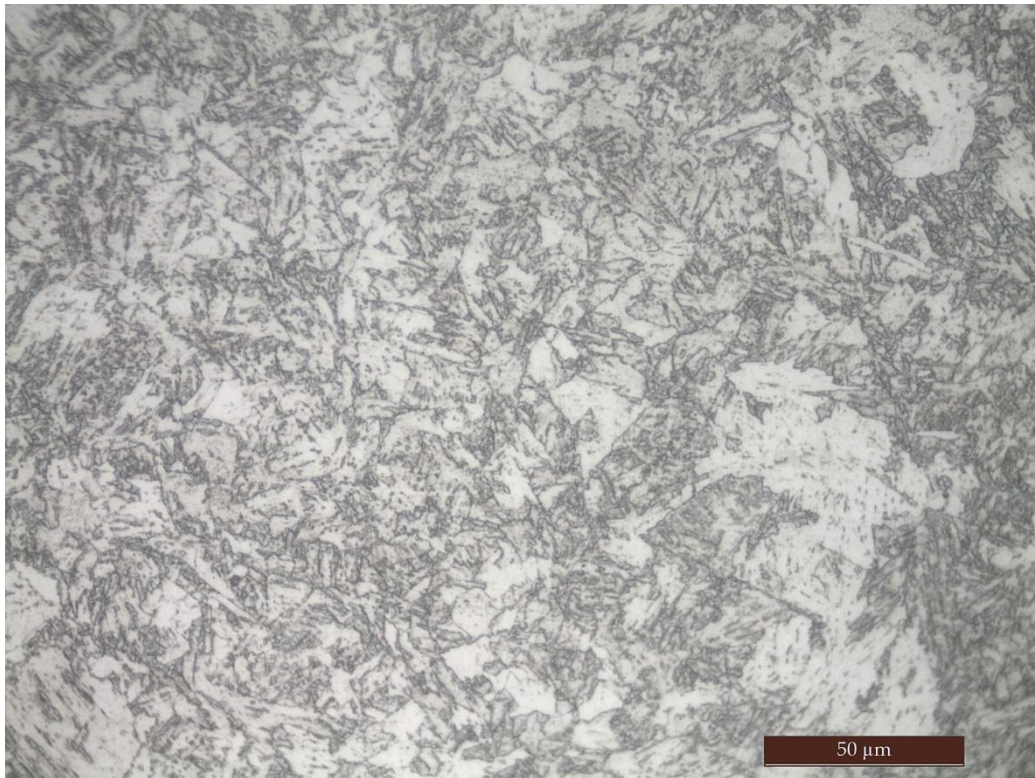
Εικόνα 4.33 Απεικόνιση ,μέσω στερεοσκοπίου, των ζωνών συγκόλλησης της εγκάρσιας τομής της γραμμικής κυματοειδούς εναπόθεσης μετάλλου ΒοΡ.



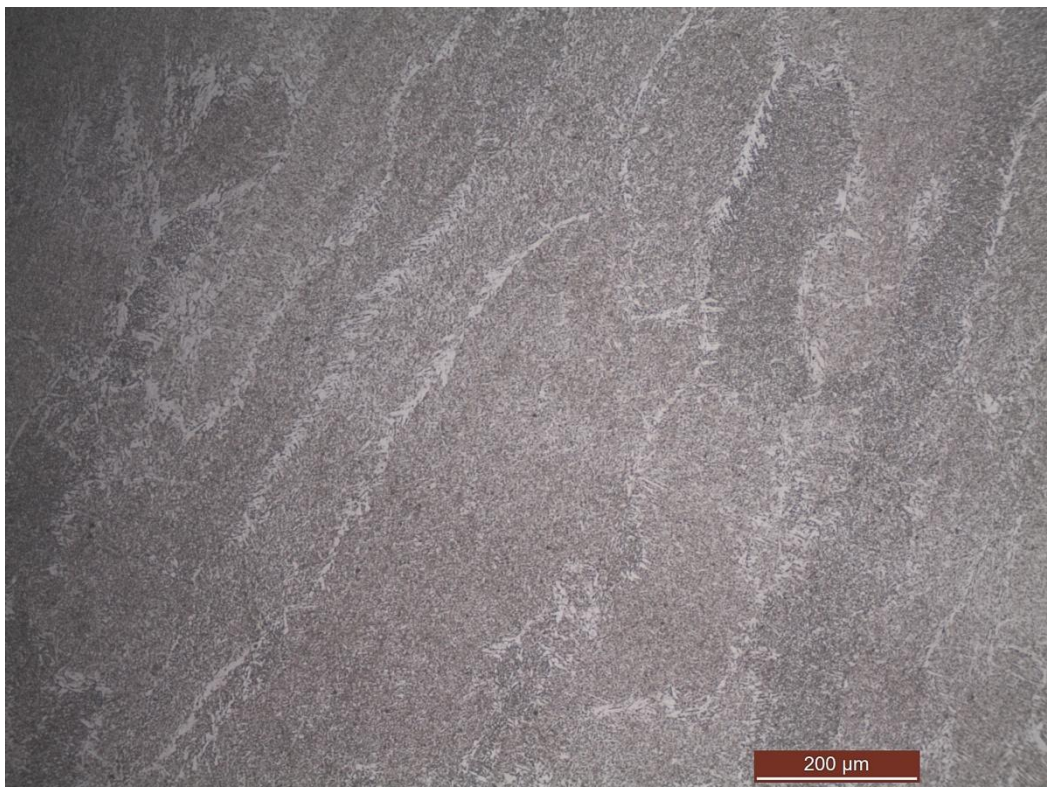
Εικόνα 4.34 Μικροδομή μετάλλου βάσης (χάλυβας FCA).



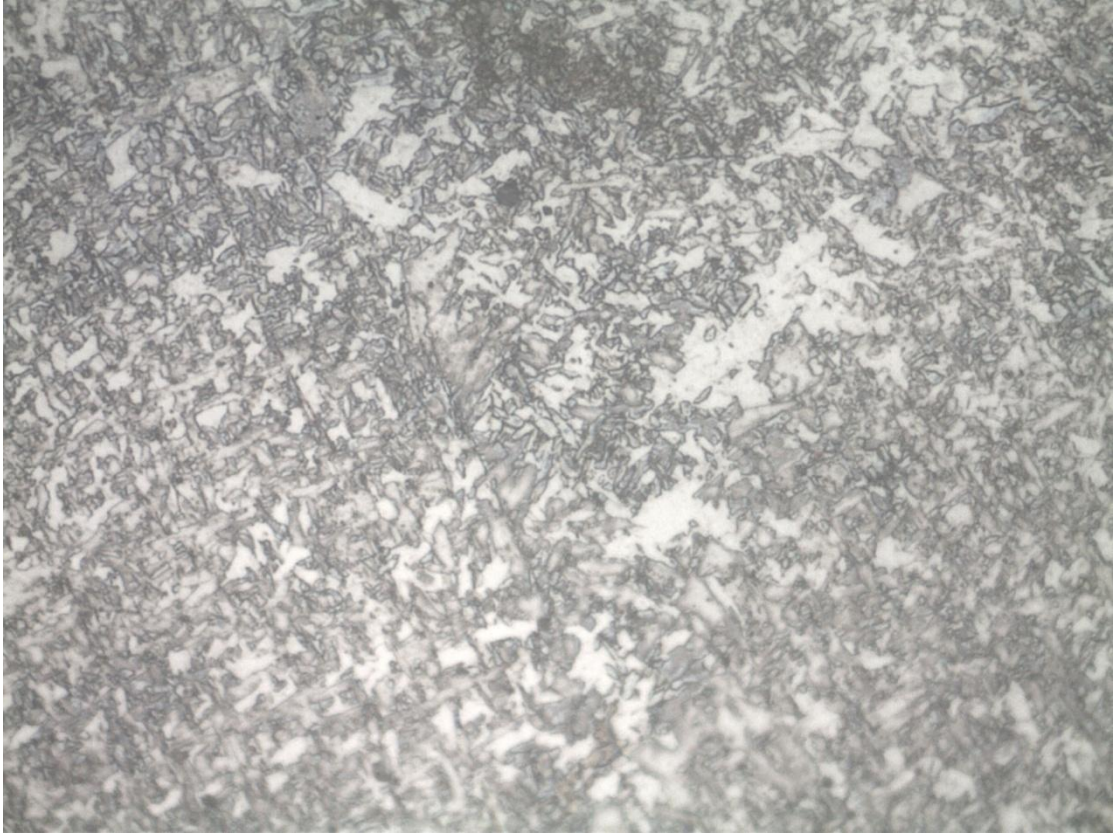
Εικόνα 4.35 Μικροδομή βασικού μετάλλου.



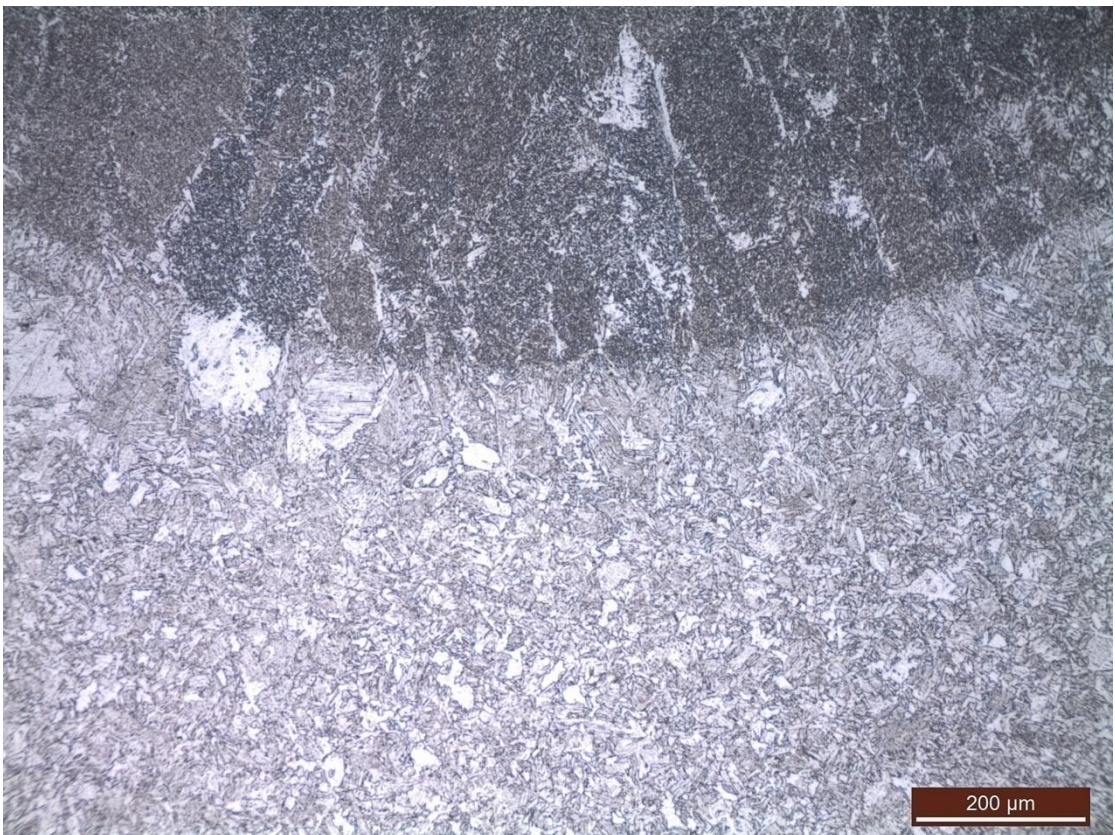
Εικόνα 4.36 Μικροδομή θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης δοκιμίου γραμμικής εναπόθεσης μετάλλου (x50).



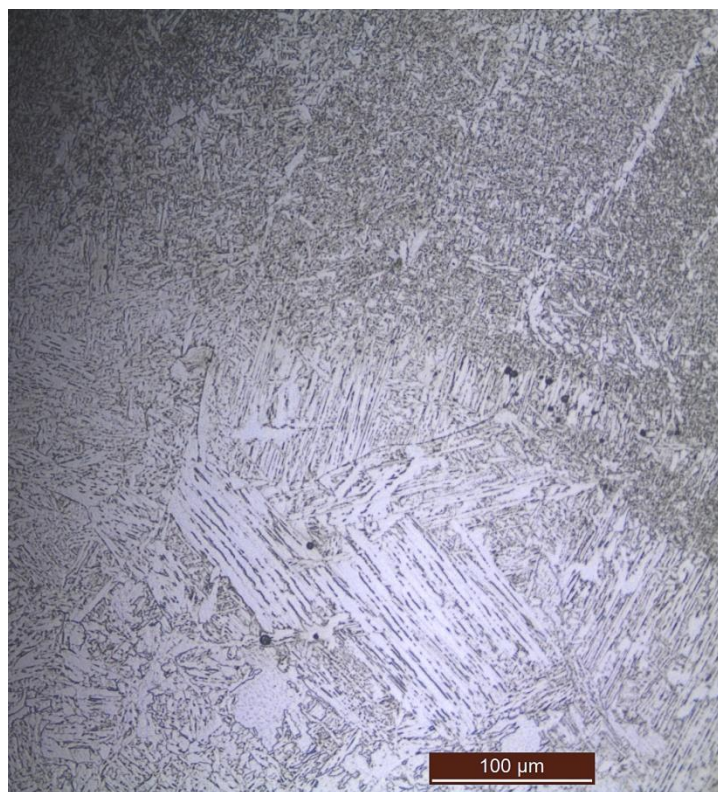
Εικόνα 4.37 Μικροδομή ζώνης τήξης (x10).



Εικόνα 4.38 Μικροδομή ζώνης τήξεως (x100).



Εικόνα 4.39 Ζώνη σύνδεσης δοκιμίου γραμμικής μεμονωμένης απόθεσης.



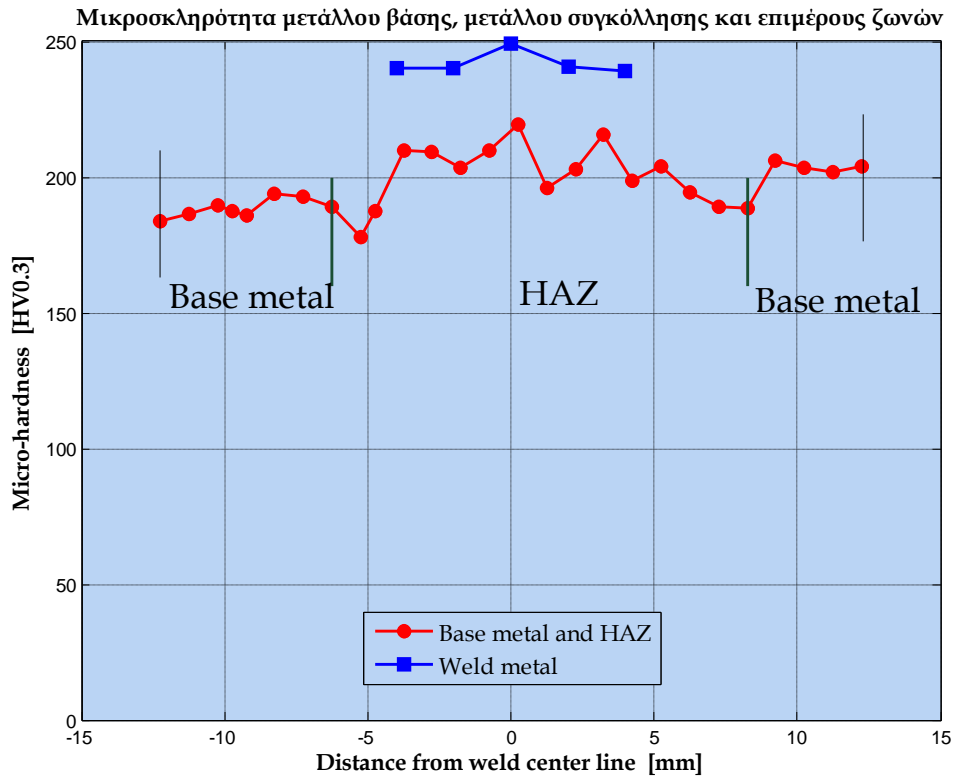
Εικόνα 4.40 Ζώνη σύνδεσης ΘΕΖ και μετάλλου συγκόλλησης- δομή Widmanstätten .

4.5.5. Μικρό-σκληρότητα βέλτιστων δοκιμίων.

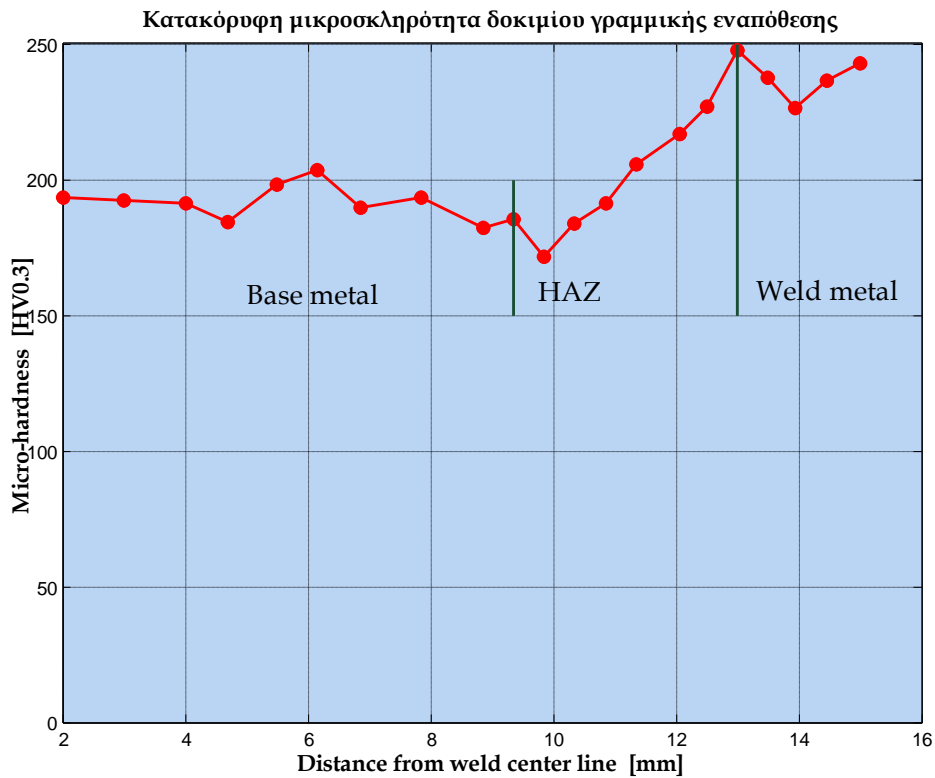
Τα κομμένα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση της μικροσκληρότητας του μετάλλου συγκόλλησης, του βασικού μετάλλου και της ΘΕΖ. Πραγματοποιήθηκαν οριζόντιες μετρήσεις στη ζώνη τήξης, ανά 2 mm και για τα δυο βέλτιστα δοκίμια. Επιπλέον, οριζόντιες μετρήσεις σε κατακόρυφη απόσταση 2 mm από την επιφάνεια των δοκιμίων, οι οποίες περιλαμβάνουν όλο το εύρος των ενδιαφερόμενων ζωνών. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν οριζόντιες μετρήσεις για το μέταλλο βάσης ανά 3.5 mm και 3 mm, για την απλή και την κυματοειδή γραμμική αντίστοιχα. Τέλος, έλαβαν χώρα κατακόρυφες μετρήσεις στο κέντρο του δοκιμίου, ανά 0.5 mm, μέχρι και την εξωτερική επιφάνεια της ζώνης τήξης.

Οι μετρήσεις μικρό-σκληρότητας έγιναν με τη βοήθεια της μεθόδου Vickers. Στην παρούσα μέθοδο χρησιμοποιήθηκε δύναμη 300 gf καθώς και χρόνος επίδρασης ίσος με 20sec. Η μέθοδος Vickers χρησιμοποιεί ως διεισδυτή μια αδαμάντινη πυραμίδα, τετραγωνικής βάσης και γωνίας κορυφής 136°.

Παρατηρούμε ότι, για τη βέλτιστη γραμμική ραφή εναπόθεσης BoP, η ζώνη τήξης παρουσιάζει την υψηλότερη σκληρότητα. Καθίσταται σημαντικά μεγαλύτερη της σκληρότητας του μετάλλου βάσης. Η κόκκινη καμπύλη του διαγράμματος 4.1 αναφέρεται σε οριζόντιες σκληρομετρήσεις που λαμβάνουν χώρα 2mm κάτω από την επιφάνεια της πλάκας FCA και που συμπεριλαμβάνουν τις περιοχές του μετάλλου βάσης και της ΘΕΖ. Κατά τη μετάβαση από τη ζώνη του βασικού μετάλλου στη ζώνη ΘΕΖ παρατηρείται μικρή πτώση της σκληρότητας και άμεση άνοδος στις υψηλότερες τιμές, στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου. Ομοίως, σημειώνεται ελάττωση της σκληρότητας και κατά τη μετάβαση από την κεντρική περιοχή του δοκιμίου προς την περιοχή του μετάλλου βάσης.



