

8. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

8.1 Εισαγωγικά στοιχεία

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, απάρτια κ.λπ. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης του μεγάλου αριθμού των μεθόδων σύνδεσης, όμως μια πρώτη θεμελιακή κατηγοριοποίηση 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.

Κατά σύμβαση, οι κοχλιώσεις και οι ηλώσεις εξετάζονται στα πλαίσια της γνωστής περιοχής (και του μαθήματος) των Στοιχείων Μηχανών. Οι συγκολλήσεις, με έμφαση στις συγκολλήσεις τήξης εξετάζονται στη συνέχεια.

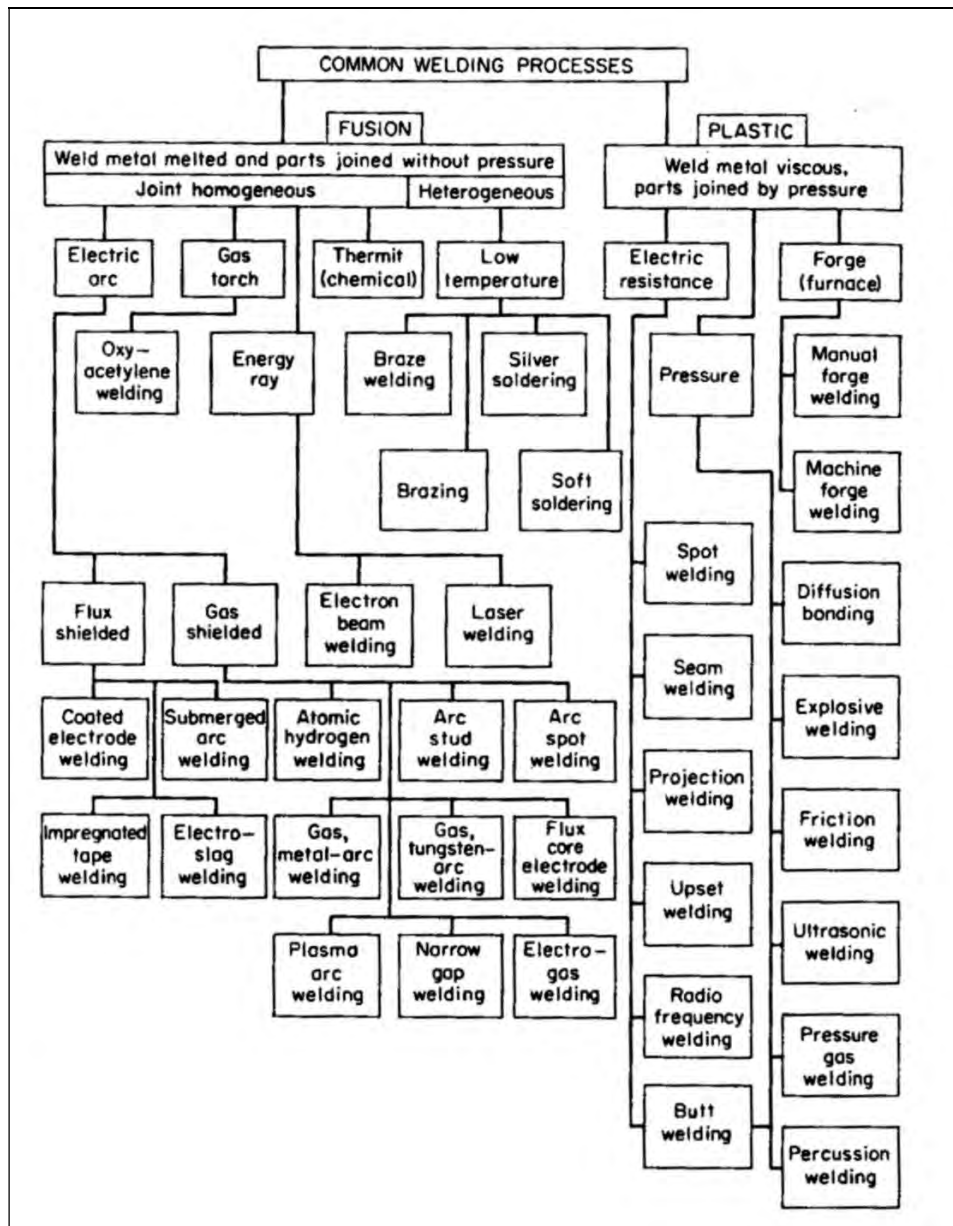
Μία (ποιοτική) σύγκριση των κύριων μεθόδων σύνδεσης με αναφορά στα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Σύγκριση των κύριων μεθόδων σύνδεσης.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

CHARACTERISTICS									
METHOD	Strength	Design Variability	Small Parts	Large Parts	Tolerances	Reliability	Ease of Maintenance	Visual Inspection	Cost
Arc welding	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Resistance welding	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brazing	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Bolts and nuts	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Riveting	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Fasteners	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Seaming, crimping	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adhesive bonding	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Note: 1, very good; 2, good; 3, poor.

Λέγοντας 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. Οι πιο σημαντικές από αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Μέθοδοι συγκολλήσεων.
(προέλευση: Doyle et al., 1985)

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

α) **Συγκολλήσεις τήξης (fusion welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα μέχρι να συμβεί τήξη, ενώ, συνήθως, προστίθεται στην περιοχή σύνδεσης (πρόσθετο) τηγμένο συγκολλητικό υλικό. Δεν απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν, μεταξύ άλλων, η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο, η συγκόλληση με αέριο, η συγκόλληση με laser κ.λπ.

β) 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. Η λεγόμενη συγκόλληση κατά σημεία (ηλεκτροπόντα) είναι μια διαδεδομένη τεχνική που εντάσσεται σ' αυτή την κατηγορία.

γ) 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. Η συγκόλληση με τριβή και η συγκόλληση με διάχυση αποτελούν τυπικές τεχνικές αυτής της κατηγορίας.

δ) **Ετερογενής συγκόλληση** ή ένωση σε υγρή - στερεή φάση (**liquid – solid phase joining**). Στην περίπτωση αυτή τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία λίγο μικρότερη του σημείου τήξης τους και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο (χαμηλότερου σημείου τήξης) σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί ένωση σε στερεή κατάσταση. Ως παραδείγματα αναφέρονται η ετερογενής συγκόλληση με φλόγα (π.χ. κασσιτεροκόλληση) και η επαγωγική συγκόλληση.

ε) **Συγκόλληση με κόλλα (adhesive bonding)**, όπου η ένωση επιτυγχάνεται ως αποτέλεσμα της μοριακής έλξης μεταξύ των προς ένωση επιφανειών και της κόλλας.

Επισημαίνεται ότι σ' ένα τμήμα της δόκιμης τεχνικής βιβλιογραφίας χρησιμοποιείται μία κατά τι διαφορετική ταξινόμηση. Οι *συγκολλήσεις τήξης* αποτελούν την πρώτη κύρια ομάδα και διακρίνονται σε δύο κύριες υπο-ομάδες, ανάλογα με τη φύση του συγκολλητικού υλικού, σε **αυτογενείς**, όπου η κόλληση και τα συγκολλούμενα τεμάχια είναι από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό και τις **ετερογενείς**, όπου το υλικό κόλλησης και αυτό των τεμαχίων είναι διαφορετικό. Οι υπόλοιπες (μεταλλουργικές) μέθοδοι συγκόλλησης εντάσσονται στη δεύτερη κύρια ομάδα, τις *συγκολλήσεις πλαστικής παραμόρφωσης*, βλέπε ενδεικτικά *Doyle et al, 1985* και το Σχήμα 8.1.

Για να επιτευχθεί πρόσφυση μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών, πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συνδυασμός επαρκούς γειννίας και δραστικότητας μεταξύ των τεμαχίων που θα συγκολληθούν, ώστε να σχηματιστούν κοινοί μεταλλικοί δεσμοί. Περιοριστικοί παράγοντες στην περίπτωση αυτή είναι:

- συνήθεις ανωμαλίες των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή (τραχύτητα),
- στρώματα οξειδίων ή ξένων ρύπων, όπως π.χ. μεταλλικά επιφανειακά επιστρώματα
- λεπτό στρώμα απορροφούμενων αερίων στην επιφάνεια των οξειδίων.

