

Κεφάλαιο 2

Οι βασικές Μέθοδοι Συγκόλλησης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 2.1 Συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW)
- 2.2 Συγκόλληση TIG ή GTAW
- 2.3 Συγκόλληση MIG – GMAW
- 2.4 Συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW)
- 2.5 Επιλογή μεθόδου συγκόλλησης

2.1 Συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW)

2.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος συγκόλλησης με επενδυμένα ηλεκτρόδια (Shielded Metal-Arc Welding – SMAW) είναι μία χειροκίνητη μέθοδος κατά την οποία η απαιτούμενη θερμότητα για την τήξη παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου. Το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο και καλυμμένο με μία **επένδυση** (πάστα), η οποία κατά την συγκόλληση αποσυντίθεται και παράγει αέρια για την προστασία του ηλεκτρικού τόξου και της λίκνης συγκόλλησης. Επιπρόσθετα το τηγμένο μέταλλο προστατεύεται από την ατμόσφαιρα με τον σχηματισμό μιας επιφανειακής κρούστας-σκουριάς (slag). Ο μεταλλικός πυρήνας του ηλεκτροδίου προσφέρει το **πρόσθετο μέταλλο** (filler metal) για το γέμισμα της ραφής συγκόλλησης.

Η μέθοδος SMAW είναι η πιο κοινή μέθοδος συγκόλλησης των μετάλλων με τις ευρύτερες εφαρμογές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην **ευελιξία** της μεθόδου. Επίσης ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι απλούστερος και πιο οικονομικός σε σχέση με αυτόν που χρησιμοποιείται σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Με την μέθοδο SMAW μπορεί να συγκολληθούν τα περισσότερα μέταλλα, όπως οι απλοί ανθρακοχάλυβες και οι χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες, οι ανοξείδωτοι και οι πυρίμαχοι χάλυβες. Με την ίδια μέθοδο μπορεί να συγκολληθούν και οι χυτοσίδηροι καθώς και οι χάλυβες υψηλής αντοχής, που σκληραίνουν μετά από θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς, με την εφαρμογή κατάλληλων διαδικασιών προθέρμανσης και μεταθέρμανσης του μετάλλου. Η μέθοδος SMAW μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης (επίπεδη, οριζόντια, κ.λ.π.) με ποιότητα εφάμιλλη των

άλλων μεθόδων που επίσης χρησιμοποιούν αναλυσκόμενο ηλεκτρόδιο (π.χ. MIG/GMAW). Η ποιότητα της συγκόλλησης μπορεί να ελεγχθεί με την επιλογή ενός κατάλληλου ηλεκτροδίου για τον σχηματισμό ενός μετάλλου συγκόλλησης με δομή και ιδιότητες εφάμιλλες με αυτές του βασικού μετάλλου.

Η μέθοδος SMAW έχει όμως και ορισμένα μειονεκτήματα ή περιορισμούς που αφορούν στη **χαμηλή παραγωγικότητα** (κυρίως σε σχέση με τη μέθοδο MIG/GMAW), που οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό εναπόθεσης μετάλλου και στις συχνές διακοπές της διαδικασίας για αλλαγή ηλεκτροδίου. Επίσης κατά την συγκόλληση πολλαπλών πάσων πρέπει να αφαιρείται η επιφανειακή κρούστα σκωρίας (slag) πριν την εφαρμογή του επόμενου πάσου και η διαδικασία αυτή επίσης μειώνει την παραγωγικότητα.

2.1.2 Βασικές αρχές της μεθόδου

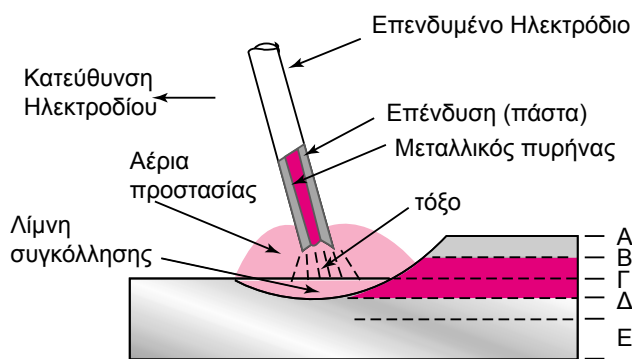
Μία σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχ.2.1. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης σχηματίζεται ηλεκτρικό τόξο μεταξύ του ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου. Η επένδυση του ηλεκτροδίου περιέχει διάφορες ενώσεις, οι οποίες όταν διασπώνται από τη θερμότητα του τόξου επιτελούν διάφορες λειτουργίες όπως: (α) παραγωγή αερίων για την προστασία τόσο του ηλεκτρικού τόξου όσο και της λίμνης συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα, (β) αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και σταθεροποίηση του τόξου, (γ) προσθήκη των στοιχείων σχηματισμού της επιφανειακής κρούστας σκωρίας (slag) για την προστασία του τηγμένου μετάλλου, (δ) καθαρισμός του τηγμένου μετάλλου και προσθήκη κραματικών στοιχείων.

Κατά την συγκόλληση SMAW το κυρίαρχο πρόβλημα είναι ο έλεγχος των τριών παραμέτρων – ταχύτητα μετατόπισης του τόξου, ένταση ρεύματος και τάση του ηλεκτρικού τόξου. Στην χειροκίνητη μέθοδο SMAW ο συγκολλητής ελέγχει τις δύο παραμέτρους – την ταχύτητα και την τάση του τόξου. Κατά την μέθοδο SMAW η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κυμαίνεται μεταξύ 15 και 500 A, ενώ η τάση μεταξύ 14 και 40V ανάλογα με το ηλεκτρόδιο.

Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει μία μηχανή συγκόλλησης, μία τσιμπίδα για την συγκράτηση του ηλεκτροδίου (με θερμικά μονωμένη χειρολαβή) καθώς και τις απαραίτητες καλωδιώσεις. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα και το ηλεκτρόδιο μπορεί να έχει θετική ή αρνητική πολικότητα. Οι επενδύσεις των ηλεκτροδίων ρυθμίζονται για λειτουργία με συνεχές ή εναλλασσόμενο ή και για τους δύο τύπους ηλεκτρικού ρεύματος.

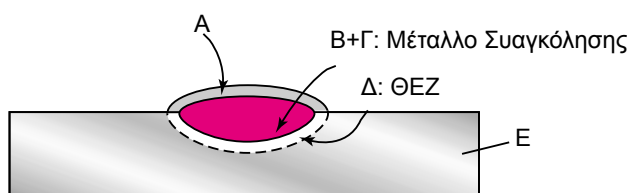
2.1.3 Ηλεκτρόδια για συγκολλήσεις χαλύβων

Η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου για την συγκόλληση απλών ανθρακούχων ή χαμηλά κραματωμένων χαλύβων εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα της συγκόλλησης, τον διαθέσιμο εξοπλισμό (μηχανή συγκόλλησης), την θέση συγκόλλησης, την χημική σύσταση του βασικού μετάλλου, την γεωμετρία της σύνδεσης και το κόστος.



(α)

A: Επιφανειακή κρούστα σκουριάς
 B: Ενίσχυση συγκόλλησης
 Γ: Διείσδυση
 B+Γ: Εναπόθεση μετάλλου (Μέταλλο Συαγκόλλησης)
 Δ: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
 E: Βασικό μέταλλο



(β)

Σχ. 2.1 (α) Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου SMAW (β) Εγκάρσια τομή στον άξονα συγκόλλησης.