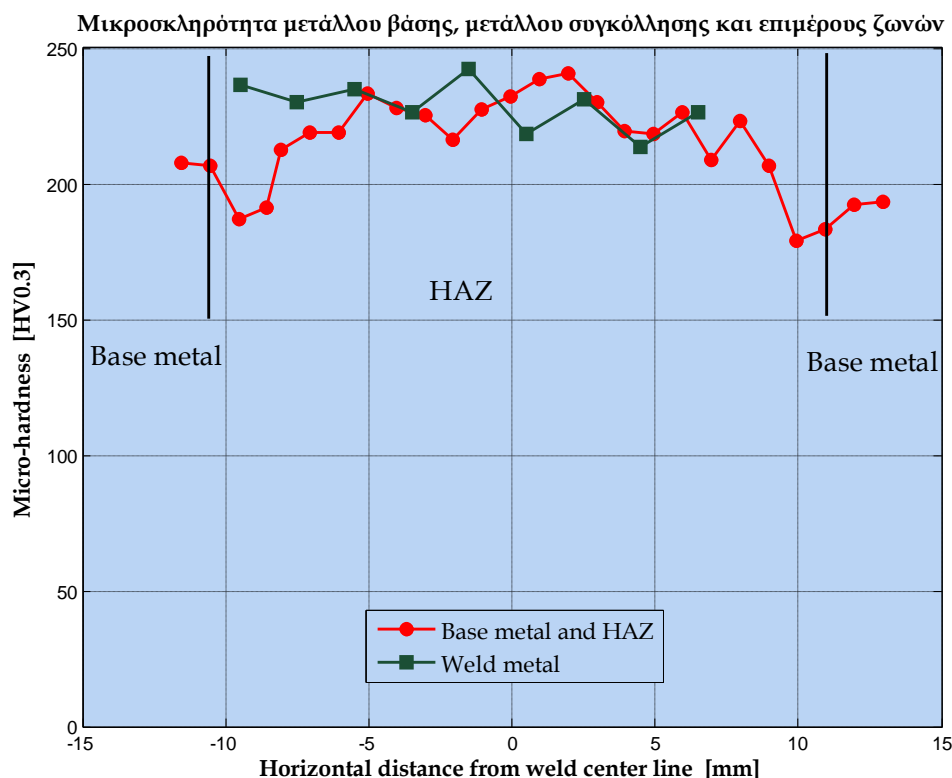
Διάγραμμα 4.2 Οριζόντιες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας για τη βέλτιστη γραμμική ραφή ΒοΡ.



Διάγραμμα 4.3 Κατακόρυφες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας για τη βέλτιστη γραμμική ραφή ΒοΡ.

Ακολουθώς, όσον αφορά τις κατακόρυφες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας ισχύουν τα εξής: η σκληρότητα του βασικού μετάλλου διατηρείται σε σταθερά επίπεδα (≈ 190 HV_{0.3}) με μικρές αποκλίσεις. Στην περιοχή των 9.5 mm, η οποία συμπίπτει με την έναρξη της ΘΕΖ του δοκιμίου, υφίσταται μια μικρή πτώση της μικροσκληρότητας, την οποία διαδέχεται σταδιακή άνοδος της μικροσκληρότητας μέχρι και το σημείο σύνδεσης της ΘΕΖ με το μέταλλο συγκόλλησης. Από το προαναφερθέν σημείο μέχρι και το μέγιστο κατακόρυφο σημείο καμπυλότητας της ραφής, η μικρό-σκληρότητα παραμένει σε υψηλά επίπεδα, της τάξεως των 225-245 HV_{0.3}.

Παρόμοια μελέτη κατέστη εφικτή και για τη βέλτιστη γραμμική κυματοειδή ραφή εναποθέσεως BoP. Όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα 4.3, η μικρό-σκληρότητα του μετάλλου βάσης διατηρείται σε σταθερά επίπεδα της τάξεως των 180-190 HV_{0.3} για όλο το εξεταζόμενο μήκος. Οι οριζόντιες μετρήσεις στη ζώνη τήξεως εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές, της τάξεως των 220-240 HV_{0.3}, για το εξεταζόμενο πλάτος ραφής. Όσον αφορά τις γραμμικές μετρήσεις της κόκκινης καμπύλης, μας υποδεικνύουν ότι, εκατέρωθεν της ΘΕΖ στις περιοχές σύνδεσης με το μέταλλο βάσης υφίσταται πτώση της μικρό-σκληρότητας. Η περιοχή της ΘΕΖ, που εντοπίζεται κάτω από τη ραφή εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές μικρό-σκληρότητας, που κυμαίνονται σε ίσα επίπεδα με τις αντίστοιχες του μετάλλου συγκόλλησης.

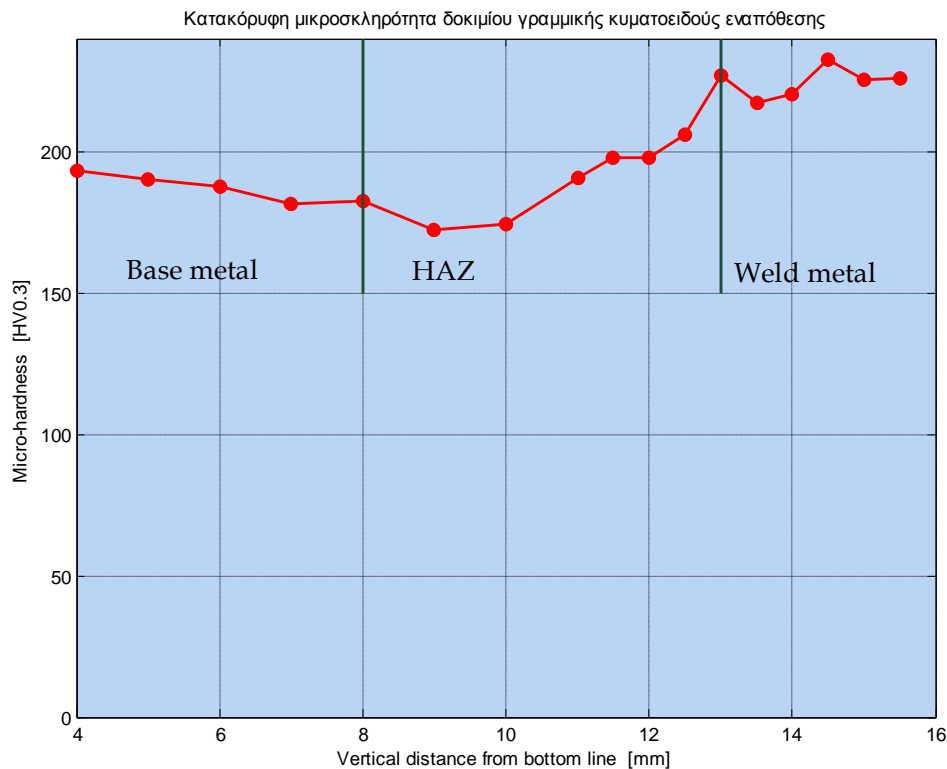


Διάγραμμα 4.4 Οριζόντιες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας για τη βέλτιστη γραμμική κυματοειδή ραφή BoP.

Οι κατακόρυφες μετρήσεις μικροσκληρότητας της γραμμικής κυματοειδούς ραφής παρουσίασαν πανομοιότυπη συμπεριφορά με τις αντίστοιχες μετρήσεις της απλής βέλτιστης γραμμικής ραφής BoP. Οι τιμές του μετάλλου βάσης διατηρούνται σε ίδια επίπεδα, με τα παρατιθέμενα στα διαγράμματα 4.1-4.3, εμφανίζοντας παράλληλα μια ελαφρά πτωτική τάση μέχρι τα 8.5 mm, όπου και ξεκινά η Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Μετέπειτα, παρατηρείται απότομη άνοδος της μικρό-σκληρότητας μέχρι και το μέγιστο κατακόρυφο σημείο καμπυλότητας της ραφής. Αναφορικά, οι μέγιστες τιμές

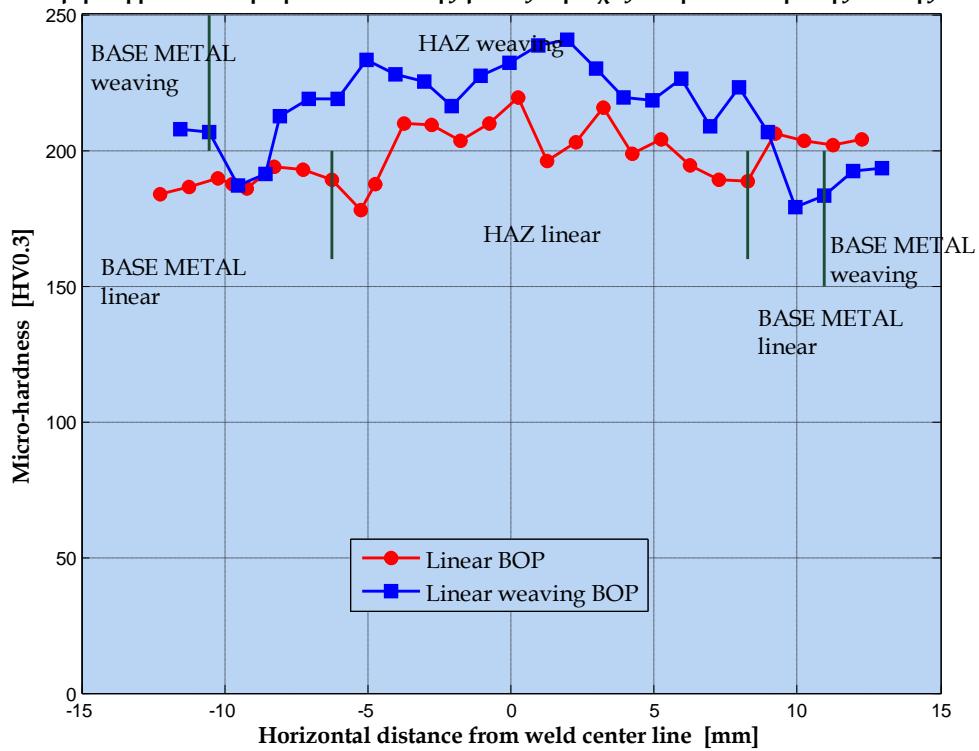
μικρό-σκληρότητας παρατηρούνται στη σημείο σύνδεσης της ζώνης τήξης με τη ΘΕΖ και στην περιοχή του προστιθέμενου μετάλλου (ζώνη τήξης).

Επιπροσθέτως, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για την απλή γραμμική και την γραμμική κυματοειδή εναπόθεση μεμονωμένης στρώσης μετάλλου συγκόλλησης. Το διάγραμμα 4.5 παρουσιάζει την κατανομή των οριζόντιων σκληρομετρήσεων για τα δοκίμια των βέλτιστων ραφών. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν οριζόντια και σε κατακόρυφη απόσταση 2mm από την επιφάνεια των δοκιμίων. Η κατανομή των μετρήσεων αντικατοπτρίζει την ίδια συμπεριφορά για τις δυο ραφές. Εκατέρωθεν της ΘΕΖ, στην περιοχή του μετάλλου βάσης η σκληρότητα διατηρείται σε σταθερά επίπεδα. Στις περιοχές διασύνδεσης του μετάλλου βάσης με τη ΘΕΖ, παρατηρείται τοπική μείωση της μικρό-σκληρότητας και ακόλουθη άνοδος της για την υπόλοιπη περιοχή της ΘΕΖ. Προφανώς, η έκταση των περιοχών μέγιστης μικρό-σκληρότητας των δυο δοκιμίων δε συμπίπτει, λόγω του διαφορετικού πλάτους ραφής των βέλτιστων δοκιμίων.

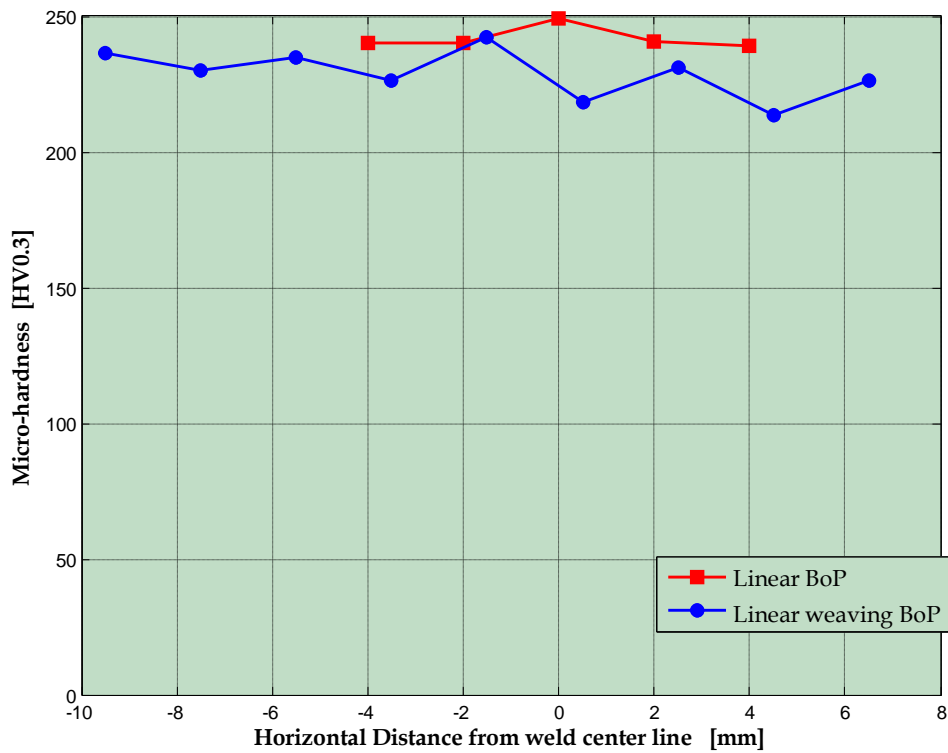


Διάγραμμα 4.5 Κατακόρυφες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας για τη βέλτιστη γραμμική κυματοειδή ραφή BoP.

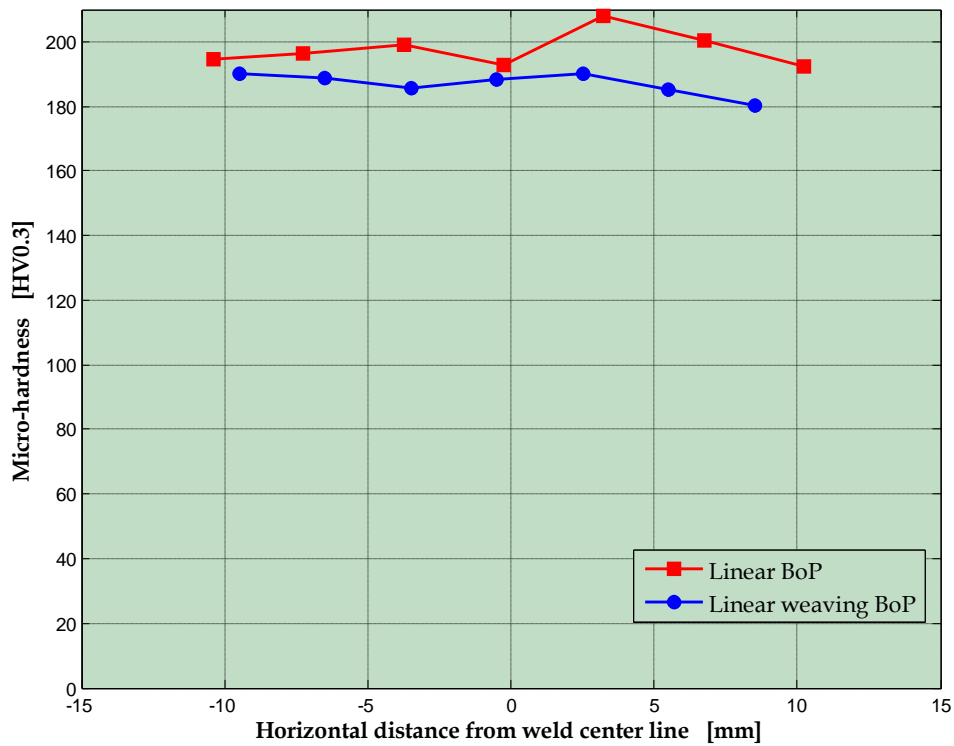
Σύγκριση βέλτιστων ραφών εναπόθεσης για τις περιοχές του μετάλλου βάσης και της ΘΕΖ



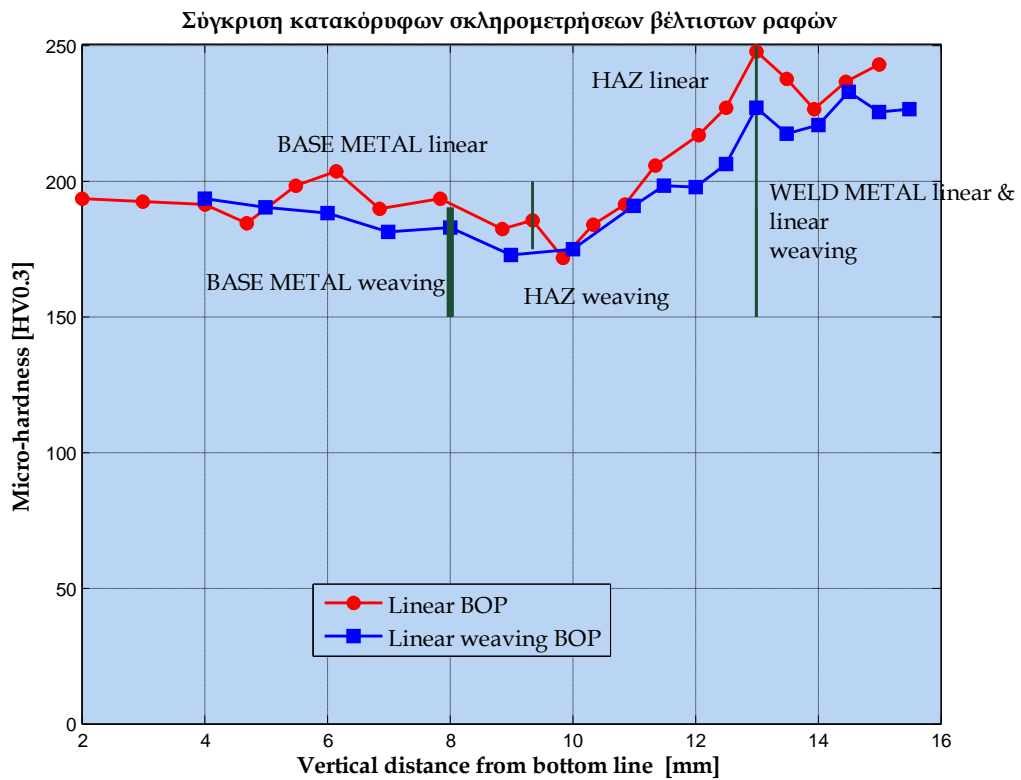
Διάγραμμα 4.6 Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων σκληρομετρήσεων για γραμμική και γραμμική κυματοειδή κίνηση.



Διάγραμμα 4.7 Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων σκληρομετρήσεων του μετάλλου συγκόλλησης για γραμμική και γραμμική κυματοειδή κίνηση.



Διάγραμμα 4.8 Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων σκληρομετρήσεων του μετάλλου βάσης για γραμμική και γραμμική κυματοειδή κίνηση.



Διάγραμμα 4.9 Συγκριτικά αποτελέσματα κατακόρυφων σκληρομετρήσεων για γραμμική και γραμμική κυματοειδή κίνηση.

Επιπλέον, κατατίθενται συγκριτικά διαγράμματα των κατανομών σκληρότητας του μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης (ζώνη τήξης) των βέλτιστων ραφών BoP. Όσον αφορά την κατανομή σκληρότητας της ζώνης σύνδεσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά και για τις δυο ραφές, με την γραμμική εναπόθεση μεμονωμένης στρώσεως (Linear BoP) να εμφανίζει παρόμοια τάξης μεγέθους, τιμές μικρό-σκληρότητας ($\approx 240 \text{ HV}_{0.3}$ έναντι $\approx 230 \text{ HV}_{0.3}$) και εντός των ορίων του αποδεκτού πειραματικού σφάλματος. Όμοια συμπεράσματα συνάγονται και για την κατανομή σκληρότητας του μετάλλου βάσης. Η σταθερότητα χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά και των δυο βέλτιστων ραφών, καθ' ότι δεν υφίστανται σημαντικές αποκλίσεις, κατά το μήκος εκτέλεσης των μετρήσεων. Η απλή γραμμική ραφή εναπόθεσης υλικού, παρουσιάζει μέση τιμή σκληρότητας, της τάξης των $197.7 \text{ HV}_{0.3}$, εν αντιθέσει με τη γραμμική κυματοειδή ραφή απόθεσης υλικού, η οποία παρουσιάζει μια μέση τιμή σκληρότητας των $187 \text{ HV}_{0.3}$.

Εν κατακλείδι, κατατίθεται η κατακόρυφη συγκριτική κατανομή σκληρότητας των βέλτιστων ραφών. Οι προκύπτουσες κατανομές προσδιορίζουν ένα πανομοιότυπο μηχανισμό συμπεριφοράς. Αναλυτικότερα, η μικρό-σκληρότητα διατηρείται σταθερή μέχρι τη περιοχή σύνδεσης του μετάλλου βάσης με τη ΘΕΖ, παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις, που μπορούν να παραβλεφθούν. Ακολούθως, κατά την εισχώρηση στη ΘΕΖ, υφίσταται μικρή πτώση της μικρό-σκληρότητας, την οποία διαδέχεται άνοδος των τιμών μέχρι και την υψηλότερη τελική μέτρηση. Αξίζει να επισημανθεί ότι, και οι δυο ραφές παρουσιάζουν τη μέγιστη μικρό-σκληρότητα στο σημείο μετάβασης από τη ΘΕΖ στη ζώνη τήξης, καθώς και στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της ραφής. Η απλή βέλτιστη γραμμική ραφή εμφανίζει την υψηλότερη μετρούμενη τιμή μικρό-σκληρότητας ($247.7 \text{ HV}_{0.3}$).