Η τραχύτητα επιφάνειας εξουδετερώνεται είτε με επιβολή δύναμης που προκαλεί πλαστική παραμόρφωση των ανωμαλιών, είτε με τήξη των δύο επιφανειών. Στις συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης, τα στρώματα των ρύπων απομακρύνονται συνήθως με μηχανικό ή χημικό καθαρισμό πριν τη συγκόλληση. Στις συγκολλήσεις τήξης οι ρύποι απομακρύνονται με κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια. Γενικά, ο καθαρισμός των επιφανειών πριν την συγκόλληση, αν και επιβοηθητικός δεν αρκεί, οπότε πρέπει να προβλεφθεί η απομάκρυνση των αλλοιωμένων από τις ακαθαρσίες λεπτών στρωμάτων υλικού από την ίδια τη μέθοδο της συγκόλλησης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της χημικής δράσης της σκόνης (flux) ή των εκτοξεύσεων (spattering) του ηλεκτρικού τόξου. Πρέπει να ληφθεί επίσης μέριμνα για να αποφευχθεί η επαναδημιουργία αλλοιωμένων στρωμάτων από τη δράση του ατμοσφαιρικού αέρα. Για την αποφυγή αυτής της χημικής αλλοίωσης χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα, όπως η χρήση προστατευτικής ατμόσφαιρας αδρανούς αερίου ή η εξαέρωση της επένδυσης των ηλεκτροδίων που δημιουργεί προστατευτικό νέφος για το τηγμένο μέταλλο, από τον περιβάλλοντα αέρα. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η εκτέλεση της συγκόλλησης «εν κενώ».

Γίνεται φανερό ότι οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης διαφέρουν σημαντικά όχι μόνο στον τρόπο που συνδυάζονται και επιτυγχάνονται οι κατάλληλες θερμοκρασία και πίεση, αλλά διαφέρουν ακόμα και ως προς την προσοχή που πρέπει να δίνεται στην καθαρότητα των μεταλλικών επιφανειών πριν τη συγκόλλησή τους, καθώς και στην πιθανή οξείδωση ή ρύπανση των τεμαχίων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Όταν χρησιμοποιούνται υψηλές θερμοκρασίες, τα περισσότερα μέταλλα επηρεάζονται δυσμενώς, φαινόμενο που γίνεται εντονότερο εάν συμβαίνει και τήξη. Επιπρόσθετα η μεταλλουργική δομή και οι μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου επηρεάζονται -συνήθως- δυσμενώς-από τη θέρμανση και ψύξη που συνοδεύουν τις περισσότερες μεθόδους συγκόλλησης και οι επιδράσεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη.

Συνοπτικά, για την επίτευξη «καλών», δηλαδή λειτουργικών, συγκολλήσεων απαιτούνται τα ακόλουθα:

επαρκής πηγή θερμότητας και/ή πίεσης,

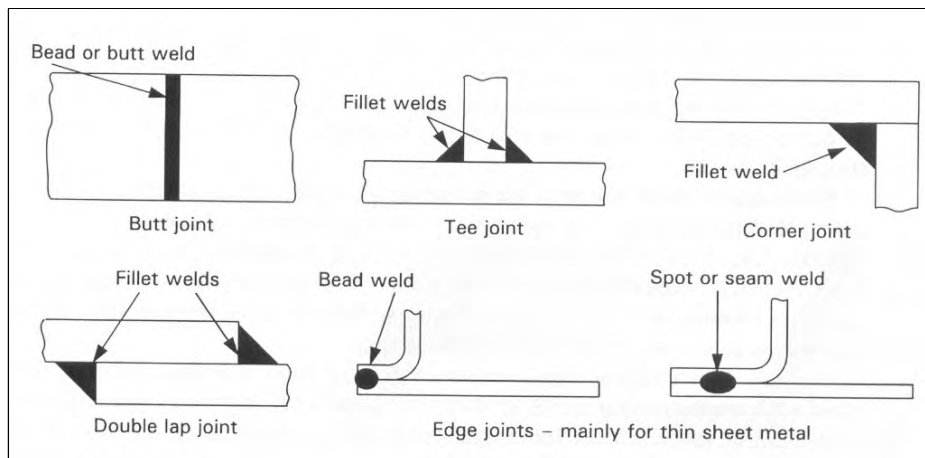
- μέσα προστασίας ή καθαρισμού του μετάλλου,
- μέσα αποφυγής ή περιορισμού των δυσμενών μεταλλουργικών δράσεων,
- ορθή επιλογή/ρύθμιση όλων των λειτουργικών παραμέτρων της συγκόλλησης.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Διακρίνονται πέντε βασικοί γεωμετρικοί τύποι σύνδεσης (joint types) μεταξύ δύο μελών, βλέπε Σχήμα 8.2.

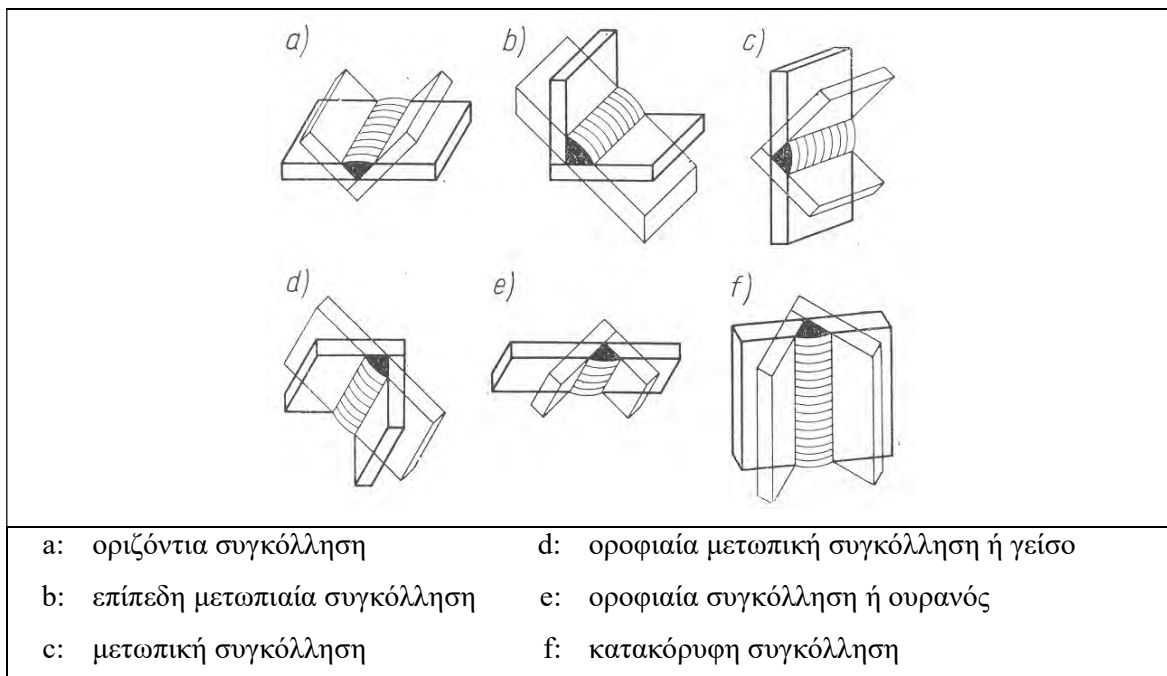
- Σύνδεση κατά συμβολή (butt joint)
- Γωνιακή σύνδεση (corner joint)
- Σύνδεση T (T - joint)
- Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint)
- Σύνδεση κατά ακμή (edge joint)

Κάθε ένας από τους παραπάνω γεωμετρικούς τύπους σύνδεσης μπορεί προφανώς να υλοποιηθεί με διάφορες μεθόδους συγκόλλησης.



Σχήμα 8.2: Γεωμετρικοί τύποι συγκολλήσεων.

Η θέση όπου παρουσιάζονται οι ραφές των συγκολλήσεων, σε σχέση με τον συγκολλητή έχει ιδιαίτερη σημασία διότι επηρεάζει την τεχνική εκτέλεση της συγκόλλησης. Οι θέσεις συγκόλλησης και οι συμβολισμοί τους είναι τυποποιημένοι, π.χ. κατά ISO 6947 (1990). Η ονοματολογία των κυριοτέρων θέσεων συγκόλλησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3: Ονοματολογία θέσεων συγκόλλησης.

8.2 Αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης

Η πηγή θερμότητας στις αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης είναι ένα από τα ακόλουθα: ηλεκτρικό τόξο, φλόγα οξυγόνου-ασετυλίνης, δέσμη ηλεκτρονίων ή ακτίνες laser. Ο αρμός (ραφή) που πρόκειται να συγκολληθεί πρέπει να προετοιμάζεται κατάλληλα. Η πηγή θερμότητας χρησιμεύει για να τήξει είτε το συγκολλούμενο μέταλλο στην περιοχή της σύνδεσης, είτε και το συγκολλητικό υλικό μέσα στην σύνδεση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μέθοδοι συγκόλλησης με τήξη.