Οι περισσότερες συγκολλήσεις πραγματοποιούνται σύμφωνα με κάποια βιομηχανικά **πρότυπα και προδιαγραφές**, όπως για παράδειγμα ο κώδικας ASME (Boiler and Pressure Vessel Code), ο κώδικας API, οι προδιαγραφές AWS, IIW, DIN, ISO, EN, κ.λ.π. Όσον αφορά στα ηλεκτρόδια για την μέθοδο SMAW, η ταξινόμηση των ηλεκτροδίων ακολουθεί τις προδιαγραφές AWS-ASTM σύμφωνα με τις οποίες η ταξινόμηση πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντοχή εφελκυσμού του μετάλλου συγκόλλησης, το είδος της επένδυσης (πάστας), το ρεύμα και την πολικότητα καθώς και τις θέσεις συγκόλλησης. Η ονοματολογία των ηλεκτροδίων ακολουθεί το σχήμα EXXX, όπου το γράμμα E σημαίνει ηλεκτρόδιο (Electrode). Τα δύο πρώτα ψηφία υποδεικνύουν την ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού του μετάλλου συγκόλλησης σε μονάδες Ksi (1Ksi=6.9 MPa). Για παράδειγμα το ηλεκτρόδιο E70XX έχει ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού 70Ksi ή 480MPa. Το τρίτο ψηφίο υποδεικνύει την θέση συγκόλλησης.

Το EXX1X σημαίνει όλες τις θέσεις, το EXX2X επίπεδη θέση συγκόλλησης και οριζόντιες αυχενικές συγκολλήσεις, το EXX3X σημαίνει μόνο επίπεδες συγκολλήσεις. Ο συνδυασμός του τρίτου και τέταρτου ψηφίου καθορίζει την πολικότητα. Ο Πιν.2.1 περιλαμβάνει τους 10 κυριότερους τύπους ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις απλών ανθρακοχαλύβων και χαμηλά κραματωμένων χαλύβων.

Η επιλογή ηλεκτροδίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι αρμοδιότητα του μηχανικού συγκολλήσεων. Για παράδειγμα το E6010 είναι ένα “γενικής χρήσης” ηλεκτρόδιο που όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εναλλασσόμενο ρεύμα. Το E6012 είναι ένα άλλο γενικής χρήσης ηλεκτρόδιο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε συνεχές όσο και σε εναλλασσόμενο ρεύμα αλλά η συγκόλληση δεν θα έχει την διείδυση που θα έχει με το E6010. Το E7016 είναι ένα άλλο ηλεκτρόδιο γενικής χρήσης με υψηλή αντοχή και ολκιμότητα, όμως είναι ακριβότερο από τα προηγούμενα και όταν απορροφήσει υγρασία δημιουργεί πόρους όταν η συγκόλληση πραγματοποιηθεί κάθετα ή υπεράνω (ουρανός). Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί πίνακες με τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων ώστε να μπορεί ο μηχανικός να πραγματοποιήσει την κατάλληλη επιλογή ηλεκτροδίου.

Πιν.2.1 Ηλεκτρόδια για την συγκόλληση ανθρακούχων χαλύβων

Κωδικός AWS-ASTM	Επένδυση Ηλεκτροδίου	Ρεύμα Πολικότητα	Θέση Συγκόλλησης
E6010	Κυτταρίνη, νάτριο	ΣΡΗΘ	E, K, Y, O
E6011	Κυτταρίνη, κάλιο	ΣΡΗΘ, ΕΡ(ΑC)	E, K, Y, O
E6012	Οξ. Τιτανίου, νάτριο	ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, K, Y, O
E6013	Οξ. Τιτανίου, κάλιο	ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, K, Y, O
E6014	Σκόνη σιδήρου, οξ. τιτανίου	ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, K, Y, O
E7016	Χαμηλού υδρογόνου, κάλιο	ΣΡΗΘ, ΕΡ	E, K, Y, O
E7018	Χαμηλού υδρογόνου, σκόνη σιδήρου	ΣΡΗΘ, ΕΡ	E, O
E6020	Οξ. σιδήρου	ΣΡΗΘ, ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, O
E7024	Σκόνη σιδήρου, οξ. τιτανίου	ΣΡΗΘ, ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, O
E6027	Σκόνη σιδήρου, οξ. σιδήρου	ΣΡΗΘ, ΣΡΗΑ, ΕΡ	E, O

Σημείωση: ΣΡΗΘ = Συνεχές ρεύμα ηλεκτρόδιο θετικό, ΣΡΗΑ= Συνεχές ρεύμα ηλεκτρόδιο αρνητικό, ΕΡ = εναλλασσόμενο ρεύμα, Ε= επίπεδη θέση, Κ= κάθετη θέση, Υ= υπεράνω (ουρανός), Ο= οριζόντια θέση

2.2 Συγκόλληση TIG ή GTAW

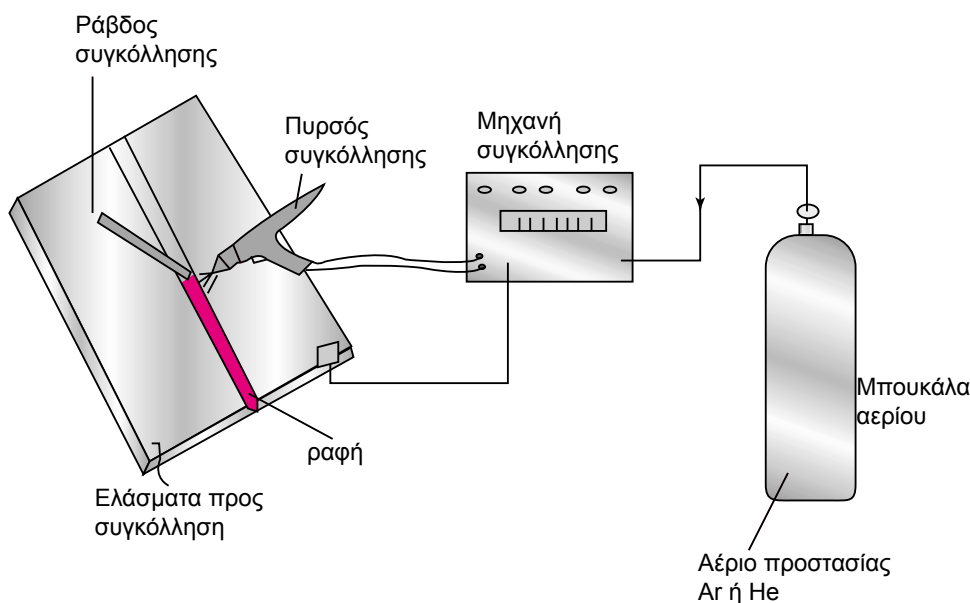
2.2.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση GTAW-TIG είναι μία μέθοδος κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός **μη-αναλυσκόμενου ηλεκτροδίου** από βολφράμιο (W) και του προς συγκόλληση μετάλλου. Η συγκόλληση προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Στην λίμνη συγκόλλησης προστίθεται, εάν απαιτείται, πρόσθετο συγκολλητικό υλικό, που προέρχεται από μία ράβδο συγκόλλησης. Η συγκόλληση TIG (Tungsten Inert Gas) αναφέρεται και ως συγκόλληση GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Στο Σχ.2.2 φαίνεται η διάταξη της συγκόλλησης TIG.

