



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΓΙΑ ΤΗ
ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ Χ65 ΜΕ
ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FCAW»**

ΤΡΙΠΟΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Δ. Ι. Παντελής

ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Διπλωματική Εργασία εκπονείται στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη της αναγόμεσης ελασμάτων χάλυβα X65 με ανοξείδωτο ωστενιτικό χάλυβα. Η αναγόμεση πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής συγκόλλησης FCAW από ειδικά προγραμματισμένο ρομποτικό βραχίονα.

Η εργασία χωρίζεται στο Θεωρητικό και στο Πειραματικό μέρος.

Στο θεωρητικό μέρος, παρατίθενται τα κεφάλαια που ορίζουν το θεωρητικό πλαίσιο εφαρμογής κάθε πτυχής της διπλωματικής εργασίας. Η σημασία τους είναι διπλή: Αφενός παρέχουν το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τη διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας και αφετέρου συνδέουν, σε θεωρητικό επίπεδο, τα αποτελέσματα των πειραμάτων με επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Το πειραματικό μέρος περιγράφει το σύνολο των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να ολοκληρωθούν τα πειράματα αναγόμεσης. Το πρώτο τμήμα των εργασιών πραγματεύεται αμιγώς τον προγραμματισμό του ρομποτικού βραχίονα. Η τεχνογνωσία γύρω από το χειρισμό και τη λειτουργία της ρομποτικής διάταξης προήλθε μετά από ενδελεχή και χρονοβόρα μελέτη των εγχειριδίων του κατασκευαστή. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να απλουστευθεί η διαδικασία προγραμματισμού και να διευκολυνθούν εργασίες με τη συγκεκριμένη διάταξη στο μέλλον, στο πρώτο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους περιγράφεται απλά και συνοπτικά ο τρόπος προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα. Το επόμενο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους αφορά στις εργασίες που έλαβαν χώρα προκειμένου να εξεταστεί η ποιότητα των πειραμάτων αναγόμεσης. Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν κοπή των ελασμάτων, λείανση, στίλβωση, χημική προσβολή, μελέτη μικροδομής και τέλος μικροσκληρομέτρηση. Στα τελευταία δύο κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωσή της, αντίστοιχα. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν τόσο στον προγραμματισμό του ρομποτικού βραχίονα, όσο και στην ποιότητα των αναγομώσεων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Δ. Ι. Παντελή για τη συνολική επίβλεψη και την καθοδήγησή του. Οι πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε υπήρξαν καθοριστικές, τόσο σε σχέση με την προσέγγιση του θέματος, όσο και για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Επιπρόσθετα, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά την Θ. Τσιούρβα για την υπομονή και τη βοήθεια της κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και ιδιαίτερα στον Χ.Ξάνθη για τις υπηρεσίες και την προθυμία του να με βοηθήσει ανά πάσα στιγμή.

Τέλος, εκτός από τον καθηγητή Δ. Ι Παντελή, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή Σ. Α. Μαυράκο και στον αναπληρωτή καθηγητή Ν. Τσούβαλη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην παρούσα εργασία κατά τη διάρκεια της παρουσίας της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της αναγόμωσης ελασμάτων χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης, HSLA (High Strength Low Alloy) με ανοξειδωτο ωστενιτικό χάλυβα. Η αναγόμωση πραγματοποιήθηκε με την τεχνική συγκόλλησης FCAW, μέσω του ειδικά προγραμματισμένου ρομποτικού βραχίονα RT 300.1 της εταιρείας IGM Robotersysteme® ο οποίος βρίσκεται στο Ε.Ν.Τ της Σ.Ν.Μ.Μ.

Με τον τεχνικό όρο *αναγόμωση (repair welding)*, εννοούμε την εναπόθεση, μέσω ηλεκτρικού τόξου, ενός μετάλλου που καλείται *μέταλλο αναγόμωσης*, σε κάποιο άλλο μέταλλο που καλείται *μέταλλο βάσης*. Η αναγόμωση λαμβάνει χώρα με σκοπό την ενίσχυση, την επισκευή ή την αντικατάσταση περιοχών του μετάλλου βάσης.

Ως μέταλλο βάσης (base metal) χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας X65, ο οποίος βρίσκεται εφαρμογές ως επί το πλείστον σε κατασκευές σωληνώσεων υψηλής πίεσης. Ο χάλυβας X65 έχει ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής περί τα 450 MPa και όριο θραύσης περί τα 535 MPa) χάρη στα κραματικά στοιχεία που περιέχει (κυρίως C, Si, Mn) και τη θερμομηχανική επεξεργασία στην οποία υπόκειται.

Ως μέταλλο αναγόμωσης χρησιμοποιήθηκε ανοξειδωτος ωστενιτικός χάλυβας στη μορφή του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW.

Ο σκοπός κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού της ρομποτικής διάταξης ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης (ταχύτητα, ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, μήκος ηλεκτρικού τόξου κ.ά.), προκειμένου να δημιουργηθούν αναγομώσεις ποιοτικές, χωρίς ατέλειες (ρωγματώσεις, πόροι, εγκλείσματα, κ.λπ.), με ομοιόμορφο πάχος και μεγάλη διείσδυση του μετάλλου αναγόμωσης στο μέταλλο βάσης.

Μετά από μεγάλο πλήθος δοκιμών, επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη οι βέλτιστες αναγομώσεις οι οποίες μπορούν να κριθούν ως επιτυχείς και αποδεκτές για δύο λόγους. Αφενός διότι δεν υπάρχουν ατέλειες ούτε στην επιφάνεια, αλλά ούτε και στο εσωτερικό των αναγομώσεων, και αφετέρου, λόγω του ότι οι τιμές της σκληρότητας σε όλο τον όγκο της αναγόμωσης είναι παρεμφερείς και κυμαίνονται, κατά μέσο όρο, από περίπου 200 HV_{0.3} στην περιοχή του μετάλλου βάσης έως 240 HV_{0.3} στη ζώνη αναγόμωσης.

ABSTRACT

The present thesis is concerned with the repair welding of HSLA (High Strength Low Alloy) steel plates using austenitic stainless steel as the filler metal. The welding was performed with the FCAW (Flux Cored Arc Welding) process by the IGM Robotersysteme® RT 300.1 robotic manipulator.

In repair welding procedures, the *filler metal* is deposited to the *base metal* through an electric arc. The repair welding takes place, as the name implies, in order to repair, strengthen or replace damaged areas of the base metal.

The base metal used in the present thesis is the X65 HSLA carbon steel, which is primarily used for the construction of high pressure pipelines. The X65 steel comprises of alloying elements (primarily Carbon, Silicon and Manganese) in order to enhance individual mechanical properties such as strength (450 MPa Yield Strength and 535 MPa Ultimate Strength), toughness, etc. Enhanced mechanical properties are also accomplished by manipulating the microstructure with Thermo Mechanical Control Processing (TMCP).

The filler metal used in the repair welding experiments is an austenitic stainless steel in the form of the consumable electrode of the FCAW process.

The goal throughout the programming process of the robotic manipulator was the optimization of the welding parameters (welding speed, electric current, arc voltage, arc length, etc) in order to create robust, high quality repair welds, with constant width, without defects and with the maximum possible penetration of the filler metal in the base metal.

After several trial repair welds, the optimal ones were chosen for microstructural and microhardness analysis of the weld interface, as well as an evaluation of the impact parameters. The optimal repair welds can be considered successful and acceptable for two reasons. Firstly because the repair welds were robust and without defects throughout their volume. Secondly because the microhardness measurements in every zone of the weld interface were similar, without great fluctuations and range from approximately 200 HV_{0.3} in the base metal zone to 240 HV_{0.3} in the fusion zone.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	
ABSTRACT	
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο	2
«Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου»	2
1.1 Εισαγωγή ^[1,2,3,5]	3
1.1.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή Συγκολλήσεων Τήξης	5
1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Συγκολλήσεων ^[1,2,3,4,5,10,17]	6
1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά Συγκολλήσεων Ηλεκτρικού Τόξου ^[1,2,3,5,10,17,18]	8
1.2.2 Το Ηλεκτρικό Τόξο (Electric Arc)	9
1.3 Κατηγορίες Συγκολλήσεων Τήξης Ηλεκτρικού Τόξου	11
1.3.1 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) ^[5,6,11,17,18]	11
1.3.2 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)[5,12,14]	18
1.3.3 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding , GMAW) ^[1,2,3,5,9,13,15,16]	27
1.3.3.1 Γενικά	27
1.3.4 Συγκόλληση Τόξου με Χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding, FCAW) ^[1,2,3,5,7,10,18]	47
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	54
«Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις»	54
2.1 Εισαγωγή ^[1,2,3,4]	55
2.2 Γενικά για τους Ρομποτικούς Βραχίονες ^[2,3,4]	58
2.2.1 Περιγραφή	58

2.2.2 Χρήση Ρομποτικών Βραχιόνων στην Βιομηχανία ^[2,3,4]	60
2.2.3 Αρθρώσεις ^[3,4]	61
2.2.4 Τύποι Ρομποτικών Βραχιόνων & Χώρος Εργασίας.....	64
2.3 Ρομποτική στη Σύγχρονη βιομηχανία ^[2,3,4]	71
3.4 Συμπεράσματα	74
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	78
«Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική»	78
3.1 Εισαγωγή	79
3.2 On-line Διδασκαλία και Off-line Προγραμματισμός ^[1,2,3,4,5,6]	80
3.3 Τρόποι μεταφοράς των ρομπότ στις θέσεις εργασίας ^[5,6]	83
3.4 Διαμόρφωση του ρομποτικού συστήματος ^[2,4,5,6]	86
3.5 Εφαρμογή του Off-Line Προγραμματισμού στην Ναυπηγική Βιομηχανία ^[1,2,4,6]	89
3.6 Αυτόματη Αναπαραγωγή Προγραμμάτων Συγκόλλησης ^[1,2,4,5]	90
3.7 Συμπεράσματα	91
Βιβλιογραφία 3 ^{ου} Κεφαλαίου:.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	93
«Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο».....	93
4.1 Εισαγωγή ^[1,2,6,8]	94
4.2 Μέθοδοι Αναγόμωσης ^[1,2,3,5,6,8]	98
4.3 Η Διαδικασία της Αναγόμωσης ^[3,4,5,7]	100
4.3.1 Προετοιμασία για την Αναγόμωση.....	100
4.3.2. Αναγόμωση	104
4.4 Εργασίες μετά την Αναγόμωση ^[3,4,5,7]	108
4.5 Αναγόμωση Ανοξείδωτου Χάλυβα σε Χαμηλά Κραματωμένο Χάλυβα ^[3,5]	109
Βιβλιογραφία 4 ^{ου} Κεφαλαίου:.....	111
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο	113

«Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης»	113
5.1 Εισαγωγή	114
5.2 Ο Εξοπλισμός Συγκόλλησης.....	114
5.3 Λειτουργία της Ρομποτικής Διάταξης.....	120
5.3.1 Γενικά	120
5.3.2 Διάταξη της κονσόλας χειρισμού	121
5.3.3 Η Εξωτερική Κονσόλα (External Start/Stop Cassette)	131
5.4 Βασικός Προγραμματισμός του Ρομποτικού Βραχίονα	136
5.4.1 Εισαγωγή.....	136
5.4.2 Χρήσιμα Μενού Επιλογών	138
5.4.3 Δημιουργία και Εκτέλεση Προγράμματος	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο	145
«Πειραματική Διαδικασία»	145
6.1 Εισαγωγή	146
6.2 Μέταλλο Βάσης ^[1]	147
6.3 Μέταλλο Αναγόμεσης ^[2]	151
6.4 Η Πειραματική Διαδικασία	152
6.4.1 Προετοιμασία Ελασμάτων X65.....	152
6.4.2 Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Συγκόλλησης	154
6.4.3 Κοπή των Ελασμάτων	159
6.4.4 Εγκιβωτισμός, Λείανση και Στίλβωση των Δοκιμίων	161
6.4.5 Χημική Προσβολή Μετάλλου βάσης	164
6.4.6 Οπτικό Στερεοσκόπιο.....	165
6.4.7 Οπτικό Μικροσκόπιο	167
6.4.8 Μικροσκληρόμετρο	169
6.4.9 Χημική προσβολή Μετάλλου Προσθήκης	172
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6 ^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	174
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο	175

«Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων»	175
7.1 Εισαγωγή	176
7.2 Μελέτη στο Οπτικό Στερεοσκόπιο	177
7.3 Μελέτη στο Οπτικό Μικροσκόπιο	179
7.3.1 Μέταλλο Βάσης (Χάλυβας Χ65).....	179
7.3.2 Μικροδομή Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης (Θ.Ε.Ζ).....	180
7.3.3 Μικροδομή Ζώνης Αναγόμεσης	184
7.4 Μελέτη Μικροσκληρότητας	188
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο	196
«Συμπεράσματα».....	196
8.1 Εισαγωγή	197
8.2 Συμπεράσματα σχετικά με τις Παραμέτρους της Συγκόλλησης-Αναγόμεσης.....	197
8.3 Συμπεράσματα σχετικά με τη Μικροδομή και τη Μικροσκληρότητα	200
8.4 Τελικά Συμπεράσματα.....	201



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

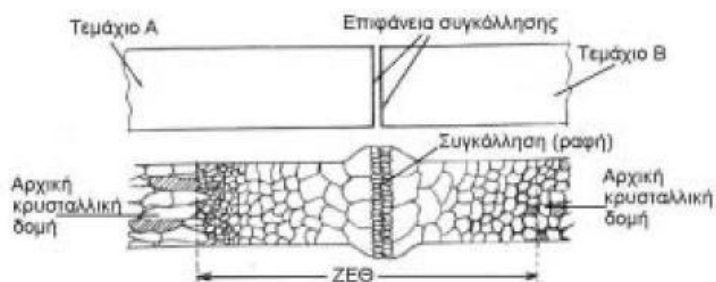
«Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου»

1.1 Εισαγωγή^[1,2,3,5]

Με τον όρο συνδέσεις (joining ή fastening) αναφερόμαστε σε πολυάριθμες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να ενώσουν και να μορφοποιήσουν σε ενιαίο σύνολο επιμέρους τεμάχια, εξαρτήματα κ.λπ. Μια πρώτη θεμελιακή κατηγοριοποίηση των τρόπων σύνδεσης αναφέρεται στη διάκριση μεταξύ μεταλλουργικών συνδέσεων (συγκολλήσεις) και μηχανικών συνδέσεων (ηλώσεις, κοχλιώσεις, συνδέσεις συναρμογής/πίεσης κ.λπ.). Οι συνδέσεις διακρίνονται επίσης σε μόνιμες (μη λυόμενες) και λυόμενες. Οι συγκολλήσεις και οι ηλώσεις ανήκουν στις μόνιμες συνδέσεις ενώ οι κοχλιώσεις στις λυόμενες συνδέσεις.

Με τον όρο *συγκόλληση*, εννοούμε τη μέθοδο κατά την οποία δύο υλικά, συνήθως μέταλλα, συνδέονται μόνιμα μεταξύ τους μέσω τοπικής πρόσφυσης, που επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και μεταλλουργικών συνθηκών. Επειδή ο συνδυασμός θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να κυμαίνεται από υψηλή θερμοκρασία με καθόλου πίεση μέχρι υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία, η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση, δημιουργείται μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων μια κρυσταλλική σύνδεση. Στο σχήμα φαίνεται η έννοια της μεταλλικής σύνδεσης των δυο μεταλλικών τεμαχίων κατά τη συγκόλληση καθώς και η λεγόμενη *ζώνη συγκόλλησης* ή *θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ)*.

Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ), ονομάζεται το τμήμα που περιλαμβάνει τη συγκόλληση (ραφή) μαζί με τις γειτονικές περιοχές των συνδεδεμένων κομματιών, οι οποίες δέχονται την επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής στη ζώνη συγκόλλησης δυο μεταλλικών τεμαχίων

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Γενικά οι μέθοδοι συγκόλλησης των μετάλλων μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες:

- 1) **Συγκολλήσεις τήξης (fusion welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα στα προς συγκόλληση μέταλλα μέχρι να συμβεί τήξη ενώ συνήθως προστίθεται στην περιοχή σύνδεσης τηγμένο συγκολλητικό υλικό. Δεν απαιτείται εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μεταξύ άλλων οι ηλεκτροσυγκολλήσεις τόξου.
- 2) **Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electric resistance welding)**, όπου πρώτα προσδίδεται θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τα υπό ένωση μέταλλα (φαινόμενο Joule) και μετά εφαρμόζεται εξωτερική πίεση.
- 3) **Συγκόλληση σε στερεή φάση (solid-phase welding)** όπου εφαρμόζεται εξωτερική πίεση χωρίς προηγούμενη τήξη των υπό συγκόλληση μετάλλων, εκτός από ένα πολύ λεπτό στρώμα κοντά στις επιφάνειες συγκόλλησης.
- 4) **Ετερογενής συγκόλληση ή ένωση σε υγρή-στερεή φάση (liquid-solid phase joining)**. Τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο τήξης και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί ένωση σε στερεά κατάσταση.
- 5) **Κόλληση με κόλλα (adhesive bonding)** όπου η ένωση επιτυγχάνεται μέσω της μοριακής έλξης των προς ένωση επιφανειών και της κόλλας.

Οι συγκολλήσεις τήξης διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες, ανάλογα με την φύση του συγκολλητικού υλικού. Σε **αυτογενείς**, όπου το υλικό κόλλησης και τα προς συγκόλληση τεμάχια είναι από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό και τις **ετερογενείς**, όπου το υλικό κόλλησης και αυτό των τεμαχίων είναι διαφορετικό.

Η πηγή θερμότητας σε αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης είναι ένα από τα ακόλουθα: ηλεκτρικό τόξο, φλόγα οξυγόνου-ασετυλίνης, δέσμη ηλεκτρονίων και ακτίνες laser. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι κυριότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι συγκόλλησης τήξης με ηλεκτρικό τόξο.

1.1.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή Συγκολλήσεων Τήξης

1865: Ηλεκτροσυγκόλληση τμημάτων σιδήρου με χρήση ηλεκτρικής πηγής, από Wilde (Αγγλία)

1881: Πρώτη χρήση ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα για τήξη μετάλλων, από Moissan (Γαλλία).

1885: Δημιουργία ραφής συγκόλλησης με χρήση ηλεκτροδίου άνθρακα και βέργας ως προστιθέμενο υλικό, από Bernardos (Ρωσία) και Solszewski.

1885: Έκδοση γερμανικού διπλώματος ευρεσιτεχνίας για συγκόλληση με ηλεκτρόδιο άνθρακα, στο όνομα Bernardos (Ρωσία).

1890: Συγκόλληση δια αντιστάσεων από Thomson.

1890: Πρώτη συγκόλληση GTAW, από C.L.Coffin.

1892: Πειράματα συγκόλλησης με μεταλλικά ηλεκτρόδια, από Slavianoff (Ρωσία).

1895: Εφεύρεση καυστήρα οξυγόνου-ασετυλίνης, από Le Chatelier (Γαλλία).

1903: Συγκολλήσεις με χρήση θερμότη, από Goldschmidt (Γερμανία).

1907: Πρώτη χρήση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, από Kjellberg (Σουηδία).

1930: -Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Η.Π.Α).

-Συγκόλληση με προστασία αερίου και ηλεκτρόδιο βολφραμίου, Hobart και Dever (Η.Π.Α).

1946: Συγκόλληση με προστασία αερίου και μεταλλικό ηλεκτρόδιο, GMAW (Η.Π.Α).

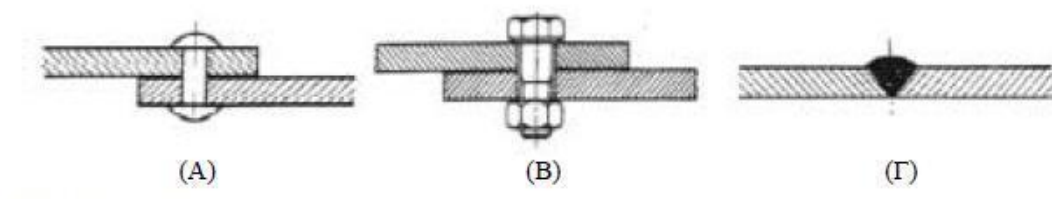
1950: Αυτόματη κατακόρυφη συγκόλληση electro slag (Ρωσία).

1955: Κοπή με τόξο πλάσματος (Η.Π.Α).

1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Συγκολλήσεων^[1,2,3,4,5,10,17]

Όπως αναφέρθηκε, οι μέθοδοι σύνδεσης μεταλλικών μερών που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη βιομηχανία είναι:

- 1) *Μηχανική σύνδεση*, με χρήση «στοιχείων σύνδεσης», πχ ηλώσεις, κοχλιώσεις.
- 2) *Συγκόλληση*, δηλαδή μεταλλουργική σύνδεση μερών με ενεργοποίηση μεταλλουργικών διεργασιών (τήξη, διάχυση, δημιουργία στερεού διαλύματος) που οδηγούν σε αλλαγή της μικροδομής στην περιοχή της διεπιφάνειας επαφής.
- 3) *Κόλληση*, με χρήση συνδετικών οργανικών ουσιών (κόλλες) υψηλής πρόσφυσης σε μεταλλικές επιφάνειες και υψηλής αντοχής σε διάτμηση.



Σχήμα 1.1: Μέθοδοι σύνδεσης μεταλλικών τεμαχίων: (Α) Με ήλωση (Β) Με κοχλιωτή σύνδεση (Γ) Με συγκόλληση

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους σύνδεσης μεταλλικών μερών είναι:

- Υψηλή μηχανική αντοχή της σύνδεσης που ενδέχεται να υπερβεί αυτή των μετάλλων βάσης.
- Υδατοστεγανότητα και αεροστεγανότητα της σύνδεσης.
- Δυνατότητα σύνδεσης μερών ανεξαρτήτως σχήματος και μεγέθους.
- Οικονομία υλικού και χρόνου εργασίας με αποτέλεσμα μειωμένο κόστος κατασκευής.
- Απλούστευση κατασκευών (στις ηλώσεις απαιτούνται πολυπλοκότερες διαμορφώσεις).
- Μειωμένο βάρος κατασκευής.
- Στις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις συγκόλλησης, οι διαδικασίες των συγκολλήσεων γίνονται αυτόματα, με ρομποτισμό. Μέσω της αυτοματοποίησης,

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

μειώνεται αισθητά το κόστος παραγωγής ενώ ταυτόχρονα η ποιότητα των συγκολλήσεων είναι άριστη.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των συγκολλήσεων συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους σύνδεσης μεταλλικών μερών είναι:

- Κίνδυνος ψαθυρής θραύσης εξαιτίας της μονολιθικότητας των συγκολλητών κατασκευών και εσωτερικών ελαττωμάτων της συγκόλλησης (εγκλείσματα οξειδίων, πόροι, ρωγμές) ή δημιουργία εσωτερικών τάσεων.
- Κίνδυνος στρέβλωσης και παραμόρφωσης σύνθετων συγκολλητών κατασκευών λόγω θερμικών διαστολών κατά την κατασκευή.
- Δυσκολία εντοπισμού εσωτερικών ελαττωμάτων χωρίς την χρήση μεθόδων καταστροφικού ελέγχου.
- Δυσκολία συγκόλλησης ορισμένων μετάλλων-κραμάτων.



Σχήμα 1.1: Ρωγμάτωση στην ζώνη τήξης



Σχήμα 1.2: Ρωγμάτωση στις γειτονικές περιοχές της ζώνης τήξης

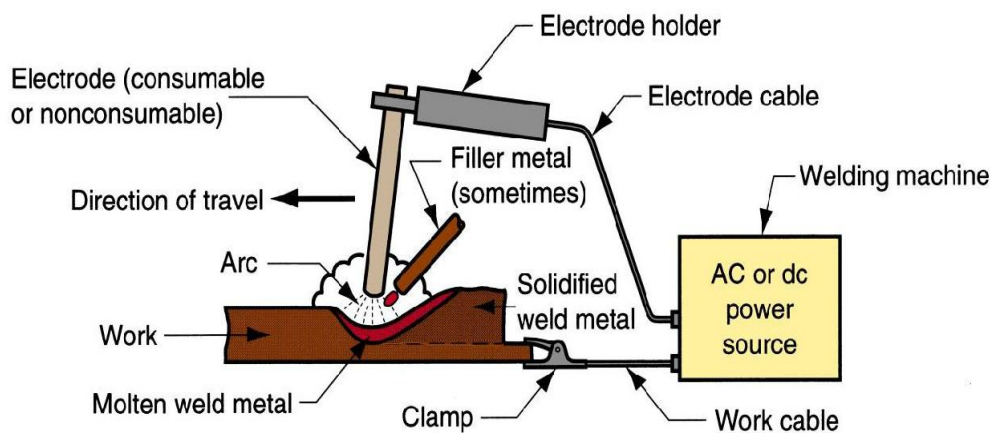
1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά Συγκολλήσεων Ηλεκτρικού Τόξου^[1,2,3,5,10,17,18]

Στις συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου, η θερμότητα που απαιτείται για την τήξη των μεταλλικών κομματιών και του πρόσθετου υλικού παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο (βολταϊκό τόξο). Το τόξο δημιουργείται μεταξύ του μετάλλου προς συγκόλληση και του ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρόδιο και το μέταλλο προς συγκόλληση συνδέονται στα άκρα κατάλληλης ηλεκτρικής πηγής, συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια για την συγκόλληση.

Κατά τις συγκολλήσεις τόξου αναπτύσσεται θερμοκρασία της τάξεως των 5500 °C, αρκετά υψηλή για να λιώσει οποιοδήποτε μέταλλο.

Οι περισσότερες διεργασίες τόξου χρησιμοποιούν πρόσθετο υλικό προκειμένου να αυξηθεί ο όγκος και η αντοχή της συγκόλλησης.

Στις συγκολλήσεις τόξου, κοντά στην άκρη του ηλεκτροδίου σχηματίζεται ένα λουτρό τηγμένου μετάλλου. Καθώς το ηλεκτρόδιο κινείται κατά μήκος της σύνδεσης, το τήγμα στερεοποιείται πίσω του, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο κρυσταλλική σύνδεση.



Σχήμα 1.3: Βασική διαμόρφωση συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου

1.2.2 Το Ηλεκτρικό Τόξο (Electric Arc)

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι συγκολλήσεις τόξου πρέπει να γίνει σύντομη αναφορά στο πως δημιουργείται και τι ακριβώς είναι ένα ηλεκτρικό τόξο.

Ηλεκτρικό τόξο είναι μια εκκένωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά μήκος ενός κενού χώρου σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Διατηρείται λόγω του ιονισμού μιας στήλης αέρα (πλάσμα) μέσα από την οποία υπάρχει ροή ρεύματος. Η δημιουργία του τόξου επιτυγχάνεται με μια από τις παρακάτω τεχνικές:

- Δημιουργία τόξου μέσω 'ξυσίματος' ('scratch') του ηλεκτροδίου με το τεμάχιο
- Δημιουργία τόξου μέσω 'χτυπήματος' ('tapping') του ηλεκτροδίου στην επιφάνεια του τεμαχίου
- Με στιγμιαία υψηλή τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μετάλλου βάσης

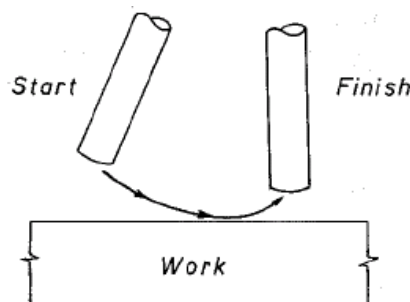


Figure 1. "Scratch" method of arc starting.

Σχήμα 1.4: Δημιουργία τόξου μέσω 'ξυσίματος'

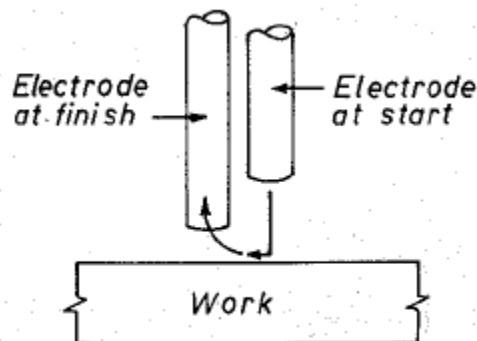


Figure 2. "Tapping" method of arc starting.

Σχήμα 1.5: Δημιουργία τόξου μέσω 'χτυπήματος'

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Κατά την επαφή του ηλεκτροδίου με το μεταλλικό τεμάχιο, ηλεκτρόνια απομακρύνονται από το ηλεκτρόδιο που λειτουργεί ως κάθοδος (αρνητικός πόλος) και κατευθύνονται με μεγάλη ταχύτητα προς το τεμάχιο που λειτουργεί ως άνοδος (θετικός πόλος). Κατά τη διαδρομή αυτή τα ηλεκτρόνια προσκρούουν στα μόρια του αέρα τα οποία διασπώνται σε ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα. Με αυτό τον τρόπο ο αέρας γίνεται αγωγίμος. Από την σύγκρουση των ηλεκτρονίων στην άνοδο και των θετικών ιόντων στην κάθοδο εκλύεται θερμότητα. Επειδή τα ηλεκτρόνια προσκρούουν με μεγαλύτερη ταχύτητα στην άνοδο απ'ότι τα θετικά ιόντα στην κάθοδο, η άνοδος θερμαίνεται περισσότερο (θερμοκρασία στην άνοδο περί τους 4200°C ενώ στην κάθοδο περί τους 3500°C). Στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου αυξηθεί πέρα από ένα όριο το ηλεκτρικό τόξο διακόπτεται.



Σχήμα 1.6: Ηλεκτρικό τόξο σε συγκόλληση

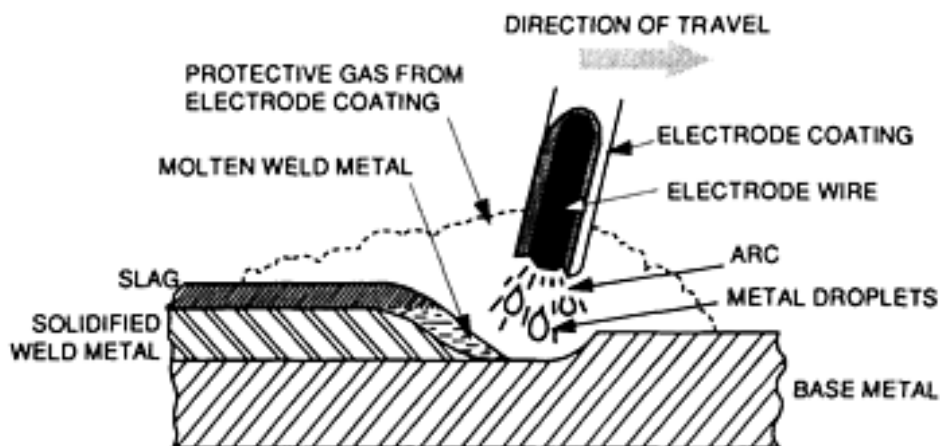
1.3 Κατηγορίες Συγκολλήσεων Τήξης Ηλεκτρικού Τόξου

1.3.1 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding, SMAW)[5,6,11,17,18]

1.3.1.1 Γενικά

Η συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW: Shielded Metal Arc Welding ή MMAW: Manual Metal Arc Welding ή Stick Welding) είναι η πιο διαδεδομένη και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος συγκόλλησης. Αυτό ισχύει, κυρίως λόγω της ευελιξίας που παρέχει ως προς την εφαρμογή της, το χαμηλό κόστος και την απλότητα του εξοπλισμού της. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογές σε οποιοδήποτε κλάδο της σύγχρονης βιομηχανίας απαιτεί συγκόλληση χαλύβδινων τεμαχίων ή κατασκευών.

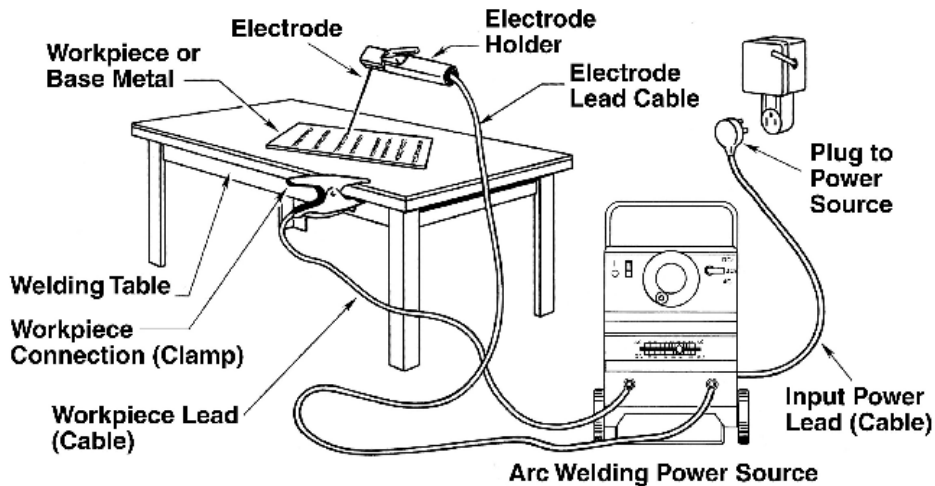
Πρόκειται για μια χειροκίνητη διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο μεταξύ του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Η θερμότητα που εκλύεται από το τόξο αυτό συμβάλλει στην μεταφορά τόσο του μεταλλικού πυρήνα όσο και της επένδυσης του ηλεκτροδίου υπό μορφή τηγμένων σταγονιδίων στο μέταλλο βάσης. Το τηγμένο μέταλλο βάσης συγκεντρώνεται στη λίμνη συγκόλλησης και στερεοποιείται σε μέταλλο συγκόλλησης. Τα τηγμένα σταγονίδια του μίγματος του μεταλλικού πυρήνα και της επένδυσης του ηλεκτροδίου επιπλέουν στην λίμνη συγκόλλησης και μετά τη στερεοποίηση τους, δημιουργούν μια στρώση σκουριάς η οποία καλύπτει και προστατεύει το μέταλλο συγκόλλησης. Σε περίπτωση συγκόλλησης με πολλαπλά πάσα η σκουριά πρέπει να αφαιρείται κάθε φορά.



Σχήμα 1.7: Συγκόλληση SMAW

1.3.1.2 Διάταξη και Εξοπλισμός της Μεθόδου SMAW

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά την μέθοδο SMAW καθώς και η διάταξη του φαίνονται στο σχήμα 1.7 :

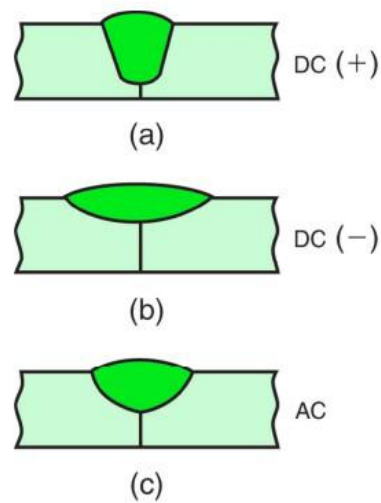


Σχήμα 1.7: Διάταξη εξοπλισμού σε συγκόλληση SMAW

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Τη *μηχανή συγκόλλησης* ή *αλλιώς γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος*. Σκοπός της είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλης τάσης και έντασης προκειμένου το ηλεκτρικό τόξο να είναι σταθερό και ελεγχόμενο. Συνήθεις τιμές έντασης για ηλεκτρόδια της μεθόδου SMAW είναι 25-500 A (Ampere) με συχνότερα χρησιμοποιούμενες 100-300 A ενώ τάσης, 14-24 V (Volt) για γυμνά ή ελαφρά επενδεδυμένα ηλεκτρόδια και 20-40 για επενδεδυμένα. Η συγκόλληση μπορεί να γίνει με συνεχές (Direct Current, D.C) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (Alternating Current, A.C). Στην περίπτωση χρήσης συνεχούς ρεύματος μπορούμε να έχουμε ορθή (straight polarity d.c.s.p) ή ανάστροφη πολικότητα (reverse polarity d.c.r.p). Η επιλογή της πολικότητας και του τύπου ρεύματος επηρεάζει τη ραφή συγκόλλησης όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8:

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Σχήμα 1.8: Επίδραση πολικότητας και τύπου ρεύματος στην ραφή συγκόλλησης

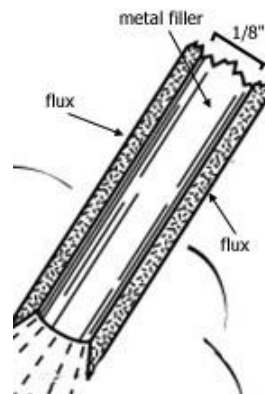
- Τη λαβίδα του ηλεκτροδίου και το σφιγκτήρα τα οποία συνδέονται με την μηχανή συγκόλλησης μέσω δύο καλωδίων. Ο σφιγκτήρας (clamp) συνδέει το καλώδιο επιστροφής με το τραπέζι εργασίας (ή με τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν) έτσι ώστε να κλείσει το κύκλωμα και να μπορεί να δημιουργηθεί και να διατηρηθεί το ηλεκτρικό τόξο. Η λαβίδα του ηλεκτροδίου, την οποία χειρίζεται ο συγκολλητής, συγκρατεί το ηλεκτρόδιο και μεταδίδει σε αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα από τη μηχανή συγκόλλησης.
- Το επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, το οποίο προσαρμόζεται και συγκρατείται σε κατάλληλη υποδοχή της λαβίδας.

1.3.1.3 Ο Ρόλος του Επενδεδυμένου Ηλεκτροδίου στην SMAW

Το ηλεκτρόδιο της μεθόδου SMAW είναι αναλώσιμο καθώς τήκεται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αποτελείται από δυο μέρη:

- Το *μεταλλικό πυρήνα* ο οποίος άγει το ρεύμα συγκόλλησης και τηκόμενος παρέχει το μέταλλο προσθήκης στη συγκόλληση.
- Την *επένδυση* η οποία έχει πολλαπλούς ρόλους.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Σχήμα 1.9: Τομή Επενδεδυμένου Ηλεκτροδίου

Η επένδυση του ηλεκτροδίου περιέχει διάφορα χημικά στοιχεία προκειμένου να μπορεί να παρέχει τα παρακάτω:

1. Προστασία από ανεπιθύμητα αέρια, κυρίως N_2 , O_2 , H_2 με τη δημιουργία προστατευτικού παραπετάσματος αερίων (CO_2 , H_2O) γύρω από το τόξο.
2. Προστασία του τηγμένου μετάλλου από την ατμοσφαιρική οξείδωση μέσω σχηματισμού στρώσης σκουριάς η οποία ταυτόχρονα βοηθάει το σχηματισμό της ραφής συγκόλλησης
3. Χημική αντίδραση της τηγμένης σκουριάς με το βασικό μέταλλο με αποτέλεσμα τη διάλυση οξειδίων και άλλων ακαθαρσιών που υπάρχουν στο τήγμα και την αφαίρεση των μη επιθυμητών O_2 και H_2 (προσθήκη Si, Mn στην επένδυση για το πρώτο και CaF για το δεύτερο).
4. Ιονισμό της ατμόσφαιρας ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο προς συγκόλληση τεμάχιο προκειμένου να διευκολύνεται η δημιουργία και η διατήρηση σταθερότητας του τόξου ακόμα και στην περίπτωση λειτουργίας με εναλλασσόμενο ρεύμα (A.C)
5. Κραματικά στοιχεία τα οποία παρέχουν ειδικά χαρακτηριστικά με σκοπό την ενίσχυση της ζώνης συγκόλλησης.
6. Απομάκρυνση φυσαλίδων που ενδέχεται να υπάρχουν στο τήγμα. Σχηματισμός φυσαλίδων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής της συγκόλλησης.
7. Σκόνη σιδήρου, σε ορισμένα ηλεκτρόδια, με σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας συγκόλλησης φερριτικών μετάλλων.

1.3.1.4 Παράμετροι που Επηρεάζουν την Διαδικασία και την Ποιότητα της Συγκόλλησης

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα συγκόλλησης είναι οι εξής:

- *Τύπος Ηλεκτροδίου:* Το ηλεκτρόδιο πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψιν τον τύπο του μετάλλου βάσης, τον προσδοκώμενο ρόλο του στη συγκόλληση και τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες του τελικού τεμαχίου.
- *Μέγεθος Ηλεκτροδίου:* Το μέγεθος του ηλεκτροδίου πρέπει να επιλέγεται με βάση τον τύπο του ηλεκτροδίου, τη θέση συγκόλλησης, τη μέθοδο σύνδεσης των τεμαχίων, το πάχος του μετάλλου βάσης και τη δεξιότητα του συγκολλητή.
- *Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος:* Στην περίπτωση που η ένταση του ρεύματος είναι πολύ υψηλή, το ηλεκτρόδιο τήκεται γρήγορα με αποτέλεσμα η λίμνη συγκόλλησης να είναι μεγάλη και δύσκολα περιορίσιμη. Από την άλλη, χαμηλή ένταση ρεύματος δεν παρέχει αρκετή θερμότητα ώστε να προκύψει τήξη του μετάλλου βάσης γεγονός που οδηγεί σε λίμνη συγκόλλησης ανεπαρκούς μεγέθους και κατ' επέκταση ανομοιογένεια και ασυνέχειες στη ραφή συγκόλλησης. Πρέπει επίσης να αναφερθεί πως κάθε ηλεκτρόδιο μπορεί να υποστηρίξει εντάσεις ρεύματος μέχρι προκαθορισμένων ορίων. Αν η ένταση ξεπερνά αυτά τα όρια, το ηλεκτρόδιο υπερθερμαίνεται και η επένδυση ραγίζει. Αν από την άλλη η ένταση είναι πολύ χαμηλή, τότε δεν μπορεί να διατηρηθεί το ηλεκτρικό τόξο και ταυτόχρονα να παραχθεί ο προστατευτικός μανδύας αερίων από την τήξη της επένδυσης του ηλεκτροδίου.
- *Μήκος Τόξου:* Αν το μήκος του τόξου είναι πολύ μεγάλο τότε η μεταφορά του τηγμένου συλλιπάσματος από το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης δεν γίνεται πλέον υπό την μορφή σταγονιδίων αλλά σφαιριδίων μεγαλύτερου μεγέθους. Η μεταφορά αυτή είναι άστατη και οδηγεί σε φαρδιά και ασυνεχή ραφή συγκόλλησης με πιθανή ύπαρξη πορώδους και ταυτόχρονα μειωμένες μηχανικές ιδιότητες. Ανεπαρκές μήκος τόξου δεν εξασφαλίζει

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

αρκετή θερμότητα για την τήξη του μετάλλου βάσης και του ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα συχνά το ηλεκτρόδιο να κολλάει στο μέταλλο βάσης.

- **Ταχύτητα Κίνησης Τόξου:** Μεγάλη ταχύτητα επιτρέπει στη λίμνη συγκόλλησης να ψυχθεί και να στερεοποιηθεί προτού απελευθερωθούν οι ακαθαρσίες και τα διάφορα αέρια που μπορούν να οδηγήσουν σε οξείδωση ενώ ταυτόχρονα η ραφή συγκόλλησης έχει ανεπαρκές πάχος. Μικρή ταχύτητα οδηγεί σε συσσώρευση μετάλλου τουτέστιν η ραφή συγκόλλησης έχει μεγαλύτερο πάχος απ' ότι χρειάζεται.



Σχήμα 1.10: Επίδραση παραμέτρων στην ποιότητα συγκόλλησης: 1) Ικανοποιητική Όψη Ραφής, 2) Χαμηλή Ένταση Ρεύματος, 3) Υψηλή Ένταση Ρεύματος, 4) Μικρό Μήκος Τόξου, 5) Μεγάλο μήκος τόξου, 6) Χαμηλή Ταχύτητα Τόξου, 7) Υψηλή Ταχύτητα Τόξου

AMOUNT OF HEAT DIRECTED AT WELD	WELD POOL
TOO LOW	
CORRECT	
TOO HOT	

Σχήμα 1.11: Επίδραση της παρεχόμενης θερμότητας στη μορφή της ραφής συγκόλλησης

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

1.3.1.5 Ονοματολογία Ηλεκτροδίων

Η American Welding Society (AWS) έχει καθιερώσει ένα σύστημα αναγνώρισης και κατηγοριοποίησης των διαφόρων τύπων ηλεκτροδίων. Με βάση την ονοματολογία της AWS, ο συμβολισμός κάθε ηλεκτροδίου ξεκινάει με το πρόθεμα 'E' (Welding Electrode). Τα σύμβολα που έπονται του προθέματος βασίζονται σε κριτήρια τα οποία περιγράφουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις δυνατότητες συγκόλλησης του ηλεκτροδίου. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν τη χημική σύνθεση και τις μηχανικές ιδιότητες του μεταλλικού πυρήνα του ηλεκτροδίου, συγκεκριμένες παραμέτρους της διαδικασίας ή συνδυασμό των ανωτέρω.

Ο συμβολισμός από την AWS είναι επομένως του τύπου: E(x)xyyz, όπου:

- E: επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο
- (x)yx: 2 ή 3 ψηφία που αντιστοιχούν στην αντοχή εφελκυσμού του αποτιθέμενου μετάλλου συγκόλλησης, σε ksi (1 ksi = 1000 lbs / in² = 6.984 MN / m²)
- y: το πρώτο y αντιστοιχεί στην θέση συγκόλλησης, με '1' να συμβολίζει όλες τις θέσεις, '2' επίπεδη και μετωπική και '3' επίπεδη
- yy: και τα δυο y μαζί αντιστοιχούν στις συνθήκες τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος

1.3.1.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της SMAW

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου SMAW συγκριτικά με άλλες μεθόδους είναι τα εξής:

1. Χαμηλό κόστος.
2. Φορητός και σχετικά απλός εξοπλισμός. Η SMAW δεν περιλαμβάνει μπουκάλα και σωλήνα παροχής αδρανούς αερίου όπως άλλες μέθοδοι (το αέριο προστασίας παράγεται από την τήξη του ηλεκτροδίου) ούτε μηχανισμό παροχής ηλεκτροδίου σε μορφή καλωδίου.
3. Εφαρμογή σε ευρύ φάσμα εργασιών λόγω της απλότητας του εξοπλισμού και της ποικιλίας που παρέχει η μέθοδος ως προς την επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου.
4. Δυνατότητα συγκόλλησης σε περιορισμένους χώρους και σε όλες τις θέσεις εργασίας (συμπεριλαμβανομένων και εξωτερικών χώρων).



Σχήμα 1.11: Ένα από τα πλεονεκτήματα της SMAW είναι η δυνατότητα εργασίας σε σημεία δύσκολα προσβάσιμα

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

1. Ο ρυθμός απόθεσης της κόλλησης έχει όρια, επειδή η επένδυση του ηλεκτροδίου τείνει να υπερθερμαίνεται και να αποκολλάται.
2. Δυσκολία στη συγκόλληση μετάλλων με μικρό πάχος.
3. Ανάγκη για συχνές επανεκκινήσεις.
4. Μείωση του συνολικού ρυθμού παραγωγής εξαιτίας της ανάγκης για συχνή αλλαγή του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου όπως επίσης και της αφαίρεσης της δημιουργούμενης σκουριάς μετά από κάθε συγκόλληση.
5. Απαίτηση για μεγάλη δεξιότητα του συγκολλητή εφόσον πρόκειται κατά κύριο λόγο για χειροκίνητη και όχι αυτοματοποιημένη διαδικασία.
6. Δυσκολία στη συγκόλληση μετάλλων όπως το αλουμίνιο και το τιτάνιο.

1.3.2 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)[5,12,14]

1.3.2.1 Γενικά

Η συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) γνωστή και ως TIG (Tungsten Inert Gas) ή HeliArc πρωτοεμφανίστηκε τα τέλη της δεκαετίας του 1930

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

όταν και αυξήθηκε η ανάγκη για συγκόλληση μαγνησίου. Ο Russell Meredith ανέπτυξε μια διαδικασία συγκόλλησης χρησιμοποιώντας το αδρανές αέριο Ήλιο και ηλεκτρόδιο από βολφράμιο (tungsten) προκειμένου να τήξει το μαγνήσιο. Η μέθοδος αυτή αντικατέστησε την ήλωση στην κατασκευή αεροσκαφών με στοιχεία από αλουμίνιο ή μαγνήσιο. Η GTAW βρίσκει εφαρμογές ακόμα και σήμερα με αρκετές βελτιώσεις και διαφορετικές ονομασίες χωρίς όμως ουσιαστικές διαφορές στις θεμελιώδεις αρχές που εισήγαγε ο Meredith.

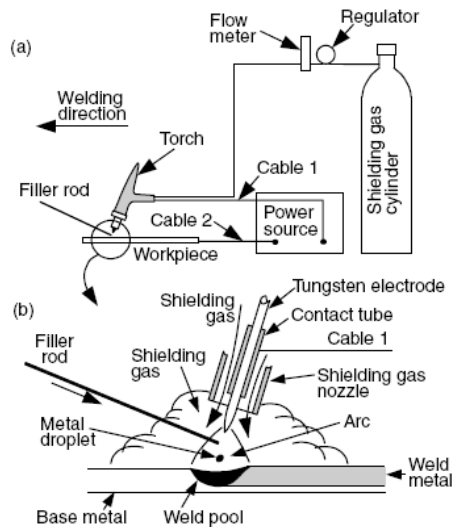
Η απαιτούμενη θερμότητα για συγκόλληση στη GTAW προσδίδεται μέσω ηλεκτρικού τόξου μεταξύ του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου από κράμα βολφραμίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Η θερμοκρασία στη λίμνη συγκόλλησης αγγίζει τους 2500°C ενώ το παρεχόμενο αδρανές αέριο (συνήθως αργό, ήλιο ή μίγμα τους) εγγυάται τη διατήρηση του τόξου και την προστασία του τηγμένου μετάλλου από την ατμόσφαιρα. Συνήθως χρησιμοποιείται και προστιθέμενο μέταλλο αν και δεν απαιτείται στην περίπτωση αυτογενών συγκολλήσεων.

Η GTAW εφαρμόζεται ευρύτατα στις συγκολλήσεις ανοξείδωτων χαλύβων, αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, τιτανίου καθώς και ανθρακοχαλύβων.

1.3.2.2 Διάταξη και Εξοπλισμός της Μεθόδου GTAW

Στο σχήμα 1.12 φαίνεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται καθώς και η διάταξή του κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης GTAW:

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Σχήμα 1.12: (α) Διάγραμμα της GTAW, (β) Απεικόνιση της περιοχής συγκόλλησης

Ο εξοπλισμός της μεθόδου GTAW περιλαμβάνει:

1. Το πιστόλι συγκόλλησης.

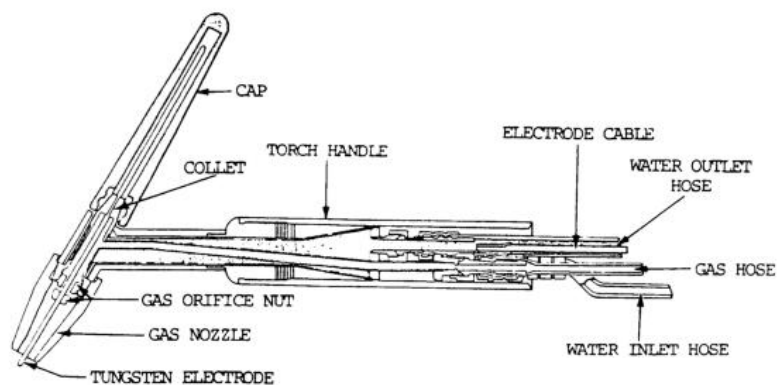
Υπάρχουν διάφοροι τύποι πιστολιών ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή. Το πιστόλι συγκόλλησης μπορεί να προορίζεται για αυτοματοποιημένο ή χειροκίνητο χειρισμό. Άλλα είναι υδρόψυκτα και άλλα αερόψυκτα ενώ μερικά φέρουν και βαλβίδες για τη ρύθμιση της παροχής του αερίου προστασίας. Συνήθως, τα αερόψυκτα πιστόλια χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις στις οποίες η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή (200 A) ενώ για υψηλότερες εντάσεις (έως 600 A) απαιτούνται υδρόψυκτα πιστόλια. Το πιστόλι συγκόλλησης είναι συνδεδεμένο με τη μηχανή συγκόλλησης μέσω καλωδίων ενώ με την μονάδα παροχής αερίου (και νερού σε περίπτωση υδρόψυκτου πιστολιού) μέσω δικτύου σωληνώσεων.

Τα εσωτερικά μεταλλικά τμήματα του πιστολιού είναι κατασκευασμένα από ισχυρά κράματα χαλκού ή χαλκού-ψευδαργύρου διότι τα παραπάνω εξασφαλίζουν την απαραίτητη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το ηλεκτρόδιο βολφραμίου πρέπει να στηρίζεται στιβαρά στο κέντρο του ακροφύσιου συγκόλλησης μέσω ενός κυλινδρικού σφιγκτήρα (collet). Ο σφιγκτήρας απαιτείται να είναι κατάλληλου μεγέθους ώστε να εξασφαλίζει την ύπαρξη αρκετού χώρου στην περίμετρο του ηλεκτροδίου για την διοχέτευση του αδρανούς αερίου. Το μέγεθος του σφιγκτήρα

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

και κατ'επέκταση του ακροφύσιου είναι ανάλογο της διαμέτρου του ηλεκτροδίου. Επειδή το ακροφύσιο πρέπει να έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα κατασκευάζεται από σύνθετα υλικά (πολυμερή ή κεραμικά).

Το εξωτερικό τμήμα του πιστολιού είναι κατασκευασμένο από ειδικά θερμομονωτικά και ηλεκτρομονωτικά πλαστικά τα οποία περιβάλλουν τα μεταλλικά τμήματα του εσωτερικού τμήματος του πιστολιού και παρέχουν προστασία στον χειριστή.



Σχήμα 1.13: Τομή υδρόψυκτου πιστολιού συγκόλλησης GTAW

2. Τη Μηχανή Συγκόλλησης

Η GTAW χρησιμοποιεί μηχανή συγκόλλησης σταθερού ρεύματος. Αυτό σημαίνει πως η ένταση του ρεύματος (και κατ'επέκταση η προσδιδόμενη θερμότητα) παραμένει σχετικά σταθερή ακόμη και αν το μήκος του τόξου ή η τάση μεταβληθούν. Το ανωτέρω γεγονός είναι ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι πρόκειται κατά κύριο λόγο για χειροκίνητη ή ημιαυτοματοποιημένη διαδικασία με το συγκολλητή να χειρίζεται το πιστόλι συγκόλλησης. Στην περίπτωση όπου η μηχανή συγκόλλησης είναι σταθερής τάσης, προκαλεί δραματικές αλλαγές στην παρεχόμενη θερμότητα και δυσχεραίνει τη διατήρηση σταθερού μήκους τόξου.

Η επιλογή της πολικότητας του ρεύματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέταλλο που πρόκειται να συγκολληθεί. Συνεχές ρεύμα με αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (DCEN) χρησιμοποιείται συχνά σε συγκολλήσεις χάλυβα, τιτανίου και άλλων μετάλλων καθώς και σε αυτοματοποιημένες συγκολλήσεις GTAW

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

αλουμινίου ή μαγνησίου όταν χρησιμοποιείται το ήλιο ως αέριο προστασίας. Το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο παράγει θερμότητα εκπέμποντας ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται κατά μήκος του τόξου προς το τεμάχιο, προκαλώντας ιονισμό του προστατευτικού αερίου και αυξάνοντας την θερμοκρασία του μετάλλου βάσης. Συνεχές ρεύμα με θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (DCEP) χρησιμοποιείται λιγότερο και οι εφαρμογές του περιορίζονται κυρίως σε συγκολλήσεις μικρού πάχους εφόσον παράγεται λιγότερη θερμότητα στο μέταλλο βάσης. Σε αντίθεση με τη DCEN, στην περίπτωση θετικά φορτισμένου ηλεκτροδίου, τα ηλεκτρόνια κινούνται από το μέταλλο βάσης προς το ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα το τελευταίο να υπερθερμαίνεται. Προκειμένου να μπορεί να διατηρήσει την μορφή και τη σκληρότητα του, επιλέγεται ηλεκτρόδιο μεγαλύτερων διαστάσεων. Καθώς τα ηλεκτρόνια κινούνται προς το ηλεκτρόδιο, το ιονισμένο αέριο προστασίας κινείται προς το μέταλλο βάσης, αφαιρώντας οξειδία και άλλες ακαθαρσίες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και ως εκ τούτου βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης.

Εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται συχνά στις χειροκίνητες ή ημιαυτοματοποιημένες συγκολλήσεις μαγνησίου και αλουμινίου. Η περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος συνδυάζει τις δυο περιπτώσεις συνεχούς ρεύματος, με το ηλεκτρόδιο και το μέταλλο βάσης να εναλλάσσουν θετικό και αρνητικό φορτίο. Κατ'αυτό τον τρόπο, η ροή των ηλεκτρονίων εναλλάσσεται συνεχώς αποτρέποντας την υπερθέρμανση του ηλεκτροδίου και διατηρώντας ταυτόχρονα τα κατάλληλα επίπεδα θερμότητας στο μέταλλο βάσης. Τα οξειδία που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία αφαιρούνται και πάλι στο χρονικό διάστημα που το ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένο ενώ το μέταλλο βάσης θερμαίνεται πιο έντονα όταν το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικά φορτισμένο.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Σχήμα 1.14: Τυπική μηχανή συγκόλλησης GTAW εναλλασσόμενου ρεύματος

3. Το Ηλεκτρόδιο.

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στη GTAW είναι είτε καθαρού βολφραμίου είτε κάποιου κράματος βολφραμίου. Το βολφράμιο έχει το υψηλότερο σημείο τήξης από όλα τα μέταλλα (3422°C) και για αυτό τον λόγο το ηλεκτρόδιο στην GTAW (σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους συγκόλλησης) είναι μη καταναλισκόμενο.

Η διάμετρος των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στην GTAW κυμαίνεται από 1.25 μέχρι 6.25 mm ενώ το μήκος τους από 75 μέχρι 610 mm.

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια διακρίνονται σε:

- Καθαρού βολφραμίου (WP ή EWP). Πρόκειται για σχετικά φθηνά ηλεκτρόδια γενικής χρήσεως με χαμηλή θερμική αντίσταση και εκπομπή ηλεκτρονίων. Βρίσκουν περιορισμένες εφαρμογές σε συγκολλήσεις μαγνησίου και αλουμινίου εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Κράματος βολφραμίου και οξειδίου του δημητρίου (Cerium Oxide, EWCe). Το οξείδιο του δημητρίου ως κραματικό στοιχείο βελτιώνει τη σταθερότητα του τόξου και βοηθάει το άναμμα του ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει την οξείδωση του ηλεκτροδίου λόγω υπερθέρμανσης (burn-off). Η προσθήκη οξειδίου του δημητρίου δεν είναι όσο αποτελεσματική είναι η προσθήκη θορίου αλλά το οξείδιο του δημητρίου δεν είναι ραδιενεργό.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

- Κράματος βολφραμίου και οξειδίου του λανθανίου (EWLa). Το κράμα αυτό έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το κράμα βολφραμίου-οξειδίου του δημητρίου. Προσθήκη 1% λανθανίου έχει τις ίδιες επιπτώσεις με προσθήκη 2% δημητρίου.
- Κράματος βολφραμίου και θορίου (EWTh). Τα κράματα αυτά προορίζονται για συγκολλήσεις με συνεχές ρεύμα και μπορούν να αντέξουν σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Ταυτόχρονα παρουσιάζουν εξαιρετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως μεγαλύτερη εκπομπή ηλεκτρονίων, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μεγαλύτερη αντίσταση σε απορρόφηση ακαθαρσιών από το περιβάλλον, ευκολότερο άναμμα τόξου ενώ και το ίδιο το τόξο είναι σταθερότερο. Το κυριότερο μειονέκτημα των ηλεκτροδίων βολφραμίου-θορίου είναι ότι το θόριο είναι ραδιενεργό στοιχείο και επομένως απαιτείται εξαιρετική προσοχή ούτως ώστε να αποφευχθεί εισπνοή ρινισμάτων θορίου κατά την προετοιμασία των ηλεκτροδίων.
- Κράματος βολφραμίου και οξειδίου του ζirkονίου (EWZr). Αυξάνουν το περιθώριο αντοχής σε υψηλότερες εντάσεις ρεύματος, βελτιώνουν τη σταθερότητα και διευκολύνουν το άναμμα του τόξου ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου. Το μειονέκτημα τους συγκριτικά με τα ηλεκτρόδια βολφραμίου-θορίου είναι το χαμηλότερο σημείο τήξης.

4. Το Μέταλλο Προσθήκης.

Μέταλλο προσθήκης χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις GTAW με κυριότερη εξαίρεση τη συγκόλληση δοκιμίων μικρού πάχους (συνήθως πάχους μικρότερου από 3.2mm). Ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε συγκόλλησης επιλέγεται το κατάλληλο μέταλλο προσθήκης. Συνήθως διατίθενται σε ράβδους διαφόρων διαμέτρων οι οποίες προστίθενται στη λίμνη συγκόλλησης με το χέρι αν και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκαία η προσθήκη τους με αυτοματοποιημένο τρόπο.

5. Το Προστατευτικό Αέριο.

Όπως όλες οι τεχνικές συγκόλλησης με προστασία αδρανούς αερίου, έτσι και η GTAW χρησιμοποιεί αδρανή αέρια (ήλιο, αργό ή κάποιο μίγμα τους) προκειμένου να προφυλάξει την περιοχή συγκόλλησης από τις δυσμενείς επιπτώσεις της επαφής

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

της τελευταίας με αέρια της ατμόσφαιρας όπως άζωτο και οξυγόνο. Τα αέρια προστασίας διοχετεύονται αρχικά από τη μπουκάλα αερίου στο πιστόλι συγκόλλησης και εν συνεχεία στη λίμνη τηγμένου μετάλλου.