8.2.1 Συγκόλληση με φλόγα αερίων (oxy-fuel gas welding – OFW)

Ο όρος οξυγονοκόλληση έχει επικρατήσει για τη μέθοδο συγκόλλησης με χρήση φλόγας υψηλής θερμοκρασίας από την καύση εύφλεκτου αερίου και οξυγόνου. Η φλόγα είναι η απαραίτητη πηγή θερμότητας για την τήξη του μετάλλου στην περιοχή της σύνδεσης. Ως αέριο καύσης χρησιμοποιείται κυρίως η ασετυλίνη λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας φλόγας (~ 3100 °C) και της εύκολης βιομηχανικής παρασκευής της, ενώ σπανιότερα το υδρογόνο, το μεθάνιο, το προπάνιο κ.α.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη συγκόλληση και κοπή ελασμάτων κατά την κατασκευή και συντήρηση αμαξωμάτων, δομικών μεταλλικών κατασκευών και πλοίων. Εφαρμόζεται στα περισσότερα σιδηρούχα και μη μέταλλα, σε ελάσματα πάχους μέχρι 30 mm. Παρά την

αλματώδη εξέλιξη των ηλεκτροσυγκολλήσεων η οξυγονοκόλληση «δεν έχασε την αξία της» και σε ορισμένες θεωρείται προτιμότερη από την ηλεκτροσυγκόλληση (λεπτά ελάσματα, σωλήνες, επισκευή χυτοσιδηρών εξαρτημάτων κ.α).

Το καύσιμο αέριο (ασετυλίνη) διατηρείται υπό πίεση (~15 at) σε φιάλη με πορώδη μάζα ακετόνης και σε θερμοκρασία 15 °C. Το οξυγόνο αποθηκεύεται επίσης σε χαλύβδινη φιάλη υπό πίεση (~150 at). Η ανάμιξη του οξυγόνου (O_2) με την ασετυλίνη (C_2H_2) γίνεται στο δαυλό ή καυστήρα και η φλόγα ασετυλίνης-οξυγόνου που δημιουργείται είναι τριών διαφορετικών τύπων, όπως συζητείται στη συνέχεια, ανάλογα με την αναλογία οξυγόνου και ασετυλίνης.

Τα κυριότερα στάδια της συγκόλλησης με φλόγα αερίων είναι τα ακόλουθα:

- Προετοιμασία των ακμών των ελασμάτων που θα συγκολληθούν και συγκράτηση αυτών στην επιθυμητή θέση με χρήση σφιγκτήρων και ιδιοσυσκευών.
- Έναυση και διατήρηση της φλόγας.
- Μετακίνηση και έλεγχος θέσης της φλόγας και της ράβδου πρόσθετου υλικού κατά μήκος της σύνδεσης.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός περιλαμβάνει, βλέπε Σχήμα 8.4, τα ακόλουθα:

- Φιάλες οξυγόνου και ασετυλίνης.
- Μανομετρικούς εκτονωτές ασετυλίνης και οξυγόνου.
- Ελαστικούς σωλήνες προσαγωγής οξυγόνου και ασετυλίνης.
- Καυστήρα.

Κάθε φιάλη φέρει κλείστρο πάνω στο οποίο συνδέεται ο αντίστοιχος μανομετρικός εκτονωτής. Ο μανομετρικός εκτονωτής αποτελείται από τον εκτονωτή που έχει σκοπό να μειώσει την υψηλή πίεση του αερίου που είναι αποθηκευμένο στη φιάλη στη χαμηλή πίεση που πρέπει να έχει το αέριο για τη συγκόλληση (πίεση εργασίας) και από δύο μανόμετρα τα οποία ελέγχουν την πίεση του αερίου μέσα στη φιάλη και την πίεση εργασίας.

Οι ελαστικοί σωλήνες συνδέουν τους μανομετρικούς εκτονωτές με τον καυστήρα. Για να αποφευχθεί λανθασμένη σύνδεση που ενδεχομένως θα προκαλέσει έκρηξη οι σωλήνες αυτοί, όπως εξάλλου και οι φιάλες, είναι διαφορετικού χρώματος. Συνήθως, οι φιάλες O_2 είναι χρώματος μπλε ή έχουν μια μπλε διακριτική λωρίδα. Οι φιάλες και οι σωληνώσεις C_2H_2 έχουν χρώμα κίτρινο. Η στεγανοποίηση των συνδέσεων των σωληνών και των μανομετρικών εκτονωτών με τις φιάλες είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και έλεγχο για πιθανή διαρροή.

Το εξάρτημα στο οποίο συναντώνται τα δύο αέρια είναι ο *καυστήρας*. Ο καυστήρας χρησιμεύει για την ανάμιξη των δύο αερίων στην επιθυμητή αναλογία και την διατήρησή της σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης. Οι καυστήρες κατασκευάζονται συνήθως από ορείχαλκο ή άλλα ελαφρά μέταλλα.

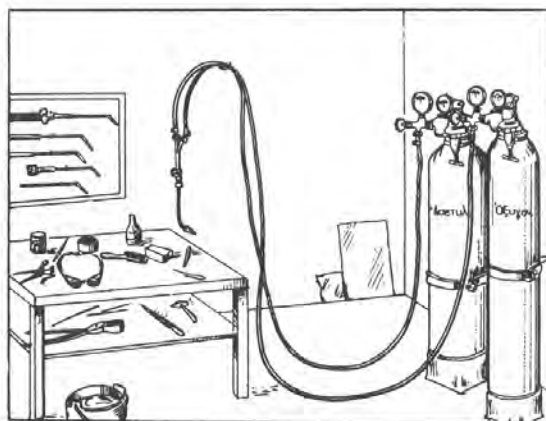
Ο καυστήρας αποτελείται από:

Τη λαβή με τις δικλείδες και τις θέσεις προσαγωγής των σωληνώσεων των αερίων.

- Το σωλήνα ανάμειξης των αερίων.
- Το ακροφύσιο (μπεκ), στο οποίο παράγεται η φλόγα.

Κάθε καυστήρας συνοδεύεται από ακροφύσια διαφορετικών παροχών ασετυλίνης (διαφορετική διάμετρος οπής) που επιτρέπει με τον ίδιο καυστήρα να παράγουμε φλόγες διαφορετικών εντάσεων, ώστε να είναι δυνατή η συγκόλληση ελασμάτων διαφορετικού πάχους.

Ο τεχνίτης συγκολλητής εκτός από τον απαραίτητο εξοπλισμό οφείλει να φέρει γυαλιά σκοτεινού χρώματος για την προστασία των οφθαλμών από την ισχυρή λάμψη της φλόγας καύσης οξυγόνου ασετυλίνης και επιπλέον χρησιμοποιεί ένα σφυρί για να απομακρύνει τη σκουρία (σκουριά) και μια συρματόβουρτσα για τον καθαρισμό της θέσης συγκόλλησης.



Σχήμα 8.4: Εξοπλισμός οξυγονοκόλλησης.
(προέλευση: Δαργενίδης, 1993)

Στην επιτυχή εφαρμογή της οξυγονοκόλλησης συντελούν τα ακόλουθα:

- Η επίτευξη και η χρησιμοποίηση της κατάλληλης φλόγας.

Στις τυπικές εφαρμογές οξυγονοκόλλησης χρησιμοποιείται συνήθως ουδέτερη φλόγα.

- Η κατάλληλη προετοιμασία (διαμόρφωση των άκρων) των ελασμάτων που πρόκειται να συγκολληθούν.

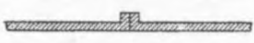
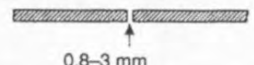
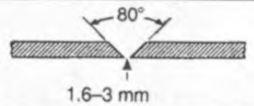
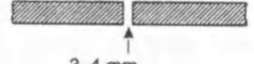
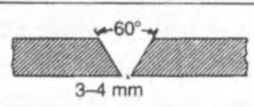
Ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων προβλέπεται κατάλληλη προετοιμασία των ακμών. Η προετοιμασία αυτή συνίσταται ανάλογα με το πάχος του ελάσματος σε ανασήκωμα των άκρων, άφεση διακένου ή και λοξοτομή. Ο Πίνακας 8.2 συνοψίζει την απαιτούμενη προετοιμασία των άκρων ενώ λεπτομερέστερες πληροφορίες πρέπει να αναζητηθούν στις αντίστοιχες προδιαγραφές (DIN, ISO, AWS κ.α.).

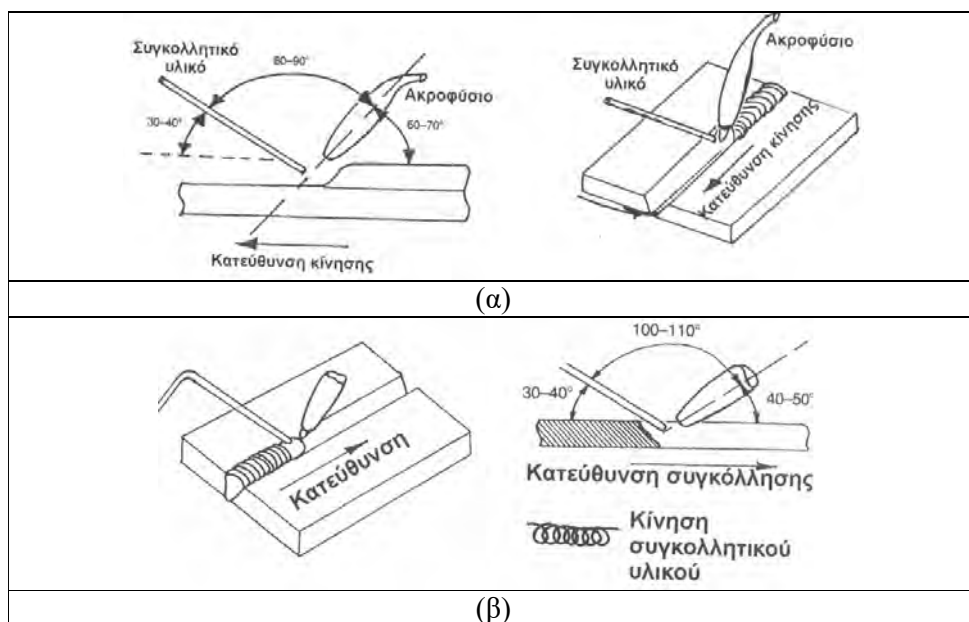
- Η κατάλληλη τεχνική οξυγονοκόλλησης.