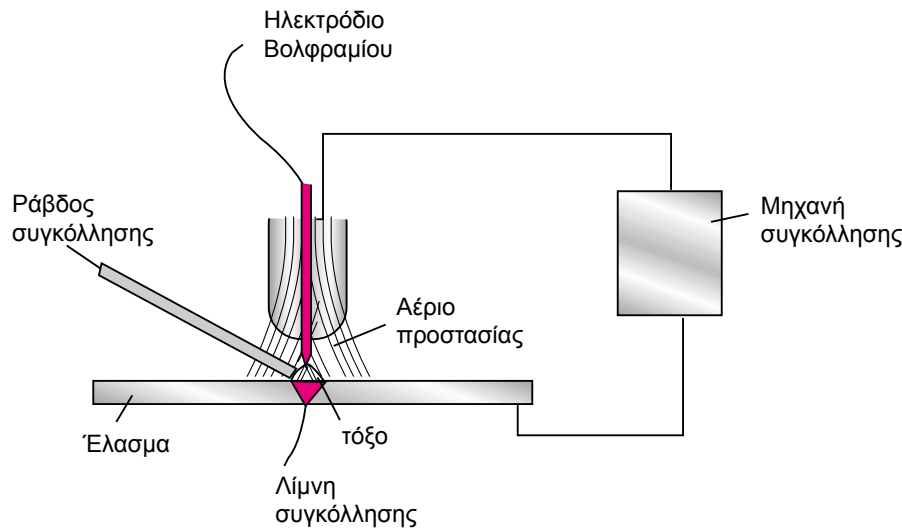
Το αέριο προστασίας χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα και ειδικότερα από την αντίδραση του τηγμένου μετάλλου με το οξυγόνο και το άζωτο. Οι αντιδράσεις αυτές συνήθως οδηγούν στον σχηματισμό πόρων και εγκλεισμάτων που εξασθενούν την συγκόλληση. Στο Σχ.2.3 φαίνεται η περιοχή της συγκόλλησης και η προστασία της λίμνης από το αδρανές αέριο.

Το αέριο προστασίας τροφοδοτείται στην περιοχή της συγκόλλησης από τον πυρσό συγκόλλησης. Στις συγκολλήσεις TIG το αέριο προστασίας είναι αργό (Ar) ή ήλιο (He). Η χρήση του αργού είναι πιο διαδεδομένη λόγω της καταλληλότητάς του για την συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων και του μικρότερου κόστους σε σχέση με το ήλιο.

Στην συγκόλληση TIG δεν απαιτείται η χρήση επένδυσης (πάστας) ηλεκτροδίου. Έτσι αποφεύγονται όλα τα πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με την χρήση της πάστας, όπως ο εγκλωβισμός της πάστας στην συγκόλληση, καθώς και ο καθαρισμός μετά το πέρας της συγκόλλησης.



Σχ. 2.2 Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου TIG-GTAW



Σχ. 2.3 Συγκόλληση TIG-GTAW

Με την μέθοδο TIG είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων και των βιομηχανικών κραμάτων, όπως οι δομικοί χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου, τα κράματα χαλκού (ορείχαλκοι και μπρούντζοι), τα κράματα νικελίου και άλλα.

Η μέθοδος TIG μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για διμεταλλικές συγκολλήσεις καθώς και για την επίστρωση σκληρών προστατευτικών επικαλύψεων πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα.

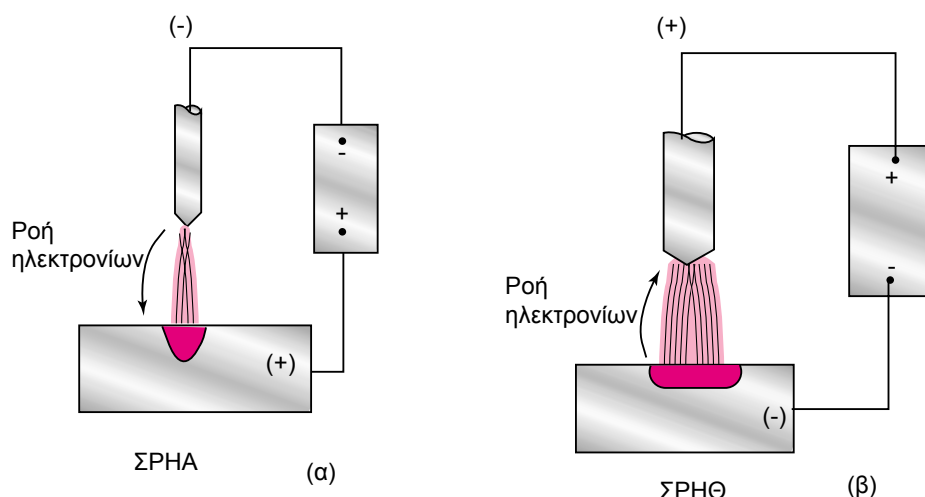
Η συγκόλληση TIG μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα, το πιο ρεύμα θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το προς συγκόλληση μέταλλο και την εφαρμογή.

2.2.2 Συγκόλληση TIG με συνεχές ρεύμα

Στην συγκόλληση TIG με συνεχές ρεύμα (ΣΡ/DC) διακρίνουμε δύο υποπεριπτώσεις:

- (α) Συνεχές Ρεύμα- Ηλεκτρόδιο Αρνητικό (ΣΡΗΑ) ή (DCEN)
- (β) Συνεχές Ρεύμα - Ηλεκτρόδιο Θετικό (ΣΡΗΘ) ή (DCEP)

Στην πρώτη περίπτωση (ΣΡΗΑ), το ηλεκτρόδιο του βολφραμίου είναι αρνητικό (-) και το προς συγκόλληση μέταλλο είναι θετικό (+). Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το ηλεκτρόδιο προς το μέταλλο όπου και προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας την θέρμανση και φυσικά την τήξη του μετάλλου με αποτέλεσμα η συγκόλληση να είναι στενή και να πραγματοποιείται με μεγάλη διείσδυση (Σχ.2.4α). Η λειτουργία ΣΡΗΑ χρησιμοποιείται στις περισσότερες συγκολλήσεις των μετάλλων.

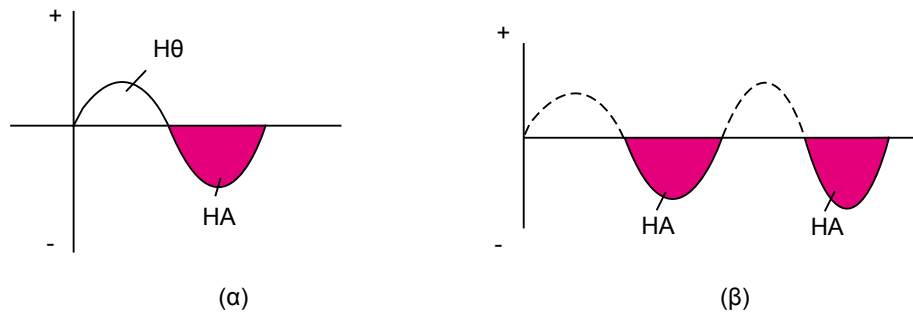


Σχ. 2.4 (α) Πολικότητα ΣΡΗΑ: στενή συγκόλληση με μεγάλη διείσδυση (β) πολικότητα ΣΡΗΘ: ευρεία συγκόλληση με μικρή διείσδυση.