Η επιλογή του αδρανούς αερίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το μέταλλο που συγκολλείται, τον τύπο σύνδεσης και την επιθυμητή μορφή της τελικής συγκόλλησης.

Το Αργό είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο αδρανές αέριο στη GTAW αφενός λόγω του χαμηλού του κόστους και αφετέρου λόγω χημικών ιδιοτήτων του, που ευνοούν την συγκόλληση. Η χημική του σύσταση διευκολύνει τη δημιουργία τόξου πλάσματος περισσότερο από κάθε άλλο αδρανές αέριο ενώ ταυτόχρονα το αργό είναι βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, τουτέστιν τον εκτοπίζει, προστατεύοντας βέλτιστα την περιοχή συγκόλλησης. Η χρήση του αργού σε συνδυασμό με εναλλασσόμενο ρεύμα οδηγεί σε υψηλή ποιότητα συγκόλλησης και καλή εμφάνιση.

Το Ήλιο χρησιμοποιείται περισσότερο σε περιπτώσεις όπου απαιτείται συγκόλληση μεγάλης διεύθυνσης, αυξημένης ταχύτητας ή συγκόλληση μετάλλων αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας όπως αλουμίνιο και χαλκός. Το κυριότερο μειονέκτημα της χρήσης ηλίου ως αέριο προστασίας έγκειται στη δυσκολία ανάμματος και διατήρησης σταθερού τόξου γεγονός που οδηγεί σε συγκόλληση μειωμένης ποιότητας.

Μίγματα Ηλίου-Αργού χρησιμοποιούνται ευρέως στις συγκολλήσεις GTAW διότι παρέχουν την δυνατότητα ρύθμισης της παρεχόμενης θερμότητας ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του Αργού. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα μίγματα αυτά περιέχουν σε μεγαλύτερο ποσοστό Ήλιο (περί το 75%). Μίγματα αυτής της κατηγορίας αυξάνουν την ταχύτητα και την ποιότητα συγκόλλησης αλουμινίου με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος και επίσης διευκολύνουν το άναμμα του τόξου.

1.3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της GTAW

Τα βασικά πλεονεκτήματα της GTAW συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνικές συγκόλλησης είναι:

- Εξαιρετικά συγκεντρωμένο ηλεκτρικό τόξο γεγονός που επιτρέπει συγκολλήσεις τεράστιας ακρίβειας με αρκετά στενή θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Η υψηλή συγκέντρωση θερμότητας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα στη συγκόλληση μετάλλων υψηλής θερμικής αγωγιμότητας όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός.
- Δεν χρησιμοποιείται σκόνη (flux) για την δημιουργία σκουριάς (slag) επομένως η οπτική επαφή του συγκολλητή με την λίμνη συγκόλλησης δεν διακόπτεται.
- Η μέθοδος δεν παράγει επιβλαβή αέρια ή αναθυμιάσεις. Στην περίπτωση που το μέταλλο βάσης είναι επενδεδυμένο ή εμπεριέχει στοιχεία όπως μόλυβδος ή ψευδάργυρος το οποία τηκόμενα παράγουν αναθυμιάσεις, οι τελευταίες πρέπει να καταπολεμηθούν με τα αντίστοιχα μέσα προστασίας. Στην περίπτωση που το μέταλλο βάσης είναι επικαλυμμένο με γράσο, χρωστικές ουσίες ή άλλες εφάμιλλες προσμίξεις, επιβλαβή αέρια και αναθυμιάσεις θα παραχθούν καθώς η συγκόλληση λαμβάνει χώρα. Αυτό πρέπει να αποφεύγεται με προσεκτικό καθαρισμό του μετάλλου πριν τη συγκόλληση.
- Δεν μεταφέρεται μέταλλο μέσω του ηλεκτρικού τόξου και επομένως δεν δημιουργούνται σπινθήρες και τηγμένα σταγονίδια τα οποία προκαλούν πιτσίλισμα (spatter) περί τη ραφή συγκόλλησης. Αποτέλεσμα αυτού είναι μια καθαρή ραφή συγκόλλησης. Η GTAW γενικά θεωρείται πολύ καθαρή τεχνική συγκόλλησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση δραστικών μετάλλων όπως το τιτάνιο, το ζirkόνιο το αλουμίνιο και το μαγνήσιο.
- Κατάλληλη για τη συγκόλληση λεπτών κομματιών λόγω της ελάχιστης προσαγόμενης ποσότητας θερμότητας στα προς συγκόλληση τεμάχια (χαμηλή ένταση ρεύματος συγκόλλησης).
- Μπορούν να συγκολληθούν περισσότερα μέταλλα και κράματα απ'ότι σε οποιαδήποτε άλλη διεργασία.
- Παράγει ραφές υψηλής ποιότητας με χαμηλό πορώδες και είναι η ιδανική μέθοδος για συχνά ξεκινήματα/σταματήματα του τόξου.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

- Παρέχει ακριβή έλεγχο των παραμέτρων συγκόλλησης καθώς και ακριβή έλεγχο της συγκόλλησης σε σύνθετα τμήματα.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της GTAW συνοψίζονται στα εξής:

- Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υψηλή ένταση του ρεύματος συγκόλλησης τήκει το ηλεκτρόδιο βολφραμίου το οποίο περνά κατ'αυτό τον τρόπο στην λίμνη συγκόλλησης και αυξάνει την ψαθυρότητα της ραφής.
- Ανάγκη για πολλαπλά περάσματα προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα στην τελική συγκόλληση.
- Απαιτείται μεγάλη δεξιότητα από το συγκολλητή.
- Συνήθως είναι ακριβότερη και πιο αργή από τις μεθόδους που χρησιμοποιούν καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια.

1.3.3 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)^[1,2,3,5,9,13,15,16]

1.3.3.1 Γενικά

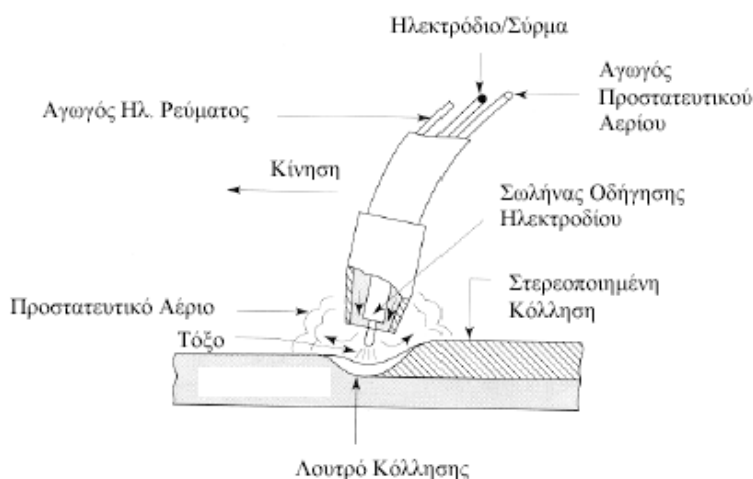
Στην μέθοδο αυτή τα προς συγκόλληση μέταλλα τήκει ηλεκτρικό τόξο το οποίο παράγεται μεταξύ των τελευταίων και ενός συνεχώς τροφοδοτούμενου, καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου. Όπως στην συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου, έτσι και στη GMAW, χρησιμοποιείται προστατευτικό αέριο (Ar, He ή CO₂) για να αποτρέψει την προσβολή της λίμνης συγκόλλησης από ατμοσφαιρικά αέρια (N₂, O₂, H₂).

Η GMAW πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1940 και θεωρείτο κατ'αρχήν μια διαδικασία υψηλής πυκνότητας ρεύματος που χρησιμοποιεί μη-επενδεδυμένα ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου και αδρανή αέρια για προστασία της συγκόλλησης. Οι εφαρμογές της περιορίζονταν στη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων ή κραμάτων (κυρίως αλουμινίου). Μεταγενέστερες εξελίξεις στη διαδικασία συμπεριλαμβάνουν: λειτουργία με ρεύμα χαμηλής πυκνότητας και παλλόμενο συνεχές ρεύμα, εφαρμογή σε μεγαλύτερο φάσμα υλικών και τη χρήση ενεργών αερίων (κυρίως CO₂). Τα πλεονεκτήματα της συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους οδήγησαν σταδιακά στο να είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Όταν το αέριο προστασίας που χρησιμοποιείται είναι αδρανές αέριο (Ar,He), χρησιμοποιείται ο όρος 'Συγκόλληση Τόξου Μεταλλικού Ηλεκτροδίου με Αδρανές Αέριο (Metal Inert Gas, MIG)'. Στην περίπτωση συγκόλλησης με φθηνότερα προστατευτικά αέρια ή μίγματα αερίων, χρησιμοποιείται ο όρος 'Συγκόλληση Τόξου Μεταλλικού Ηλεκτροδίου με Ενεργό Αέριο (Metal Active Gas, MAG)'. Ο όρος GMAW είναι πιο γενικός και περιλαμβάνει τις παραπάνω περιπτώσεις.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου φαίνεται στο σχήμα 1.15. Το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται μέσω της λαβίδας στη θέση συγκόλλησης. Ο συγκολλητής, μέσω διακόπτη που βρίσκεται στη λαβίδα ενεργοποιεί το μηχανισμό τροφοδοσίας του σύρματος και ταυτόχρονα τη ροή του προστατευτικού αερίου.



Σχήμα 1.15: Αρχή λειτουργίας της GMAW

Ανάλογα με τον τύπο και την ένταση του ρεύματος, η μεταφορά μετάλλου από το ηλεκτρόδιο στην ζώνη συγκόλλησης γίνεται με τρεις τρόπους: Με ψεκασμό (spray transfer), με μορφή σταγόνων (globular transfer) και με βραχυκύκλωση (short circuiting transfer). Κάθε τρόπος είναι προτιμητέος για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η GMAW μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους:

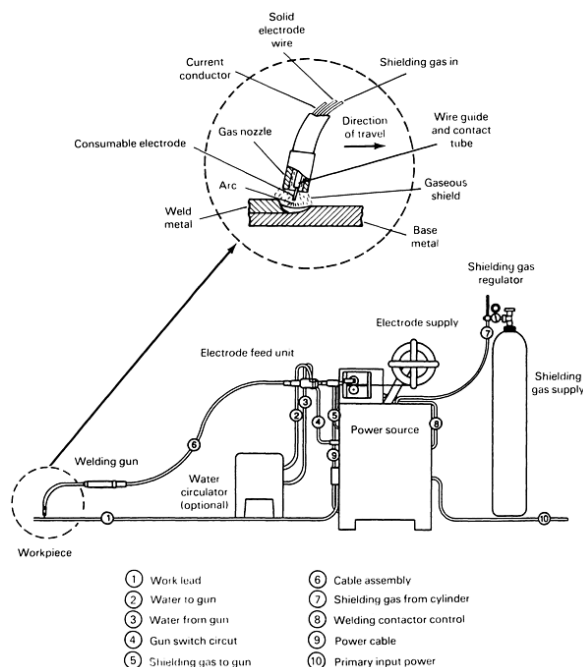
- *Ημιαυτοματοποιημένη Συγκόλληση* όπου ο εξοπλισμός ελέγχει μόνο την τροφοδοσία του ηλεκτροδίου. Ο συγκολλητής κινεί με το χέρι του το πιστόλι συγκόλλησης, πρόκειται δηλαδή για χειροκίνητη διαδικασία.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

- *Μηχανική Συγκόλληση* κατά την οποία η κίνηση του ακροφύσιου συγκόλλησης ελέγχεται από κάποιου είδους μηχανικό οδηγό του οποίου τις κινήσεις καθορίζει ελέγχει και προσαρμόζει ένας χειριστής.
- *Αυτοματοποιημένη Συγκόλληση* η οποία δεν απαιτεί χειριστή ο οποίος ελέγχει και προσαρμόζει τις κινήσεις του μηχανισμού, αλλά μπορεί να προγραμματιστεί και να πραγματοποιήσει εξ'ολοκλήρου τη συγκόλληση. Μερικές αυτοματοποιημένες διατάξεις διαθέτουν και αισθητήρες οι οποίοι προσαρμόζουν την κίνηση του πιστολιού συγκόλλησης ανάλογα με τη γεωμετρία των προς συγκόλληση τεμαχίων.

1.3.3.2 Διάταξη και Εξοπλισμός της GMAW

Προκειμένου να λάβει χώρα μια συγκόλληση GMAW, ο βασικός απαιτούμενος εξοπλισμός περιλαμβάνει το πιστόλι συγκόλλησης, τη μονάδα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου, τη μηχανή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, το ηλεκτρόδιο-καλώδιο και τη μονάδα παροχής προστατευτικού αερίου. Μια τυπική διάταξη συγκόλλησης GMAW φαίνεται στο σχήμα 1.16:



Σχήμα 1.16: Διάταξη της GMAW

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Τα σημαντικότερα εξαρτήματα του εξοπλισμού της GMAW αναλύονται παρακάτω:

- Το Πιστόλι Συγκόλλησης (Welding Gun)

Παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα στο ηλεκτρόδιο, κατευθύνει το τελευταίο κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης και ταυτόχρονα διοχετεύει το προστατευτικό αέριο στην περιοχή της συγκόλλησης. Έχουν σχεδιαστεί διάφοροι τύποι πιστολιών για ποικίλες εφαρμογές, από συγκολλήσεις μαζικής παραγωγής και πιστόλια με δυνατότητα μεταφοράς υψηλών εντάσεων ρεύματος, μέχρι εξειδικευμένες συγκολλήσεις χαμηλών εντάσεων. Τα περισσότερα πιστόλια είναι αερόψυκτα (σχήμα 1.17), ωστόσο, καθώς αυξάνονται οι ανάγκες για υψηλότερη ένταση ρεύματος, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο υδρόψυκτα πιστόλια.

Τα βασικά τμήματα ενός πιστολιού συγκόλλησης είναι: ο διακόπτης ελέγχου (control switch), ο σωλήνας επαφής (contact tube), το καλώδιο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (power cable), το ακροφύσιο παροχής προστατευτικού αερίου (gas nozzle), ο σωλήνας παροχής και ευθυγράμμισης του ηλεκτροδίου (electrode conduit and liner) και ο σωλήνας παροχής προστατευτικού αερίου (gas hose).

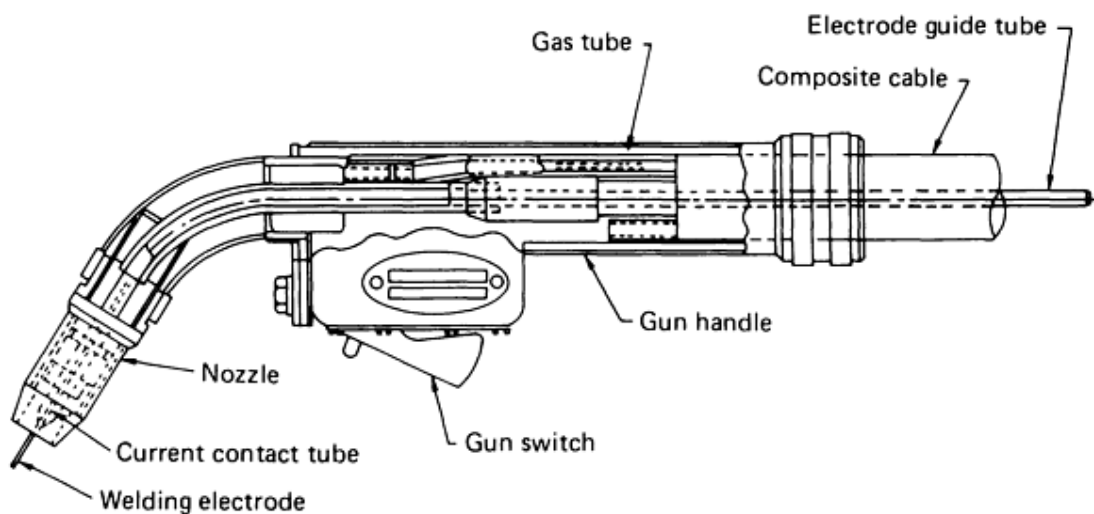
Ο διακόπτης ελέγχου, όταν πατηθεί από τον χειριστή, εκκινεί την παροχή ηλεκτροδίου, ηλεκτρικής ενέργειας και προστατευτικού αερίου προκαλώντας τη δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου.

Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το πιστόλι πρέπει απαραίτητα να διαθέτει μια ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνας επαφής, contact tube) για τη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο σωλήνας επαφής κατασκευάζεται από χαλκό ή κράματα χαλκού και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χημικά επεξεργασμένος για να μειώνει το πιτσίλισμα. Συνδέεται με τη μηχανή συγκόλλησης μέσω του καλωδίου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα επαφής παίζει σημαντικό ρόλο καθώς το ηλεκτρόδιο πρέπει να τροφοδοτείται με ευκολία μέσω του σωλήνα ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρείται καλή ηλεκτρική επαφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα επαφής είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο του ηλεκτροδίου κατά 0.13 mm έως 0.25 mm. Η διάμετρος του σωλήνα επαφής πρέπει να ελέγχεται τακτικά καθώς επιμήκυνση της εξαιτίας υπερβολικής χρήσης οδηγεί σε κακή ηλεκτρική επαφή και ασταθές ηλεκτρικό τόξο.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Το ακροφύσιο παροχής προστατευτικού αερίου (*Nozzle*) διοχετεύει σταθερά το προστατευτικό αέριο στη ζώνη συγκόλλησης μέσω του σωλήνα παροχής προστατευτικού αερίου (*gas hose*) ο οποίος συνδέει το ακροφύσιο με τη μπουκάλα αερίου. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να διατηρείται σταθερή η παροχή του προστατευτικού αερίου προκειμένου να προστατευτεί επαρκώς το τηγμένο μέταλλο από τα ατμοσφαιρικά αέρια. Ανάλογα με το είδος συγκόλλησης πρέπει να γίνεται και η επιλογή του κατάλληλου ακροφύσιου. Μεγαλύτερα ακροφύσια επιλέγονται σε εργασίες με υψηλή ένταση ρεύματος όπου απαιτείται υψηλή παροχή προστατευτικού αερίου και μεγάλη λίμνη συγκόλλησης ενώ μικρότερα ακροφύσια σε περιπτώσεις χαμηλής έντασης ρεύματος.

Ο σωλήνας παροχής και ευθυγράμμισης του ηλεκτροδίου (*electrode conduit and liner*) αποτρέπει πιθανή κάμψη του ηλεκτροδίου κατά την μεταφορά προς τον σωλήνα επαφής και κατ'αυτό τον τρόπο εγγυάται σταθερή παροχή ηλεκτροδίου, τούτέστιν σταθερό ηλεκτρικό τόξο.



Σχήμα 1.17: Τομή Αερόψυκτου Πιστολιού Συγκόλλησης GMAW

- Η Μονάδα Παροχής του Ηλεκτροδίου (Wire Feed Unit)

Προμηθεύει το ηλεκτρόδιο στη συγκόλληση, τραβώντας το από το ρολό στο οποίο βρίσκεται τυλιγμένο και οδηγώντας το εν μέσω του σωλήνα παροχής και ευθυγράμμισης στο σωλήνα επαφής. Τα περισσότερα μοντέλα παρέχουν το

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

ηλεκτρόδιο με σταθερή ταχύτητα αν και πιο εξελιγμένα μηχανήματα μπορούν να προσαρμόσουν την ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου ανάλογα με το μήκος και την τάση του ηλεκτρικού τόξου. Οι ταχύτητες παροχής μπορούν να αγγίξουν μέχρι και τα 30 m/min αν και πιο συνηθισμένες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2 και 10 m/min. Το ηλεκτρόδιο πρέπει να προμηθεύεται επαρκώς στη συγκόλληση για να διατηρείται η αποδοτικότητα της διαδικασίας και συνήθως συγκεντρώνεται σε μορφή ρολού το οποίο μπορεί να περιέχει από 7 έως 27 kg καλωδίου. Το ρολό αυτό είναι τυλιγμένο με τέτοιο τρόπο που κατά το ξετύλιγμα του, το ηλεκτρόδιο προμηθεύεται χωρίς μπλεξίματα και τυλίγματα στο πιστόλι συγκόλλησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα ρολά των ηλεκτροδίων μπορεί να ζυγίζουν μέχρι και 115 kg.

- *Η Μηχανή Συγκόλλησης (Welding Power Source)*

Η μηχανή συγκόλλησης παρέχει την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια (συνήθως 20-80 V) προκειμένου να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό τόξο. Η συντριπτική πλειονότητα των συγκολλήσεων με τη μέθοδο GMAW χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας (DCEP: Direct Current Electrode Positive γνωστό και ως Direct Current with Reverse Polarity, δηλαδή συνεχές ρεύμα με ανάστροφη πολικότητα). Αυτό σημαίνει ότι ο θετικός ακροδέκτης της μηχανής συγκόλλησης συνδέεται με το πιστόλι και το ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένο ενώ ο αρνητικός ακροδέκτης με το προς συγκόλληση τεμάχιο.

Η μηχανή μπορεί να είναι είτε στατικού είτε περιστροφικού τύπου. Στην πρώτη περίπτωση, η εισερχόμενη ωφέλιμη ενέργεια (120-480 V) μειώνεται σε κατάλληλα επίπεδα για την συγκόλληση μέσω ενός μετασχηματιστή. Στην δεύτερη περίπτωση η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για την συγκόλληση παρέχεται από μια γεννήτρια η οποία περιστρέφεται μέσω ενός μοτέρ ή ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Μηχανές 'στατικού' τύπου χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις όπου διαθέτουν μόνιμη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ περιστροφικού τύπου χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις σε τοποθεσίες χωρίς προϋπάρχουσα πηγή ενέργειας. Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών συγκόλλησης είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος (pulsed d.c. Power supply) οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω (1.3.4.2.).

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

- Το Ηλεκτρόδιο

Η χημική σύσταση του ηλεκτροδίου πρέπει να επιλέγεται κυρίως με βάση την χημική σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης και με σκοπό το τελικό συγκολλημένο μέταλλο να έχει την επιθυμητή χημική σύσταση και ιδιότητες. Σε γενικές γραμμές, σκοπός είναι το τελικό μέταλλο συγκόλλησης να παρουσιάζει μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των μετάλλων βάσης απουσία ελαττωμάτων και ατελειών όπως φερεπείν ασυνέχειες υλικού ή πορώδες. Η σύσταση του ηλεκτροδίου σχεδιάζεται με πλεόνασμα από αποξειδωτικά στοιχεία (deoxidizers) όπως πυρίτιο, τιτάνιο, μαγγάνιο αλουμίνιο και άλλα με σκοπό να αντισταθμιστούν οι δυσμενείς επιπτώσεις της επαφής του τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Ορισμένα ηλεκτρόδια περιέχουν μέταλλα όπως τιτάνιο και ζirkόνιο, τα οποία βοηθούν στην απομάκρυνση του αζώτου προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία πορώδους αζώτου.

Ανάλογα με την παραλλαγή της μεθόδου που χρησιμοποιείται και το μέταλλο βάσης που συγκολλείται, οι διάμετροι των ηλεκτροδίων κυμαίνονται από 0.7-2.4 mm και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάνουν τα 4 mm. Τα μικρότερα σε διάμετρο ηλεκτρόδια, συνήθως μέχρι 1.14 mm, σχετίζονται με τη διαδικασία μεταφοράς μετάλλου δια βραχυκύκλωσης ενώ η διάμετρος ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στη μεταφορά μετάλλου με σταγονίδια είναι στις περισσότερες περιπτώσεις τουλάχιστον 0.9 mm.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά (φινίρισμα, ευθύτητα κτλ) των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στην GMAW είναι εξαιρετικά σημαντικά για μια ποιοτική συγκόλληση. Οι προδιαγραφές υλικού για αυτά τα ηλεκτρόδια καθιερώνουν κατασκευαστικές απαιτήσεις προκειμένου να εξασφαλίζουν ένα τελικό προϊόν ομοιογενές, το οποίο τροφοδοτείται ομαλά μέσω του εξοπλισμού και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ομοιόμορφο τύλιγμα στο ρολό του ηλεκτροδίου χωρίς κόμπους, μπλεξίματα, τυλίγματα και άλλες αντίστοιχες δυσμορφίες.
- Ομαλό φινίρισμα επιφάνειας που εγγυάται την απουσία σχισμών, γρατζουνιών ή εξογκωμάτων.
- Ομοιογενή διάμετρο ηλεκτροδίου σε όλο το μήκος του.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

- Κατά την περίπτωση όπου το ηλεκτρόδιο αφαιρεθεί από το ρολό και τοποθετηθεί σε επίπεδη επιφάνεια (πχ το έδαφος) θα πρέπει να μην παρουσιάζει υπερβολική ανύψωση (helix) από την επίπεδη αυτή επιφάνεια και ταυτόχρονα η διάμετρος του ρολού από το τυλιγμένο ηλεκτρόδιο (cast) πρέπει να μην είναι πολύ μικρή. Σε περίπτωση που τα δυο παραπάνω μεγέθη δεν πληρούν τις προδιαγραφές, παρουσιάζονται προβλήματα κατά την τροφοδοσία του ηλεκτροδίου.

- Το Προστατευτικό Αέριο

Μακράν ο μεγαλύτερος αριθμός μιγμάτων προστατευτικών αερίων έχει παρασκευαστεί για εφαρμογές της μεθόδου GMAW και δη για συγκολλήσεις ανθρακοχαλύβων. Μπορούμε να κατατάξουμε τα προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται στην GMAW σε τέσσερις κατηγορίες: αμιγή προστατευτικά αέρια, μίγματα αργού-οξυγόνου, μίγματα αργού-διοξειδίου του άνθρακα και τέλος τριμερή μίγματα που απαρτίζονται από συνδυασμούς αργού, ηλίου, οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα ή υδρογόνου. Παρακάτω αναλύονται οι διάφορες κατηγορίες προστατευτικών αερίων.

Αργό (Ar): Καθαρό αργό χρησιμοποιείται στην περίπτωση μη σιδηρούχου μετάλλου βάσης όπως φερεϊτείν αλουμινίου, νικελίου, χαλκού, κραμάτων του μαγνησίου και στην περίπτωση αντιδραστικών μετάλλων όπως του τιτανίου. Το αργό παρέχει εξαιρετική σταθερότητα στο ηλεκτρικό τόξο, μεγάλη διείδυση και καλή όψη ραφής στην περίπτωση συγκόλλησης των ανωτέρω μετάλλων. Απαιτεί σχετικά χαμηλά ποσά ενέργειας για να ιονιστεί (15.7 eV) και για αυτό τον λόγο επιτρέπει εύκολο άναμμα τόξου. Το Αργό παράγει σχετικά στενό τόξο με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος, γεγονός που σημαίνει ότι η ενέργεια του τόξου συγκεντρώνεται σε μικρή επιφάνεια και επομένως η διείδυση είναι βαθιά και στενόμακρη.

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂): Πρόκειται για αντιδραστικό αέριο και χρησιμοποιείται συνήθως για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων. Είναι εύκολα διαθέσιμο και σχετικά φθηνό. Λόγω του ότι το CO₂ δεν μπορεί να υποστηρίξει τη μεταφορά μέσω σταγονιδίων, η αποδοτικότητα της μεταφοράς τηγμένου μετάλλου είναι

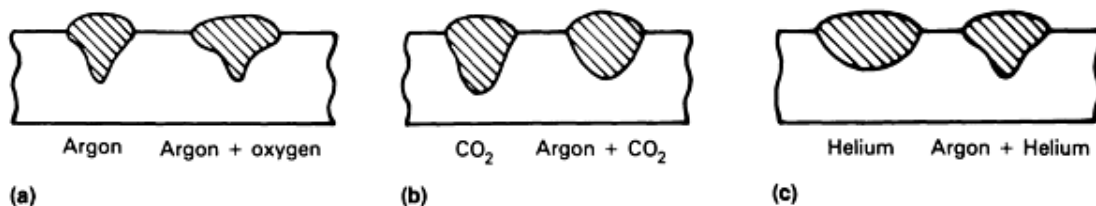
Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

χαμηλότερη ενώ το πιτσίλισμα και η παραγωγή καπνών και αναθυμιάσεων είναι πιο έντονα συγκριτικά με τα αντίστοιχα μεγέθη κατά την χρήση αργού ή μιγμάτων του. Η ραφή συγκόλλησης παρουσιάζει εμφανή σημάδια οξειδωσης και ακανόνιστης γεωμετρίας. Η υψηλή ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να ιονιστεί το διοξείδιο του άνθρακα και η χαρακτηριστική τάση του για αποσύνθεση σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε υψηλά επίπεδα τήξης και διείδυσης ενώ ταυτόχρονα οι μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου μετάλλου κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Ήλιο (He): Χάρης στην υψηλή θερμική του αγωγιμότητα, το ήλιο παρέχει επιπρόσθετη θερμότητα στο μέταλλο βάσης ενώ ταυτόχρονα διατηρεί αδρανή την ατμόσφαιρα συγκόλλησης. Συγκολλήσεις με ήλιο ως προστατευτικό αέριο παρουσιάζουν μεγαλύτερο βάθος και ταχύτητα συγκόλλησης συγκριτικά με τις συγκολλήσεις αργού. Το πλεονέκτημα αυτό γίνεται συχνά εκμεταλλεύσιμο στις συγκολλήσεις βαρέων τμημάτων αλουμινίου, μαγνησίου και κραμάτων χαλκού.

Μίγματα Αργού-Οξυγόνου (Ar-O): Ανάμιξη έστω και μικρής ποσότητας οξυγόνου με αργό σταθεροποιεί αισθητά το ηλεκτρικό τόξο, αυξάνει το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης στη λίμνη συγκόλλησης, μειώνει την τιμή της έντασης του ρεύματος που απαιτείται για μετάδοση μετάλλου με σταγονίδια και επηρεάζει θετικά την τελική όψη της ραφής. Η λίμνη συγκόλλησης είναι περισσότερο ρευστή και παραμένει τηγμένη για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας το μέταλλο να κυλίσει προς τα ακραία σημεία της συγκόλλησης. Τα πιο κοινά μίγματα περιέχουν 1,2,5, ή 8% οξυγόνο μέσα στο αργό. Αύξηση του οξυγόνου στο μίγμα βελτιώνει τη σταθερότητα του τόξου και τη ταχύτητα συγκόλλησης αλλά προσθήκη οξυγόνου σε ποσοστά μεγαλύτερα του 5% έχει δυσμενή αποτελέσματα όπως απώλεια κραματικών στοιχείων και πιθανότητα για διάτρηση του προς συγκόλληση τεμαχίου.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Σχήμα 1.18: Επίδραση των διαφόρων μιγμάτων προστατευτικών αερίων στη ραφή συγκόλλησης GMAW υπό συνεχές ρεύμα και ανάστροφη πολικότητα (DCEP). (a) Αργό συγκριτικά με Αργό-Οξυγόνο, (b) Διοξείδιο του Άνθρακα συγκριτικά με μίγμα Αργού-CO₂, (c) Ήλιο συγκριτικά με μίγμα Ηλίου-Αργού

Μίγματα Αργού-Διοξειδίου του Άνθρακα (Ar-CO₂): Μίγματα αυτού του τύπου βρίσκουν εφαρμογές περισσότερο σε συγκολλήσεις ανθρακοχαλύβων και χαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία και λιγότερο σε ανοξειδωτους χάλυβες. Η προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα παράγει αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα της προσθήκης οξυγόνου αλλά ταυτόχρονα διευρύνει την διείδυση όσο η περιεκτικότητα σε CO₂ αυξάνεται (Σχήμα 1.18 (b)). Όταν η περιεκτικότητα σε CO₂ ξεπεράσει το 18-20%, η μεταφορά μετάλλου υπό μορφή τηγμένων σταγονιδίων δεν είναι πλέον δυνατή και γίνεται κυρίως μέσω βραχυκύκλωσης με αυξημένο βαθμό πιτσιλίσματος μέχρι και περιεκτικότητες 50% CO₂ στο Αργό. Τα πιο κοινά μίγματα για μεταφορά του μετάλλου προσθήκης με σταγονίδια είναι μίγματα αργού με 5,8,10 ή 13-18% CO₂. Αύξηση του CO₂ οδηγεί σε πιο ρευστή λίμνη συγκόλλησης και επομένως επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης. Μίγματα με ακόμη μεγαλύτερα ποσοστά περιεκτικότητας σε CO₂ (20-25%) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά μετάλλου προσθήκης με βραχυκύκλωση διότι συνδυάζουν βέλτιστη εναπόθεση υλικού υπό μορφή σταγονιδίων και ταυτόχρονα ελάχιστο πιτσίλισμα κυρίως για ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου (0.9-1.2 mm).

Μίγματα Αργού-Ηλίου (Ar-He): Το ήλιο αναμιγνύεται συχνά με αργό προκειμένου να επωφεληθεί η συγκόλληση από τα πλεονεκτήματα και των δυο αερίων. Μίγματα αυτού του είδους βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις συγκολλήσεις μη σιδηρούχων κραμάτων όπως αλουμινίου, χαλκού και νικελίου. Το ήλιο αυξάνει την θερμότητα που προσδίδεται στο μέταλλο βάσης και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις παχέων και θερμικά αγωγίμων μεταλλικών ελασμάτων. Όσο

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

αυξάνεται η περιεκτικότητα του μίγματος σε ήλιο, αυξάνονται και η τάση του τόξου, το πιτσίλισμα και ο λόγος πλάτους προς βάθος συγκόλλησης (Σχήμα 1.18 (c)). Τα πιο συνηθισμένα μίγματα αργού-ηλίου περιέχουν 25, 50 ή 75% ήλιο. Τα μίγματα με τα υψηλότερα ποσοστά ηλίου χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις παχέων (>50mm) ελασμάτων ειδικότερα αλουμινίου και χαλκού.

Μίγματα Αργού-Οξυγόνου-Διοξειδίου του Άνθρακα (Ar-O-CO₂): Μίγματα που περιέχουν τρία αέρια παρέχουν μεγάλη ευελιξία εφαρμογών καθώς χρησιμοποιούνται και στους τρεις διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς μετάλλου της GMAW: υπό μορφή σταγόνων (globular transfer), υπό μορφή ψεκασμού (spray transfer) και με βραχυκύκλωση τόξου (short-circuit transfer). Οι τρεις αυτοί τρόποι αναλύονται στο επόμενο εδάφιο. Μίγματα Ar-O-CO₂ χρησιμοποιούνται κυρίως στις συγκολλήσεις ανθρακοχαλύβων.

Μίγματα Αργού-Ηλίου-Διοξειδίου του Άνθρακα (Ar-He-CO₂):

Προσθήκη ηλίου και διοξειδίου του άνθρακα στο αργό αυξάνει την προσδιδόμενη θερμότητα στο μέταλλο βάσης, την ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης και το πλάτος της ραφής συγκόλλησης. Με προσθήκες ηλίου και CO₂ σε ποσοστά μικρότερα του 40% επιτυγχάνεται καλή μεταφορά με ψεκασμό ειδικά για χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και άλλα κραματικά στοιχεία. Όταν το ήλιο ξεπεράσει το 50-60%, η μεταφορά του μετάλλου γίνεται μόνο υπό μορφή σταγόνων ή με βραχυκύκλωση τόξου. Μίγματα με CO₂ σε ποσοστά μικρότερα του 5% χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις ανοξειδωτων χαλύβων όπου επιθυμείται να μη μειωθεί η αντοχή τους σε διάβρωση.

Μίγματα Αργού-Διοξειδίου του Άνθρακα-Υδρογόνου (Ar-CO₂-H):

Τριμερή μίγματα αυτής της κατηγορίας προορίζονται για συγκολλήσεις ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων δια ψεκασμού ή βραχυκύκλωσης. Εξ αιτίας της προσθήκης υδρογόνου, τα μίγματα αυτά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις ανθρακοχαλύβων. Το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο αυξάνουν το ποσό θερμότητας που προσδίδεται στο μέταλλο βάσης ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν την ταχύτητα και βελτιώνουν την όψη της ραφής συγκόλλησης.

1.3.3.3 Τεχνικές Μεταφοράς Μετάλλου στην GMAW

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές με τις οποίες το τηγμένο ηλεκτρόδιο μεταφέρεται στα προς συγκόλληση μέταλλα στην GMAW: μεταφορά μετάλλου υπό μορφή σταγόνων (Globular), μεταφορά μετάλλου με ψεκασμό (Spray transfer) και μεταφορά μετάλλου με βραχυκύκλωση τόξου (Short-circuit transfer). Ο τύπος μεταφοράς καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψιν διάφορους παράγοντες οι κυριότεροι των οποίων είναι:

- Η ένταση και το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος συγκόλλησης
- Η διάμετρος του ηλεκτροδίου
- Η χημική σύσταση του ηλεκτροδίου
- Το μήκος που προεξέχει το ηλεκτρόδιο πέρα από το την άκρη του ακροφύσιου συγκόλλησης
- Το αέριο προστασίας
- Η απόδοση της μηχανής συγκόλλησης

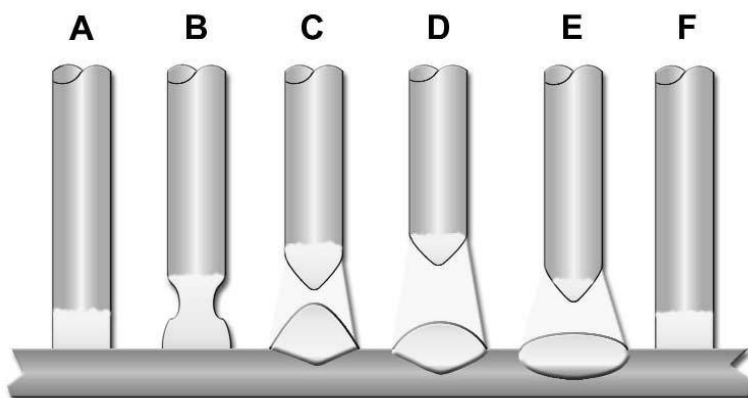
Οι τρεις τεχνικές μεταφοράς μετάλλου αναλύονται παρακάτω:

A. Μεταφορά μετάλλου με βραχυκύκλωση τόξου (Short Circuit Transfer):

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές έντασης ρεύματος και διαμέτρου ηλεκτροδίου που μπορούν να εφαρμοστούν στην GMAW. Παράγει μικρή λίμνη συγκόλλησης που στερεοποιείται ταχύτατα και είναι ιδανική για συγκολλήσεις με μικρές ραφές σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Το τηγμένο μέταλλο του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο τεμάχιο μόνο όταν το ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης και τότε δημιουργείται βραχυκύκλωμα το οποίο στιγμιαία διακόπτει το ηλεκτρικό τόξο. Αφότου όμως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο συμπιέσει την τηγμένη σταγόνα στο άκρο του ηλεκτροδίου (pinch effect), η λίμνη συγκόλλησης παρασύρει την τηγμένη σταγόνα από την άκρη του ηλεκτροδίου, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται και το τόξο ανάβει ξανά. Η αύξηση στην τιμή της έντασης του ρεύματος πρέπει να είναι αρκετή ώστε να θερμάνει επαρκώς το ηλεκτρόδιο προκειμένου να λάβει χώρα η μεταφορά τηγμένου μετάλλου αλλά ταυτόχρονα όχι υπερβολική ούτως ώστε να αποφευχθεί πιτσιλίσμα εξαιτίας απότομης αποκόλλησης της τηγμένης σταγόνας του ηλεκτροδίου. Ο ρυθμός αύξησης της έντασης του ρεύματος ελέγχεται ρυθμίζοντας την επαγόμενη τάση από

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

την μηχανή συγκόλλησης. Η ιδανική ρύθμιση εξαρτάται από την ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος και την θερμοκρασία τήξης του ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης με σταθερό ρυθμό ο οποίος κυμαίνεται από 20 έως και περισσότερες από 200 επαφές το δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα η διακοπή του τόξου να μη γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Μετά το άναμμα του τόξου, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται καθώς το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται προς το επόμενο βραχυκύκλωμα. Η τάση και η ένταση του ρεύματος που παρέχεται από την πηγή ενέργειας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (συνήθως 100-200 A και 17-22 V) προκειμένου η λιωμένη σταγόνα στην άκρη του ηλεκτροδίου να μεταφέρεται μόνο όταν έρθει σε επαφή με το μέταλλο συγκόλλησης. Λόγω του ότι μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται μόνο δια βραχυκύκλωσης, το προστατευτικό αέριο δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην μεταφορά αυτή καθαυτή, ωστόσο επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του τόξου και τη διείσδυση στο μέταλλο βάσης.



Σχήμα 1.19: Τα έξι στάδια της μεταφοράς με βραχυκύκλωση: A) Επαφή ηλεκτροδίου με το μέταλλο βάσης που οδηγεί σε βραχυκύκλωση. Δεν υπάρχει ηλεκτρικό τόξο και το ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται από το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης μέσω επαφής. B) Το ηλεκτρόδιο υπερθερμαίνεται, τήκεται και δημιουργεί 'λαιμό'. C) Το ηλεκτρόδιο διαχωρίζεται από την λίμνη συγκόλλησης δημιουργώντας κατ' αυτό τον τρόπο ηλεκτρικό τόξο. Ένα μικρό τμήμα του ηλεκτροδίου εναποτίθεται στην λίμνη συγκόλλησης. D) Το μήκος και η τάση του τόξου είναι μέγιστα σε αυτό το στάδιο. E) Η ταχύτητα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου ξεπερνά την ταχύτητα με την οποία καταναλώνεται και το ηλεκτρόδιο προσεγγίζει το μέταλλο βάσης ξανά. F) Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το μέταλλο βάσης ξανά, το ηλεκτρικό τόξο σβήνει και λαμβάνει χώρα εκ νέου βραχυκύκλωση

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

B. Μεταφορά μετάλλου υπό μορφή σταγόνων (Globular):

Όταν το ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένο (DCEP), μεταφορά υπό μορφή σταγόνων λαμβάνει χώρα όταν η πυκνότητα του ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή, ανεξάρτητα από τον τύπο του προστατευτικού αερίου. Στις περιπτώσεις όμως όπου το αέριο προστασίας είναι ήλιο ή διοξείδιο του άνθρακα, η μεταφορά μετάλλου γίνεται πάντα υπό μορφή σταγόνων για όλες τις συχνότητες ρεύματος. Το τηγμένο ηλεκτρόδιο σχηματίζει σταγόνες οι οποίες πριν αποκολληθούν αποκτούν μεγαλύτερη διάμετρο από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Αυτές οι μεγάλες σταγόνες από το μέταλλο του ηλεκτροδίου ταξιδεύουν κατά μήκος του κενού που γεφυρώνει το ηλεκτρικό τόξο κάτω από την επίδραση της βαρύτητας. Εξ' αιτίας του ότι η μεταφορά μετάλλου βασίζεται στην βαρύτητα, η τεχνική αυτή περιορίζεται σε συγκολλήσεις επίπεδων θέσεων (flat position). Όταν η ένταση του ρεύματος κυμαίνεται σε σχετικά μέσα επίπεδα (περίπου 180 A), η μεταφορά μετάλλου μπορεί να πραγματοποιηθεί αξονικά όταν η συγκόλληση προστατεύεται κατά κύριο λόγο από αδρανή αέρια. Αν το μήκος του τόξου είναι πολύ μικρό οι σταγόνες έρχονται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης προτού προλάβουν να αποκολληθούν από το ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα να υπερθερμαίνονται και να αποσυντίθενται προκαλώντας έντονο πιτσιλίσμα. Επομένως, το μήκος του τόξου πρέπει να είναι επαρκές ούτως ώστε οι σταγόνες να αποκολλώνται προτού έρθουν σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Όταν χρησιμοποιείται ακόμη μεγαλύτερη τάση, η ποιότητα της συγκόλλησης κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι αποδεκτή κυρίως λόγω ανεπαρκούς τήξης και διείδυσης, γεγονός που περιορίζει τη χρήση αυτής της τεχνικής σε μικρό εύρος εφαρμογών. Η τεχνική αυτή είναι η λιγότερο επιθυμητή εξ' αιτίας της παραγωγής υπερβολικής θερμότητας, κακής ποιότητας συγκόλλησης και έντονου πιτσιλίσματος. Αρχικά αναπτύχθηκε ως φθηνή μέθοδος συγκόλλησης χάλυβα χάρη στη χρήση διοξειδίου του άνθρακα ως προστατευτικό αέριο που είναι φθηνότερο από το αργό. Το χαμηλό κόστος της τεχνικής αυτής σε συνδυασμό με το ότι επιτρέπει υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης (έως και 110 mm/s) είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους επιλέγεται αυτή η τεχνική.

Γ. Μεταφορά μετάλλου με σταγονίδια (Spray transfer):

Πρόκειται για πολύ σταθερή τεχνική μεταφοράς χωρίς σχεδόν καθόλου πιτσιλίσμα η οποία χρησιμοποιεί αδρανή αέρια (κυρίως αργό) για προστασία. Είναι η πρώτη τεχνική που εφαρμόστηκε στην GMAW και είναι ιδανική για συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξείδωτων

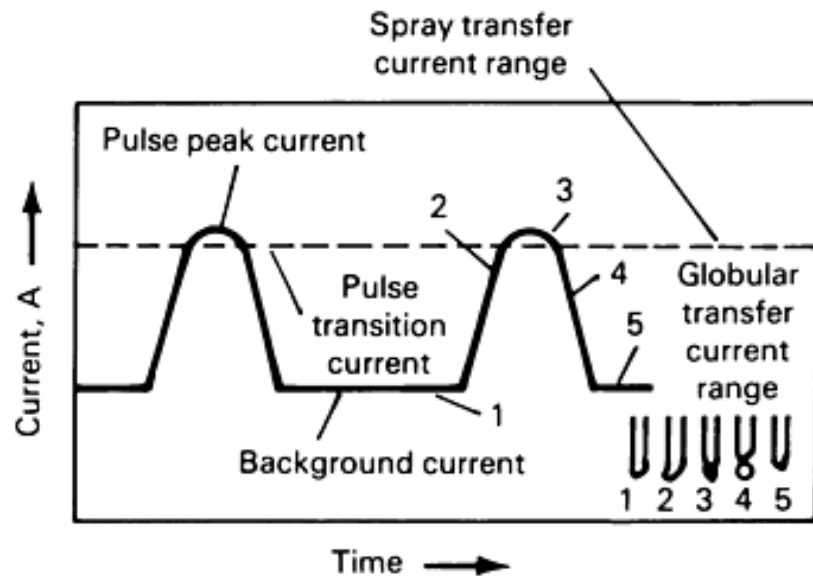
Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

χαλύβων υπό την προστασία αδρανών αερίων. Απαιτεί την χρήση συνεχούς ρεύματος με θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (DCEP). Όταν η ένταση του ρεύματος ξεπερνάει μια κρίσιμη τιμή η οποία καλείται 'τιμή μετάβασης (transition current, I_{tr}), η μεταφορά του τηγμένου ηλεκτροδίου προς την λίμνη συγκόλλησης γίνεται υπό την μορφή σταγονιδίων υψηλής ενέργειας. Για χαμηλότερες τιμές έντασης ρεύματος η μεταφορά γίνεται υπο μορφή σταγόνων (globular mode) με σχετικά μικρό αριθμό σταγόνων να μεταφέρεται ανα δευτερόλεπτο. Σε εντάσεις ρεύματος υψηλότερες της I_{tr} , δημιουργούνται και μεταφέρονται εκατοντάδες μικρά σταγονίδια ανα δευτερόλεπτο τα οποία επιταχύνουν αξονικά μέσα στο κενό που δημιουργεί το ηλεκτρικό τόξο. Η τιμή του ρεύματος μετάβασης είναι ανάλογη της διαμέτρου του ηλεκτροδίου και, σε μικρότερο βαθμό, του πόσο εκτείνεται το ηλεκτρόδιο εξωτερικά του ακροφυσίου.

Η μεταφορά υπο μορφή σταγονιδίων γίνεται ουσιαστικά εν μέσω μιας καθοδηγούμενης δέσμης διακριτών σταγονιδίων τα οποία επιταχύνονται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις του ηλεκτρικού τόξου σε ταχύτητες αρκετά μεγάλες που υπερνικούν την επίδραση της βαρύτητας. Αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις υπο συγκεκριμένες συνθήκες. Χάρη στο ότι τα σταγονίδια είναι διαχωρισμένα μεταξύ τους, δεν δημιουργούνται βραχυκυκλώσεις και το επίπεδο πιτσιλίσματος είναι αμελητέο αν όχι ανύπαρκτο. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων και κραμάτων χάρη στα χαρακτηριστικά του προστατευτικού παραπετάσματος που δημιουργεί το αργό ως προστατευτικό αέριο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι ζήτημα εξ' αιτίας της απαίτησης για υψηλές εντάσεις ρεύματος. Το ηλεκτρικό τόξο είναι αρκετά ισχυρό και μπορεί να κόψει αντί να συγκολλήσει λεπτά ελάσματα. Επιπρόσθετα, ο υψηλός ρυθμός εναπόθεσης του τηγμένου ηλεκτροδίου οδηγεί σε μεγάλη επιφάνεια λίμνης συγκόλλησης η οποία δεν μπορεί να συγκρατηθεί από την επιφανειακή τάση στην κατακόρυφη και οροφιαία συγκόλληση. Ωστόσο, οι δυσκολίες και οι περιορισμοί που προκύπτουν λόγω πάχους και θέσης συγκόλλησης έχουν ξεπεραστεί σε μεγάλο βαθμό χάρη σε ειδικά σχεδιασμένες πηγές ενέργειας. Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών συγκόλλησης GMAW είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος. Οι μηχανές αυτές παρέχουν δυο επίπεδα έντασης ρεύματος: ένα σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης, που δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηγμένου υλικού σε σταγονίδια, και ένα ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπο μορφή παλμών, που υπερίθεται στο

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

πρώτο (συχνότητα συνήθως 50 Hz). Η μέγιστη τιμή του συνολικού ρεύματος είναι υψηλότερη της τιμής μετάβασης τουτέστιν η μεταφορά γίνεται με ψεκασμό. Το σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι η επιθυμητή μεταφορά με ψεκασμό γίνεται με αποδοτικότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.19: Χαρακτηριστική κυματομορφή ρεύματος για μηχανή παλλόμενου συνεχούς ρεύματος

1.3.3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα συγκόλλησης

Οι σημαντικότερες μεταβλητές που επηρεάζουν τη διείδυση της συγκόλλησης, τη γεωμετρία της ραφής και γενικά την ποιότητα συγκόλλησης είναι:

- Η τιμή της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης.
- Η πολικότητα.
- Η τάση του ηλεκτρικού τόξου.
- Η ταχύτητα κίνησης του πιστολιού.
- Η προέκταση του ηλεκτροδίου.
- Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου (η γωνία μεταξύ του πιστολιού και των τεμαχίων).
- Η διάμετρος του ηλεκτροδίου.

Η γνώση και ο έλεγχος αυτών των μεταβλητών είναι ουσιώδους σημασίας για την πραγματοποίηση ποιοτικών συγκολλήσεων. Εφόσον οι παράμετροι αυτές δεν είναι εντελώς

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

ανεξάρτητες, αλλαγή μιας εκ αυτών, συνήθως απαιτεί αλλαγή μιας ακόμη ή και περισσότερων μεταβλητών προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων απαιτεί ιδιαίτερη ικανότητα και εμπειρία. Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων περιπλέκεται ακόμη περισσότερο λόγω του ότι οι ιδανικές ρυθμίσεις για τις μεταβλητές αυτές επηρεάζονται επίσης από τον τύπο του μετάλλου βάσης, τη χημική σύσταση του ηλεκτροδίου, τη θέση συγκόλλησης, τις απαιτήσεις ποιότητας και τον αριθμό των συγκολλήσεων που θα πραγματοποιηθούν. Επομένως, ο ιδανικός συνδυασμός παραμέτρων είναι διαφορετικός σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω αναλύεται η επίδραση κάθε μιας παραμέτρου στην ποιότητα συγκόλλησης.

Ένταση του ρεύματος: Η ένταση του ρεύματος ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου όταν γίνεται χρήση μηχανής συνεχούς τάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από τη μηχανή συγκόλλησης μεταβάλλεται δραματικά με την παραμικρή μεταβολή στην τάση του τόξου (ή αλλιώς στο μήκος του τόξου). Τέτοιου είδους μεταβολές οφείλονται σε αλλαγές στην ταχύτητα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι άλλες μεταβλητές παραμένουν σταθερές, αύξηση της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης επιφέρει αύξηση στο βάθος και στο πλάτος της διείδυσης της συγκόλλησης, στον ρυθμό εναπόθεσης του ηλεκτροδίου και στο μέγεθος της ραφής συγκόλλησης.

Πολικότητα: Είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ηλεκτρική σύνδεση του πιστολιού συγκόλλησης με την πηγή συνεχούς ρεύματος (DC). Όταν το πιστόλι συγκόλλησης είναι συνδεδεμένο στο θετικό πόλο, η πολικότητα ορίζεται ως 'συνεχές ρεύμα με ανάστροφη πολικότητα', DCEP (Direct Current Electrode Positive). Εναλλακτικά, σύνδεση με τον αρνητικό πόλο ορίζεται ως 'συνεχές ρεύμα με ορθή πολικότητα', DCEN (Direct Current Electrode Negative). Η συντριπτική πλειονότητα των εφαρμογών της GMAW χρησιμοποιεί DCEP διότι παρέχει σταθερό τόξο, χαμηλά επίπεδα πιτσιλίσματος, ικανοποιητική όψη ραφής και το μεγαλύτερο βάθος διείδυσης.

Τάση του ηλεκτρικού τόξου: Η τάση του ηλεκτρικού τόξου (arc voltage) και το μήκος του (arc length) είναι όροι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και πολλές φορές χρησιμοποιείται ο ένας έναντι του άλλου. Ωστόσο είναι διαφορετικοί. Η τάση του τόξου είναι ένα προσεγγιστικό μέσο που δηλώνει το φυσικό μήκος του τόξου σε ηλεκτρικούς όρους. Το ίδιο φυσικό μήκος

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

τόξου όμως μπορεί να αποδίδει διαφορετικές μετρήσεις τάσης ανάλογα με παράγοντες όπως το είδος του προστατευτικού αερίου, η ένταση του ρεύματος και το μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι μεταβλητές διατηρούνται σταθερές, τα δυο αυτά μεγέθη έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους: αύξηση στην τάση του ρεύματος θα οδηγήσει σε μεγαλύτερο μήκος τόξου. Αν και το μήκος του τόξου είναι η μεταβλητή με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και αυτή η οποία πρέπει να ελέγχεται, η τάση είναι αυτή που μεταβάλλεται με μεγαλύτερη ευκολία από τον χειριστή. Λόγω του τελευταίου και επειδή η τάση του τόξου συνήθως δηλώνεται σε διαδικασίες συγκόλλησης, είναι ο όρος που χρησιμοποιείται ευρύτερα. Αύξηση στην τιμή της τάσης του τόξου, τείνει να κάνει την ραφή συγκόλλησης πιο επίπεδη και τη ζώνη τήξης πιο πλατιά. Υπερβολικά υψηλές τιμές τάσης μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία πορώδους, πιτσιλίσματος και κοπής. Μειωμένες τιμές τάσης έχουν ως αποτέλεσμα στενότερες ραφές.

Ταχύτητα κίνησης τόξου: Είναι ο γραμμικός ρυθμός με τον οποίο κινείται το ηλεκτρικό τόξο κατά μήκος της συμβολής των προς συγκόλληση τεμαχίων. Όταν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές, η διείδυση είναι μέγιστη για ενδιάμεσες τιμές ταχυτήτων. Όταν η ταχύτητα μειώνεται, η εναπόθεση του ηλεκτροδίου ανά μονάδα μήκους προφανώς αυξάνεται. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες το ηλεκτρικό τόξο έρχεται σε επαφή με την λίμνη συγκόλλησης αντί του μετάλλου βάσης και εκ τούτου μειώνεται η αποτελεσματικότητα της διείδυσης της συγκόλλησης. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται και η θερμική ενέργεια που μεταδίδεται από το ηλεκτρικό τόξο στο μέταλλο βάσης διότι το τόξο επιδρά πιο άμεσα στο μέταλλο βάσης. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα ανεπαρκή μετάδοση θερμότητας από το τόξο στο μέταλλο βάσης, δηλαδή η τήξη του μετάλλου βάσης αρχικά αυξάνεται και εν συνεχεία μειώνεται με σταδιακή αύξηση της ταχύτητας. Υπερβολική αύξηση της ταχύτητας μπορεί να επιφέρει κοπή του δοκιμίου στις άκρες της ραφής συγκόλλησης διότι η εναπόθεση του τηγμένου ηλεκτροδίου είναι ανεπαρκής και δεν μπορεί να γεμίσει το τηγμένο μονοπάτι που δημιουργεί το ηλεκτρικό τόξο.

Προσανατολισμός του ηλεκτροδίου: Περιγράφεται με δυο τρόπους: από την γωνία μεταξύ του άξονα του ηλεκτροδίου και τη διεύθυνση κίνησης (γωνία κίνησης) και από τη γωνία μεταξύ του άξονα του ηλεκτροδίου και την προσκείμενη επιφάνεια εργασίας (γωνία εργασίας). Όταν το ηλεκτρόδιο είναι προσανατολισμένο προς διεύθυνση αντίθετη από τη

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

διεύθυνση κίνησης η γωνία μεταξύ ηλεκτροδίου και διεύθυνσης κίνησης ονομάζεται 'trail angle' και η τεχνική συγκόλλησης ονομάζεται 'backhand'. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το ηλεκτρόδιο είναι δηλαδή προσανατολισμένο προς τη διεύθυνση κίνησης η γωνία καλείται 'lead angle' και η τεχνική συγκόλλησης 'forehand'. Για όλες τις θέσεις συγκόλλησης, γωνία 'trail' η οποία κυμαίνεται μεταξύ 5° και 15° (ως προς την κατακόρυφο) παρέχει συγκόλληση με μέγιστη διείδυση και στενή, κυρτή διάταξη επιφάνειας. Επίσης παρέχει μέγιστη προστασία στην λίμνη συγκόλλησης. Ωστόσο, η πιο κοινή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική χρησιμοποιεί 'lead angle' η οποία παρέχει καλύτερη ορατότητα για το χειριστή και συγκόλληση με πιο επίπεδο προφίλ επιφάνειας. Για ορισμένα υλικά όπως το αλουμίνιο προτιμάται συγκόλληση με 'lead angle'. Αυτό διότι καθώς το ηλεκτρόδιο προχωράει κατά τη διεύθυνση συγκόλλησης, ταυτόχρονα 'καθαρίζει' την περιοχή μπροστά από τη λίμνη συγκόλλησης γεγονός που ευνοεί τη διαβροχή και μειώνει τα επίπεδα οξειδωσης του μετάλλου βάσης.

Η προέκταση του ηλεκτροδίου: Είναι η απόσταση μεταξύ του τελευταίου σημείου ηλεκτρικής επαφής (συνήθως ο σωλήνας επαφής) και του τέλους του ηλεκτροδίου. Αύξηση αυτής της απόστασης οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης που με τη σειρά της παράγει περισσότερη θερμότητα στο ηλεκτρόδιο και τελικά αυξάνεται ο ρυθμός με τον οποίο τήκεται το ηλεκτρόδιο. Χωρίς αύξηση στην τάση του τόξου, το επιπρόσθετο τηγμένο ηλεκτρόδιο εναποτίθεται στη ραφή συγκόλλησης και η οποία εν τέλει εκτείνεται περισσότερο καθ' ύψος. Η ιδανική προέκταση ηλεκτροδίου κυμαίνεται μεταξύ 6.4mm και 13mm για μεταφορά με βραχυκύκλωση και από 13mm έως 25mm για μεταφορά υπό μορφή σταγόνων και σταγονιδίων.

Η διάμετρος του ηλεκτροδίου: Επηρεάζει τη μορφή της ραφής συγκόλλησης. Μεγαλύτερα ηλεκτρόδια χρειάζονται υψηλότερες εντάσεις ρεύματος απότι μικρότερα ηλεκτρόδια προκειμένου να επιτευχθούν τα ίδια χαρακτηριστικά μεταφοράς μετάλλου. Αντίστοιχα, υψηλότερες εντάσεις ρεύματος παράγουν επιπρόσθετη τήξη ηλεκτροδίων και μεγαλύτερες, πιο υγρές λίμνες συγκόλλησης. Υψηλότερο ρεύμα επίσης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης μετάλλου και μεγαλύτερη διείδυση αλλά αποτρέπει τη χρήση ορισμένων ηλεκτροδίων στην κατακόρυφη και την οροφιαία συγκόλληση.