4.6. Διεξαγωγή Συγκολλήσεων δοκιμών FCA.

Το παρόν υποκεφάλαιο πραγματεύεται τη διεξαγωγή και τη λεπτομερή μελέτη των συγκολλήσεων πλακών χάλυβα FCA. Η συγκόλληση των δοκιμών διενεργήθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου FCAW. Ομοίως με την § 4.5, τη συγκολλητική πορεία ακολούθησαν οι διαδικασίες κοπής, εγκιβωτισμού, λείανσης, στίλβωσης, χημικής προσβολής καθώς και μακροσκοπικής και μικροσκοπικής ανάλυσης των βέλτιστων συγκολλήσεων. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικρό-σκληρότητας του μετάλλου βάσης, του μετάλλου συγκόλλησης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης των βέλτιστων δοκιμών.

Όπως έχει προαναφερθεί, τα ελάσματα με διαστάσεις $480 \times 380 \times 13 \text{ mm}^3$ υπέστησαν διαδικασίες κοπής, λοξοτομής και αμμοβολής, προτού συγκολληθούν. Εν τέλει, πραγματοποιήθηκαν 5 συγκολλήσεις για ελάσματα διαστάσεων των οικογενειών $375 \times 115 \times 13 \text{ mm}^3$, $185 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$ και $220 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$, εκ των οποίων οι 2 εμπίπτουν στη πρώτη οικογένεια, οι άλλες 2 στη δεύτερη και η τελευταία στη 3^η οικογένεια διαστάσεων. Χάριν βελτιστοποίησης, μελετήθηκαν και παρατίθενται, ακολούθως, οι τρεις εκ των πέντε συγκολλητικών διαδικασιών. Περιλαμβάνονται λοιπόν, οι εξής συγκολλητικές πορείες:

- ❖ Συγκόλληση δοκιμών Σειράς Α για ελάσματα της οικογενείας $220 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$.
- ❖ Συγκόλληση δοκιμών Σειράς Β για ελάσματα της οικογενείας $185 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$.
(Η συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριλαμβάνει δυο συγκολλητικές διαδικασίες των ελασμάτων της παρούσης οικογενείας διαστάσεων.)

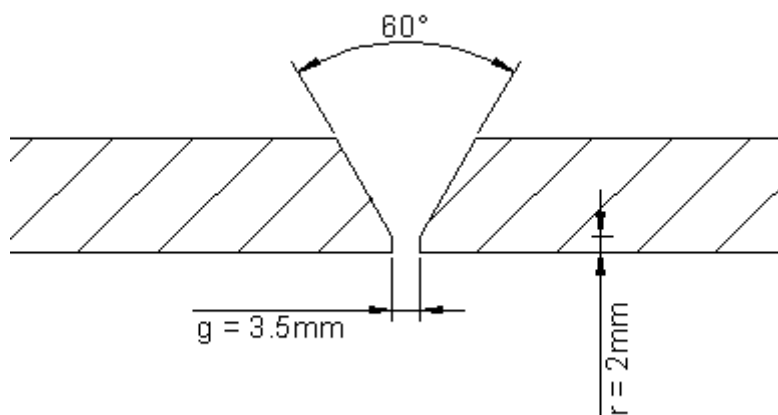
Η διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης συνέδραμε τα μέγιστα στην πορεία μελέτης των συγκολλητικών διαδικασιών. Κατέστη εφικτή η έμπρακτη εφαρμογή των

κατάλληλων τιμών των συγκολλητικών παραμέτρων, η εμπειρική προσαρμογή στις εκάστοτε απαιτούμενες περιστάσεις και η αποφυγή εμφάνισης τυπικών σφαλμάτων.

4.6.1. Προετοιμασία Δοκιμίων.

Αρχικά, θα παρατεθεί διεξοδική περιγραφή της προετοιμασίας των δοκιμίων των δυο σειρών για την εκτέλεση της συγκόλλησης. Εν συνεχεία, θα κατατεθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων της πορείας εκπόνησης της. Επιπροσθέτως, θα συνταχθεί μια πλήρης μικροσκοπική μεταλλογραφική ανάλυση, η οποία θα αφορά τη μικροδομή της ζώνης τήξης, της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και του μετάλλου βάσης. Εν τέλει, θα παρουσιαστεί η γραφική κατανομή της μικροσκληρότητας των ανωτέρω ζωνών και θα παρατεθούν, όλα τα προς ανάλυση, συμπεράσματα.

Για την παρούσα συγκολλητική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα FCA με διαστάσεις $220 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$ και $185 \times 120 \times 13 \text{ mm}^3$. Το σχετικά υψηλό πάχος των ελασμάτων δεν ευνοεί τη συγκόλληση κλειστής (*closed butt or square groove*) ή ανοιχτής (*open square butt or open square groove weld*) συμβολής. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε η κατεργασία των ακμών των προς συγκόλληση τεμαχίων σε διαμόρφωση **V**, προκειμένου να καταστεί ευκολότερη και πληρέστερη η διείσδυση του υλικού συγκόλλησης στη συμβολή. Η ανωτέρω διαδικασία ονομάζεται λοξοτομή και απεικονίζεται στην κάτωθι εικόνα. Για την αποφυγή λεπτών ακμών διαμορφώνεται και αυχένας μήκους $r = 2 \text{ mm}$. Η γωνία λοξοτόμησης για το κάθε τεμάχιο είναι 30° , επομένως η συνολική γωνία ϕ λοξοτόμησης της ενδιαφερόμενης συμβολής ισούται με $\phi = 60^\circ$.



Εικόνα 4.41 Διαμόρφωση V των προς συγκόλληση τεμαχίων της σειράς A.

Οι τιμές των ϕ , g και r εξαρτώνται από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων, τη θέση συγκόλλησης και το αν η συγκόλληση γίνεται από τη μία ή και τις δυο πλευρές. Όποτε, βάσει των υποδείξεων του AWS, και για έλασμα πάχους 13 mm και μονής **V** διαμόρφωσης επιλέγονται οι ανωτέρω τιμές. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου ανοίγματος της ρίζας, $g=3.5 \text{ mm}$ κρίνεται επιβεβλημένη η χρήση κεραμικής επικάλυπτρας, η οποία εξασφαλίζει ικανοποιητική εναπόθεση τηγμένου μετάλλου στη ρίζα, συνδράμοντας έτσι στην επαρκή και όχι υπερβολική ενίσχυση της. Τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης των ελασμάτων της σειράς παρατίθενται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.33 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά διαμόρφωσης των δοκιμών της σειράς Α.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΕΙΡΑΣ Α & ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 220x120x13 mm³			
Διαστάσεις Δοκιμίου	Μήκος Δοκιμίου (mm)	Πλάτος Δοκιμίου (mm)	Πάχος δοκιμίου (mm)
	220	120	13
Διαμόρφωση ακμών	Γωνία Διαμόρφωσης ϕ (°)	Αυχένας r (mm)	Άνοιγμα g (mm)
	60°	2	3.5

Πίνακας 4.34 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά διαμόρφωσης των δοκιμών της σειράς Β.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΕΙΡΑΣ Β & ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 185x120x13 mm³			
Διαστάσεις Δοκιμίου	Μήκος Δοκιμίου (mm)	Πλάτος Δοκιμίου (mm)	Πάχος δοκιμίου (mm)
	185	120	13
Διαμόρφωση ακμών	Γωνία Διαμόρφωσης ϕ (°)	Αυχένας r (mm)	Άνοιγμα g (mm)
	60°	2	3.5

Εν συνεχεία, καθίσταται αναγκαία η αμμοβολή των προς συγκόλληση τεμαχίων, με σκοπό την απομάκρυνση ακαθαρσιών από την περιοχή της συμβολής. Η εναπόθεση υλικού συγκόλλησης πάνω στις πλάκες FCA προϋποθέτει την ύπαρξη μιας αμμοβολημένης επιφάνειας, προκειμένου η τήξη του προστιθέμενου μετάλλου και η ροή της λίμνης συγκόλλησης να καταστεί συνεχής και χωρίς εμπόδια κατά μήκος της διεύθυνσης της συγκόλλησης. Στην αντίθετη περίπτωση, ενδεχόμενες ακαθαρσίες της επιφάνειας δύναται να αναμειχθούν με το μέταλλο συγκόλλησης, εντός της λίμνης, και να αλλοιώσουν τη μικροδομή του, επηρεάζοντας επομένως και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης αρνητικά. Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε σε διάταξη κλειστού τύπου του Ε.Ν.Τ. Η επιφάνεια αμμοβολής παρατηρείται στην εικόνα 4.20 ευδιάκριτα, συγκριτικά με την γειτονική επιφάνεια, που δεν έχει υποστεί τη συγκεκριμένη κατεργασία. Όπως έχει προαναφερθεί, η υλοποιούμενη μέθοδος της συγκόλλησης με σωληνοειδή ηλεκτρόδια FCAW, παρουσιάζει υψηλή ανεκτικότητα σε τυχούσες ακαθαρσίες της επιφάνειας, γεγονός που σε πολλές περιπτώσεις δύναται να καθίσει τη διαδικασία αμμοβολής περιττή.



Εικόνα 4.42 Απεικόνιση αμμοβολημένης λοξοτομής δοκιμίων της σειράς Α.

Ακολουθώς, για το κάθε ζεύγος δοκιμίων προς συγκόλληση, των σειρών Α & Β, πραγματοποιήθηκαν δυο συγκολλήσεις πόντας, με άμεσο στόχο την συγκράτηση των ελασμάτων σε απόσταση 3.5 mm. Οι πόντες έγιναν με τη βοήθεια του ρομποτικού βραχίονα, ο οποίος προγραμματίστηκε να εκτελέσει δυο σημειακές συγκολλήσεις μήκους 15mm. Σημαντική απόρροια της ύπαρξης πόντας στην αρχή της συγκόλλησης συντελεί η αποφυγή προβλημάτων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της συγκόλλησης και κυρίως κατά την εκτέλεση της ρίζας. Οι πόντες της οικογένειας ελασμάτων Α, έγιναν σε απόσταση 40mm έκαστη από την άκρη της συμβολής, ενώ οι αντίστοιχες πόντες της οικογένειας Β σε απόσταση 35mm από την άκρη της συμβολής. Οι παραμετρικές τιμές (το εισαχθέν ποσοστό ισχύος στη διάταξη, η ένταση ρεύματος και η απόσταση ακροφυσίου από το προς συγκόλληση τεμάχιο), που ισχύουν για τις πόντες παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.35 Τα χαρακτηριστικά πόντας για κάθε ζεύγος συγκολλημένων δοκιμίων.

Οικογένεια διαστάσεων	Ισχύς (%)	Ένταση (Α)	Απόσταση ακροφυσίου από τεμάχιο (mm)
220x120x13	80	200	18
185x120x13 (1)	80	206	16
185x120x13 (2)	80	200	18



Εικόνα 4.43 Πόντες συγκόλλησης για την οικογένεια ελασμάτων B.



Εικόνα 4.44 Διάταξη των προς συγκόλληση δοκιμίων πριν την εκτέλεση πόντας.

Αξίζει, βέβαια, να τονιστεί ότι, πριν την εκτέλεση των συγκολλήσεων πόντας, το ζεύγος των προς συγκόλληση τεμαχίων τοποθετείται στην τράπεζα συγκόλλησης, όπου το ένα, εκ των δυο, τεμαχίων πακτώνεται με σφιγκτήρες, ενώ το άλλο αφήνεται ελεύθερο για να παραλάβει τις παραμορφώσεις. Επιπλέον, στην πακτωμένη πλευρά τοποθετείται και η αρπαγή επιστροφής, η οποία καθορίζει άμεσα την πολικότητα του ρεύματος, τη διατήρηση του τόξου καθώς και το κλείσιμο του κυκλώματος κατά τη συγκόλληση. Η αρπαγή τοποθετείται στην πλευρά όπου ξεκινά η εκτέλεση της ρίζας. Τέλος, κάτω από το διάκενο των 3.5mm τοποθετείται κεραμική επικαλύπτρα για τους λόγους, που προαναφέραμε.

4.6.2. Διαδικασία Συγκόλλησης & Παρατηρήσεις.

Όλες οι συγκολλητικές διαδικασίες διεξήχθησαν με πολλαπλά περάσματα για την ακρίβεια 6. Το πέρασμα της ρίζας (root pass) και 5 διαδοχικά περάσματα επικάλυψης (cover passes). Η εναπόθεση του μετάλλου συγκόλλησης στη ρίζα και στα τέσσερα πρώτα περάσματα επικάλυψης έγινε με γραμμική κίνηση του πυρσού συγκόλλησης. Αντιθέτως, το τελευταίο πέρασμα για όλες τις σειρές δοκιμίων εκτελέστηκε, μέσω γραμμικής κυματοειδούς κίνησης του πυρσού συγκόλλησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, το πρώτο και το τελευταίο πέρασμα μιας συμβολής συγκόλλησης χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι, επιθυμούμε ικανοποιητική ενίσχυση της ρίζας, όχι ελλiptή αλλά ούτε και υπερβολική, με άμεσο στόχο την απόκτηση ραφής υψηλής αντοχής και καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, επιθυμούμε ομαλή και ικανοποιητική όψη ραφής για το τελικό πέρασμα επικάλυψης, με απουσία τυπικών σφαλμάτων υποκοπής (Undercut) και υπερκάλυψης (overlap).

Εμβαθύνοντας στο ζήτημα, παρατηρήθηκε ότι η εκτέλεση του πρώτου περάσματος της ρίζας με γραμμική κίνηση του πιστολιού συνέδραμε σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του μετάλλου συγκόλλησης στη ρίζα, συγκριτικά με τη γραμμική κυματοειδή κίνηση. Πιθανές ανοχές των χαρακτηριστικών της λοξοτομής δύνανται να καταστήσουν την πορεία συγκολλητικών βημάτων δυσχερή και την κατανομή του τηγμένου μετάλλου περισσότερο ανομοιόμορφη και ανισοεπίπεδη με επιλογή γραμμικής κυματοειδούς κίνησης.

Επιπροσθέτως, η χρήση γραμμικής & κυματοειδούς κίνησης κρίθηκε προτιμητέα για την διεξαγωγή του τελικού περάσματος επικάλυψης. Σε περίπτωση εκτέλεσης του τελικού πάσου επικάλυψης με απλή γραμμική κίνηση του πυρσού συγκόλλησης, ο εκάστοτε χειριστής της διάταξης θα αντιμετώπιζε ουσιώδη προβλήματα στην επιλογή των τιμών παραμέτρων, όπως η ένταση του ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, ο χειριστής θα έπρεπε να επιλέξει εμπειρικά κι ανάλογα με την εγκάρσια απόσταση των δοκιμίων, έπειτα από το 5^ο πέρασμα, τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων της έντασης του ρεύματος και της ταχύτητας συγκόλλησης. Λανθασμένη επιλογή των συγκεκριμένων παραμέτρων, εύλογα οδηγεί σε εμφάνιση σφαλμάτων υποκοπής κι υπερκάλυψης και σε μείωση παραγωγικότητας, λόγω χρονοβόρων διορθωτικών συγκολλητικών μέτρων. Η χρησιμοποίηση, λοιπόν, γραμμικής κυματοειδούς κίνησης για το τελικό πέρασμα επικάλυψης, αναιρεί άμεσα την πιθανότητα εμφάνισης του ανωτέρω προβλήματος, διότι προσφέρει την επιλογή εισαγωγής του πλάτους της κυματοειδούς κίνησης (mm). Ο εκάστοτε χρήστης δύνανται να μετρήσει το πλάτος της, προς πλήρωση, ραφής και να εισάγει το αντίστοιχο πλάτος στο στοιχείο Weav.Width/height της σελίδας FUNC του Work menu.

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

Ακολουθώς, τα ενδιάμεσα περάσματα επικάλυψης εκτελούνται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε η επιφάνεια, που προσδίδουν στο τέλος του 5^{ου} πάσου να είναι όσο το δυνατόν πιο ισοεπίπεδη γίνεται. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση είναι επιθυμητή, επειδή καθιστά ευχερέστερη και αποδοτικότερη την εναπόθεση μετάλλου συγκόλλησης στο τελικό πέρασμα επικάλυψης. Αξίζει να αναλογιστεί κανείς ότι, ανισοεπίπεδη επιφάνεια στο τέλος του 5^{ου} πάσου δύνανται να οδηγήσει σε ικανοποιητική ενίσχυση της μιας άκρης

(toe) και στην εμφάνιση υποκοπής στην έτερη. Γενικότερα, υποβόσκουν διάφορες εκδοχές εμφάνισης σφαλμάτων, υπό τη συνθήκη ύπαρξης της ανωτέρω καταστάσεως.

Πριν την έναρξη των διαδικασιών συγκόλλησης, εκτελέστηκε ένας αριθμός BoP, προκειμένου να εξακριβωθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για το τελικό πέρασμα επικάλυψης. Διεξήχθησαν 4 εναποθέσεις μεμονωμένων στρώσεων με διαφορετικά πλάτη κυματοειδούς κίνησης, με σκοπό να εκτιμηθεί η αλληλεπίδραση του τελικού πλάτους ραφής σε σχέση με το εφαρμοζόμενο πλάτος κυματοειδούς κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίστηκε το βέλτιστο πλάτος κυματοειδούς απόθεσης που έδωσε επαρκές τελικό πλάτος ραφής, κατάλληλο για το πάσο επικάλυψης. Οι συγκολλητικές συνθήκες των 4 ραφών δίνονται κάτωθι:

Πίνακας 4.36 Πίνακας αλληλεξάρτησης εφαρμοζόμενου πλάτους κυματοειδούς κίνησης και τελικού πλάτους ραφής.

A/A BoP	Ισχύς (%)	Ταχύτητα (cm/min)	Συχνότητα f(Hz)	Weaving πλάτος (mm)	Τελικό πλάτος ραφής (mm)
1 ^ο	75	30	1.5	4	11.7
2 ^ο	75	30	1.5	8	12.5
3 ^ο	75	30	1.5	10	13.2
4 ^ο	75	30	1.5	12	14.5

Οι συνθήκες συγκόλλησης των δυο σειρών ελασμάτων παρατίθενται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες. Όλες οι εναποθέσεις εκτελέστηκαν μέσω της *forehand* τεχνικής. Τα αντίστοιχα επιλεγόμενα πλάτη κυματοειδούς κίνησης του τελικού πάσου επικάλυψης έλαβαν τις τιμές των 10, 12 και 12.4 mm. Μετά το τέλος κάθε πάσου, η εκάστοτε ραφή καλύπτεται με ένα στρώμα σκουριάς, το οποίο οφείλεται στη σκόνη ρουτιλίου του πυρήνα του ηλεκτροδίου και το οποίο είναι εύκολα αφαιρούμενο.

Κατά τη διεξαγωγή συγκολλήσεων της σειράς A, παρατηρήθηκε ότι, δεδομένης της κατάλληλης επιλογής παραμέτρων και της σωστής ευθυγράμμισης της πορείας του πυρσού συγκόλλησης με τη διεύθυνση της συμβολής, παρουσιάστηκε ελλιπής διείδυση του μετάλλου εναπόθεσης στη ρίζα της συγκόλλησης. Η αντιμετώπιση του προβλήματος κατέστη δυνατή με αύξηση της έντασης ρεύματος του 1^{ου} περάσματος. Αύξηση της έντασης ισοδυναμεί με αύξηση του όγκου παροχής μετάλλου προσθήκης γεγονός, που οδηγεί σε καλύτερη πλήρωση της διαμορφωθείσας λοξοτομής. Επίσης, όσον αφορά τα ενδιάμεσα περάσματα επικάλυψης (2^ο-5^ο), χρησιμοποιήθηκαν μικρές εντάσεις ρεύματος, εν συγκρίσει με του 1^{ου}, λόγω απαιτήσεων μικρότερων αποθέσεων υλικού συγκόλλησης.

Πίνακας 4.37 Συγκεντρωτικές συνθήκες συγκόλλησης ελασμάτων σειράς Α.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΕΙΡΑΣ Α 220x120x13 mm³							
Πέρασμα	Είδος	Ισχύς (%)	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (cm/min)	Απόσταση ακροφυσίου-τεμαχίου (cm)	Παροχή αερίου (lt/min)
1 ^ο -Ρίζα	Linear	80	210	32	30	1.9	23
2 ^ο -Επικάλυψη	Linear	75	210	30,8	30	1.7	23
3 ^ο -Επικάλυψη	Linear	70	210	29,6	30	1.5	23
4 ^ο -Επικάλυψη	Linear	70	220	29,6	30	1.5	23
5 ^ο -Επικάλυψη	Linear	60	170	23,6	30	1.5	23
6 ^ο -Επικάλυψη	Weaving	80	210	29,6	25	1.6	23

Πίνακας 4.38 Συγκεντρωτικές συνθήκες συγκόλλησης ελασμάτων σειράς Β (1).