Η τεχνική οξυγονοκόλλησης καθορίζεται κυρίως από την κίνηση του καυστήρα, η οποία εξαρτάται από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων. Διακρίνουμε συγκόλληση από τα αριστερά, βλέπε Σχήμα 8.5(α) και συγκόλληση από τα δεξιά, βλέπε Σχήμα 8.5(β). Και στις δύο περιπτώσεις η κίνηση του καυστήρα είναι σταθερή σε μία κατεύθυνση και για τη μέθοδο από αριστερά ο καυστήρας κινείται από δεξιά προς τα αριστερά ενώ για τη μέθοδο από δεξιά ο καυστήρας κινείται από αριστερά προς τα δεξιά. Η κύρια διαφορά των δύο τεχνικών έγκειται στο γεγονός ότι στην πρώτη το συγκολλητικό υλικό προηγείται του καυστήρα ενώ στη δεύτερη έπεται. Γενικά η συγκόλληση από αριστερά είναι η πλέον διαδεδομένη και χρησιμοποιείται συνήθως σε ελάσματα πάχους έως 3 mm.

- Η κατάλληλη εκλογή του ακροφυσίου και της διαμέτρου της κόλλησης.

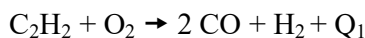
Πίνακας 8.2: Δεδομένα οξυγονοκόλλησης

Πάχος ελάσματος	Διάμετρος συγκολλητικού υλικού	Προετοιμασία ακμών ελασμάτων	Μέθοδος συγκόλλησης
0.9–1.6 mm	1.5 mm		Από αριστερά
3 mm	1.5 έως 3.2 mm		
3 - 4 mm	3.2 mm		
5 - 8 mm	3.2 mm		Από δεξιά
13 mm	6 mm		

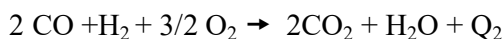


Σχήμα 8.5 (α) : Οξυγονοκόλληση από αριστερά.
(β) : Οξυγονοκόλληση από δεξιά.

Όπως προαναφέρθηκε, η φλόγα, από την ανάμιξη στον καυστήρα, O_2 και C_2H_2 είναι η απαραίτητη πηγή θερμότητας για την τήξη του μετάλλου στην περιοχή της σύνδεσης. Η μορφή μίας τέτοιας τυπικής φλόγας O_2 και C_2H_2 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.6 αποτελείται από τον πυρήνα και την εξωτερική ζώνη. Η πρωτογενής (εξώθερμη) αντίδραση που πραγματοποιείται στον πυρήνα είναι η ακόλουθη:



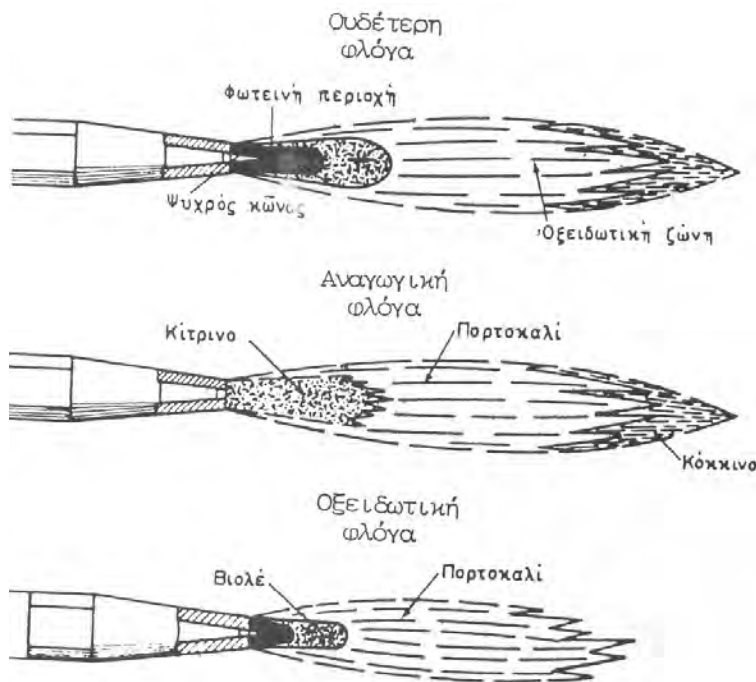
Η θερμότητα που αποδεσμεύεται κατά την πρωτογενή καύση ανεβάζει τη θερμοκρασία των αερίων στο 1/3 της τελικής θερμοκρασίας. Στη συνέχεια το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα που έχει παραχθεί κατά την πρωτογενή καύση καίγεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Κατά την αντίδραση αυτή (δευτερογενής καύση) εκλύεται θερμότητα που ανεβάζει τη θερμοκρασία στην τελική της τιμή (3100 – 3300 °C). Όσο απομακρυνόμαστε από τον πυρήνα προς στην εξωτερική ζώνη της φλόγας, η καύση συντηρείται από το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και οι θερμοκρασίες είναι σημαντικά χαμηλότερες.

Η αναλογία ασετυλίνης - οξυγόνου καθορίζει τις ιδιότητες και τον *τύπο της φλόγας*. Εάν η αναλογία είναι κατά προσέγγιση 1:1, δηλαδή δεν υπάρχει περίσσεια οξυγόνου, η φλόγα είναι *ουδέτερη (neutral flame)*. Όταν η παροχή του οξυγόνου είναι μεγαλύτερη (παροχή O_2 / παροχή $C_2H_2 = 1,14 - 1,70$), η φλόγα γίνεται *οξειδωτική (oxidizing flame)*.

Η φλόγα αυτή χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση κραμάτων χαλκού ή ψευδαργύρου οπότε και δημιουργείται ζώνη οξείδωσης στην επιφάνεια της περιοχής κόλλησης. Όταν η ασετυλίνη είναι σε μεγαλύτερη αναλογία από αυτή του οξυγόνου, (παροχή O_2 / παροχή $C_2H_2 = 0,85 - 0,95$), η φλόγα ονομάζεται *ανθρακωτική* (*reducing flame*) και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις συγκόλλησης που απαιτείται χαμηλή θερμοκρασία. Οι τρεις τύποι φλόγας παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.6: Τύποι φλόγας ασετυλίνης – οξυγόνου.

Άλλα αέρια, όπως το προπάνιο, το βουτάνιο ή το φυσικό αέριο δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της μικρότερης θερμότητας που εκλύουν και των οξειδωτικών ιδιοτήτων της φλόγας τους. Αντίθετα, το υδρογόνο χρησιμοποιείται για συγκόλληση μικρών και λεπτών ελασμάτων ή μετάλλων με χαμηλό σημείο τήξης, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας της φλόγας του ($\sim 1980^\circ C$).

Ελαττώματα κατά την οξυγονοκόλληση

Η εκτέλεση της οξυγονοκόλλησης είναι μια τεχνική, χειρωνακτική, εργασία που απαιτεί εμπειρία για την ρύθμιση των παραμέτρων και ορθό χειρισμό του εξοπλισμού. Τα κύρια στοιχεία που επηρεάζουν την ποιότητα συγκόλλησης είναι:

- Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής οξυγονοκόλλησης

- Η ρύθμιση της πίεσης των αερίων και η σωστή ρύθμιση της φλόγας
- Η σωστή επιλογή του μεγέθους του ακροφυσίου
- Το είδος και η διάσταση της κόλλησης
- Η τεχνική δεξιότητα του οξυγονοκολλητή

Όσο εμπειρότερος και καλύτερα εκπαιδευμένος είναι ο τεχνίτης οξυγονοκολλητής, τόσο λιγότερα θα είναι τα ελαττώματα στις εργασίες συγκόλλησης. Τα συνηθέστερα από αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 8.3.

Πίνακας 8.3: Ελαττώματα κατά την οξυγονοκόλληση.