1.3.3.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της GMAW

Η GMAW χρησιμοποιείται εκτενώς χάρη στο ότι εγγυάται συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας για μεγάλο εύρος υλικών (σιδηρούχων και μη) με χαμηλό κόστος. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της GMAW είναι τα εξής:

- Η ευελιξία που παρέχει σχετικά με το υλικό και το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Τα τμήματα του εξοπλισμού της GMAW είναι ετοιμοπαράδοτα και σχετικά οικονομικά.
- Η συγκόλληση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλες τις πιθανές θέσεις αν εφαρμοστούν οι κατάλληλες παράμετροι.
- Το ηλεκτρόδιο είναι μεν καταναλισκόμενο αλλά ταυτόχρονα είναι συνεχώς τροφοδοτούμενο, τουτέστιν η διαδικασία δεν σταματά όπως στην SMAW.
- Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι σχετικά υψηλή.
- Ο ρυθμός εναπόθεσης του τηγμένου ηλεκτροδίου στην συγκόλληση είναι υψηλός.
- Απαιτείται λιγότερη ικανότητα από τον χειριστή συγκριτικά με άλλες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, καθώς το μήκος του τόξου διατηρείται σχετικά σταθερό μεταξύ του της άκρης του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου.
- Ελάχιστο πιτσίλισμα (spatter) και σχεδόν αμελητέα δημιουργία σκουριάς κατά την συγκόλληση διευκολύνουν και επιταχύνουν το καθάρισμα του τεμαχίου μετά την εργασία.
- Προσαρμόζεται εύκολα σε ρομποτικές συγκολλήσεις καθώς και σε αυτοματοποιημένες και ημιαυτοματοποιημένες εφαρμογές συγκολλήσεων.
- Εξαιρετική εμφάνιση ραφής συγκόλλησης.
- Παράγει λιγότερες αναθυμιάσεις συγκριτικά με τη SMAW και τη FCAW (Flux-Cored Arc Welding).
- Χαμηλό κόστος ηλεκτροδίου.
- Γενικά έχει χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα μήκους συγκολλημένου μετάλλου συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους συγκόλλησης τόξου.
- Λιγότερη παραμόρφωση των τεμαχίων όταν χρησιμοποιείται η GMAW-P (μεταφορά υλικού με σταγονίδια υπό παλμικό ρεύμα) και η GMAW-S (μεταφορά υλικού με βραχυκύκλωση).

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

Η GMAW, όπως όλες οι τεχνικές συγκόλλησης έχει μερικούς περιορισμούς ως προς το πεδίο εφαρμογής της:

- Ο εξοπλισμός της είναι σχετικά πιο πολύπλοκος, ακριβός και λιγότερο φορητός από τον αντίστοιχο της SMAW.
- Το πιστόλι συγκόλλησης είναι μεγαλύτερο από το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο της SMAW και επομένως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σε δυσπρόσιτες ραφές με την ίδια άνεση.
- Το ηλεκτρικό τόξο πρέπει να προστατεύεται από ρεύματα αέρα τα οποία μπορούν να διασκορπίσουν το προστατευτικό αέριο. Αυτό περιορίζει την εφαρμογή της GMAW σε εσωτερικούς χώρους εκτός αν έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα προστατευτικά μέσα γύρω από την περιοχή συγκόλλησης.
- Η χρήση προστατευτικών μιγμάτων αερίων με βασικό συστατικό το αργό την οποία απαιτεί η μεταφορά με σταγονίδια (είτε με παλμικό ρεύμα είτε χωρίς) αυξάνει αρκετά το κόστος της μεθόδου συγκριτικά με την χρήση 100% διοξειδίου του άνθρακα.

1.3.4 Συγκόλληση Τόξου με Χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding, FCAW)^[1,2,3,5,7,10,18]

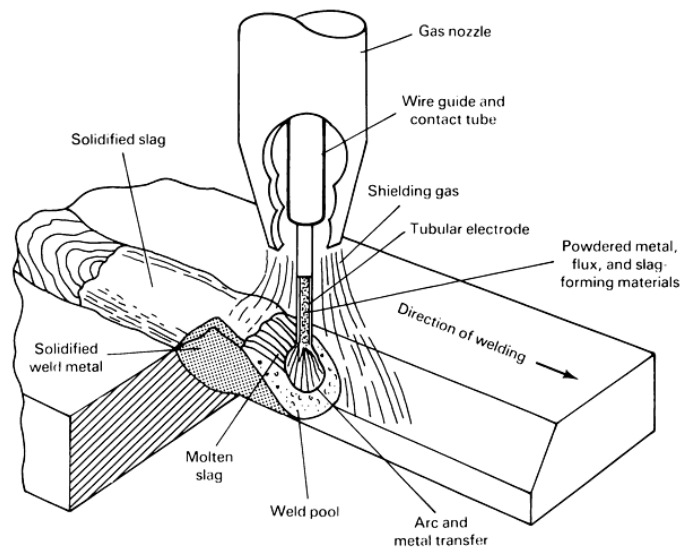
1.3.4.1 Γενικά

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά όμοια με τη GMAW όσον αφορά τη διαδικασία και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Αυτό που τη διαχωρίζει από την GMAW είναι η μορφή του ηλεκτροδίου-σύρματος. Το ηλεκτρόδιο είναι μεν μεταλλικό αλλά σωληνοειδές, με πυρήνα από ειδική προστατευτική σκόνη στο εσωτερικό του, παρόμοια με εκείνη των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της μεθόδου SMAW. Η σκόνη αυτή σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχει αρκετή προστασία και δεν απαιτείται η χρήση προστατευτικού αερίου κατά τη συγκόλληση. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται και προστατευτικό αέριο.

Στην περίπτωση συγκόλλησης FCAW με την χρήση προστατευτικού αερίου (σχήμα 1.20) η διαδικασία είναι παρόμοια με την GMAW. Χρησιμοποιείται δηλαδή προστατευτικό αέριο που διοχετεύεται μέσω του ακροφύσιου του πιστολιού στην περιοχή συγκόλλησης και το οποίο βοηθά στην προστασία του τόξου από το άζωτο και το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Τα κύρια συστατικά του ηλεκτροδίου της FCAW στην περίπτωση που χρησιμοποιείται

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

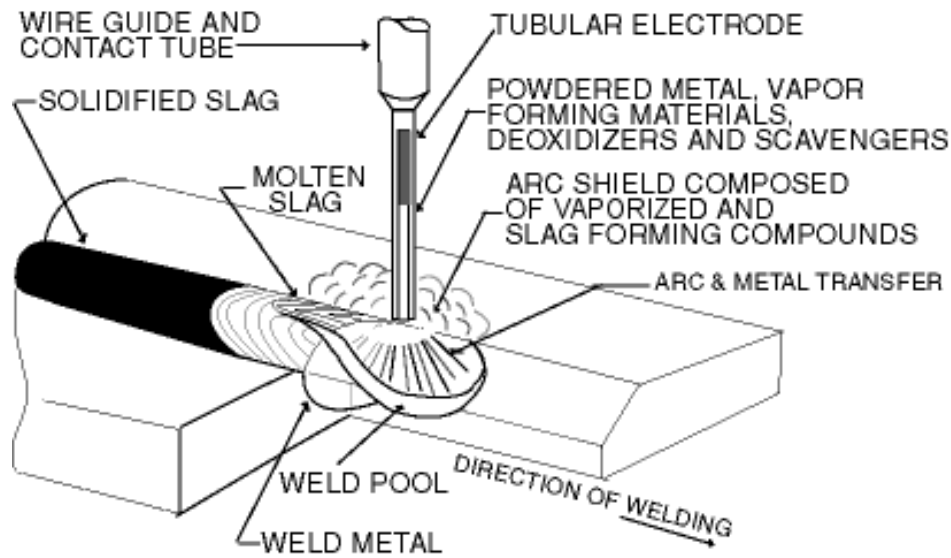
προστατευτικό αέριο είναι κραματικά στοιχεία, αποξειδωτικά στοιχεία, στοιχεία που ευνοούν τον σχηματισμό σκουριάς και στοιχεία που διατηρούν το ηλεκτρικό τόξο σταθερό.



Σχήμα 1.20: FCAW με προστασία αερίου (gas shielded FCAW or G-FCAW)

Όταν δεν χρησιμοποιείται προστατευτικό αέριο, τα συστατικά του πυρήνα του ηλεκτροδίου παρέχουν την απαιτούμενη προστασία από τα ατμοσφαιρικά αέρια. Το βασικό πλεονέκτημα της αυτοπροστατευόμενης FCAW είναι η απλούστευση της διαδικασίας χάρη στην απουσία του εξοπλισμού που απαιτείται για την παροχή του προστατευτικού αερίου. Ορισμένα ηλεκτρόδια αυτής της μεθόδου παρέχουν από μόνα τους προστατευτικά αέρια τα οποία δημιουργούνται κατά την τήξη και αποσύνθεση των συστατικών του πυρήνα τους. Άλλα ηλεκτρόδια παρέχουν προστασία στη λίμνη συγκόλλησης μέσω του στρώματος σκουριάς που δημιουργούν και το οποίο καλύπτει την ραφή συγκόλλησης αποτρέποντας την επαφή της με τα ατμοσφαιρικά αέρια. Πολλά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στην FCAW χωρίς τη χρήση προστατευτικού αερίου περιέχουν επίσης στοιχεία που ευνοούν την απομάκρυνση του οξυγόνου και του αζώτου, στοιχεία που βοηθούν στην διατήρηση της σταθερότητας του τόξου και κραματικά στοιχεία.

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου



Self Shielded Flux Cored Arc Welding

Σχήμα 1.21: Αυτοπροστατευόμενη FCAW (self-shielded GCAW or S-FCAW)

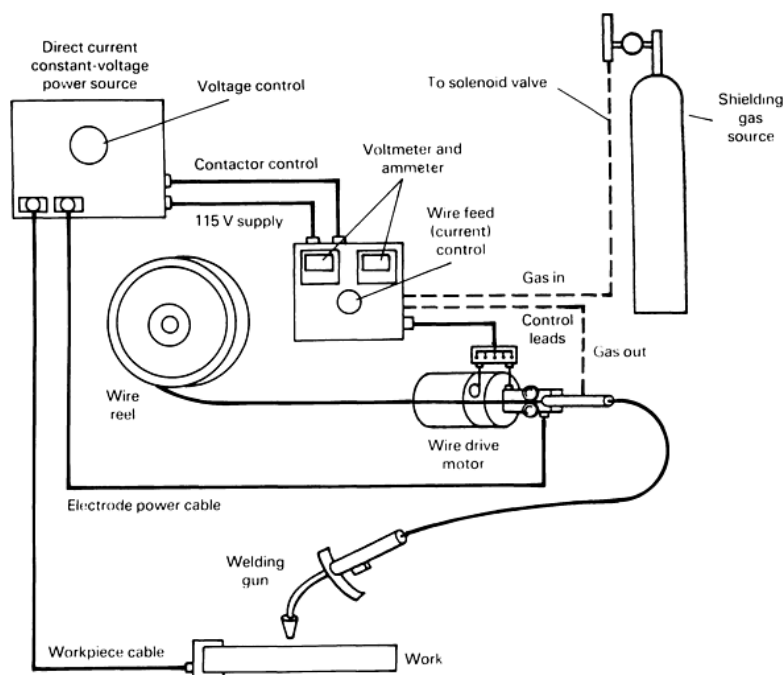
Η FCAW πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 50 ως παραλλαγή της μεθόδου SMAW. Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες. Τόσο η αυτοπροστατευόμενη FCAW όσο και η FCAW που χρησιμοποιεί εξωτερικό αέριο προστασίας βρίσκουν εφαρμογές σε συγκολλήσεις διαφόρων χαλύβων, από ανθρακοχάλυβες μέχρι χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε κραμικά στοιχεία. Και οι δύο παραλλαγές της μεθόδου χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις εντός εργαστηρίου και γενικότερα εντός εξοπλισμένων εγκαταστάσεων αλλά η αυτοπροστατευόμενη FCAW προτιμάται σε συγκολλήσεις εκτός τέτοιων χώρων.

1.3.4.2 Διάταξη και Εξοπλισμός της FCAW

Συγκολλήσεις με τη μέθοδο FCAW χρησιμοποιούν ημιαυτοματοποιημένα, μηχανικά ή πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα συγκόλλησης. Ο βασικός εξοπλισμός συμπεριλαμβάνει τη μηχανή συγκόλλησης, τη μονάδα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου-σύρματος και το πιστόλι συγκόλλησης. Ο βοηθητικός εξοπλισμός, όπως το προστατευτικό αέριο, εξαρτάται από την παραλλαγή της μεθόδου που εφαρμόζεται και από το βαθμό αυτοματοποίησης της ενώ στις περισσότερες εφαρμογές της FCAW πρέπει να υπάρχει εξοπλισμός για την απομάκρυνση των αναθυμιάσεων που παράγονται κατά τη συγκόλληση. Αξίζει να σημειωθεί πως ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην G-FCAW (gas shielded

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

FCAW, FCAW με προστασία αερίου) είναι πανομοιότυπος με τον εξοπλισμό της GMAW. Ο τυπικός εξοπλισμός ημιαυτοματοποιημένης FCAW φαίνεται στο σχήμα 1.22.



Σχήμα 1.22: Τυπική διάταξη ημιαυτόματης FCAW

Η προτεινόμενη μηχανή συγκόλλησης για την ημιαυτοματοποιημένη FCAW είναι σταθερής τάσης και συνεχούς ρεύματος (dc). Οι περισσότερες μηχανές συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στην ημιαυτοματοποιημένη FCAW παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα έντασης μέχρι 600 A.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως φερειπείν σε συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους, χρησιμοποιούνται και μηχανές σταθερής παροχής ρεύματος. Ωστόσο, χρήση τέτοιων συστημάτων προτείνεται μόνο όταν δεν είναι δυνατή η χρήση συστήματος σταθερής τάσης, διότι τα συστήματα σταθερού ρεύματος παράγουν ηλεκτρικό τόξο εγγενώς πιο ασταθές από εκείνο των συστημάτων σταθερής τάσης.

Οι μονάδες τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου (wire feeder) για συγκολλήσεις FCAW σταθερής τάσης είναι γενικά απλές συσκευές που παρέχουν το ηλεκτρόδιο με σταθερό ρυθμό. Η μηχανή συγκόλλησης παρέχει επαρκές ρεύμα για να διατηρήσει το ηλεκτρικό τόξο στην

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

επιθυμητή τάση. Αλλαγή στην ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου οδηγεί σε αλλαγή της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης.

Σε συστήματα σταθερής έντασης ρεύματος, η μονάδα παροχής του ηλεκτροδίου είναι τρόπον τινά πιο πολύπλοκη. Η τιμή της έντασης του ρεύματος τίθεται στην μηχανή συγκόλλησης. Η μονάδα παροχής του ηλεκτροδίου διαθέτει αισθητήρες τάσης οι οποίοι της δίνουν τη δυνατότητα να προσαρμόζει την ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου προκειμένου να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά επίπεδα.

Στην ημιαυτοματοποιημένη FCAW χρησιμοποιούνται αερόψυκτα και υδρόψυκτα πιστόλια συγκόλλησης. Τα αερόψυκτα προτιμούνται γενικά διότι είναι ευκολότερα στην συντήρηση, πιο ελαφριά και λιγότερο ογκώδη. Τα υδρόψυκτα πιστόλια χρειάζονται σε συγκολλήσεις με εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες από 500 A και ειδικότερα όταν το προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιείται είναι αργό ή κάποιο μίγμα πλούσιο σε αργό. Τα αερόψυκτα πιστόλια που προορίζονται για συγκόλληση με προστασία αερίου δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις χωρίς προστασία αερίου διότι η σωστή ψύξη του πιστολιού εξαρτάται από τη ροή του προστατευτικού αερίου από μέσα του.

Σε πολλές περιπτώσεις, η ποσότητα του καπνού και των αναθυμιάσεων που παράγεται από τη διαδικασία συγκόλλησης είναι επαρκής για να απαιτείται μηχανισμός απομάκρυνσης των εν λόγω αναθυμιάσεων. Αν και ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να είναι απλός όπως φερειπείν συστήματα εξαερισμού στην οροφή του εργαστηρίου συχνά απαιτείται και άμεση απομάκρυνση καπνού και αναθυμιάσεων σε τοπικό επίπεδο. Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι είτε απορροφητήρες οι οποίοι τοποθετούνται έτσι ώστε να καλύπτουν το πιστόλι συγκόλλησης είτε ειδικά πιστόλια τα οποία απορροφούν τον καπνό. Τα τελευταία αυτά πιστόλια είναι πιο αποδοτικά στην απομάκρυνση του καπνού αλλά είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από τα συμβατικά πιστόλια συγκόλλησης.

Τα αέρια προστασίας στην περίπτωση της S-FCAW είναι είτε διοξείδιο του άνθρακα είτε μίγμα αργού-διοξειδίου του άνθρακα.

Η πλειονότητα των ηλεκτροδίων μεγάλης διαμέτρου (>1.6 mm) χρησιμοποιούν διοξείδιο του άνθρακα ως προστατευτικό αέριο. Το τόξο είναι γενικά σταθερό και παρέχει μεταφορά του ηλεκτροδίου με σταγονίδια. Επίσης, χρήση ηλεκτροδίων μεγάλης διαμέτρου και

Κεφάλαιο 1^ο: Συγκολλήσεις Ηλεκτρικού Τόξου

διοξειδίου του άνθρακα ως προστατευτικό αέριο διευκολύνει τη συγκόλληση πάνω σε στρώμα σκουριάς.

Ένας σημαντικός αριθμός σωληνοειδών ηλεκτροδίων μικρής διαμέτρου (<1.6 mm) προστατεύονται από μίγματα αργού και 15-50% διοξειδίου του άνθρακα. Τα μίγματα αυτά παρέχουν καλύτερο έλεγχο της λίμνης συγκόλλησης έναντι του καθαρού CO₂.

1.3.4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της FCAW

Συνδυάζοντας την παραγωγικότητα της συνεχόμενης, χωρίς διακοπές συγκόλλησης με τα οφέλη από την ύπαρξη της προστατευτικής σκόνης, η FCAW έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους συγκόλλησης. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Υψηλός ρυθμός εναπόθεσης, ειδικά για συγκολλήσεις σε μη συμβατικές θέσεις.
- Απαιτείται λιγότερη ικανότητα από τον χειριστή-συγκολλητή συγκριτικά με τις SMAW, GTAW και GMAW.
- Εξασφαλίζει μεγαλύτερη διεύθυνση από την SMAW.
- Μπορεί να λειτουργήσει καλύτερα από την GMAW στην περίπτωση που υπάρχει σκουριά.
- Το γεγονός ότι δεν απαιτείται χρήση προστατευτικού αερίου σε ορισμένες περιπτώσεις την καθιστά ιδανική μέθοδο για συγκόλληση σε εξωτερικούς χώρους ακόμα και υπό την επίδραση ανέμων.
- Απαιτείται λιγότερος καθαρισμός του μετάλλου πριν την έναρξη της διαδικασίας.

Μειονεκτήματα της διαδικασίας περιλαμβάνουν:

- Το στρώμα σκουριάς που δημιουργείται μετά την συγκόλληση πρέπει να αφαιρείται.
- Κατά την διαδικασία της FCAW παράγεται περισσότερος καπνός και αναθυμιάσεις απ'ότι στην GMAW.
- Απαιτείται μηχανισμός απομάκρυνσης του καπνού και των αναθυμιάσεων.
- Ο εξοπλισμός της FCAW είναι πιο ακριβός και λιγότερο ευέλικτος σε μετακινήσεις από εκείνον της SMAW.
- Το ηλεκτρόδιο είναι πιο ακριβό από το αντίστοιχο της GMAW.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Παπάζογλου, Β.Ι. 1995. *Ναυπηγική Τεχνολογία (Σημειώσεις)*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
2. Παπάζογλου, Β.Ι. & Παπαδημητρίου, Γ. 1994. *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων (Σημειώσεις)*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
3. Παντελής Δ.Ι. 2012. *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων: Ειδικά Κεφάλαια (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις)*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
4. Βαξεβανίδης, Ν.Μ., *Κατεργασίες Ι: Συγκολλήσεις, Πάτρα*, 2007.
5. American Welding Society, *Welding Handbook, 8th ed., 3 vols*, 1987.
6. American Metallurgical Consultants. "*Flux Cored Arc Welding*", *Welding Procedures & Techniques*. 23 June 2006.
7. ASM Handbook, vol. 6: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, 1993.
8. Lincoln Electric. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Cleveland: Lincoln Electric, 1994.
9. Lincoln Electric, 2004. *GMAW Welding Guide*. The Lincoln Electric Company.
10. Messler, Robert W. *Principles of Welding*. Troy, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
11. Miller Electric. *Principles of SMAW*. Miller Electric MFG.CO, 1997.
12. Miller Electric. *Guidelines to GTAW*. Miller Electric MFG.CO, 2003.
13. Miller Electric. *Guidelines for GMAW*. Miller Electric MFG.CO, 2007.
14. Minnick, William H. *Gas Tungsten Arc Welding Handbook*. Tinley Park, Illinois: Goodheart-Willcox Company, 1996.
15. Minnick, William H. *Gas Metal Arc Welding Handbook Textbook*. Tinley Park, 2007.
16. Nadzam, Jeff. *Gas Metal Arc Welding Guidelines*. Lincoln Electric, 1997.
17. O' Brien, Robert L. *Jefferson's Welding Encyclopedia (18th edition)*, 1997.
18. Weman, Klas. *Welding Processes Handbook*. New York: CRC Press LLC, 2009.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

«Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις»

2.1 Εισαγωγή^[1,2,3,4]

Οι συγκολλήσεις αποτελούν τον οικονομικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο για τη μόνιμη σύνδεση μεταλλικών τμημάτων. Με τις συγκολλήσεις πραγματοποιούνται μεγάλες και σύνθετες κατασκευές συνδέοντας μεταξύ τους μικρότερα μέρη. Οι συγκολλήσεις αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα κάθε τεχνολογικής δραστηριότητας ως κατεργασίες σύνδεσης, συναρμολόγησης και γενικότερα ανέγερσης κατασκευών.

Τις τελευταίες δεκαετίες στις διεργασίες των συγκολλήσεων έχουν υιοθετηθεί νέες τεχνολογίες όπως η αξιοποίηση των ρομποτικών συστημάτων στις συγκολλήσεις. Έτσι, ρομποτικές θεωρούνται εκείνες οι συγκολλήσεις που εκτελούνται και ελέγχονται από μια ρομποτική διάταξη.

Ο όρος ρομπότ (robot) προέρχεται από την Τσεχοσλοβακία και σημαίνει «αναγκαστική εργασία». Ο όρος βιομηχανικό ρομπότ (industrial robot) καθιερώθηκε το 1954 από τον G. C. Devol (ΗΠΑ). Ο Devol περιέγραψε πώς μπορεί να κατασκευαστεί ένα ελεγχόμενο μηχανικό χέρι το οποίο μπορεί να εκτελεί διάφορες εργασίες στη βιομηχανία. Το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 1961 από την εταιρία Unimation, Από τότε έχουν τεθεί σε λειτουργία χιλιάδες ρομπότ στην Αμερική, την Ιαπωνία και την Ευρώπη.

Τα βιομηχανικά ρομπότ δεν έχουν τη μορφή ή τη συμπεριφορά του ανθρώπου, αλλά μπορούν να εκτελούν εργασίες που κάνει ο άνθρωπος και ουσιαστικά αποτελούν μηχανές που δίνουν στη βιομηχανία μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με άλλες μορφές αυτοματισμού.

Σήμερα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές αποτελούν ουσιαστικό τμήμα του βιομηχανικού αυτοματισμού. Κατευθύνουν γραμμές παραγωγής και ελέγχουν συστήματα κατασκευής (π.χ. εργαλειομηχανές, συγκολλητές, κοπτικές διατάξεις Laser, κ.α.). Τα βιομηχανικά ρομπότ χρησιμοποιούν τους υπολογιστές ως βασική συνιστώσα ελέγχου, αλλά σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες που διαθέτουν, αποτελούν εν τέλει εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που μπορούν να εκτελούν ποικίλες εργασίες στα βιομηχανικά συστήματα, και γενικά να συμμετέχουν στον πλήρη αυτοματισμό των εργασιών.

Τα βιομηχανικά ρομπότ είναι ουσιώδη τμήματα στη σημερινή βιομηχανία και αναμένεται να είναι ακόμη περισσότερο στη μελλοντική. Η αυξημένη ζήτηση για τη χρήση ρομποτικών

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

συστημάτων πηγάζει από την ανάγκη για ευέλικτες, έξυπνες μηχανές οι οποίες θα μπορούν να πραγματοποιήσουν τα καθήκοντα τους με επαναλαμβανόμενο τρόπο, οικονομικά και ποιοτικά. Ο πιο ενεργός κλάδος της βιομηχανίας στην εφαρμογή ρομπότ είναι αυτός της αυτοκινητοβιομηχανίας ενώ αυξάνεται το ενδιαφέρον για την εφαρμογή ρομπότ και σε άλλους κλάδους όπως της ναυπηγικής.

Χάριν ανταγωνιστικότητας στη σύγχρονη βιομηχανία, οι συγκολλήσεις με το χέρι πρέπει να περιορίζονται σε μικρότερης διάρκειας εργασίες εξαιτίας του χρόνου που απαιτείται για προετοιμασία, της κούρασης του συγκολλητή, των προδιαγραφών ασφαλείας και τέλος, του κόστους. Επομένως, οι ρομποτικές συγκολλήσεις είναι καθοριστικές για την αυτοματοποίηση των συγκολλήσεων σε όλες τις βιομηχανίες. Υπολογίζεται ότι το 25% του συνόλου των βιομηχανικών ρομπότ προορίζεται για εργασίες συγκολλήσεων.

Η εισαγωγή των ρομπότ στις συγκολλήσεις έλαβε χώρα προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ραφές υψηλής ποιότητας σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Η πρώτη γενιά ρομποτικών συστημάτων για συγκόλληση ήταν ένα σύστημα δυο περασμάτων, όπου το πρώτο πέρασμα γινόταν για να μάθει το ρομπότ την γεωμετρία της ραφής και στο δεύτερο πέρασμα λάμβανε χώρα η συγκόλληση. Η δεύτερη γενιά ρομποτικών συστημάτων για συγκολλήσεις, ωστόσο, εκτελεί τη συγκόλληση με ένα πέρασμα, κατά το οποίο το ρομπότ αναγνωρίζει τη ραφή και τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιεί τη συγκόλληση. Η τρίτη γενιά συγκολλητικών συστημάτων όχι μόνο πραγματοποιεί την αναγνώριση της ραφής και της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει ταυτόχρονα με τη συγκόλληση, αλλά έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει και να προσαρμοστεί σε απότομες αλλαγές στη γεωμετρία της ραφής ενώ πραγματοποιεί εργασίες σε μη δομημένο περιβάλλον. Με την τρίτη γενιά ρομποτικών συστημάτων επιτεύχθηκε τρομερή ευελιξία ως προς το εύρος εφαρμογών των ρομπότ αλλά με κόστος. Απαιτείται υπολογίσιμος όγκος προγραμματισμού για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές, από υψηλά εκπαιδευμένους και ικανούς προγραμματιστές. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα και η ευελιξία των εφαρμογών είναι επιπρόσθετοι παράγοντες-κλειδιά για τη σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής, η οποία απαιτεί από τα συστήματα συγκόλλησης να υιοθετούν τους παράγοντες αυτούς, προσδίδοντας με αυτόν τον τρόπο την ευελιξία κίνησης του συστήματος στο χειριστή χωρίς την απαίτηση για επιπλέον γνώσεις και ικανότητες από αυτόν.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Η σύγχρονη βιομηχανία αντιμετωπίζει δυο βασικές προκλήσεις: υψηλότερη ποιότητα σε χαμηλότερες τιμές και την ανάγκη για αύξηση της παραγωγικότητας. Αυτές είναι οι απαιτήσεις προκειμένου να διατηρηθούν τα βιομηχανικά εργοστάσια παραγωγής στις ανεπτυγμένες χώρες, δεδομένου του ανταγωνισμού από χώρες όπου το κόστος εργασίας είναι χαμηλότερο. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων παραγωγής, είναι η ευελιξία της διαδικασίας παραγωγής, από τη στιγμή που οι εταιρείες πρέπει να προσαρμόζονται σε μια πολύ δυναμική αγορά όπου τα προϊόντα παρουσιάζουν πολύ σύντομους κύκλους ζωής λόγω των διεθνών τάσεων και ανταγωνισμού. Επομένως, οι εταιρείες παραγωγής πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της αγοράς αποδοτικά, διατηρώντας τα προϊόντα τους ανταγωνιστικά. Αυτό απαιτεί μια πολύ αποδοτική και ελεγχόμενη διαδικασία παραγωγής, στο επίκεντρο της οποίας βρίσκεται η αυτοματοποίηση μέσω υπολογιστών και κατάλληλων λογισμικών. Ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία ημιαυτόνομων, υψηλά αυτοματοποιημένων συστημάτων, τα οποία θα λειτουργούν απαιτώντας την ελάχιστη παρέμβαση από τον χειριστή.

Οι ρομποτικές συγκολλήσεις συνιστούν μια από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων. Στην πράξη, ένας τεράστιος αριθμός προϊόντων απαιτεί διεργασίες συγκολλήσεων στην διαδικασία συναρμολόγησης τους. Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον, οι βιομηχανικές ρομποτικές συγκολλήσεις δεν έχουν εξελιχθεί ιδιαίτερα και απέχουν αρκετά ακόμα από το να είναι μια τελειοποιημένη τεχνολογική διαδικασία, τουλάχιστον καθολικά. Η διαδικασία συγκόλλησης είναι πολύπλοκη, δύσκολη στην παραμετροποίηση και τον χειρισμό. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες από τις τεχνικές συγκόλλησης και οι επιδράσεις τους πάνω στις ραφές δεν είναι πλήρως κατανοητές και πραγματοποιούνται με βάση εμπειρικά μοντέλα τα οποία προκύπτουν μετά από πολλές επαναλήψεις και βελτιστοποίηση. Οι επιπτώσεις της διαδικασίας συγκόλλησης στις συγκολλημένες επιφάνειες δεν είναι πάντα πλήρως γνωστές και κατανοητές. Κατά την διαδικασία συγκόλλησης λαμβάνει χώρα η συγκέντρωση πολύ υψηλών θερμοκρασιών σε μικρές ζώνες, γεγονός που οδηγεί το υλικό στο να υποστεί εξαιρετικά υψηλές τοπικές θερμικές διαστολές και έντονους θερμικούς κύκλους, τουτέστιν πιθανές αλλαγές στις μηχανικές του ιδιότητες. Οι παραπάνω αλλαγές πρέπει να είναι πλήρως κατανοητές προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις της συγκόλλησης στο υλικό.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Η πλειονότητα των βιομηχανικών συγκολλήσεων ωφελείται από την εισαγωγή ρομποτικών συστημάτων, από τη στιγμή που τα σφάλματα τα οποία καταλογίζονται στον ανθρώπινο παράγοντα εξαλείφονται πλήρως. Αυτό οδηγεί σε οικονομικότερα προϊόντα από τη στιγμή που η παραγωγικότητα και η ποιότητα μπορούν να αυξηθούν ενώ ταυτόχρονα μειώνονται τα κόστη και το εργατικό δυναμικό.

2.2 Γενικά για τους Ρομποτικούς Βραχίονες^[2,3,4]

2.2.1 Περιγραφή

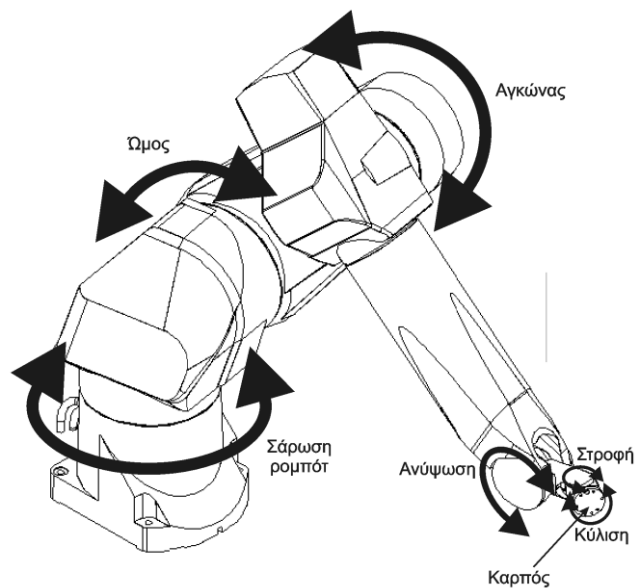
Η τυπική μορφή ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα φαίνεται στο σχήμα 2.1. Ένας ρομποτικός βραχίονας μιμείται το ανθρώπινο χέρι. Επειδή οι ρομποτικοί βραχίονες εκτελούν διάφορους χειρισμούς, ονομάζονται και μηχανικοί χειριστές ή απλά χειριστές (manipulators). Πολλοί επιστήμονες τα ονομάζουν και μηχανικά χέρια (mechanical arms).

Ένας ρομποτικός βραχίονας έχει αρθρώσεις, ανάλογες εκείνων του ανθρώπινου χεριού, δηλαδή «ώμο» (shoulder), «αγκώνα» (elbow) και «καρπό» (wrist). Ο καρπός μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τρεις άξονες :

- τον διαμήκη που έχει τη διεύθυνση των δακτύλων (η κίνηση ονομάζεται κύλιση: roll),
- τον εγκάρσιο που βρίσκεται στο επίπεδο της παλάμης και είναι κάθετος προς τα δάκτυλα (κίνηση ανύψωσης: pitch) και
- τον κάθετο άξονα που είναι κάθετος προς τους άλλους δύο, δηλαδή προς το επίπεδο της παλάμης (κίνηση στροφής: yaw).

Οι αρθρώσεις οδηγούνται από κινητήρες ή γενικότερα από επενεργητές (actuators) που μπορεί να είναι ηλεκτρικοί ή υδραυλικοί. Οι επενεργητές (κινητήρες, έμβολα, κ.ά.) δίνουν στο ρομπότ πολύ μεγαλύτερη ισχύ από αυτή που μπορεί να αναπτύξει ο άνθρωπος.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις



Σχήμα 2.1: Τυπική μορφή βιομηχανικού ρομπότ

Ο υπολογιστής αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα ενός σύγχρονου ρομπότ, καθώς περιέχει ένα πρόγραμμα ελέγχου (control program) και ένα πρόγραμμα εργασίας (task program). Το πρόγραμμα ελέγχου παρέχεται από τον κατασκευαστή και ρυθμίζει την κίνηση κάθε μιας από τις αρθρώσεις του ρομπότ. Το πρόγραμμα εργασίας ορίζεται από το χρήστη και καθορίζει τις κινήσεις που απαιτούνται για να εκτελεσθεί κάθε φορά η επιθυμητή εργασία. Ένα πρόγραμμα εργασίας (task program) μπορεί να δημιουργηθεί είτε οδηγώντας το ρομπότ να κινηθεί στις θέσεις που απαιτεί η συγκεκριμένη εργασία είτε χρησιμοποιώντας κατάλληλες γλώσσες προγραμματισμού για να περιγραφούν η τροχιά και οι κινήσεις. Όταν χρησιμοποιείται μια γλώσσα προγραμματισμού, το ρομπότ περιέχει έναν κατάλληλο επεξεργαστή που μεταφράζει το πρόγραμμα εργασίας και παρέχει τα δεδομένα που χρειάζεται το πρόγραμμα ελέγχου (control program) για να καθοδηγήσει το ρομπότ στις επιθυμητές κινήσεις. Το πρόγραμμα ελέγχου χρησιμοποιεί το πρόγραμμα εργασίας σαν είσοδο και συνεπώς για κάθε εργασία ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα διαφορετικό πρόγραμμα εργασίας.

2.2.2 Χρήση Ρομποτικών Βραχιόνων στην Βιομηχανία^[2,3,4]

Τα ρομπότ είναι ιδανικά για εργασίες επικίνδυνες και δύσκολες, όπως είναι λ.χ. η βαφή με ψεκασμό ή ο χειρισμός ραδιενεργών ουσιών. Επίσης τα ρομπότ μπορούν να εργάζονται σε ανιαρές και επαναλαμβανόμενες εργασίες, που είναι όμως απλές και συνήθως χρειάζονται ανειδίκευτους εργάτες. Εργασίες που απαιτούν την ανθρώπινη ευφυΐα και δημιουργικότητα δεν μπορούν να εκτελεστούν από τα σημερινά ρομπότ.

Γενικά, τα βιομηχανικά ρομπότ μπορούμε να πούμε ότι παρέχουν:

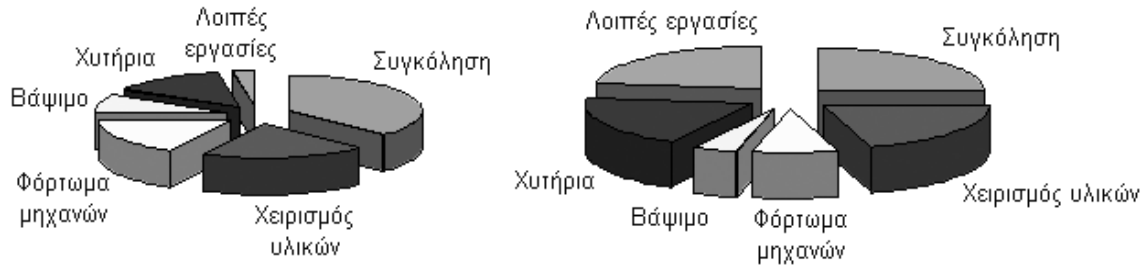
- Υποκατάστατο ανθρώπινου χεριού
- Ευελιξία (εύκολες μεταβολές προϊόντος, πολλά προϊόντα)
- Ευφυΐα και ειδικούς αισθητήρες (π.χ. όραση)
- Ταχύτητα και ακρίβεια
- Μεγαλύτερη δύναμη από τον άνθρωπο
- Γρήγορη ανάπτυξη – ολοκλήρωση
- Οικονομικές λύσεις για μικρή παραγωγή
- Σταθερή ποιότητα προϊόντος και παραγωγικότητα

Οι κυριότερες βιομηχανικές εφαρμογές των ρομπότ είναι οι ακόλουθες:

- Φόρτωση και εκφόρτωση μηχανών
- Σημειακή συγκόλληση
- Συγκόλληση τόξου
- Βάψιμο με ψεκασμό
- Συναρμολόγηση εξαρτημάτων
- Κατεργασίες (διάτρηση, κοπή, κ.ά.)
- Έγχυση μετάλλων σε καλούπια χύτευσης

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή χρήσης των ρομπότ για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές στην Αμερική και Ιαπωνία στη δεκαετία του 90. Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε μια κατηγορία εφαρμογών απαιτείται διαφορετική ακρίβεια θέσης και διαφορετικά χαρακτηριστικά του συστήματος ελέγχου. Έτσι λ.χ. ένα ρομπότ βαφής ή φόρτωσης-εκφόρτωσης δεν μπορεί να αντικαταστήσει ένα ρομπότ συναρμολόγησης, επειδή έχουν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας.

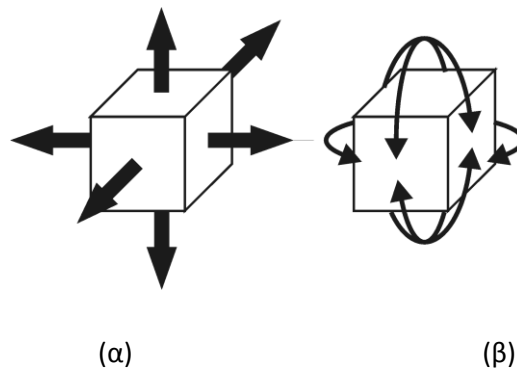
Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις



Σχήμα 2.2 Κατανομή απασχόλησης ρομπότ στη βιομηχανία (α) ΗΠΑ (β) Ιαπωνία

2.2.3 Αρθρώσεις^[3,4]

Στο χώρο των τριών διαστάσεων η σχετική κίνηση που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα συμπαγές σώμα, ως προς ένα άλλο που θεωρείται ακίνητο, χωρίζεται σε έξι (6) βασικές επιμέρους κινήσεις. Τρεις κινήσεις μεταφοράς στις διευθύνσεις των αξόνων του τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων, και τρεις κινήσεις περιστροφής γύρω από αυτούς.



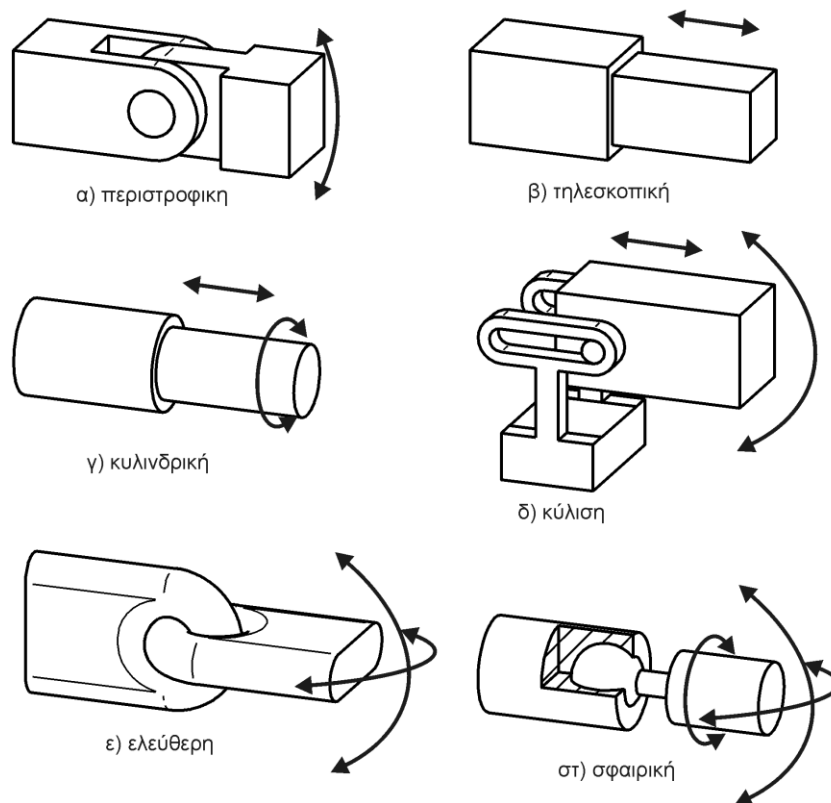
**Σχήμα 2.3: Οι 6 βαθμοί ελευθερίας ενός συμπαγούς σώματος
(α) μεταφοράς (β) περιστροφής**

Άρθρωση (joint) ονομάζεται η κατάλληλα διαμορφωμένη διάταξη που συνδέει δύο σώματα μεταξύ τους, περιορίζοντας έναν ή, συχνότερα, περισσότερους από τους μεταξύ τους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή εμποδίζει την πραγματοποίηση μιας ή περισσότερων από τις παραπάνω έξι (6) δυνατότητες κίνησης, μειώνοντας την ελευθερία κίνησης του ενός ως προς το άλλο σώμα.

2.2.3.1 Είδη Αρθρώσεων

Οι αρθρώσεις που συναντώνται συχνότερα σε μηχανισμούς είναι οι εξής:

1. Η **περιστροφική άρθρωση** παρέχει ένα βαθμό ελευθερίας, επιτρέποντας στο σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης. Επειδή είναι η συνηθέστερη μορφή σύνδεσης δύο σωμάτων, καλείται και απλά «άρθρωση»
2. Η **τηλεσκοπική άρθρωση** παρέχει και αυτή ένα βαθμό ελευθερίας, επιτρέποντας στο σώμα να μετατοπίζεται στη διεύθυνση ενός από τους άξονες, και αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.



Σχήμα 2.4: Τυπικές αρθρώσεις

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

3. Η **κυλινδρική άρθρωση** παρέχει δύο βαθμούς ελευθερίας, επιτρέποντας μία μεταφορική κίνηση στη διεύθυνση ενός άξονα και μία περιστροφική γύρω από τον άξονα αυτό.
4. Η **άρθρωση κύλισης** παρέχει και αυτή δύο βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή μία μεταφορική και μία περιστροφική κίνηση, άλλα σε αυτή την περίπτωση ο άξονας της περιστροφικής κίνησης είναι κάθετος στη διεύθυνση του άξονα της μεταφορικής κίνησης.
5. Η **ελεύθερη άρθρωση** παρέχει δύο βαθμούς ελευθερίας επιτρέποντας δύο περιστροφικές κινήσεις και εμποδίζοντας όλες τις υπόλοιπες
6. Η **σφαιρική άρθρωση** παρέχει τρεις βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις ελεύθερες και εμποδίζοντας όλες τις μεταφορικές.

Πρέπει να σημειωθεί πως δεν είναι πάντα εφικτό με μία μόνο άρθρωση να επιτύχουμε τις επιθυμητές κινήσεις, έτσι πολλές φορές καταφεύγουμε σε συνδυασμούς περισσότερων σωμάτων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις.

2.2.3.2 Αρθρώσεις σε Ρομποτικούς Βραχίονες

Οι ρομποτικοί βραχίονες, αν και είναι μηχανισμοί με πολύ μεγάλη ευελιξία, στην πλειοψηφία τους βασίζονται σε βραχίονες που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις **ενός βαθμού ελευθερίας**.

Έτσι οι ρομποτικοί βραχίονες, για να μπορέσουν να επιτύχουν την προσδοκώμενη ευελιξία, σχεδιάζονται με πολλές (συνήθως από τρεις έως έξι) αρθρώσεις, κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να επιτρέπουν στους επενεργητές να κινούνται εύκολα. Οι αρθρώσεις αυτές είναι:

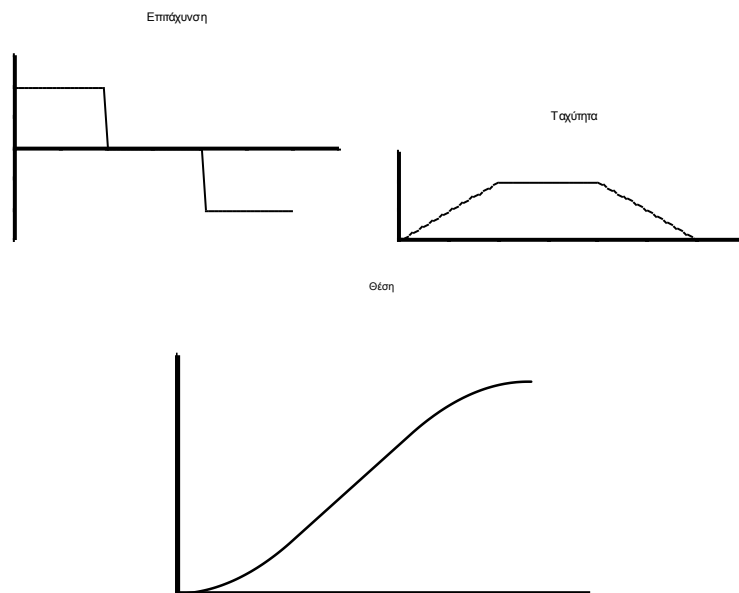
1. **Περιστροφική άρθρωση** (revolute joint), που επιτρέπει την ελεγχόμενη περιστροφή γύρω από τον άξονά της. Η περιστροφική άρθρωση κυρίως λόγω της μεγάλης ταχύτητάς της είναι η κοινότερη άρθρωση σε ρομποτικούς βραχίονες.
2. **Γραμμικές αρθρώσεις** που χωρίζονται σε: ολίσθησης (sliding) και πρισματικές (prismatic), οι οποίες επιτρέπουν την ελεγχόμενη μετατόπιση προς μία κατεύθυνση. Οι αρθρώσεις αυτές χαρακτηρίζονται για τη μεγάλη ακρίβειά τους, και χρησιμοποιούνται κυρίως σε διατάξεις συναρμολόγησης.

2.2.3.3 Ταχύτητες & Επιταχύνσεις Αρθρώσεων

Η κίνηση ενός ρομποτικού βραχίονα νοείται ως το άθροισμα των επιμέρους κινήσεων κάθε άρθρωσης με φυσικούς νόμους που διέπει κάθε μια από αυτές.

Κάθε άρθρωση χαρακτηρίζεται από μία **οριακή (μέγιστη) ταχύτητα** που μπορεί να αποκτήσει, και από μία **οριακή (μέγιστη) επιτάχυνση ή επιβράδυνση** αντίστοιχα που μπορεί να ασκήσει πάνω του ο αντίστοιχος επενεργητής.

Στην πλειονότητα των ρομποτικών αρθρώσεων η κίνηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5 η κίνηση που πραγματοποιεί κάθε άρθρωση είναι ομαλά επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη αντίστοιχα.

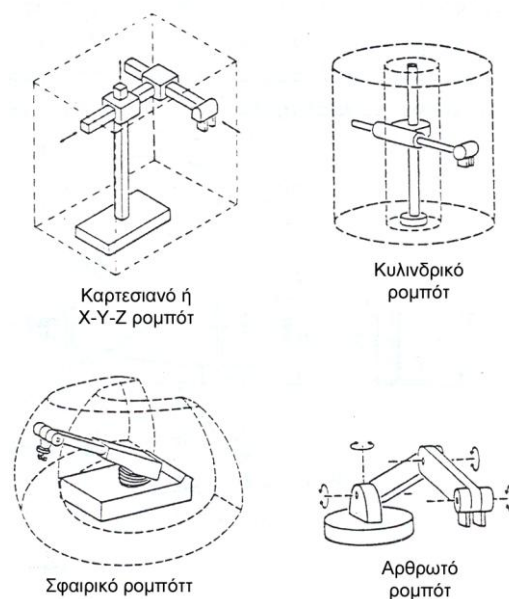


Σχήμα 2.5: Τυπικά διαγράμματα επιτάχυνσης, ταχύτητας και θέσεις μια άρθρωσης

2.2.4 Τύποι Ρομποτικών Βραχιόνων & Χώρος Εργασίας

Το μηχανικό τμήμα των ρομπότ αποτελείται από μια αλληλουχία μηχανικών συνδέσμων (links) και αρθρώσεων (joints) που ενώνουν τους συνδέσμους ανά δύο. Ένα τυπικό ρομπότ αποτελείται από το κυρίως τμήμα (δηλαδή τον βραχίονα) και από τον καρπό. Τόσο ο βραχίονας (arm), όσο και ο καρπός (wrist) έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας. Υπάρχουν ωστόσο και ρομπότ στα οποία ο καρπός έχει λιγότερους βαθμούς ελευθερίας.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις



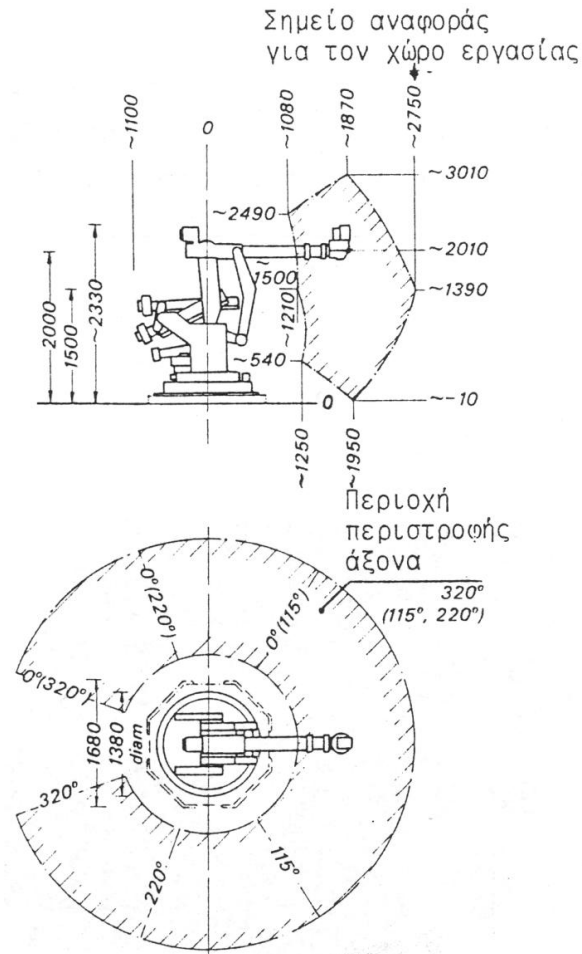
Σχήμα 2.6: Οι τέσσερις βασικοί δομικοί τύποι βιομηχανικού ρομπότ

Ως προς τη δομή τους, τα ρομπότ ταξινομούνται ανάλογα με το σύστημα συντεταγμένων του βραχίονα ως εξής (Σχ. 2.6):

- **Καρτεσιανά:** Τρεις γραμμικοί άξονες
- **Κυλινδρικά:** Δυο γραμμικοί και ένας στροφικός άξονας
- **Σφαιρικά:** Ένας γραμμικός και δυο στροφικοί άξονες
- **Αρθρωτά:** Τρεις στροφικοί άξονες

Οι γραμμικές αρθρώσεις μπορούν να είναι αρθρώσεις ολίσθησης (συμβολικά S: sliding), ή πρισματικές (συμβολικά P: prismatic). Μια στροφική άρθρωση συμβολίζεται με R (revolute joint). Έτσι ο τύπος ενός ρομπότ με βάση τα συστήματα συντεταγμένων των αρθρώσεών του συμβολίζεται με την αλληλουχία των συμβόλων S, P και R αρχίζοντας από τη βάση και προχωρώντας προς τον καρπό. Ένα σφαιρικό ρομπότ μπορεί να είναι της μορφής RRP, ενώ ένα αρθρωτό ρομπότ συμβολίζεται με RRR.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις



Σχήμα 2.7: Χώρος εργασίας του ρομπότ KUKA IR 601/60

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός βιομηχανικού ρομπότ είναι το μέγεθος και το σχήμα του χώρου εργασίας του (work volume ή reach envelope). Το σχήμα του χώρου εργασίας εξαρτάται από τα συστήματα συντεταγμένων των αξόνων του ρομπότ, ενώ το μέγεθος του χώρου εργασίας εξαρτάται από τις διαστάσεις του βραχίονα του ρομπότ. Παράδειγμα του χώρου εργασίας δίνεται στο σχήμα 2.7. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την προσθήκη του τελικού στοιχείου δράσης (εργαλείου) στον καρπό του ρομποτικού βραχίονα ο χώρος εργασίας μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του εργαλείου.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζονται οι βασικές χαρακτηριστικές ιδιότητες καθώς και οι σημαντικότερες εφαρμογές για κάθε τύπο ρομπότ.



Σχήμα 2.8: Χρήση των καρτεσιανών, κυλινδρικών, σφαιρικών και αρθρωτών ρομπότ στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές

2.2.4.1 Ρομπότ Καρτεσιανών Συντεταγμένων

Το κυρίως σώμα ενός ρομπότ του τύπου αυτού αποτελείται από τρεις γραμμικούς άξονες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η δομή μπορεί να είναι όμοια με των εργαλειομηχανών (βάση, τραπέζι εργασίας, κ.ά.) αλλά τότε ο λόγος μεταξύ του χώρου εργασίας του ρομπότ και του χώρου που καταλαμβάνει είναι μικρότερος. Γενικά, τα χαρακτηριστικά (ηλεκτρονικό υλικό; hardware, πρόγραμμα ελέγχου κλπ) ενός καρτεσιανού ρομπότ είναι όμοια με εκείνα των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC).

Έτσι η διακριτική ικανότητα και η επαναληψιμότητα ενός καρτεσιανού ρομπότ μπορεί να είναι πολύ καλή, όπως και στις εργαλειομηχανές. Σε πολλά καρτεσιανά ρομπότ η βάση δεν είναι σταθερή αλλά μπορεί να κινείται μέσα σε ορισμένα όρια. Ο καρπός ενός καρτεσιανού ρομπότ μπορεί να ακολουθήσει μια ευθύγραμμη τροχιά, αν κάθε άξονας κινηθεί με σταθερή ταχύτητα. Άλλο πλεονέκτημα των καρτεσιανών ρομπότ είναι η σταθερότητα της διακριτικής ικανότητας θέσης. Αυτό δεν συμβαίνει στα μη καρτεσιανά ρομπότ.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα καρτεσιανά ρομπότ δεν είναι προτιμητέα στη βιομηχανία. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν διαθέτουν μηχανική ευελιξία (δεν μπορούν λ.χ. να φθάσουν αντικείμενα που βρίσκονται στο πάτωμα ή δεν είναι ορατά από τη βάση τους). Επίσης η ταχύτητα λειτουργίας στο οριζόντιο επίπεδο είναι συνήθως μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα των ρομπότ που έχουν περιστρεφόμενη Βάση. Παραδείγματα καρτεσιανών ρομπότ είναι τα ρομπότ DEA Pragma, Renault Acma Cribier και Mitsubishi Robitus (για συγκολλήσεις σημείων) και το ρομπότ Shin Meīwa για συγκολλήσεις τόξου.

2.2.4.2 Ρομπότ Κυλινδρικών Συντεταγμένων

Το κυρίως σώμα ενός ρομπότ αυτού του τύπου αποτελείται από έναν οριζόντιο βραχίονα στερεωμένο σε μια κατακόρυφη κολώνα. Η κολώνα είναι με τη σειρά της στερεωμένη πάνω σε μια περιστρεφόμενη βάση (σχήμα 2.6). Ο οριζόντιος βραχίονας κινείται προς τα εμπρός και προς τα πίσω κατά τη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του και επίσης ανεβοκατεβαίνει στη κολώνα. Κολώνα και βραχίονας στρέφονται ως ένα σώμα πάνω στη βάση γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Η διακριτική ικανότητα ενός κυλινδρικού ρομπότ δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την απόσταση r μεταξύ της κολώνας και του εργαλείου κατά μήκος του οριζόντιου βραχίονα.

Η διακριτική ικανότητα θέσης του κυλινδρικού ρομπότ γύρω από τον άξονα είναι κατά 1-2 τάξεις μεγέθους χειρότερη από την αντίστοιχη των καρτεσιανών ρομπότ ή των εργαλειομηχανών. Αυτό είναι ένα από τα μειονεκτήματα των κυλινδρικών απέναντι στα καρτεσιανά ρομπότ. Τα κυλινδρικά όμως ρομπότ λόγω του περιστρεφόμενου άξονα προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα στο άκρο του βραχίονα. Βέβαια η ταχύτητα αυτή περιορίζεται από το φορτίο στο εργαλείο του ρομπότ και από τη θέση του βραχίονα. Επίσης η δυναμική συμπεριφορά των ρομπότ που έχουν στρεφόμενους άξονες εξαρτάται από τη ροπή αδρανείας του όλου συστήματος ως προς τη βάση, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το βάρος που σηκώνει το ρομπότ και από την απόσταση του βάρους αυτού από τον άξονα της βάσης. Επειδή δε η ενεργός αυτή ροπή αδρανείας μεταβάλλεται συναρτήσεως του χρόνου και της θέσης, η δυναμική συμπεριφορά του κυλινδρικού (σφαιρικού και αρθρωτού) ρομπότ είναι χειρότερη από εκείνη του καρτεσιανού ρομπότ που δεν έχει στρεφόμενο άξονα.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

2.2.4.3 Ρομπότ Σφαιρικών (Πολικών) Συντεταγμένων

Τα ρομπότ του τύπου αυτού αποτελούνται από μια στρεφόμενη βάση, ένα ανυψούμενο στέλεχος και ένα τηλεσκοπικό βραχίονα που κινείται προς τα μέσα και προς τα έξω όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.

Το μέγεθος της περιστροφής μετράται από ψηφιακούς κωδικοποιητές που είναι στερεωμένοι στους άξονες. Το βασικό μειονέκτημα των σφαιρικών ρομπότ είναι και πάλι η μικρή διακριτική ικανότητα θέσης των δυο στροφικών αξόνων που μεταβάλλεται με το μήκος του βραχίονα. Τα σφαιρικά ρομπότ, εκτός από το πλεονέκτημα της αυξημένης ταχύτητας κίνησης των στροφικών αξόνων, έχουν και το πλεονέκτημα της αυξημένης ευελιξίας σε σχέση τόσο με τα καρτεσιανά όσο και με τα κυλινδρικά ρομπότ.

2.2.4.4 Αρθρωτό Ρομπότ

Τα αρθρωτά ρομπότ αποτελούνται από τρία σταθερά μέλη (συνδέσμους) που ενώνονται με στροφικές αρθρώσεις και είναι τοποθετημένα πάνω σε μια στρεφόμενη βάση (σχήμα 2.6). Η κινηματική διάταξη μοιάζει με εκείνη του ανθρώπινου χεριού. Το εργαλείο (αρπάγη) είναι ανάλογο της παλάμης και προσαρμόζεται στον πήχη (Forearm) μέσω του καρπού. Ο "αγκώνας" συνδέει τον πήχη με τον άνω βραχίονα και ο "ώμος" συνδέει τον άνω βραχίονα με τη βάση. Πολλές φορές στην άρθρωση του ώμου διατίθεται και μια περιστροφική κίνηση σε οριζόντιο επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.

Επειδή το αρθρωτό ρομπότ έχει και τους τρεις άξονες στροφικούς, η διακριτική ικανότητα θέσης εξαρτάται άμεσα από τη θέση του βραχίονα. Η ολική ακρίβεια ενός αρθρωτού ρομπότ είναι μικρή γιατί τα σφάλματα των αρθρώσεων συσσωρεύονται στο άκρο του βραχίονα δηλαδή στη θέση του καρπού. Τα πλεονεκτήματα των αρθρωτών ρομπότ είναι ότι έχουν την πιο μεγάλη μηχανική ευελιξία και μπορούν να κινηθούν με πολύ μεγάλη ταχύτητα.