Στη δεύτερη περίπτωση (ΣΡΗΘ), η ροή των ηλεκτρονίων είναι αντίστροφη, από το μέταλλο προς το ηλεκτρόδιο, και επομένως προκαλεί θέρμανση και σε πολλές περιπτώσεις τήξη της κορυφής του ηλεκτροδίου με επακόλουθη αλλοίωση της χημικής σύστασης της συγκόλλησης. Για τον λόγο αυτό, στις συγκολλήσεις ΣΡΗΘ πρέπει να χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο βολφραμίου μεγαλύτερης διαμέτρου. Αυτό σε συνδυασμό με την χαμηλότερη ένταση του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα η συγκόλληση να έχει μεγαλύτερο πλάτος και μικρότερη διείσδυση (Σχ.2.4β). Μία από τις σημαντικότερες επιδράσεις της συγκόλλησης ΣΡΗΘ είναι ο λεγόμενος καθοδικός καθαρισμός, ο οποίος είναι πιο εμφανής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, όπου υπάρχει διάσπαση του προστατευτικού οξειδίου Al_2O_3 διευκολύνοντας την τήξη του μετάλλου. Η διάσπαση προκαλείται είτε από τα ηλεκτρόνια που απομακρύνονται από το μέταλλο είτε από τα θετικά ιόντα του αερίου που προσπίπτουν επάνω στο μέταλλο.

2.2.3 Συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα

Κατά την συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP/AC) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει συνδυασμός ΣΡΗΑ και ΣΡΗΘ. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ.2.5α ένας πλήρης κύκλος EP αποτελείται από μισό κύκλο ΣΡΗΘ και μισό κύκλο ΣΡΗΑ. Στις συγκολλήσεις αλουμινίου το προστατευτικό φιλμ οξειδίου (Al_2O_3) παρεμποδίζει την ροή του ρεύματος όταν ο κύκλος είναι στην περιοχή ΗΘ, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό ανόρθωση του ρεύματος (rectification), Σχ.2.5β. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται επιπρόσθετα ένα υψίσυχνο (HF) ρεύμα υψηλής τάσεως με χαμηλή ένταση, το οποίο γεφυρώνει το κενό μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μετάλλου ενώ ταυτόχρονα διασπά το προστατευτικό φιλμ του οξειδίου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία δίοδος για την ροή του ρεύματος συγκόλλησης. Η συγκόλληση αυτή χαρακτηρίζεται ως EP/HF (AC/HF).



Σχ. 2.5 (α) Τα τμήματα ΣΡΗΘ και ΣΡΗΑ ενός πλήρους κύκλου συγκόλλησης ΕΡ (β) Ανόρθωση του ΕΡ.

Στον Πιν.2.2 φαίνονται οι διαφορετικές μέθοδοι για την συγκόλληση μετάλλων με TIG.

Πιν.2.2 Μέθοδοι συγκόλλησης TIG

Μέταλλο	ΣΡΗΑ	ΣΡΗΘ	ΕΡ
Χάλυβες	E	O	O
Χυτοσίδηροι	E	O	K (Σημ. 1)
Ανοξείδωτοι χάλυβες	E	O	K (Σημ. 1)
Κράματα υψηλών θερμοκρασιών	E	O	K (Σημ. 1)
Πυρίμαχα μέταλλα	E	O	O
Κράματα αλουμινίου			
<0.6mm	O (Σημ.2)	K	E
>0.6mm	O (Σημ.2)	O	E
Χυτά αλουμινίου	O (Σημ.2)	O	E
Κράματα χαλκού			
Ορείχαλκοι	E	O	K (Σημ. 1)
Μπρούντζοι	E	O	O
Κράματα μαγνησίου			
<3mm	O (Σημ.2)	K	E
>3mm	O (Σημ.2)	O	E
Χυτά μαγνησίου	O (Σημ.2)	O	E

E: Εξαιρετική K: Καλή O: Δεν συνιστάται

Σημ.1: Με ένταση ρεύματος κατά 25% υψηλότερη από ΣΡΗΑ

Σημ.2: Εκτός αν προηγηθεί μηχανικός ή χημικός καθαρισμός.

2.2.4 Οι βασικές συνδέσεις στις συγκολλήσεις TIG

Στις συγκολλήσεις TIG χρησιμοποιούνται πέντε βασικές συνδέσεις ενώ όλες οι άλλες συνδέσεις αποτελούν συνδυασμό των πέντε βασικών συνδέσεων. Οι συνδέσεις αυτές είναι:

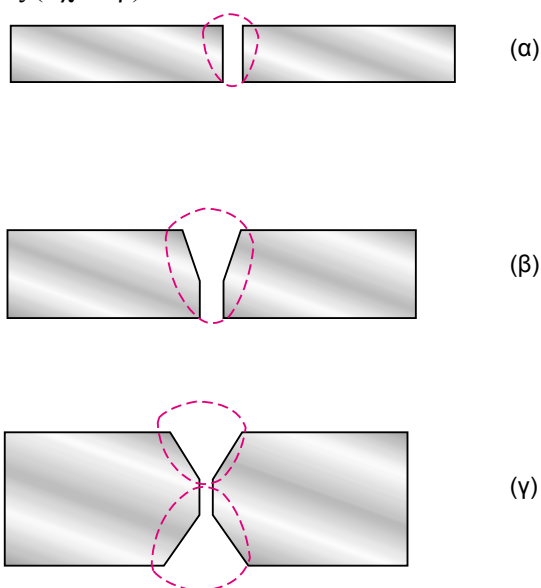
1. Σύνδεση συμβολής (butt joint), Σχ.2.6
2. Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint), Σχ.2.7α
3. Γωνιακή σύνδεση (corner joint), Σχ.2.7β
4. Αυχενική σύνδεση “T” (tee joint), Σχ. 2.7γ
5. Σύνδεση ακμών (edge joint), Σχ.2.7δ

Σε όλες τις συνδέσεις απαιτείται καλός καθαρισμός πριν από την συγκόλληση για την απομάκρυνση σκουριάς, οξειδίων, σκόνης, γράσου, λαδιών και κάθε τύπου ακαθαρσιών.