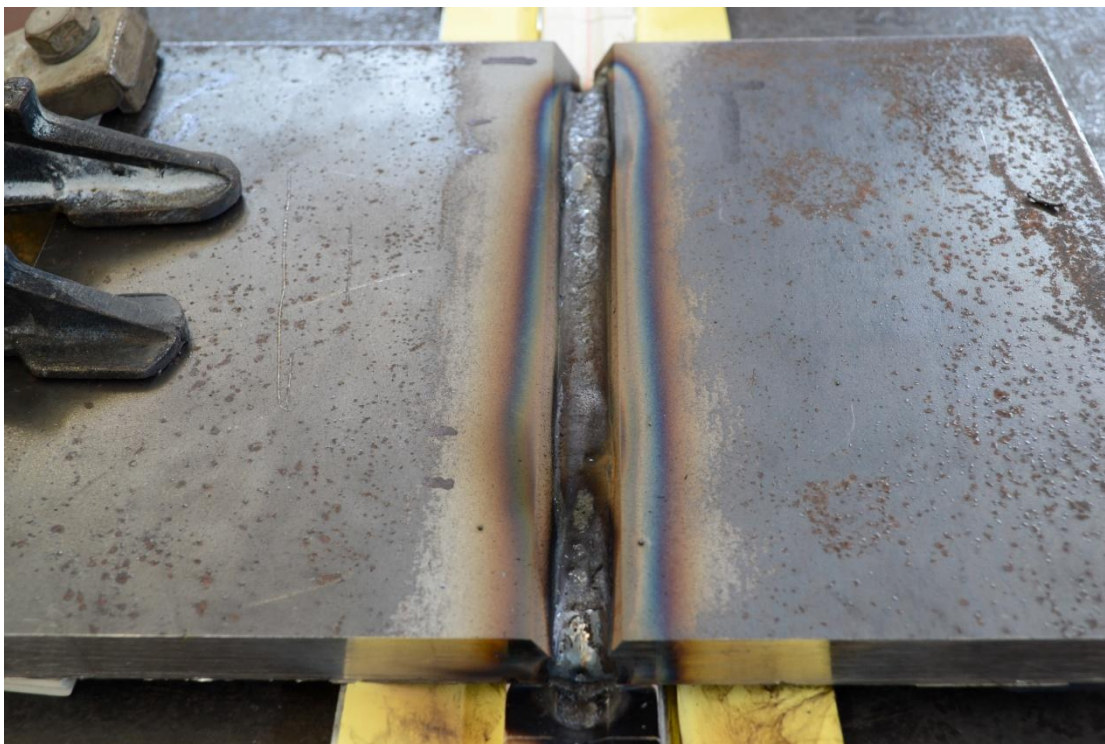
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 1^{ΟΥ} ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΕΙΡΑΣ Β 185x120x13 mm³							
Πέρασμα	Είδος	Ισχύς (%)	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (cm/min)	Απόσταση ακροφυσίου-τεμαχίου (cm)	Παροχή αερίου (lt/min)
1 ^ο -Ρίζα	Linear	85	240	33.8	30	1.8	23
2 ^ο -Επικάλυψη	Linear	80	232	32	30	1.5	23
3 ^ο -Επικάλυψη	Linear	80	240	31.8	30	1.5	23
4 ^ο -Επικάλυψη	Linear	80	215	32	30	1.8	23
5 ^ο -Επικάλυψη	Linear	72.5	200	30	30	1.8	23
6 ^ο -Επικάλυψη	Weaving	80	215	31.5	25	1.5	23

Πίνακας 4.39 Συγκεντρωτικές συνθήκες συγκόλλησης ελασμάτων σειράς Β (2).

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 2^{ΟΥ} ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΕΙΡΑΣ Β 185x120x13 mm³							
Πέρασμα	Είδος	Ισχύς (%)	Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (cm/min)	Απόσταση ακροφυσίου-τεμαχίου (cm)	Παροχή αερίου (lt/min)
1 ^ο -Ρίζα	Linear	85	258	32.8	30	1.8	23
2 ^ο -Επικάλυψη	Linear	77.5	218	31.8	30	1.5	23
3 ^ο -Επικάλυψη	Linear	75	218	31.8	30	1.5	23
4 ^ο -Επικάλυψη	Linear	70	206	31.2	35	1.5	23
5 ^ο -Επικάλυψη	Linear	67.5	200	28.5	40	1.5	23
6 ^ο -Επικάλυψη	Weaving	80	213	32	25	1.8	23

Οι διαφοροποιήσεις ρεύματος και απόστασης ακροφυσίου και προς συγκόλληση τεμαχίου οφείλονται και αυτές στην προσαρμογή των ρυθμίσεων, ανάλογα πάντα των απαιτήσεων εναπόθεσης υλικού κάθε περάσματος. Η εναπόθεση κάθε πάσου γινόταν 20 min, έπειτα από την εναπόθεση του προηγούμενου. Στο χρονικό διάστημα, που μεσολαβούσε μεταξύ των δυο περασμάτων λάμβανε χώρα ο καθαρισμός της ραφής, η μακροσκοπική παρατήρηση της και ο προγραμματισμός του ακόλουθου περάσματος. Εδάφιο, προς περαιτέρω ανάλυση, αποτελεί το χρονικό διάστημα ψύξης, το οποίο μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών περασμάτων και η επίδραση του στη σκληρότητα τις μηχανικές ιδιότητες και τις αποκτηθείσες παραμορφώσεις της συγκόλλησης.

Η συγκολλητική πορεία διαδικασιών και η λογική αλληλουχία ενεργειών, κατά τη διάρκεια εκπόνησης μιας συγκόλλησης πολλαπλών περασμάτων, αποσαφηνίζεται καλύτερα με την ακριβή παράθεση βημάτων, που ακολουθήθηκαν για δοκίμια της σειράς Β. Αναλυτικότερα επιλέχθηκε υψηλή ένταση ρεύματος (255-260A) για τη ρίζα της συγκόλλησης, προκειμένου να έχουμε ικανοποιητική διείσδυση προστιθέμενου μετάλλου. Η ταχύτητα των 30cm/min εξασφαλίζει ικανοποιητικού πλάτους απόθεση. Η διεξαγωγή του βήματος προσέδωσε αρκετά καλή επιφάνεια ραφής, ομοιόμορφη κατανομή υλικού και σχετικά ισοεπίπεδη επιφάνεια ραφής.



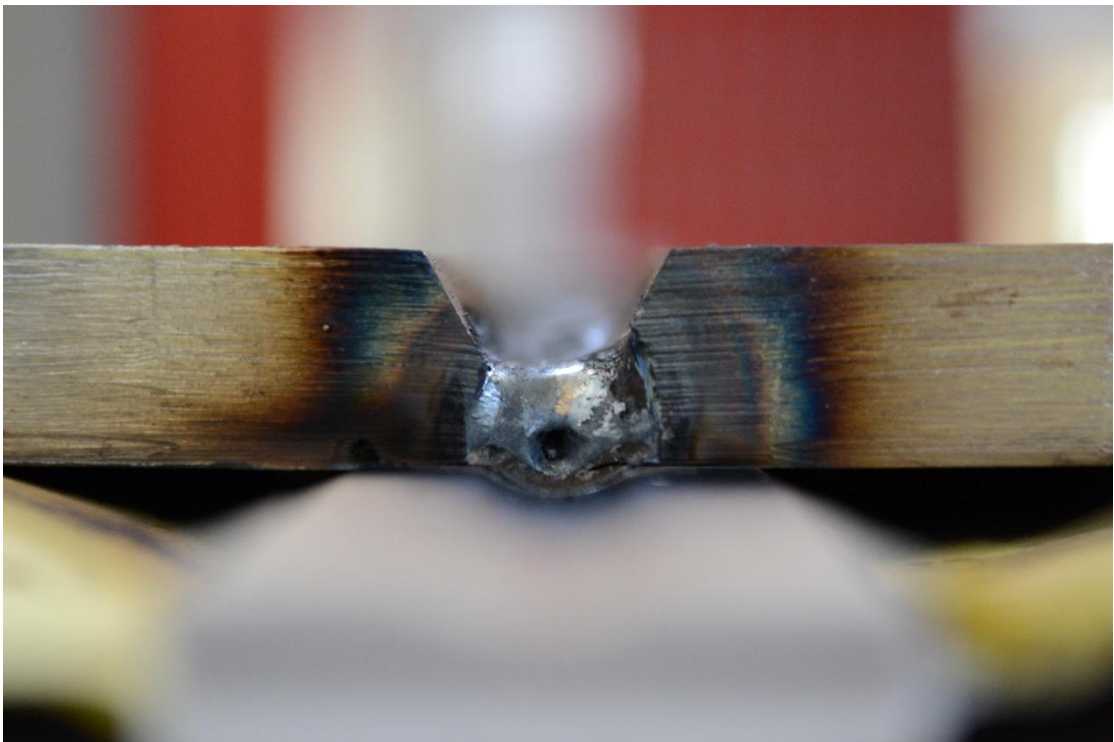
Εικόνα 4.45 Εκτέλεση συγκόλλησης ρίζας δοκιμών σειράς Β. Παρατηρείται το στρώμα σκουριάς, το οποίο επικάθεται ως προστατευτική φλοίδα στο στερεοποιημένο μέταλλο προσθήκης.

Οι εικόνες 4.23-4.25 παρουσιάζουν τη ρίζα συγκόλλησης, πριν και μετά την αφαίρεση του στρώματος σκουριάς, καθώς και την πλήρωση της διαμορφωθείσας λοξοτομής ως προς την πλάγια όψη της συμβολής. Παρατηρείται ομαλή επιφάνεια ραφής, απουσία εκτοξεύσεων μετάλλου & μικρές φλοίδες σκουριάς, οι οποίες δύναται να αφαιρεθούν με χρήση κατάλληλων πιεστικών συστημάτων.

Το πρώτο πάσο επικάλυψης (2^ο γενικά), εκτελέστηκε με σημαντικά χαμηλότερη ένταση ρεύματος, της τάξεως των 215-220A. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι, είναι επιθυμητή μικρότερη εναπόθεση μετάλλου συγκόλλησης, συγκριτικά με τη ρίζα. Δεν απαιτείται υψηλή ένταση για λόγους πλήρους διείσδυσης.



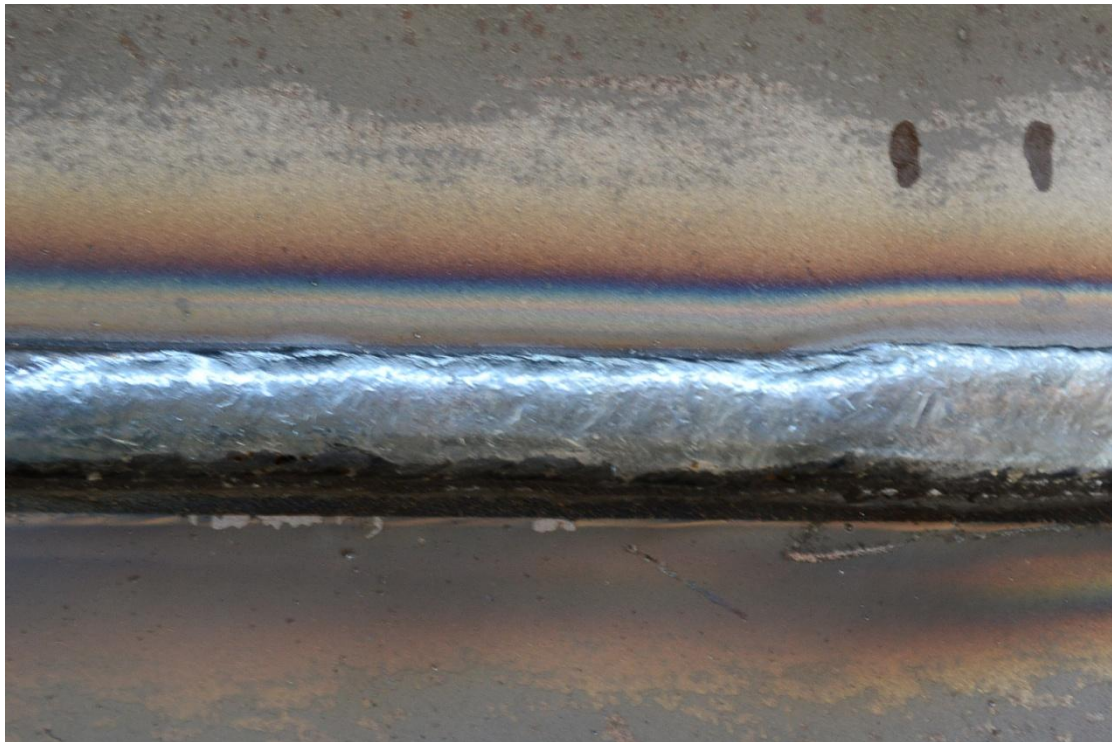
Εικόνα 4.46 Επιφάνεια ραφής της ρίζας συγκόλλησης.



Εικόνα 4.47 Απεικόνιση πλάγιας όψης ραφής της ρίζας συγκόλλησης.

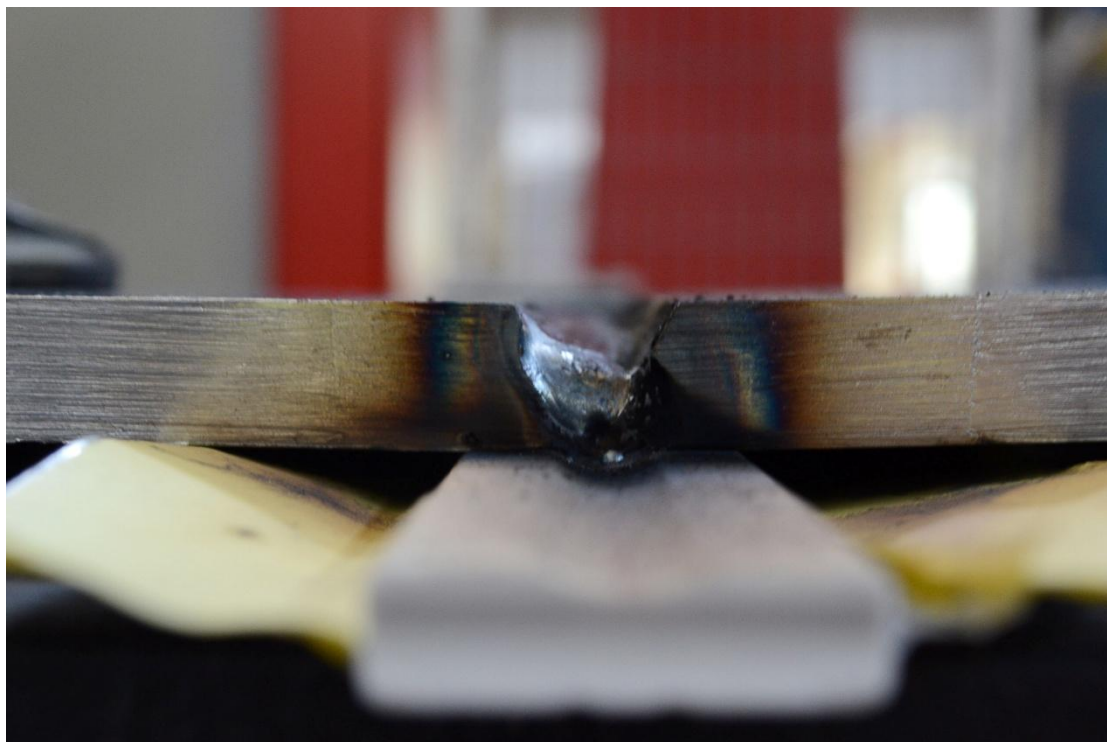


Εικόνα 4.48 Εκτέλεση 1^{ου} περάσματος επικάλυψης των δοκίμων της σειράς Β.



Εικόνα 4.49 Επιφάνεια ραφής 1^{ου} περάσματος επικάλυψης.

Η ταχύτητα των 30 cm/min βοηθά σε αυτήν την περίπτωση στην εξασφάλιση ενός ικανοποιητικού πλάτους απόθεσης. Η εκτέλεση του βήματος προσέδωσε αρκετά καλή κι ομαλή επιφάνεια ραφής.



Εικόνα 4.50 Απεικόνιση πλάγιας όψης συγκόλλησης μετά το πέρας του 1^{ου} περάσματος επικάλυψης.

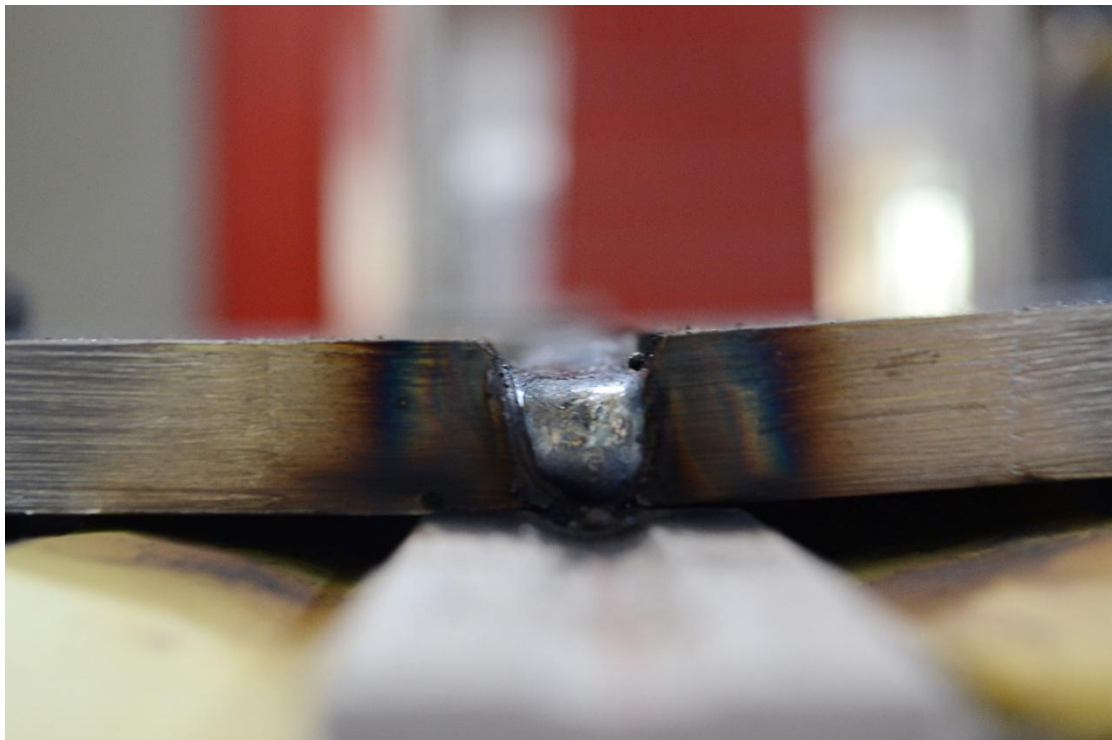
Το δεύτερο πέραςμα επικάλυψης (3^ο γενικά), επιλέχθηκε να εκτελεστεί με ίδιες παραμέτρους, όπως και του πρώτου πάσου επικάλυψης. Η ελαφρά μειωμένη τιμή της ισχύος οφείλεται στο γεγονός ότι, επιθυμούμε ίδια τιμή έντασης ρεύματος για την ίδια απόσταση ακροφυσίου-προς συγκόλληση τεμαχίου. Αξίζει να επισημανθεί ότι, η απόσταση ακροφυσίου και προς συγκόλληση τεμαχίου σε αυτό το πέραςμα μετράται με βασικό επίπεδο το μέταλλο συγκόλλησης του 1^{ου} περάσματος στο σημείο κατακόρυφης διεύθυνσης του ακροφυσίου. Σημειώνονται λοιπόν, εντάσεις της τάξεως των 215-220A. Παρατηρείται ιδιαίτερα ομαλή επιφάνεια ραφής και επιπλέον, σχετικά ισοεπίπεδη επιφάνεια, μετά το πέρας των δυο πρώτων πάσων επικάλυψης. Η μικρή αυτή απόκλιση στην επιθυμητή επίπεδη επιφάνεια δύναται να διορθωθεί εύκολα κατά την εκτέλεση του 3^{ου} & 4^{ου} περάσματος επικάλυψης (4^{ου} & 5^{ου} γενικά).

Η διεξαγωγή του 3^{ου} περάσματος επικάλυψης (4^{ου} γενικά), επιτυγχάνεται μέσω χαμηλότερων εντάσεων ρεύματος κι υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης. Ο λόγος έγκειται στην απαίτηση μικρότερης εναπόθεσης υλικού. Η ένταση κατέρχεται στα 205A, ενώ χρησιμοποιείται ταχύτητα 35 cm/min. Ως αποτέλεσμα θα προκύψει ραφή μικρότερου όγκου εναπόθεσης καθώς και λιγότερο πεπλατυσμένης μορφής. Η όψη της ραφής χαρακτηρίζεται από αρκετά καλή ομαλότητα, όπως διαφαίνεται και στην εικόνα 4.31.

Όμοια για το 4^ο πέραςμα επικάλυψης (5^ο γενικά), επιλέχθηκαν χαμηλότερες τιμές έντασης και υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης. Για την ακρίβεια η ένταση κατήλθε στα 200A, ενώ η ταχύτητα ανήλθε στα 40 cm/min. Οι ανοχές στην εναπόθεση υλικού ήταν μικρότερες στο συγκριμένο πέραςμα, για αυτό υπήρξε επιπρόσθετη αύξηση της ταχύτητας. Στόχος αποτέλεσε η εναπόθεση μικρότερου όγκου υλικού συγκόλλησης, συγκριτικά με το προηγούμενο πάσο και στενότερη μορφή ραφής.