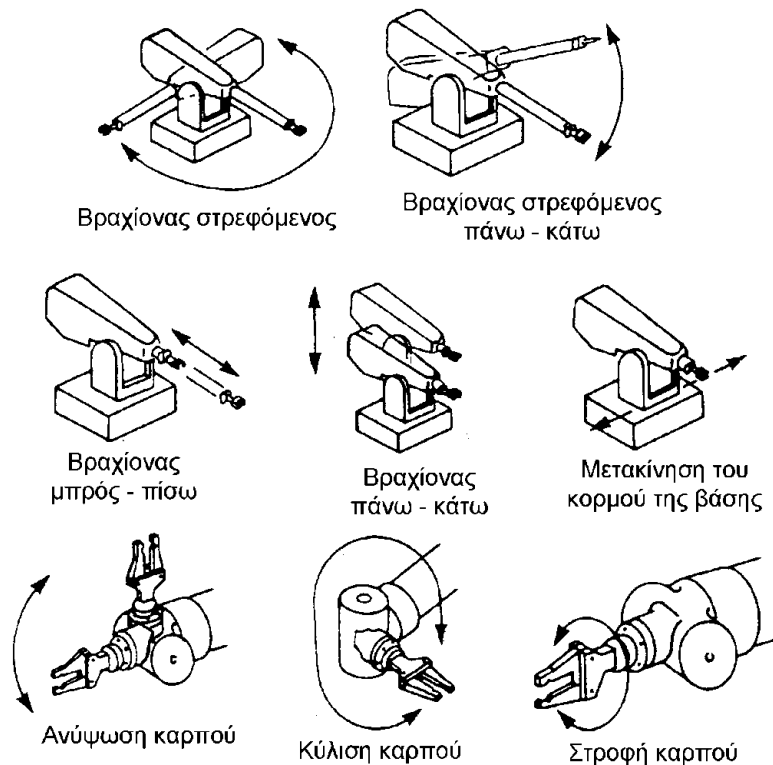
2.2.4.5 Κινήσεις του Καρπού & του Τελικού Στοιχείου Δράσης

Το τελικό στοιχείο δράσης (εργαλείο) συνδέεται με το κυρίως σώμα, δηλαδή με τον βραχίονα του ρομπότ μέσω του καρπού. Στον καρπό η κίνηση **κύλισης** (roll) αντιστοιχεί σε περιστροφή πάνω σε επίπεδο κάθετο προς το τέλος του βραχίονα, η κίνηση **ανύψωσης** (pitch, bend) αντιστοιχεί σε περιστροφή πάνω σε ένα κάθετο επίπεδο και η κίνηση **στροφής**

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

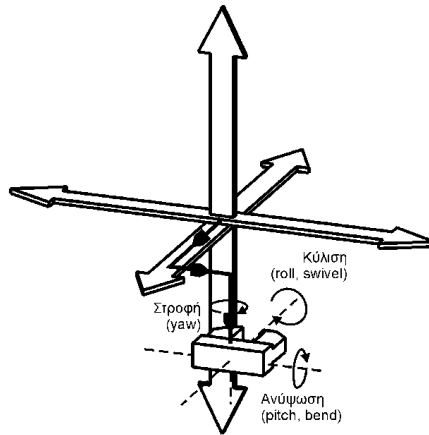
(yaw) αντιστοιχεί σε περιστροφή πάνω σε οριζόντιο επίπεδο. Οι βασικές κινήσεις του βραχίονα και του καρπού των ρομπότ εικονίζονται στο σχήμα 2.9.

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται ότι για να φθάσει ένα ρομπότ σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου με συγκεκριμένο προσανατολισμό του άκρου του καρπού χρειάζονται έξι βαθμοί ελευθερίας (τρεις για τον βραχίονα και τρεις στροφικές για τον καρπό). Αν και οι περισσότεροι ρομποτικοί καρποί έχουν τρεις στροφικούς άξονες, υπάρχουν εφαρμογές που χρειάζονται μόνο δυο άξονες του καρπού. Για παράδειγμα, επειδή το πιστόλι συγκόλλησης είναι ένα συμμετρικό εργαλείο, οι περισσότερες εργασίες συγκόλλησης τόξου χρειάζονται καρπό με δυο βαθμούς ελευθερίας. Ο καρπός πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο ελαφρύς, γιατί έτσι αυξάνεται το μέγιστο επιτρεπτό βάρος που μπορεί να σηκώσει το ρομπότ και μειώνεται η ροπή αδρανείας πράγμα που βελτιώνει την όλη δυναμική συμπεριφορά του ρομπότ. Για να μειωθεί το βάρος του καρπού, οι κινητήρες που οδηγούν τον καρπό τοποθετούνται στη βάση του ρομπότ και η κίνηση μεταδίδεται με αλυσίδες ή στερεούς συνδέσμους.



Σχήμα 2.9: Βασικές κινήσεις ρομποτικού βραχίονα και καρπού

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

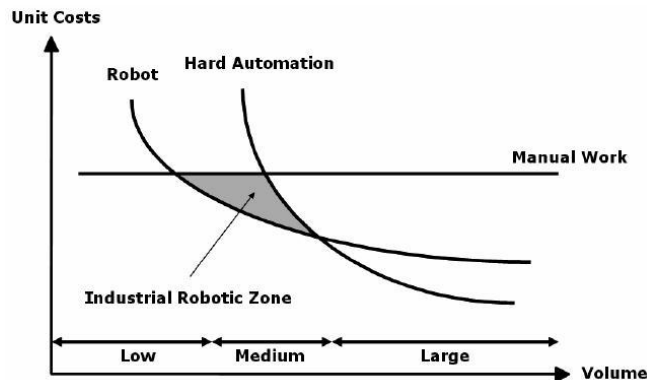


Σχήμα 2.10: Οι έξι κινήσεις που χρειάζονται για επιθυμητό προσανατολισμό του καρπού σε επιθυμητό σημείο του χώρου

Γενικά, τα τελικά στοιχεία δράσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: αρπάγες και εργαλεία για εφαρμογές κατεργασιών (πιστόλια συγκόλλησης, πιστόλια χρωματισμού, τρυπάνια, λειαντές, κ.ά.) Οι αρπάγες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χειρισμού υλικών, φορτώματος μηχανών και συναρμολόγησης. Σε πολλές αρπάγες ο μηχανισμός ενεργοποιείται με ένα πνευματικό έμβολο που κινεί τα δάκτυλα της αρπάγης. Σε εφαρμογές χειρισμού υάλινων προϊόντων ή ανταλλακτικών με πολύ λείες επιφάνειες χρησιμοποιούνται αρπάγες κενού.

2.3 Ρομποτική στη Σύγχρονη Βιομηχανία^[2,3,4]

Εξ' αιτίας του πολύ ισχυρού ανταγωνισμού και των δυναμικών αλλαγών στις διεθνείς αγορές, οι πλέον συμβατές συνθήκες παραγωγής είναι εκείνες με μικρά ή μεσαίου μεγέθους σύνολα παραγωγής (Διάγραμμα 2.11).



Διάγραμμα 2.11: Ζώνη εφαρμογής ρομποτικών συστημάτων στη βιομηχανία.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Υπό αυτές τις συνθήκες, τα ρομποτικά συστήματα παραγωγής παρουσιάζουν τη βέλτιστη απόδοση όσον αφορά το 'κόστος ανά μονάδα' συγκριτικά με την ανθρώπινη εργασία ή άλλα, αυτοματοποιημένα συστήματα. Οι βιομηχανικές ρομποτικές συγκολλήσεις είναι με διαφορά η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της ρομποτικής παγκοσμίως. Ο αριθμός των προϊόντων για την δημιουργία των οποίων απαιτούνται εργασίες συγκόλλησης είναι πολύ μεγάλος. Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι πιθανότατα το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομηχανικού κλάδου στον οποίο χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι MIG/MAG με την χρήση ρομποτικών βραχιόνων. Ωστόσο, ένας αυξανόμενος αριθμός μικρότερων επιχειρήσεων, είναι προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένους πελάτες και παράγουν προϊόντα ως επί το πλείστον για τους πελάτες αυτούς. Αυτές ακριβώς οι επιχειρήσεις έχουν ανάγκη ταχύτατες και αυτοματοποιημένες διαδικασίες συγκόλλησης, προκειμένου να ανταποκρίνονται εγκαίρως στις ανάγκες των πελατών τους και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της αγοράς για υψηλή ποιότητα.

Παρά την αυξανόμενη ανάγκη για ταχύτερη και ποιοτικότερη παραγωγή, ο κλάδος των βιομηχανικών ρομποτικών συγκολλήσεων έχει παρουσιάσει μικρή εξέλιξη και οι ρομποτικές συγκολλήσεις απέχουν παρασάγγας από το να είναι μια επιλυμένη, κατανοητή και εύκολα εφαρμόσιμη διαδικασία, τουλάχιστον ευρέως. Η διαδικασία συγκόλλησης είναι πολύπλοκη, δύσκολη στην παραμετροποίηση, τον έλεγχο και τον χειρισμό. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες τεχνικές συγκόλλησης δεν είναι πλήρως κατανοητές, (κυρίως οι επιδράσεις τους στις ραφές συγκόλλησης), και εφαρμόζονται με βάση εμπειρικά μοντέλα. Οι επιπτώσεις της διαδικασίας συγκόλλησης στις συγκολλημένες επιφάνειες δεν είναι πλήρως γνωστές. Κατά την συγκόλληση, εφαρμόζονται εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες σε πολύ περιορισμένη περιοχή των μετάλλων με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλές τάσεις λόγω θερμικής συστολής και έντονοι θερμικοί κύκλοι. Τα παραπάνω επιφέρουν αλλαγές στην μορφή των υλικών, και μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες τους. Οι αλλαγές αυτές που επιφέρουν οι συγκολλήσεις στα υλικά πρέπει να γίνουν περισσότερο κατανοητές προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις σε μελλοντικές εφαρμογές.

Η διαδικασία εφαρμογής ρομποτικών συστημάτων ικανών να πραγματοποιήσουν εργασίες συγκόλλησης πέρασε από διάφορα στάδια έρευνας και ανάπτυξης (R&D). Αυτό διότι η σύγχρονη βιομηχανία παράγει κατά κόρον προϊόντα τα οποία απαιτούν συγκολλήσεις

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

προκειμένου να συναρμολογηθούν. Αν το ποσοστό των συνδέσεων που απαιτούν συγκόλληση σε κάποιο προϊόν είναι μεγάλο, τότε συμφέρει ιδιαίτερα η αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Η αυτοματοποίηση οδηγεί σε φθηνότερα προϊόντα εφόσον αυξάνεται η παραγωγικότητα και η ποιότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος παραγωγής και το απαιτούμενο εργατικό δυναμικό. Ωστόσο, όταν ένα ρομποτικό σύστημα εισάγεται σε μια εγκατάσταση συγκόλλησης, αυξάνονται ιδιαίτερα τα προβλήματα και η πολυπλοκότητα της διαδικασίας. Οι ρομποτικές εγκαταστάσεις είναι δύσκολες στον χειρισμό και στον προγραμματισμό, απαιτούν ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό, έχουν περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά στην τοποθεσία εφαρμογής τους και είναι άρρηκτα συνυφασμένες με συγκεκριμένα προγραμματιστικά περιβάλλοντα.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης αποτελεί έναν ιδιαίτερο κλάδο έρευνας που συνδυάζει τα επί μέρους επιστημονικά πεδία της ρομποτικής, της τεχνολογίας αισθητήρων, των συστημάτων ελέγχου και της τεχνητής νοημοσύνης. Αν και υπάρχουν διάφορες τεχνικές συγκολλήσεων κάθε μια από τις οποίες είναι κατάλληλη για συγκεκριμένη εφαρμογή, σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές για συγκολλήσεις μετάλλων στη σύγχρονη βιομηχανία χρησιμοποιείται η συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου. Οι δυο τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι η GTAW (Gas Tungsten Arc Welding, 1.3.2) και η GMAW (Gas Metal Arc Welding, 1.3.3). Εξαιτίας των διάφορων παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης (τάση/ένταση ρεύματος, ταχύτητα συγκόλλησης, προέκταση ηλεκτροδίου, παροχή προστατευτικού αερίου, διάμετρος ηλεκτροδίου κλπ) εύκολα συμπεραίνει κανείς πως στις συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με το χέρι, η ποιότητα και η μορφή της τελικής ραφής εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από την ικανότητα και την δεξιότητα του συγκολλητή ο οποίος πρέπει:

1. Να επιλέξει τον τύπο του προστατευτικού αερίου, τον τύπο και την διάμετρο του ηλεκτροδίου καθώς και τις αρχικές τιμές για την ένταση και την τάση του ρεύματος.
2. Να προσαρμόζει συνεχώς τις μεταβλητές της διαδικασίας είτε κοιτώντας την λίμνη συγκόλλησης είτε ακούγοντας τον ήχο που παράγει το ηλεκτρικό τόξο, ούτως ώστε η ποιότητα της ραφής να είναι η βέλτιστη.
3. Να διατηρεί τον σωστό προσανατολισμό του ακροφύσιου με σταθερότητα και ακρίβεια, προϋπόθεση απαραίτητη για μια σωστή και ποιοτική συγκόλληση.

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

Από τα ανωτέρω είναι προφανές πως σκοπός της αυτοματοποίησης της διαδικασίας συγκόλλησης είναι να αντικαταστήσει τον έμπειρο συγκολλητή με ένα ρομποτικό σύστημα το οποίο θα μπορεί να προσανατολίζει το ακροφύσιο συγκόλλησης και θα ελέγχει τις παραμέτρους συγκόλλησης εξίσου καλά, αν όχι καλύτερα. Προκειμένου να γίνει αυτό, απαιτείται να πληρούνται τρεις βασικές προϋποθέσεις. Κατ'αρχάς μεγάλη διαθεσιμότητα βάσεων δεδομένων, στις οποίες καταχωρούνται οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για κάθε εφαρμογή, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές, παρόμοιες εργασίες. Επιπρόσθετα, απαιτείται να υπάρχει η δυνατότητα για παρακολούθηση της διαδικασίας συγκόλλησης ενόσω αυτή πραγματοποιείται, ούτως ώστε να μπορούν να λάβουν χώρα τυχόν απαραίτητες διορθώσεις σε κάποια παράμετρο. Τέλος, είναι αναγκαία η δυνατότητα ελέγχου της κίνησης του ακροφύσιου συγκόλλησης με ακρίβεια.

Ανάλογα με την τεχνική (GMAW,GTAW, κ.ά.) και τον τύπο της συγκόλλησης (συμβολής, αυχενική, γωνιακή, σημειακή, κλπ) υπάρχουν αντίστοιχες βάσεις δεδομένων, οι οποίες παρέχουν τιμές για τις βασικές παραμέτρους με βάση προηγούμενες εργασίες. Μια τέτοια βάση δεδομένων, η οποία αφορά συγκολλήσεις MIG/MAG είναι η βάση του *The Welding Institute-UK*. Σε αυτές τις βάσεις δεδομένων, τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης είναι συνήθως ο τύπος συγκόλλησης (συμβολής ή αυχενική), η τοποθεσία συγκόλλησης (επίπεδη, μετωπική, κατακόρυφη, οροφιαία, κλπ), η διάμετρος του ηλεκτροδίου και το πάχος των ελασμάτων προς συγκόλληση. Τα δεδομένα εξόδου, είναι συνήθως οι παράμετροι συγκόλλησης (ένταση και τάση ρεύματος, ταχύτητα συγκόλλησης και αριθμός περασμάτων-στρώσεων). Με την χρήση τέτοιων βάσεων δεδομένων μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών, επιτυγχάνεται η αυτόματη επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης.

3.4 Συμπεράσματα

Η εξέλιξη των ρομποτικών βραχιόνων από την στιγμή της εμφάνισης τους έως τώρα είναι αλματώδης και συνεχίζει διαρκώς. Οι ρομποτικοί βραχίονες είναι τεχνολογικά εξελιγμένα μηχανήματα που παρέχουν μεγάλη ευελιξία και ακρίβεια στην προσπάθεια αυτοματισμού της παραγωγικής διαδικασίας. Τα σύγχρονα συστήματα παραγωγής βασίζονται όλο και περισσότερο σε αυτοματοποιημένο εξοπλισμό. Αυτό αποτελεί μια καθαρά οικονομική επιλογή, η οποία βασίζεται στους παρακάτω λόγους:

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

1. Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να πραγματοποιήσουν βιομηχανικές εργασίες αντικαθιστώντας σε αρκετές περιπτώσεις τον άνθρωπο. Η ποιότητα της εργασίας είναι, στην χειρότερη περίπτωση, συγκρίσιμη, ενώ οι εργασίες εκτελούνται για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.
2. Οι ρομποτικοί βραχίονες παρουσιάζουν τη βέλτιστη αναλογία μεταξύ 'κόστους παραγωγής' και 'όγκου παραγωγής', ειδικά στην περίπτωση μικρομεσαίων όγκων παραγωγής. Στην πραγματικότητα, εξαιτίας της κατάστασης της αγοράς (πολύ υψηλός ανταγωνισμός, μικροί σε διάρκεια κύκλοι ζωής προϊόντων, αυξανόμενη ζήτηση για υψηλή ποιότητα σε χαμηλότερες τιμές, κλπ), οι εταιρείες λειτουργούν με βάση τις παραγγελίες και δεν διακινδυνεύουν με το να παράγουν μεγάλες ποσότητες προϊόντων οι οποίες δύναται να μην πουληθούν. Με αυτό τον τρόπο η παραγωγή διατηρείται σε μικρομεσαία επίπεδα στα οποία η χρήση ρομποτικών βραχιόνων ενδείκνυται.
3. Η ευελιξία που παρέχουν ως προς τον τρόπο εφαρμογής και αξιοποίησης τους κυρίως μέσω του προγραμματισμού τους, καθιστά τους ρομποτικούς βραχίονες εξαιρετικά χρήσιμους σε γραμμές παραγωγής όπου απαιτείται η πραγματοποίηση διαφορετικών εργασιών. Συνεπώς, οι ρομποτικοί βραχίονες είναι κατάλληλοι για χρήση σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου απαιτείται συχνά αλλαγή εργασιών, θεμελιώδης προϋπόθεση για την προσαρμογή στις απότομες διακυμάνσεις της αγοράς και στην εισαγωγή νέων προϊόντων.

Από την στιγμή που οι περισσότερες τεχνικές συγκόλλησης απαιτούν προσεκτικό έλεγχο στην κίνηση και στην σταθερότητα της διαδικασίας, οι ρομποτικοί βραχίονες αποτελούν ιδανική λύση για την πλειονότητα των εργασιών συγκόλλησης. Οι δυσκολίες που εμφανίζονται σχετίζονται με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, κυρίως με το κομμάτι του προγραμματισμού, καθώς απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για να αναλάβει τον προγραμματισμό και την συντήρηση του ρομπότ. Το ανωτέρω δύναται να αποτελέσει τροχοπέδη, εμποδίζοντας τις εταιρείες από το να εκμεταλλευτούν πλήρως τις δυνατότητες που παρέχουν οι ρομποτικοί βραχίονες.

Εν κατακλείδι, η πλειονότητα των βιομηχανικών εφαρμογών συγκολλήσεων επωφελείται από την εισαγωγή ρομποτικών συστημάτων, καθώς τα περισσότερα σφάλματα που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα εξαλείφονται, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται και

Κεφάλαιο 2^ο: Η Ρομποτική στις Συγκολλήσεις

σχεδόν μηδενίζεται η ανάγκη για παρουσία εργατών σε ένα άκρως ανθυγιεινό και επικίνδυνο περιβάλλον όπως αυτό των συγκολλήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

1. Β.Ι Παπάζογλου, Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων (Σημειώσεις), Αθήνα 1994.
2. Welding Robots Applications in Shipbuilding industry: Offline programming, virtual reality simulation and open architecture.
3. J.Roberto Pires, Altino Loureiro, Gunnar Bolmsjö, Welding Robots, Technology, System Issues and Applications.
4. Larry Ross, Stephen Fardo, James Masterson and Robert Towers, Robotics: Theory and Industrial Application, 2nd Edition.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

«Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική»

3.1 Εισαγωγή

Η ναυπηγική βιομηχανία αναπτύσσεται διαρκώς εισάγοντας την ρομποτική στα πεδία εργασίας της προκειμένου να επιφέρει αυξήσεις στην παραγωγικότητα και βελτιώσεις στις συνθήκες εργασίας των εργαζομένων στα ναυπηγεία. Ωστόσο, παρά την σταδιακή προσθήκη ρομποτικών συστημάτων στα ναυπηγεία, οι ναυτιλιακές εταιρείες αντιμετωπίζουν ακόμη προβλήματα που αφορούν την υγεία των εργατών τους, τον αυξημένο αριθμό εργατικού δυναμικού μεγάλης ηλικίας, την έλλειψη επιδέξιων εργατών καθώς και ζητήματα προστασίας του περιβάλλοντος. Επομένως, η ανάγκη για προσθήκη προηγμένων ρομποτικών συστημάτων γίνεται επιτακτική προκειμένου να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα και διαφαίνεται το πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η σωστή εφαρμογή των συστημάτων αυτών προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι παραγωγής του ναυπηγείου.

Η διαδικασία ναυπήγησης ενός πλοίου χωρίζεται στις επί μέρους διαδικασίες σχεδιασμού, κοπής, συγκόλλησης, συναρμολόγησης, λείανσης, και βαφής. Από αυτές, η διαδικασία της συγκόλλησης είναι η πιο κρίσιμη, ακριβή και χρονοβόρα. Η εφαρμογή ρομποτικών συγκολλήσεων επιφέρει μεγάλη αύξηση στην παραγωγικότητα της διαδικασίας συγκόλλησης της γάστρας του πλοίου καθώς εξαλείφει τον παράγοντα της κόπωσης των εργατών και επιτυγχάνει εκπληκτικά ποσοστά όσον αφορά στον χρόνο συγκόλλησης (χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιούνται συγκολλήσεις) ως προς τον συνολικό χρόνο εργασίας. Επιπρόσθετα, η ποιότητα των ραφών των ρομποτικών συγκολλήσεων είναι άριστη και ομοιογενής σε κάθε σημείο της γάστρας σε αντίθεση με τις ανομοιογενείς και όχι πάντα καλής ποιότητας ραφές που πραγματοποιούνται από εργάτες-συγκολλητές. Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα από την εισαγωγή ρομποτικών συγκολλήσεων στα ναυπηγεία, είναι η ραγδαία μείωση προβλημάτων υγείας των εργατών που εργάζονται στον τομέα των συγκολλήσεων.

3.2 On-line Διδασκαλία και Off-line Προγραμματισμός^[1,2,3,4,5,6]

Ο χειρισμός των βιομηχανικών ρομπότ στην ναυπηγική βιομηχανία γίνεται είτε μέσω on-line 'διδασκαλίας' (on-line teaching) είτε μέσω προγραμματισμού off-line (off-line programming).

Η διδασκαλία on-line (σχήμα 3.1) είναι, εξ ορισμού, μια τεχνική κατά την οποία δημιουργείται ένα πρόγραμμα για το ρομπότ χρησιμοποιώντας το ίδιο το ρομποτικό σύστημα (προγραμματισμός μέσω του teach pendant) ενώ ο προγραμματισμός off-line είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί προσομοιώσεις οι οποίες έχουν συσταθεί εκ των προτέρων. Αναλυτικότερα, ο off-line προγραμματισμός (σχήμα 3.2) περιλαμβάνει προσομοίωση, προγραμματισμό και άλλες λειτουργίες όπως παρακολούθηση και χρονοδρομολόγηση, οι οποίες επιτρέπουν στον χρήστη να χειρίζεται το ρομποτικό σύστημα με ευκολία. Ο προγραμματισμός off-line είναι εξαιρετικά ουσιαστικός για την εφαρμογή ρομποτικών συστημάτων στα ναυπηγεία καθώς μειώνει δραστικά το χρόνο που απαιτείται για την προετοιμασία και τη σύνθεση του προγράμματος συγκόλλησης, τουτέστιν μειώνει τον χρόνο παραγωγής.

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική



Σχήμα 3.1: On-line διδασκαλία του ρομπότ συγκόλλησης σε χώρο εργασίας



Σχήμα 3.2: Off-line προγραμματισμός

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

Η on-line διδασκαλία (σχήμα 3.1) είναι κατάλληλη για εργασίες κατά τις οποίες το ρομπότ απαιτείται να επαναλαμβάνει την ίδια μονότονη κίνηση χρησιμοποιώντας το ίδιο πρόγραμμα το οποίο έχει γραφτεί για ένα συγκεκριμένο τύπο τεμαχίων, συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων. Σε βιομηχανίες όμως όπως η ναυπηγική, όπου το σχήμα και το μέγεθος κάθε τεμαχίου εργασίας μπορεί να διαφέρει, η διδασκαλία on-line προκαλεί σοβαρά προβλήματα. Αφενός διότι μειώνει σε τεράστιο βαθμό την παραγωγικότητα της διαδικασίας σταματώντας τα ρομπότ και επαναπρογραμματίζοντάς τα κάθε φορά που αλλάζει το προς συγκόλληση τεμάχιο, και αφετέρου κυρίως διότι δεν παρέχει την δυνατότητα για αναθεώρηση σφαλμάτων κατά την διάρκεια εργασίας που μπορεί να έχουν προκληθεί από τον ίδιο τον προγραμματισμό. Ως εκ τούτου, ο πιο κερδοφόρος τρόπος κατασκευής ενός προγράμματος εργασίας είναι μέσω προγραμματισμού off-line, θέτοντας σε εφαρμογή μόνο προγράμματα και υποπρογράμματα που επιβεβαιωμένα είναι κατάλληλα για την συγκεκριμένη εργασία.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα από την χρήση προγραμματισμού off-line είναι:

1. Αποτελεσματικός προγραμματισμός εντολών προς το ρομπότ με τη βοήθεια προγραμμάτων διόρθωσης λαθών.
2. Εύκολη επαλήθευση της εγκυρότητας του προγράμματος μέσω προσομοίωσης και οπτικής απεικόνισης της διαδικασίας σε τρισδιάστατο μοντέλο στον υπολογιστή.
3. Οργανωμένη αρχειοθέτηση προσομοιωτικών μοντέλων και των αντίστοιχων προγραμμάτων τους για ένα πολύ μεγάλο αριθμό εργασιών.
4. Επαναχρησιμοποίηση ήδη υπάρχοντων προγραμμάτων και εύκολη προσαρμογή τους σε παρεμφερή αντικείμενα.
5. Μείωση του κόστους παραγωγής καθώς ο προγραμματισμός πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της παραγωγής και δεν αποτελεί ξεχωριστό στάδιο.

Οι βιομηχανίες παραγωγής ρομποτικών συστημάτων παρέχουν εμπορικά λογισμικά για ρομποτικές προσομοιώσεις όπως τα ROBCAD, IGRIP, κλπ, τα οποία συμπεριλαμβάνουν ανεπτυγμένα εργαλεία προσομοίωσης για τα ρομπότ. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των εμπορικών λογισμικών στην ναυπηγική βιομηχανία απαιτεί επιπλέον προετοιμασία καθώς απαιτεί την εξοικείωση του χρήστη με προγράμματα CAD, την πλήρη μοντελοποίηση του τεμαχίου προς συγκόλληση και την ανάπτυξη προγραμμάτων μετάφρασης γλωσσών

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

προγραμματισμού τα οποία θα είναι συνυφασμένα με τα προγράμματα που χρησιμοποιούν οι βιομηχανίες παραγωγής λογισμικών προσομοίωσης.

Εν συντομία, εξαιτίας του ότι απαιτείται πολύς χρόνος και προσπάθεια, η χρήση εμπορικών λογισμικών ρομποτικών συστημάτων δεν είναι τόσο αποδοτική. Αντ'αυτού, χάρη στην ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των σχεδιαστικών προγραμμάτων, αυτές τις μέρες προτιμάται η χρήση σχεδιαστικού περιβάλλοντος βασιζόμενου σε προσωπικούς υπολογιστές καθώς είναι ευκολότερο στην χρήση. Επομένως, η χρήση off-line προγραμματισμού για ρομποτικά συστήματα είναι κατάλληλη για ναυπηγικές εργασίες καθώς είναι μια αισθητά πιο οικονομική διαδικασία από την αγορά και χρήση εμπορικών λογισμικών που παρέχουν οι εταιρείες παραγωγής ρομποτικών συστημάτων.

3.3 Τρόποι μεταφοράς των ρομπότ στις θέσεις εργασίας [5,6]

Η συναρμολόγηση της γάστρας χωρίζεται σε τρεις φάσεις ανάλογα με τα επί μέρους τμήματα (blocks) που συγκολλούνται. Υπάρχουν τριών ειδών blocks: κύρια blocks (grand assembly blocks), δευτερεύοντα blocks (middle assembly blocks) και τριτεύοντα blocks (sub assembly blocks).

Τα τριτεύοντα blocks δημιουργούνται συγκολλώντας στοιχεία και ελάσματα που έχουν προέλθει κατευθείαν από το χαλυβουργείο.

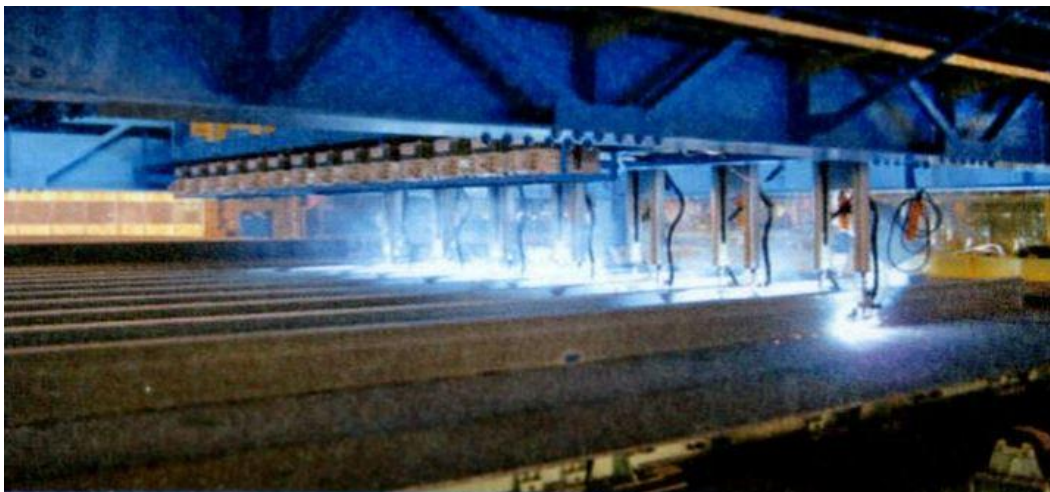
Κάθε δευτερεύον block αποτελείται από επί μέρους τριτεύοντα blocks και ένα εκ των δευτερευόντων blocks καλείται ' κύριο δευτερεύον block' (main sub-assembly block). Η συναρμολόγηση του κύριου δευτερεύοντος block πρέπει να έχει ολοκληρωθεί προτού ξεκινήσει η διαδικασία συναρμολόγησης του κύριου block που αποτελείται από αυτά τα κομμάτια και αντίστοιχα η συναρμολόγηση του κυρίου δευτερεύοντος block έπεται της κατασκευής όλων των τριτευόντων blocks από τα οποία αποτελείται. Τα κύρια blocks χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου στην διαδικασία ανέγερσης.

Ένα από τα κρίσιμα προβλήματα που προκύπτει κατά την χρήση ρομποτικών συστημάτων στα ναυπηγεία, είναι η μεταφορά και τοποθέτηση των ρομπότ στις θέσεις εργασίας. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες που αφορούν εφικτά συστήματα τοποθέτησης των ρομποτικών συστημάτων στα ναυπηγεία. Είναι ξεκάθαρο πως η ευκολία μετακίνησης των ρομπότ στις διάφορες θέσεις συγκόλλησης κατά την διάρκεια της ανέγερσης ενός πλοίου

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

είναι το κλειδί για την επιτυχή εισαγωγή και επικράτηση των ρομποτικών συγκολλήσεων στην ναυπηγική.

Αυτή την στιγμή, η μεταφορά των ρομπότ στις θέσεις συγκόλλησης γίνεται με τρεις τρόπους: χειροκίνητα, ημιαυτόματα και πλήρως αυτοματοποιημένα. Η χειροκίνητη και η πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος δεν προτιμούνται στις διαδικασίες συγκόλλησης κυρίων και δευτερευόντων blocks. Αυτό διότι η χειροκίνητη μετακίνηση απαιτεί πολύ χρόνο και προσπάθεια από τους εργάτες, ενώ η πλήρως αυτοματοποιημένη μετακίνηση προκαλεί ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που παραμορφώνουν τον μεταλλικό σκελετό του ρομπότ και υποβαθμίζουν την ποιότητα συγκόλλησης. Επομένως, η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η ημιαυτόματη κατά την οποία το ρομπότ κινείται πάνω σε ένα ειδικό κάρο με την βοήθεια γερανού στον οποίο είναι προσδεμένο μέσω ενός μεταλλικού σκελετού όπως φαίνεται στα σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5.

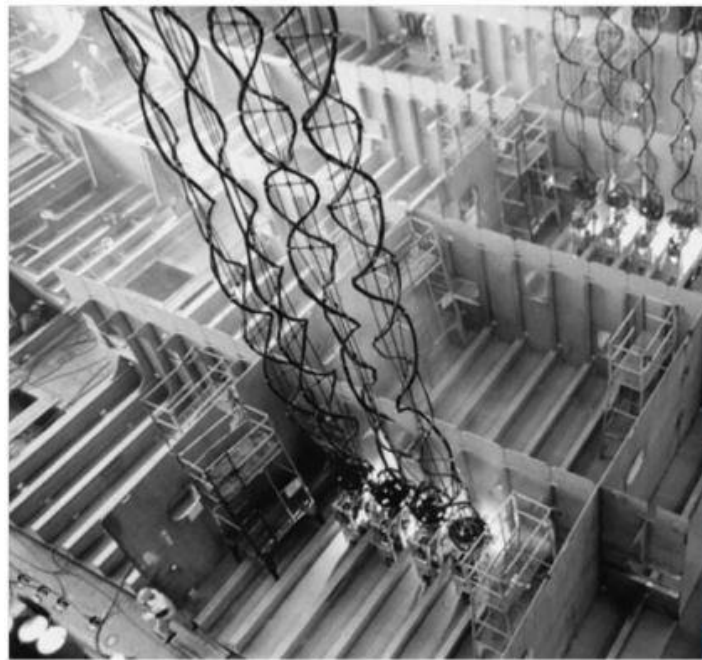


Σχήμα 3.3: Ρομποτικές συγκολλήσεις κατά την συναρμολόγηση κύριου block

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική



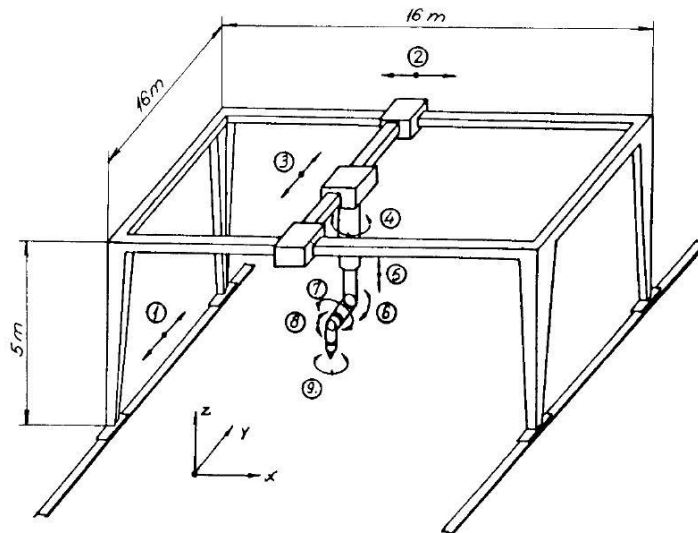
Σχήμα 3.4: Ρομποτικές συγκολλήσεις κατά την συναρμολόγηση κύριου block



Σχήματα 3.5: Ρομποτική συγκόλληση σε κύριο block. Περίπτωση ημιαυτόματης μεταφορά των ρομπότ μέσω μεταλλικών σκελετών που είναι συνδεδεμένοι με γερανούς που κινούνται κατά τις x,y διευθύνσεις

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

Τελευταία, πραγματοποιείται έρευνα για νέες μεθόδους μεταφοράς των ρομπότ όπως με ειδικά διαμορφωμένες ράγες και μηχανισμούς (σχήμα 3.6)

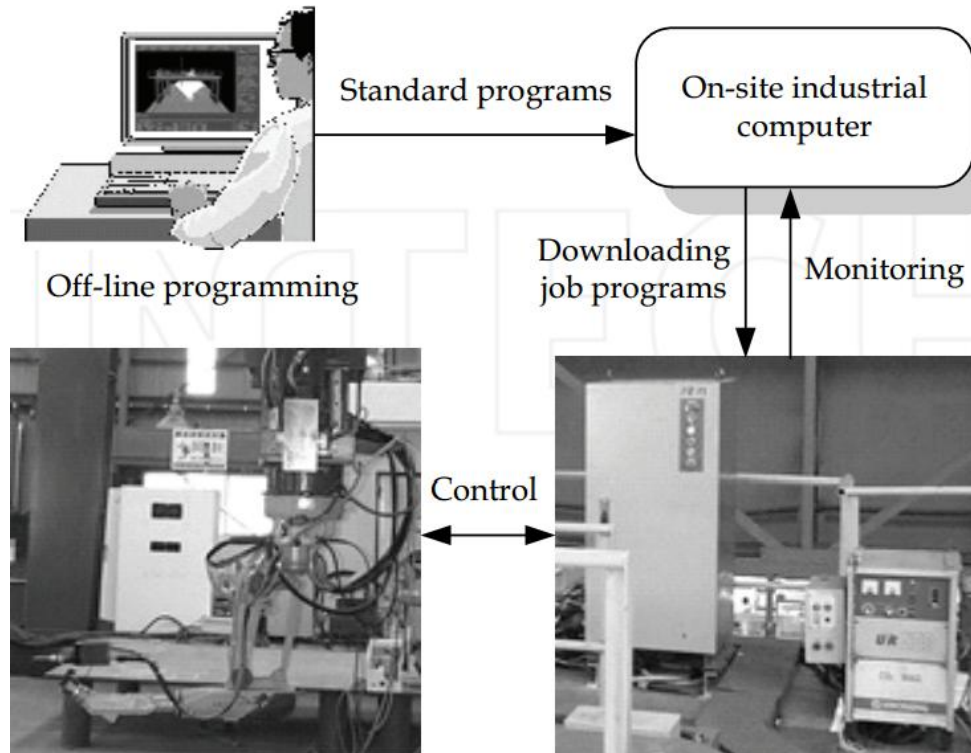


Σχήμα 3.6: Ρομπότ με εννέα βαθμούς ελευθερίας, στηριζόμενο σε ειδικά διαμορφωμένο σύστημα

3.4 Διαμόρφωση του ρομποτικού συστήματος^[2,4,5,6]

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε διάφορα ναυπηγεία όπως αυτό της Daewoo στην Ν.Κορέα προκειμένου να πραγματοποιηθούν ρομποτικές συγκολλήσεις μέσω off-line προγραμματισμού αποτελείται από τα εξής μέρη: Το ρομπότ και γενικά τον εξοπλισμό συγκόλλησης (μηχανή συγκόλλησης, προστατευτικό αέριο αν απαιτείται, κλπ) και έναν κεντρικό υπολογιστή που βρίσκεται στο χώρο εργασίας (on-site industrial computer).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Αρχικά, γράφεται το βασικό πρόγραμμα (standard program) με τη χρήση προσωπικού υπολογιστή. Στη συνέχεια, μέσω ενός προγράμματος CAD, δημιουργείται το πρόγραμμα εργασίας από τον κεντρικό υπολογιστή, μέσα στο οποίο εμπεριέχονται οι διαστάσεις του δοκιμίου προς συγκόλληση. Ακολούθως, το πρόγραμμα εργασίας μεταφέρεται στον υπολογιστή του ρομπότ ο οποίος το διαβάζει και το εκτελεί γραμμή-γραμμή κινώντας το ρομποτικό βραχίονα με τον προδιαγεγραμμένο τρόπο.



Σχήμα 3.7: Διαδικασία off-line προγραμματισμού ενός ρομπότ

Προκειμένου να αυξήσουμε την ικανότητα του ρομπότ να πραγματοποιεί συγκολλήσεις σε δοκίμια διαφορετικού σχήματος και μεγέθους, ορίζουμε δυο ειδών προγράμματα, τα βασικά προγράμματα και τα προγράμματα εργασίας. Για ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία, το βασικό πρόγραμμα αποτελείται από τρία ξεχωριστά αρχεία (files): ένα program-file, ένα rpy-file και ένα rule-file. Το program-file περιγράφει την αλληλουχία των ρομποτικών κινήσεων οι οποίες είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού. Το rpy-file αντιπροσωπεύει τις κινήσεις roll (περιστροφή γύρω από τον x άξονα), pitch (περιστροφή γύρω από τον y άξονα) και yaw (περιστροφή γύρω από τον z άξονα) και εμπεριέχει τις γωνίες προσανατολισμού του ακροφύσιου συγκόλλησης στο κάθε σημείο συγκόλλησης. Το rule-file περιέχει τις συντεταγμένες των σημείων συγκόλλησης. Ένα παράδειγμα των παραπάνω αρχείων φαίνεται στο σχήμα.

Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

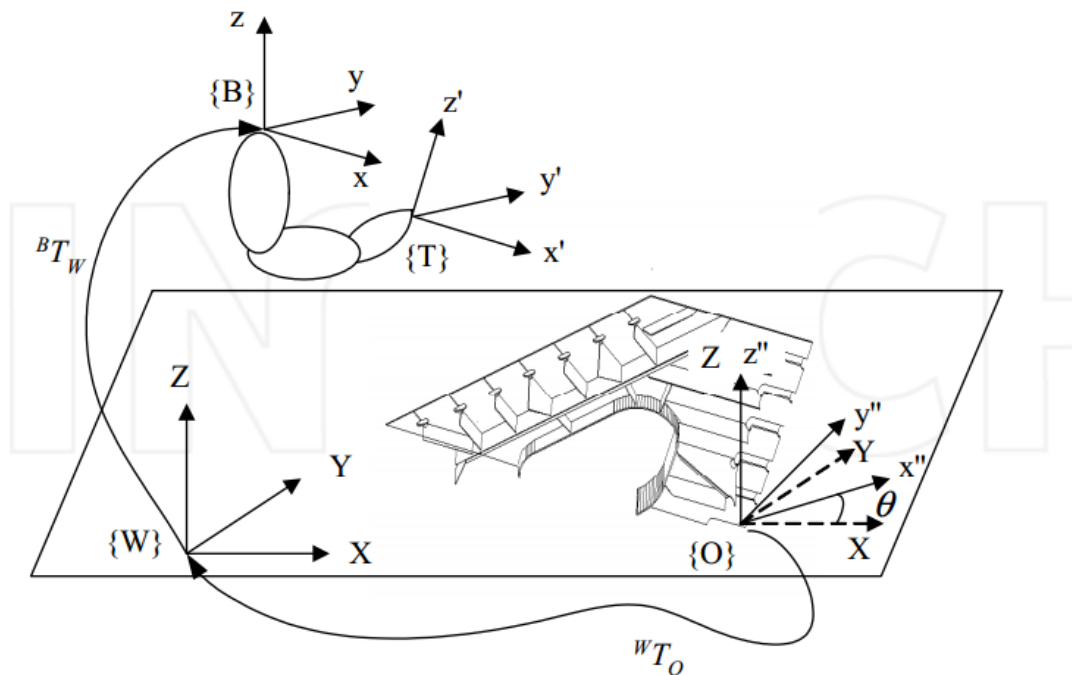
```
;FR65-74sl.pgm
001 RHOME V=030.0(%) HF=1
002 GETP P01 0 0 0 CRD=BASE
003 GMOVJ T01 V=030.0(%) PL=0
004 RHOME V=030.0(%) HF=2
005 RMOVJ T02 V=030.0(%) PL=0
006 GMOVJ T03 V=030.0(%) PL=0
007 GMOVJ T04 V=030.0(%) PL=0
008 GETP P02 0 0 0 CRD=BASE
009 RMOVL T05 V080.0 PL0 D0
010 RTOUCH V=035.0 X1 Y0 Z0 L100 P00
011 RIMOV V=030.0 x=-10 y=0 z=0 CRD=BASE
012 RTOUCH V=035.0 X0 Y0 Z-1 L100 P00
```

```
;FR65-74sl.rpy
T02 = 180 0 0 1 1
T03 = -180 -47 180 1 1
T04 = 180 0 0 1 1
T05 = 90 0 0 1 1
T06 = 180 -47 90 1 1
```

```
;FR65-74sl.rule
T02 G52 2064.0 -2389.0 1680.0
T03 A52 2734.0 -2389.0 44.0 2064.0 -2389.0 1680.0 0.0
T04 A52 2734.0 -1889.0 44.0 2064.0 -1889.0 1680.0 0.0
T05 A52 2734.0 -2889.0 44.0 2064.0 -2889.0 1680.0 0.0
T06 G52 2177.6 -2344.2 1680.0
```

Σχήμα 3.8: Παράδειγμα βασικού προγράμματος το οποίο αποτελείται από τρία μέρη: το program file (πάνω), το rpy-file (μέση) και το rule-file (κάτω)

Προκειμένου να είναι δυνατή η εργασία με δοκίμια διαφόρων μεγεθών αλλά πανομοιότυπου σχήματος χωρίς να απαιτείται επαναπρογραμματισμός του ήδη υπάρχοντος προγράμματος, τα σημεία συγκόλλησης στο rule-file του βασικού προγράμματος εισάγονται με τη μορφή μεταβλητών. Επίσης, προκειμένου να μπορεί ο υπολογιστής του ρομπότ να εκτελέσει το βασικό πρόγραμμα, το τελευταίο πρέπει να εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με τις ακριβείς διαστάσεις του δοκιμίου. Οι πληροφορίες για το μέγεθος του δοκιμίου παρέχονται από τα προγράμματα CAD ενώ οι συνθήκες συγκόλλησης (ένταση ρεύματος, τάση, παροχή αερίου, ταχύτητα συγκόλλησης κλπ) συλλέγονται από μια βάση δεδομένων στην οποία αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα από προηγούμενες εργασίες, πειραματικές και μη.



Σχήμα 3.9: Τα τέσσερα συστήματα συντεταγμένων: world (W), base (B), object (O) και tool (T)

Το σχήμα 3.9 περιγράφει τα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί το ρομπότ. Το σύστημα world (W) είναι το σύστημα με τους άξονες x, y, z προσαρμοσμένους στο έδαφος. Το base (B) είναι σύστημα συντεταγμένων προσαρμοσμένο στη βάση του ρομπότ ενώ το tool (T) είναι προσαρμοσμένο στην άκρη του ακροφύσιου συγκόλλησης. Τέλος, το object (O) αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων που είναι προσαρμοσμένο στο τεμάχιο προς συγκόλληση.

3.5 Εφαρμογή του Off-Line Προγραμματισμού στην Ναυπηγική Βιομηχανία^[1,2,4,6]

Οι επιμέρους ενέργειες που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια του off-line προγραμματισμού στη ναυπηγική βιομηχανία είναι:

- Η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων τόσο του ρομπότ όσο και των δοκιμίων προς συγκόλληση μέσω ενός σχεδιαστικού προγράμματος CAD.
- Ο προγραμματισμός προγραμμάτων συγκόλλησης προσαρμοσμένων στο δοκίμιο συγκόλλησης απ'ευθείας από τον υπολογιστή του ρομπότ, για εξοικονόμηση χρόνου.
- Η προσομοίωση της διεύθησης των blocks μέσω υπολογιστή και τέλος

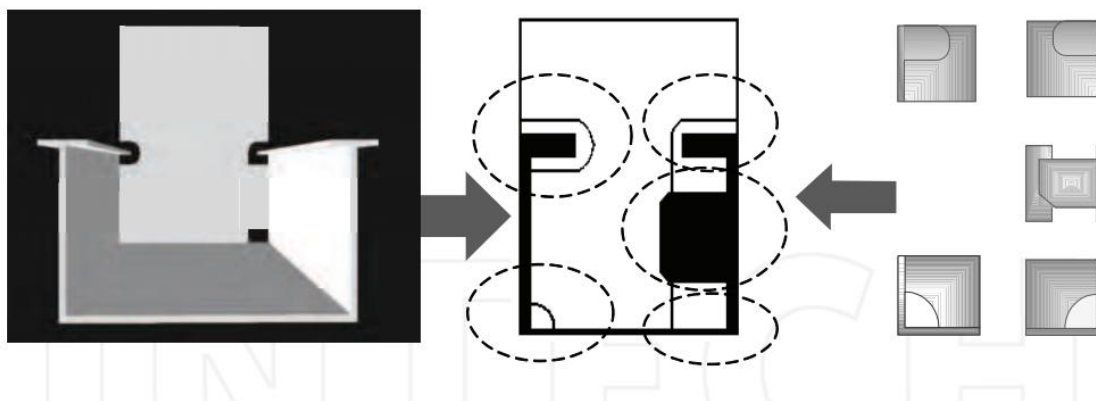
Κεφάλαιο 3^ο: Ρομποτικές Συγκολλήσεις στη Ναυπηγική

- Η δημιουργία της διαδρομής που θα ακολουθήσει το ακροφύσιο του ρομπότ κατά την διάρκεια των εργασιών συγκόλλησης μέσω γενετικών αλγορίθμων.

Ο συνδυασμός των παραπάνω ενεργειών εγγυάται ένα πλήρες αυτοματοποιημένο σύστημα στο οποίο η ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση έχει μειωθεί στο ελάχιστο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Κατ'αρχάς, αν το τεμάχιο προς συγκόλληση είναι πανομοιότυπο με κάποιο που έχει ήδη συγκολληθεί, τότε φορτώνεται το κατάλληλο, υπάρχον πρόγραμμα από την βάση δεδομένων. Στην περίπτωση που το τεμάχιο δεν είναι πανομοιότυπο με κάποιο που έχει ήδη συγκολληθεί, δημιουργείται αυτόματα το πρόγραμμα για το συγκεκριμένο τεμάχιο μέσω off-line προγραμματισμού. Εν συνεχεία, αν το πρόγραμμα είναι καινούριο, ελέγχεται η εγκυρότητά του μέσω προσομοίωσης. Τρίτον, ανάλογα με το πρόγραμμα εργασιών, ο off-line προγραμματισμός παρέχει και ένα έγγραφο με βάση το οποίο θα διευθετηθούν τα blocks στον χώρο εργασίας. Τέταρτον, αφού διευθετηθούν τα blocks με βάση το παραπάνω έγγραφο, ελέγχεται και αν χρειαστεί αναθεωρείται η τοποθέτηση τους μέσω αισθητήρων. Τέλος, τα προγράμματα που έχουν δημιουργηθεί μέσω off-line προγραμματισμού αποστέλλονται στον υπολογιστή του ρομπότ προκειμένου να ξεκινήσει η εργασία.

3.6 Αυτόματη Αναπαραγωγή Προγραμμάτων Συγκόλλησης^[1,2,4,5]

Η πιο χρονοβόρα διαδικασία κατά την λειτουργία ρομπότ στα ναυπηγεία είναι εκείνη του προγραμματισμού τους. Ιδιαίτερα για δοκίμια διαφορετικού μεγέθους και σχήματος, απαιτείται περισσότερος χρόνος προκειμένου να καθίστανται τα προγράμματα λειτουργικά και εφαρμόσιμα στη διαδικασία. Για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού, τα ρομποτικά προγράμματα συχνά αναπαράγονται αυτόματα χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες από τα συστήματα CAD. Αρχικά, αναλύεται το σχήμα του τεμαχίου, το οποίο μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους απλούστερες γεωμετρίες (οριζόντια γραμμή, καμπύλη, κλπ). Τα προγράμματα συγκόλλησης για τις απλές αυτές γεωμετρίες υπάρχουν ήδη στη βάση δεδομένων του ρομπότ. Όταν το δοκίμιο τοποθετείται στο περιβάλλον του ρομπότ, οπτικοί αισθητήρες σε συνδυασμό με ειδικούς αλγορίθμους διασπούν τη γεωμετρία του σε απλούστερες γεωμετρίες για τις οποίες υπάρχουν προδιαγεγραμμένα προγράμματα συγκόλλησης. Εν συνεχεία, επιλέγονται τα προγράμματα συγκόλλησης για τις απλουστευμένες γεωμετρίες από την βάση δεδομένων και με κατάλληλη σύνθεση τους, δημιουργείται το ολοκληρωμένο πρόγραμμα συγκόλλησης.



Σχήμα 3.10: Διάσπαση ενός δοκιμίου πολύπλοκης γεωμετρίας σε απλούστερα τμήματα από τον υπολογιστή του ρομπότ

3.7 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή των ρομποτικών συγκολλήσεων στην ναυπηγική βιομηχανία είναι εξαιρετικά εξυπηρετική, όχι μόνο χάρη στη ραγδαία αύξηση που επιφέρει στην παραγωγικότητα και στην ποιότητα των εργασιών αλλά και διότι ελαχιστοποιεί τα προβλήματα υγείας που αντιμετωπίζουν οι εργαζόμενοι στις εργασίες συγκολλήσεων.

Μέσω του off-line προγραμματισμού το σύστημα παρέχει προσομοίωση του ρομπότ και του δοκιμίου προς συγκόλληση μέσω σχεδιαστικών προγραμμάτων CAD, προσομοίωση σχετικά με την οργάνωση των blocks, βελτιστοποίηση της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα μέσω γενετικών αλγορίθμων και αυτοματοποιημένη δημιουργία προγραμμάτων.

Η χρήση off-line προγραμματισμού είναι συμβατή με μεγάλη ποικιλία λογισμικών, γεγονός που επιτρέπει την χρήση του μέσω Internet. Ως εκ τούτου, μπορούν να πραγματοποιηθούν προσαρμογές ανάλογα με τον τύπο του ρομπότ που χρησιμοποιείται. Ταυτόχρονα, ο off-line προγραμματισμός είναι αρκετά εύκολος για τους χειριστές και μεγιστοποιεί την λειτουργική αποδοτικότητα των ρομποτικών συστημάτων στην ναυπηγική βιομηχανία.

Στο μέλλον, δεδομένης της προόδου της τεχνολογίας στον τομέα της ρομποτικής και της αυξανόμενης ανάγκης για αποδοτικότερη και ποιοτικότερη εργασία, αναμένεται σταδιακή αύξηση των εφαρμογών ρομποτικών εγκαταστάσεων στα ναυπηγεία με παράπλευρα οφέλη τόσο για την υγεία των εργαζομένων όσο και την παραγωγική διαδικασία.

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου:

[1] Chang-Sei Kim, Keum-Shik Hong and Yong-Sub Han (2006). Welding Robot Applications in Shipbuilding Industry: Off-Line Programming, Virtual Reality Simulation, and Open Architecture

[2] Kangsanant T, and Wang R G (1995), CAD-based robotic welding system with enhanced intelligence, in *Proceedings of the Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, World Scientific Publishing, Singapore.*

[3] Heemoon Kim, Jangha Kang, Sungsoo Park (2001). Scheduling of Shipyard Block Assembly Process using Constraint Satisfaction Problem. Department of Industrial Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

[4] Ivica Mandic, Zeljko Domazer and Darko Stipanicev (1989), Advanced Robotics, The International Journal of the Robotics Society of Japan.

[5] Donghun Lee, Namkug Ku, Tae-Wan Kim, Jongwon Kim, Kyu-Yeul Lee, Youg-Shuk Son (2009) Development and Application of an Intelligent Welding Robot System for Shipbuilding.

[6] Lee JH.Hwang HS. Development of Robot Welding System for Panel Block Assemblies of Ship Hull. Okpo Ship Technologies (1998).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

«Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο»

4.1 Εισαγωγή^[1,2,6,8]

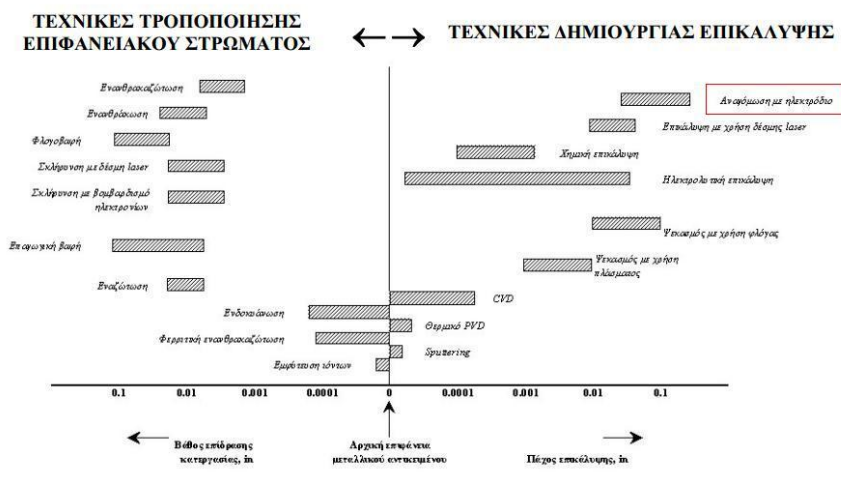
Ο όρος *επιφανειακή κατεργασία (Surface Engineering)*, χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα ευρύ φάσμα διεργασιών τροποποίησης των εξωτερικών στρωμάτων ενός υλικού που στόχο έχει είτε τη μικροδομική και μηχανική τους ενίσχυση, είτε τη μεταβολή της γεωμετρίας τους. Οποιοδήποτε από τους δυο στόχους κι αν καλείται να ικανοποιήσει μια επιφανειακή κατεργασία, αυτή αποτελεί το τελευταίο στάδιο κατεργασίας ενός τελικού αντικειμένου πριν αυτό τεθεί σε λειτουργία. Περαιτέρω κατεργασία ενός αντικειμένου μετά την επιφανειακή του κατεργασία είναι επιτρεπτή μόνο για λόγους διόρθωσης ή συντήρησης του αντικειμένου.

Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν, οι επιφανειακές κατεργασίες διακρίνονται σε:

- Κατεργασίες επιφανειακής ενίσχυσης του υλικού έναντι μηχανικών φορτίσεων ή/και δράσεων χημικών παραγόντων. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν πως οι δαπάνες που καταναλώνονται παγκοσμίως για την εφαρμογή κατεργασιών αυτής της κατηγορίας αφορούν σε ποσοστό 50% την προστασία μεταλλικών υλικών έναντι διάβρωσης, 30% την προστασία έναντι φθοράς από τριβή και 20% άλλες ειδικές απαιτήσεις.
- Κατεργασίες εξομάλυνσης του ανάγλυφου ή χάραξης με επέμβαση στη μικρογεωμετρία της επιφάνειας και ταυτόχρονη αφαίρεση υλικού. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι τεχνικές λείανσης (πχ τόννευση), επιφανειακής διαμόρφωσης (πχ ηλεκτροδιάβρωση), μαρκαρίσματος (πχ laser marking), κλπ.

Οι τεχνικές της πρώτης κατηγορίας διακρίνονται, σε γενικές γραμμές, αφενός σε αυτές που ενισχύουν το ίδιο το μέταλλο βάσης με ή χωρίς την προσθήκη άλλου στοιχείου και στις οποίες η εξωτερική επιφάνεια του κατεργασμένου αντικειμένου ταυτίζεται με την εξωτερική επιφάνεια του αρχικού υλικού, και αφετέρου σε αυτές που αποσκοπούν στη δημιουργία προστατευτικής, μεταλλικής ή κεραμικής επικάλυψης και στις οποίες η τελική εξωτερική επιφάνεια του κατεργασμένου αντικειμένου είναι πλέον η εξωτερική επιφάνεια της επικάλυψης (σχήμα 4.1).

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο



Σχήμα 4.1: Επίδραση των τεχνικών επιφανειακής ενίσχυσης στην τελική επιφάνεια του κατεργαζόμενου αντικειμένου

Στην περίπτωση προστατευτικών επικαλύψεων, η επιφάνεια του προς προστασία υλικού καλύπτεται από στρώμα άλλου υλικού, ανώτερων ιδιοτήτων και μικρού πάχους σχετικά με τις διαστάσεις του μεταλλικού αντικειμένου. Η επικάλυψη αυτή δημιουργείται με ψεκασμό μέσω ηλεκτρικού τόξου (αναπόθεση), χημικά, ηλεκτρολυτικά ή με εναπόθεση από ατμούς. Η επιφάνεια της επικάλυψης βρίσκεται σε άμεση επαφή με το «εχθρικό περιβάλλον» (διαβρωτικοί παράγοντες, συζυγής τριβόμενη επιφάνεια, περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας) και έχοντας καλύτερη συμπεριφορά από το υλικό βάσης το προστατεύει από τους παράγοντες αυτούς.

Σε βιομηχανικές εφαρμογές, οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών ως κύριο σκοπό έχουν την προστασία της συνολικής κατασκευής έναντι:

- *Φθοράς*, που προκαλείται από την επαφή της επιφάνειας με τις επιφάνειες άλλων αντικειμένων,
- *Διάβρωσης*, όταν η επιφάνεια φέρεται σε υγρό περιβάλλον που δρα δυσμενώς επ'αυτής,
- *Οξειδωσης*, όταν η επιφάνεια φέρεται σε υγρό περιβάλλον που δρα δυσμενώς επ'αυτής.
- *Κόπωσης*, η οποία εκδηλώνεται ως αστοχία του υλικού λόγω εναλλασσόμενης μηχανικής ή θερμικής φόρτισης.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

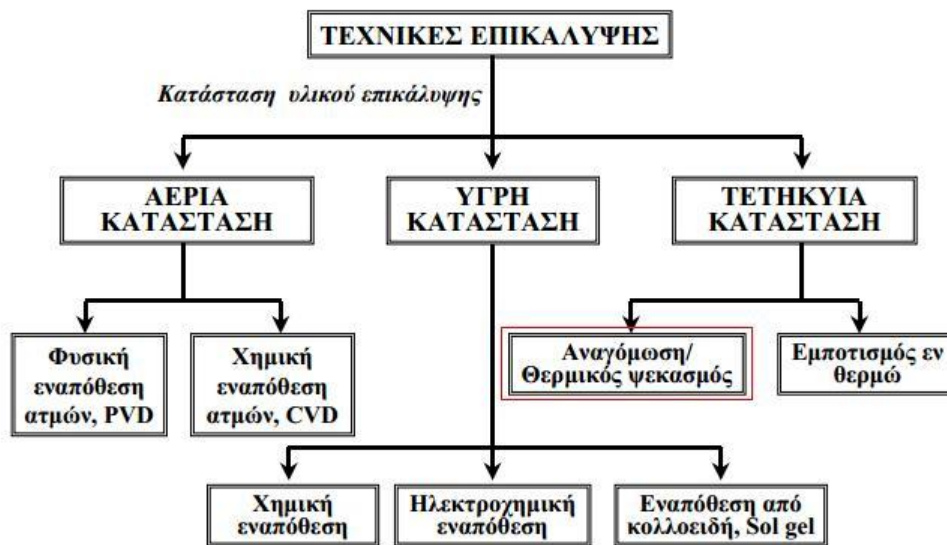
Στις περισσότερες εφαρμογές οι καταπονήσεις των υλικών είναι σύνθετες. Φερεπειν, δύνανται δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή να δέχονται εναλλασσόμενες μηχανικές φορτίσεις μέσα σε οξειδωτικό περιβάλλον. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο μηχανικός καλείται να εκτιμήσει τη «βιαιότητα» του κάθε παράγοντα και να συναξιολογήσει τη δράση τους προκειμένου να υιοθετήσει την επιφανειακή κατεργασία που θα ενισχύσει την κατασκευή κατά το βέλτιστο τρόπο έναντι όλων των «εχθρικών» παραγόντων, ταυτόχρονα.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως ενώ η ορθή εφαρμογή μιας τεχνικής επιφανειακής κατεργασίας σ'ένα μεταλλικό εξάρτημα μπορεί να βελτιώσει θεαματικά τη συμπεριφορά του σε συνθήκες «εχθρικού περιβάλλοντος» και να επιμηκύνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του, ο μη σωστός σχεδιασμός ή υλοποίηση της κατεργασίας, τις περισσότερες φορές, επιταχύνει μηχανισμούς αστοχίας με καταστροφικά αποτελέσματα.