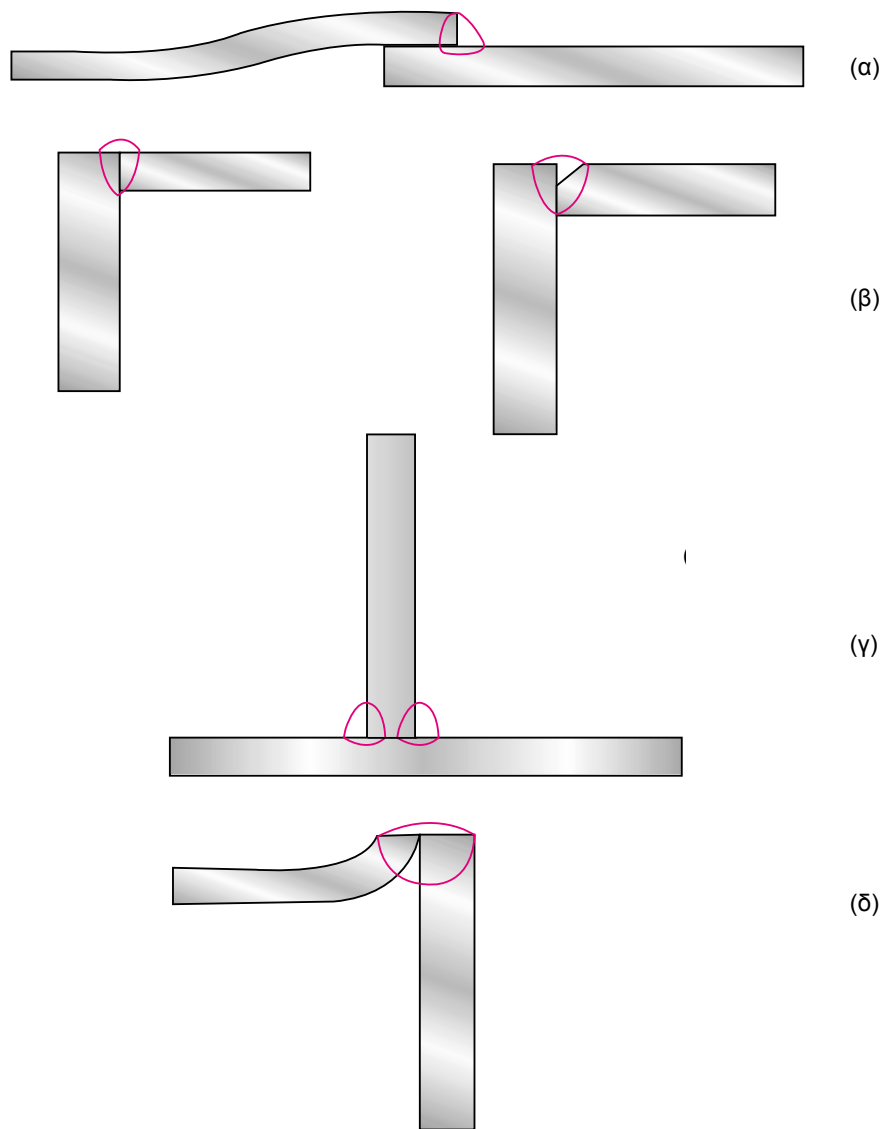
Η σύνδεση συμβολής μπορεί να είναι απλή (Σχ. 2.6α), με μονό V (Σχ.2.6β) ή διπλό V (Σχ.2.6γ). Η επιλογή της σύνδεσης εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων και από την χρήση ή όχι συγκολλητικού υλικού. Το μονό και διπλό V κατασκευάζεται με φρεζάρισμα των ακμών των ελασμάτων.

Οι συνδέσεις με επικάλυψη (Σχ.2.7α) δεν απαιτούν προετοιμασία των ακμών, απαιτούν όμως καλή επαφή των ελασμάτων. Οι συνδέσεις αυτές χρησιμοποιούνται σε σχετικά λεπτά ελάσματα (<6mm).

Οι γωνιακές συνδέσεις χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την κατασκευή μεταλλικών κουτιών και δοχείων. Ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων χρησιμοποιούνται διάφορες συνδέσεις (Σχ.2.7β)



Σχ. 2.6 Συνδέσεις συμβολής: (α) απλή (β) μονό V (γ) διπλό V



Σχ. 2.7 (α) Σύνδεση με επικάλυψη, (β) Γωνιακές συνδέσεις, (γ) Αυχενική σύνδεση “T”, (δ) Σύνδεση ακμών

Στις αυχενικές συνδέσεις T (Σχ.2.7γ) συνήθως απαιτείται η χρήση ράβδου συγκόλλησης για το γέμισμα της σύνδεσης. Ο αριθμός των περασμάτων (πάσων) εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων και την επιθυμητή ενίσχυση.

Οι συνδέσεις ακμών (Σχ.2.7δ) χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στα πολύ λεπτά ελάσματα και δεν απαιτούν την προσθήκη πρόσθετου συγκολλητικού υλικού (ράβδου). Το μειονέκτημα των συνδέσεων αυτών είναι ότι δεν έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή σε εφελκυστικά ή καμπτικά φορτία.

2.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συγκολλήσεων TIG

Οι συγκολλήσεις TIG παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ποιότητα συγκολλήσεων
- Μικρές παραμορφώσεις
- Μεγάλη ευελιξία στη χρήση μηχανών συγκόλλησης διαφορετικών τύπων
- Συγκόλληση με ή χωρίς προσθήκη πρόσθετου συγκολλητικού υλικού (filler)
- Ακρίβεια στον έλεγχο της εισαγωγής θερμότητας

Μειονεκτήματα

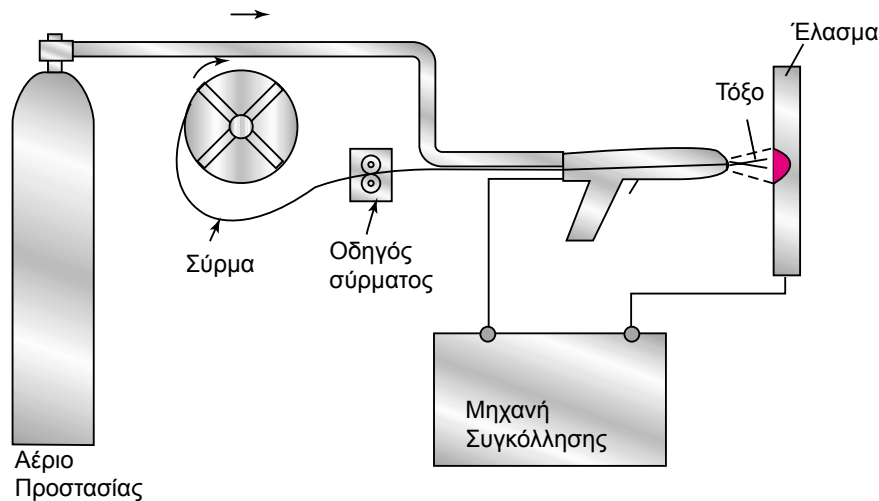
- Χαμηλότερη παραγωγικότητα σε σχέση με τις συγκολλήσεις SMAW και GMAW-MIG
- Αντιοικονομική μέθοδος για ελάσματα μεγάλου πάχους (>10mm)
- Εύκολη μόλυνση της λίμνης συγκόλλησης όταν η προστασία αερίου δεν είναι ικανοποιητική.

2.3 Συγκόλληση MIG – GMAW

2.3.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση MIG/GMAW είναι μία μέθοδος κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός **αναλυσκόμενου ηλεκτροδίου** και του προς συγκόλληση μετάλλου ενώ ταυτόχρονα η λίμνη συγκόλλησης προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Η συγκόλληση MIG (Metal Inert Gas) αναφέρεται και ως συγκόλληση GMAW (Gas Metal Arc Welding).

Το αναλυσκόμενο ηλεκτρόδιο έχει την μορφή μεταλλικού σύρματος και έχει συνήθως σύσταση παραπλήσια με αυτήν του βασικού μετάλλου. Τόσο το σύρμα συγκόλλησης (που διατίθεται σε συσκευασία κουλούρας) όσο και το προστατευτικό αέριο, διοχετεύονται μέσα από τον πυρσό συγκόλλησης. Στο Σχ.2.8 φαίνεται η βασική διάταξη για την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης MIG. Μία βασική διαφορά με την συγκόλληση TIG, που μελετήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι ότι στην MIG το ηλεκτρόδιο είναι αναλυσκόμενο και παρέχει το απαραίτητο συμπληρωματικό υλικό συγκόλλησης, ενώ στην TIG, το ηλεκτρόδιο είναι μη αναλυσκόμενο (από βολφράμιο) και το συμπληρωματικό υλικό συγκόλλησης παρέχεται από την ράβδο συγκόλλησης. Η συνεχής ροή συγκολλητικού υλικού κατά την συγκόλληση MIG επιτρέπει την επίτευξη υψηλών ρυθμών εναπόθεσης ραφών και προσδίδει στην μέθοδο αυτή **υψηλή παραγωγικότητα**, τουλάχιστον 4-5 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που επιτυγχάνεται με την μέθοδο TIG. Παράλληλα, η μεταφορά μετάλλου μέσω της στήλης του ηλεκτρικού τόξου επιτρέπει την επίτευξη υψηλού ρυθμού εισαγωγής θερμότητας, που εν μέρει οφείλεται στο υπέρθερμο τηγμένο μέταλλο που μεταφέρεται από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης.