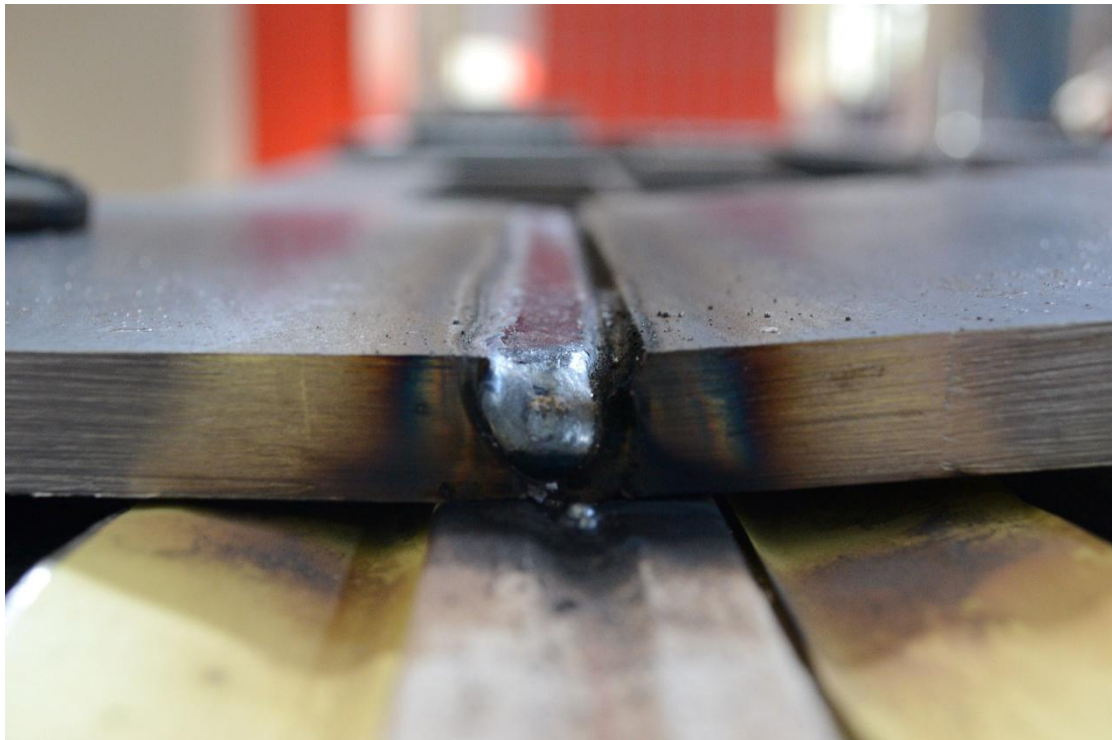
Εικόνα 4.51 Επιφάνεια ραφής έπειτα από την εκτέλεση του 2^{ου} περάσματος επικάλυψης.



Εικόνα 4.52 Απεικόνιση πλάγιας όψης συγκόλλησης μετά το πέρας του 2^{ου} περάσματος επικάλυψης.



Εικόνα 4.53 Επιφάνεια ραφής, έπειτα από την εκτέλεση του 3^{ου} περάσματος επικάλυψης.

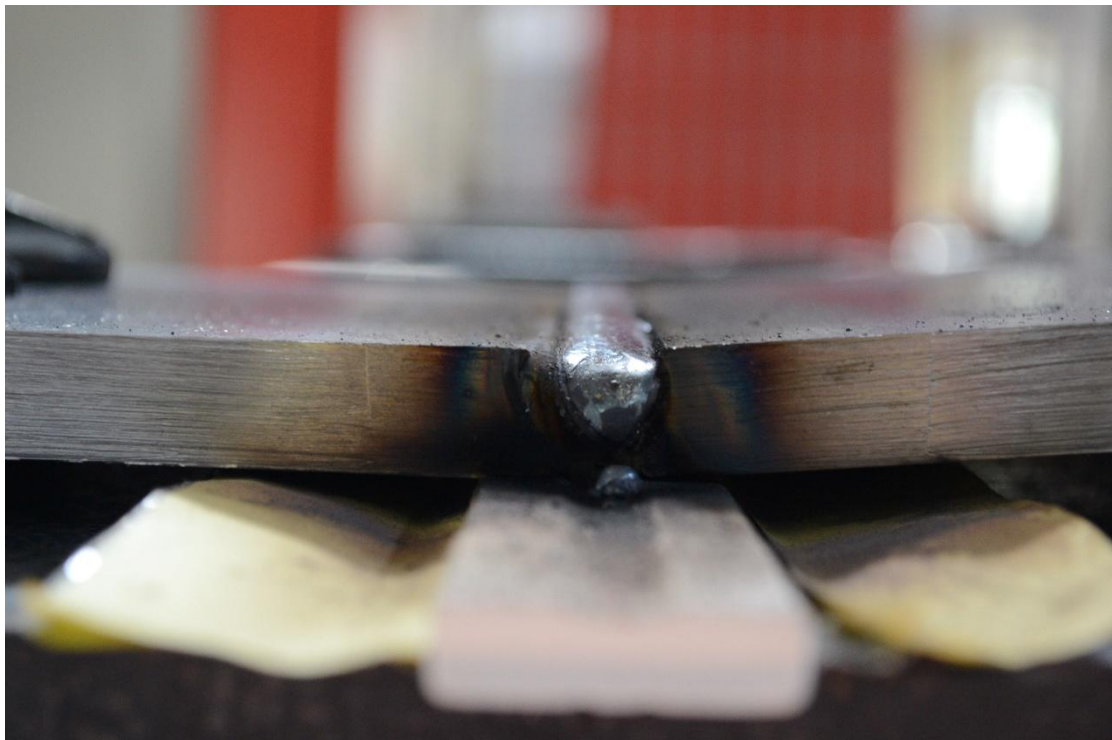


Εικόνα 4.54 Απεικόνιση πλάγιας όψης συγκόλλησης μετά το πέρας του 3^{ου} περάσματος επικάλυψης.

Όπως παρατηρείται, τα χαρακτηριστικά της όψης ραφής κυμαίνονται σε αρκετά καλά επίπεδα με την ραφή να αποκτά μετά το πέρας και του 4^{ου} περάσματος την επίπεδη επιθυμητή μορφή. Η επίπεδη επιφάνεια θα βοηθήσει στην βελτιωμένη συμπεριφορά εναπόθεσης υλικού κατά το τελικό πάσο επικάλυψης.



Εικόνα 4.55 Επιφάνεια ραφής μετά το πέρας του 4^{ου} περάσματος επικάλυψης.



Εικόνα 4.56 Απεικόνιση πλάγιας όψης συγκόλλησης μετά το πέρας του 3^{ου} περάσματος επικάλυψης.

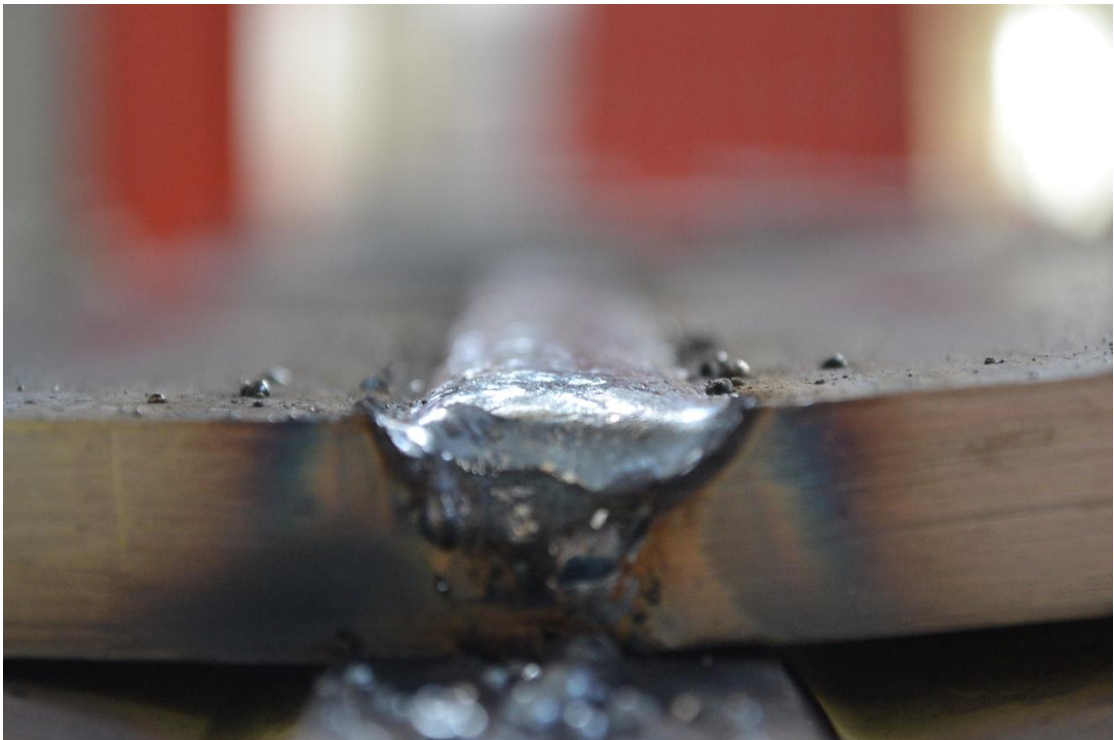
Το τελικό πέρασμα επικάλυψης εκτελείται με γραμμική κυματοειδή κίνηση του πυρσού συγκόλλησης. Όπως είναι γνωστό, οι κυματοειδείς κινήσεις υλοποιούνται μέσω χαμηλότερων ταχυτήτων για καλύτερη εναπόθεση του υλικού συγκόλλησης. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ταχύτητα συγκόλλησης, ίση με 25 cm/min για συχνότητα κυματοειδούς κίνησης ίση με 1.67 Hz. Η ένταση ανέρχεται στα 213A, εφόσον απαιτείται αυξημένη εναπόθεση υλικού, συγκριτικά με ενδιάμεσα πάσα επικάλυψης. Το άνοιγμα της συμβολής μετράται ίσο με 14 mm, ενώ κατά μήκος της ραφής παρατηρείται σε σημεία, ατελής διείσδυση του υλικού μέχρι τη βάση (toe) της συγκόλλησης. Το παρόν σφάλμα διορθώνεται με την εισαγωγή του κατάλληλου πλάτους κυματοειδούς κίνησης (12.4 mm). Εν τέλει, προκύπτει ομαλή όψη ραφής με παρουσία εκτοξεύσεων μετάλλου, οι οποίες είναι εύκολα αφαιρούμενες. Το γεγονός απουσίας σφαλμάτων υποκοπής και υπερκάλυψης υποδηλώνει μια επιτυχή επιφάνεια ραφής συγκόλλησης. Σε συνδυασμό με ικανοποιητική όψη ρίζας και την επιθυμητή μικροσκοπική δομή (απουσία σφαλμάτων), μπορούμε να αναφερθούμε σε μια καθολικά επιτυχημένη συγκολλητική διαδικασία.



Εικόνα 4.57 Τελικό πέρασμα επικάλυψης της συγκόλλησης με παρουσία εκτοξεύσεων μετάλλου.



Εικόνα 4.58 Επιφάνεια τελικής ραφής συγκόλλησης δοκιμίων σειράς Β.



Εικόνα 4.59 Απεικόνιση πλάγιας όψης συγκόλλησης μετά και το τελικό πέρασμα επικάλυψης.

4.6.3. Μεταλλογραφική Παρατήρηση.

Τα συγκολλημένα ελάσματα προετοιμάστηκαν κατάλληλα για μεταλλογραφική ανάλυση. Όμοια με την περίπτωση των μεμονωμένων αποθέσεων στρώσης μετάλλου συγκόλλησης BoP, πραγματοποιήθηκαν εγκάρσιες τομές της περιοχής συγκόλλησης με τη βοήθεια δισκοτόμου. Συνεπώς, μελετήθηκαν τρία βέλτιστα δοκίμια μήκους 28 mm και πλάτους 12 mm, το καθένα από τα οποία προήλθε από τις συγκολλήσεις των σειρών A&B. Τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε μείγμα ρητίνης και σκληρυντικής ουσίας και υπέστησαν διαδικασίες λείανσης, στίλβωσης και χημικής προσβολής. Επιπλέον, έλαβε χώρα η παρατήρηση τους σε οπτικό στερεοσκόπιο και μικροσκόπιο.

4.6.3.1 Προετοιμασία δοκιμίων.

Η προετοιμασία των δοκιμίων επιτυγχάνεται με πανομοιότυπο τρόπο όπως και στη §4.5.3. Με τη βοήθεια δισκοτόμου κόβονται 3 δοκίμια έκαστο από τις συγκολλήσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στους πίνακες 4.16-4.18. Τη διαδικασία κοπής διαδέχεται ο εγκιβωτισμός των δοκιμίων, με τη βοήθεια κατάλληλου μείγματος εποξειδικής ρητίνης και σκληρυντικής ουσίας, που αποσκοπεί στη μεταλλογραφική μελέτη της εγκάρσιας τομής των. Η σύσταση του μείγματος ακολουθεί την αναλογία (κατ 'όγκο) 15:2 ml ρητίνης και σκληρυντικής ουσίας, αντίστοιχα. Η διαδικασία του εγκιβωτισμού έως την πλήρη στερεοποίηση του μείγματος διήρκεσε 24 ώρες. Έπειτα, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια εγκιβωτισμού, καθαρίστηκαν προσεχτικά με απιονισμένο νερό και αιθανόλη για την απομάκρυνση ελαίων και ακαθαρσιών και προετοιμάστηκαν για λείανση. Συνοπτικά, παρατίθενται τα κατωτέρω στοιχεία των διαδικασιών.

❖ Λείανση.

Η διαδικασία της λείανσης των βέλτιστων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, του οίκου Struers, φθίνουσας σειράς τραχύτητας: P# 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1200, 2400 και 4000 grit. Τα χαρτιά χρησιμοποιούνται μεταβατικά, από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο, ενώ το εκάστοτε χαρτί τοποθετείται σε λειαντική μηχανή Struers. Θεωρήθηκαν κατάλληλες ταχύτητες της τάξης των 250 rpm για τις εγκάρσιες τομές των δοκιμίων. Κάθε επανάληψη λείανσης διήρκεσε 4min, ικανοποιώντας τη συνθήκη που υπαγορεύει ότι, ο χρόνος λείανσης του εκάστοτε δοκιμίου δε συνίσταται να είναι μικρότερος των 3 λεπτών, αλλά ούτε και μεγαλύτερος των 5 λεπτών. Περαιτέρω λεπτομέρειες της διάταξης κατατίθενται στην §4.5.3.

❖ Στίλβωση.

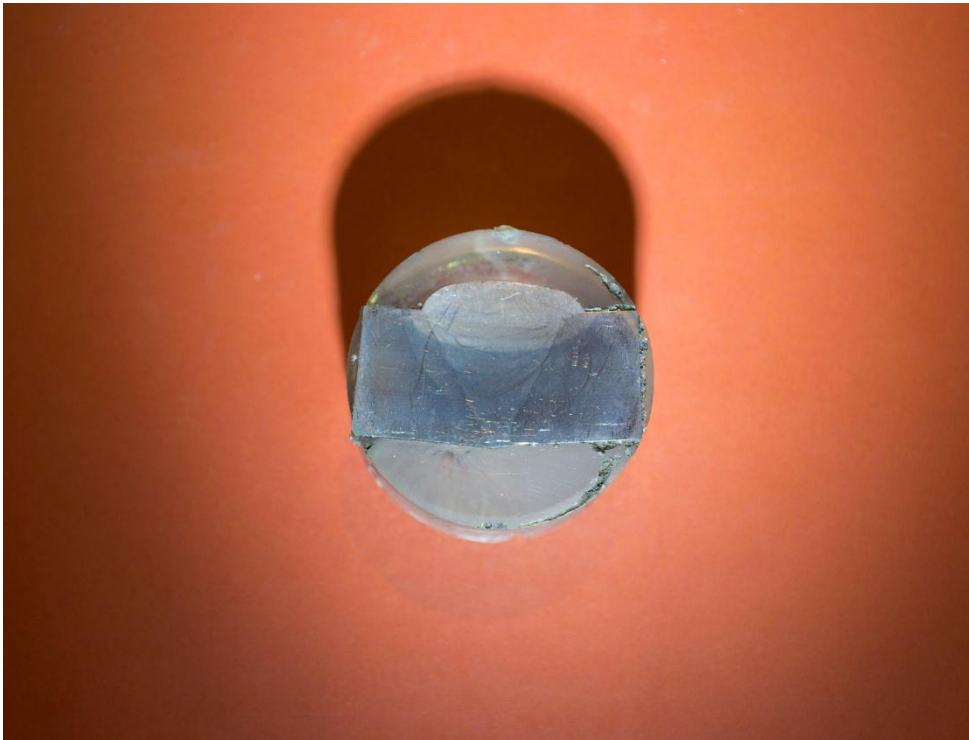
Σκοπός της στίλβωσης συνιστά η εξάλειψη των λειαντικών γραμμών, προκειμένου η επιφάνεια του δοκιμίου να αποκτήσει όψη καθρέπτη. Η στίλβωση πραγματοποιείται σε υφασμάτινους, βελούδινους δίσκους, οι οποίοι με τη σειρά τους προσαρμόζονται πάνω στις βάσεις των περιστροφικών διατάξεων, που παρέχει ο οίκος Struers. Κατά την περιστροφή των δοκιμίων, απλώνεται στους δίσκους ειδική πάστα οξειδίων κυρίως αλούμινα. Η στίλβωση πραγματοποιείται, γενικότερα, σε υψηλότερες στροφές της μηχανής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν 300-350 rpm. Περαιτέρω λεπτομέρειες της διάταξης και της διαδικασίας κατατίθενται στην §4.5.3.

❖ Χημική προσβολή.

Η χημική προσβολή των δοκιμίων, που προέκυψαν από τις συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων καθίσταται εφικτή μέσω του ιδίου διαλύματος, που χρησιμοποιήθηκε και για τα δοκίμια των μεμονωμένων αποθέσεων στρώσης μετάλλου συγκόλλησης. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιήθηκε μείγμα *Nital*, το οποίο συντελείται από:

- Καθαρή Αιθανόλη C_2H_6O .
- Νιτρικό Οξύ HNO_3 .

Το συγκεκριμένο χημικό αντιδραστήριο διαμορφώνεται με αναλογία 98-2 ml %100 κατ' όγκο. Ακολούθως, αναδεύεται για τρία λεπτά, προκειμένου να ομογενοποιηθεί η σύσταση του. Τα δοκίμια συγκρατούνται από μεταλλική τσιμπίδα, εμβαπτίζονται στο γυάλινο δοχείο που περιέχει το αντιδραστήριο και παραμένουν για 10 δευτερόλεπτα, μέχρι όπου να εμφανιστεί η μικροδομή των μετάλλων. Στο χρόνο αυτό προστίθεται επίσης, το χρονικό διάστημα επίδρασης του αντιδραστηρίου, που μεσολαβεί από την απομάκρυνση του δοκιμίου από το δοχείο, μέχρι τον καθαρισμό του δοκιμίου με αποσταγμένο νερό. Ο συνολικός χρόνος επίδρασης επί του δοκιμίου θεωρείται, λοιπόν, ίσος με 15 δευτερόλεπτα, χρόνος σημαντικά διαφορετικός από τον αντίστοιχο των δοκιμίων BoP.



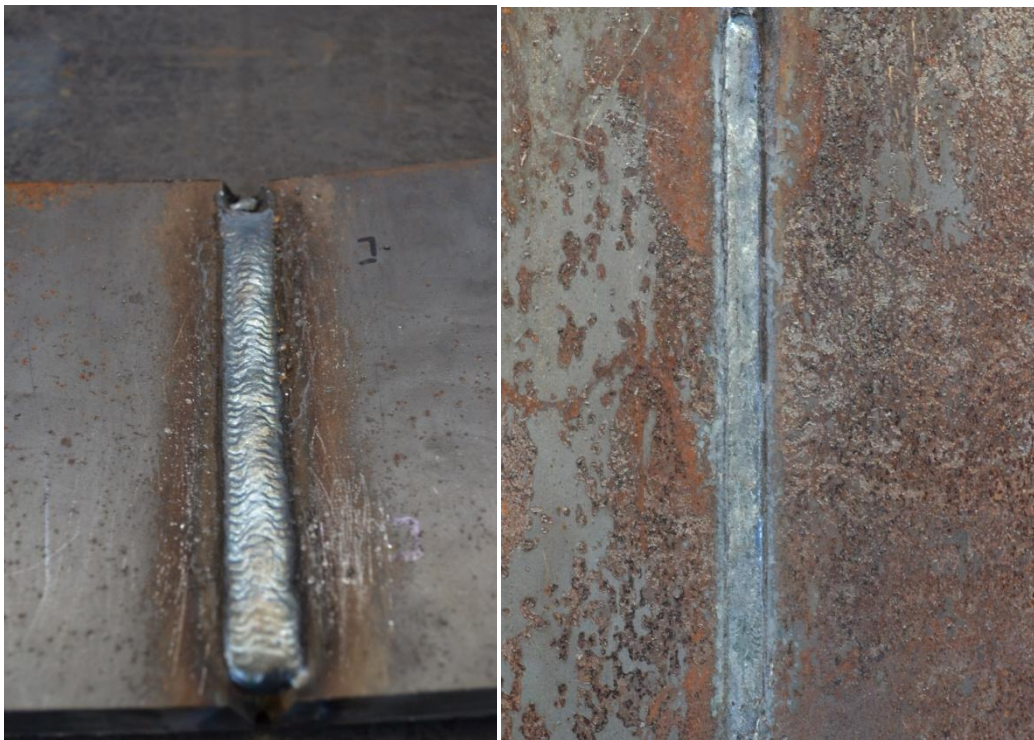
Εικόνα 4.60 Εγκάρσια τομή συγκολλημένου δοκιμίου σειράς A, που έχει υποστεί λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή.

4.6.3.2 Μακροσκοπική παρατήρηση δοκιμίων.