Σε αντίθεση με τις θερμικές κατεργασίες που επηρεάζουν το συνολικό όγκο του υλικού, οι επιφανειακές περιορίζονται σε μια εξωτερική στοιβάδα του, πάχους μερικών μμ έως μερικών χιλιοστών. Η σημασία τους για την καλή απόκριση του μεταλλικού αντικειμένου σε συνθήκες λειτουργίας είναι τεράστια, αφού το μεγαλύτερο μέρος των αστοχιών που καταγράφονται καθημερινά έχουν ως σημεία έναρξης επιφανειακές περιοχές του υλικού. Παραδείγματος χάριν, η εφαρμογή μη βέλτιστων συνθηκών εναπόθεσης μπορεί να οδηγήσει σε επικαλύψεις με εσωτερικές δομικές ατέλειες (πόρους, ρωγμές ή εγκλείσματα) που κατά την χρήση του επικαλυμμένου αντικειμένου θα αποτελέσουν περιοχές αυξημένων τάσεων ή συσσώρευσης διαβρωτικών ειδών επιβαρύνοντας έτσι με πρόσθετους παράγοντες τη διάρκεια ζωής του μεταλλικού αντικειμένου.

Με τον τεχνικό όρο *αναγόμωση (repair welding)* επιφάνειας μετάλλου, εννοούμε την αποκατάσταση ή αντικατάσταση φθαρμένης μεταλλικής επιφάνειας (φερεπειν ελάσματος, εργαλείου, μηχανήματος, εξαρτήματος, κλπ) προκειμένου να επαναφέρουμε ή και να βελτιώσουμε τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου στην περιοχή της αποκατάστασης. Η αναγόμωση ανήκει στη γενικότερη κατηγορία των τεχνικών δημιουργίας *επικαλύψεων*. Οι επικαλύψεις περιλαμβάνουν τις επιφανειακές κατεργασίες κατά τις οποίες το υλικό, διαφορετικής σύστασης από το μέταλλο βάσης αλλά με τις ιδιότητες που στοχεύουμε να έχει η τελική επιφάνεια, εναποτίθεται σχηματίζοντας επιπρόσθετο σώμα, το οποίο καλείται επίστρωμα ή επικάλυψη. Το υλικό επικάλυψης εναποτίθεται στο μέταλλο βάσης υπό την μορφή ατμών, υδατικών διαλυμάτων ή σε κατάσταση τήγματος (σχήμα 4.2).

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο



Σχήμα 4.2: Ταξινόμηση τεχνικών επικάλυψης βάσει της κατάστασης του υλικού επικάλυψης.

Γενικά, οι τεχνικές εναπόθεσης ατμών χαρακτηρίζονται ως τεχνικές δημιουργίας επιστρωμάτων μικρού πάχους (<5 μm), ενώ οι τεχνικές αναγόμωσης χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία επιστρωμάτων μεγάλου πάχους (>200 μm). Όλες οι υπόλοιπες τεχνικές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία επικαλύψεων ενδιάμεσου πάχους (20-80 μm).

Αναγόμωση (γέμισμα) μιας φθαρμένης μεταλλικής επιφάνειας γίνεται στις περιπτώσεις που:

- Το αντικείμενο που χρίζει επισκευής δεν κυκλοφορεί πια στην αγορά ή είναι εξαιρετικά δυσεύρετο
- Η αντικατάσταση της φθαρμένης επιφάνειας έχει μεγαλύτερο κόστος από την αναγόμωση της
- Απαιτείται επισκευή τμήματος ενός γενικού συνόλου το οποίο δεν μπορεί να αντικατασταθεί αυτόνομα (πχ το δόντι ενός οδοντωτού τροχού,)

Η φθορά ενός μεταλλικού αντικειμένου δύναται να προέλθει από τη συνεχή τριβή του με άλλα υλικά, ακόμη και αν αυτά είναι μικρότερης σκληρότητας. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, το οποίο διαφέρει ανάλογα με το υλικό και τη χρήση του, το αντικείμενο ή η επιφάνεια χρειάζεται αναγόμωση ή αντικατάσταση.

4.2 Μέθοδοι Αναγόμωσης^[1,2,3,5,6,8]

Για την αναγόμωση φθαρμένων μεταλλικών εξαρτημάτων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, οι πιο διαδεδομένες εκ των οποίων είναι:

- Η μέθοδος αναγόμωσης με τη χρήση συσκευής οξυγονοασετιλίνης.
- Η μέθοδος ψεκασμού λιωμένης μεταλλικής σκόνης με τη βοήθεια οξυγονοασετιλίνης.
- Η μέθοδος ηλεκτρικού τόξου.

Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο μηχανικός καλείται να επιλέξει τη σωστή μέθοδο για κάθε περίπτωση, αφού λάβει υπόψιν όλους τους παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα, την αντοχή και το κόστος της αναγόμωσης. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας θα εξετάσουμε την τελευταία μέθοδο, η οποία και χρησιμοποιήθηκε.

Η μέθοδος του ηλεκτρικού τόξου είναι η πλέον διαδεδομένη. Η αναγόμωση γίνεται κυρίως με τη μέθοδο επενδεδυμένων ηλεκτροδίων (S.M.A.W 1.3.1) χάρη στην ευελιξία και την προσαρμοστικότητα που παρέχει στο συγκολλητή αλλά πολύ συχνά χρησιμοποιείται και η μέθοδος σωληνοειδών ηλεκτροδίων (F.C.A.W 1.3.4). Σπανιότερα, στην αναγόμωση βρίσκει εφαρμογή και το σύστημα SAW (Submerged Arc Welding).

Προκειμένου να επιλέξουμε το κατάλληλο υλικό αναγόμωσης, πρέπει να γνωρίζουμε πως τα ηλεκτρόδια της S.M.A.W και τα σωληνοειδή σύρματα της F.C.A.W διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

1. *Αντοχής στην κρούση*: Η βάση τους είναι το Mn σε περιεκτικότητες της τάξεως του 14%. Ένα χαρακτηριστικό του χάλυβα είναι πως μετά από επαναλαμβανόμενη έκθεση σε κρουστικά φορτία παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση της σκληρότητας του.
2. *Αντοχής στην τριβή*: Η κατασκευή τους βασίζεται στο σχηματισμό καρβιδίων τα οποία έχουν πολύ μεγάλη σκληρότητα. Κατά κανόνα έχουν προσμίξεις σε μέταλλα τα οποία έχουν την δυνατότητα να σχηματίζουν καρβίδια χωρίς όμως να χάνουν σε μεγάλο βαθμό και την ελαστικότητα τους, όπως είναι το Cr και το Mo. Όταν η εφαρμογή για την οποία τα προορίζουμε απαιτεί το τελικό αντικείμενο να διαθέτει

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

συγκεκριμένη ελαστικότητα, είθισται το ηλεκτρόδιο να περιέχει και Nb (Νιόβιο) προκειμένου να περιορίσει το φαινόμενο της κατακρήμνισης του χρωμίου. Τα υλικά αυτά συνήθως έχουν αρκετά υψηλές περιεκτικότητες σε άνθρακα. Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία με διαφορετικούς βαθμούς σκληρότητας. Υπάρχουν υλικά, με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε προσμίξεις που δεν υπερβαίνουν το 5% της μάζας του μετάλλου, επιτυγχάνουν μέτριους βαθμούς σκληρότητας και είναι κατεργάσιμα με μηχανουργικά μέσα. Αντίστοιχα, υπάρχουν και υλικά αναγόμωσης τα οποία έχουν πολύ υψηλή περιεκτικότητα προσμίξεων, οι οποίες προσεγγίζουν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις το 40% της μάζας του χάλυβα και είναι κατεργάσιμα μόνο με λειαντικούς τροχούς.

Στο σχήμα 4.3 φαίνονται περιπτώσεις αναγόμωσης με σκοπό τη σκλήρυνση της υπό αναγόμωση επιφάνειας. Η πρώτη περίπτωση αφορά αναγόμωση μεταφορικού κοχλίου που δεν πρόκειται να υποβληθεί σε καμία απολύτως κατεργασία (άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολύ σκληρό υλικό). Η δεύτερη περίπτωση αφορά ένα μεγάλο οδοντωτό τροχό ο οποίος θα πρέπει να κατεργαστεί μηχανουργικά, τουτέστιν απαιτείται υλικό ήπιας σκληρότητας.



Σχήμα 4.3: (1) Αναγόμωση πτερυγίων μεταφορικού κοχλίου (2) Αναγόμωση οδοντωτού τροχού

Η επιλογή του σωστού ηλεκτροδίου για υλικό προσθήκης είναι εξαιρετικά σημαντική για όλες τις εργασίες αναγόμωσης. Σε γενικές γραμμές, αυτό που ισχύει είναι πως κάθε υλικό θα πρέπει να αντικαθίσταται από κάποιο άλλο μεγαλύτερης ή ίσης αντοχής με το βασικό μέταλλο. Κάθε εφαρμογή διαφέρει ως προς τις μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή, αντοχή στην κόπωση, αντοχή στην κρούση κλπ. Όσο πιο συγγενείς είναι οι χημικές συστάσεις του

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης, τόσο πιο ποιοτική είναι η σύνδεση με αποτέλεσμα την μακροζωία του υλικού και την έλλειψη πρόωρων σφαλμάτων.

4.3 Η Διαδικασία της Αναγόμωσης^[3,4,5,7]

Προκειμένου να λάβει χώρα η αναγόμωση ενός υλικού, πρέπει να πραγματοποιηθούν τρεις σημαντικές διαδικασίες:

1. Προετοιμασία του υλικού για την αναγόμωση (συγκόλληση)
2. Αναγόμωση
3. Εργασίες μετά την αναγόμωση

4.3.1 Προετοιμασία για την Αναγόμωση

Πριν περιγραφεί η διαδικασία της αναγόμωσης, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ένας σημαντικός αριθμός παραγόντων που την επηρεάζουν. Οι κυριότεροι είναι:

Ασφάλεια των εργαζομένων: Η τοποθεσία στην οποία θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση πρέπει να έχει επιθεωρηθεί και να πληρούνται όλες οι προδιαγραφές ασφάλειας. Οι προδιαγραφές αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν απομάκρυνση εύφλεκτων υλικών, εξουδετέρωση τοξικών υλικών όπως επιστρώσεις που περιέχουν μόλυβδο, πλαστικές επικαλύψεις των μετάλλων, κ.ά.

Καθαρισμός της επιφάνειας: Η εγγύς περιοχή της συγκόλλησης πρέπει να είναι καθαρή και επ' ουδενί να μη βρίσκονται εντός αυτής προσμίξεις και στοιχεία που μπορούν να επηρεάσουν την καθαρότητα της συγκόλλησης. Απαιτείται δηλαδή απομάκρυνση σκόνης, γράσου, σκουριάς, επιστρώσεων (βαφή ή πλαστικές επιστρώσεις), κλπ, από την επιφάνεια των προς αναγόμωση τεμαχίων. Η μέθοδος καθαρισμού εξαρτάται από το υλικό που στοχεύουμε να απομακρύνουμε και τη θέση του τεμαχίου. Για την πλειονότητα του κατασκευαστικού και βιομηχανικού εξοπλισμού προτείνεται καθαρισμός μέσω ατμού. Όταν αυτό δεν καθίσταται δυνατό, εφαρμόζεται καθαρισμός μέσω διαλυτικών μέσων. Ακόμη μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως με μεγάλη επιτυχία είναι η αμμοβολή ενώ εφαρμόζονται και άλλες μέθοδοι όπως καθαρισμός με λειαντικό τροχό, συρματόβουρτσες, κλπ.

Αποσυναρμολόγηση: Σε περιπτώσεις όπου το αντικείμενο προς αναγόμωση είναι πολύπλοκης κατασκευής ή εμπεριέχει μηχανολογικά τμήματα με καλωδιώσεις και άλλα

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

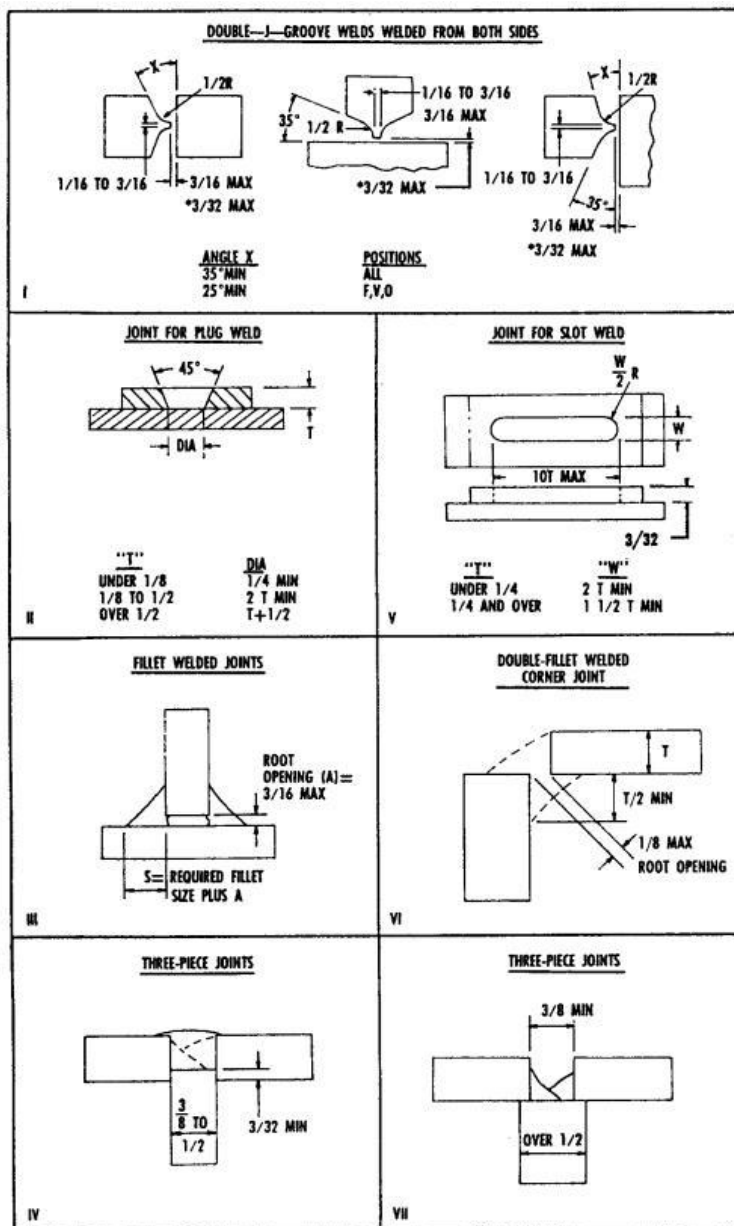
παρεμφερή συστήματα, προτείνεται η αποσυναρμολόγηση του προκειμένου να διευκολυνθεί η εργασία συγκόλλησης και να αποφευχθεί τυχόν βλάβη.

Προστασία εξοπλισμού: Όταν πραγματοποιείται αναγόμωση σε μηχανολογικό εξοπλισμό, πολλά τμήματα του εξοπλισμού τα οποία δεν είναι εύκολο να αποσυναρμολογηθούν και να απομακρυνθούν πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα. Αυτό διότι κατά τη διάρκεια της αναγόμωσης εκτοξεύονται σπίθες και τηγμένο μέταλλο προσθήκης σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Τα παραπάνω δύναται να προκαλέσουν βλάβη στα πλησιέστερα μηχανολογικά μέρη αν δεν έχουν προστατευτεί κατάλληλα. Ειδικά μεταλλικά πλέγματα και διαφράγματα χρησιμοποιούνται προκειμένου να εμποδίσουν την βλάβη σε προσκείμενα τμήματα του εξοπλισμού ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τμήματα του εξοπλισμού καλύπτονται από πλέγμα αμιάντου. Μηχανολογικά εξαρτήματα εντός ακτίνας 1.5 m από την πηγή συγκόλλησης θα πρέπει να προστατεύονται.

Στήριξη και σταθεροποίηση του εξοπλισμού: Σε πολύπλοκες εργασίες, δύναται να χρειαστεί κατάλληλη σταθεροποίηση των τεμαχίων προς αναγόμωση. Αυτό γίνεται διότι είναι πιθανό να ασκηθούν μεγάλα φορτία κατά την διαδικασία της αναγόμωσης, ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται κοπή κάποιου τμήματος για να πραγματοποιηθεί η εργασία. Αρκετές φορές τα απαιτούμενα στηρίγματα συγκολλούνται προσωρινά στο εκάστοτε μηχάνημα και αποκολλώνται αργότερα.

Διαμόρφωση της επιφάνειας προς αναγόμωση: Στις περισσότερες εργασίες αναγόμωσης απαιτείται αφαίρεση τμήματος της μεταλλικής επιφάνειας πριν την προσθήκη μετάλλου. Το περίγραμμα του τμήματος της μεταλλικής επιφάνειας που πρόκειται να αφαιρεθεί σχεδιάζεται προσεκτικά και στην συνέχεια αφαιρείται το μέταλλο μέχρι το επιθυμητό πάχος. Στόχος της αφαίρεσης του υλικού είναι να επιτευχθεί η βέλτιστη διείσδυση του μετάλλου προσθήκης περιμετρικά της επιφάνειας αναγόμωσης. Η γεωμετρία του τμήματος προς αφαίρεση πρέπει να είναι τέτοια που να διευκολύνει τη διαδικασία συγκόλλησης, και να εξασφαλίζει πως ολόκληρος, ή το μεγαλύτερο τμήμα του όγκου εργασίας, θα πραγματοποιείται από την πιο βολική θέση συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

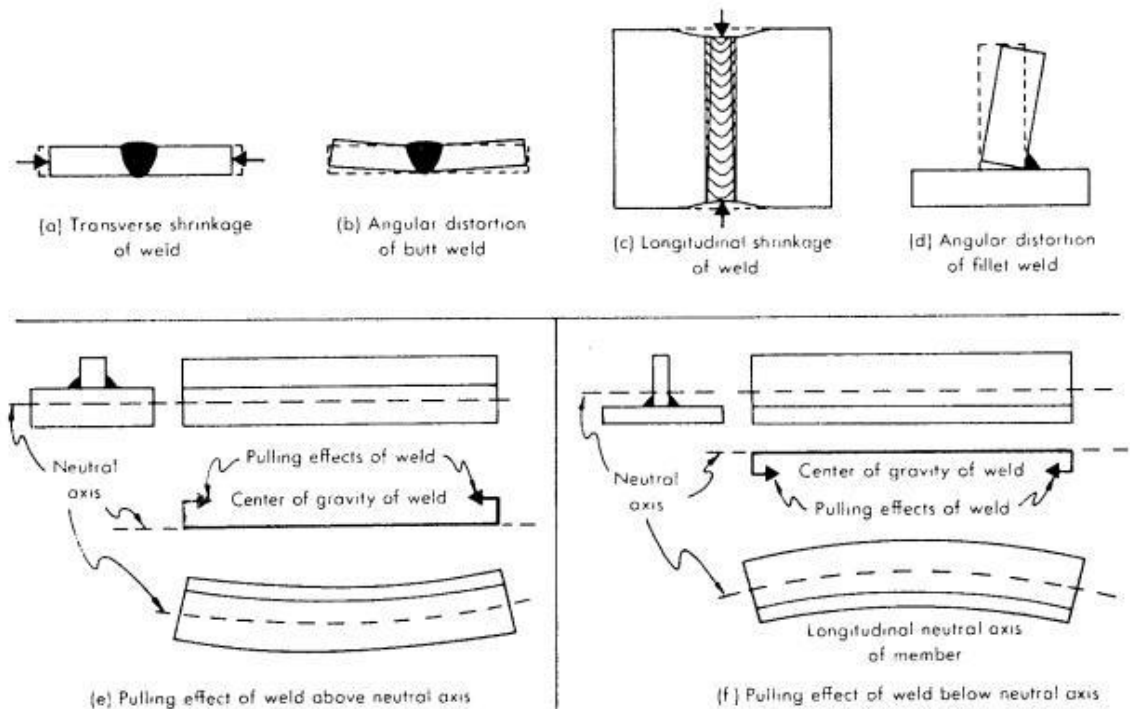


Σχήμα 5.4: Προτεινόμενες αναλογίες τομών προς αναγόμωση μέσω GMAW, FCAW, GTAW.

Προθέρμανση: Η συγκόλληση μέσω ηλεκτρικού τόξου, ως γνωστόν εφαρμόζει τοπικά, εξαιρετικά υψηλά θερμικά φορτία σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απότομη απόψυξη του μετάλλου προσθήκης και την επίσης απότομη θέρμανση και απόψυξη του προσκείμενου μετάλλου βάσης. Αυτά τα θερμικά φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγματώσεις κατά τη διάρκεια ή και μετά από τη συγκόλληση (hot cracking ή cold cracking), σε συγκόλληση με πολύ υψηλή σκληρότητα και κατά συνέπεια αντίστοιχες επιβλαβείς συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες της θερμικά

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ), στην ύπαρξη παραμενουσών τάσεων και τέλος, στην παραμόρφωση του τεμαχίου μετά τη συγκόλληση.



Σχήμα 4.5: Παραδείγματα παραμορφώσεων μετά από συγκόλληση

Η προθέρμανση του τεμαχίου πριν την αναγόμωση ελαχιστοποιεί όλα τα παραπάνω ανεπιθύμητα φαινόμενα, μειώνοντας τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της λίμνης συγκόλλησης και του ψυχρότερου μετάλλου βάσης, και μειώνοντας επίσης τον ρυθμό απόψυξης. Επιπρόσθετα, η προθέρμανση του μετάλλου παρέχει περισσότερο χρόνο για τη διάχυση του υδρογόνου μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης και ταυτόχρονα μειώνει τα επίπεδα υγρασίας στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης τα οποία αποτελούν εν δυνάμει πηγή παροχής υδρογόνου. Η παρουσία του υδρογόνου πρέπει να μειώνεται στο ελάχιστο προκειμένου να αποφεύγεται η ρωγμάτωση της ζώνης συγκόλλησης.

Η προθέρμανση επιτυγχάνεται με δυο γενικές μεθόδους: προθέρμανση σε ειδικό φούρνο, η οποία περιλαμβάνει θέρμανση του συνόλου του τεμαχίου, και τοπική προθέρμανση στην προσκείμενη περιοχή της συγκόλλησης μέσω φλόγας ή μέσω επαγωγικής θέρμανσης.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

Κοπή-Αφαίρεση Υλικού: Προτού πραγματοποιηθεί η εργασία της αναγόμωσης, απαιτείται να αφαιρεθεί το τμήμα της επιφάνειας του υλικού που παρουσιάζει τα ελαττώματα (γήρανση, ρωγματώσεις, διάβρωση, κλπ). Η αφαίρεση υλικού γίνεται με διάφορους τρόπους, οι συνηθέστεροι των οποίων είναι: κοπή με φλόγα ασετυλίνης (oxy-fuel cutting), κοπή πλάσματος (plasma cutting) και κοπή με τόξο άνθρακα (carbon arc cutting). Οι πρώτες δυο τεχνικές είναι κατάλληλες για δημιουργία τομών στο μέταλλο. Η κοπή με τόξο άνθρακα, είναι κατάλληλη για τη λάξευση της επιφάνειας προκειμένου να απομακρυνθεί ένα επιφανειακό ελάττωμα όπως φερειπείν μια ρωγμή, χωρίς να χρειαστεί να δημιουργηθεί τομή στο μέταλλο.

Εργασίες κοπής με φλόγα ασετυλίνης είναι οι συνηθέστερες λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει η διαδικασία τόσο στην εφαρμογή της όσο και στην διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Η κοπή με πλάσμα, ωστόσο, παρέχει τομές ταχύτερα, με μεγαλύτερη ακρίβεια και μικρότερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Επιπρόσθετα, η κοπή με πλάσμα έχει την δυνατότητα να κόψει όλα τα μέταλλα ενώ η φλόγα ασετυλίνης δεν μπορεί να κόψει αλουμίνιο και ανοξείδωτους χάλυβες.

Λείανση και Καθαρισμός: Η μεταλλική επιφάνεια μετά τη κοπή και την αφαίρεση του υλικού συνήθως δεν είναι ομαλή και μπορεί να περιέχει διάφορες δυσμορφίες όπως καμένα τμήματα του μετάλλου, τοπικές οξειδώσεις κλπ. Προτού λάβει χώρα η εργασία της αναγόμωσης, το μέταλλο πρέπει να έχει λειανθεί επαρκώς.

4.3.2. Αναγόμωση

Η επιτυχής αναγόμωση απαιτεί την τήρηση μερικών συνθηκών προκειμένου να ικανοποιηθούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της εργασίας. Οι συνθήκες αυτές αφορούν:

Τη διαδικασία συγκόλλησης: Η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης επηρεάζει προφανώς το τελικό αποτέλεσμα και πρέπει να γίνεται με βάση τις ανάγκες της εκάστοτε περίπτωσης. Εν πάση περιπτώσει, προτού πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε εργασία, ο μηχανικός πρέπει να έχει εξασφαλίσει πως κάθε απαιτούμενο κομμάτι του εξοπλισμού είναι διαθέσιμο. Ο εξοπλισμός αυτός αφορά τα ηλεκτρόδια (μέταλλο προσθήκης), τον κατάλληλο εξοπλισμό για την προθέρμανση του υλικού καθώς και οτιδήποτε ακόμη είναι αναγκαίο για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

Τον εξοπλισμό συγκόλλησης: Προκειμένου η διαδικασία να λάβει χώρα με τον βέλτιστο τρόπο, ο μηχανικός πρέπει να εξασφαλίσει πως κάθε κομμάτι απαραίτητο για τη διεκπεραίωση της θα είναι διαθέσιμο. Αυτό δεν αφορά μόνο στον εξοπλισμό για τη συγκόλληση αλλά και βοηθητικό εξοπλισμό που αφορά κάθε ένα από τα εννέα βήματα της προετοιμασίας για την αναγόμωση.

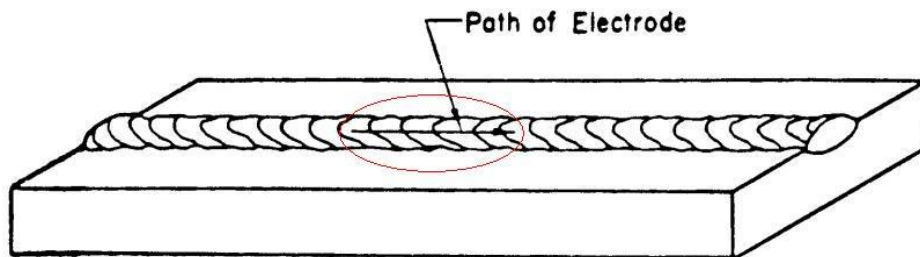
Τα υλικά: Επαρκής ποσότητα υλικών θα πρέπει να είναι διαθέσιμη λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό όγκο εργασίας. Εκτός από τα ηλεκτρόδια, η προϋπόθεση αυτή αφορά επιπρόσθετα τμήματα του βασικού μετάλλου που μπορούν να χρειαστούν για ενίσχυση καθώς και το προστατευτικό αέριο, στην περίπτωση που αυτό χρησιμοποιείται.

Την τεχνική εναπόθεσης: Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες το μέταλλο προσθήκης εναποτίθεται στην προς αναγόμωση περιοχή του μετάλλου βάσης. Η βέλτιστη τεχνική εξαρτάται από το μήκος της αυλακιάς που έχουμε δημιουργήσει στο μέταλλο βάσης, το πάχος της, τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης και του ηλεκτροδίου καθώς και τη θέση συγκόλλησης (αυχενική, μετωπική, οροφιαία, κλπ). Δυο βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη τεχνική εναπόθεσης είναι η ταχύτητα συγκόλλησης και ο όγκος του προστιθέμενου υλικού. Προκειμένου να ελέγξουμε τα θερμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, επιλέγουμε αντίστοιχες τιμές για τις δυο αυτές παραμέτρους. Για παράδειγμα, όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης τόσο πιο απότομα θα πραγματοποιηθεί η απόψυξη του συγκολλημένου μετάλλου με δυνητικά δυσμενείς επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ταυτόχρονα όμως, υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης μειώνει τις παραμορφώσεις λόγω θερμικής διαστολής και στη συνέχεια συστολής διότι ο όγκος του βασικού μετάλλου που προλαβαίνει να θερμανθεί αρκετά ώστε να υποστεί θερμικές παραμορφώσεις, είναι μικρότερος. Όταν το μέταλλο βάσης προθερμανθεί, η ταχύτητα συγκόλλησης δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο δεδομένου ότι η ραφή είναι συμπαγής και στιβαρή.

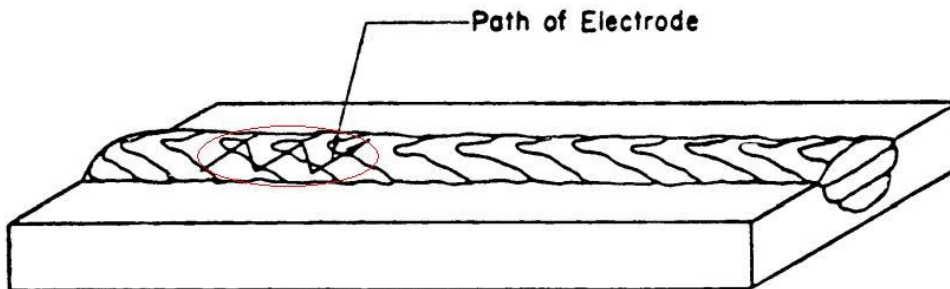
Οι επιπτώσεις του όγκου της ραφής είναι παρεμφερείς με αυτές της ταχύτητας: μικρή ραφή έχει αντίστοιχες επιπτώσεις με εκείνες της υψηλής ταχύτητας διότι, για μια ακόμη φορά, ο ρυθμός απόψυξης της ζώνης τήξης είναι σχετικά υψηλός. Αντιστρόφως, μεγάλος όγκος προστιθέμενου μετάλλου παράγει αισθητά περισσότερη θερμότητα στη ζώνη τήξης, δηλαδή ο ρυθμός απόψυξης είναι πιο αργός αλλά εφαρμόζονται υψηλότερες τάσεις.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

Οι δυο βασικοί τύποι ραφών συγκόλλησης είναι η γραμμική (linear ή stringer bead) και η γραμμική με ταλάντωση (weaving bead). Όπως διαφαίνεται από τις ονομασίες τους, στην γραμμική το μέταλλο βάσης εναποτίθεται γραμμικά, κατά μήκος μιας ευθείας, ενώ στην γραμμική με ταλάντωση η εναπόθεση είναι μεν γραμμική αλλά ταλαντώνεται μεταξύ δυο σημείων που βρίσκονται εκατέρωθεν μιας νοητής ευθείας. Οι δυο αυτές τεχνικές φαίνονται στο σχήμα 4.6 (α,β).



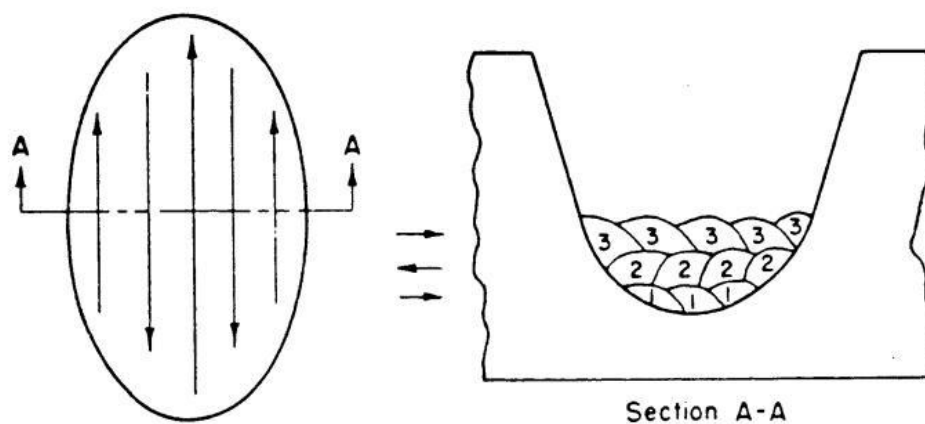
Σχήμα 5.6(α): Linear Bead



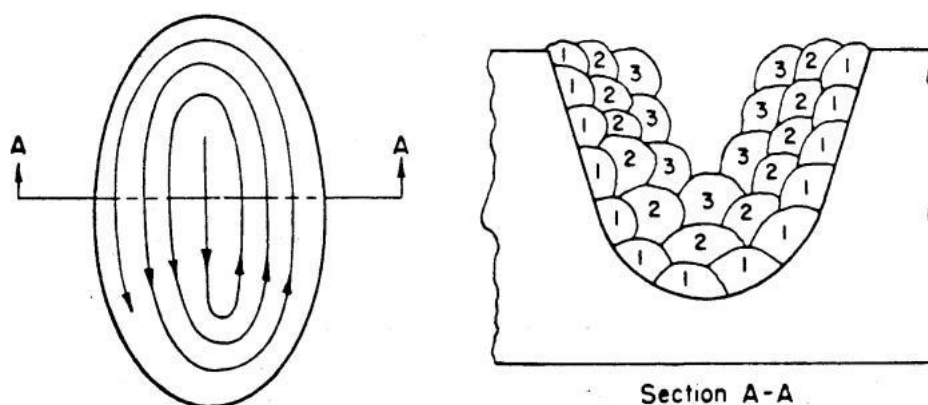
Σχήμα 5.6(β): Weaving Bead

Οι παραπάνω δυο τεχνικές χρησιμοποιούνται σε μονές στρώσεις, όταν η αυλακιά που έχει δημιουργηθεί στο βασικό μέταλλο μπορεί να γεμίσει με ένα πέρασμα. Στην περίπτωση που οι διαστάσεις της αυλακιάς δεν επιτρέπουν το γέμισμα της με ένα πέρασμα, εφαρμόζονται πολλαπλά περάσματα. Τα περάσματα αυτά μπορεί να είναι γραμμικά, γραμμικά με ταλάντωση ή και συνδυασμός των ανωτέρω δυο τεχνικών. Για την αναγόμωση αυλακιών όπου απαιτούνται πολλά περάσματα, η απλούστερη μέθοδος είναι να γεμίσει η αυλακιά σε οριζόντιες στρώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6(α). Στη τεχνική που φαίνεται στο σχήμα 4.6(β), τα περάσματα γίνονται σπειροειδώς και με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι τάσεις που εφαρμόζονται στο υλικό.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο



Σχήμα 4.7(α): Οριζόντια εναπόθεση περασμάτων



Σχήμα 4.7(β): Σπειροειδής εναπόθεση περασμάτων

Την ασφάλεια: Η τήρηση των κανονισμών ασφάλειας είναι προεξάρχουσα σημασίας κατά τη διάρκεια των εργασιών συγκόλλησης. Μέσα στο πλαίσιο της τήρησης των κανονισμών συγκαταλέγεται η χρήση κατάλληλου εξοπλισμού από τον συγκολλητή (ειδική μάσκα και ρούχα εργασίας) καθώς και συστημάτων εξαερισμού.

Την ποιότητα της συγκόλλησης: Η τελική ραφή της αναγόμωσης θα πρέπει να είναι ομαλή, συμπαγής, στιβαρή, χωρίς πόρους, ρωγματώσεις και ατέλειες γενικότερα. Προκειμένου να επιτευχθεί ομαλότητα καθ'όλη την επιφάνεια του υλικού, πολλές φορές η τελική επιφάνεια συγκόλλησης λειαίνεται μετά το πέρας των εργασιών.



Σχήμα 4.8(α): Μεταλλική επιφάνεια μετά από αναγόμωση, χωρίς λείανση



Σχήμα 4.8(β): Μεταλλική επιφάνεια μετά από αναγόμωση και λείανση

4.4 Εργασίες μετά την Αναγόμωση^[3,4,5,7]

Μετά το τέλος της συγκόλλησης, η ραφή πρέπει να αποθερμανθεί φυσικά. Δεν πρέπει να εκτεθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον θα επιταχύνει την διαδικασία απόψυξης και δεν πρέπει επ' ουδενί να εφαρμοστούν πάνω στην ραφή μηχανικές καταπονήσεις, τουλάχιστον μέχρι να επανέλθει το μέταλλο στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επιθεώρηση: Η τελική ραφή θα πρέπει να επιθεωρηθεί για να ελεγχθεί η ποιότητα και η ομοιογένεια της. Αυτή η διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνει μη-καταστροφικούς ελέγχους όπως ραδιογραφίες, ακτινογραφίες κλπ. Η ποιότητα της αναγόμωσης απαιτείται εξ ορισμού

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

να είναι πολύ υψηλή δεδομένου ότι η όλη διαδικασία έλαβε χώρα προκειμένου να ενισχυθεί το υλικό σε μια περιοχή όπου το μέταλλο βάσης δεν ανταποκρινόταν πλέον στις μηχανικές απαιτήσεις.

Καθαρισμός: Περιλαμβάνει δυο εργασίες. Αφ' ενός την απομάκρυνση κάθε τμήματος εξοπλισμού ο οποίος μπορεί να είναι συνδεδεμένος με το μέταλλο προκειμένου να το σταθεροποιεί, στηρίζει, κλπ, και αφετέρου τη διαδικασία καθαρισμού της ραφής από κάθε κατάλοιπο της συγκόλλησης όπως το στρώμα σκουριάς (slag), τα απομεινάρια μετάλλου προσθήκης πλησίον της συγκόλλησης κλπ. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην απομάκρυνση της σκόνης και των ρινισμάτων μετά την λείανση καθώς είναι ιδιαίτερα τραχιά και μπορούν να διεισδύσουν σε εγχοπές ή αρθρώσεις του μηχανολογικού εξοπλισμού προκαλώντας φθορές και μελλοντικές βλάβες.

4.5 Αναγόμωση Ανοξειδωτου Χάλυβα σε Χαμηλά Κραματωμένο Χάλυβα^[3,5]

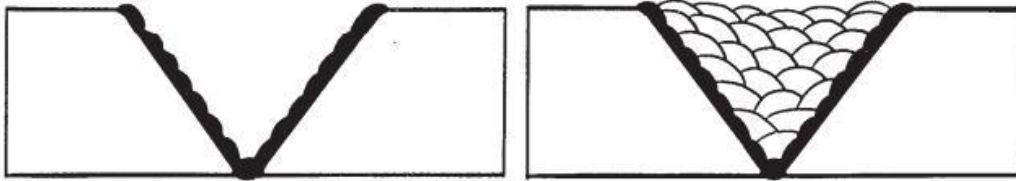
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα αναγόμωσης ανοξειδωτου χάλυβα στον χάλυβα X-65 που ανήκει στην κατηγορία χαλύβων υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloyed Carbon Steels). Η χημική σύσταση των 2 χαλύβων καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Σε γενικές γραμμές, η συγκόλληση ανοξειδωτων χαλύβων με κοινούς, χαμηλά κραματωμένους χάλυβες είναι το πιο συνηθισμένο και σημαντικό παράδειγμα συγκόλλησης ανόμοιων μετάλλων.

Η συγκόλληση ανοξειδωτων χαλύβων με κοινούς, χαμηλά κραματωμένους πρέπει να πραγματοποιείται με ανοξειδωτα ηλεκτρόδια που θα περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα κραματικών στοιχείων από το βασικό μέταλλο.

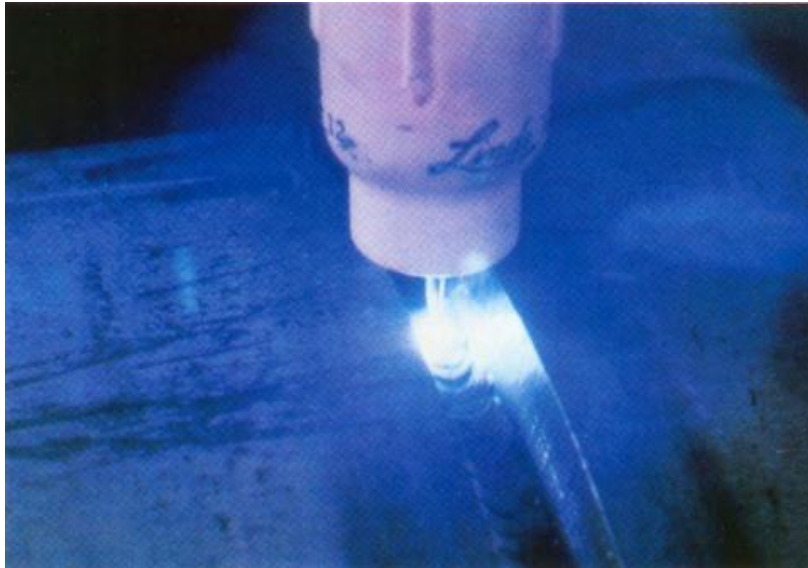
Υπάρχουν δυο τεχνικές αναγόμωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτή την περίπτωση. Στην πρώτη, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής, το ανοξειδωτο ηλεκτρόδιο εναποτίθεται απ'ευθείας στην ειδικά διαμορφωμένη αυλακιά του βασικού μετάλλου. Στην δεύτερη, η αυλακιά του βασικού μετάλλου 'αλείφεται' με μια 'πάστα' ανοξειδωτου μετάλλου και πάνω σε αυτή την πάστα εναποτίθεται το ανοξειδωτο ηλεκτρόδιο μέσω του ηλεκτρικού τόξου.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναγομώσεις Μετάλλων με Ηλεκτρικό Τόξο

Η συγκόλληση των συγκεκριμένων υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς προθέρμανση.



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής με εναπόθεση πάστας πριν την συγκόλληση



Σχήμα 4.10: Αναγόμωση σωληνώσεων σε σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας

Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου:

1. Α.Ασημακόπουλος, Κ.Διακουμάκος, Συγκολλήσεις.
2. Δρ.Ν.Μ Βαξεβανίδης, Κατεργασίες Ι: Συγκολλήσεις.
3. John F.Wallace Steel Castings Handbook Supplement 6: Repair Welding and Fabrication Welding of Carbon and Low Steel Castings.
4. Bengt Dahl, Björn Mogard, Repair Welding on Site.
5. ESAB, Repair and Maintenance Welding Handbook, Second Edition.
6. Δρ.Πανδώρα Ψυλλάκη, Θερμικές Κατεργασίες Ενότητα Α: Επιφανειακές Κατεργασίες Υλικών για Μηχανολογικές Εφαρμογές.
7. <http://www.keytometals.com/page.aspx?!D=CheckArticle&site=kts&NM=130>
8. www.millerwelds.com The basics of field welding repair on construction equipment



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

«Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης»

5.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο έχει ως σκοπό την περιγραφή του εξοπλισμού της αυτοματοποιημένης συγκολλητικής διάταξης (robot) που βρίσκεται στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει σύντομη περιγραφή όλων των μηχανολογικών εξαρτημάτων τα οποία είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση συγκόλλησης τύπου GMAW ή FCAW με τη χρήση της ρομποτικής εγκατάστασης της IGM.

Στην τελευταία υποενότητα του κεφαλαίου περιγράφεται η διαδικασία προγραμματισμού του ρομποτικού βραχίονα μέσω της ηλεκτρονικής κονσόλας χειρισμού του (teach pendant).

5.2 Ο Εξοπλισμός Συγκόλλησης

Όπως αναφέρθηκε, οι δυο τύποι συγκολλήσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση του ρομποτικού βραχίονα της IGM είναι η GMAW (Gas Metal Arc Welding) και η FCAW (Flux Cored Arc Welding). Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει γίνει λεπτομερής περιγραφή των δυο παραπάνω τεχνικών συγκόλλησης, συμπεριλαμβανομένου και του εξοπλισμού που χρησιμοποιούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μόνη διαφορά στον εξοπλισμό των ανωτέρω δυο μεθόδων έγκειται στην μορφή των ηλεκτροδίων. Στη μεν GMAW είναι αμιγώς μεταλλικά και ομοιογενή καθ'όλο το πάχος τους ενώ στη δε FCAW είναι σωληνοειδή, αποτελούμενα από μεταλλική εξωτερική επιφάνεια και ειδική προστατευτική σκόνη στο εσωτερικό τους.

Τα υπόλοιπα τμήματα του εξοπλισμού των δυο μεθόδων είναι ίδια και υπό αυτή την έννοια η ρομποτική διάταξη μπορεί να πραγματοποιήσει και τους δυο τύπους συγκόλλησης, δεδομένου ότι κάθε φορά χρησιμοποιείται το κατάλληλο ηλεκτρόδιο. Τα τμήματα αυτά είναι:

- Το πιστόλι συγκόλλησης.
- Η μονάδα παροχής του ηλεκτροδίου.
- Το ηλεκτρόδιο.
- Η μηχανή συγκόλλησης.
- Η μονάδα παροχής του προστατευτικού αερίου.
- Ο ρομποτικός βραχίονας.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

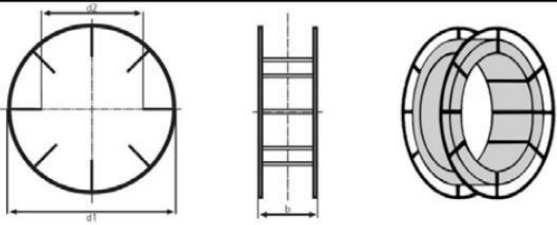
- Η κονσόλα ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα (teach pendant)

Πιστόλι συγκόλλησης: Πρόκειται για τυπικό υδρόψυκτο πιστόλι συγκόλλησης μεθόδου GMAW (βλ. Κεφάλαιο 1, 1.3.3.2).



Σχήμα 5.1: Το πιστόλι συγκόλλησης της ρομποτικής διάταξης

Μονάδα παροχής ηλεκτροδίου και ηλεκτρόδιο: Αποτελείται από την κουλούρα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου-σύρματος βάρους 15kg και τύπου B300 σύμφωνα με το EN ISO 544: 2003 (σχήματα 5.2,5.3) και το σύστημα τροφοδοσίας με τα ράουλα πάνω στο ρομποτικό βραχίονα (σχήμα 5.4).

				
ENISO 544	outside diameter d_1	Inside diameter d_2	external width b	kg wire
B 300	300	180	103	15/16/18

Σχήμα 5.2: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά κουλούρας B300

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης



Σχήμα 5.3: Η μονάδα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου με το τυλιγμένο ηλεκτρόδιο



Σχήμα 5.4: Σύστημα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου προς το πιστόλι συγκόλλησης (wire feeder)

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Μηχανή συγκόλλησης: Πρόκειται για τη μηχανή TPS330[®] (σχήμα 5.5) της εταιρείας Fronius[®], η οποία παρέχει το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης. Η ονομαστική ισχύς της μηχανής είναι στα 380 A, αρκετά υψηλή δηλαδή, και για αυτό το λόγο απαιτείται υδρόψυκτο πιστόλι συγκόλλησης προκειμένου να αποφευχθεί υπερθέρμανση.



Σχήμα 5.5: Μηχανή συγκόλλησης Fronius TPS330[®]

Μονάδα παροχής προστατευτικού αερίου: Το αέριο που χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης είναι μίγμα αργού (Ar) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε αναλογία Ar 82% + CO₂ 18% ενώ η επιλογή του έχει γίνει με βάση κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, το μίγμα ανήκει στην οικογένεια των προστατευτικών αερίων M21 του πιστοποιητικού EN 439: 1995. Το αέριο διοχετεύεται στο ακροφύσιο συγκόλλησης από κύλινδρο υψηλής πίεσης (μπουκάλια αερίου, σχήμα 5.6). Η παροχή του αερίου ρυθμίζεται

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

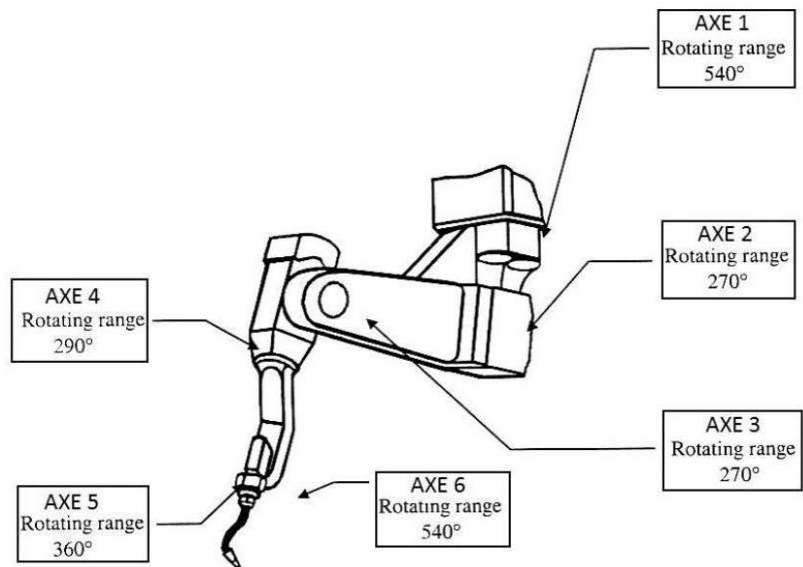
από τους ρυθμιστές πίεσης και τροφοδοσίας. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η παροχή του αερίου ήταν ρυθμισμένη στα 18 lt/min.



Σχήμα 5.6: Κύλινδρος παροχής αερίου προστασίας

Ρομποτικός Βραχίονας: Ο υψηλής ακρίβειας ρομποτικός βραχίονας τύπου RT 330.1 έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την εταιρεία IGM Robotersysteme®. Αποτελείται από έξι αρθρωτούς περιστροφικούς άξονες κατασκευασμένους από ειδικό πλαίσιο αλουμινίου. Διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας οι οποίοι επιτρέπουν την περιστροφή των έξι αξόνων όπως φαίνεται στο σχήμα (5.7.α).

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης



Σχήμα 5.7.α): Σχηματική αναπαράσταση των έξι βαθμών ελευθερίας του ρομποτικού βραχίονα



Σχήμα 5.7.β): Ο ρομποτικός βραχίονας RT 330.1 της IGM

Κονσόλα χειρισμού του ρομποτικού βραχίονα (teach pendant): Ο προγραμματισμός του ρομποτικού βραχίονα γίνεται αποκλειστικά μέσω της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8). Στο επόμενο εδάφιο θα περιγραφούν οι βασικές λειτουργίες της κονσόλας καθώς και το πως προγραμματίζεται ο βραχίονας για να πραγματοποιηθεί συγκόλληση μέσω του teach pendant.



Σχήμα 5.8: Η κονσόλα χειρισμού (teach pendant) του ρομποτικού βραχίονα

5.3 Λειτουργία της Ρομποτικής Διάταξης

5.3.1 Γενικά

Όλα τα βήματα προγραμματισμού που απαιτούνται προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια συγκόλληση με το ρομποτικό βραχίονα συντίθενται μέσω της κονσόλας χειρισμού.

Χρησιμοποιώντας την κονσόλα με τον κατάλληλο τρόπο, η συγκόλληση προγραμματίζεται βήμα-βήμα (step by step programming). Το teach pendant παρέχει τη δυνατότητα μετακίνησης του βραχίονα στις κατάλληλες θέσεις, ρύθμισης των παραμέτρων της συγκόλλησης (ταχύτητα συγκόλλησης, ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, τάση, μήκος τόξου

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

κλπ), αποθήκευσης των κινήσεων που προγραμματίζονται και τέλος, ενεργοποίησης της μηχανής συγκόλλησης προκειμένου να λάβει χώρα η συγκόλληση.

5.3.2 Διάταξη της κονσόλας χειρισμού

5.3.2.1 LCD οθόνη χειρισμού (LCD Display)

Η LCD οθόνη του teach pendant χρησιμοποιείται από το ρομπότ προκειμένου να επικοινωνεί οπτικά με το χειριστή. Αυτό γίνεται δια μέσου συγκεκριμένων menu, των επιλογών που αυτά παρέχουν, και μηνυμάτων τα οποία ενημερώνουν το χειριστή για τυχόν σφάλματα ή δραστηριότητες που πραγματοποιεί το ρομπότ. Η οθόνη είναι χωρισμένη σε 6 περιοχές πληροφοριών διαφορετικού μεγέθους οι οποίες αναφέρονται ως fields:

Menu Page Field: Εμφανίζει τις διαθέσιμες σελίδες για το εν ενεργεία menu. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα (σχήμα 5.9) είναι ενεργοποιημένη η σελίδα BAS του JOG menu (5.4.2.4). Η σελίδα που είναι ενεργοποιημένη είναι πάντα αντίστροφα φωτισμένη από τις υπόλοιπες.

Menu Title Field: Εμφανίζει το όνομα του εν ενεργεία προγράμματος, το βήμα που εκτελείται και τον συνολικό αριθμό βημάτων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα (σχήμα 5.9) φαίνεται το βήμα 0 (δεν έχει εισαχθεί ακόμα βήμα) του προγράμματος 'example'.

Menu Items Field: Επιλογές του εν ενεργεία menu. Στο συγκεκριμένο menu υπάρχουν 8 παράμετροι οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν.

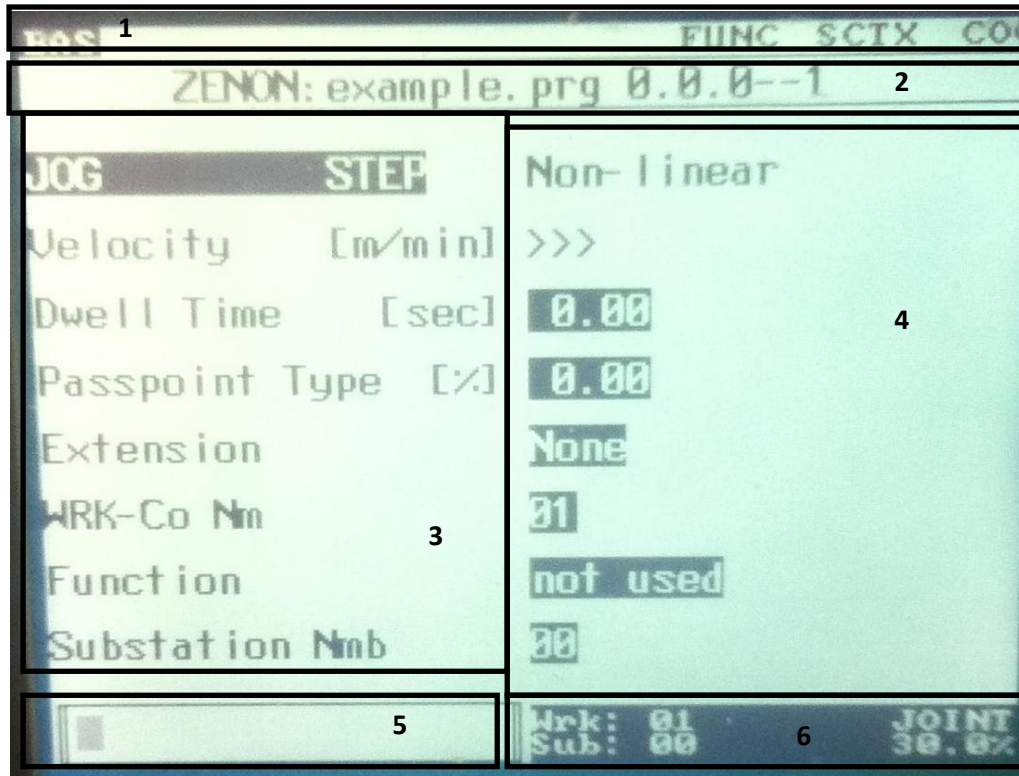
Work Field: Εμφανίζει την τιμή (σε περίπτωση μετρήσιμου μεγέθους) ή την κατάσταση της κάθε παραμέτρου του εν ενεργεία menu.

Edit Field: Εμφανίζονται τα δεδομένα που πληκτρολογούνται πριν την εισαγωγή τους στην αντίστοιχη επιλογή πληκτρολογώντας το ADD.

Status Field: Παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας (τρόπος κίνησης αξόνων, ταχύτητα κίνησης) στην οποία βρίσκεται το robot.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Η διάταξη της οθόνης και των διαφόρων fields φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Διάταξη περιοχών της LCD οθόνης της κονσόλας χειρισμού. 1) Menu Page Field, 2) Menu Title Field, 3) Menu Items, 4) Work Field, 5) Edit Field, 6) Status Field

5.3.2.2 Emergency Stop Button

Χρησιμοποιείται σε περίπτωση ανάγκης για να ακινητοποιηθεί ακαριαία το ρομπότ και να διακοπεί η εκτέλεση οποιουδήποτε προγράμματος. Πατώντας το συγκεκριμένο πλήκτρο, όλοι οι οδηγοί (drives), δηλαδή τα ηλεκτρικά κυκλώματα που κινούν τους άξονες της ρομποτικής διάταξης, απενεργοποιούνται και προκειμένου να συνεχιστεί η εργασία πρέπει να ενεργοποιηθούν ξανά από την εξωτερική κονσόλα εκκίνησης (start/stop cassette).

Το κουμπί έκτακτης ανάγκης βρίσκεται στην πάνω δεξιά γωνία της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8) και σε περίπτωση που πατηθεί, κλειδώνει στην κάτω θέση. Προκειμένου να ελευθερωθεί ξανά απαιτείται ταυτόχρονη περιστροφή και τράβηγμα.

5.3.2.3 Πλήκτρα Mode

Τα πλήκτρα αυτά βρίσκονται κάτω και δεξιά στην κονσόλα χειρισμού (σχήμα 2.8). Χρησιμοποιούνται από το χειριστή για την επιλογή συγκεκριμένου τρόπου κίνησης των τμημάτων του ρομποτικού βραχίονα. Υπάρχουν τέσσερα πλήκτρα mode και ανάλογα με το ποιο θα επιλέξει ο χειριστής, ο βραχίονας κινείται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα χειροκίνητης κίνησης (manual control keys, 5.3.2.4). Συγκεκριμένα, οι τέσσερις τρόποι κίνησης των τμημάτων του βραχίονα είναι οι εξής:

- **Joint key/mode:** Επιλέγοντας την κίνηση σε Joint mode, επιτρέπεται η περιστροφή κάθε τμήματος του ρομποτικού βραχίονα (ρομποτικοί άξονες, robot axes) γύρω από τον άξονα περιστροφής του μέχρι την μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία (σχήμα 5.6). Πρόκειται δηλαδή για μη γραμμική κίνηση. Το ποιο τμήμα του βραχίονα θα στραφεί και ο τρόπος περιστροφής του επιλέγονται από τα manual control keys (5.3.2.4).
- **World key/mode:** Με την κίνηση σε World mode επιλέγεται γραμμική κίνηση για το ακροφύσιο συγκόλλησης στο χώρο, κατά τους άξονες x,y,z χωρίς να αλλάζει ο προσανατολισμός του ακροφύσιου συγκόλλησης. Η κίνηση στους άξονες x,y,z πραγματοποιείται μέσω των manual control keys 1,2 και 3, αντίστοιχα. Για να αλλάξει ο προσανατολισμός του ακροφύσιου σε World mode, χρησιμοποιούνται τα manual control keys 4, 5 και 6. Ακόμη και στην τελευταία περίπτωση πάντως, η θέση του TCP θα παραμείνει σταθερή (Tool Center Point: Ένα μαθηματικά υπολογισμένο σημείο το οποίο υπολογίζεται βάσει συγκεκριμένων παραμέτρων που αφορούν τους άξονες συνυπολογίζοντας το μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου από το ακροφύσιο. Πιο απλά θα μπορούσαμε να το περιγράψουμε ως το σημείο στο οποίο τήκεται το ηλεκτρόδιο και δημιουργείται το ηλεκτρικό τόξο). Η κίνηση σε World mode επομένως, απαιτεί ταυτόχρονη κίνηση πολλών αξόνων προκειμένου να εξασφαλίζεται γραμμικότητα και το ακροφύσιο να κινείται σε ευθείες κατά τους x,y,z άξονες.
- **Tool key/mode:** Παρεμφερής επιλογή με την World με τη διαφορά ότι οι γραμμικές κινήσεις γίνονται με βάση τον προσανατολισμό του ακροφύσιου. Οι άξονες κίνησης δηλαδή δεν είναι οι x,y,z αλλά οι x',y',z' περιστραμμένοι ως προς τους αρχικούς και προσαρμοσμένοι στον προσανατολισμό του ακροφύσιου συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

- **Work key/mode:** Το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο θα κινηθεί ο βραχίονας καθορίζεται είτε από το χειριστή είτε από την IGM. Τέτοια συστήματα συντεταγμένων καλούνται 'εξωτερικά συστήματα συντεταγμένων'.