Σχ. 2.8 Διάταξη μεθόδου GMAW/MIG

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης. Η ποιότητα των συγκολλήσεων MIG εξαρτάται από διάφορους παράγοντες κυριότεροι των οποίων είναι η καθαρότητα του βασικού μετάλλου, το είδος του προστατευτικού αερίου και ο μηχανισμός της μεταφοράς μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Αυτός με την σειρά του εξαρτάται από τις συνθήκες συγκόλλησης (τάση και ένταση ρεύματος, πολικότητα). Πιο κάτω θα δούμε συνοπτικά τους παράγοντες αυτούς.

2.3.2 Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση MIG

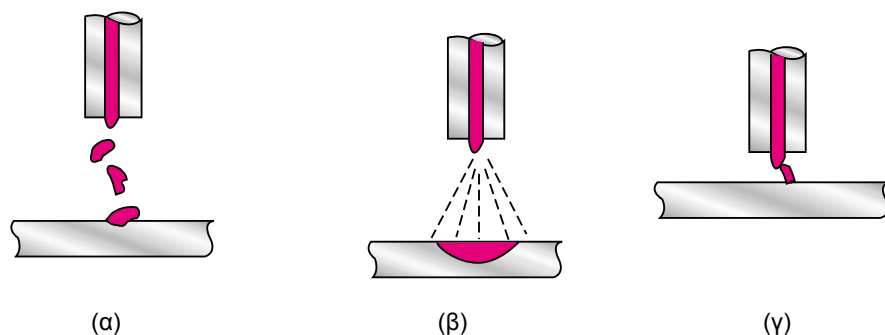
Η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης πραγματοποιείται με τρεις μηχανισμούς, ανάλογα με την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος που επιβάλλεται στο ηλεκτρικό τόξο. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- Μεταφορά με σταγόνες
- Μεταφορά με ψεκασμό (σπρέι)
- Μεταφορά μέσω βραχυκυκλώματος σύρματος/βασικού μετάλλου

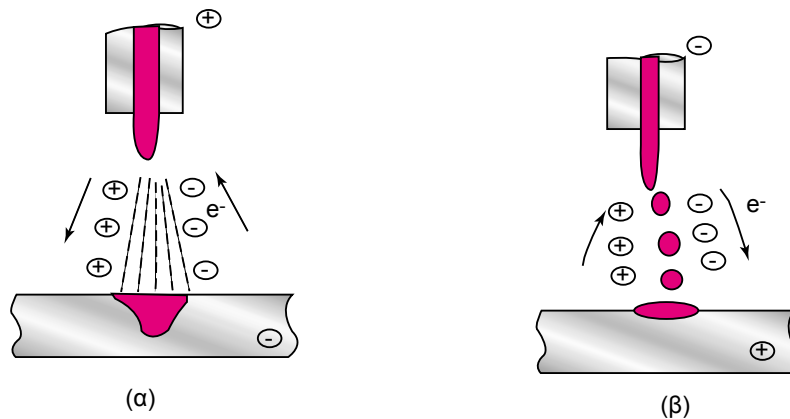
Για την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης MIG είναι αναγκαία η επίτευξη μιας ικανής πυκνότητας ρεύματος ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Για μια δεδομένη ελάχιστη πυκνότητα ρεύματος, που εξαρτάται από την διάμετρο του σύρματος, η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με την μορφή σχετικά μεγάλων σταγόνων (Σχ.2.9α), που αποκολλώνται από την άκρη του σύρματος συγκόλλησης. Με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος σχηματίζεται ένα σπρέι, αποτελούμενο από μικροσκοπικά σταγονίδια μετάλλου (Σχ.2.9β). Το σπρέι αυτό έχει κωνική μορφή από το άκρο του σύρματος προς το μέταλλο βάσης και στην ουσία το υλικό συγκόλλησης ψεκάζεται προς την λίμνη

συγκόλλησης. Ο τρίτος μηχανισμός μεταφοράς μετάλλου δεν πραγματοποιείται με μεταφορά σταγονιδίων μέσω του τόξου αλλά με περιοδική επαφή του ηλεκτροδίου (σύρματος) με το προς συγκόλληση μέταλλο, με ρυθμό μεγαλύτερο από 100 επαφές/sec και ονομάζεται μεταφορά μετάλλου μέσω βραχυκυκλώματος (Σχ.2.9γ). Κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος, τηγμένα τμήματα του σύρματος αποσπώνται και ενσωματώνονται στην λίμνη συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως με σύρματα μικρής διαμέτρου για συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο σχετικά μικρός ρυθμός εισαγωγής θερμότητας, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις παραμορφώσεις και τις μεταλλουργικές μεταβολές.

Η υψηλή παραγωγικότητα στις συγκολλήσεις MIG επιτυγχάνεται κυρίως όταν η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με σπρέι. Μεγάλο ρόλο στην μεταφορά μετάλλου με σπρέι παίζει η **πολικότητα** της συγκόλλησης. Η μεγάλη πλειοψηφία των συγκολλήσεων MIG για τα περισσότερα μέταλλα πραγματοποιείται με Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρώδιο Θετικό (ΣΡΗΘ/DCEP). Στην περίπτωση αυτή (Σχ.2.10α), τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς το ηλεκτρώδιο (σύρμα) προκαλώντας την θέρμανση και την τήξη του. Παράλληλα, μέσα στο τόξο, τα θετικά ιόντα του αερίου οδεύουν προς την συγκόλληση. Κατά την κίνησή τους αυτή, τα ιόντα αερίου προκαλούν την επιτάχυνση των σταγόνων μετάλλου που οδεύουν προς την συγκόλληση, με αποτέλεσμα η συγκόλληση να πραγματοποιείται με μεγάλη διείσδυση. Παράλληλα, τα ιόντα αερίου προκαλούν και τον καθαρισμό της επιφάνειας του μετάλλου βάσης. Στην αντίθετη περίπτωση (Σχ.2.10β), όταν η πολικότητα είναι Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρώδιο Αρνητικό (ΣΡΗΑ/DCEN), τα ιόντα αερίου οδεύουν προς το ηλεκτρώδιο. Εκεί παρεμποδίζουν την ροή μετάλλου και τον σχηματισμό σπρέι, καθώς συγκρατούν τις σταγόνες στο άκρο του σύρματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγάλων σταγόνων, οι οποίες οδεύουν προς την συγκόλληση με μικρή ταχύτητα. Έτσι στην περίπτωση αυτή η διείσδυση είναι μικρή.