Σε γενικά πλαίσια, οι συνθήκες συγκόλλησης, που επιλέχθηκαν για τις διαδικασίες εναπόθεσης ραφών FCAW της αυτοματοποιημένης διάταξης, έδωσαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα ραφών. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η εναπόθεση της ρίζας για τις συγκολλήσεις των δοκιμίων της σειράς A. Παρατηρείται από την εικόνα 4.39 (β), ότι η ενίσχυση στη ρίζα δεν είναι ικανοποιητική, καθ' όλο το μήκος του δεξιού τεμαχίου του συγκολλημένου ζεύγους. Το σφάλμα επιδιορθώθηκε στις επακόλουθες συγκολλήσεις με αύξηση της έντασης του ρεύματος και συνεπώς της τροφοδοσίας του τηγμένου μετάλλου στη ρίζα.



Εικόνα 4.61(α),(β) Τελικό πέρασμα επικάλυψης και εναπόθεση ρίζας συγκόλλησης δοκιμίων σειράς Α.



Εικόνα 4.62 (α),(β) Τελικό πέρασμα επικάλυψης και εναπόθεση ρίζας δοκιμίων σειράς Β(1).



Εικόνα 4.63 Τελικό πέρασμα επικάλυψης και εναπόθεση ρίζας δοκιμίων σειράς Β(2).

Με τη βοήθεια των ανωτέρω εικόνων συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

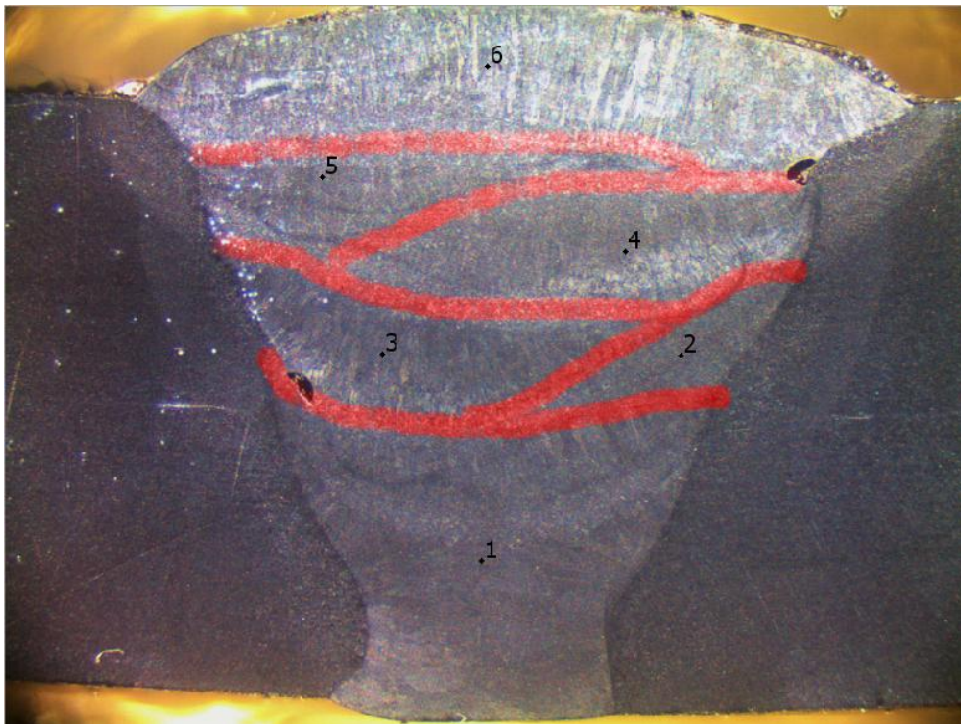
Τα τελικά περάσματα επικάλυψης όλων των συγκολλημένων δοκιμίων, έχουν καλύψει πλήρως όλη την απαιτούμενη επιφάνεια ραφής χωρίς υπερβολική ή ελλιπή εναπόθεση μετάλλου προσθήκης στην περιοχή. Οι ραφές χαρακτηρίζονται από σχετικά λεία και ομαλή ραφή, καθώς και από ικανοποιητική και ευδιάκριτη κυρτότητα, στοιχεία που συνοδεύουν τις ιδιότητες μιας επιτυχημένης ραφής συγκόλλησης. Αντιθέτως, η ρίζα των δοκιμίων της σειράς Β, παρουσίασε εναπόθεση εξαιρετικής διείσδυσης, χωρίς υπερβολική ή ελλιπή ενίσχυση της. Χαρακτηρίζεται, επίσης από λεία και ομαλή όψη ραφής. Προς αυτή την κατεύθυνση συνδράμει και η χρήση κεραμικής επικαλύπτρας, η οποία βοηθά στη διαμόρφωση της κυρτότητας και στην ικανοποιητική διαβροχή της περιοχής της ρίζας από το μέταλλο συγκόλλησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι, κατά την μακροσκοπική παρατήρηση δεν διαπιστώθηκαν εμφανή σφάλματα, παρά μόνο η δημιουργία ενός τοπικού-σημειακού worm track, έπειτα από την εκτέλεση του 1^{ου} περάσματος επικάλυψης σε δοκίμια της σειράς Α.

4.6.3.3 Παρατήρηση στο οπτικό στερεοσκόπιο.

Η παρατήρηση των βέλτιστων δοκιμίων με οπτικό στερεοσκόπιο έγινε μέσω της διάταξης του οίκου Leica. Η προαναφερθείσα οπτική διάταξη διαθέτει ένα σημαντικό αριθμό φακών μεγέθυνσης (x0.63, x0.8, x1, x1.25, x1.6, x2, x2.5, x3.2 και x4). Μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η παρατήρηση των 6 εναποθέσεων της κάθε συγκόλλησης. Είναι διακριτός ο προσανατολισμός στερεοποίησης των κρυστάλλων στο μέταλλο συγκόλλησης. Στην ρίζα διακρίνονται δύο μέτωπα στερεοποίησης που ξεκινούν από τις παρειές της συγκόλλησης με κατεύθυνση το κέντρο της, όπου και συναντώνται. Στα υπόλοιπα περάσματα, η στερεοποίηση ξεκινά από τις πλευρές της συγκόλλησης και από την επιφάνεια του προηγούμενου πάσου με κατεύθυνση την επιφάνεια της συγκόλλησης. Οι εγκάρσιες τομές των δοκιμίων των σειρών Α&Β διαφαίνονται στις ακόλουθες εικόνες:

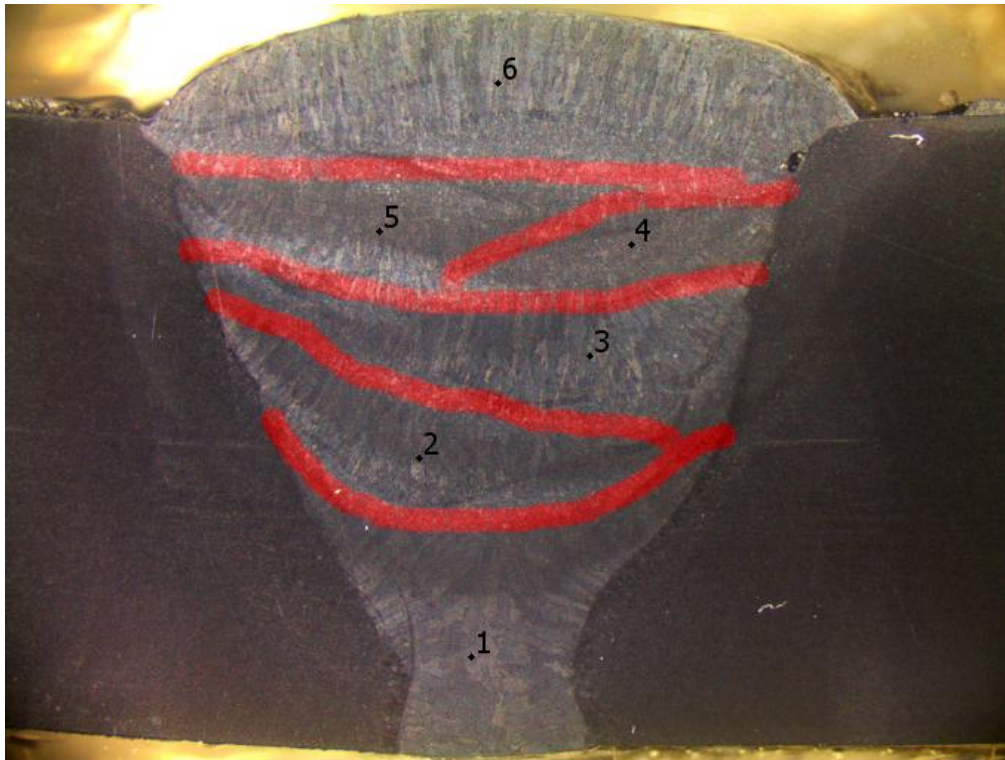


Εικόνα 4.64 Προφίλ συγκόλλησης δοκιμίων σειράς A και διακριτοποίηση περασμάτων ρίζας και επικάλυψης της ζώνης τήξης.



Εικόνα 4.65 Προφίλ συγκόλλησης δοκιμίων σειράς B(1).

Στις φωτογραφίες 4.42-4.44 διακρίνονται οι περιοχές μετάβασης από τη ζώνη τήξης στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και μετέπειτα στο μέταλλο βάσης. Η μικροδομή της κάθε ζώνης θα αναλυθεί σε ακόλουθο υπό-κεφάλαιο.



Εικόνα 4.66 Προφίλ συγκόλλησης δοκιμίων σειράς Β(2).

4.6.3.4 Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.

Τη στερεοσκοπική παρατήρηση διαδέχεται η παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο του οίκου Leica. Στην παρούσα φάση καθίσταται εφικτή η μελέτη της μικροδομής του μετάλλου βάσης, της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης.

➤ Μέταλλο Βάσης.

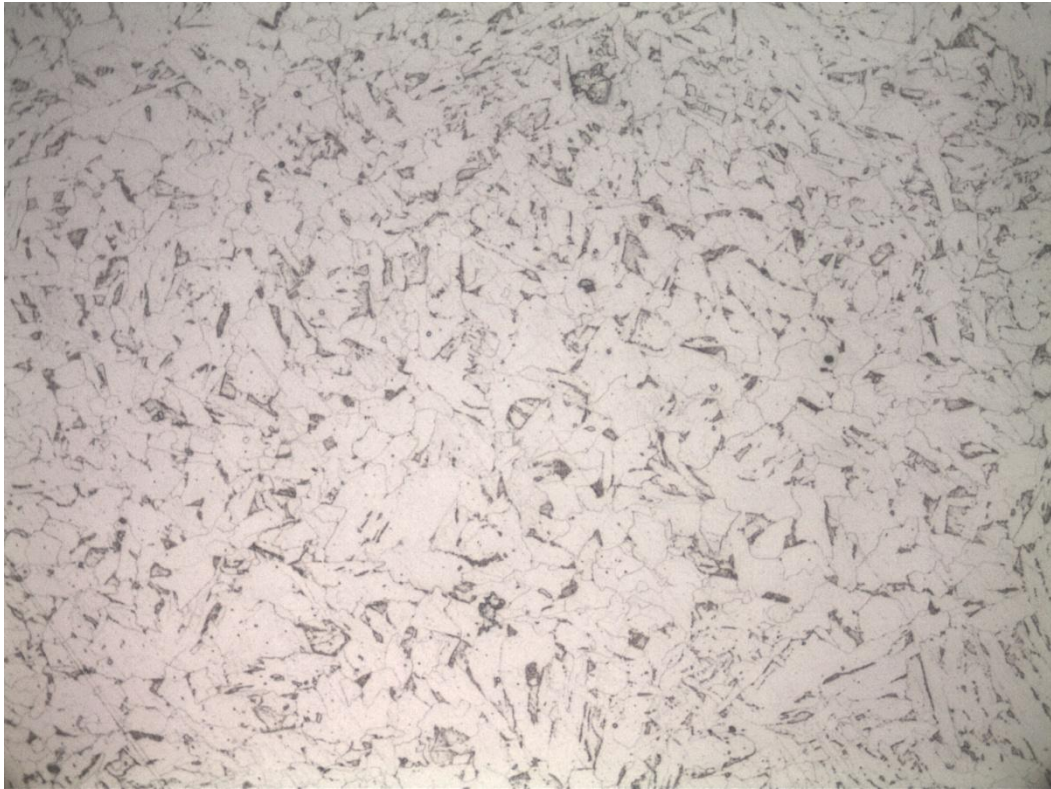
Η μικροδομή του μετάλλου βάσης των δοκιμίων συγκόλλησης, είναι διφασική κι αποτελούμενη από φερρίτη και μπαινίτη. Στην εικόνα 4.45 παρατηρείται η φάση του φερρίτη, η οποία αντιπροσωπεύεται από τις άσπρες περιοχές, και μέσα στις οποίες εγκλείονται οι μαύρες περιοχές του μπαινίτη.

➤ Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη.

Στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη δεν παρατηρείται ευδιάκριτη αύξηση του μεγέθους των κόκκων. Η επικρατούσα φάση είναι σε αυτή την περίπτωση ο φερρίτης, ο οποίος αντιπροσωπεύεται από τις λευκές περιοχές. Παρατηρείται εμφανώς η ζώνη σύνδεσης, μεταξύ των ζωνών τήξης και της ΘΕΖ στο ύψος του 1^{ου} περάσματος επικάλυψης. Η δομή του μετάλλου συντελείται και σε αυτή την περίπτωση από φερρίτη και μπαινίτη.

➤ Ζώνη Τήξης.

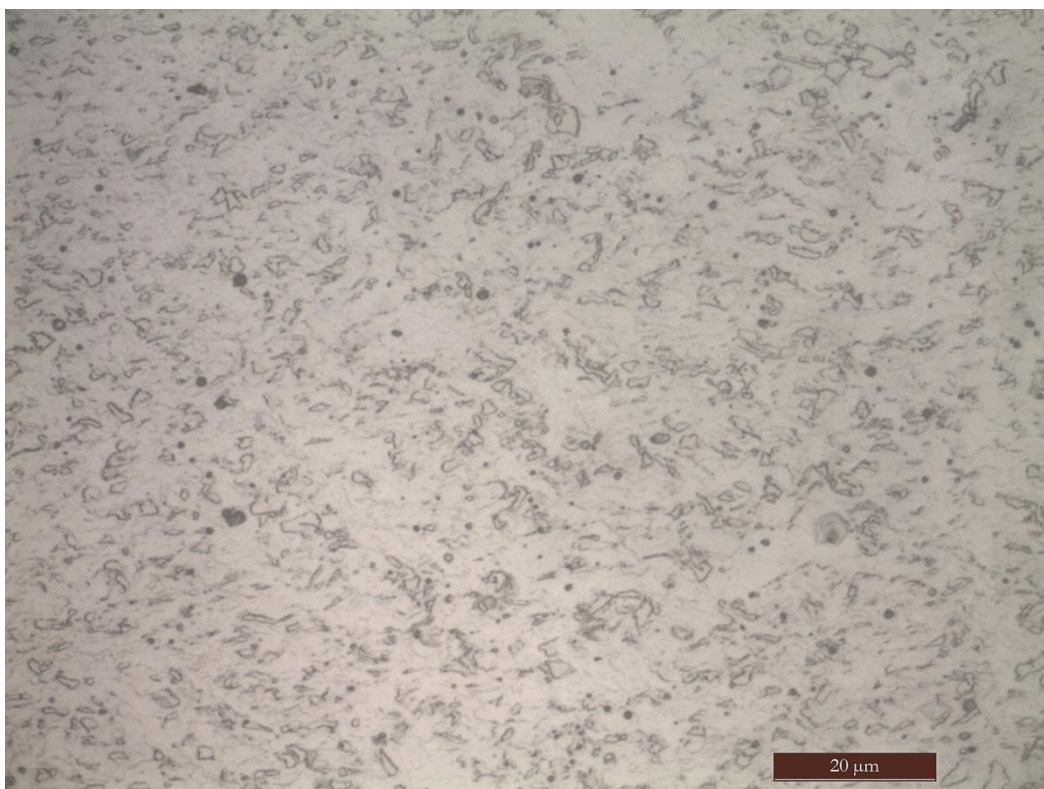
Στη ζώνη τήξης παρατηρούνται κόκκοι δενδριτικής δομής μέσα σε φερριτική μήτρα. Η ανάπτυξη των κόκκων του μετάλλου συγκόλλησης στη ρίζα της έχει φορά προς την κεντρική γραμμή συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των κόκκων ξεκινά από τις δύο πλευρές της συγκόλλησης και κατευθύνεται προς το κέντρο της, όπου τα δύο μέτωπα στερεοποίησης συναντώνται. Αντιθέτως, η ανάπτυξη κόκκων στα ενδιάμεσα περάσματα επικάλυψης γίνεται με φορά προς την επιφάνεια του εναποτεθέντος περάσματος. Το ποσοστό του εμπεριεχόμενου μπαινίτη στη ζώνη τήξης κυμαίνεται εμφανώς σε ποσοστά υψηλότερα από τα αντίστοιχα της ΘΕΖ. Η διφασική μικροδομή φερρίτη-μπαινίτη σε όλες τις ζώνες επαληθεύεται με τη βοήθεια του σχήματος 4.1.



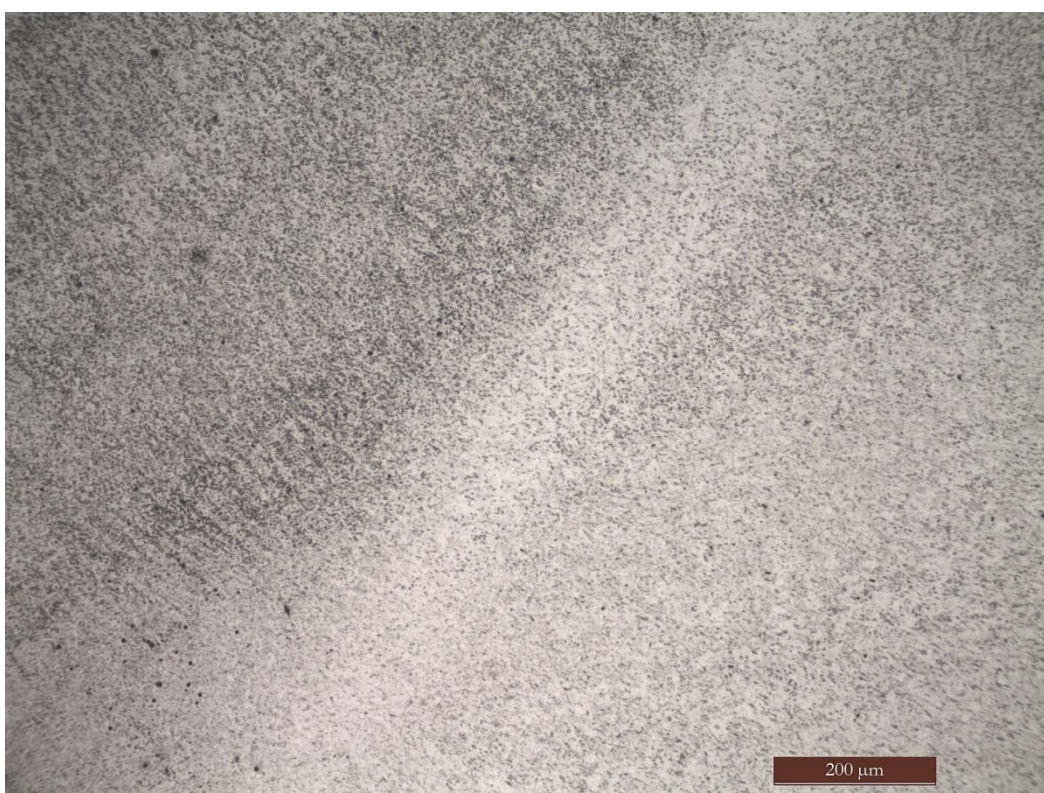
Εικόνα 4.67 Μικροδομή βασικού μετάλλου σειράς δοκιμών Β.



Εικόνα 4.68 Μικροδομή ΘΕΖ της συγκόλλησης δοκιμών της σειράς Β.



Εικόνα 4.69 Μικροδομή της ζώνης τήξης σε συγκόλληση δοκιμίων της σειράς Α.



Εικόνα 4.70 Ύπαρξη ζώνης συνδέσεως κατά τη μετάβαση από το μέταλλο συγκόλλησης στη ΘΕΖ.

4.6.4. Μελέτη Μικρό-σκληρότητας.