5.3.2.4 Πλήκτρα Χειροκίνητης Κίνησης (Manual Control Keys)

Βρίσκονται στο δεξί άκρο της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8), στη σχηματική αναπαράσταση του ρομποτικού βραχίονα. Χρησιμοποιούνται για να κινήσουν γραμμικά ή να στρέψουν τα τμήματα του βραχίονα. Κάθε ένα από τα manual control keys χωρίζεται σε δύο τμήματα, ένα για κάθε μια από τις δύο αντίθετες κινήσεις που προκαλεί εφόσον πατηθεί (μπρος-πίσω, κάτω-πάνω κλπ). Τα manual control keys είναι 9 (X,Y,Z,1,2,3,4,5,6). Τα πλήκτρα X,Y,Z δεν χρησιμοποιούνται στη ρομποτική διάταξη του εργαστηρίου. Τα τελευταία κινούν ολόκληρο το ρομποτικό βραχίονα κατά τους άξονες X,Y,Z πάνω σε ειδικές ράγες αν και εφόσον υπάρχει τέτοια εγκατάσταση. Επομένως, από την στιγμή που ο βραχίονας είναι πακτωμένος σε ένα στύλο, δεν μας απασχολούν. Κάθε ένα από τα πλήκτρα 1,2,3,4,5,6 εκτελεί διαφορετικές κινήσεις ανάλογα με το Mode που υπάρχει ως επιλογή (εδάφιο 5.3.2.3).

Πλήκτρο 1: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 1 (σχήμα 5.6) δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα όταν έχει επιλεγθεί κίνηση σε Joint mode. Όταν η κίνηση είναι σε World mode, το ακροφύσιο κινείται γραμμικά κατά τη διεύθυνση Y (υπό την έννοια του πλάτους του βραχίονα).

Πλήκτρο 2: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 2 (σχήμα 5.6) κάτω ή πάνω σε Joint mode ή κινεί γραμμικά το ακροφύσιο κατά τη διεύθυνση Z (κατακόρυφα) σε World mode.

Πλήκτρο 3: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 3 (σχήμα 5.6) κάτω ή πάνω σε Joint mode ή κινεί γραμμικά το ακροφύσιο κατά τη διεύθυνση X (υπό την έννοια του μήκους) σε World mode.

Πλήκτρο 4: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 4 (σχήμα 5.6) δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα σε Joint mode ή προσανατολίζει το ακροφύσιο κατά τη διεύθυνση Y σε World mode.

Πλήκτρο 5: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 5 (σχήμα 5.6) πάνω ή κάτω σε Joint mode ή προσανατολίζει το ακροφύσιο κατά τη Z διεύθυνση σε World mode.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Πλήκτρο 6: Περιστρέφει το ρομποτικό άξονα 6 (σχήμα 5.6) δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα σε Joint mode ή περιστρέφει το ακροφύσιο γύρω από τη θέση TCP σε World mode.

5.3.2.5 Πλήκτρα Ελέγχου (Control Keys):

Βρίσκονται στο αριστερό άκρο της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8). Επιτρέπουν στο χειριστή να ενεργοποιεί-απενεργοποιεί συγκεκριμένες συσκευές και εφαρμογές της ρομποτικής εγκατάστασης. Κάθε ένα από αυτά τα πλήκτρα έχει ενσωματωμένο ένα LED λαμπάκι το οποίο είναι αναμμένο όταν η συγκεκριμένη λειτουργία είναι ενεργή. Τα πλήκτρα αυτά λειτουργούν σε toggle mode, δηλαδή κάθε φορά που πατιούνται εναλλάσσεται η κατάσταση τους από ενεργά σε ανενεργά και αντίστροφα. Υπάρχουν 5 πλήκτρα ελέγχου: **DRIVES,ROB,PROC,SYNC,SENSOR**. Από αυτά για τη ρομποτική διάταξη του εργαστηρίου έχουν νόημα μόνο τα πλήκτρα DRIVES και PROC.

Όταν το πλήκτρο **DRIVES** είναι αναμμένο, οι drives της εγκατάστασης λειτουργούν κανονικά και επομένως μπορεί να κινηθεί ο βραχίονας. Σημειωτέον πως για λόγους ασφάλειας οι drives απενεργοποιούνται αυτόματα στις εξής περιπτώσεις: επαφή του βραχίονα με οποιαδήποτε επιφάνεια, χρήση του emergency stop button και τέλος, άνοιγμα της πόρτας του προστατευτικού κιγκλιδώματος.

Το πλήκτρο **PROC** (από το Process) είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς όταν είναι σβηστό δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση συγκόλλησης. Συνιστάται να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο να είναι σβηστό το συγκεκριμένο πλήκτρο κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού και μόνο μετά από τρέξιμο και επαλήθευση της ορθότητας του εκάστοτε προγράμματος να ενεργοποιείται το PROC.

5.3.2.6 Πλήκτρα προσαύξησης/μείωσης (Increment/Decrement Keys):

Βρίσκονται στην κορυφαία γραμμή της κονσόλας χειρισμού πάνω από τα πλήκτρα FUNC3 και FUNC4 (σχήμα 5.8). Πρόκειται για πλήκτρα πολλαπλών χρήσεων και χρησιμοποιούνται στις εξής 3 περιπτώσεις:

1. Προσαρμογή της ταχύτητας κίνησης του ρομποτικού βραχίονα στο manual mode. Υπάρχουν 3 modes όσον αφορά στη λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα τα οποία επιλέγονται από την εξωτερική κονσόλα ελέγχου: manual mode (χειροκίνητος χειρισμός), test mode και automatic mode. Τα test και automatic modes θα αναλυθούν στο εδάφιο για την εξωτερική κονσόλα ελέγχου. Στο manual mode, ο

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

βραχίονας κινείται με τα πλήκτρα χειροκίνητης κίνησης (manual control keys, εδάφιο 5.3.2.4) σε προκαθορισμένη ταχύτητα. Πατώντας το πλήκτρο προσαύξησης (ή μείωσης) αυτή η προκαθορισμένη ταχύτητα αυξάνεται (ή μειώνεται). Η επιλεγμένη ταχύτητα φαίνεται στην LCD οθόνη στο status field (εδάφιο 5.3.2.1 σχήμα 5.9) ως ποσοστό της μέγιστης δυνατής ταχύτητας κίνησης των αξόνων του βραχίονα (200 m/min). Υπάρχουν 8 διαφορετικές ταχύτητες (2%, 5%, 10%, 18%, 30%, 50%, 75% και 100%) από τις οποίες ο χειριστής μπορεί να επιλέξει αυτή που τον διευκολύνει κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού.

2. Επέκταση των σελίδων του menu page field (σχήμα 5.9) από 8 σε έως και 16.
3. Εισαγωγή αρνητικών τιμών πατώντας πρώτα το πλήκτρο 2nd και έπειτα το πλήκτρο μείωσης.

5.3.2.7 Πλήκτρα επιλογής σελίδας (Page keys):

Βρίσκονται στην κορυφαία γραμμή της κονσόλας χειρισμού, αριστερά από τα πλήκτρα προσαύξησης/μείωσης. Είναι 8 πλήκτρα (Pg1-Pg8) και επιτρέπουν την επιλογή συγκεκριμένης σελίδας μέσα στο εκάστοτε μενού. Ο ρόλος τους θα γίνει πιο κατανοητός στη συνέχεια και ιδιαίτερα κατά την περιγραφή της δημιουργίας ενός προγράμματος (5.4.3).

5.3.2.8 Πλήκτρα Σύνταξης (Edit Keys):

Βρίσκονται στη βάση της LCD οθόνης χειρισμού (σχήμα 5.8). Είναι εξαιρετικά σημαντικά πλήκτρα διότι χρησιμοποιούνται κατά τις διαδικασίες δημιουργίας, διόρθωσης και διαγραφής είτε ολόκληρων προγραμμάτων είτε συγκεκριμένων βημάτων σε ένα πρόγραμμα. Πρόκειται για τα πλήκτρα **STEP⁻**, **STEP⁺**, **GET STEP**, **JOG/WORK/AUX**, **DEL**, **INS**, **CORR** και **ADD**.

Με τα πλήκτρα **STEP⁺**, **STEP⁻**, **GET STEP** εμφανίζεται ένα συγκεκριμένο βήμα από ένα πρόγραμμα χωρίς το τελευταίο να εκτελεστεί. Για παράδειγμα, προκειμένου να εμφανιστεί το 3^ο βήμα ενός προγράμματος 7 βημάτων πληκτρολογείται το πλήκτρο '3' και μετά το 'GET STEP'. Είναι σημαντικό πρώτα να πληκτρολογείται ο αριθμός του βήματος και μετά το πλήκτρο σύνταξης. Έχοντας μεταβεί στο 3^ο βήμα εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία, η μετάβαση στο 2^ο η στο 4^ο βήμα του προγράμματος, γίνεται με τα πλήκτρα STEP⁻ και STEP⁺ αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Κατ' αναλογία, πληκτρολογώντας τον αριθμό ενός βήματος και στη συνέχεια ένα εκ των **DEL, CORR** διαγράφεται ή διορθώνεται το επιλεγμένο βήμα.

Με το πλήκτρο **INS** εισάγεται ένα νέο βήμα αμέσως μετά από το βήμα του οποίου ο αριθμός πληκτρολογήθηκε. Το βήμα που εισάγεται έχει ως αρχικές παραμέτρους (ταχύτητα κίνησης, ένταση ρεύματος, θέση του ακροφύσιου) τις παραμέτρους του αμέσως προηγούμενου βήματος έτσι ώστε να μπορεί να συνεχιστεί η εκτέλεση του προγράμματος.

Το πλήκτρο **JOG/WORK/AUX** είναι ένα από τα σημαντικότερα στην κονσόλα χειρισμού. Έχει δύο βασικές λειτουργίες:

1. Στην αρχή της δημιουργίας ενός προγράμματος, αμέσως μετά την πληκτρολόγηση των κατάλληλων πλήκτρων προκειμένου να δημιουργηθεί ένα νέο πρόγραμμα (5.4.3), το πλήκτρο JOG/WORK/AUX είναι το πρώτο που πρέπει να πατηθεί προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία του προγραμματισμού και να μπορεί ο υπολογιστής της ρομποτικής διάταξης να αποθηκεύει τα βήματα που προγραμματίστηκαν. Σε περίπτωση που γίνει προσπάθεια να αποθηκευτεί οποιαδήποτε κίνηση (με το πλήκτρο ADD) χωρίς να έχει πρώτα πληκτρολογηθεί το πλήκτρο JOG/WORK/AUX, θα εμφανίζονται μηνύματα σφαλμάτων στην οθόνη.
2. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω (εδάφιο 5.4.1.2) υπάρχουν δύο κατηγορίες βημάτων που εκτελεί η ρομποτική διάταξη. Η πρώτη είναι τα βήματα μετάβασης (transition steps ή JOG steps). Κατά τη διάρκεια των JOG steps δεν εκτελείται συγκόλληση αλλά ο βραχίονας κινείται μέχρι να φτάσει στην επιθυμητή θέση για συγκόλληση. Ο τρόπος κίνησης (γραμμικός-μη γραμμικός) και η ταχύτητα κίνησης είναι οι μόνες παράμετροι που καθορίζουμε στα JOG steps.

Η δεύτερη κατηγορία βημάτων που εκτελεί η ρομποτική διάταξη είναι τα λεγόμενα βήματα εργασίας ή βήματα συγκόλλησης (WORK steps). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί συγκόλληση πρέπει να υπάρχει work step σε ένα πρόγραμμα. Οι παράμετροι κατά τον προγραμματισμό ενός work step είναι περισσότερες προφανώς απ'ότι σε jog step καθώς εκτός από την ταχύτητα και τον τρόπο με τον οποίο θα κινηθεί το πιστόλι συγκόλλησης πρέπει να προσδιοριστούν και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, η τάση και το μήκος του ηλεκτρικού τόξου.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Το πλήκτρο **ADD** χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία νέων βημάτων σε ένα πρόγραμμα. Προκειμένου να αποθηκευτεί η κίνηση του βραχίονα από τη θέση A στη θέση B, χρησιμοποιείται το πλήκτρο ADD όταν ο βραχίονας έχει φτάσει στην επιθυμητή θέση (θέση B). Όλες οι παράμετροι του προηγούμενου βήματος αποθηκεύονται στο νέο βήμα και ο αριθμός βημάτων αυξάνεται κατά ένα. Ανεξάρτητα από το ποιο βήμα εμφανίζεται στην οθόνη τη στιγμή που ο βραχίονας κινείται χειροκίνητα, όταν πληκτρολογείται το ADD, το νέο βήμα αποθηκεύεται πάντα ως το τελευταίο βήμα του προγράμματος. Επιπρόσθετα, το πλήκτρο ADD χρησιμοποιείται ως πλήκτρο γενικής αποδοχής. Καθώς δηλαδή σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζονται μηνύματα στην οθόνη, απαιτείται η πληκτρολόγηση του ADD για να ξεκινήσει η συγκεκριμένη διαδικασία, είτε αυτή είναι ενεργοποίηση ήδη υπάρχοντος προγράμματος είτε διαγραφή προγράμματος κλπ. Το πλήκτρο ADD δηλαδή θα μπορούσε να παρομοιαστεί με το 'OK' ενός προσωπικού υπολογιστή.

5.3.2.9 Πλήκτρα FUNC, FN & 2ND:

Τα πλήκτρα **FUNC1 – FUNC4** βρίσκονται στη δεύτερη γραμμή της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8). Συνοπτικά ο ρόλος τους:

FUNC1: Δεν έχει απολύτως καμία λειτουργία.

FUNC2: Αποθηκεύει το εν ενεργεία πρόγραμμα στο σκληρό δίσκο.

FUNC3: Ενεργοποιεί το λεγόμενο local manip menu. Το local manip menu εμπεριέχει διάφορα υπο-menus τα οποία χρησιμοποιούνται για διάφορες ενέργειες μέσα στο πρόγραμμα που βρίσκεται εν ενεργεία.

FUNC4: Ενεργοποιεί ένα μενού επιλογών το οποίο περιέχει παραμέτρους και ρυθμίσεις για όλη την ρομποτική εγκατάσταση.

Το πλήκτρο **FN** είναι το πλήκτρο στην πάνω αριστερή γωνία του αλφαριθμητικού πληκτρολογίου της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8). Ο σκοπός του είναι να παρέχει στα υπόλοιπα πλήκτρα του πληκτρολογίου και στα EDIT πλήκτρα επιπρόσθετες λειτουργίες. Το πλήκτρο FN σε συνδυασμό με άλλα πλήκτρα παρέχει τις λεγόμενες συντομεύσεις. Οι συντομεύσεις χρησιμοποιούνται για ταχύτερο, επομένως αποδοτικότερο προγραμματισμό και χειρισμό του ρομπότ. Το πλήκτρο FN έχει ενσωματωμένο λαμπάκι το οποίο υποδεικνύει τότε είναι ενεργό. Μόλις πατηθεί το πλήκτρο FN, το λαμπάκι ανάβει και για να σβήσει

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

πρέπει να πατηθεί κάποιο άλλο κουμπί υπό την προϋπόθεση πως τα δυο αυτά πλήκτρα δημιουργούν μια συντόμευση. Υπάρχουν διάφορες συντομεύσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού αλλά ίσως η πιο χρήσιμη είναι η 'FN+C'. Πατώντας το πλήκτρο FN και στη συνέχεια το πλήκτρο C, πραγματοποιείται καλιμπράρισμα των αξόνων του βραχίονα, 'τέντωμα' δηλαδή (σχήμα 5.10). Η ενέργεια αυτή είναι απαραίτητη πριν από τη δημιουργία του πρώτου βήματος σε ένα νέο πρόγραμμα.



Σχήμα 5.10: Ο ρομποτικός βραχίονας μετά από καλιμπράρισμα όλων των αξόνων

Το πλήκτρο **2nd** είναι αντίστοιχο με το FN και βρίσκεται 2 θέσεις κάτω από το τελευταίο στο πληκτρολόγιο. Χρησιμοποιείται και αυτό για την δημιουργία συντομεύσεων με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που χρησιμοποιείται και το FN. Μερικές πρακτικές συντομεύσεις για το πλήκτρο 2nd είναι:

2nd + D : Μετάβαση στο menu για την διαγραφή προγραμμάτων.

2nd + N : Δημιουργία νέου προγράμματος.

2nd + S : Αποθήκευση του εν ενεργεία προγράμματος.

5.3.2.10 Πλήκτρα AUTO:

Τα πλήκτρα AUTO βρίσκονται αριστερά από τα πλήκτρα MODE (σχήμα 5.8). Χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση ολοκληρωμένου προγράμματος ή και συγκεκριμένων βημάτων ενός προγράμματος. Τα πλήκτρα AUTO είναι τα **START, STOP, GOTO STEP** και **SINGLE STEP**.

START: Πατώντας αυτό το πλήκτρο, το εν ενεργεία πρόγραμμα θα ξεκινήσει από το βήμα που βρίσκεται τη δεδομένη στιγμή στην οθόνη. Προκειμένου να ξεκινήσει από ένα συγκεκριμένο βήμα, το βήμα αυτό πρέπει να εμφανίζεται στην οθόνη. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί πως σε όλα τα προγράμματα που δημιουργούνται, το πρώτο βήμα είναι πάντα το βήμα No.2! Αυτό συμβαίνει διότι το βήμα No.1 είναι πάντα καταχωρημένο με τη δημιουργία νέου προγράμματος από τον εσωτερικό υπολογιστή του ρομπότ και περιέχει 30 υποβήματα. Επομένως, το πρώτο βήμα που προγραμματίζεται από το χειριστή είναι το δεύτερο και πάντα προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία του προγραμματισμού πληκτρολογείται το πλήκτρο JOG/WORK/AUX (5.3.2.8). Τη στιγμή που ο χειριστής θα πατήσει το πλήκτρο START, το ρομπότ κάνει έλεγχο της σύνταξης του προγράμματος και δεδομένου ότι δεν υπάρχουν λάθη, θα ξεκινήσει να εκτελεί το πρόγραμμα από το βήμα που εμφανίζεται στην οθόνη. Η εκτέλεση του προγράμματος σταματάει είτε όταν το πρόγραμμα φτάσει επιτυχώς στο τέλος του, είτε αν ενδιάμεσα πατηθεί το κουμπί STOP ή το emergency stop, είτε αν προκύψει κάποιο σφάλμα κατά την εκτέλεση του προγράμματος (επαφή του ρομπότ με κάποια επιφάνεια ή άνοιγμα της πόρτας του προστατευτικού κιγκλιδώματος).

STOP: Χρησιμοποιείται από το χειριστή για τη διακοπή της εκτέλεσης ενός προγράμματος. Πατώντας το πλήκτρο STOP το ρομπότ δημιουργεί ένα προσωρινό βήμα στο οποίο αποθηκεύει τις συντεταγμένες του TCP τη στιγμή της διακοπής. Πατώντας ξανά το πλήκτρο START, το ρομπότ συνεχίζει κανονικά την εκτέλεση του προγράμματος ακριβώς από το σημείο στο οποίο σταμάτησε και το προσωρινό βήμα διαγράφεται αυτόματα.

GOTO STEP: Χρησιμοποιείται για τη μετάβαση σε ένα συγκεκριμένο βήμα ενός προγράμματος. Φερειτείν, έστω ότι ο χειριστής έχει μόλις ολοκληρώσει τη σύνταξη ενός προγράμματος 7 βημάτων. Στην οθόνη εμφανίζεται το τελευταίο βήμα, δηλαδή το 7^ο. Προκειμένου να εκτελεστεί το πρόγραμμα από την αρχή, θα πρέπει στην οθόνη να εμφανίζεται το βήμα No.2. Αυτό μπορεί να γίνει ή με τον αντιπαραγωγικό τρόπο του να πληκτρολογηθεί 5 φορές το πλήκτρο STEP ή να χρησιμοποιηθεί το πλήκτρο GOTO STEP.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Αρχικά πρέπει να πατηθεί ο αριθμός του βήματος στο οποίο θέλουμε να μεταβούμε και στη συνέχεια το πλήκτρο GOTO STEP. Έτσι, για να μεταβούμε απευθείας από το τέλος του προγράμματος στην αρχή του, πληκτρολογούμε το 2, ύστερα το GOTO STEP και η οθόνη θα εμφανίσει το 2^ο βήμα του προγράμματος.

SINGLE STEP: Πατώντας αυτό το πλήκτρο, το ρομπότ εκτελεί το βήμα που έπεται του βήματος που εμφανίζεται στην οθόνη. Για να εκτελεστεί ένα συγκεκριμένο βήμα, αρχικά λαμβάνει χώρα η μετάβαση σε αυτό μέσω του πλήκτρου GOTO STEP και στη συνέχεια πληκτρολογείται ο αριθμός του βήματος ακολουθούμενος από το πλήκτρο SINGLE STEP.

5.3.2.11 Πλήκτρα ESC, MAIN και SOFTKEYS:

Βρίσκονται στην πάνω αριστερή γωνία της κονσόλας χειρισμού (σχήμα 5.8).

ESC: Χρησιμοποιείται για την έξοδο από το εκάστοτε υπομενού προς το αρχικό μενού των κατηγοριών JOG και WORK. Επίσης χρησιμοποιείται για να εξαφανίζονται τα διάφορα μηνύματα που εμφανίζει το ρομπότ.

MAIN: Πληκτρολογώντας το πλήκτρο MAIN είναι δυνατή η έξοδος από όλα τα μενού και η οθόνη εμφανίζει το κεντρικό, κύριο μενού.

SOFTKEYS: Εκατέρωθεν της οθόνης, σε δυο στήλες υπάρχουν 16 πλήκτρα αριθμημένα 1-8. Ο αριθμός των πλήκτρων αυτών προκύπτει από το μέγιστο αριθμό επιλογών που μπορεί να έχει ένα μενού. Κάθε μέγεθος σε κάθε μενού επιλογών αντιστοιχεί σε ένα από αυτά τα 16 πλήκτρα. Προκειμένου ο χειριστής να ορίσει την τιμή του μεγέθους που τον ενδιαφέρει (πχ ταχύτητα) πληκτρολογεί την τιμή που επιθυμεί στο αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο και στην συνέχεια καταχωρεί την τιμή που πληκτρολόγησε στο αντίστοιχο μέγεθος μέσω του SOFTKEY που βρίσκεται στο ύψος του μεγέθους αυτού.

5.3.3 Η Εξωτερική Κονσόλα (External Start/Stop Cassette)

Η εξωτερική κονσόλα εκκίνησης/σταματήματος (E/Σ), είναι η διεπαφή που παρέχει ασφάλεια ανεξάρτητα από το σύστημα χειρισμού του ρομπότ. Η διάταξη της φαίνεται στο σχήμα 5.11. Η κονσόλα είναι χωρισμένη στα εξής στοιχεία:

- Γενικά πλήκτρα.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

- Διακόπτη work mode ο οποίος απαιτεί ειδικό κλειδί προκειμένου να αλλάξει η θέση του.
- Διακόπτη bypass ο οποίος επίσης κινείται με κλειδί.
- Οθόνη και πλήκτρα εφαρμογών F1-F6.
- Emergency Stop.



Σχήμα 5.11: External Start/Stop Cassette

Γενικά Πλήκτρα:

1. **Drives On:** Προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι drives πρέπει το ρομπότ να βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία δεν υπάρχει κανένα σφάλμα

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

στη λογική ασφαλείας ή στο χειρισμό του ρομπότ. Στο σχήμα 5.11 οι drives είναι ενεργοποιημένοι και το πλήκτρο Drives On είναι φωτισμένο.

2. **Drives Off:** Απενεργοποιεί όλους τους drives ταυτόχρονα.
3. **STOP:** Διακόπτει (σταματάει) την εκτέλεση του προγράμματος.
4. **START1 – START6:** Σε κάθε ένα από αυτά τα πλήκτρα μπορεί να αποθηκευτεί ένα πρόγραμμα συγκόλλησης. Δεδομένου ότι υπάρχει αποθηκευμένο πρόγραμμα σε ένα τέτοιο πλήκτρο, πατώντας το ξεκινάει η εκτέλεση του προγράμματος.

Διακόπτης για την αλλαγή του τρόπου (mode) συγκόλλησης:

Πρόκειται για το διακόπτη στην κάτω και αριστερή γωνία της κονσόλας. Χρησιμοποιείται προκειμένου ο χειριστής να επιλέξει μεταξύ τριών modes εργασίας με τα οποία μπορεί να λειτουργήσει το ρομπότ. Τα τρία αυτά modes είναι τα: Manual ή Programming (θέση 'M'), Test (θέση 'T') και Automatic (θέση 'A'). Η θέση 'S' δεν χρησιμοποιείται.

MANUAL mode: Χρησιμοποιείται όταν προγραμματίζουμε ένα νέο πρόγραμμα. Στο Manual Mode, τα προγράμματα εκτελούνται σε χαμηλότερη ταχύτητα από ότι στο Test ή στο Automatic mode. Ο περιορισμός στην ταχύτητα βέβαια αφορά μόνο τα JOG steps στα οποία δεν ορίζει ο χειριστής την ταχύτητα (non linear JOG steps).

TEST mode: Μετά την ολοκλήρωση και την εκτέλεση ενός προγράμματος σε Manual mode, προτείνεται η εκτέλεσή του και σε κανονική ταχύτητα. Ωστόσο, επειδή μπορεί να χρειάζονται μερικές επιπρόσθετες αλλαγές, ο χειριστής πρέπει να έχει την δυνατότητα να δουλεύει και με μειωμένη ταχύτητα για λόγους ασφαλείας. Αυτόν το σκοπό εξυπηρετεί το Test mode. Σε αυτό το mode, οι drives ενεργοποιούνται μόνο εφόσον ένας από τους δύο πλαϊνούς διακόπτες ασφαλείας στην κονσόλα χειρισμού (teach pendant) είναι πατημένος. Σε περίπτωση που ο χειριστής θέλει να σταματήσει ακαριαία την εκτέλεση του προγράμματος, πρέπει απλώς να αφήσει ελεύθερο τον πλαϊνό διακόπτη ασφαλείας.

AUTOMATIC mode: Εκτελεί το πρόγραμμα σε κανονική ταχύτητα. Συνίσταται να χρησιμοποιείται μόνο αφού έχει εκτελεστεί το πρόγραμμα σε manual και test mode πρώτα. Δεν απαιτείται να είναι πατημένοι οι πλαϊνοί διακόπτες ασφαλείας. Σημειωτέον πως για να εκτελεστεί ένα πρόγραμμα με τα πλήκτρα START1-START6 ο διακόπτης πρέπει να είναι στο Automatic mode.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

Διακόπτης Bypass:

Ο διακόπτης αυτός βρίσκεται αριστερά από το πλήκτρο STOP και μπορεί να έχει 3 πιθανές θέσεις. Θέση 'Ο' όπου δεν πραγματοποιεί καμία λειτουργία και τις θέσεις I και II.

Θέση I: Γενικά, ο ρομποτικός βραχίονας είναι προγραμματισμένος έτσι ώστε να υπάρχουν περιορισμοί στις κινήσεις των αξόνων του για λόγους ασφαλείας. Υπό κανονικές συνθήκες δηλαδή, αν πραγματοποιηθεί μια λανθασμένη λειτουργία και κάποιος άξονας του βραχίονα φτάσει ή και ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια κίνησης, οι drives απενεργοποιούνται αυτόματα και εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος στην οθόνη του teach pendant. Προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι drives ξανά και να μετακινηθεί ο άξονας που δημιούργησε το πρόβλημα εντός του επιτρεπτού πεδίου λειτουργίας, ο διακόπτης πρέπει να βρίσκεται στη θέση 'I'. Με αυτό τον τρόπο παραβλέπονται οι περιορισμοί στις κινήσεις των αξόνων και έτσι επιτρέπεται η κίνησή τους εντός των ορίων λειτουργίας μέσω του teach pendant. Επειδή οι περιορισμοί στις κινήσεις των αξόνων είναι καλό να υπάρχουν κυρίως για να μην προκύψει βλάβη στον βραχίονα, ο διακόπτης δεν 'κλειδώνει' στην θέση I. Πρέπει δηλαδή προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία, ο χειριστής να κρατά παρατεταμένα τον διακόπτη στην θέση I και ταυτόχρονα να επαναφέρει τον άξονα εντός του πεδίου λειτουργίας.

Θέση II: Σε αντιστοιχία με την θέση I, η θέση II απενεργοποιεί και αυτή ένα μηχανισμό ασφαλείας. Το πιστόλι συγκόλλησης έχει ενσωματωμένο ένα διακόπτη ο οποίος αντιλαμβάνεται πότε πραγματοποιείται επαφή του πιστολιού με κάποια επιφάνεια. Μόλις γίνει αυτό οι drives απενεργοποιούνται αυτόματα και εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος στο teach pendant. Αν ο διακόπτης βρεθεί στη θέση II, απενεργοποιείται ο παραπάνω μηχανισμός ασφαλείας.

Emergency stop button:

Βρίσκεται στην κάτω δεξιά γωνία της εξωτερικής κονσόλας. Μόλις πατηθεί, σταματάει κάθε διαδικασία και απενεργοποιεί τους drives ακαριαία. Προκειμένου να επανέλθει στην αρχική του θέση απαιτείται τράβηγμα και ελαφριά περιστροφή στην άνω θέση.

Ενεργοποίηση των drives μετά από διακοπή:

Όλα τα πλήκτρα αναγκαστικής διακοπής προγράμματος (emergency stop buttons), οι διακόπτες ασφαλείας περιορισμού κινήσεων και γενικά όλες οι ασφαλιστικές δικλίδες που διαθέτει η ρομποτική διάταξη για την αποφυγή ατυχημάτων συνδέονται με ένα κύκλωμα ασφαλείας το οποίο βρίσκεται μέσα στον υπολογιστή του ρομπότ. Αν οποιοδήποτε από τα παραπάνω στοιχεία διακόψει αυτό το κύκλωμα, οι drives απενεργοποιούνται αυτόματα.

Στην περίπτωση που γίνει το παραπάνω, το πλήκτρο 'DRIVES ON' ενώ είναι φωτεινό όταν οι drives είναι ενεργοποιημένοι (σχήμα 5.11), σβήνει και στην οθόνη της εξωτερικής κονσόλας εμφανίζεται ένα μήνυμα σφάλματος. Σε αυτήν την περίπτωση προκειμένου να ενεργοποιηθούν ξανά οι drives απαιτούνται τρεις πράξεις:

1. Κατανόηση του σφάλματος το οποίο οδήγησε σε διακοπή του κυκλώματος και διόρθωση του. Τέτοια σφάλματα μπορεί να είναι η επαφή του ακροφύσιου σε κάποια επιφάνεια, το άνοιγμα της πόρτας του προστατευτικού κιγκλιδώματος ή απλώς το πάτημα κάποιου πλήκτρου αναγκαστικής διακοπής. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να διορθωθεί το σφάλμα πριν προχωρήσουμε στο βήμα 2.
2. Αφού διορθωθεί το σφάλμα για το οποίο προέκυψε η απενεργοποίηση των drives, πρέπει να πατηθεί το πλήκτρο 'STOP' στην εξωτερική κονσόλα παρατεταμένα. Με αυτόν τον τρόπο ο υπολογιστής του ρομπότ καταλαβαίνει πως αναγνωρίσαμε και διορθώσαμε το λάθος. Στην οθόνη της εξωτερικής κονσόλας ενώ μετά τη διακοπή των drives αναβοσβήνει ένα μήνυμα, αν το βήμα 1 έχει εκτελεστεί σωστά και πατηθεί παρατεταμένα το πλήκτρο 'STOP', το μήνυμα αλλάζει και δεν αναβοσβήνει πια.
3. Μετά την σταθεροποίηση του μηνύματος στην οθόνη της εξωτερικής κονσόλας, πρέπει να πληκτρολογηθεί το πλήκτρο 'DRIVES ON', το οποίο και φωτίζεται ξανά για να ειδοποιήσει πως ενεργοποιήθηκαν οι drives.

5.4 Βασικός Προγραμματισμός του Ρομποτικού Βραχίονα

5.4.1 Εισαγωγή

5.4.1.1 Βασικοί Κανόνες

Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε εργασίας προγραμματισμού ο χειριστής/προγραμματιστής πρέπει να έχει κατά νου μερικούς βασικούς κανόνες:

- Όταν ένα πλήκτρο της κονσόλας χειρισμού πατηθεί σωστά κάνει ένα χαρακτηριστικό ήχο. Στις περιπτώσεις σημαντικών εντολών όπως φερειπείν στην προσθήκη νέου βήματος σε κάποιο πρόγραμμα με το πλήκτρο ADD, εκτός από την ηχητική ειδοποίηση υπάρχει και αντίστοιχο μήνυμα στην οθόνη της κονσόλας χειρισμού.
- Ένα νέο πρόγραμμα πρέπει να εκτελείται πάντα στο Manual mode της εξωτερικής κονσόλας χειρισμού, δηλαδή με μειωμένη ταχύτητα προς αποφυγή ατυχημάτων.
- Το πλήκτρο **PROC** ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την επικοινωνία του βραχίονα με την μηχανή συγκόλλησης. Μετά από κάθε εκκίνηση του συστήματος το PROC είναι πάντα ενεργοποιημένο. Για λόγους ασφαλείας το πλήκτρο PROC πρέπει να απενεργοποιείται πάντα κατά τη διάρκεια της δημιουργίας ενός νέου προγράμματος.
- Όταν για οποιονδήποτε λόγο οι drives απενεργοποιηθούν, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καμία κίνηση. Ο χειριστής πρέπει να φροντίσει να κάνει τις κατάλληλες ενέργειες για να επαναενεργοποιήσει τους drives (εδάφιο 5.3.3).

5.4.1.2 Βήματα Μετάβασης & Βήματα Συγκόλλησης

Κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος, κάθε κίνηση του ρομπότ προκύπτει από ένα προγραμματισμένο βήμα. Τα βήματα αυτά μπορεί να είναι είτε βήματα μετάβασης του ακροφύσιου από ένα σημείο του χώρου σε κάποιο άλλο, είτε βήματα κατά τα οποία το ρομπότ πραγματοποιεί συγκόλληση. Τα βήματα μετάβασης είναι πάντα JOG steps και τα βήματα συγκόλλησης είναι πάντα WORK steps. Το σύνολο των κινήσεων που πραγματοποιεί το ρομπότ κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης ενός προγράμματος συντίθεται βήμα-βήμα. Αυτό σημαίνει πως η διαδρομή που ακολουθεί το TCP όταν εκτελεί ένα βήμα του προγράμματος, ξεκινά από το σημείο προορισμού (target point) του προηγούμενου βήματος το οποίο είναι ταυτόχρονα σημείο εκκίνησης (start point) για το βήμα που

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

εκτελείται. Το σημείο προορισμού του βήματος που εκτελείται είναι αντίστοιχα το σημείο εκκίνησης του επόμενου βήματος κοκ. Οι παράμετροι της κίνησης (για JOG step) ή της συγκόλλησης (για WORK step) εισάγονται πάντα στο σημείο προορισμού του κάθε βήματος.

Βήματα Μετάβασης: Είναι πάντα JOG steps και χρησιμοποιούνται προκειμένου το ακροφύσιο να φτάσει στο σημείο εκκίνησης της συγκόλλησης το συντομότερο δυνατόν. Ως εκ τούτου, κάθε βήμα κατά το οποίο δεν πραγματοποιείται συγκόλληση καλείται βήμα μετάβασης και σε αυτά τα βήματα δεν καθορίζεται καμία παράμετρος συγκόλλησης (ένταση ρεύματος κλπ). Ωστόσο, τα βήματα αυτά μπορεί να προγραμματιστούν για να πραγματοποιούνται με δυο τρόπους: γραμμικά και μη γραμμικά.

Κατά τη *γραμμική κίνηση*, ο ρομποτικός βραχίονας κινεί το ακροφύσιο πάνω στη νοητή ευθεία μεταξύ του σημείου εκκίνησης και του σημείου προορισμού. Η ταχύτητα με την οποία κινείται το TCP προσδιορίζεται μέσα στο συγκεκριμένο βήμα με μέγιστη δυνατή ταχύτητα τα 200 m/min ή 3.3 m/sec.

Στη *μη γραμμική κίνηση*, ο ρομποτικός βραχίονας κινεί το TCP από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού με το συντομότερο δυνατό τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση το TCP κινείται πάνω σε μια νοητή καμπύλη. Η ταχύτητα με την οποία κινείται ο βραχίονας στην περίπτωση μη γραμμικής κίνησης δεν προγραμματίζεται καθώς το ρομπότ εκτελεί τις κινήσεις αυτές με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Για αυτόν ακριβώς το λόγο είναι εξαιρετικά σημαντικό να δημιουργούνται νέα προγράμματα στο Manual mode της εξωτερικής κονσόλας χειρισμού καθώς έτσι οι κινήσεις μετάβασης πραγματοποιούνται με τη μισή ταχύτητα απ'ότι στο Automatic mode.

Βήματα Συγκόλλησης: Είναι πάντα WORK steps και υπάρχουν δυο κατηγορίες βημάτων συγκόλλησης, γραμμικά και κυκλικά. Σε ένα WORK step το ρομπότ εκτελεί συγκόλληση. Οι παράμετροι που αφορούν την ένταση του ρεύματος, την ταχύτητα συγκόλλησης κλπ, εισάγονται στο σημείο προορισμού της ραφής συγκόλλησης.

5.4.2 Χρήσιμα Μενού Επιλογών

5.4.2.1 Το κεντρικό Μενού (Main Menu)

Το πρώτο μενού που εμφανίζεται στην οθόνη της κονσόλας χειρισμού μετά την ενεργοποίηση της ρομποτικής διάταξης είναι το κεντρικό μενού. Το μενού αυτό αποτελεί το εναρκτήριο σημείο για όλες τις περαιτέρω ενέργειες που αφορούν το χειρισμό και τον προγραμματισμό του ρομπότ. Ο χειριστής μπορεί να επαναφέρει το κεντρικό μενού στην οθόνη ανά πάσα στιγμή πατώντας το πλήκτρο MAIN. Το κεντρικό μενού έχει 7 επιλογές:

1. Step menu.
2. Installation Parameters.
3. Diagnose.
4. System Utilities.
5. Ext.Start Monitor.
6. Save Parameter.
7. Load Parameter.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας η μόνη επιλογή που χρησιμοποιήσαμε ήταν η πρώτη, δηλαδή η μετάβαση σε 'Step menu'. Οι υπόλοιπες επιλογές απευθύνονται σε επαρκώς εκπαιδευμένο προσωπικό και δεν σχετίζονται τόσο με τη δημιουργία προγράμματος για συγκόλληση όσο με τις παραμέτρους εγκατάστασης του ρομπότ. Επομένως θα αναλυθεί μόνο η επιλογή 'Step Menu' από το κεντρικό μενού.

5.4.2.2 Το Step Menu

Service Menu: Επιλέγοντας την επιλογή 'Step Menu' στο κεντρικό μενού, αν δεν υπάρχει κανένα πρόγραμμα εν ενεργεία, στην οθόνη εμφανίζεται το λεγόμενο Service Menu. Όλα τα πλήκτρα λειτουργούν κανονικά και οι άξονες του ρομπότ μπορούν να κινηθούν χρησιμοποιώντας τα πλήκτρα χειροκίνητης κίνησης (5.3.2.4). Οποιαδήποτε επόμενη πράξη, είτε καλιμπράρισμα αξόνων είτε δημιουργία νέου προγράμματος, ξεκινάει από αυτό το μενού.

5.4.2.3 Η σελίδα I/O του Step Menu:

Πληκτρολογώντας το πλήκτρο FUNC4 όταν το Step Menu εμφανίζεται στην οθόνη, πραγματοποιείται μετάβαση στη σελίδα I/O (File In – Out). Η σελίδα αυτή περιέχει όλες τις

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

επιλογές που απαιτούνται για τη διαχείριση προγραμμάτων. Συγκεκριμένα, παρέχει τις εξής επιλογές:

1. Load: Φορτώνει και ενεργοποιεί ένα ήδη υπάρχον πρόγραμμα από το σκληρό δίσκο ή τη δισκέτα που χρησιμοποιείται για αποθήκευση στη μνήμη του συστήματος. Η ίδια ενέργεια πραγματοποιείται και με τη συντόμευση 2nd + L.
2. Save: Αποθηκεύει ένα πρόγραμμα από τη μνήμη του συστήματος στο σκληρό δίσκο ή τη δισκέτα. Υπάρχουν 2 συντομεύσεις για την αποθήκευση προγράμματος. Είτε 2nd + S, είτε FUNC2.
3. Save As: Αποθηκεύει το τρέχον πρόγραμμα με διαφορετικό όνομα.
4. New: Δημιουργεί νέο πρόγραμμα. Χρησιμοποιείται και η συντόμευση 2nd + N.
5. Delete: Διαγράφει ένα πρόγραμμα. Συντόμευση 2nd + D.

5.4.2.4 To JOG Menu:

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω (5.4.1.2) τα βήματα JOG είναι βήματα μετάβασης και δεν πραγματοποιείται συγκόλληση κατά την εκτέλεση τους. Το JOG menu συνίσταται από 4 σελίδες (BAS,FUNC,SCTX,COO) αλλά η μόνη σελίδα στην οποία τίθενται οι παράμετροι είναι η BAS (Basic), δηλαδή η βασική σελίδα του μενού. Στη βασική σελίδα του JOG menu ρυθμίζονται διάφορες παράμετροι με τις εξής 5 επιλογές:

1. JOG STEP: Επιλέγεται το αν η μετάβαση θα γίνεται γραμμικά (linear) ή μη γραμμικά (non linear).
2. Velocity: Ορίζεται η ταχύτητα κίνησης στην περίπτωση που έχει επιλεγθεί γραμμική κίνηση καθώς στη μη γραμμική είναι εξ ορισμού η μέγιστη που επιτρέπει το mode της εξωτερικής κονσόλας χειρισμού.
3. Delay: Επιλέγονται τα δευτερόλεπτα που θα καθυστερήσει το ρομπότ μέχρι να κινήσει το TCP από το σημείο εκκίνησης του συγκεκριμένου βήματος προς το σημείο προορισμού.
4. Passpoint Type: Επιλογή για να εξομαλυνθεί η μετάβαση από το ένα βήμα στο άλλο.
5. Extension: Καλεί προεκτάσεις και υπομενού με επιπλέον επιλογές για JOG steps.

5.4.2.5 To Work Menu:

Τα βήματα WORK είναι εξ ορισμού βήματα κατά τα οποία εκτελείται συγκόλληση. Η συγκόλληση προγραμματίζεται μέσα από τις διάφορες επιλογές των σελίδων του WORK menu.

Το Work Menu διαθέτει 8 σελίδες η κάθε μια από τις οποίες ενεργοποιείται με το αντίστοιχο πλήκτρο PAGE (5.3.2.7). Από αυτές τις 8 σελίδες κατά τον προγραμματισμό για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήσαμε 2, τη BAS και τη TDEV.

Σελίδα BAS:

Η σελίδα BAS ενεργοποιείται με το πλήκτρο Pg1 (page 1) του Work menu. Σε αυτή τη σελίδα ο χειριστής μπορεί να ρυθμίσει 5 παραμέτρους της συγκόλλησης:

1. WORK Step: Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα επιλογής τρόπου κίνησης του πιστολιού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Υπάρχουν οι επιλογές Linear (γραμμική), Linear Weaving (γραμμική με ταλάντωση), Linear Weaving Reverse (γραμμική ανάστροφη με ταλάντωση), Circular (κυκλική), Circular Weaving (κυκλική με ταλάντωση), Circular Weaving Reverse (κυκλική ανάστροφη με ταλάντωση). Η πλειονότητα των πειραμάτων έγινε με γραμμική κίνηση.
2. Velocity: Ταχύτητα εκτέλεσης της συγκόλλησης (σε cm/min).
3. Delay: Μόλις το ρομπότ φτάσει στο σημείο εκκίνησης της συγκόλλησης αν ορίσουμε χρόνο καθυστέρησης, θα συγκολλά για το χρόνο αυτό πάνω από το ίδιο σημείο.
4. Weaving Frequency: Συχνότητα ταλαντώσεων ανά λεπτό στην περίπτωση συγκόλλησης με ταλάντωση.
5. Extension: Πρόσβαση σε μενού με επιπρόσθετες επιλογές για την συγκόλληση όπως πολλαπλά πάσα και άλλα.

Σελίδα TDEV:

Η σελίδα TDEV (Technology Device) χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των ουσιαστικότερων παραμέτρων συγκόλλησης και ενεργοποιείται με το πλήκτρο Pg3 στο WORK menu. Στη σελίδα αυτή, ο χειριστής έχει τη δυνατότητα ρύθμισης των εξής παραμέτρων:

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

1. Arc Length Correction: Διόρθωση της τάσης του ηλεκτρικού τόξου διατηρώντας τον ίδιο ρυθμό τροφοδοσίας ηλεκτροδίου. Η διόρθωση είναι το πολύ μέχρι 20% (+/-) της τάσης που εφαρμόζεται.
2. Power (%): Ορίζεται η ένταση του ρεύματος με την οποία θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μηχανής συγκόλλησης. Αυτή η παράμετρος καθορίζει την τάση συγκόλλησης και το ρυθμό τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου.
3. Pulsing (On/Off): Ενεργοποιεί/Απενεργοποιεί την παροχή παλλόμενου ρεύματος.

5.4.3 Δημιουργία και Εκτέλεση Προγράμματος

Στα προηγούμενα εδάφια έγινε λεπτομερής περιγραφή όλων των πλήκτρων της κονσόλας χειρισμού και των βασικών εφαρμογών τους. Στο παρόν εδάφιο θα καταγραφεί βήμα-βήμα η διαδικασία δημιουργίας και εκτέλεσης ενός προγράμματος.

1. **Εκκίνηση** της ρομποτικής διάταξης θέτοντας τον κεντρικό διακόπτη στην θέση 'I'. Αναμονή περί το ένα λεπτό μέχρι να φωτίσει η οθόνη στην κονσόλα χειρισμού.
2. **Ενεργοποίηση των drives** πατώντας το κουμπί 'DRIVES ON' στην εξωτερική κονσόλα. Από τη στιγμή που το πλήκτρο 'DRIVES ON' είναι φωτεινό, το ρομπότ μπορεί να κινηθεί μέσω των πλήκτρων χειροκίνητης κίνησης (5.3.2.4). Το mode switch στην εξωτερική κονσόλα πρέπει να βρίσκεται στην θέση M (manual).
3. **Δημιουργία νέου προγράμματος**. Αυτή τη στιγμή η οθόνη της κονσόλας χειρισμού βρίσκεται στο κεντρικό μενού (main menu). Επιλέγοντας την επιλογή 1 δηλαδή 'Step menu' οδηγούμαστε στο Service menu (5.4.2.2), ένα μενού το οποίο επειδή δεν υπάρχει εν ενεργεία πρόγραμμα φαίνεται κενό. Πληκτρολογώντας το πλήκτρο FN4, εμφανίζεται το μενού της σελίδας I/O του Step menu (5.4.2.3). Επιλέγεται η επιλογή 4 δηλαδή 'New' και εμφανίζεται ένα νέο μενού στο οποίο πληκτρολογείται το όνομα του προγράμματος που δημιουργείται. Έπειτα πληκτρολογείται το Softkey '1' (5.3.2.11) από την αριστερή μεριά της οθόνης για να καταχωρηθεί το όνομα του προγράμματος. Το όνομα του προγράμματος που ορίστηκε έχει κατοχυρωθεί και πλέον πληκτρολογώντας το 'ADD' δημιουργείται το νέο πρόγραμμα.
4. Η πρώτη κίνηση που λαμβάνει χώρα στο μενού του νέου προγράμματος είναι το **καλιμπράρισμα των αξόνων**. Χρησιμοποιώντας την συντόμευση FN+C,

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης

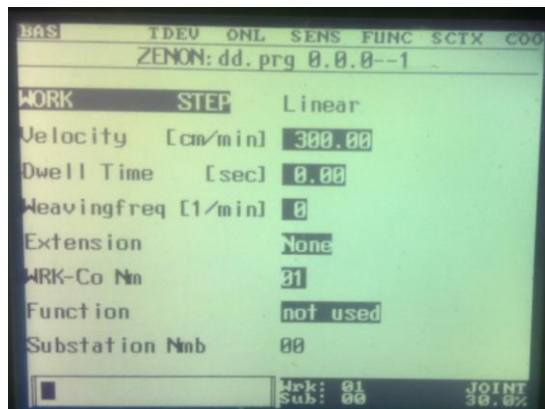
καλιμπράρονται οι άξονες του ρομπότ χωρίς να αλλάξει κάτι στην οθόνη πέρα από το αυτόματο μήνυμα που εμφανίζεται για να ενημερώσει ότι το καλιμπράρισμα έγινε επιτυχώς. Το μήνυμα αυτό το εξαφανίζεται είτε με το πλήκτρο 'OK' είτε με το πλήκτρο 'ESC'.

5. Έχοντας καλιμπράρει τους άξονες επιτυχώς, πληκτρολογείται το πλήκτρο '**JOG/WORK/AUX**' (5.3.2.8) και στην οθόνη εμφανίζεται το JOG menu.
6. Από το σημείο αυτό και στη συνέχεια ο σκοπός του προγραμματιστή είναι ο **προσανατολισμός του ακροφύσιου στη θέση εκκίνησης της συγκόλλησης**. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα ή και περισσότερα βήματα μετάβασης. Με τα πλήκτρα χειροκίνητης κίνησης ο βραχίονας κινείται είτε σε JOINT είτε σε WORLD mode (5.3.2.3) μέχρι το TCP να βρεθεί ακριβώς στην επιθυμητή θέση για συγκόλληση. Μόλις αυτό επιτευχθεί, πληκτρολογείται το πλήκτρο 'ADD' προκειμένου να αποθηκευτεί αυτό το βήμα στο πρόγραμμα.
7. Το επόμενο βήμα, εφόσον το πιστόλι συγκόλλησης βρίσκεται στο σημείο εκκίνησης της συγκόλλησης είναι ο προγραμματισμός του **βήματος συγκόλλησης (WORK step)**. Κατ'αρχάς, πληκτρολογείται το 'JOG/WORK/AUX' για να εμφανιστεί το WORK menu και να μπορεί να οριστεί το επόμενο βήμα ως βήμα συγκόλλησης. Εφόσον πλέον στην οθόνη βρίσκεται το WORK menu (σχήμα 5.13) και είναι βέβαιο πως η κίνηση θα πραγματοποιηθεί σε WORLD mode (ευθύγραμμη κίνηση), το πιστόλι συγκόλλησης κινείται κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης. Σημειωτέον πως η κίνηση αυτή μπορεί να σταματήσει και να συνεχιστεί, ακόμα και να γυρίσει πίσω, μέχρι να έρθει το πιστόλι συγκόλλησης ακριβώς στην επιθυμητή θέση. Μόλις γίνει αυτό, δηλαδή το TCP να είναι ακριβώς στο σημείο προορισμού (ή αλλιώς το τελευταίο σημείο της ραφής) τίθενται οι παράμετροι συγκόλλησης στις σελίδες BAS και TDEV (5.4.2.5). Πληκτρολογείται πρώτα η τιμή της κάθε παραμέτρου και στη συνέχεια το αντίστοιχο Softkey στο οποίο αντιστοιχεί η συγκεκριμένη παράμετρος προκειμένου να κατοχυρωθεί η τιμή που ορίσαμε. Αφού οριστούν όλες οι παράμετροι, το βήμα αυτό προστίθεται στο πρόγραμμα με το πλήκτρο 'ADD'.
8. Δεδομένου ότι η συγκόλληση που θα λάβει χώρα είναι ενός πάσου και προγραμματίστηκε στο προηγούμενο βήμα, σκοπός τώρα είναι η απομάκρυνση του πιστολιού συγκόλλησης από την περιοχή της ραφής. Μέσω του πλήκτρου 'JOG/WORK/AUX' γίνεται η μετάβαση από το WORK menu στο JOG menu και έπειτα

το TCP κινείται μέσω των πλήκτρων χειροκίνητης κίνησης μακριά από τη ραφή (αντίστοιχα με το βήμα 6). Μόλις μετακινηθεί το ρομπότ στην επιθυμητή θέση, προστίθεται και αυτό το βήμα με το 'ADD'.

9. Το πρόγραμμα θεωρητικά έχει ολοκληρωθεί. Δημιουργήθηκε μια σειρά κινήσεων κατά την οποία ο βραχίονας μετακινείται από τη θέση καλιμπραρίσματος στο σημείο εκκίνησης της συγκόλλησης, εκτελεί την συγκόλληση και τέλος απομακρύνεται από τη ραφή σε μία θέση ασφάλειας. Απομένει να **εκτελεστεί όλο το πρόγραμμα από την αρχή προκειμένου να ελεγχθεί την ορθότητα του**. Σε αυτό το σημείο, στην οθόνη εμφανίζεται το τελευταίο βήμα του προγράμματος που δημιουργήθηκε. Προκειμένου να τρέξει το πρόγραμμα από την αρχή, πρώτα πληκτρολογείται η συντόμευση '2 + GET STEP' προκειμένου να εμφανιστεί το βήμα 2 στην οθόνη (θυμίζουμε πως το βήμα 2 είναι το πρώτο βήμα του προγράμματος (5.3.2.10)) και στη συνέχεια πληκτρολογείται το πλήκτρο 'START'. Μετά από μια σύντομη παύση κατά την οποία ο υπολογιστής του ρομπότ ελέγχει την σύνταξη του προγράμματος ξεκινάει η εκτέλεση του προγράμματος σε αργή ταχύτητα (manual mode στην εξωτερική κονσόλα). Όταν το πρόγραμμα ολοκληρωθεί επιτυχώς και είναι πλέον σίγουρο πως εκτελεί τις επιθυμητές κινήσεις, τότε ξεκινά η διαδικασία της συγκόλλησης.
10. **Ενεργοποίηση της μηχανής συγκόλλησης** θέτοντας τον διακόπτη της στην θέση 'I'.
11. **Άνοιγμα της παροχής του προστατευτικού αερίου** από τον κύλινδρο παροχής αερίου. Φροντίζουμε να λάβει χώρα η αποσυμπίεση του συστήματος μέσω του πράσινου πλήκτρου που βρίσκεται στο πίσω μέρος της μηχανής συγκόλλησης και να ρυθμιστεί η παροχή του αερίου στην επιθυμητή τιμή (χειροκίνητα).
12. **Ενεργοποίηση του πλήκτρου PROC** (5.3.2.5).
13. Επαναφορά στην οθόνη του 1^ο βήματος του προγράμματος (2 + GET STEP). Πλέον είναι όλα έτοιμα για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης. Ο χειριστής φροντίζει να φορέσει την προστατευτική μάσκα και πληκτρολογεί START. Το πρόγραμμα θα εκτελεστεί κανονικά και θα πραγματοποιήσει τη συγκόλληση με τις παραμέτρους που ορίστηκαν στο βήμα 7.

Κεφάλαιο 5^ο: Λειτουργία και Χειρισμός του Εξοπλισμού Συγκόλλησης



Σχήμα 5.12: Η σελίδα BAS του WORK menu όπως φαίνεται στην LCD οθόνη της κονσόλας χειρισμού



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

«Πειραματική Διαδικασία»

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

6.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη αναγόμεσης του χάλυβα υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης, X65, με ανοξειδωτο ωστενιτικό χάλυβα. Ο ανοξειδωτος χάλυβας είναι στη μορφή ηλεκτροδίου στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει ειδική σκόνη (Flux) η οποία βοηθάει στην προστασία της συγκόλλησης. Όλες οι εργασίες συγκολλήσεων – αναγομώσεων πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο FCAW (Flux Cored Arc Welding, 1.3.4) με τη χρήση του ρομποτικού βραχίονα της IGM που βρίσκεται στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (Ε.Ν.Τ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Οι εργασίες που έλαβαν χώρα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας χωρίζονται σε δυο μέρη.

Το πρώτο μέρος αφορά στον προγραμματισμό του ρομποτικού βραχίονα. Η γνώση για το χειρισμό και τον προγραμματισμό του ρομπότ προήλθε απ'ευθείας από τα εγχειρίδια χρήσης που παρέχει ο κατασκευαστής. Το συγκεκριμένο εγχείρημα απαιτήσε μελέτη, μεθοδικότητα, χρόνο και προσεκτικό χειρισμό προκειμένου να προγραμματιστεί και να χρησιμοποιηθεί σε καθημερινή βάση, και με ασφάλεια, ο ρομποτικός βραχίονας. Δεδομένου ότι το ρομπότ συγκολλήσεων παρέχει τη δυνατότητα για συγκολλήσεις και αναγομώσεις εξαιρετικά ποιοτικές και ακριβείς, και προκειμένου να πραγματοποιηθούν μελλοντικές εργασίες και μελέτες με τη συγκεκριμένη διάταξη, το κεφάλαιο 5 της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματεύεται αποκλειστικά τον τρόπο λειτουργίας της ρομποτικής διάταξης. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο 5 επεξηγεί ενδελεχώς το χειρισμό του ρομποτικού βραχίονα, ενώ στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου υπάρχει ένα αναλυτικό παράδειγμα που περιγράφει βήμα-βήμα το πώς συντάσσεται και εκτελείται ένα πρόγραμμα για συγκόλληση μονού περάσματος.

Το δεύτερο μέρος του πειραματικού τμήματος της διπλωματικής εργασίας, αποτελείται από το σύνολο των εργασιών που έλαβαν χώρα αφού είχε αποκτηθεί η γνώση για τον προγραμματισμό του ρομπότ. Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν:

- Την προετοιμασία των ελασμάτων του χάλυβα X65 για εργασίες αναγόμεσης.
- Δοκιμαστικά περάσματα με σκοπό τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης και επιλογή των ποιοτικά βέλτιστων ραφών.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

- Κοπή των ελασμάτων του X65 μετά τις εναποθέσεις του ανοξειδωτού ηλεκτροδίου και δημιουργία οκτώ δοκιμών προς μελέτη που προέκυψαν από τις οκτώ βέλτιστες ποιοτικά ραφές.
- Εγκιβωτισμός, λείανση και στίλβωση των δοκιμών.
- Χημική προσβολή των δοκιμών προκειμένου να φανεί η μικροδομή το μετάλλου βάσης.
- Μελέτη της θερμικά επηρεασμένης ζώνης στο ηλεκτρονικό στερεοσκόπιο.
- Μελέτη της μικροδομής της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.
- Μικροσκληρομέτρηση στις διάφορες περιοχές της αναγόμωσης.
- Χημική προσβολή των δοκιμών προκειμένου να φανεί η μικροδομή του ανοξειδωτού χάλυβα.
- Μελέτη της μικροδομής του ανοξειδωτού χάλυβα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

6.2 Μέταλλο Βάσης [1]

Ως μέταλλο βάσης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloyed carbon steel, HSLA) X65.

Ο συγκεκριμένος χάλυβας ανήκει στην κατηγορία των χαλύβων HSLA που χρησιμοποιούνται σε σωληνώσεις υψηλής πίεσης. Οι χάλυβες αυτοί είναι κραματωμένοι με στοιχεία που ενισχύουν τις μηχανικές τους ιδιότητες όπως αντοχή σε εφελκυσμό, σκληρότητα, κλπ. Ενίσχυση των μηχανικών τους ιδιοτήτων προκύπτει επίσης και μέσω θερμομηχανικής επεξεργασίας (Thermo Mechanical Control Processing, TMCP). Επιπρόσθετα, η περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα, στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται από 0.05% σε 0.2% κατά βάρος, με την τάση να μειώνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα με κάθε νέα γενιά χαλύβων για σωληνώσεις.

Τα τελευταία 30 χρόνια, αυξήθηκαν οι απαιτήσεις της αγοράς προς τους κατασκευαστές σωληνώσεων κατ'αναλογία με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται. Σε γενικές γραμμές, για τη μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου, χρησιμοποιούνται διαμήκως συγκολλημένοι σωλήνες μεγάλης διαμέτρου διότι αποτελούν την ασφαλέστερη και ταυτόχρονα οικονομικότερη λύση. Το υλικό κατασκευής των σωληνώσεων μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου πρέπει να ανταποκρίνεται στις

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

απαιτήσεις της αγοράς, δεδομένου ότι αυξάνεται συνεχώς η ζήτηση για αγωγούς με ολόενα και μεγαλύτερες διαμέτρους, τουτέστιν μεγαλύτερες πιέσεις που ασκούνται στο υλικό κατασκευής. Οι χάλυβες που προορίζονται για την κατασκευή σωληνώσεων πρέπει να παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης και των διάφορων μηχανικών καταπονήσεων που θα τους ασκηθούν σε χρονικό ορίζονται 40 ετών τουλάχιστον. Οι απαιτήσεις αυτές καθιστούν απαραίτητο οι χάλυβες σωληνώσεων συνδυάζουν υψηλή αντοχή και υψηλή συγκολλητότητα.

Για την ονοματολογία των συγκεκριμένων χαλύβων κατά API 5L, χρησιμοποιείται το χαρακτηριστικό γράμμα 'X' ακολουθούμενο από δυο νούμερα, φερειπείν X42, X56, X65 κοκ. Τα δυο νούμερα μετά το γράμμα 'X' αναφέρονται στο προδιαγεγραμμένο ελάχιστο όριο διαρροής (Specified Minimum Yield Strength, SMYS) του υλικού, μετρημένο σε ksi (kilopound per square inch). Επομένως, ο χάλυβας της κατηγορίας X65 έχει όριο διαρροής 65 ksi ή 65,000 psi. Η ονοματολογία αυτή προκύπτει με βάση την τυποποίηση API 5L. Ωστόσο, με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN (European Norm), η ονομασία του χάλυβα αλλάζει, και οι μονάδες της αντοχής σε εφελκυσμό από ksi μετατρέπονται σε μονάδες μετρικού συστήματος όπως τα Newtons ανά τετραγωνικό χιλιοστό (N/mm²) ή MegaPascals (MPa). Οι προδιαγραφές των σωληνώσεων στην Ευρώπη βασίζονται στις τιμές μετρημένες σε MPa ή N/mm². Οι απαιτήσεις αντοχής για χάλυβες σωληνώσεων σύμφωνα με τις τυποποιήσεις API 5L και EN 10208 παρουσιάζονται στην εικόνα 6.1.