Σχ. 2.9 Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG: (α) μεταφορά με σταγόνες, (β) μεταφορά με σπρέι, (γ) μεταφορά με βραχυκύκλωμα



Σχ. 2.10 Επίδραση της πολικότητας στη μεταφορά μετάλλου: (α) ΣΡΗΘ, (β) ΣΡΗΑ

Αξίζει να σημειώσουμε ότι κατά την συγκόλληση MIG χρησιμοποιείται η αντίθετη πολικότητα απ' ό τι στη συγκόλληση TIG. Στην MIG χρησιμοποιείται κυρίως η πολικότητα ΣΡΗΘ ενώ στην TIG χρησιμοποιείται η πολικότητα ΣΡΗΑ.

2.3.3 Σύρμα Συγκόλλησης

Η επιλογή ενός σύρματος συγκόλλησης για την μέθοδο MIG εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, κυριότεροι των οποίων είναι οι εξής:

- Η επίτευξη παραπλήσιας χημικής σύστασης μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και βασικού μετάλλου
- Έλεγχος μεταλλουργικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης (π.χ. μέγεθος κόκκου και μικροδιαφορισμός στο μέταλλο συγκόλλησης)
- Αποξείδωση του μετάλλου συγκόλλησης
- Σταθερότητα ηλεκτρικού τόξου και μεταφοράς μετάλλου

Όπως είπαμε και πιο πάνω, το σύρμα συγκόλλησης παρέχεται με τη μορφή κουλούρας. Ένα ερώτημα που τίθεται συχνά είναι ποιος είναι ο ρυθμός εναπόθεσης για δεδομένη διάμετρο σύρματος και ρεύματος συγκόλλησης. Οι κατασκευαστές συνήθως παρέχουν αυτές τις πληροφορίες με την μορφή διαγραμμάτων. Για την αποξείδωση του μετάλλου συγκόλλησης χρησιμοποιούνται κραματικά στοιχεία, όπως τα Si, Al και Ti, ενώ για την αποθείωση χρησιμοποιείται το Mn. Στο εμπόριο διατίθεται μία μεγάλη ποικιλία συρμάτων συγκόλλησης για την συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων.

2.4 Συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW)

2.4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος συγκόλλησης με βυθισμένο τόξο (Submerged Arc Welding – SAW) είναι μία αυτοματοποιημένη μέθοδος κατά την οποία η απαιτούμενη θερμότητα για την τήξη παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδί-

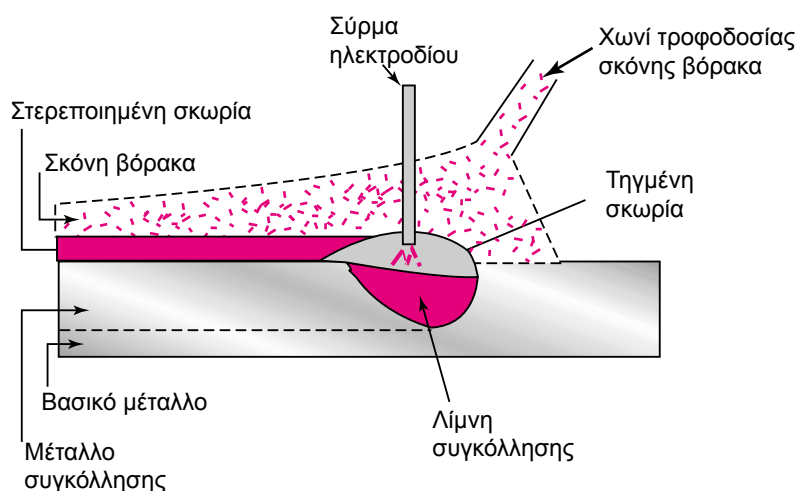
ου και του προς συγκόλληση μετάλλου. Το ηλεκτρικό τόξο και η λίμνη συγκόλλησης προστατεύονται από ένα στρώμα τηγμένης σκωρίας και από ένα στρώμα άτηκτου κοκκώδους συλλιπάσματος (σκόνη βόρακα - flux). Το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο σε μορφή σύρματος και προσφέρει το αναγκαίο πρόσθετο μέταλλο (filler metal) για το γέμισμα της ραφής συγκόλλησης. Η διάταξη για την συγκόλληση SAW φαίνεται στο Σχ. 2.11. Η σκόνη βόρακα προ-εναποτίθεται με τη βοήθεια ενός χωνιού τροφοδοσίας που κινείται μαζί με το ηλεκτρικό τόξο.

2.4.2 Χαρακτηριστικά της μεθόδου

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης με βυθισμένο τόξο, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων είναι τα εξής:

Ρόλος της σκόνης βόρακα (flux). Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το ηλεκτρικό τόξο παραμένει καλυμμένο και πλήρως προστατευμένο από το περιβάλλον με αποτέλεσμα να παράγονται συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας. Με κατάλληλες προσθήκες στην σκόνη βόρακα είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η σύσταση του μετάλλου συγκόλλησης και να αντισταθμιστούν τυχόν απώλειες κραματικών στοιχείων. Η αλληλεπίδραση του τηγμένου βόρακα με την λίμνη συγκόλλησης οδηγεί στον καθαρισμό της λίμνης έτσι ώστε μετά την στερεοποίηση να ελαχιστοποιούνται τα εγκλείσματα σκουριάς. Η μηδενική σχεδόν απορρόφηση αερίων από την ατμόσφαιρα περιορίζει και την δημιουργία πορώδους στο μέταλλο συγκόλλησης.

Μετάδοση θερμότητας. Η πλήρης κάλυψη του τόξου περιορίζει τις θερμικές απώλειες με αποτέλεσμα η συγκόλληση με βυθισμένο τόξο να έχει πολύ μεγάλη απόδοση που πλησιάζει το 90%. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, την αύξηση της παραγωγικότητας, δηλαδή του βάρους εναποτιθέμενου μετάλλου ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης.



Σχ. 2.11 Συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW)

Τύπος ηλεκτρικού ρεύματος. Κατά τις συγκολλήσεις SAW χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα με ηλεκτρόδιο θετικό (ΣΡΗΘ) με ένταση που κυμαίνεται μεταξύ 400 και 2000Α. Πάνω από τα 1000Α χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα για την ελαχιστοποίηση της εκτροπής του ηλεκτρικού τόξου (arc blow) λόγω του ισχυρού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται.

Πλεονεκτήματα. Όπως συζητήσαμε και πιο πάνω, η μέθοδος SAW έχει υψηλή παραγωγικότητα, η οποία μάλιστα μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την χρήση πολλαπλών κεφαλών συγκόλλησης. Με την μέθοδο SAW είναι δυνατόν να συγκολληθούν ελάσματα μεγάλου πάχους. Η καθαρότητα και ποιότητα του μετάλλου συγκόλλησης είναι υψηλή με εγκλείσματα και πορώδες σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Η κάλυψη του ηλεκτρικού τόξου καθιστά μη αναγκαία την χρήση προστατευτικού αδρανούς αερίου.

Μειονεκτήματα. Λόγω της βαρύτητας η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε επίπεδη και οριζόντια θέση συγκόλλησης. Ο μεγάλος ρυθμός εισαγωγής θερμότητας (βλ. Κεφ.3) είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση των παραμορφώσεων.