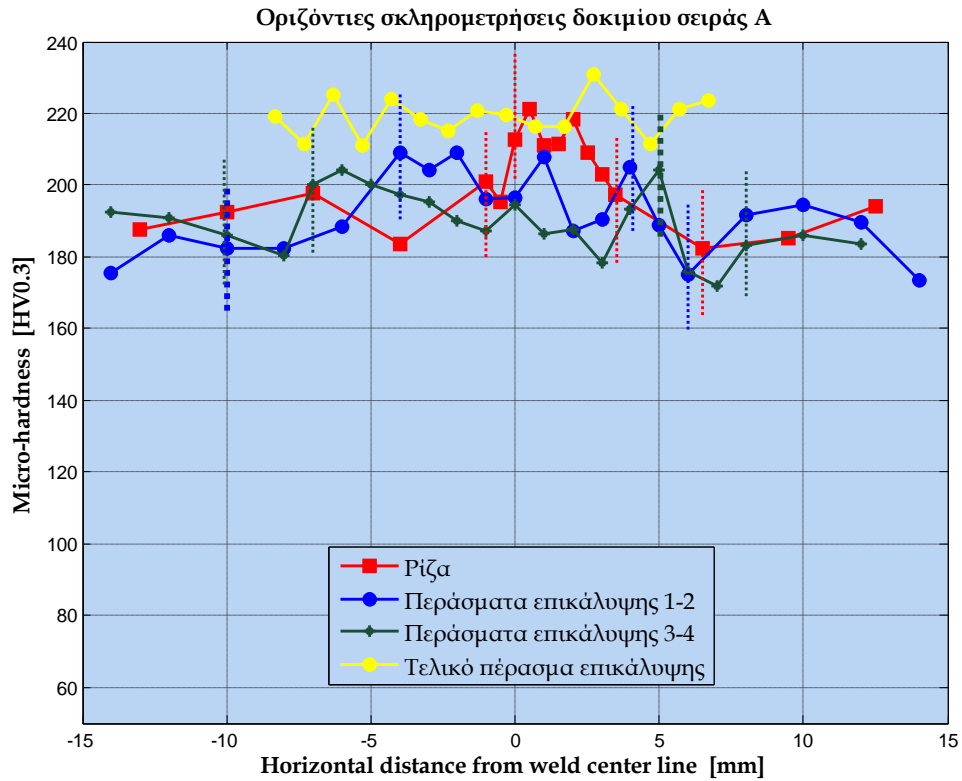
Οι μετρήσεις μικρό-σκληρότητας των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου Vickers, η οποία υλοποιείται από τη διάταξη μικρό-σκληρόμετρου του E.N.T. Έγιναν οριζόντιες μετρήσεις στο ύψος της ρίζας συγκόλλησης, στο ύψος του 1^{ου} & 2^{ου} περάσματος επικάλυψης, του 3^{ου} & 4^{ου} περάσματος επικάλυψης, καθώς και στο ύψος του τελικού πάσου επικάλυψης. Οι προαναφερθείσες οριζόντιες μετρήσεις εκτελέστηκαν καθ' όλο το μήκος των δοκιμίων, συμπεριλαμβάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο όλες τις ενδιαφερόμενες ζώνες συγκόλλησης. Η διακριτοποίηση των μετρήσεων κατέστη αραιή στην περιοχή του μετάλλου βάσης, ενώ πυκνότερη στις περιοχές της ΘΕΖ και της ζώνης τήξης. Η πυκνή διακριτοποίηση των περιοχών σημασίας περιέχει μετρήσεις ανά 0.5mm και 1mm, εν αντιθέσει με την περιοχή μετάλλου βάσης, στην οποία οι μετρήσεις λήφθηκαν με ισαποστάσεις των 2mm και άνω. Επιπροσθέτως, λήφθηκαν κατακόρυφες μετρήσεις μικρό-σκληρότητας στην περιοχή της ζώνης τήξης με έκταση από τη βάση της ρίζας, μέχρι και την επιφάνεια του τελικού περάσματος επικάλυψης.

Επισημαίνεται ότι, οι οριζόντιες μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στις εξής αποστάσεις από το επίπεδο βάσης της ρίζας συγκόλλησης:

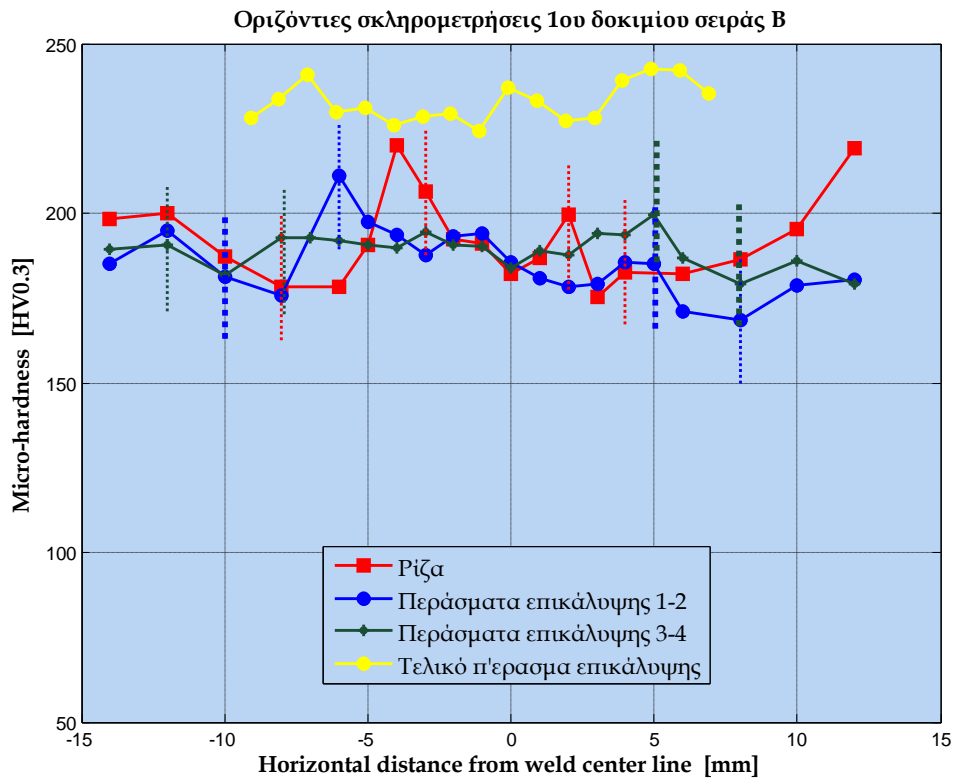
- Για το βέλτιστο δοκίμιο της σειράς Α, οι μετρήσεις ρίζας λήφθηκαν 2.5mm άνω του επιπέδου βάσης της ρίζας, οι μετρήσεις του 1^{ου} & 2^{ου} πάσου επικάλυψης 7.5mm άνω του επιπέδου βάσης της ρίζας, ενώ οι μετρήσεις του 3^{ου} & 4^{ου} πάσου 12mm άνωθεν του επιπέδου. Τέλος οι μετρήσεις του 5^{ου} περάσματος επικάλυψης έγιναν σε απόσταση 15mm από το επίπεδο αναφοράς.
- Για το 1^ο δοκίμιο της σειράς Β, οι μετρήσεις της ρίζας έλαβαν χώρα σε απόσταση 2mm από το επίπεδο αναφοράς, οι μετρήσεις 1^{ου} & 2^{ου} πάσου επικάλυψης 8.5mm άνω του επιπέδου και οι μετρήσεις του 3^{ου} & 4^{ου} περάσματος επικάλυψης 11mm. Οι μετρήσεις του τελικού πάσου διεξήχθησαν σε κατακόρυφη απόσταση 14mm.
- Για το 2^ο δοκίμιο της σειράς Β, οι μετρήσεις που λήφθηκαν, έγιναν σε αποστάσεις 2.5mm, 8mm, 11mm και 14mm αντίστοιχα, αναφορικά με το επίπεδο της βάσης ρίζας.

Ακολουθώς, παρατίθενται διαγράμματα οριζόντιων σκληρομετρήσεων συναρτήσει της απόστασης από την κατακόρυφη κεντρική γραμμή συγκόλλησης, διαγράμματα κατακόρυφων σκληρομετρήσεων συναρτήσει της απόστασης από το επίπεδο βάσης της ρίζας και συγκριτικά διαγράμματα μικρό-σκληρότητας των ενδιαφερόμενων ζωνών για τα δοκίμια και των δυο σειρών.

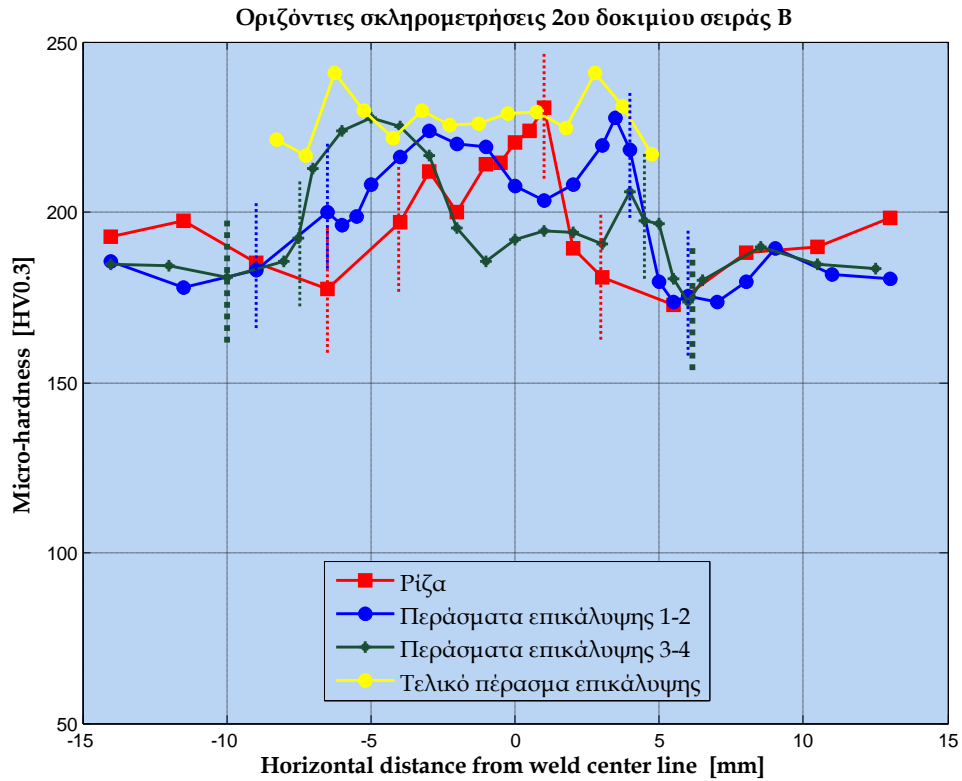
Από την μελέτη των οριζόντιων σκληρομετρήσεων συνάγονται κάποια γενικά και άμεσα συμπεράσματα. Η υψηλότερη σκληρότητα παρουσιάζεται στο τελικό πέραςμα επικάλυψης με μέσες σκληρότητας της τάξης των 220 HV_{0.3}, 232 HV_{0.3} και 227 HV_{0.3} αντίστοιχα για τα δοκίμια της σειράς Α&Β. Εν συνεχεία, για τις οριζόντιες μετρήσεις που διατρέχουν όλο το μήκος του εξεταζόμενου δοκιμίου, η υψηλότερη σκληρότητα παρουσιάζεται και πάλι στη ζώνη τήξης. Οι μετρήσεις του βασικού μετάλλου κυμαίνονται σε μέσα σταθερά επίπεδα της τάξεως των 185-186 HV_{0.3}. Παρατηρείται, επίσης, ελαφρά πτώση της σκληρότητας, κατά τη μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και άμεση επακόλουθη άνοδος κατά τη μετάβαση από τη ΘΕΖ στη ζώνη τήξης. Οι μέσες σκληρότητες της ρίζας και των ενδιάμεσων περασμάτων κυμαίνονται σε κοντινά επίπεδα της τάξεως των 195 HV_{0.3}. Επιπλέον, για τα δυο εκ των τριών δοκιμίων, η ρίζα παρουσιάζει τη μέγιστη σκληρότητα στην περιοχή, όπου συγκλίνουν τα επίπεδα στερεοποίησης, δηλαδή στο μέσο της ρίζας.



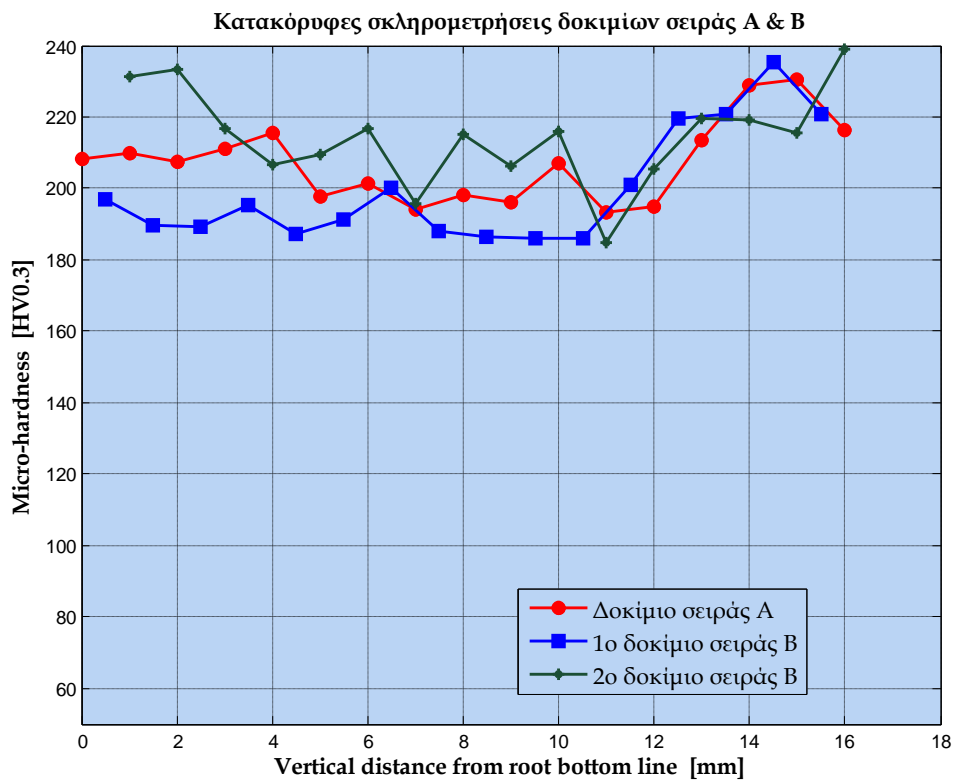
Διάγραμμα 4.10 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις δοκιμίου σειράς A, συναρτήσει της απόστασης από την κεντρική διεύθυνση συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal→HAZ→Weld metal→HAZ→Base metal).



Διάγραμμα 4.11 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις 1^{ου} δοκιμίου της σειράς B, συναρτήσει της απόστασης από την κεντρική διεύθυνση συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal→HAZ→Weld metal→HAZ→Base metal).



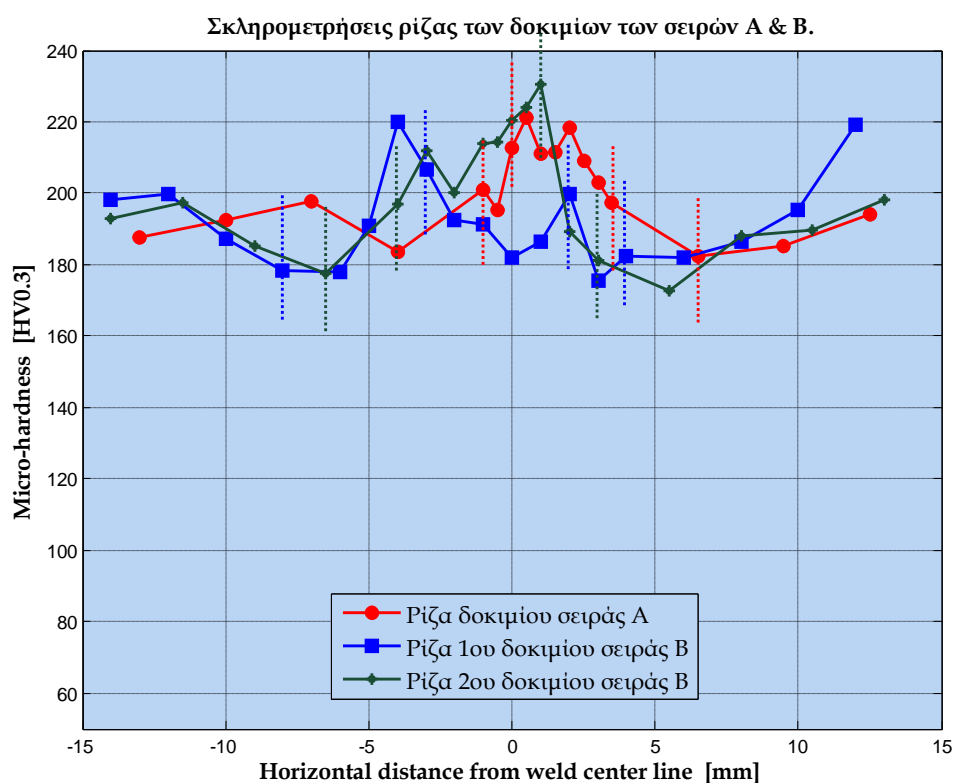
Διάγραμμα 4.12 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις 2^{ου} δοκιμίου της σειράς Β, συναρτήσει της απόστασης από την κεντρική διεύθυνση συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal→HAZ→Weld metal→HAZ→Base metal).



Διάγραμμα 4.13 Συγκριτικές κατακόρυφες σκληρομετρήσεις δοκιμίων της σειράς Α&Β, συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από το επίπεδο βάσης της ρίζας.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, το 1^ο δοκίμιο της σειράς B, το οποίο παρουσιάζει τις μέσες υψηλότερες τιμές επιβαλλόμενου ρεύματος για τη εναπόθεση ρίζας και τα ενδιάμεσα πάσα, παρουσιάζει συνάμα και τις μικρότερες μέσες τιμές σκληρότητας στις περιοχές αυτές. Η απόκλιση, ωστόσο κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα της τάξεως των 2.5-4.5%.

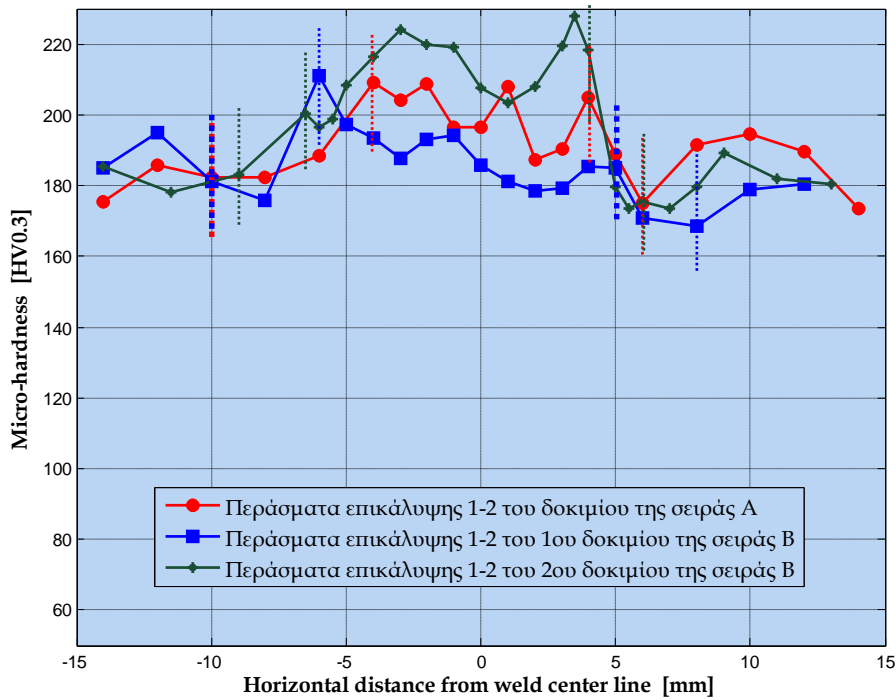
Όσον αφορά τις κατακόρυφες σκληρομετρήσεις, παρατηρείται ότι στην περιοχή της ρίζας και των ενδιάμεσων πάσων, το 1^ο δοκίμιο της σειράς B με τις υψηλότερες μέσες τιμές έντασης ρεύματος παρουσιάζει τις μικρότερες μέσες τιμές σκληρότητας στις περιοχές αυτές. Σαν γενικότερο συμπέρασμα, συνάγεται ότι, υφίσταται μικρή πτώση της μικροσκληρότητας, κατά τη μετάβαση από τη ρίζα στην περιοχή του 1^{ου} & 2^{ου} περάσματος επικάλυψης. Ακολούθως οι τιμές μικροσκληρότητας διατηρούνται σε σταθερά επίπεδα κατά τη μετάβαση στην περιοχή του 3^{ου} και 4^{ου} περάσματος. Τέλος, καταγράφεται απότομη αύξηση της μικροσκληρότητας κατά την μετάβαση στο πάσο τελικής επικάλυψης. Η πτώση της μικροσκληρότητας στις περιοχές των ενδιάμεσων πάσων δικαιολογείται από τις συνεχείς αναθερμάνσεις των περιοχών αυτών κατά την εναπόθεση των περασμάτων μετάλλου συγκόλλησης. Δικαιολογημένα, οι τοπικά μέγιστες τιμές παρατηρούνται κοντά στην επιφάνεια της τελικής ραφής.



Διάγραμμα 4.14 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις ρίζας των εξεταζόμενων δοκιμίων, συναρτήσει της απόστασης τους από την κατακόρυφη κεντρική διεύθυνση της συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal→HAZ→Weld metal→HAZ→Base metal).