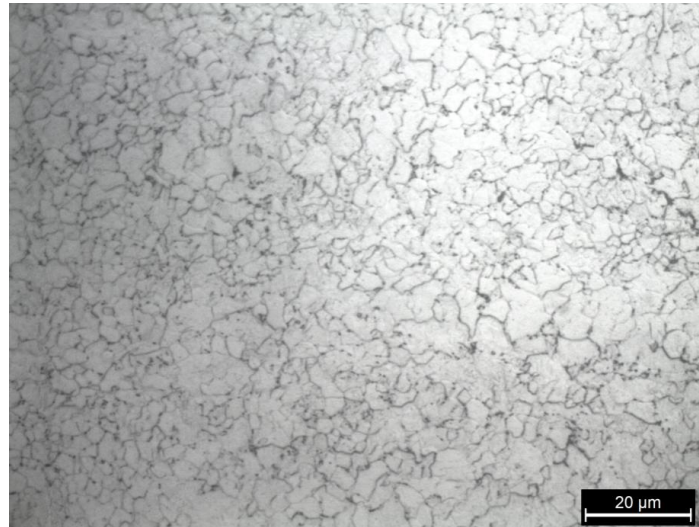
API 5 L Grade	EN 10208 Grade	YS (min)		UTS (min)		Y/T (max)	EI % (min)
		ksi	MPa	ksi	MPa		
A	-	30	207	48	331	0.93	
B	L245	35	241(245) [*]	60	413(415)	0.93 (0.8-0.85)	22.5 (22)
X42	L290	42	289 (290)	60	413 (415)	0.93 (0.85)	22.5 (21)
X46	-	46	317	63	434	0.93	21.5
X52	L360	52	358 (360)	66	455 (460)	0.93 (0.85-0.88)	21.0 (20)
X56	-	56	386	71	489	0.93	19.5
X60	L415	60	413 (415)	75	517 (520)	0.93 (0.85-0.88)	18.5 (18)
X65	L450	65	448 (450)	77	535 (535)	0.93 (0.87-0.90)	18.0 (18)
X70	L485	70	482 (485)	82	565 (570)	0.93 (0.90)	17.0 (18)
X80	L555	80	551 (555)	90	620 (625)	0.93 (0.90)	15.5 (18)

^{*} Figures without parentheses are for API 5L, those in parentheses are for EN10208
^{**} API 5L elongation figures vary with specimen dimensions, those quoted are for 0.2 sq in specimen

Πίνακας 6.1: Απαιτήσεις αντοχής για χάλυβες σωληνώσεων σύμφωνα με API 5L και EN 10208

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

Ο χάλυβας X65, διαθέτει φερριτο-μπαϊνιτική μικροδομή με διάσπαρτες νησίδες περλίτη όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2:



Εικόνα 6.2: Μικροδομή Χάλυβα X65 (μεγέθυνση 100x)

Η μέση σκληρότητα του χάλυβα X65 μετρημένη με τη μέθοδο Vickers είναι $200 \text{ HV}_{0.3}$, ενώ η μέση μικροσκληρότητα του φερρίτη είναι $180 \pm 10 \text{ HV}_{0.3}$, του μπαϊνίτη $220 \pm 10 \text{ HV}_{0.3}$ και του περλίτη $235 \pm 10 \text{ HV}_{0.3}$. Οι σχετικά χαμηλές τιμές μικροσκληρότητας του X65 μπορούν να αποδοθούν στην παρουσία χαμηλού ποσοστού μπαϊνίτη.

Η χημική σύσταση του χάλυβα X65 φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

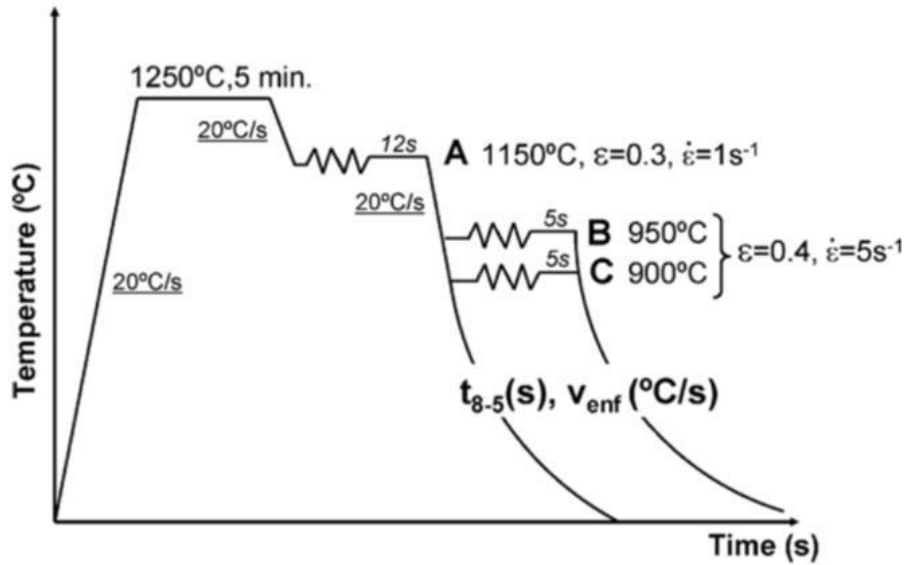
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	N
X65	0.076	0.2	1.46	0.016	<0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	<0.01	0.05	0.006

Πίνακας 6.3: Χημική σύσταση (%κ.θ) του Χάλυβα X65

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της μικροδομής του X65, είναι η παρουσία μικρών και ολίγων περιοχών μαρτενσίτη/ωστενίτη στα όρια των κόκκων μεταξύ φερρίτη και μπαϊνίτη. Η παρουσία των περιοχών μαρτενσίτη/ωστενίτη έχει εντοπιστεί και σε άλλους χάλυβες σωληνώσεων με παρεμφερείς χημικές συστάσεις και μικροδομές. Αξίζει να αναφερθεί πως οι περισσότεροι χάλυβες που προορίζονται για υλικά σωληνώσεων, κατασκευάζονται μέσω

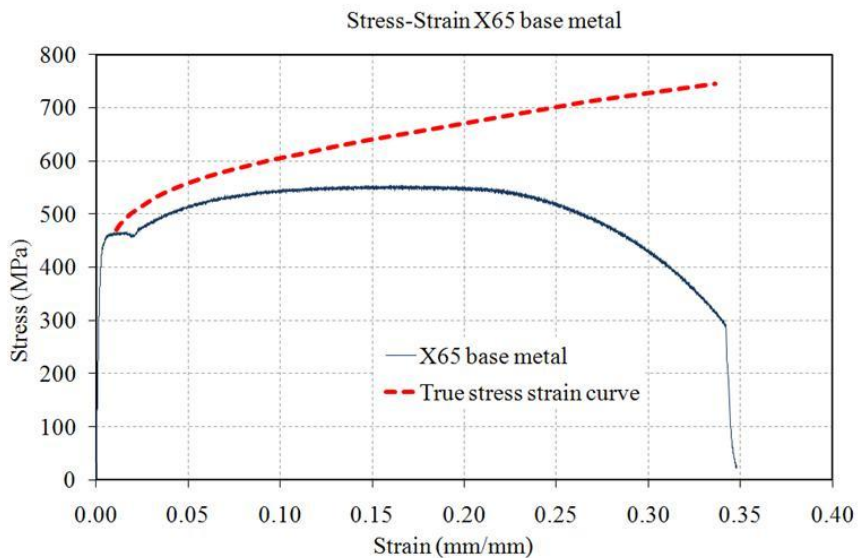
Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

θερμομηχανικών διαδικασιών κατά τις οποίες θερμαίνονται και αποθερμαίνονται όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.4:



Διάγραμμα 6.4: Σχηματική αναπαράσταση της θερμικής κατεργασίας του χάλυβα X65

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τον χάλυβα X65:



Διάγραμμα 6.5: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για τον χάλυβα X65

6.3 Μέταλλο Αναγόμωσης [2]

Το καταναλισκόμενο, ανοξειδωτο ωστενιτικό ηλεκτρόδιο της μεθόδου FCAW (Flux Cored Arc Welding) είναι σε μορφή σωληνοειδούς σύρματος (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Φωτογραφία εγκάρσιας τομής του ηλεκτροδίου από το οπτικό στερεοσκόπιο. 1: Ανοξειδωτος Χάλυβας, 2: Σκόνη Ρουτιλίου

Η εμπορική ονομασία του ηλεκτροδίου όπως αυτή δίνεται από την εταιρεία κατασκευής του (BÖHLER Thyssen® company), είναι BÖHLER EAS 4 M-FD®. Η ονομασία του προστιθέμενου μετάλλου με βάση την τυποποίηση EN ISO 17633-A: 2006 είναι T 19 12 3 L M R (C) 3, ενώ με βάση την τυποποίηση AWS A5.22-95 είναι E316LT0-4. Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου περιείχε σκόνη ρουτιλίου, ενώ η διάμετρος του ήταν 1.2mm, που θεωρείται ιδανική για συγκόλληση ελασμάτων με πάχος μεγαλύτερο από 3mm. Η σύσταση του μεταλλικού περιβλήματος παρουσιάζεται στον πίνακα 6.7 που ακολουθεί:

Σύσταση Μετάλλου Αναγόμωσης											
Στοιχείο	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	N	Cu	Fe
Σύσταση (κ.β.%)	0.029	0.78	1.38	11.94	19.07	2.60	0.008	0.022	0.024	0.17	Bal.

Πίνακας 6.7: Χημική σύσταση του ανοξειδωτου ωστενιτικού ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

Οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου αναγόμενης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.8:

Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλου Αναγόμενης					
Μηχανικές Ιδιότητες στους 20° C	Όριο Διαρροής Rp 0.2% (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Επιμήκυνση μετά την θραύση (%)	Απορροφούμενη ενέργεια στους 20°C (J)	Απορροφούμενη ενέργεια στους -120°C (J)
Τιμή	350	520	30	47	32

Πίνακας 6.8: Μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου αναγόμενης

6.4 Η Πειραματική Διαδικασία

6.4.1 Προετοιμασία Ελασμάτων X65

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα αναγόμενης μέσω συγκόλλησης FCAW στα ελάσματα του χάλυβα X65, τα τελευταία έπρεπε να προετοιμαστούν κατάλληλα. Η προετοιμασία για τη συγκόλληση περιέλαβε τις εξής εργασίες:

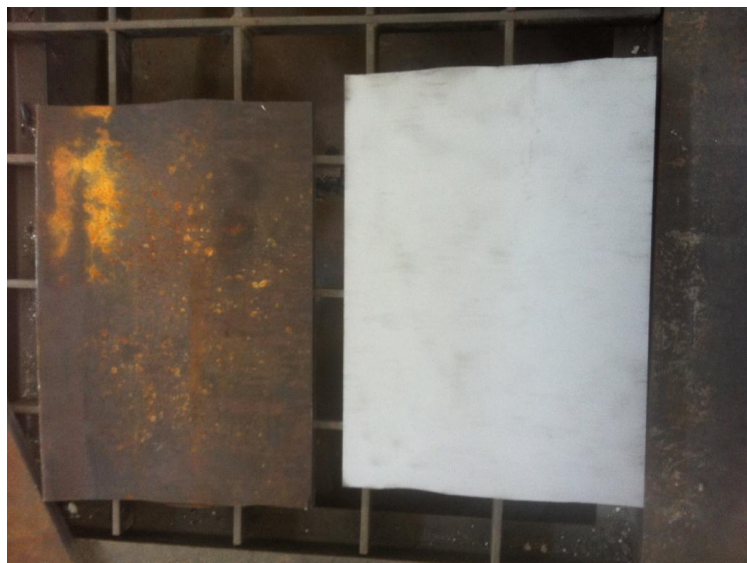
1. *Κοπή* των ελασμάτων που βρισκόντουσαν στο Ε.Ν.Τ του Ε.Μ.Π σε ελάσματα μικρότερων διαστάσεων προκειμένου να μπορεί να διευκολυνθεί η διαδικασία συγκόλλησης. Οι μεγάλες διαστάσεις (80x50x1.2 cm³) των ελασμάτων του χάλυβα X65 πριν την κοπή, δεν ευνοούσαν τη διαδικασία. Η κοπή τους ήταν απαραίτητη προκειμένου να μπορούν να μετακινηθούν ευκολότερα καθώς και να χωρούν στο θάλαμο της αμμοβολής. Η κοπή έγινε σε εξειδικευμένο ελασματουργείο-μηχανουργείο στην περιοχή του Π.Φαλήρου και μετά την κοπή, τα ελάσματα μειωμένων διαστάσεων (40x20x1.2 cm³) μεταφέρθηκαν εκ νέου στο Ε.Ν.Τ του Ε.Μ.Π.
2. *Αμμοβολή* των ελασμάτων με σκοπό την απομάκρυνση του στρώματος διάβρωσης και ακαθαρσιών που είχε σχηματιστεί. Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε στο θάλαμο αμμοβολής SANDBLASTER MS100[®] της εταιρείας ΝΕΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΕ[®]. Η αμμοβολή πραγματοποιήθηκε με πιστόλι τύπου S200, με μπεκ καρβιδίου 7-9mm,

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

σχεδιασμένο για μακρόχρονη διάρκεια λειτουργίας, ελεγχόμενο με ποδοβαλβίδα. Τα χέρια του χειριστή εισέρχονται σε ειδικά ελαστικά γάντια βαρέως τύπου και ελέγχουν το πιστόλι αέρος για τον καθαρισμό των αντικειμένων. Το μηχάνημα διαθέτει επίσης φιλτρορυθμιστή αέρος και μανόμετρο 0-12 bar για την ένδειξη πίεσης του αέρα, ενώ η κατανάλωση του αέρα είναι στα 900 λίτρα/λεπτό όταν η πίεση είναι 6 bar. Προκειμένου να εξασφαλίζει καθαρό και υγιεινό το περιβάλλον του εργασιακού χώρου, το μηχάνημα διαθέτει ειδικό φίλτρο για το διαχωρισμό και την κατακράτηση της σκόνης. Το μηχάνημα αμμοβολής καθώς και τα ελάσματα πριν και μετά την αμμοβολή φαίνονται στις φωτογραφίες 6.9 και 6.10 αντίστοιχα



Εικόνες 6.9: Θάλαμος αμμοβολής SANDBLASTER MS100®.



Εικόνα 6.10: Ελάσματα X65 πριν και μετά την αμμοβολή

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

3. *Καθαρισμός των ελασμάτων.* Μετά το πέρας της διαδικασίας αμμοβολής, τα ελάσματα καθαρίστηκαν προσεκτικά με αιθανόλη και στην συνέχεια στεγνώθηκαν προσεκτικά με θερμό αέρα.

6.4.2 Βελτιστοποίηση Παραμέτρων Συγκόλλησης

Έχοντας αποκτήσει την γνώση για τον προγραμματισμό του ρομποτικού βραχίονα (Κεφάλαιο 5), το επόμενο βήμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η τάση και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος με την οποία θα πραγματοποιηθεί η συγκόλληση.
- Η ταχύτητα με την οποία θα κινείται ο ρομποτικός βραχίονας.
- Η απόσταση του ηλεκτροδίου από το προς συγκόλληση ελάσματα.
- Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου (γωνία μεταξύ του ηλεκτροδίου και των ελασμάτων).
- Η διάμετρος του ηλεκτροδίου (1.2mm).

Ο έλεγχος των παραπάνω μεταβλητών είναι ουσιώδους σημασίας για την πραγματοποίηση ποιοτικών συγκολλήσεων. Δεδομένου ότι οι παράμετροι αυτές δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλαγή μιας εξ αυτών, συνήθως απαιτεί αλλαγή μιας ακόμη ή και περισσότερων προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού των παραπάνω παραμέτρων ήταν ο σκοπός της παρούσας φάσης της πειραματικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 50 δοκιμαστικές αναγομώσεις προκειμένου να καταλήξουμε στους βέλτιστους συνδυασμούς παραμέτρων. Έχοντας καταλήξει σε αυτούς, ξεχωρίσαμε τις 8 καλύτερες ραφές εναπόθεσης πάνω σε πλάκα (Beads On Plate, BOP) και με αυτές συνεχίσαμε στα επόμενα βήματα της πειραματικής διαδικασίας.

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνεται η πειραματική διάταξη πριν, κατά τη διάρκεια, και μετά τις εργασίες συγκόλλησης. Επίσης φαίνεται το σύνολο των bead on plates που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα ποιοτικότερα από αυτά. Τέλος, στον πίνακα 6.17 παρουσιάζονται οι παράμετροι συγκόλλησης υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκε κάθε ένα από τα 8 βέλτιστα BOP's.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

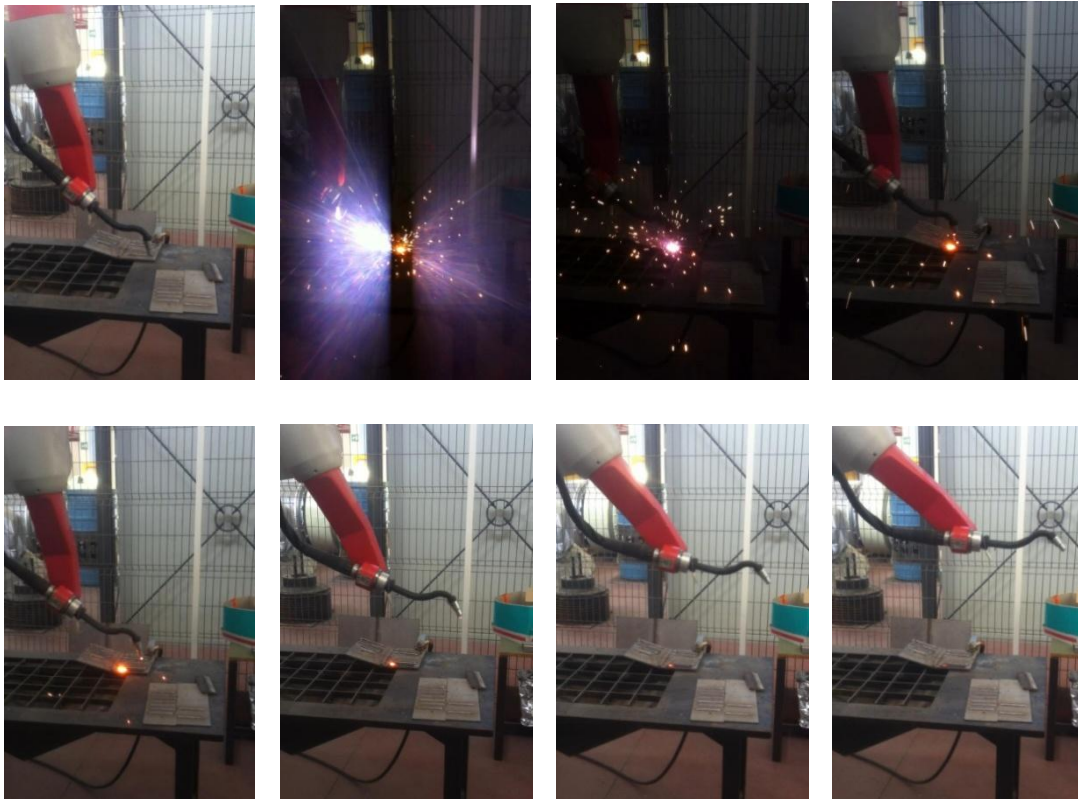


Εικόνα 6.11: Έλασμα του χάλυβα X65 πριν από δοκιμαστικό πέρασμα με το ρομπότ



Εικόνα 6.12: Η ρομποτική διάταξη κατά την διάρκεια των εργασιών

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία



Σχήμα 6.13: Καρέ-καρέ ένα από τα *bead on plates* που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης παραμέτρων



Εικόνα 6.14: Δοκιμαστικά περάσματα κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης παραμέτρων

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία



Εικόνα 6.15: Δοκιμαστικά περάσματα σε ελάσματα χάλυβα X65



Σχήμα 6.16: Βέλτιστα beads on plate (No.6 και No.7) στο χάλυβα X65

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

	Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος (%max)	Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος (A)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (cm/min)	Μήκος Τόξου (cm)	Τάση (Volt)
B.o.p 1	65	210	30	1.5	31
B.o.p 2	63	200	35	1.5	25
B.o.p 3	70	215	30	1.6	31.5
B.o.p 4	65	210	35	1.6	32
B.o.p 5	60	190	30	1.4	26
B.o.p 6	65	210	40	1.6	31.5
B.o.p 7	70	220	35	1.6	31.5
B.o.p 8	60	194	40	1.5	24

Πίνακας 6.17: Παράμετροι συγκόλλησης για τα 8 βέλτιστα *beads on plate*

Όπως διαφαίνεται από τον πίνακα 6.17, οι βέλτιστες τιμές για κάθε παράμετρο συγκόλλησης ήταν οι εξής:

- Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος: 190-220 A.
- Ταχύτητα συγκόλλησης: 30-40 cm/min.
- Μήκος ηλεκτρικού τόξου: ~1.5 cm.
- Τάση: 24-32 Volt.

6.4.3 Κοπή των Ελασμάτων

Τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης και την επιλογή των 8 ποιοτικότερων αναγομώσεων ακολούθησε η κοπή των ελασμάτων. Η κοπή των ελασμάτων έγινε προκειμένου να δημιουργηθούν 8 δοκίμια, ένα για κάθε αναγόμωση, για περαιτέρω μελέτη της μικροδομής τους σύμφωνα με τις διευθύνσεις που φαίνονται στην εικόνα 6.18.



Εικόνα 6.18: α) Διευθύνσεις τομών στο έλασμα του X65, β) Έλασμα X65 μετά τις τομές

Οι αρχικές τομές, παράλληλες με την διεύθυνση των ραφών, πραγματοποιήθηκαν από το ημιαυτόματο μηχανικό πριόνι της εταιρείας CARIF® τύπου 200BA και διαστάσεων 2450x25 mm με ταχύτητα κοπής 30-50 m/min. Προσοχή δόθηκε στο να υπάρχει αρκετή απόσταση μεταξύ των τομών και των ραφών προκειμένου να μη λάβει χώρα διάτμηση της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, γεγονός που θα απέτρεπε την μετέπειτα μελέτη της.



Εικόνα 6.19: Το μηχανικό πριόνι της CARIF®

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

Οι εγκάρσιες τομές πραγματοποιήθηκαν σε δισκοτόμο της εταιρείας Struers®, μοντέλο Discotom 50 (Εικόνα 6.20). Ο δισκοτόμος λειτουργούσε στις 2200 RPM και ταχύτητα προχώρησης 2 mm/min, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή για τα υλικά προς κοπή.



Εικόνα 6.20: Struers Discotom 50[®]

Στην εικόνα 6.21, παρουσιάζονται τα 8 δοκίμια που δημιουργήθηκαν προς περαιτέρω μελέτη.



Εικόνα 6.21: Τα 8 δοκίμια προς περαιτέρω μελέτη

6.4.4 Εγκιβωτισμός, Λείανση και Στίλβωση των Δοκιμίων

Προκειμένου να λάβει χώρα η οπτική μελέτη των δοκιμίων που έχουν προκύψει από την κοπή των ελασμάτων, είναι απαραίτητη η λείανση και η στίλβωσή τους. Προτού λειανθούν τα δοκίμια, λαμβάνει χώρα ο εγκιβωτισμός τους σε ειδική μήτρα η οποία γεμίζει με εποξική ρητίνη και σκληρυντικό μέσο, τύπου Eporfix, σε κατ'όγκον αναλογία 15/2. Απαιτείται προσεκτική μέτρηση των ποσοτήτων της ρητίνης και του σκληρυντή, ακολουθεί καλή ανάμειξη τους και τέλος βύθιση των δοκιμίων μέσα στη ρητίνη. Τα δοκίμια παραμένουν βυθισμένα για περίπου 12 ώρες, έως ότου το μίγμα στερεοποιηθεί.

Οι εποξικές ρητίνες έχουν τη μικρότερη συρρίκνωση από όλες τις ρητίνες ψυχρού εγκιβωτισμού. Ο χρόνος στερεοποίησής τους είναι σχετικά μεγάλος αλλά έχουν εξαιρετική πρόσφυση στα περισσότερα υλικά. Πολυμερίζονται μέσω χημικής αντίδρασης αφού πρώτα αναμειχθούν στις σωστές αναλογίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Μετά την σκλήρυνσή δεν επηρεάζονται από μέτριες θερμοκρασίες και χημικά.

Μετά τον εγκιβωτισμό σε ρητίνη, ακολουθεί η λείανση και η στίλβωση των δοκιμίων.

Η λείανση πραγματοποιείται στο ειδικό μηχάνημα Laborol-5 της εταιρείας Struers (Εικόνα 6.23). Το μηχάνημα έχει δυνατότητα ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας μέσω ενός ειδικού συστήματος κατά το οποίο η γωνιακή ταχύτητα παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την πίεση που ασκείται στο μηχάνημα. Η μηχανή λειτουργεί σε εύρος γωνιακών ταχυτήτων από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό. Για την ψύξη και τη λίπανση της επιφάνειας λείανσης/στίλβωσης χρησιμοποιείται νερό το οποίο παρέχεται από βρύση ενσωματωμένη στη συσκευή λείανσης. Αν και η συσκευή διαθέτει σύστημα συγκράτησης των δοκιμίων για την αυτόματη λείανση των δοκιμίων, αυτό δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί, καθώς η επιφάνεια των δοκιμίων ήταν αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη των υποδοχών της συσκευής.

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη λείανση, η προς λείανση επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου έρχεται σε επαφή με λειαντικά χαρτιά από καρβίδιο του πυριτίου (SiC), τα οποία προσαρμόζονται στη μηχανή λείανσης και περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα της επιλογής μας. Τα χαρτιά διαφέρουν ως προς την τραχύτητά τους, η οποία μετριέται σε grit (dots/in²). Οι ονομασίες των χαρτιών και οι διάμετροι των κόκκων φαίνονται στον πίνακα 6.22. Η διαδικασία της λείανσης ξεκινά με τα πιο τραχιά γυαλόχαρτα και καταλήγει στα πιο λεπτόκοκκα.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

Λειαντικά Χαρτιά (Πρότυπο Fera)	Μέγεθος Κόκκων (μm)
120	120
180	75
220	65
320	46
800	21.8
1000	18.3
1200	15.2
2400	10
4000	5

Πίνακας 6.22: Λειαντικά χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν και μέγεθος κόκκων αυτών

Με τη χρήση κάθε γυαλόχαρτου, δημιουργούνται συγκεκριμένες γραμμές στην επιφάνεια λείανσης, ανάλογα με τον προσανατολισμό του δοκιμίου πάνω στην μηχανή λείανσης. Ο προσανατολισμός του δοκιμίου πρέπει να είναι σταθερός κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, έτσι ώστε οι γραμμές να διαγράφονται ξεκάθαρα πάνω στην επιφάνεια λείανσης. Προκειμένου να είμαστε σίγουροι πως έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της λείανσης με ένα συγκεκριμένο γυαλόχαρτο, πρέπει να μη διακρίνονται στην επιφάνεια του δοκιμίου γραμμές λείανσης από προηγούμενα γυαλόχαρτα. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι να αλλάζει ο προσανατολισμός του δοκιμίου με την αλλαγή κάθε γυαλόχαρτου, ούτως ώστε η διεύθυνση των γραμμών λείανσης να είναι αισθητά διαφορετική ως προς τις προηγούμενες και με αυτό τον τρόπο να είναι ξεκάθαρο τότε εξαφανίζονται τελείως οι γραμμές από τα προηγούμενα χαρτιά. Η χρονική διάρκεια της λείανσης σε κάθε γυαλόχαρτο διαρκούσε περίπου 5 λεπτά. Στα αρχικά στάδια λείανσης επιλέγονται χονδρόκοκκοι λειαντικοί δίσκοι, ενώ στο τελικό στάδιο, μετά και το γυαλόχαρτο 4000, τα δοκίμια λειαινούνται πάνω σε βελούδινο δίσκο στον οποίο τοποθετείται ειδική πάστα αλούμινας (Al_2O_3) μεγέθους κόκκων $1\mu\text{m}$ και $0.1\mu\text{m}$ της εταιρείας Struers®. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται στίλβωση. Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης πρέπει το ύφασμα στίλβωσης να είναι ελαφρά νωπό αλλά η παροχή νερού από τη βρύση πρέπει να ελέγχεται έτσι ώστε να μην ξεπλένεται η πάστα αλούμινας.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία



Εικόνες 6.23(α,β): Μηχανή λείανσης-στίλβωσης Struers Laborpol-5 με α) γυαλόχαρτο 80 grit και β) το βελούδο στίλβωσης με την πάστα αλούμινας

Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών λείανσης και στίλβωσης, τα δοκίμια ξεπλένονται με απιονισμένο νερό, αιθανόλη και στεγνώνονται με θερμό αέρα.



Εικόνες 6.24(α,β): Δοκίμιο πριν (α) και μετά (β) τις διαδικασίες λείανσης-στίλβωσης

6.4.5 Χημική Προσβολή Μετάλλου βάσης

Της διαδικασίας λείανσης και στίλβωσης των δοκιμίων έπεται το στάδιο της χημικής προσβολής τους σε κατάλληλο διάλυμα, με σκοπό να φανεί η μικροδομή τους και να μελετηθούν στο ηλεκτρονικό στερεοσκόπιο και μικροσκόπιο.

Η χημική προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας γίνεται με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού, κυρίως με τη μέθοδο της οπτικής μικροσκοπίας. Με τη χημική προσβολή μιας επιφάνειας, που αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο, τα διαφορετικά συστατικά της επιφάνειας διαβρώνονται επιλεκτικά, με αποτέλεσμα να αντανακλούν διαφορετικά το φως και συνεπώς να εμφανίζονται διαφορετικά στο οπτικό μικροσκόπιο. Έτσι για παράδειγμα όταν ένα συστατικό αντανακλά πλήρως το φως εμφανίζεται να έχει ανοιχτό χρώμα. Η προσβολή γίνεται με εμβάπτιση του υλικού σε κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως με βάση την εμπειρία. Γνωρίζοντας ποιες φάσεις προσβάλλει το αντιδραστήριο που επιλέχθηκε και ποιες όχι, αντιλαμβάνεται κανείς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της δομής.

Το διάλυμα με το οποίο θα γίνει η χημική προσβολή εξαρτάται από το υλικό του οποίου την μικροδομή επιθυμούμε να εξετάσουμε. Σε αυτό το στάδιο, σκοπός μας ήταν να εμφανίσουμε τη μικροδομή του μετάλλου βάσης, δηλαδή του χάλυβα X65, και ταυτόχρονα να μελετήσουμε τη ζώνη αναγόμεσης και τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη της συγκόλλησης.

Για την αποκάλυψη της μικροδομής του χάλυβα X65, τα δοκίμια προσβλήθηκαν σε Nital 2%. Το Nital είναι χημικό διάλυμα το οποίο περιέχει 98% κατ'όγκο καθαρή αιθυλική αλκοόλη (C₂H₆O) και 2% κατ'όγκο νιτρικό οξύ (HNO₃). Η προσβολή διήρκησε 15 δευτερόλεπτα περίπου μέχρι να εμφανιστούν τα όρια των κόκκων του χάλυβα και η μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία



Εικόνα 6.25: Nital

6.4.6 Οπτικό Στερεοσκόπιο

Το στερεοσκοπικό ή ανατομικό μικροσκόπιο, είναι σχεδιασμένο για παρατήρηση χαμηλής μεγέθυνσης ενός δείγματος με τη χρήση φωτισμού προσπίπτοντος φωτός και όχι διαφανοσκόπησης. Χρησιμοποιεί δυο ξεχωριστές οπτικές διαδρομές με δυο στόχους και δυο προσοφθάλμιους φακούς, για να παρέχει ελαφρώς διαφορετικές γωνίες θέασης στο αριστερό και το δεξί μάτι. Με αυτό τον τρόπο παράγει μια τρισδιάστατη απεικόνιση του δείγματος που εξετάζεται. Η στερεομικροσκοπία επικαλύπτει τη μακροφωτογράφιση για την καταγραφή και την εξέταση των στερεών δειγμάτων με σύνθετη τοπογραφία επιφανείας, όπου μια τρισδιάστατη άποψη είναι απαραίτητη για την ανάλυση των λεπτομερειών.

Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται συχνά για τη μελέτη των επιφανειών των στερεών δειγμάτων ή για την εκτέλεση εργασίας σε κοντινή απόσταση. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλους αριθμούς στη βιομηχανία των κατασκευών, τόσο για την κατασκευή, όσο και για την επιθεώρηση και τον έλεγχο της ποιότητας. Τείνουν να αποκτήσουν χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τα συμβατικά μικροσκόπια.

Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι το Leica MZ6 (Εικόνα 6.26) και διαθέτει βηματικές μεγεθύνσεις (x0.63, x0.8, x1.0, x1.25, x1.6, x2.0, x2.5, x3.2, x4.0) για κατάλληλη μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων.

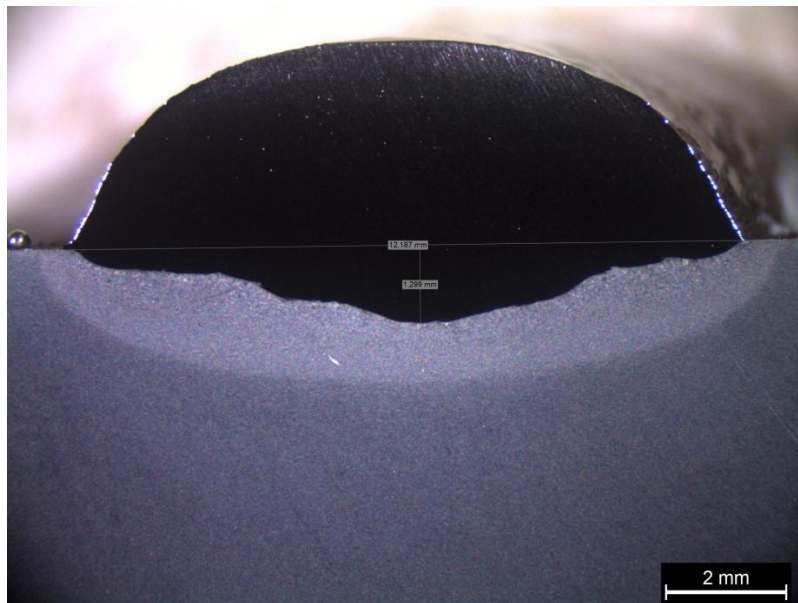
Προσαρμοσμένη στο στερεοσκόπιο, είναι η camera της Sony που με τη σειρά της συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του προγράμματος

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

Image Pro Plus Image Analysis της εταιρείας Media Cybernetics®, που είναι εγκατεστημένο στον συγκεκριμένο υπολογιστή, καθίσταται δυνατή η λήψη και η επεξεργασία ψηφιακών φωτογραφιών κάθε δοκιμίου, σε διάφορες μεγεθύνσεις.



Εικόνα 6.26: Οπτικό στερεοσκόπιο Leica MZ6 του Ε.Ν.Τ. του Ε.Μ.Π



Εικόνα 6.27: Ηλεκτρονική φωτογραφία δοκιμίου στο οπτικό στερεοσκόπιο μετά από χημική προσβολή

6.4.7 Οπτικό Μικροσκόπιο

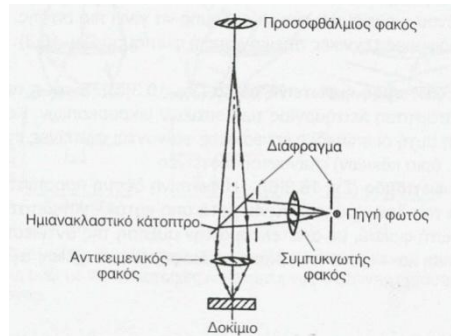
Η οπτική μικροσκοπία (μεταλλογραφία) είναι, εδώ και δεκαετίες, μια πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της μεταλλογραφίας. Προκειμένου να μελετηθεί σωστά στο οπτικό μικροσκόπιο, το μεταλλικό δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να διακρίνεται ξεκάθαρα η μικροδομή του. Το οπτικό μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι το LEICA DM ILM (Εικόνα 6.29). Τα κύρια μέρη του μικροσκοπίου είναι (εικόνα 6.24):

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

Εκτός από τα ανωτέρω, το οπτικό μικροσκόπιο διαθέτει κατάλληλη διάταξη που να επιτρέπει τη στερέωση κάμερας. Η κάμερα αυτή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπως και στην περίπτωση του οπτικού στερεοσκοπίου και με αυτόν τον τρόπο μας παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας των φωτογραφιών στο πρόγραμμα Image Pro Plus Image Analysis (Εικόνα 6.30). Το μικροσκόπιο διαθέτει δυο τύπους μεγεθυντικών φακών: τους αντικειμενικούς και τους προσοφθάλμιους. Οι πρώτοι είναι οι πιο σημαντικοί, γιατί συγκεντρώνουν το ανακλώμενο από το μεταλλικό δοκίμιο φως και συνθέτουν την εικόνα. Είναι συνήθως βιδωτοί και τοποθετούνται σε μια περιστρεφόμενη βάση, η οποία δέχεται τέσσερις φακούς με διαφορετική μεγέθυνση (x10, x20, x50 και x100). Οι προσοφθάλμιοι φακοί έχουν σταθερή μεγέθυνση. Βρίσκονται στο σημείο από το οποίο παρατηρεί ο χρήστης του μικροσκοπίου και μεγεθύνουν την παραγόμενη από τον αντικειμενικό φακό εικόνα, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική μεγέθυνση της παρατηρούμενης εικόνας είναι το γινόμενο της μεγέθυνσης των δυο αυτών φακών.

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

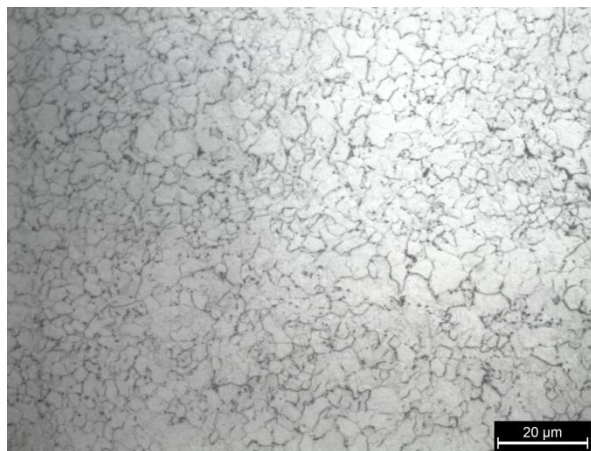
Τέλος, το μικροσκόπιο διαθέτει ειδική τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας (x,y και περιστροφή) με δυνατότητα στήριξης φορτίου και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.



Σχήμα 6.28: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας του οπτικού μικροσκοπίου



Εικόνα 6.29: Οπτικό μικροσκόπιο Leica DM ILM του Ε.Ν.Τ. του Ε.Μ.Π



Εικόνα 6.30: Φωτογραφία οπτικού μικροσκοπίου σε μεγέθυνση x100

6.4.8 Μικροσκληρόμετρο

Ως σκληρότητα ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε μόνιμη παραμόρφωση ή αλλοίωση, όταν έρθει σε επαφή με ένα διεισδυτή υπό κάποιο φορτίο. Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού.

Γενικά, η δοκιμή σκληρότητας πραγματοποιείται με πίεση ενός διεισδυτή γνωστής γεωμετρίας και μηχανικών ιδιοτήτων στο υπό μελέτη δοκίμιο. Ο διεισδυτής μπορεί να είναι σφαιρικός (Brinell), κωνικός (Rockwell), ή να έχει μορφή πυραμίδας (Vickers και Knoop). Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων, τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις.

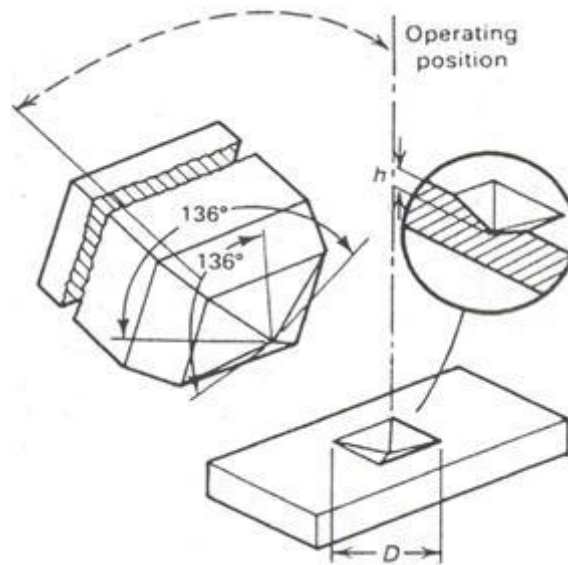
Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας με τη μέθοδο Vickers. Κατά τη μικροσκληρομέτρηση Vickers χρησιμοποιείται ως διεισδυτής αδαμάντινη πυραμίδα τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής $\alpha=136^\circ$ και γνωστή δύναμη που κυμαίνεται από 5-1000gr (Σχήμα 6.31). Η δύναμη εφαρμόζεται σταδιακά και η επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου διαρκεί 10-20 δευτερόλεπτα. Η δύναμη πρέπει να είναι γνωστή επακριβώς (αναφορά στο πρότυπο ASTM E 384 σε ό,τι αφορά τις ανοχές). Μετά την αφαίρεση της δύναμης μετρούνται οι δυο διαγώνιοι και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Vickers σύμφωνα με τη σχέση:

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

Όπου:

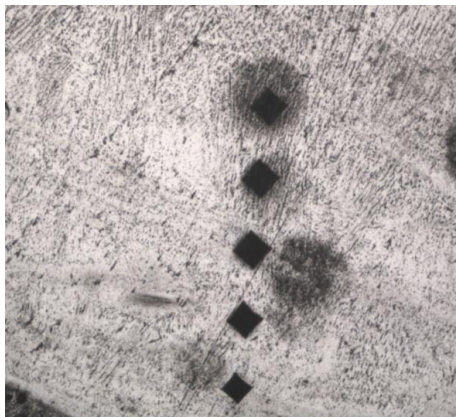
- d: μέσος όρος διαγώνιων σε μm
- α : γωνία κορυφής (136°)
- P: δύναμη σε gr

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία



Σχήμα 6.31: Σχηματική αναπαράσταση μικροσκληρομέτρησης κατά Vickers

Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: το δοκίμιο τοποθετείται στην τράπεζα του οργάνου και μέσω του ενσωματωμένου στο όργανο μικροσκοπίου, γίνεται εστίαση μέχρι να διακριθεί καθαρά η μικροδομή του δοκιμίου. Στη συνέχεια, προγραμματίζονται οι παράμετροι της διείσδυσης όπως ο χρόνος και το φορτίο που θα ασκήσει η πυραμίδα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ακολούθως, εστιάζουμε στο σημείο του δοκιμίου που επιθυμούμε να μετρήσουμε τη σκληρότητα και μετά την εστίαση, πατώντας ένα συγκεκριμένο πλήκτρο μετακινούμε την αδαμάντινη πυραμίδα στη θέση του φακού. Πατώντας το πλήκτρο 'start', η πυραμίδα διεισδύει στην επιφάνεια του υλικού δημιουργώντας ένα αποτύπωμα (Εικόνα 6.32).



Σχήμα 6.32: Αποτυπώματα της αδαμάντινης πυραμίδας στη ζώνη αναγόμωσης

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

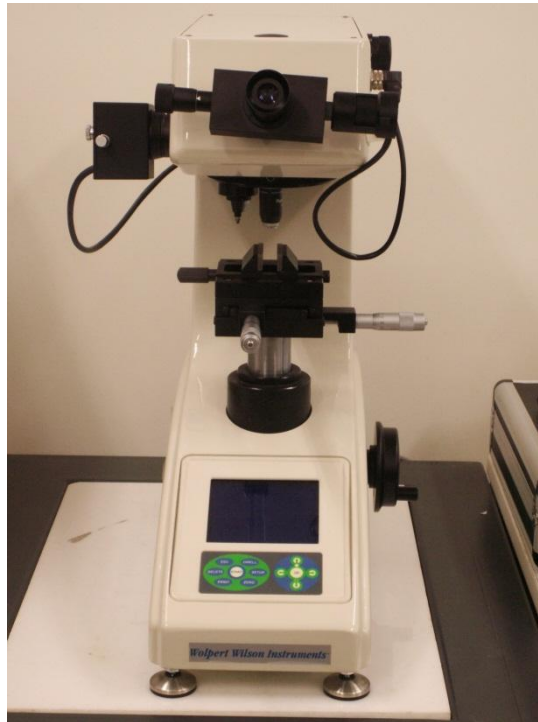
Γυρίζοντας πάλι στο μικροσκόπιο υπολογίζονται (με τη βοήθεια γραμμών) οι διαγωνίοι της πυραμίδας που έχει σχηματιστεί. Τέλος, το λογισμικό υπολογίζει από τις τιμές των διαγωνίων τις τιμές σκληρότητας σε HVN (Hardness Vickers Number). Κρίνεται αναγκαίο στις πρώτες μετρήσεις να δοκιμάζονται διάφορες τιμές τόσο για το φορτίο όσο και για το χρόνο ώστε να κρίνεται πιο αποτύπωμα εξυπηρετεί καλύτερα.

Το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, είναι το 402 MVD της εταιρείας Wolpert Wilson Instruments (Εικόνα 6.33). Εξαιτίας της διαμόρφωσης του δοκιμίου και του μεγέθους του, για τη στερέωση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε η ειδική βάση του μικροσκληρόμετρου.

Με το συγκεκριμένο μικροσκληρόμετρο, είναι δυνατή η αυτόματη αλλαγή της εφαρμοζόμενης δύναμης, χαρακτηριστικό πολύ χρήσιμο στην περίπτωση που οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε υλικά με μεγάλες διαφορές μικροσκληρότητας. Χάρη στην υψηλή μεγέθυνση των αντικειμενικών φακών (x40) είναι δυνατή η μέτρηση του μήκους της διαγωνίου με ακρίβεια 0.01μm, δίνοντας στη συσκευή τη δυνατότητα μέτρησης με υψηλή ακρίβεια.

Η συσκευή έχει διαθέσιμες τις ακόλουθες τιμές: 98.07 mN, 245.2 mN, 490.3 mN, 980.7 mN, 1.96N, 2.942 N, 4.903 N, 9.807N και 19.614 N. Ο χρόνος εφαρμογής της δύναμης μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 999 sec. Ο αντικειμενικός φακός είναι x40 και ο προσοφθάλμιος x10.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές σε κάθε δοκίμιο. Στη ζώνη αναγόμεωσης (Z.A), στη ζώνη σύνδεσης (Z.Σ), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ) και στην περιοχή του μετάλλου βάσης (Μ.Β). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 2 διευθύνσεις, παράλληλα στο πλάτος και το ύψος του δοκιμίου, με σημείο εκκίνησης το κέντρο της διεπιφάνειας ζώνης τήξης και μετάλλου βάσης. Οι μικροσκληρότητες του μετάλλου βάσης και του μετάλλου αναγόμεωσης είναι προφανώς σταθερές και στα 8 δοκίμια. Οι μετρήσεις που μας ενδιέφεραν ιδιαίτερα, ήταν εκείνες που έλαβαν χώρα στην περιοχή όπου μεταβάλλεται η μικροδομή του υλικού. Οι μετρήσεις στις περιοχές ενδιαφέροντος (Z.Σ και Θ.Ε.Ζ) πραγματοποιούντο κάθε 0.1mm και μέχρι να σταθεροποιηθεί η σκληρότητα του υλικού, δηλαδή μέχρι να μεταβούμε σε ζώνη όπου υπήρχε αμιγώς είτε το μέταλλο βάσης είτε το μέταλλο προσθήκης.



Εικόνα 6.33: Μικροσκληρόμετρο Wolpert Wilson 402 MVD

6.4.9 Χημική προσβολή Μετάλλου Προσθήκης

Το τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η χημική προσβολή των δοκιμίων, σε κατάλληλο διάλυμα προκειμένου να μελετηθεί η μικροδομή της ζώνης αναγόμεσης.

Εξαιτίας της παρουσίας του χρωμίου (Cr), η προσβολή των ανοξείδωτων χαλύβων είναι σχετικά δύσκολη. Με βάση τη βιβλιογραφία, για τη μελέτη της μεταλλογραφικής δομής του τμήματος των συγκολλημένων δοκιμίων που αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα, χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο Glyceregia.

Το αντιδραστήριο Glyceregia περιέχει:

- 3 μέρη υδροχλωρικό οξύ (HCl)
- 2 μέρη γλυκερόλη (glycerol)
- 1 μέρος νιτρικό οξύ (HNO₃)

Η προετοιμασία του δοκιμίου έγινε στον απαγωγό, εξαιτίας της παρουσίας του HCl. Το αντιδραστήριο Glyceregia αποτελεί σύνηθες αντιδραστήριο για τους ανοξείδωτους χάλυβες

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματική Διαδικασία

και προσβάλει κυρίως τη σ-φάση ενώ παράλληλα αναδεικνύει και τυχόν καρβίδια. Το δοκίμιο εμβαπτίστηκε στο διάλυμα για περίπου 60 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ξεπλύθηκε με απιονισμένο νερό, αιθανόλη και στεγνώθηκε με θερμό αέρα.



Εικόνα 6.34: Χημική προσβολή δοκιμίου σε αντιδραστήριο *Glyceresia*

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1] Chatzidouros Elias, Hydrogen effect on fracture toughness of pipeline steel welds, with in situ hydrogen charging.

[2] Andreas P. Kyriakogonas, Three-dimensional thermo-mechanical modeling of austenitic stainless steel welding.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

«Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων»

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας η οποία αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 6. Συγκεκριμένα, από τα 8 δοκίμια των οποίων μελετήθηκε η μικροδομή και η μικροσκληρότητα, παραθέτονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των 2 ποιοτικά βέλτιστων.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν στα εξής:

- Μελέτη της διείδυσης του μετάλλου αναγόμεσης στο μέταλλο βάσης.
- Μελέτη του πάχους της ζώνης αναγόμεσης στο οπτικό στερεοσκόπιο.
- Μελέτη της μικροδομής του συγκολλημένου δοκιμίου στις διάφορες περιοχές συγκόλλησης (μέταλλο βάσης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ζώνη αναγόμεσης).
- Μελέτη της μικροσκληρότητας των παραπάνω περιοχών.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι παράμετροι της αναγόμεσης για κάθε δοκίμιο.

	Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος (%max)	Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος (A)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (cm/min)	Μήκος Τόξου (cm)	Τάση (Volt)
B.o.p 1	65	210	30	1.5	31
B.o.p 2	63	200	35	1.5	25
B.o.p 3	70	215	30	1.6	31.5
B.o.p 4	65	210	35	1.6	32
B.o.p 5	60	190	30	1.4	26
B.o.p 6	65	210	40	1.6	31.5
B.o.p 7	70	220	35	1.6	31.5
B.o.p 8	60	194	40	1.5	24

Πίνακας 7.1: Παράμετροι αναγόμεσης για τις 8 βέλτιστες ραφές

Μετά την επιλογή των 8 βέλτιστων ποιοτικά ραφών και την κοπή τους προκειμένου να εξεταστεί η μικροδομή των 8 αντίστοιχων δοκιμίων, τα μεγέθη που ενδιέφεραν ούτως ώστε να εξακριβωθεί η ποιότητα της σύνδεσης του μετάλλου αναγόμεσης με το χάλυβα X65, ήταν: το βάθος διείδυσης του μετάλλου αναγόμεσης στο μέταλλο βάσης, η όψη και το

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

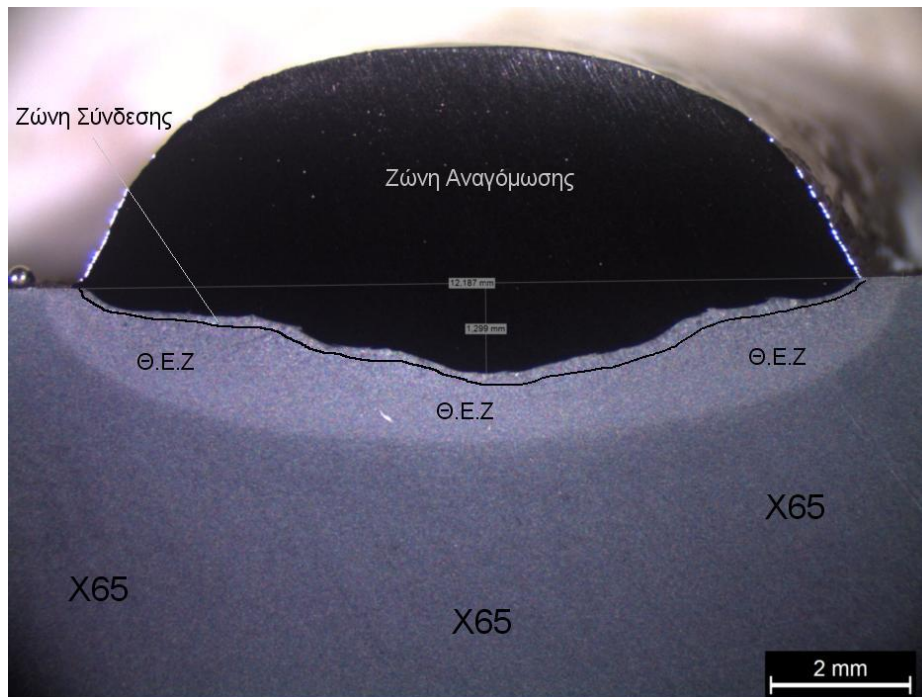
πάχος της ραφής. Ο βέλτιστος συνδυασμός των ανωτέρω μεγεθών παρατηρήθηκε στα δοκίμια Νο.6 και Νο.7, τα οποία και εξετάζουμε στο παρόν κεφάλαιο. Στην εικόνα 7.1 φαίνονται οι ραφές από τις οποίες προέρχονται συγκριτικά με τις υπόλοιπες 6 ραφές.



Εικόνα 7.1: Ραφές 6 και 7, οι πρώτες δυο από δεξιά

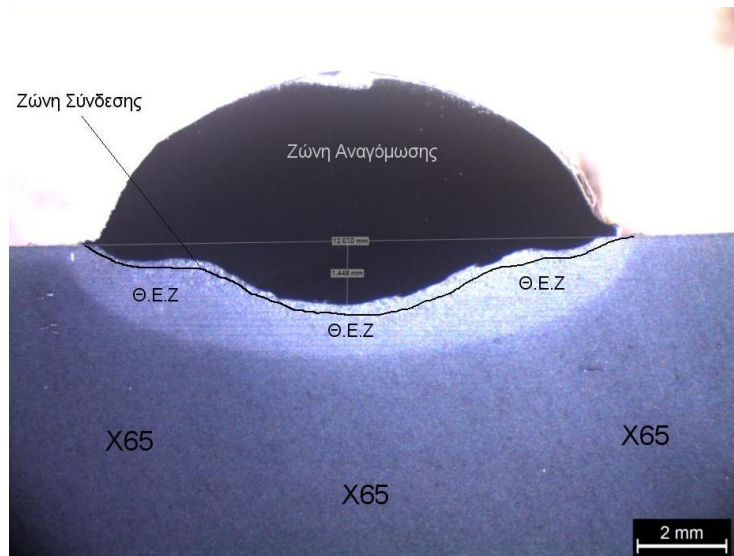
7.2 Μελέτη στο Οπτικό Στερεοσκόπιο

Τα δοκίμια προσβλήθηκαν σε διάλυμα αιθανόλης και νιτρικού οξέως (Nital 2%) προκειμένου να φανεί η μικροδομή του μετάλλου βάσης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Τη χημική προσβολή ακολουθεί το στάδιο της μελέτης στο οπτικό στερεοσκόπιο. Παρακάτω παρατίθενται οι φωτογραφίες των δοκιμών 6 και 7 από το οπτικό στερεοσκόπιο, στις οποίες φαίνονται ξεκάθαρα οι 4 βασικές περιοχές της αναγόμενης: η ζώνη αναγόμενης (Z.A), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ), η ζώνη σύνδεσης (Z.Σ) και το μέταλλο βάσης (χάλυβας X65).



Εικόνα 7.2: Οι τέσσερις περιοχές αναγόμεσης του δοκιμίου No.6, όπως αυτές διακρίνονται στο οπτικό στερεοσκόπιο

Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με το οπτικό στερεοσκόπιο και του προγράμματος Image Pro Plus Image Analysis της εταιρείας Media Cybernetics®, καθίσταται δυνατή η μέτρηση διαφόρων αποστάσεων στις φωτογραφίες υπό επεξεργασία. Εν προκειμένω, δυο μεγέθη των οποίων οι τιμές μας απασχολούν και μετρήθηκαν μέσω του προγράμματος, είναι το βάθος διείσδυσης του μετάλλου προσθήκης στο βασικό μέταλλο και το πάχος της ραφής αναγόμεσης. Για το δοκίμιο No.6, το μέγιστο πάχος διείσδυσης ήταν 1.3mm ενώ το μέγιστο πάχος της αναγόμεσης ήταν 1.405mm.



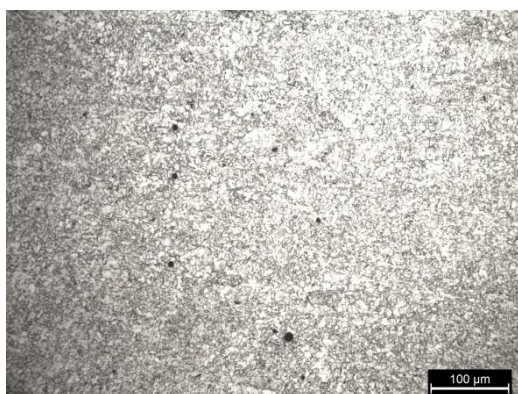
Εικόνα 7.3: Περιοχές αναγόμεσης δοκιμίου No.7 όπως αυτές διακρίνονται στο οπτικό στερεοσκόπιο

Για το δοκίμιο No.7, το μέγιστο πάχος διείσδυσης ήταν 1,448 mm ενώ το μέγιστο πάχος της αναγόμεσης ήταν 1,786 mm.

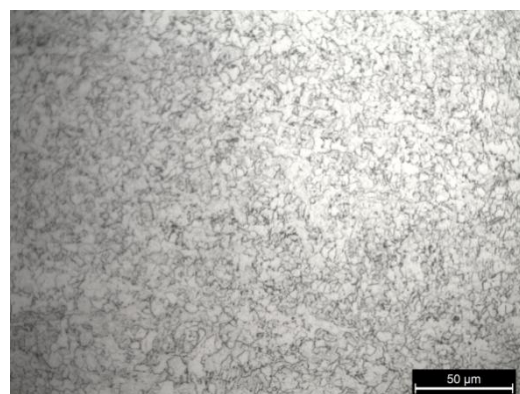
7.3 Μελέτη στο Οπτικό Μικροσκόπιο

7.3.1 Μέταλλο Βάσης (Χάλυβας X65)

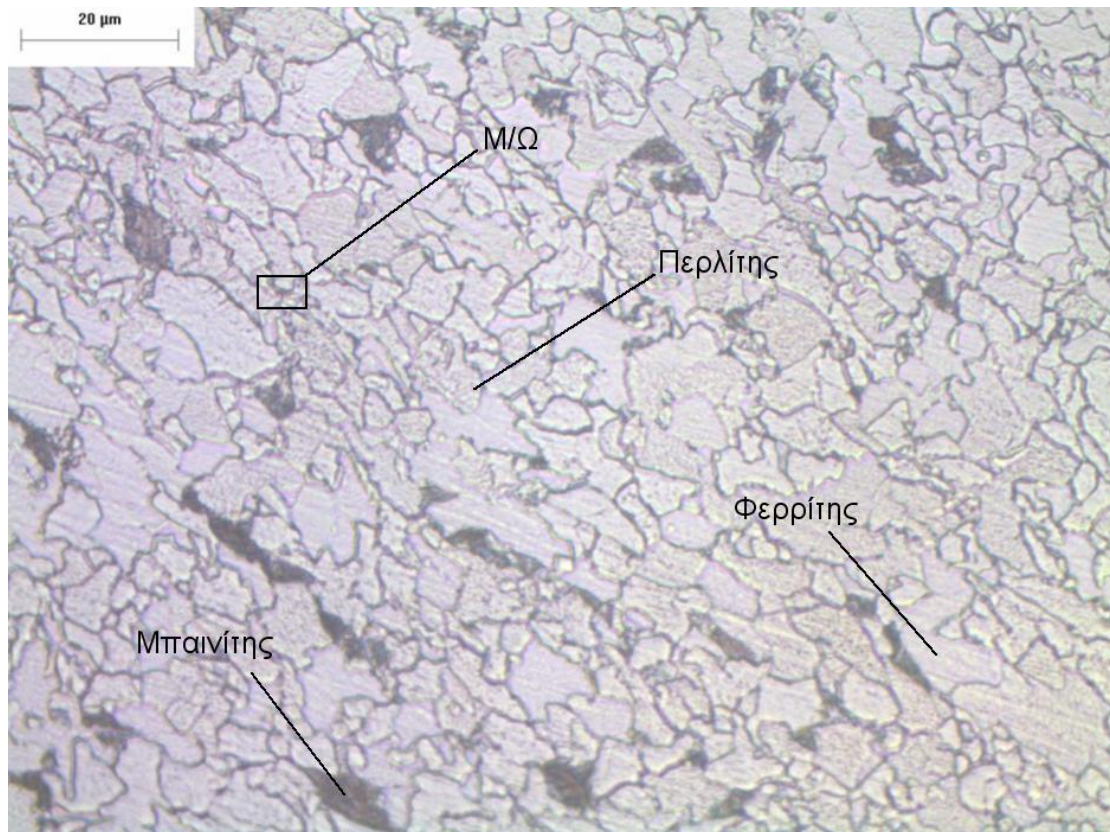
Ο χάλυβας X65 διαθέτει φερριτο-μπαϊνιτική μικροδομή με διάσπαρτες νησίδες περλίτη. Πλησίον των ορίων των περιοχών μπαϊνίτη και φερρίτη, εμφανίζεται μαρτενσίτης/ωστενίτης (M/Ω). Η μικροδομή του χάλυβα X65 φαίνεται στις εικόνες 7.4(α), 7.4(β) και 7.4(γ).