Είδος σφάλματος	Σχηματική απεικόνιση	Πιθανές αιτίες
• Συγκόλληση με αυλακώσεις στη ραφή		• Επιλογή μεγάλου ακροφυσίου • Μικρή απόσταση του ακροφυσίου από μέταλλο
• Συγκόλληση με ελλιπή διείσδυση της κόλλησης		• Επιλογή μικρού ακροφυσίου • Η συγκόλληση γίνεται ταχύτερα απ' ό,τι απαιτείται • Η απόσταση του πυρήνα της φλόγας από μέταλλο είναι πολύ μεγάλη • Διάκενο αρμού μικρό
• Συγκόλληση με υπερυψωμένη τη ραφή		• Επιλογή βέργας συγκολλητικού υλικού με μικρότερης διαμέτρου από αυτή που απαιτείται για συγκεκριμένη συγκόλληση • Υπερβολική εναπόθεση κόλλησης
• Συγκόλληση με εγκλωβισμό φυσαλίδων ή πόρων στη ραφή		• Ακάθαρτες επιφάνειες συγκόλλησης • Συγκολλητικό υλικό κακής ποιότητας • Κακή ρύθμιση της φλόγας (μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτεί το πάχος των ελασμάτων συγκόλλησης) • Μη ομαλή ψύξη του μετάλλου μετά τη σκλήρυνση
• Συγκόλληση με εμφανή την έλλειψη συγκολλητικού υλικού (κόλληση)		• Μικρότερη ποσότητα συγκολλητικού υλικού από την απαιτούμενη
• Ρωγμές στη ραφή συγκόλλησης		• Ακατάλληλο συγκολλητικό υλικό • Απότομη ψύξη της συγκόλλησης

Οξυγονοκοπή

Η φλόγα οξυγόνου-ασετυλίνης χρησιμοποιείται επίσης και για την κοπή ελασμάτων (οξυγονοκοπή). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ιδιότητα του οξυγόνου να οξειδώνει τα μέταλλα με μεγάλη ταχύτητα, όταν είναι πυρακτωμένα. Κατά συνέπεια, εάν ένα μεταλλικό έλασμα θερμανθεί μέχρι να πυρακτωθεί και διοχετευθεί στο πυρακτωμένο σημείο, καθαρό οξυγόνο με μεγάλη πίεση, θα σχηματισθούν οξείδια, τα οποία στη συνέχεια απομακρύνονται με την πίεση με την οποία παρέχεται το οξυγόνο. Στην

περιοχή σχηματισμού των οξειδίων, και μετά την απομάκρυνσή τους, επέρχεται διάσπαση της συνοχής του μετάλλου, δημιουργία διακένου (kerf), με αποτέλεσμα την κοπή του. Η οξυγονοκοπή εφευρέθηκε το 1887 και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την κοπή χαλύβδινων ελασμάτων δεδομένου ότι ο εξοπλισμός είναι απλούστατος και η κοπή μπορεί να εφαρμοσθεί οπουδήποτε (χωρίς να απαιτείται μεταφορά βαρέων ελασμάτων σε συγκεκριμένο χώρο μηχανουργείου).

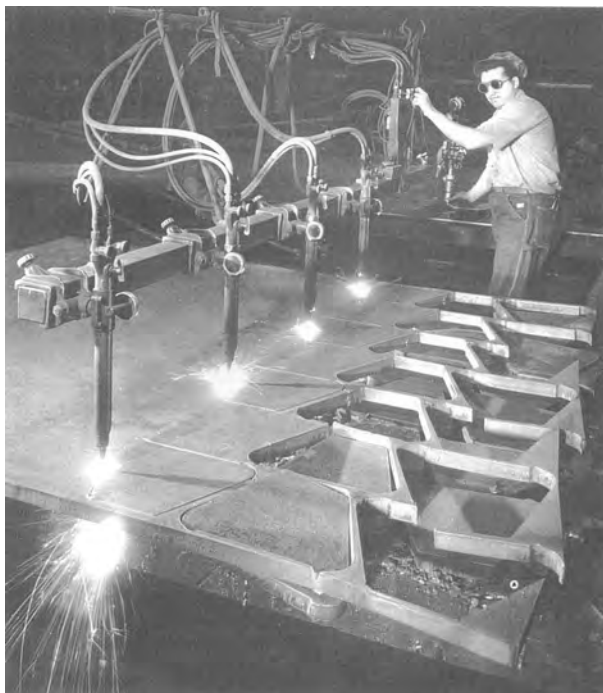
Στην οξυγονοκοπή χρησιμοποιείται ειδικός καυστήρας (οξυγονοκόφτης). Ο καυστήρας αυτός περιλαμβάνει έναν πρόσθετο αγωγό για παροχή ομοιόμορφης συγκεντρωμένης ροής οξυγόνου που χρησιμοποιείται για τη στιγμιαία οξείδωση του σιδήρου και την πρόκληση της κοπής.

Το μείγμα οξυγόνου-ασετιλίνης, καταλήγει σ' έναν αριθμό μικρών οπών, που σχηματίζουν ένα κύκλο, στο κέντρο του οποίου καταλήγει ο σωλήνας του καθαρού οξυγόνου κοπής. Με την καύση του μείγματος οξυγόνου-ασετιλίνης πραγματοποιείται αρχικά η προθέρμανση και η πυράκτωση του μετάλλου και κατόπιν, πιέζοντας το μοχλό παροχής του οξυγόνου κοπής, παρέχεται στο κέντρο του ακροφυσίου οξυγόνο με πίεση και αρχίζει η κοπή του μετάλλου. Το μέγεθος του ακροφυσίου εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του ελάσματος, τόσο μεγαλύτερο (μεγαλύτερης παροχής) πρέπει να είναι το ακροφύσιο.

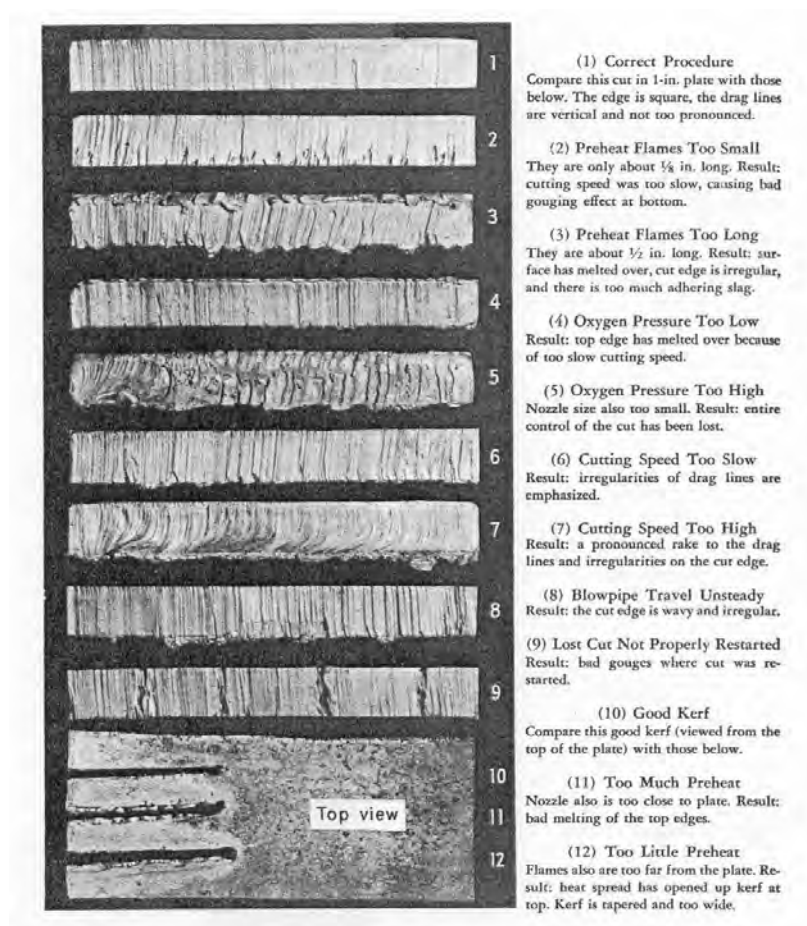
Η οξυγονοκοπή είναι δυνατή μόνο σε φερομαγνητικά υλικά. Κοπή με οξυγόνο δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κράματα αλουμινίου, χρωμίου, νικελίου κλπ. Τα υλικά αυτά κόβονται συνήθως με τόξο πλάσματος (plasma cutting).

Η οξυγονοκοπή μπορεί να εκτελεστεί είτε με το χέρι είτε μηχανικά (χρήση παντογράφου). Σήμερα διατίθενται ειδικές εργαλειομηχανές καθοδηγούμενες από ηλεκτρονικό υπολογιστή που επιτρέπουν αυτόματη πολλαπλή κοπή (NC cutting). Στο Σχήμα 8.7 εικονίζεται ημιαυτόματο σύστημα κοπής 4 θέσεων (multiple-torch cutting). Σημειώνεται ότι με χρήση ειδικού καυστήρα (πυροκόφτη) είναι δυνατή η οξυγονο-κοπή μέσα σε νερό (ενδεικτικά: έλασμα 100 mm σε βάθος 30 m κάτω από το νερό).