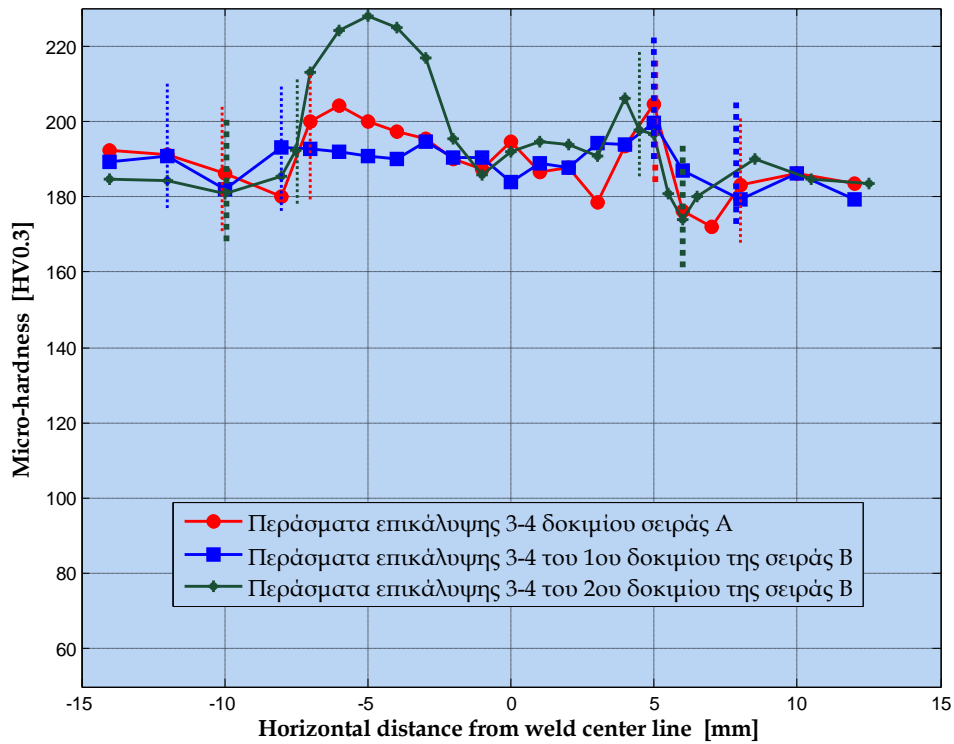
Στο διάγραμμα των παρατιθέμενων μετρήσεων ρίζας, παρατηρείται ελάττωση της μικροσκληρότητας κατά την εκατέρωθεν μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ. Η ζώνη τήξης αντιπροσωπεύει την περιοχή με την υψηλότερη μικροσκληρότητα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγιστοποίηση της σκληρότητας κοντά στην περιοχή του μέσου των δοκιμίων, η οποία ταυτίζεται με την περιοχή συνάντησης των επιπέδων στερεοποίησης στη ρίζα. Αξίζει να τονιστεί ότι, το 1^ο δοκίμιο της σειράς B σημειώνει μέγιστη τιμή στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης. Η μικροσκληρότητα της περιοχής του μετάλλου βάσης κυμαίνεται σε σταθερά επίπεδα και για τρία δοκίμια.

Σκληρομετρήσεις 1ου & 2ου περάσματος επικάλυψης των δοκιμίων των σειρών A&B

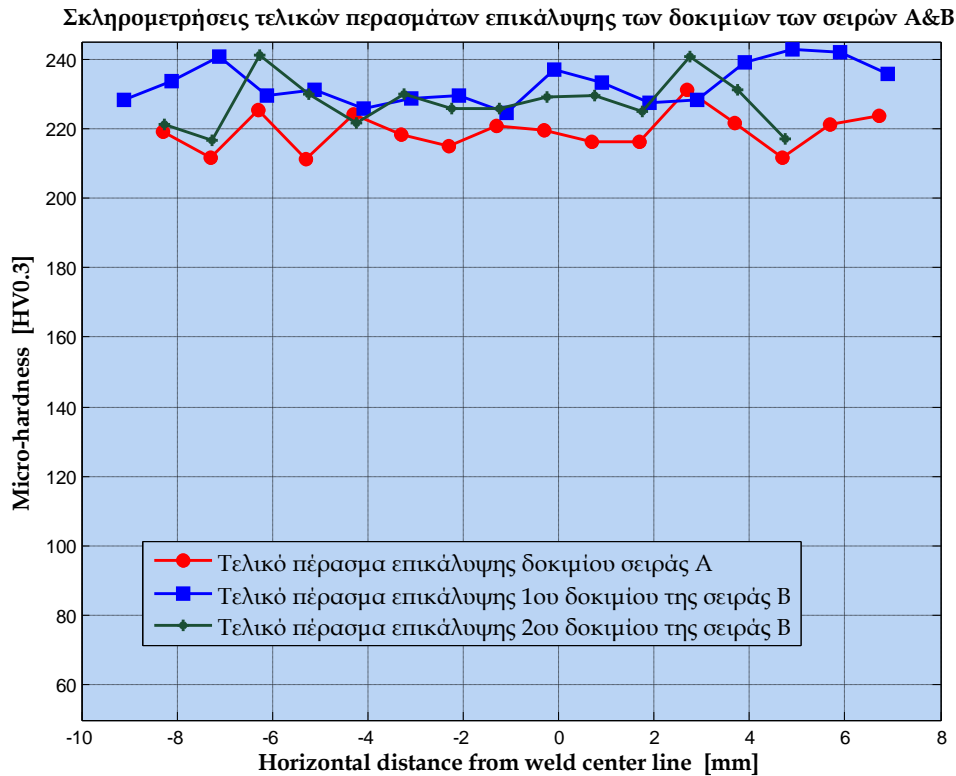


Διάγραμμα 4.15 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις περιοχής 1^{ου} & 2^{ου} περάσματος επικάλυψης, συναρτήσει της απόστασης τους από την κατακόρυφη κεντρική διεύθυνση της συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal → HAZ → Weld metal → HAZ → Base metal).

Σκληρομετρήσεις 3ου & 4ου περάσματος επικάλυψης των δοκιμίων των σειρών A&B



Διάγραμμα 4.16 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις περιοχής 3^{ου} & 4^{ου} περάσματος επικάλυψης, συναρτήσει της απόστασης τους από την κατακόρυφη κεντρική διεύθυνση της συγκόλλησης. Τα διαστήματα μεταξύ των κάθετων διακεκομμένων γραμμών ορίζουν μια περιοχή συγκόλλησης (Base metal → HAZ → Weld metal → HAZ → Base metal).



Διάγραμμα 4.17 Οριζόντιες σκληρομετρήσεις της περιοχής του τελικού πάσου επικάλυψης, συναρτήσει της απόστασης τους από την κατακόρυφη κεντρική διεύθυνση της συγκόλλησης.

Ομοίως, για την περιοχή του 1^{ου} και 2^{ου} περάσματος επικάλυψης, παρατηρείται σταδιακή ελάττωση της μικροσκληρότητας, κατά την εκατέρωθεν μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ. Η πτώση της μικροσκληρότητας του 1^{ου} δοκιμίου της σειράς Β οφείλεται στην ευρεία περιοχή αναθέρμανσης, που διατρέχει το δεξί μισό της ζώνης τήξης (εικόνα 4.43). Και σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές μικροσκληρότητας έπειτα από τη μετάβαση της ΘΕΖ στο μέταλλο βάσης σταθεροποιούνται.

Η κατανομή σκληρότητας για την περιοχή του 3^{ου} και 4^{ου} περάσματος επικάλυψης δεν αποκλίνει σημαντικά από τις προηγούμενες παρατηρούμενες συμπεριφορές. Οι περιοχές της ζώνης τήξης εμφανίζουν σταθερή και ελαφρά υψηλότερη συμπεριφορά μικροσκληρότητας με τις μέγιστες τιμές να παρουσιάζονται στη ζώνη σύνδεσης. Η μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ συνοδεύεται από τοπική μείωση των τιμών της μικροσκληρότητας.

Εν κατακλείδι, η μικροσκληρότητα των εναποθέσεων του τελικού περάσματος επικάλυψης παρουσιάζει ομοιόμορφη και σταθερή κατανομή καθ'όλη την έκταση της ζώνης τήξης. Γεγονός εύλογο, διότι η περιοχή καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από μέταλλο συγκόλλησης και δεν υφίστανται ζώνες μετάβασης. Παρατηρούμε ότι, οι μέσες τιμές μικροσκληρότητας των δοκιμίων κυμαίνονται σε σχετικά ίδια επίπεδα, με τη ραφή του δοκιμίου της σειράς Α να παρουσιάζει τη μικρότερη. Η τάξη μεγέθους ανέρχεται σε 227 HV_{0.3} και 232 HV_{0.3} για τις μέσες τιμές των δοκιμίων της σειράς Β, ενώ η Α αποκλίνει κατά 3.5% και 5.6% αντίστοιχα.

Για όλα τα ανωτέρω διαγράμματα μικροσκληρότητας ισχύει ότι, η περιοχή από την αρχή της εκάστοτε καμπύλης μέχρι την πρώτη διακεκομμένη και η περιοχή από την τελευταία διακεκομμένη ως το τέλος της καμπύλης ορίζουν περιοχές του βασικού μετάλλου. Ακολούθως, οι περιοχές μεταξύ της 1^{ης} και 2^{ης} διακεκομμένης και μεταξύ της 3^{ης} και 4^{ης} ορίζουν τις εκατέρωθεν περιοχές της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Εν

τέλει, η περιοχή μεταξύ της 2^{ης} και 3^{ης} διακεκομμένης ορίζει τη ζώνη τήξης του εκάστοτε περάσματος.

4.6.5. Συμπεράσματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τίθεται ως καίριος στόχος η πραγματοποίηση και μελέτη συγκολλήσεων ,διφασικών χαλύβων, υψηλής αντοχής σε κόπωση με τη συνδρομή της αυτοματοποιημένης διάταξης του E.N.T. Ο προαναφερθείς ρομποτικός βραχίονας υλοποιεί τη μέθοδο συγκόλλησης σωληνοειδών ηλεκτροδίων. Ως μέταλλο βάσης επιλέχθηκαν φερριτό-μπαινιτικοί χάλυβες FCA χαμηλού εμπεριεχομένου ποσοστού άνθρακα (0.4%) και ιδιαίτερα ενισχυμένων χαρακτηριστικών αντοχής κοπώσεως.

A) Συμπεράσματα Παραμετρικής Βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά τις αποθέσεις μεμονωμένων στρώσεων (BoP) και κατ' επέκταση την επίδραση των μελετώμενων παραμέτρων στις κύριες συγκολλητικές διαδικασίες των πλακών FCA ισχύουν τα ακόλουθα. Η ταχύτητα συγκόλλησης V_n επηρεάζει άμεσα το πλάτος των αποκτώμενων ραφών, με προϋπόθεση την απουσία μεταβλητότητας των υπόλοιπων παραμέτρων. Η συγκεκριμένη ιδιότητα κρίνεται εύλογη, διότι μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης για το ίδιο διατρεχόμενο μήκος ραφής, οδηγούν σε διάχυση υψηλότερου βαθμού του μετάλλου εναπόθεσης εγκαρσίως και εκατέρωθεν της κύριας διεύθυνσης συγκόλλησης. Δευτερευόντως επηρεάζει την κυρτότητα της ραφής. Υψηλές τιμές της ταχύτητας παρουσιάζουν υψηλότερη κυρτότητα. Ουσιαστικότερη παράμετρος όλων αποτελεί η ένταση του ρεύματος I , που διαρρέει το ηλεκτρόδιο. Το επιβαλλόμενο ρεύμα καθορίζει τον όγκο, την ποσότητα του εναποτιθέμενου μετάλλου στη συμβολή συγκόλλησης. Οι υψηλές τιμές έντασης ρεύματος οδηγούν σε πλατύτερες κι υψηλότερης κυρτότητας ραφές, υπό την προϋπόθεση σταθερών τιμών των υπόλοιπων παραμέτρων. Μολαταύτα, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει άμεση αλληλεξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων του ρεύματος, της τάσης τόξου και της απόστασης ακροφυσίου και προς συγκόλληση τεμαχίου. Η απόσταση ακροφυσίου-προς συγκόλληση τεμαχίου επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα την ένταση ρεύματος. Αύξηση της απόστασης ισοδυναμεί με μείωση της έντασης ρεύματος. Αντιθέτως μείωση της απόστασης επιφέρει αύξηση της έντασης ρεύματος. Διαπιστώθηκε ότι, αύξηση της τάσεως V του τόξου διατηρώντας σταθερές τις έτερες παραμέτρους οδήγησε σε μείωση της κυρτότητας της ραφής, στο μέσο της κατά την εγκάρσια διεύθυνση, προσδίδοντας της κατά αυτόν τον τρόπο μια πιο πεπλατυσμένη γεωμετρία στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε πως η πρόσθια (forehand) τεχνική συγκόλλησης επί της μεθόδου FCW, έδωσε ικανοποιητικότερα αποτελέσματα αναφορικά με την όψη ραφής και συγκριτικά με την οπίσθια (backhand) τεχνική. Αναλυτικότερα, προέκυψε καλύτερη όψη ραφής, λόγω ομαλότερης εναπόθεσης υλικού συγκόλλησης καθώς και σταθερότερο τόξο συγκόλλησης. Οι ραφές χαρακτηρίστηκαν από ικανοποιητικό πλάτος και κυρτότητα ραφής.

Επίσης, σε συμφωνία με τη διεθνή βιβλιογραφία, παρατηρήθηκε ότι το βέλτιστο εύρος γωνιών συγκόλλησης ϕ , κυμάνθηκε στην περιοχή των 10°-20° ,ως προς την κατακόρυφη στην διεύθυνση συγκόλλησης. Οι ραφές, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν έδωσαν ιδιαίτερα καλή όψη ραφής, χαρακτηριζόμενες από την επιθυμητή ομαλότητα και χαμηλό επίπεδο εκτοξεύσεων.

Θέτοντας υπό εξέταση τις γραμμικά κυματοειδείς κινήσεις, διαπιστώθηκε η ανάγκη επιβολής χαμηλότερων ταχυτήτων και η ιδιαίτερη σημασία των παραμέτρων της συχνότητας και του πλάτους της κυματοειδούς κίνησης. Για σταθερό επιλεγόμενο

πλάτος, οι μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης εξασφάλισαν καλύτερη διαβροχή της περιοχής της συγκόλλησης και έδωσαν ραφές καλύτερης ομαλότητας. Ακολουθώντας, η αύξηση της συχνότητας κυματοειδούς κίνησης ενισχύει την όψη της ραφής στα άκρα (toes) της, υπό την έννοια μείωσης των διαδοχικών διακυμάνσεων της εναπόθεσης σε αυτές τις περιοχές. Παρατηρείται, επίσης, ομαλότερη επιφάνεια ραφής, λόγω της πιο ομοιόμορφης κατανομής του εναποτιθέμενου υλικού. Το βέλτιστο εύρος συχνοτήτων κυμάνθηκε από 1-2Hz για μέσο ενδιαφερόμενο εύρος ταχυτήτων των 30-40 cm/min.

Η μεταλλογραφική παρατήρηση των δοκιμίων των μεμονωμένων αποθέσεων BoP, ανέδειξε τη διασπαστική μικροδομή φερριτική και μαινιτική του μετάλλου βάσης και των ενδιαφερόμενων ζωνών.

Θέτοντας υπό συζήτηση τη μελέτη μικροσκληρότητας των βέλτιστων δοκιμίων, συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα. Η ζώνη τήξης παρουσιάζει την υψηλότερη μικροσκληρότητα με τάξεως μεγέθους μέση σκληρότητα $235HV_{0.3}$. Οι οριζόντιες μετρήσεις ανέδειξαν την ελαφρά ελάττωση της σκληρότητας κατά την μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και την ακόλουθη άνοδο της κατά την μετάβαση από τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη στη ζώνη τήξης. Τη συγκεκριμένη συμπεριφορά επιβεβαίωσαν κι οι κατακόρυφες σκληρομετρήσεις. Το βασικό μέταλλο των δοκιμίων γραμμικής και γραμμικής κυματοειδούς απόθεσης εμφάνισε σταθερή συμπεριφορά με μέσες τιμές σκληρότητας της τάξεως των $197 HV_{0.3}$ και $187 HV_{0.3}$.

B) Συμπεράσματα Κύριων Συγκολλητικών Διαδικασιών.

Όλες οι διαδικασίες συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν με 6 περάσματα, τα οποία περιλαμβάνουν την εναπόθεση της ρίζας, τα ενδιάμεσα πάσα και το τελικό πέρασμα επικάλυψης. Για τα πρώτα 5 περάσματα χρησιμοποιήθηκε γραμμική κίνηση πυρσού, ενώ για το τελικό πέρασμα γραμμική κυματοειδής κίνηση, λόγω του πλεονεκτήματος καθορισμού επακριβούς πλάτους κυματοειδούς κίνησης, που προσφέρει η διάταξη. Η συμβολή της συγκόλλησης ευθυγραμμίστηκε πλήρως με την κίνηση του πυρσού σε έκαστο πέρασμα. Η ευθυγράμμιση πορείας συγκόλλησης χρήζει ιδιαίζουσας προσοχής για το πέρασμα της ρίζας, διότι ενδεχόμενες αποκλίσεις έχουν ως άμεσο αντίκτυπο τις διαφοροποιήσεις της κατανομής του τηγμένου μετάλλου κατά μήκος της ραφής, και πιθανή εμφάνιση ελλিপούς διείδυσης ρίζας. Επίσης, είναι προτιμητέα η εναπόθεση των ενδιάμεσων περασμάτων κατά τρόπο τέτοιο, ώστε η επιφάνεια ραφής στο τέλος του 3^{ου} και 5^{ου} πάσου να είναι όσο πιο επίπεδη δύναται να είναι. Το συγκεκριμένο γεγονός συνδράμει στην πληρέστερη και πιο ομοιόμορφη εναπόθεση του μετάλλου συγκόλλησης για το 4^ο-5^ο και τελικό πέρασμα αντίστοιχα. Διαπιστώθηκε ότι, εντάσεις της τάξεως των 240A-260A οδηγούν σε πολύ ικανοποιητική διείδυση ρίζας για μια τυπική ταχύτητα συγκόλλησης (30-40 cm/min). Όλα τα περάσματα έδωσαν πολύ ικανοποιητικά χαρακτηριστικά όψης ραφής συμπεριλαμβανομένης της διείδυσης, του πλάτους, της κυρτότητας και της ομαλότητας επιφανείας. Για τις κυματοειδείς κινήσεις χρησιμοποιήθηκε συχνότητα 1.67 Hz, η οποία εμπίπτει εντός του βέλτιστου παρατηρούμενου εύρους. Μακροσκοπικά, δεν παρατηρήθηκαν τυπικά σφάλματα επιφανειακών πόρων, υποκοπής (undercut) και υπερκάλυψης (overlap). Σε γενικά πλαίσια, τα περάσματα παρουσίασαν ικανοποιητική διαβροχή της περιοχής συγκόλλησης. Οι ραφές χαρακτηρίστηκαν από λεία και ομαλή επιφάνεια, καθώς και ευδιάκριτη κυρτότητα. Πιο συγκεκριμένα, η ρίζα παρουσίασε ομαλή επιφάνεια και εξαιρετική διείδυση, ενώ το τελικό πέρασμα των δοκιμίων ραφή ομοιόμορφης κατανομής υλικού και ικανοποιητικού πλάτους και κυρτότητας.

Όσον αφορά τη μικροδομή της περιοχής συγκόλλησης, διαπιστώθηκε η ύπαρξη δυο μετώπων στερεοποίησης στην περιοχή της ρίζας, τα οποία κινούνται από τις παρειές της λοξοτομούμενης επιφάνειας με κατεύθυνση προς το κέντρο της ρίζας,

όπου και συναντώνται. Στα υπόλοιπα περάσματα, η στερεοποίηση ξεκινά από τις πλευρές της συγκόλλησης και από την επιφάνεια του προηγούμενου περάσματος με κατεύθυνση την επιφάνεια της συγκόλλησης.

Εν κατακλείδι, έχοντας ως γνώμονα τη μελέτη μικροσκληρότητας, η υψηλότερη σκληρότητα παρουσιάστηκε στο τελικό πέραςμα επικάλυψης με μέσες σκληρότητας της τάξης των 220 HV_{0.3}, 232 HV_{0.3} και 227 HV_{0.3} αντίστοιχα για τα δοκίμια της σειράς A&B. Οι οριζόντιες μικροσκληρομετρήσεις, που έλαβαν χώρα κατά μήκος των ενδιαφερόμενων μεταλλουργικών ζωνών ανέδειξαν ως σκληρότερη ζώνη, τη ζώνη τήξης, με ελαφρά παρατηρούμενη πτώση της σκληρότητας κατά τη μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Ακολούθως, σημειώθηκε σταδιακή άνοδος κατά τη μετάβαση από τη ΘΕΖ στη ζώνη τήξης. Οι μετρήσεις του βασικού μετάλλου κυμάνθηκαν σε μέσα σταθερά επίπεδα της τάξεως των 185-186 HV_{0.3}.

Η μέση σκληρότητα της ρίζας κυμάνθηκε στην περιοχή των 195 HV_{0.3} με την τιμή υψηλότερης σκληρότητας να εμφανίζεται στο κέντρο της ρίζας. Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε ελάττωση της μικροσκληρότητας κατά την εκατέρωθεν μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ για το ύψος της ρίζας. Οι περιοχές 1^{ου}-2^{ου} και 3^{ου}-4^{ου} πάσου επικάλυψης δεν παρουσίασαν αποκλίνουσα συμπεριφορά. Για την ακρίβεια, η ζώνη τήξης για το ύψος των προαναφερθέντων περασμάτων παρουσίασε την μέση υψηλότερη σκληρότητα, ενώ κατά την μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη ΘΕΖ σημειώθηκε τοπική πτώση των τιμών μικροσκληρότητας.

Οι κατακόρυφες σκληρομετρήσεις απέδειξαν μικρή πτώση της μικροσκληρότητας, κατά τη μετάβαση από τη ρίζα στην περιοχή του 1^{ου} & 2^{ου} περάσματος επικάλυψης και διατήρηση αυτών των τιμών σε σταθερά επίπεδα κατά τη μετάβαση στην περιοχή του 3^{ου} και 4^{ου} περάσματος επικάλυψης. Όπως ήταν αναμενόμενο, σημειώθηκε αύξηση της μικροσκληρότητας και διατήρηση της σε μέγιστα επίπεδα για την περιοχή του τελικού πάσου επικάλυψης. Η πτώση της μικροσκληρότητας στις περιοχές των ενδιάμεσων πάσων δικαιολογείται από τις συνεχείς αναθερμάνσεις των περιοχών αυτών κατά την εναπόθεση των περασμάτων μετάλλου συγκόλλησης.