Εικόνα 7.4(α): Χάλυβας X65 σε μεγέθυνση x20



Εικόνα 7.4(β): Χάλυβας X65 σε μεγέθυνση x50



Εικόνες 7.4(γ): Μικροδομή χάλυβα X65 σε μεγέθυνση x100

7.3.2 Μικροδομή Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (Θ.Ε.Ζ)

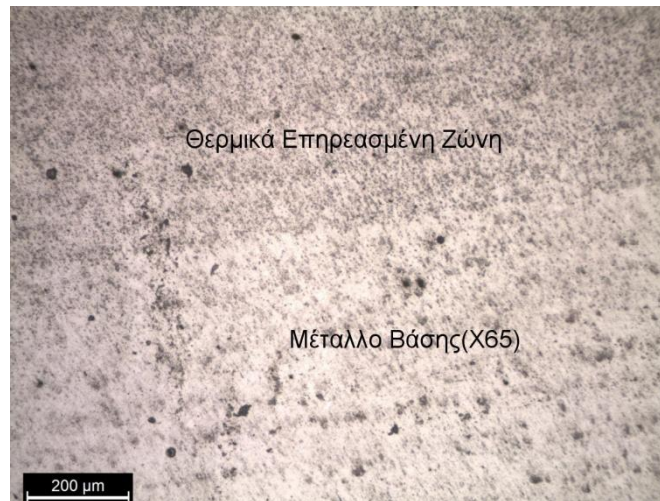
Ακολουθούν φωτογραφίες της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του δοκιμίου 6 όπως αυτή διαφάνεται στο πρόγραμμα Image Pro Plus Image Analysis του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι φωτογραφίες είναι σε μεγέθυνση x10, x20, x50, και x100 αντίστοιχα.

Στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη η μικροδομή είναι μικτή. Αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, σε μεγαλύτερη συγκέντρωση απ'ότι στο μέταλλο βάσης, σε συνδυασμό με φερρίτη και μαρτενσίτη.

Στις εικόνες 7.5(β), 7.5(γ), 7.6(α) και 7.6(β) φαίνεται η διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου αναδόμωσης (ανοξειδωτος χάλυβας) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται ζώνη σύνδεσης και πρόκειται για μια κραματωμένη ζώνη λόγω ανάμιξης του μετάλλου αναδόμωσης με το μέταλλο βάσης.

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Η ζώνη σύνδεσης αποτελείται από μπαινίτη και μαρτενσίτη αλλά είναι κυρίως μπαινιτικής μικροδομής, γεγονός που δικαιολογεί τις υψηλές τιμές σκληρότητας που μετρήθηκαν σε αυτή την ζώνη.

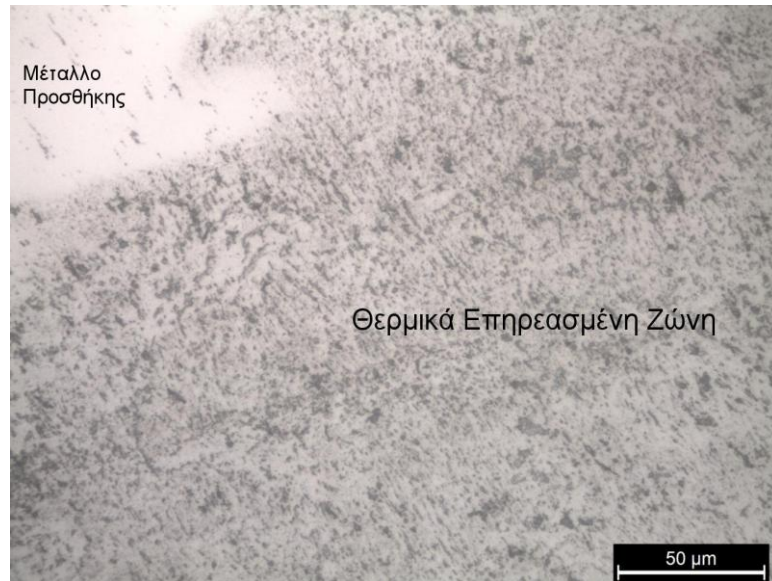


Εικόνα 7.5(α): Θερμικά Επηρασαμένη Ζώνη και μέταλλο βάσης δοκιμίου Νο.6 σε μεγέθυνση x10

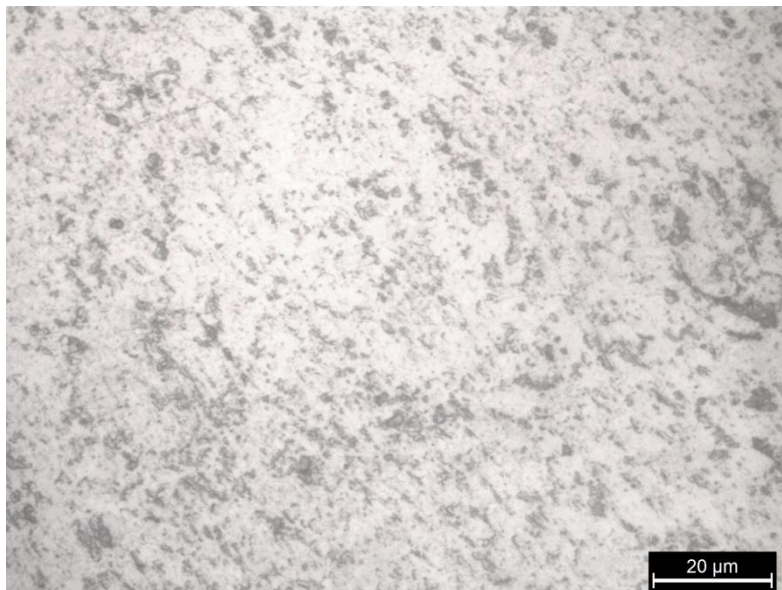


Εικόνα 7.5(β): Οι 3 περιοχές της αναγόμωσης του δοκιμίου Νο.6 σε μεγέθυνση x20

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων



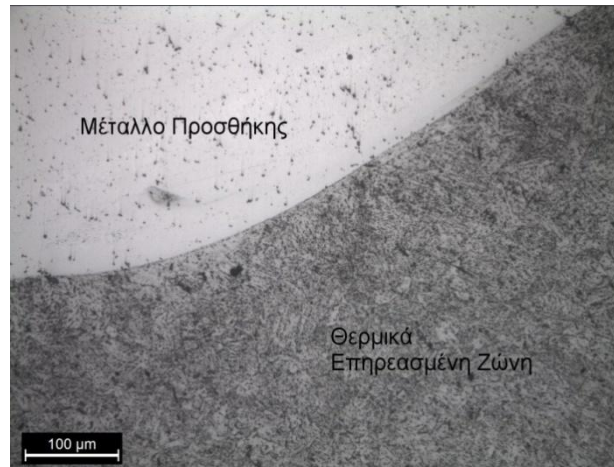
Εικόνα 7.5(γ): Θ.Ε.Ζ και μέταλλο αναγόμωσης δοκιμίου No.6 σε μεγέθυνση x50



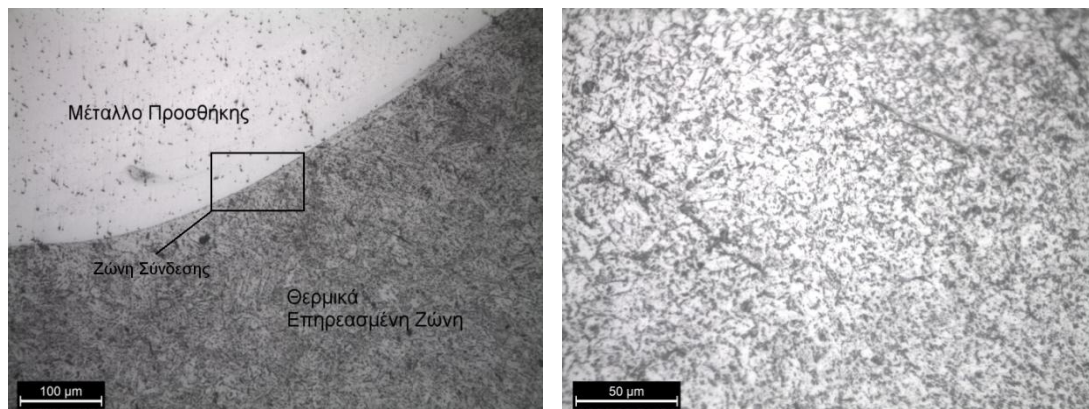
Εικόνα 7.5(δ): Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη δοκιμίου No.6 σε μεγέθυνση x100

Αντιστοίχως, παραθέτονται οι φωτογραφίες της μικροδομής της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του δοκιμίου No.7 σε διάφορες μεγεθύνσεις.

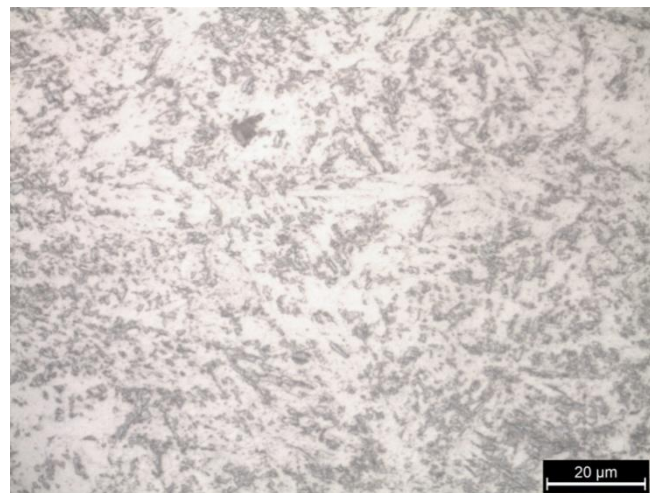
Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων



Εικόνα 7.6(α): Μικροδομή Θ.Ε.Ζ δοκιμίου Νο.7 σε μεγέθυνση x20



Εικόνες 7.6(β) και 7.6(γ): Μικροδομή Θ.Ε.Ζ δοκιμίου Νο.7 σε μεγέθυνση x50



Εικόνα 7.6(δ): Μικροδομή Θ.Ε.Ζ δοκιμίου 7 σε μεγέθυνση x100

7.3.3 Μικροδομή Ζώνης Αναγόμεωσης

Προκειμένου να φανεί η μικροδομή της ζώνης αναγόμεωσης, δηλαδή του ανοξειδωτού χάλυβα, έλαβε χώρα χημική προσβολή των δοκιμίων στο χημικό αντιδραστήριο Glyceregia (6.4.9). Πρόκειται για μικροδομή χαρακτηριστικής μορφολογίας ταχείας στερεοποίησης. Η τελική μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης μπορεί να επηρεάσει πλήθος ιδιοτήτων, όπως την αντίσταση σε διάβρωση, τη συμπεριφορά απέναντι σε θερμή ρωγμάτωση, κλπ. Όλοι οι ανοξειδωτοί ωστενιτικοί χάλυβες στερεοποιούνται πρωτογενώς ως φερρίτης ή ωστενίτης. Το είδος της πρωτογενούς μικροδομής εξαρτάται από τη σύσταση του κράματος. Μικρές αλλαγές στη σύσταση του κράματος μπορούν να προκαλέσουν μετατόπιση της πρωτογενούς φάσης από φερρίτη σε ωστενίτη. Μετά το πέρας της στερεοποίησης, πραγματοποιούνται μετασχηματισμοί στερεάς φάσης μέχρι την απόψυξη σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτοί οι μετασχηματισμοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί σε κράματα που στερεοποιούνται πρωτογενώς ως φερρίτης, επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό φερρίτη μετασχηματίζεται σε ωστενίτη. Στις συγκολλήσεις ανοξειδωτων ωστενιτικών χαλύβων, η ζώνη τήξης μπορεί να στερεοποιηθεί σε μια από τέσσερις πιθανές μορφές. Η μορφή στην οποία στερεοποιήθηκε το μέταλλο προσθήκης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αναγομώσεων, ήταν η στερεοποίηση FA, κατά την οποία η πρωτογενής φάση είναι δ-φερρίτης. Μετά τη στερεοποίηση, πραγματοποιείται μετασχηματισμός στερεάς φάσης επειδή ο φερρίτης είναι ασταθής σε χαμηλές θερμοκρασίες.

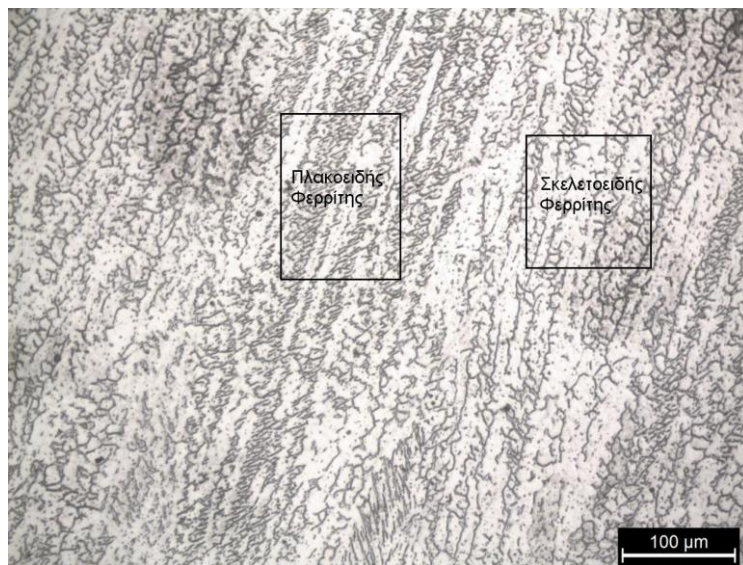
Όταν ο ρυθμός στερεοποίησης είναι μέτριος αλλά μέσα στο εύρος FA, προκύπτει σκελετοειδής (skeletal ή vermicular) φερρίτης. Η μικροδομή αυτή είναι αποτέλεσμα της σταδιακής κατανάλωσης του ωστενίτη από το φερρίτη, μέχρι που ο φερρίτης εμπλουτίζεται σε α-φερρογόνα στοιχεία (Cr και Mo) και στερείται τα γ-φερρογόνα (Ni,C,N). Με τον τρόπο αυτό, σταθεροποιείται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες όπου η διάχυση είναι περιορισμένη. Ο σκελετοειδής φερρίτης προέκυψε και στα οκτώ δοκίμια των πειραμάτων και η δομή του φαίνεται ξεκάθαρα στις φωτογραφίες 7.7.

Όταν ο ρυθμός στερεοποίησης είναι ταχύτερος, προκύπτει πλακοειδής (lathy) φερρίτης. Η πλακοειδής μορφολογία του φερρίτη σχηματίζεται στη θέση της σκελετοειδούς, λόγω περιορισμένης διάχυσης κατά το μετασχηματισμό ωστενίτη σε φερρίτη. Όταν οι αποστάσεις διάχυσης ελαττώνονται, είναι ευκολότερο ο μετασχηματισμός να καταλήξει σε μορφολογία πλακών, σε πολύ μικρή απόσταση η μια από την άλλη, οι οποίες

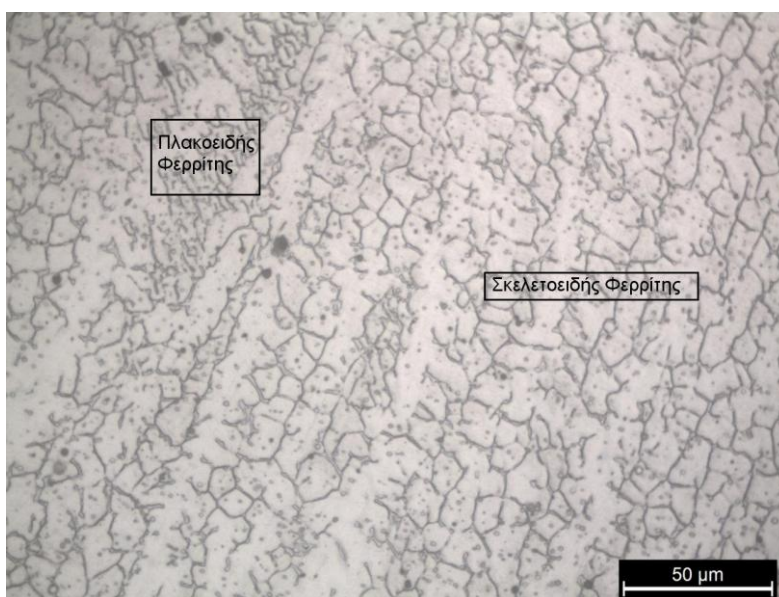
Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

παρεμβάλλονται στη διεύθυνση ανάπτυξης των αρχικών δενδριτών ή κυψελίδων. Η πλακοειδής δομή του φερρίτη εμφανίστηκε σε μικρότερα ποσοστά απ'ότι η σκελετοειδής αλλά φαίνεται ξεκάθαρα στις φωτογραφίες 7.7.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μικροδομή του ανοξείδωτου χάλυβα σε μεγεθύνσεις x20, x50 και x100 για τα δοκίμια No.6 και No.7:

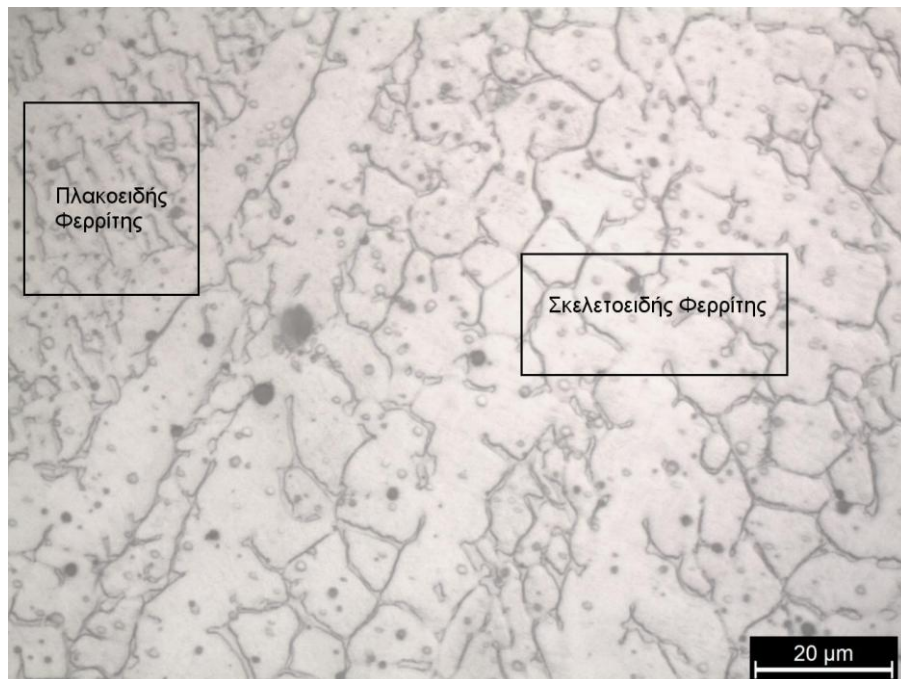


Εικόνα 7.7(α): Σκελετοειδής και πλακοειδής φερρίτης σε γειτονικούς κρυστάλλους του μετάλλου προσθήκης. Δοκίμιο No.6, μεγέθυνση x20

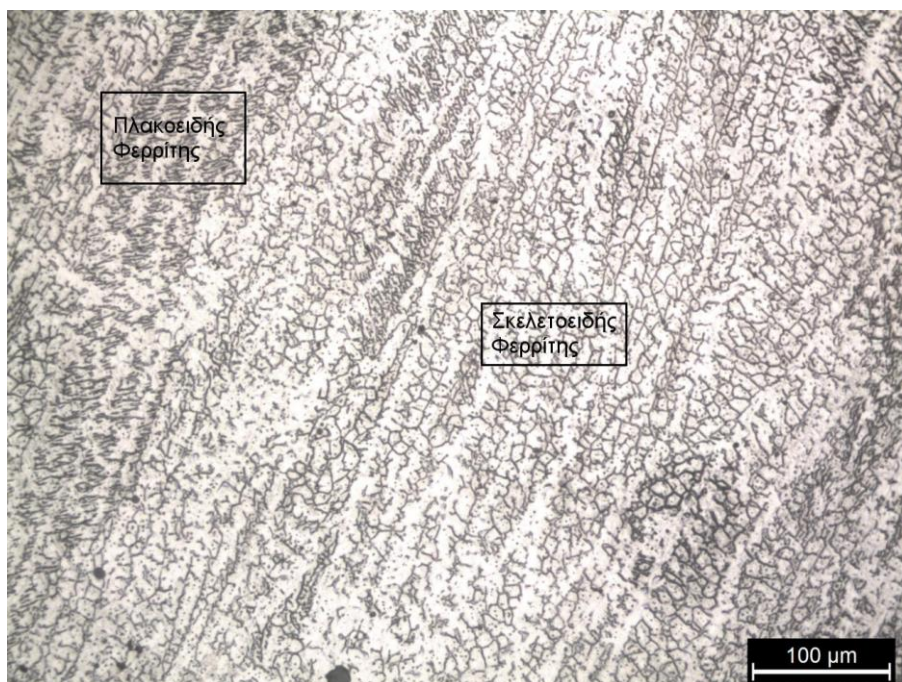


Εικόνα 7.7(β): Μικροδομή ζώνης αναγόμενης δοκιμίου No.6 σε μεγέθυνση x50

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

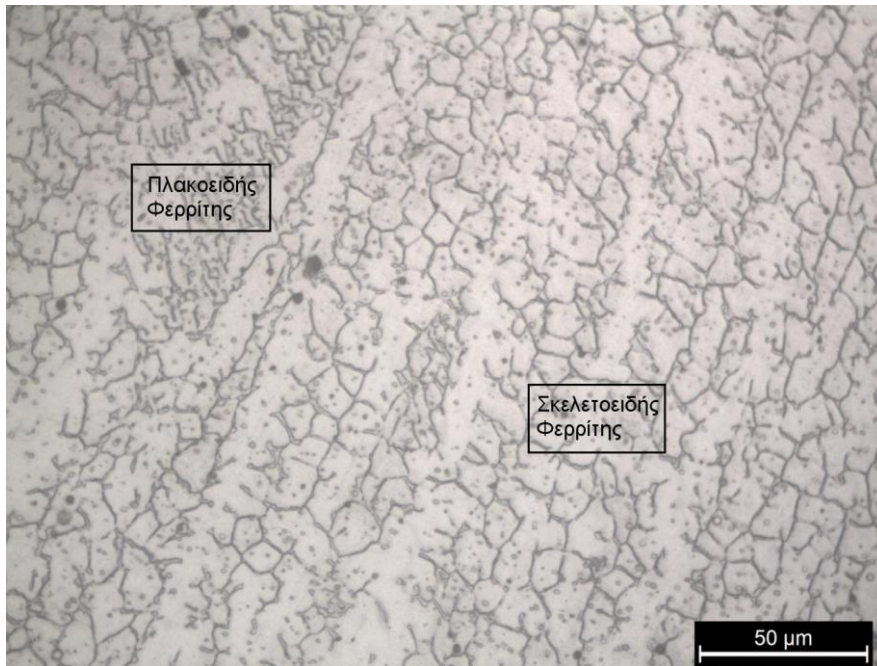


Εικόνα 7.7(γ): Μικροδομή ζώνης αναδόμησης δοκιμίου No.6 σε μεγέθυνση x100

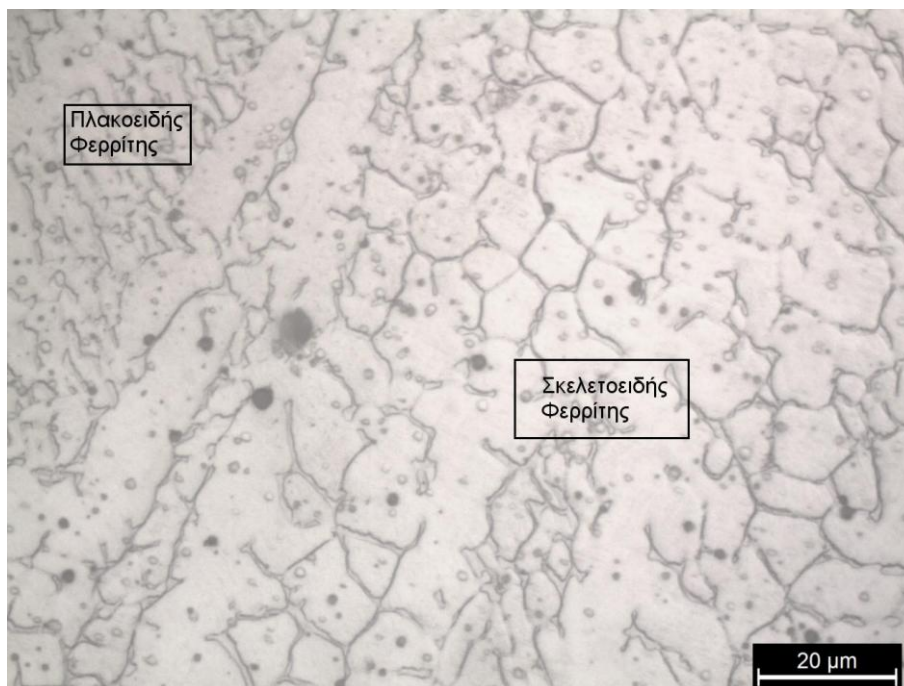


Εικόνα 7.7 (δ): Μικροδομή ζώνης αναδόμησης δοκιμίου No.7 σε μεγέθυνση x20

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων



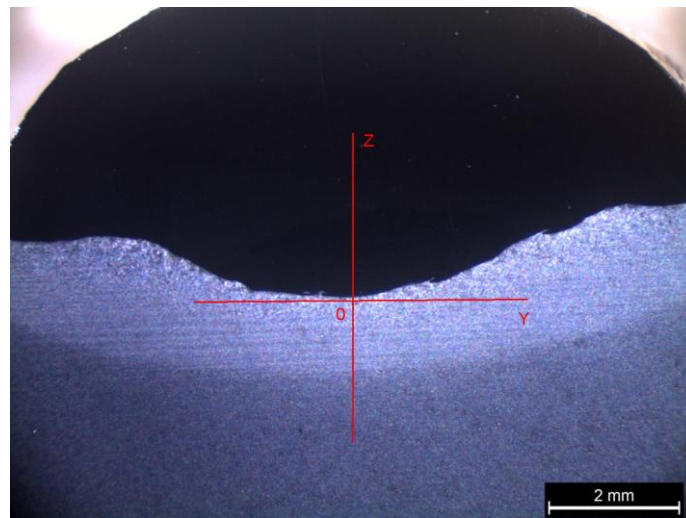
Εικόνα 7.7(ε): Μικροδομή ζώνης αναδόμησης δοκιμίου No.7 σε μεγέθυνση x50



Εικόνα 7.7(στ): Μικροδομή ζώνης αναδόμησης δοκιμίου No.7 σε μεγέθυνση x100

7.4 Μελέτη Μικροσκληρότητας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές σε κάθε δοκίμιο. Στη ζώνη αναγόμεωσης (Z.A), στη ζώνη σύνδεσης (Z.Σ), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ), και στην περιοχή του μετάλλου βάσης (Μ.Β). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 2 διευθύνσεις, παράλληλα στο πλάτος και το ύψος του δοκιμίου, με σημείο εκκίνησης το κέντρο της διεπιφάνειας Z.Σ και Θ.Ε.Ζ (Εικόνα 7.8).



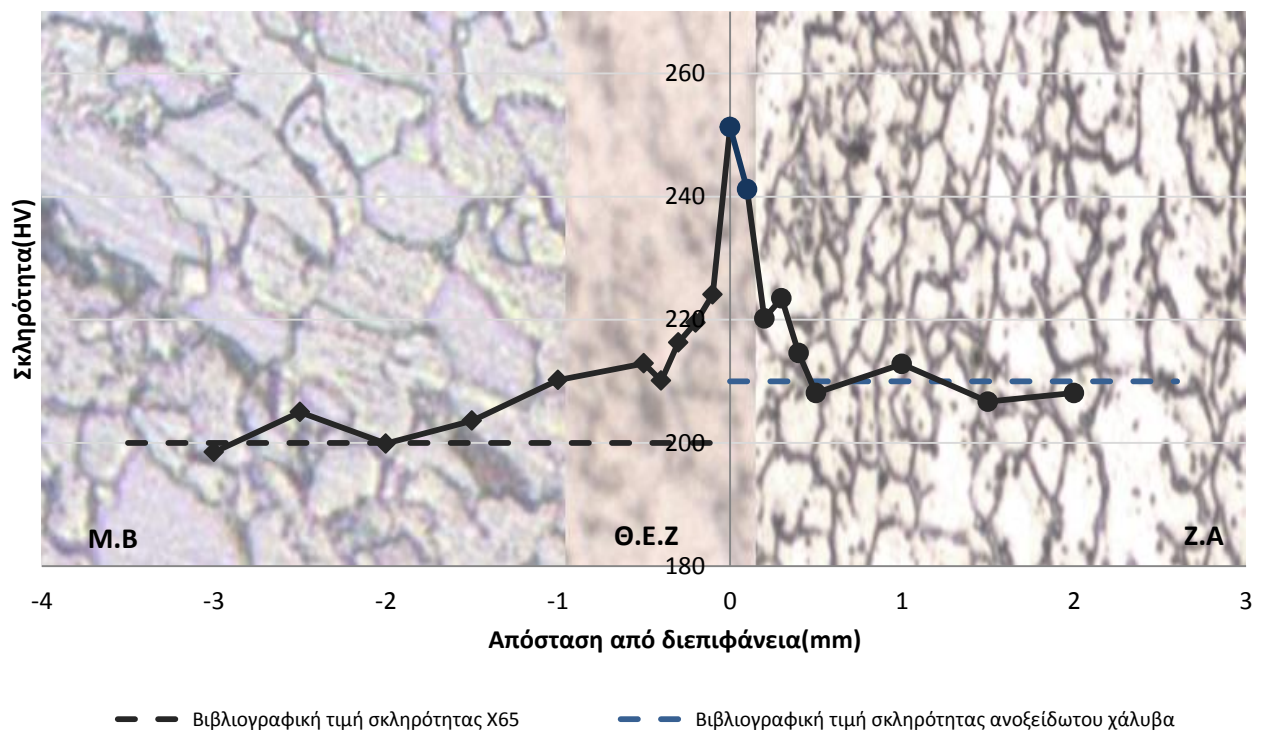
Εικόνα 7.8: Σχηματική αναπαράσταση των διευθύνσεων κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι σκληρομετρήσεις

Η μικροσκληρότητα του μετάλλου βάσης και της ζώνης τήξης είναι προφανώς ίδια και στα 8 δοκίμια. Οι μετρήσεις που μας ενδιέφεραν ιδιαίτερα, ήταν εκείνες που έλαβαν χώρα στην περιοχή όπου μεταβάλλεται η μικροδομή του υλικού. Αυτό διότι οι διακυμάνσεις στη μικροδομή του υλικού συνεπάγονται διακυμάνσεις στο μέγεθος των κόκκων του, τούτέστιν διακυμάνσεις στην σκληρότητα του. Οι μετρήσεις στις περιοχές ενδιαφέροντος πραγματοποιούνται κάθε 0.1mm και μέχρι να σταθεροποιηθεί η σκληρότητα του υλικού, δηλαδή μέχρι να μεταβούμε σε ζώνη όπου υπήρχε αμιγώς είτε το μέταλλο βάσης είτε το μέταλλο προσθήκης.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές σκληρότητας των δοκιμίων No.6 και No.7 που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των μικροσκληρομετρήσεων στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Στο διάγραμμα 7.9(α) παρουσιάζονται οι τιμές της σκληρότητας του δοκιμίου No.6 συναρτήσει της απόστασης από τη διεπιφάνεια στην κατακόρυφη διεύθυνση. Προκειμένου να είναι εμφανές σε ποια περιοχή του δοκιμίου ανήκει το κάθε σημείο του διαγράμματος, κάθε μια από τις τρεις περιοχές ενδιαφέροντος (Μέταλλο Βάσης, Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη και Ζώνη Αναγόμεωσης) οριοθετείται από φωτογραφία της αντίστοιχης μικροδομής της, ενώ οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην Ζώνη Σύνδεσης παρουσιάζονται στο διάγραμμα με διαφορετικό χρώμα από τις υπόλοιπες.



Διάγραμμα 7.9(α): Διάγραμμα μικροσκληρότητας δοκιμίου No.6 συναρτήσει της κατακόρυφης (κατά την διεύθυνση Z) απόστασης από το σημείο εκκίνησης των μικροσκληρομετρήσεων

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

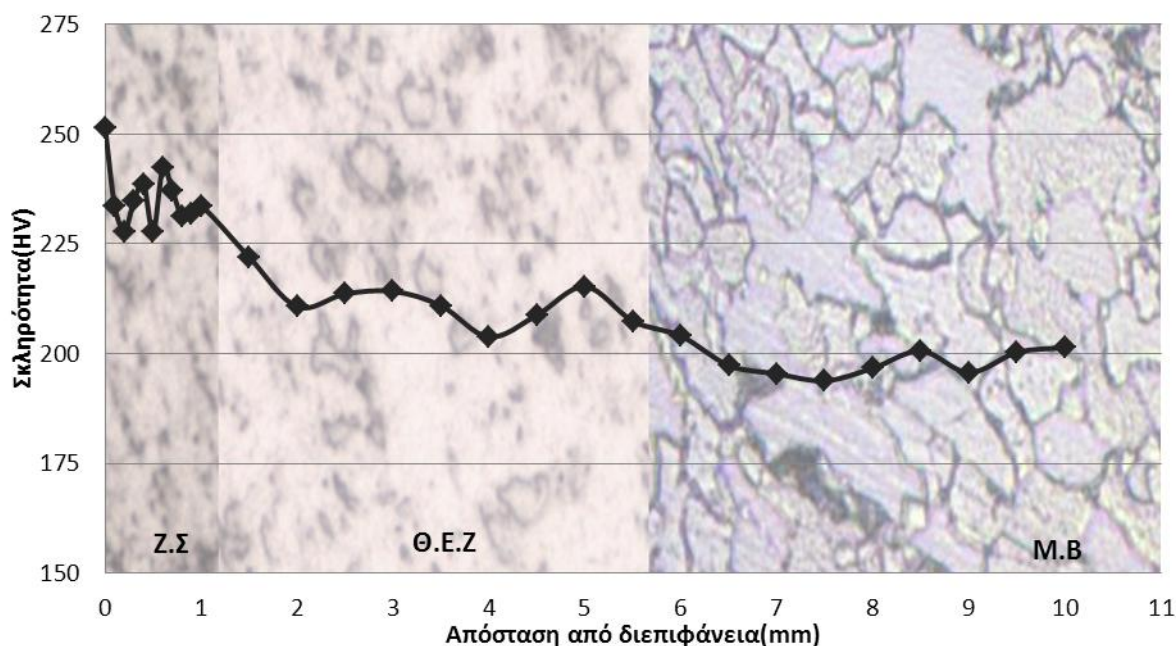
Οι τιμές σκληρότητας $HV_{0.3}$, οι οποίες μετρήθηκαν στο εργαστήριο και από τις οποίες προέκυψε το ανωτέρω διάγραμμα, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.9(β).

ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	ΣΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)	ΠΕΡΙΟΧΗ
-3	198.5	M.B
-2.5	205	M.B
-2	199.9	M.B
-1.5	203.6	M.B
-1	210.2	M.B
-0.5	212.9	Θ.Ε.Ζ
-0.4	210.1	Θ.Ε.Ζ
-0.3	216.3	Θ.Ε.Ζ
-0.2	219.5	Θ.Ε.Ζ
-0.1	224.1	Θ.Ε.Ζ
0	251.3	Z.Σ
0.1	241.2	Z.Σ
0.2	220.2	Z.A
0.3	223.5	Z.A
0.4	214.6	Z.A
0.5	208.1	Z.A
1	212.8	Z.A
1.5	206.7	Z.A
2	208.1	Z.A

Πίνακας 7.9(β): Τιμές απόστασης-σκληρότητας στην κάθε περιοχή του διαγράμματος 7.9(α)

Στο διάγραμμα 7.10(α) παρουσιάζονται οι τιμές σκληρότητας του δοκιμίου No.6 συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκκίνησης των μικροσκληρομετρήσεων στην οριζόντια διεύθυνση (Υ). Κατ'αντιστοιχία με το διάγραμμα 7.9(α), οι περιοχές ενδιαφέροντος (Ζώνη Σύνδεσης, Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη και Μέταλλο Βάσης) στο διάγραμμα 7.10(α) οριοθετούνται από τις αντίστοιχες φωτογραφίες της μικροδομής τους.

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 7.10(α): Διάγραμμα μικροσκληρότητας δοκιμίου No.6 συναρτήσει της οριζόντιας (κατά την διεύθυνση Υ) απόστασης από το σημείο εκκίνησης των μικροσκληρομετρήσεων

Στον πίνακα 7.10(β) φαίνονται αναλυτικά οι τιμές του διαγράμματος.

ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)	ΠΕΡΙΟΧΗ
0	251.3	Z.S
0.1	233.5	Z.S
0.2	227.9	Z.S
0.3	234.8	Z.S
0.4	238.7	Z.S
0.5	227.7	Z.S
0.6	242.3	Z.S
0.7	237.1	Z.S
0.8	231.2	Z.S
0.9	231.8	Z.S
1	233.7	Z.S
1.5	222	Θ.Ε.Ζ
2	210.7	Θ.Ε.Ζ
2.5	213.6	Θ.Ε.Ζ
3	214.2	Θ.Ε.Ζ
3.5	210.9	Θ.Ε.Ζ

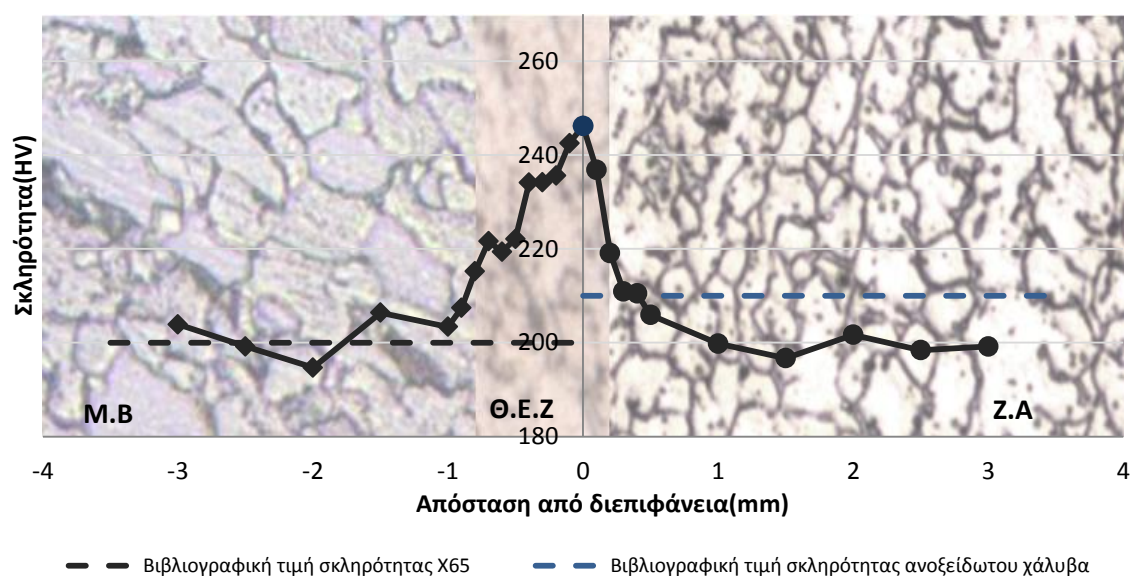
Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

4	203.8	Θ.Ε.Ζ
4.5	208.8	Θ.Ε.Ζ
5	215.3	Θ.Ε.Ζ
5.5	207.4	Θ.Ε.Ζ
6	204	Μ.Β
6.5	197.3	Μ.Β
7	195.4	Μ.Β
7.5	193.8	Μ.Β
8	196.7	Μ.Β
8.5	200.6	Μ.Β
9	195.7	Μ.Β
9.5	200.3	Μ.Β
10	201.4	Μ.Β

Πίνακας 7.10(β): Τιμές απόστασης-σκληρότητας στην κάθε περιοχή του διαγράμματος 7.10(α).

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα και πίνακες τιμών για το δοκίμιο Νο.7.

Σκληρομέτρηση Δοκιμίου Νο.7 στην Κατακόρυφη Διεύθυνση (Z)



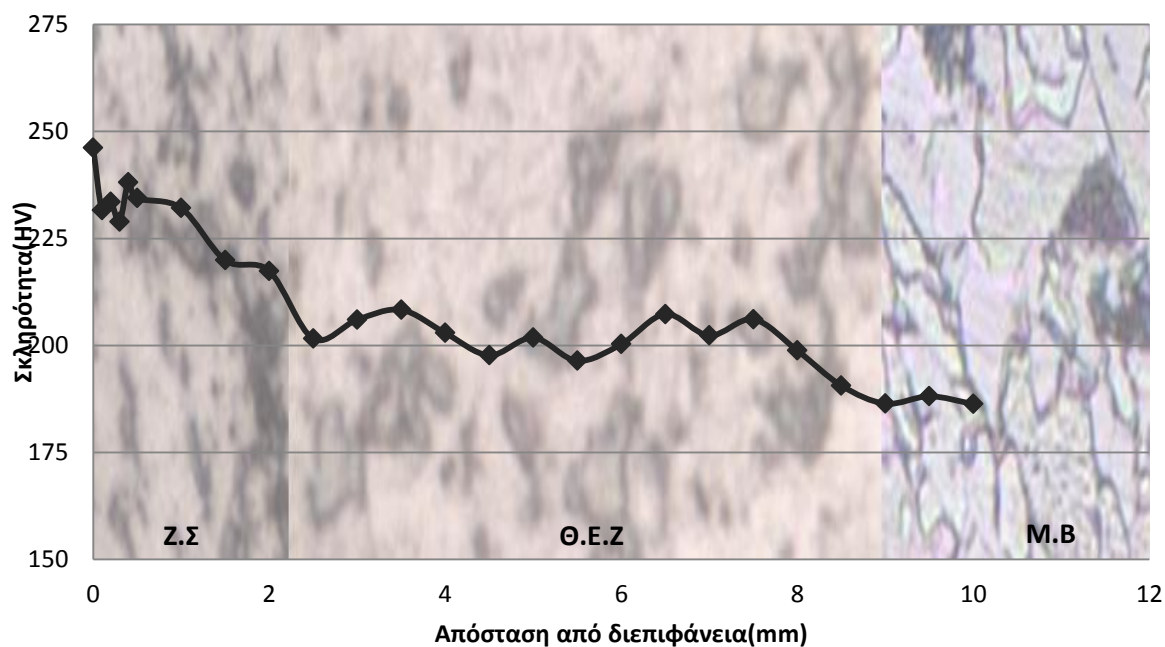
Διάγραμμα 7.11(α): Διάγραμμα μικροσκληρότητας δοκιμίου Νο.7 συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από το σημείο εκκίνησης των μικροσκληρομετρήσεων.

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)	ΠΕΡΙΟΧΗ
-3	203.9	M.B
-2.5	199.2	M.B
-2	194.7	M.B
-1.5	206.4	M.B
-1	203.4	M.B
-0.9	207.4	M.B
-0.8	215.2	Θ.Ε.Ζ
-0.7	221.6	Θ.Ε.Ζ
-0.6	219.4	Θ.Ε.Ζ
-0.5	222.1	Θ.Ε.Ζ
-0.4	234.1	Z.Σ
-0.3	234.2	Z.Σ
-0.2	235.6	Z.Σ
-0.1	242.5	Z.Σ
0	246.2	Z.Σ
0.1	236.8	Z.Σ
0.2	219.1	Z.A
0.3	210.9	Z.A
0.4	210.5	Z.A
0.5	205.9	Z.A
1	199.8	Z.A
1.5	196.7	Z.A
2	201.7	Z.A
2.5	198.4	Z.A
3	199.2	Z.A

Πίνακας 7.11(β): Τιμές απόστασης-σκληρότητας στην κάθε περιοχή του διαγράμματος 7.11 (α)

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων



Διάγραμμα 7.12(α): Διάγραμμα μικροσκληρότητας δοκιμίου No.7 συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από το σημείο εκκίνησης των μικροσκληρομετρήσεων

ΑΠΟΣΤΑΣΗ (mm)	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (HV)	ΠΕΡΙΟΧΗ
0	246.2	Z.S
0.1	231.6	Z.S
0.2	233.5	Z.S
0.3	228.9	Z.S
0.4	238.1	Z.S
0.5	234.4	Z.S
1	232.1	Z.S
1.5	219.9	Z.S
2	217.4	Z.S
2.5	201,6	Θ.Ε.Ζ
3	206	Θ.Ε.Ζ
3.5	208.3	Θ.Ε.Ζ
4	202.9	Θ.Ε.Ζ
4.5	197.7	Θ.Ε.Ζ
5	201.8	Θ.Ε.Ζ
5.5	196.4	Θ.Ε.Ζ

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση και Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

6	200.3	Θ.Ε.Ζ
6.5	207.3	Θ.Ε.Ζ
7	202.3	Θ.Ε.Ζ
7.5	206.1	Θ.Ε.Ζ
8	198.8	Θ.Ε.Ζ
8.5	190.6	Θ.Ε.Ζ
9	186.4	Μ.Β
9.5	188.1	Μ.Β
10	186.3	Μ.Β

Πίνακας 7.12(β): Τιμές απόστασης-σκληρότητας στην κάθε περιοχή του διαγράμματος 7.12(α).

Όπως διαφαίνεται στα ανωτέρω διαγράμματα και πίνακες, η μέση τιμή μικροσκληρότητας για το μέταλλο βάσης όπως προκύπτει από τις μετρήσεις είναι περίπου 200 HV_{0.3}, ενώ για τη ζώνη αναδόμωσης περίπου 210 HV_{0.3}. Αυξημένες τιμές σκληρότητας παρατηρήθηκαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και ακόμη περισσότερο στη ζώνη σύνδεσης. Για την ακρίβεια, η μέση τιμή σκληρότητας για την θερμικά επηρεασμένη ζώνη ήταν περίπου 220 HV_{0.3}, ενώ η μέση τιμή σκληρότητας στην ζώνη σύνδεσης ήταν περίπου 240 HV_{0.3}.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο

«Συμπεράσματα»

8.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα αναγόμωσης ελασμάτων χάλυβα X65, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των HSLA (High Strength Low Alloy) χαλύβων, με ανοξειδωτο χάλυβα. Η μέθοδος με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες συγκόλλησης-αναγόμωσης ήταν η F.C.A.W (Flux Cored Arc Welding) ενώ οι εργασίες αναγόμωσης πραγματοποιήθηκαν μέσω του ρομποτικού βραχίονα RT 330.1 της εταιρείας IGM Robotersysteme®.

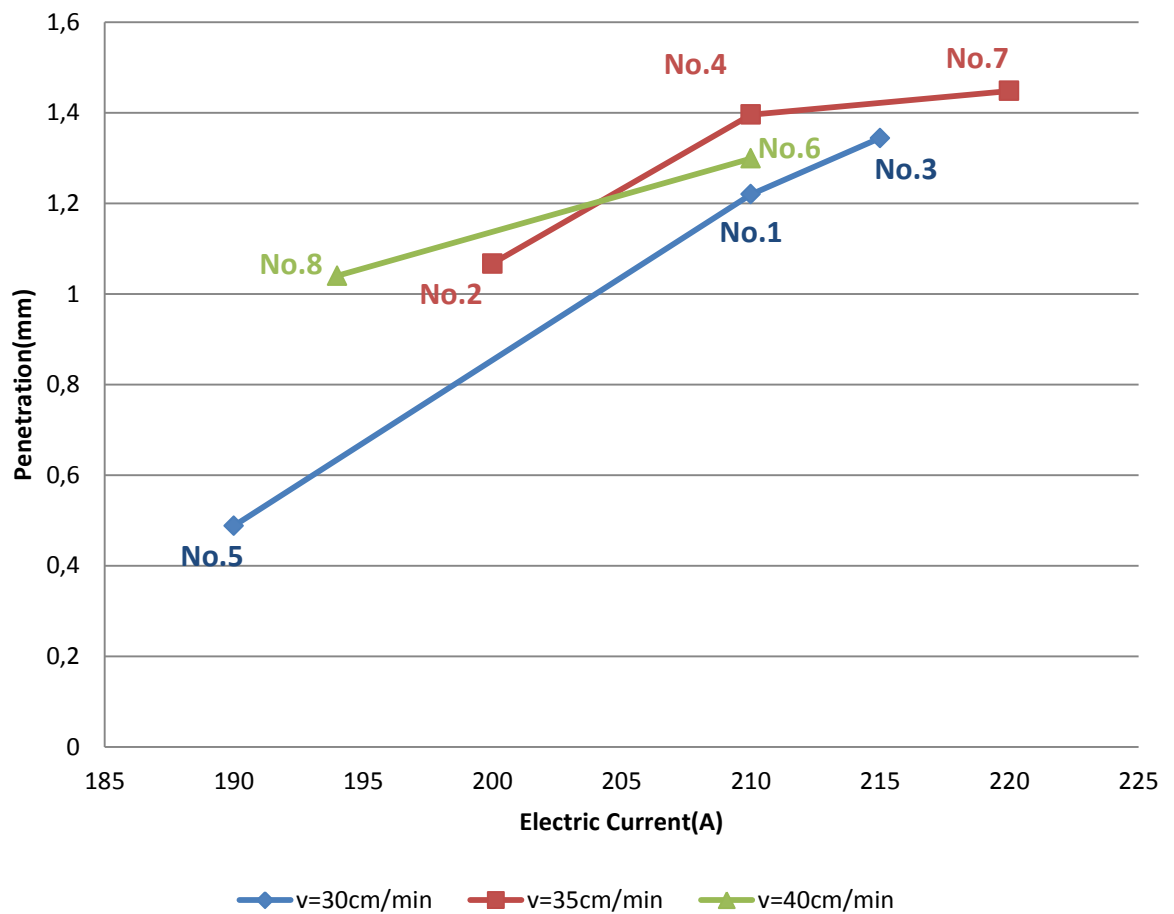
Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας καταλήξαμε σε συμπεράσματα που αφορούν τόσο στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης όσο και στη μεταλλογραφική μελέτη των δοκιμίων.

8.2 Συμπεράσματα σχετικά με τις Παραμέτρους της Συγκόλλησης-Αναγόμωσης

Μετά από πλήθος δοκιμαστικών αναγομώσεων (άνω των 50, εικόνα 6.14), καθίσταται σαφές πως οι δυο σημαντικότερες παράμετροι για την ποιότητα της ραφής της αναγόμωσης, είναι η ένταση του ρεύματος και η ταχύτητα συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, οι τιμές της έντασης για τις 8 βέλτιστες ραφές κυμαίνονταν από 190-220 A ενώ οι τιμές των ταχυτήτων από 30-40 cm/min (πίνακας 8.3).

Στο διάγραμμα 8.1 απεικονίζεται η σχέση του βάθους διείσδυσης (penetration) συναρτήσει της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης σε κάθε δοκίμιο.

Κεφάλαιο 8^ο: Συμπεράσματα



Διάγραμμα 8.1: Βάθος διείσδυσης συναρτήσει της έντασης ρεύματος για κάθε ταχύτητα αναγόμενης

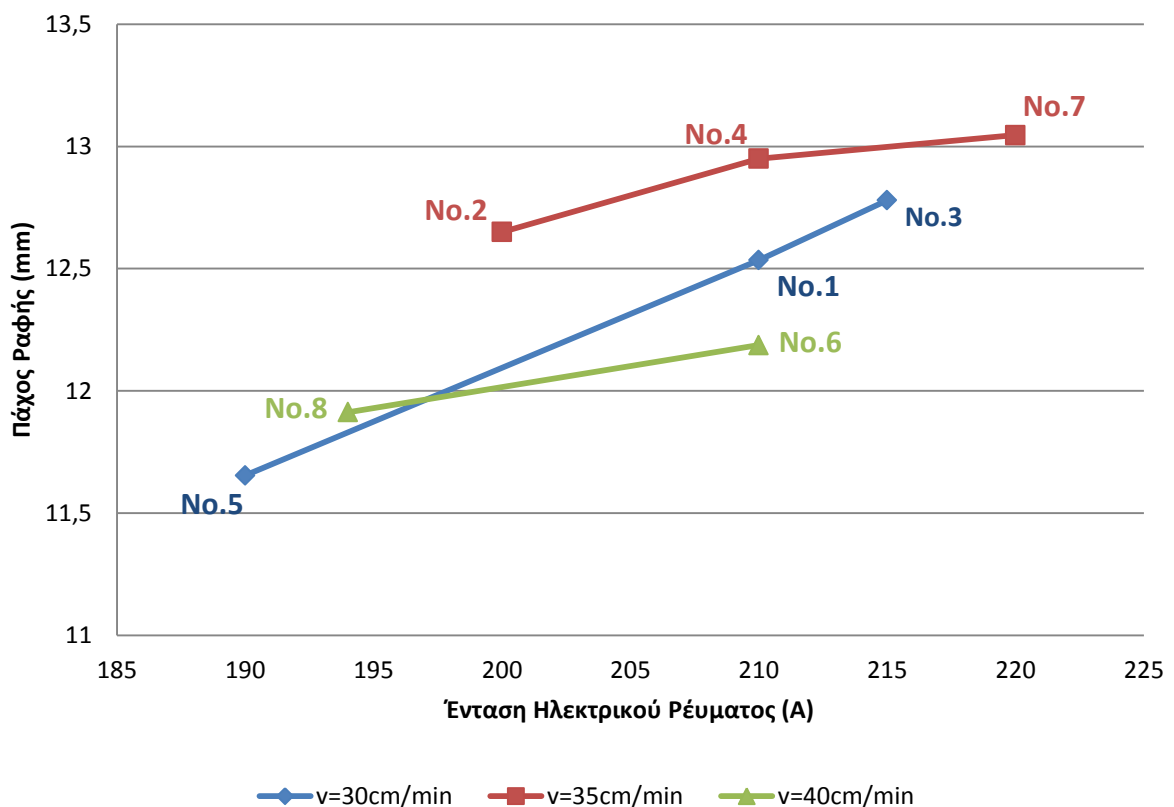
Από το διάγραμμα 8.1, παρατηρούμε τα εξής:

- Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται άμεσα από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης. Αυτό παρατηρείται και για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες.
- Για την ίδια ένταση ρεύματος ($I=210A$), το μέγιστο βάθος διείσδυσης παρατηρείται για ταχύτητα $v=35$ cm/min. Συμπεραίνουμε επομένως πως το μέγιστο βάθος προκύπτει για ενδιάμεσες τιμές ταχυτήτων. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι σε πολύ χαμηλές ταχύτητες το ηλεκτρικό τόξο έρχεται σε επαφή με την λίμνη συγκόλλησης αντί του μετάλλου βάσης και ως εκ τούτου μειώνεται η αποτελεσματικότητα της

Κεφάλαιο 8^ο: Συμπεράσματα

διείσδυσης της συγκόλλησης. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται και η θερμική ενέργεια που μεταδίδεται από το ηλεκτρικό τόξο στο μέταλλο βάσης διότι το τόξο επιδρά πιο άμεσα στο τελευταίο. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση στην ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα ανεπαρκή μετάδοση θερμότητας από το τόξο στο μέταλλο βάσης, δηλαδή η τήξη του μετάλλου βάσης αρχικά αυξάνεται και εν συνεχεία μειώνεται με σταδιακή αύξηση της ταχύτητας.

Στο διάγραμμα 8.2 απεικονίζεται η σχέση του πάχους ραφής με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης:



Διάγραμμα 8.2: Πάχος Ραφής συναρτήσει της έντασης ρεύματος για κάθε ταχύτητα αναγόμωσης

Από το διάγραμμα 8.2 συμπεραίνουμε πως κατ'αντιστοιχία με το βάθος διείσδυσης, το πάχος ραφής αυξάνεται όταν αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, αύξηση της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης επιφέρει αύξηση στο βάθος και πλάτος της διείσδυσης της αναγόμωσης, στον ρυθμό εναπόθεσης του ηλεκτροδίου και στο μέγεθος της ραφής συγκόλλησης.

8.3 Συμπεράσματα σχετικά με τη Μικροδομή και τη Μικροσκληρότητα

Όσον αφορά στη μικροδομή και τη σκληρότητα των δοκιμίων, αναφέρουμε τα εξής:

1. Η μικροδομή του μετάλλου βάσης των δοκιμίων είναι ως επί το πλείστον φερριτομπαινιτική με διάσπαρτες περιοχές περλίτη και μικρής έκτασης τοπικά, νησίδες μπαινίτη/ωστενίτη.
2. Η μορφή του μετάλλου αναγόμωσης (ανοξειδωτος χάλυβας) μετά τη στερεοποίηση, ήταν φερρίτης/ωστενίτης FA. Συγκεκριμένα, στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του ανοξειδωτου χάλυβα εμφανίζεται φερρίτης σε σκελετοειδή μορφή (Skeletal ή Vermicular Ferrite) ενώ τοπικά εμφανίζεται και πλακοειδής φερρίτης (Lathy Ferrite).
3. Στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη η μικροδομή είναι μικτή. Αποτελείται κυρίως από μπαινίτη, σε μεγαλύτερη συγκέντρωση απ'ότι στο μέταλλο βάσης, σε συνδυασμό με φερρίτη και μαρτενσίτη.

Η μέση τιμή μικροσκληρότητας για το μέταλλο βάσης όπως προκύπτει από τις μετρήσεις και των 8 δοκιμίων είναι περίπου 200 HV_{0.3}, ενώ για τη ζώνη αναγόμωσης περίπου 210 HV_{0.3}. Αυξημένες τιμές σκληρότητας παρατηρήθηκαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και ακόμη περισσότερο στη ζώνη σύνδεσης. Για την ακρίβεια, η μέση τιμή σκληρότητας για την θερμικά επηρεασμένη ζώνη ήταν περίπου 220 HV_{0.3}, ενώ η μέση τιμή σκληρότητας στην ζώνη σύνδεσης ήταν περίπου 240 HV_{0.3}. Η αύξηση της σκληρότητας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη σύνδεσης είναι αναμενόμενη καθώς σε αυτές τις ζώνες η μικροδομή του υλικού είναι ως επί το πλείστον μπαινιτική. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 8.4:

Κεφάλαιο 8^ο: Συμπεράσματα

8.4 Τελικά Συμπεράσματα

Ο σκοπός των πειραμάτων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ποιότητας των αναγομώσεων ανοξείδωτου χάλυβα σε χάλυβα X65. Η εναπόθεση του μετάλλου αναγόμωσης στο μέταλλο βάσης έγινε μέσω ηλεκτρικού τόξου με τη μέθοδο FCAW (Flux Cored Arc Welding), ενώ η τελευταία πραγματοποιήθηκε με ρομποτικό βραχίονα.

Στόχος κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού της ρομποτικής διάταξης ήταν η βελτιστοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης προκειμένου να δημιουργηθούν αναγομώσεις ποιοτικές, χωρίς ατέλειες (ρωγματώσεις, πόροι, εγκλείσματα, κ.λπ.), με ομοιόμορφο πάχος και μεγάλη διείδυση του μετάλλου αναγόμωσης στο μέταλλο βάσης.

Μετά το πέρας των πειραμάτων και της διαδικασίας βελτιστοποίησης των αναγομώσεων, τα προτεινόμενα εύρη παραμέτρων για ποιοτικές αναγομώσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ένταση Ρεύματος (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα (cm/min)	Μήκος Ηλεκτρικού Τόξου (cm)	Γωνία Ακροφύσιου ως προς την Κάθετο (°)	Παροχή Αερίου (lt/min)
190-220	25-35	30-40	1.4-1.8	50-70	18-25

Πίνακας 8.3: Προτεινόμενα εύρη τιμών για τις παραμέτρους συγκόλλησης

Οι αναγομώσεις που πραγματοποιήθηκαν συνδυάζοντας παραμέτρους εντός των ανωτέρω ορίων μπορούν να κριθούν ως επιτυχείς και αποδεκτές για δύο λόγους. Αφενός, διότι δεν υπάρχουν ατέλειες ούτε στην επιφάνεια, αλλά ούτε και στο εσωτερικό των αναγομώσεων, και αφετέρου, λόγω του ότι οι τιμές της σκληρότητας σε όλο τον όγκο της αναγόμωσης είναι παρεμφερείς και κυμαίνονται, κατά μέσο όρο, από περίπου 200 HV_{0.3} στην περιοχή του μετάλλου βάσης έως 240 HV_{0.3} στη ζώνη αναγόμωσης (πίνακας 8.4).

Περιοχή	M.B	Θ.E.Z	Z.Σ	Z.A
Μέση Μικροσκληρότητα (HV _{0.3})	197.8	217.3	237.8	209.06

Πίνακας 8.4: Μέσες τιμές μικροσκληρότητας σε κάθε ζώνη