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται, για δεδομένο υλικό και πάχος ελάσματος, ο σωστός συνδυασμός προθέρμανσης, πίεσης οξυγόνου κοπής και θέσης και ταχύτητας κίνησης του ακροφυσίου, δημιουργούνται ελαττώματα στην πλευρική επιφάνεια κοπής και στη μορφή του διακένου, βλέπε Σχήμα 8.8



Σχήμα 8.7: Σύστημα οξυγονοκοπής πολλαπλών θέσεων.



Σχήμα 8.8: Ελαττώματα κατά την οξυγονοκοπή. (προέλευση: DeGarmo et al., 1988)

8.2.2 Συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου (arc welding)

Το κοινό βασικό γνώρισμα όλων των μεθόδων που περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες είναι η ύπαρξη ηλεκτρικού τόξου ως πηγής θερμότητας για την τήξη και τη συγκόλληση των μετάλλων. Το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ της άκρης του ηλεκτροδίου και του συγκολλούμενου αντικειμένου και η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κυμαίνεται από 5.000 °C έως 30.000 °C. Στην ομάδα των συγκολλήσεων τόξου περιλαμβάνονται οι ακόλουθες τεχνικές:

- Συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (SMAW)
- Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW)
- Συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο (GMAW)
- Συγκόλληση τόξου με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο (GTAW ή TIG)

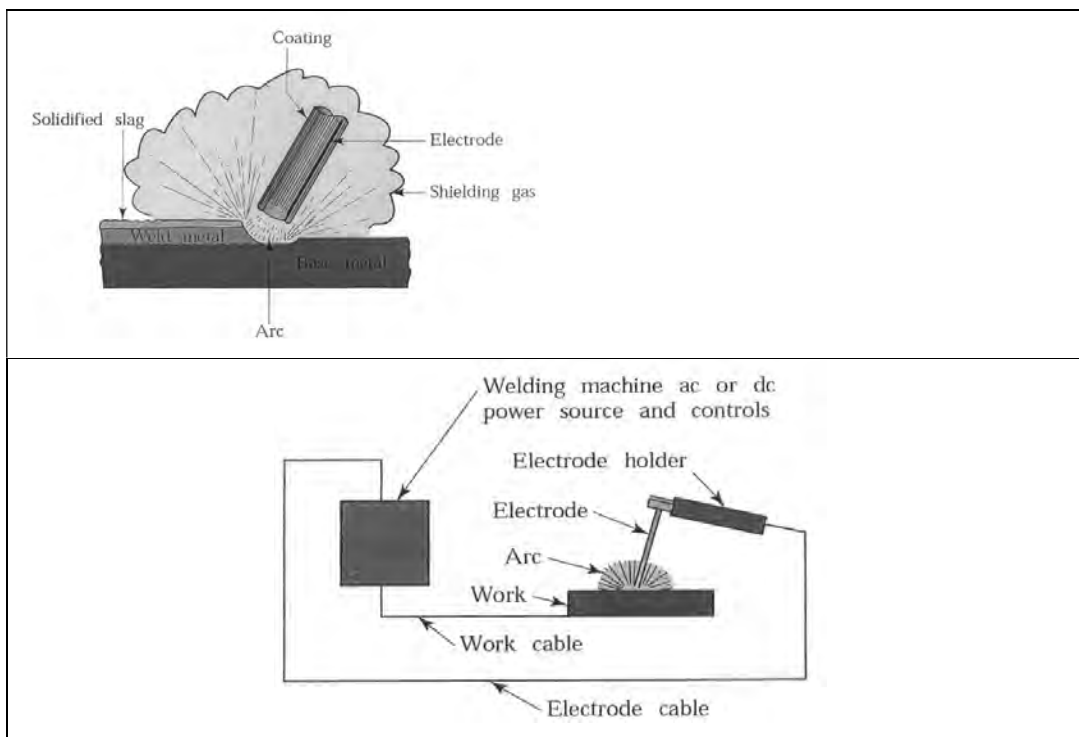
8.2.3 Συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (shielded metal-arc welding)

Περιγραφή της μεθόδου

Η πιο γνωστή μέθοδος συγκόλλησης τόξου είναι η τεχνική του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου (shielded metal-arc welding - SMAW), που ονομάζεται και συγκόλληση με το χέρι (manual metal arc welding/MMAW), βλέπε Σχήμα 8.9. Είναι η απλούστερη και πιο ευέλικτη μέθοδος συγκόλλησης. Χρησιμοποιείται στο 50% περίπου των κατασκευαστικών και επισκευαστικών εργασιών συγκόλλησης. Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι η μηχανή συγκόλλησης (πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος), τα ηλεκτρόδια και η προστατευτική μάσκα του χειριστή (ηλεκτροσυγκολλητή).

Για τη δημιουργία του τόξου ο χειριστής φέρνει σε επαφή το ηλεκτρόδιο με το συγκολλούμενο αντικείμενο, οπότε κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος και υπερθερμαίνεται το άκρο του ηλεκτροδίου. Στη συνέχεια, το ηλεκτρόδιο απομακρύνεται απότομα σε μικρή απόσταση, ικανή να διατηρήσει το τόξο που μόλις έχει ανάψει. Το μήκος του τόξου είναι κατά προσέγγιση ίσο με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου (1-6 mm). Η αρχική τάση που εφαρμόζεται για τη δημιουργία του τόξου κυμαίνεται μεταξύ 40-50 V για συνεχές και από 50V έως 90 V για εναλλασσόμενο ρεύμα. Με την έναρξη του τόξου η τάση πέφτει στα 25-30 V και διατηρείται κατά προσέγγιση σταθερή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ενώ η ένταση του ρεύματος κυμαίνεται από 50 A έως 300 A. Στην περιοχή του τόξου θετικά ιόντα οδεύουν προς την αρνητικά φορτισμένη πλευρά του πεδίου, ενώ ηλεκτρόνια οδεύουν προς τη θετικά φορτισμένη πλευρά. Τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το πεδίο στην περιοχή του τόξου και αποκτούν κινητική ενέργεια. Όταν όμως προσκρούσουν είτε στο

ηλεκτρόδιο είτε στη προς συγκόλληση μεταλλική επιφάνεια χάνουν αυτή την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα. Η θερμότητα αυτή τήκει το ηλεκτρόδιο και την επένδυσή του καθώς και το βασικό μέταλλο στην περιοχή της σύνδεσης.



Σχήμα 8.9: Ηλεκτροσυγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Στην περίπτωση πηγής συνεχούς ρεύματος (dc current) η επιλογή της πολικότητας σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος της ζώνης συγκόλλησης, τα συγκολλούμενα μέταλλα και τον τύπο των ηλεκτροδίων. Όταν ο αρνητικός πόλος είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο και ο θετικός με το συγκολλούμενο τεμάχιο, έχουμε την λεγόμενη *ευθεία πολικότητα (straight polarity)*. Στην περίπτωση αυτή το νέφος των ηλεκτρονίων προσπίπτει με μεγάλη ταχύτητα στο τεμάχιο το οποίο θερμαίνεται περισσότερο από το ηλεκτρόδιο. Η κατάσταση αυτή είναι επιθυμητή στη συγκόλληση ογκωδών αντικειμένων.

Στην *αντίστροφη πολικότητα (reverse polarity)*, το ηλεκτρόδιο είναι ο θετικός πόλος και το συγκολλούμενο μέταλλο ο αρνητικός. Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα που διέρχεται από το ηλεκτρόδιο μειώνεται, κατάσταση επιθυμητή στη συγκόλληση λεπτών διατομών. Προτιμάται επίσης σε συγκολλήσεις κραμάτων μαγνησίου και αλουμινίου διότι εκεί το τόξο τείνει να απομακρύνει το στρώμα οξειδίων από τις συγκολλούμενες επιφάνειες.

Το συνεχές ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους συγκόλλησης, προσφέρει σταθερό τόξο και είναι προτιμητέο για δύσκολες θέσεις (π.χ. ουρανό). Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις το τόξο του συνεχούς ρεύματος εκτρέπεται από τη ευθεία (μαγνητικό φύσημα) λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου, με δυσμενή αποτελέσματα στην ποιότητα της ραφής. Τότε προτιμάται η συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα (ac current) που διαθέτει και το πλεονέκτημα του απλούστερου και φθηνότερου εξοπλισμού.

Ηλεκτρόδια

Στην μέθοδο SMAW το ηλεκτρόδιο έχει τη μορφή μεταλλικής ράβδου (stick) και φέρει επένδυση (shielded electrode). Επειδή το υλικό του ηλεκτροδίου εναποτίθεται μέσα στην ραφή, πρέπει προφανώς να είναι όμοιο με τα συγκολλούμενα τεμάχια. Συνήθως για βασικό μέταλλο χάλυβα χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο από μαλακό χάλυβα (rimmed steel, ~0,1 % C) ενώ για βασικό μέταλλο αλουμίνιο το ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου.