2.5 Επιλογή μεθόδου συγκόλλησης

Σε πολλές κατασκευές, ο μηχανικός καλείται να επιλέξει, μεταξύ των άλλων, και την μέθοδο συγκόλλησης που θα εφαρμοστεί. Όπως είδαμε και στην περιγραφή των μεθόδων πιο πάνω, κάθε μέθοδος έχει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Τις περισσότερες φορές το βασικότερο κριτήριο για την επιλογή μεθόδου είναι το κόστος και η διαθεσιμότητα του απαιτούμενου εξοπλισμού. Η εξοικείωση του συνεργείου συγκολλητών ή μιας βιομηχανίας με μία συγκεκριμένη μέθοδο δημιουργεί επιπλέον κόστος όταν ζητηθεί η εφαρμογή μιας νέας μεθόδου. Η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης πρέπει να βασίζεται στην ικανοποίηση των απαιτήσεων που θέτει η πραγματοποίηση της σύνδεσης. Έτσι θα δούμε πρώτα τις κυριότερες απαιτήσεις της σύνδεσης και στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις δυνατότητες των μεθόδων με στόχο την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων.

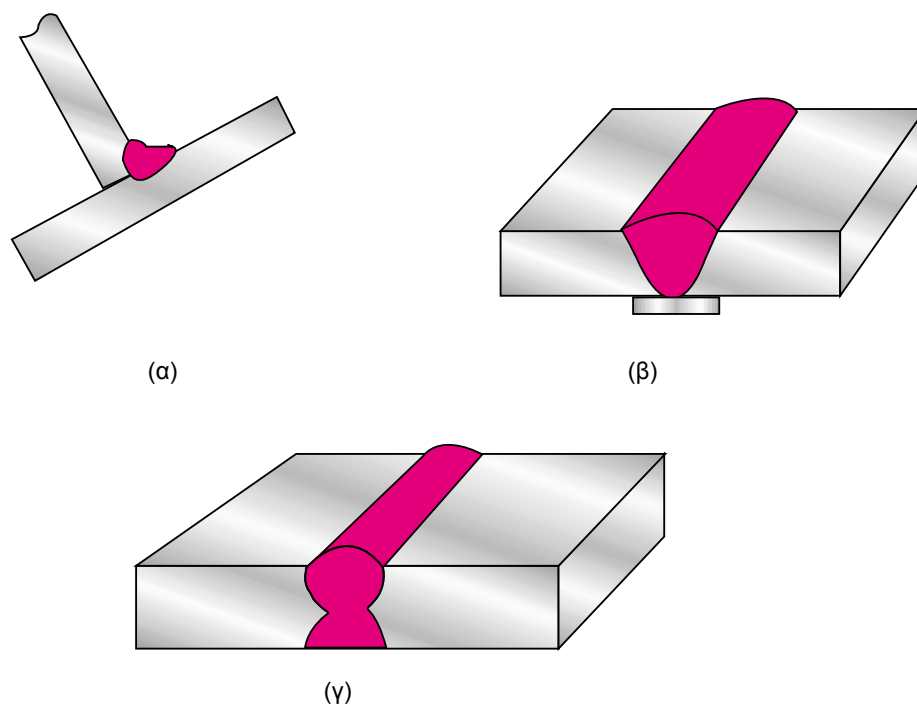
Οι απαιτήσεις της σύνδεσης. Η μέθοδος συγκόλλησης πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που προκύπτουν από την συγκεκριμένης σύνδεση που πρέπει να πραγματοποιηθεί. Οι απαιτήσεις αυτές είναι οι εξής:

- ο ρυθμός εναπόθεσης μετάλλου συγκόλλησης
- η διείδυση
- η ικανότητα συγκόλλησης σε δύσκολες θέσεις
- η ταχύτητα συγκόλλησης

Υπάρχουν περιπτώσεις που μία σύνδεση απαιτεί σημαντική πλήρωση με μέταλλο συγκόλλησης (Σχ. 2.12α,β). Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος με μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης (π.χ συγκόλληση MIG αντί της TIG). Επίσης σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται σημαντική διείδυση, όπως π.χ σε περιπτώσεις

που πρέπει να πραγματοποιηθεί συγκόλληση και στις δύο πλευρές της σύνδεσης (Σχ.2.12γ). Για την πραγματοποίηση αυτών των συγκολλήσεων απαιτείται πρώτα συγκόλληση από την μία πλευρά και κατόπιν φρεζάρισμα από την πίσω πλευρά για την πραγματοποίηση της δεύτερης συγκόλλησης. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη η διείσδυση τόσο λιγότερο βασικό μέταλλο πρέπει να αφαιρεθεί για την διαμόρφωση της φρέζας από την πίσω πλευρά. Η δυνατότητα συγκόλλησης σε δύσκολες θέσεις αναφέρεται σε κάθετες συγκολλήσεις (ανεβατό-κατεβατό) ή σε συγκολλήσεις υπεράνω (ουρανό). Γενικά είναι πιο οικονομικό τα ελάσματα να τοποθετούνται για επίπεδη ή οριζόντια συγκόλληση αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, ιδιαίτερα όταν πραγματοποιούνται συγκολλήσεις πεδίου. Τέλος, η απαίτηση για μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης αφορά κυρίως μικρές συγκολλήσεις και μπορεί να συνδυαστεί μόνο με μικρό ρυθμό εναπόθεσης μετάλλου. Το μέγεθος των σταγόνων κατά την μεταφορά μετάλλου, η επιφανειακή τάση, η ρευστότητα της λίμνης και άλλοι παράγοντες συνδυάζονται και καθιστούν μία μέθοδο συγκόλλησης ταχύτερη από κάποια άλλη.

Οι δυνατότητες της μεθόδου συγκόλλησης. Όπως είπαμε και πιο πάνω η επιλογή μεθόδου στηρίζεται στην σύγκριση μεταξύ απαιτήσεων της σύνδεσης και δυνατοτήτων των μεθόδων συγκόλλησης.



Σχ. 2.12 (α,β) Συνδέσεις που απαιτούν σημαντική πλήρωση με μέταλλο συγκόλλησης, (γ) Σύνδεση που απαιτεί μεγάλη διείσδυση.

Όσον αφορά την απαίτηση για μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης, η συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW) διαθέτει τον μεγαλύτερο βαθμό εναπόθεσης. Σε εφαρμογές όπου μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά ηλεκτρόδια, ο ρυθμός εναπόθεσης αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Εκεί που η θέση της συγκόλλησης δεν επιτρέπει την χρήση του βυθισμένου τόξου, η συγκόλληση MIG προσφέρει ικανοποιητικό ρυθμό εναπόθεσης. Η συγκόλληση σε δύσκολες θέσεις (ανεβατό-κατεβατό και ουρανός) αποκλείει την εφαρμογή ορισμένων μεθόδων. Για παράδειγμα, το βυθισμένο τόξο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εδώ. Στις περιπτώσεις αυτές επιλέγεται η συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW), όπου η στερεοποιημένη πάστα (κρούστα) μπορεί να συγκρατήσει το τηγμένο μέταλλο. Όσον αφορά την απαίτηση για μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, πρέπει να τονίσουμε ότι αυτή δεν μπορεί να συνδυαστεί ταυτόχρονα με μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης μετάλλου. Πολλές φορές γίνεται το λάθος να επιλέγεται μία μέθοδος με πολύ υψηλό ρυθμό εναπόθεσης αλλά με αντίστοιχα μικρή ταχύτητα συγκόλλησης. Η επιλογή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υπερμεγέθεις συγκολλήσεις. Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να επιλεγεί μία μέθοδος με βάση την ταχύτητα συγκόλλησης. Αυτό μπορεί μεν να οδηγήσει σε χαμηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης αλλά το συνολικό κόστος θα είναι μικρότερο αφού αποφεύγονται οι υπερμεγέθεις συγκολλήσεις.