Η επένδυση είναι ένα μίγμα συστατικών όπως SiO_2 , TiO_2 , FeO , MgO , Al_2O_3 και κελουλόζη και ο ρόλος της είναι πολλαπλός. Ενδεικτικά, ανάλογα με το είδος και την θέση της συγκόλλησης η επένδυση συμβάλει στα ακόλουθα:

Συντελεί στη σταθερότητα και την διατήρηση της κατεύθυνσης του τόξου.

- Σχηματίζει ένα αεριώδες περίβλημα που προστατεύει από την ατμοσφαιρική μόλυνση.
- Ελέγχει την επιφανειακή τάση της λίμνης του τηγμένου υλικού και επηρεάζει την μορφή της ραφής κατά την στερεοποίηση.
- Συμβάλει στον καθαρισμό της περιοχής συγκόλλησης από τα επιβλαβή οξείδια.
- Προσθέτει χρήσιμα κραματικά στοιχεία στη ραφή συγκόλλησης.
- Δημιουργεί μια επένδυση (κρούστα) προστασίας στην κορυφή της ζώνης εναπόθεσης που συγκεντρώνει όλες τις ακαθαρσίες προστατεύοντας το ρευστό μέταλλο.
- Λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση του μεταλλικού σύρματος (πυρήνας ηλεκτροδίου)
- Δημιουργεί έναν αγωγό πλάσματος που υποβοηθεί την αγωγή του ρεύματος διαμέσου του τόξου.

Οι πιο διαδεδομένες τυποποιήσεις των ηλεκτροδίων είναι αυτές κατά DIN, ISO και AWS-ASTM. Το μέγεθος του ηλεκτροδίου καθορίζεται συνήθως από την διάμετρο του

μεταλλικού σύρματος δεδομένου ότι το πάχος της επένδυσης διαφέρει κατά περίπτωση. Κατά AWS-ASTM (προδιαγραφή AWS-A5.1) τα ηλεκτρόδια έχουν μέγεθος 1/16", 3/32", 1/8", 5/32", 3/16", 1/4" και 5/16". Η πλήρης τυποποίηση έχει την μορφή LXXYZ (π.χ. E 6015) όπου το πρώτο γράμμα, (E), υποδηλώνει ηλεκτρόδιο με επένδυση, τα δύο ψηφία XX προσδιορίζουν την αντοχή του μεταλλικού σύρματος-πυρήνα σε εφελκυσμό (60: 60 000 psi, 80: 80 000 psi), το τρίτο ψηφίο Y καθορίζει τη θέση συγκόλλησης (1: όλες οι θέσεις, 2: οριζόντιες και επίπεδες κ.λπ) και το τέταρτο ψηφίο Z καθορίζει τύπο επένδυσης, πολικότητα και είδος ρεύματος για τα οποία το ηλεκτρόδιο είναι κατάλληλο (π.χ. 5: συνεχές ρεύμα, αντίστροφη πολικότητα). Αυτό το σύστημα τυποποίησης συνοψίζεται στον Πίνακα 8.3. Λεπτομερείς πληροφορίες περιέχονται σε εξειδικευμένα εγχειρίδια συγκολλήσεων και σε καταλόγους κατασκευαστών/ προμηθευτών ηλεκτροδίων. Για την τυποποίηση των ηλεκτροδίων κατά ISO βλέπε την προδιαγραφή ISO 2560 (2002)

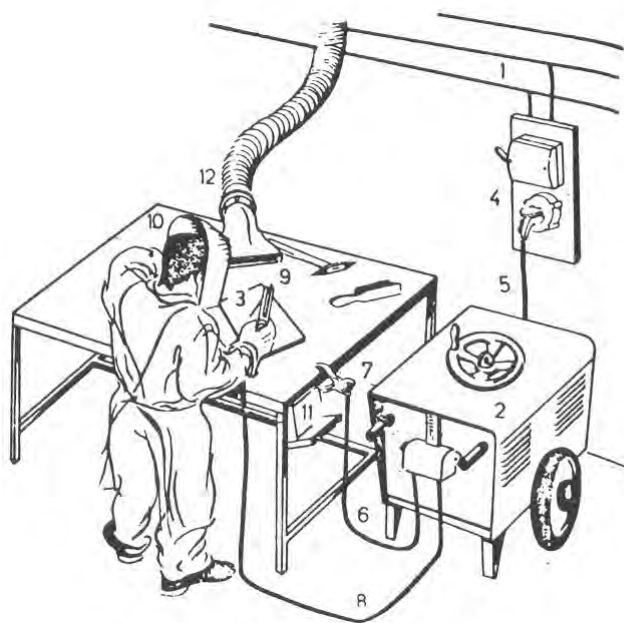
Πίνακας 8.3: Τυποποίηση ηλεκτροδίων κατά AWS-ASTM.

E (X) XX X X				0-8		
Minimum tensile strength, in 1,000 lbs., as-deposited weld metal in nonstress-relieved condition.	Welding position	Current	Polarity	Type of Coating		
45	1 All	AC or DC	Straight or reversed	0	Cellulosic	
60	2 Flat and horizontal			1	Cellulosic + Ca and K	
70	3 Flat only			2	Titania	
80				3	High titania-potassium	
90				4	Titania + iron powder	
100				5	Low hydrogen (lime)	
120				6	Low hydrogen + potassium	
				7	Cellulosic + iron powder	
				8	Low hydrogen + iron powder	

Πρακτική της ηλεκτροσυγκόλλησης SMAW

Η πρακτική της ηλεκτροσυγκόλλησης κατ' αρχήν είναι θέμα εργαστηρίου και εκπαίδευσης πεδίου. Η εμπειρία και η εξάσκηση συμβάλει πολύ στη τεχνική δεξιότητα που απαιτείται. Εδώ για λόγους πληροφόρησης επιχειρείται μια συνοπτική περιγραφή. Αφού τα προ συγκόλληση τεμάχια έχουν τοποθετηθεί στον πάγκο εργασίας, βλέπε Σχήμα 8.10. και έχει τεθεί σε λειτουργία η συσκευή ηλεκτροσυγκόλλησης γίνεται η έναυση του ηλεκτροδίου. Η επιφάνεια . που θα χρησιμοποιηθεί για την έναυση, πρέπει να είναι επιμελώς καθαρισμένη με τροχό ή συρματοβουρτσα και, ενδεχομένως, και με

το κατάλληλο καθαριστικό. Αν η έναυση δε γίνει σωστά, ενδέχεται να κολλήσει το ηλεκτρόδιο πάνω στο μέταλλο βάσης. Υπάρχουν δύο τρόποι για την έναυση του τόξου: (α) με το τρίψιμο του ηλεκτροδίου πάνω στο μέταλλο βάσης. (παρόμοια με τον τρόπο που ανάβει ένα σπίρτο) Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως, όταν η συγκόλληση γίνεται με ρεύμα ac ή όταν χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα βασικά ηλεκτρόδια (β) με το άγγιγμα του ηλεκτροδίου πάνω στο μέταλλο βάσης και το απότομο σήκωμα. Στην περίπτωση αυτή, συνήθως, επειδή απομακρύνουμε το ηλεκτρόδιο με ακαριαία κίνηση, δημιουργείται ένα «μακρύ» τόξο. Πλησιάζουμε λίγο το ηλεκτρόδιο, για να έχουμε το σωστό μήκος τόξου(=απόσταση άκρης ηλεκτροδίου-επιφάνειας συγκόλλησης). Εάν τυχόν κολλήσει το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης, η αντίδραση θα πρέπει να είναι άμεση:. Συνήθως αρκεί να γίνει μία απότομη κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση ή προς τα πλάγια για να ξεκολλήσει. Αν δεν ξεκολλήσει, πρέπει να πατήσουμε αμέσως τη λαβίδα της τσιμπίδας και να απελευθερώσουμε το ηλεκτρόδιο. Άλλως δημιουργείται ισχυρό βραχυκύκλωμα που θα καταστρέψει το ηλεκτρόδιο, ενώ ενδέχεται να προκαλέσει και βλάβη στη μηχανή.(γεννήτρια) ηλεκτρο-συγκόλλησης

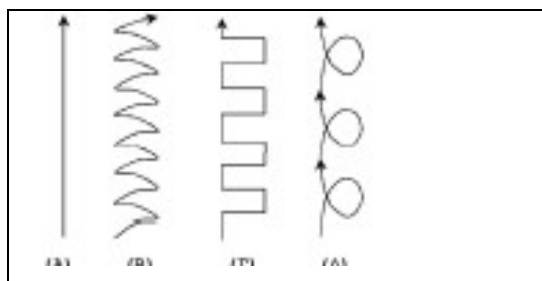


Σχήμα 8.10: Εξοπλισμός ηλεκτροσυγκόλλησης.
(προέλευση: Δαργενίδης, 1993)

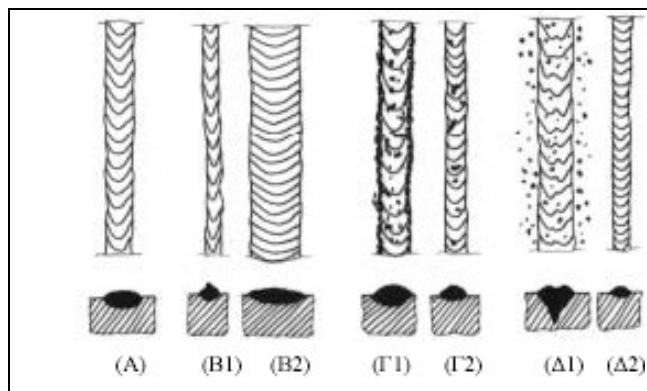
Το ηλεκτρόδιο πρέπει να κινείται, με σταθερό χέρι και σταθερό μήκος τόξου. Η σωστή ηλεκτροσυγκόλληση απαιτεί τον ορθό συνδυασμό των παρακάτω στοιχείων:

- ✓ του ηλεκτροδίου, δηλαδή της διαμέτρου, του είδους της επένδυσης (πάστα), της χημικής σύστασης κ.λπ.
- ✓ της έντασης του ρεύματος.
- ✓ του μήκους του τόξου. (συνήθως ίση με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου)
- ✓ της ταχύτητας και του τρόπου κίνησης του ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρόδιο μπορεί να κινείται με διάφορους τρόπους, οι κυριότεροι από τους οποίους φαίνονται στο Σχήμα 8.11.

Ο ορθός συνδυασμός όλων των παραπάνω οδηγεί στη *οπτικά* αποδεκτή ραφή, βλέπε Σχήμα 8.12(A): Η επιφάνεια της ραφής είναι λεία, χωρίς πόρους, πιτσιλίσματα ή υπολείμματα σκουριάς και η επικαλυπτική σκουριά πρέπει να αφαιρείται εύκολα. Ανάλογα με το σφάλμα που γίνεται, η ραφή έχει διαφορετική εμφάνιση, βλέπε Σχήμα 8.12 (B1)-(Δ2) οπότε και προβαίνουμε σε αντίστοιχες διορθωτικές κινήσεις.



Σχήμα 8.11: Οι συνηθέστεροι τρόποι κίνησης των ηλεκτροδίων- (Α): ευθύ-γραμμη, (Β): κίνηση «ζιγκ-ζακ» ή ημισελήνου, (Γ): τραπεζοειδής και (Δ):κυκλική.



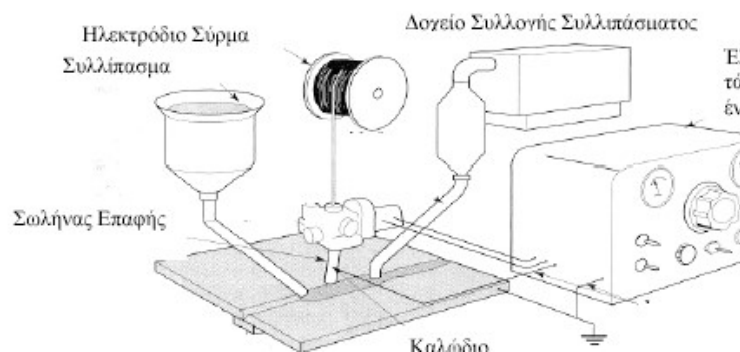
Σχήμα 8.12: Τυπικές μορφές ραφών ηλεκτροσυγκόλλησης - (Α): «σωστή» ραφή, (Β1): με μεγάλη ταχύτητα κίνησης, (Β2): Μικρή ταχύτητα κίνησης, (Γ1): μεγάλο ύψος τόξου, (Γ2): μικρό ύψος τόξου, (Δ1) υψηλή ένταση ρεύματος και (Δ2): χαμηλή ένταση ρεύματος.

Η συγκόλληση με το χέρι (SMAW ή MMAW) είναι ίσως η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική αλλά χαρακτηρίζεται από μεγάλους νεκρούς χρόνους και εξαρτάται επίσης από την τεχνική δεξιότητα του συγκολλητή. Αυτόματες ή ημιαυτόματες μέθοδοι είναι πιο συνηθισμένες σε βιομηχανικές χρήσεις.

8.2.4 Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (submerged arc welding/SAW)

Στη μέθοδο αυτή, το ηλεκτρικό τόξο προστατεύεται (καλύπτεται) από συλλίπασμα σε μορφή σκόνης που αποτελείται κυρίως από ασβέστη, πυρίτιο, οξείδιο του μαγγανίου και φθοριούχο ασβέστιο. Τυπική διάταξη συγκόλλησης βυθισμένου ηλεκτρικού τόξου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.13.

Το ηλεκτρόδιο («γυμνό» σύρμα χωρίς επένδυση) που είναι τυλιγμένο σε τύμπανο έλκεται από Η/Κ που το τροφοδοτεί στην ζώνη συγκόλλησης. Πριν το ηλεκτρόδιο, διοχετεύεται στην ζώνη συγκόλλησης το συλλίπασμα, από χοάνη μέσω βαρύτητας. Το «γυμνό» ηλεκτρόδιο (διαμέτρου 1,5-10 mm) βυθίζεται στο συλλίπασμα και το τόξο ανάβει και λειτουργεί εσωτερικά, χωρίς την δημιουργία καπνού και την ακτινοβολία που ενυπάρχουν στην τεχνική SMAW. Ο ρόλος του συλλιπάσματος είναι ανάλογος της επένδυσης των ηλεκτροδίων χειροκίνητης συγκόλλησης. Το ρευστό συλλίπασμα επιπλέει στην επιφάνεια της συγκόλλησης και την καλύπτει. Η επικάλυψη (κρούστα) που σχηματίζεται απομακρύνεται εύκολα.



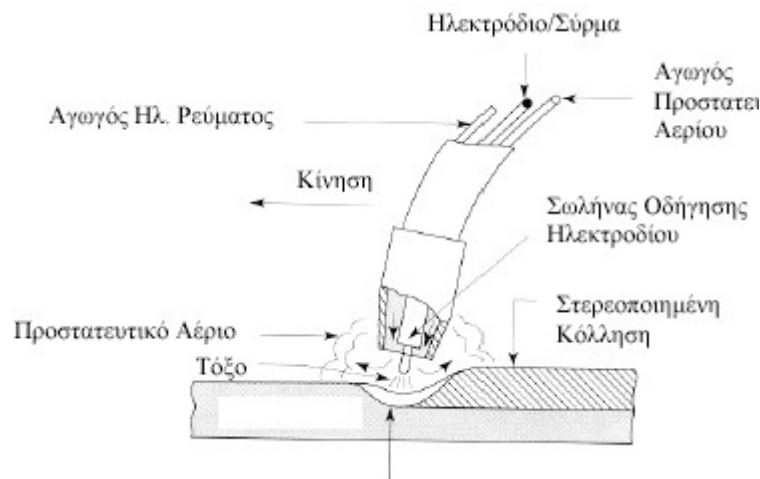
Σχήμα 8.13: Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW).

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (600 A - 2000 A) στη μέθοδο αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό,τι στη «χειροκίνητη» συγκόλληση, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο βάθος της ζώνης συγκόλλησης, ομοιομορφία και ποιότητα της ραφής και υψηλότερη παραγωγικότητα. Ο κύριος περιορισμός στην εφαρμογή της μεθόδου είναι η *απαίτηση οριζόντιας θέσης συγκόλλησης* και η χρήση υποστηρικτικού ελάσματος στη ρίζα της ραφής.

8.2.5 Συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο (gas metal-arc welding /GMAW)

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη αυτόματη/ημιαυτόματη μέθοδος είναι η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου σε ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου και οι διάφορες παραλλαγές της. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε τη δεκαετία 1950-60 και αναφέρεται επίσης ως MIG (metal inert gas) ή MAG (metal active gas).

Η αρχή της μεθόδου εικονίζεται στο Σχήμα 8.14. Το ηλεκτρόδιο-σύρμα τροφοδοτείται μέσω της λαβίδας (πιστολέτο) στη θέση συγκόλλησης. Ο συγκολλητής μέσω διακόπτη (σκανδάλη) που βρίσκεται στη λαβίδα ενεργοποιεί τον μηχανισμό τροφοδοσίας του σύρματος και ταυτόχρονα τη ροή του προστατευτικού αερίου. Το προστατευτικό αέριο που είναι συνήθως αργόν, ήλιον, CO₂ ή μίγμα αυτών, καλύπτει την περιοχή συγκόλλησης και την απομονώνει από την δυσμενή επίδραση/επαφή του ατμοσφαιρικού αέρα. Ανάλογα με τον τύπο και την ένταση του ρεύματος η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα στη ζώνη συγκόλληση 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, βλέπε ενδεικτικά *Kalpakjian and Schmid, 2003*.



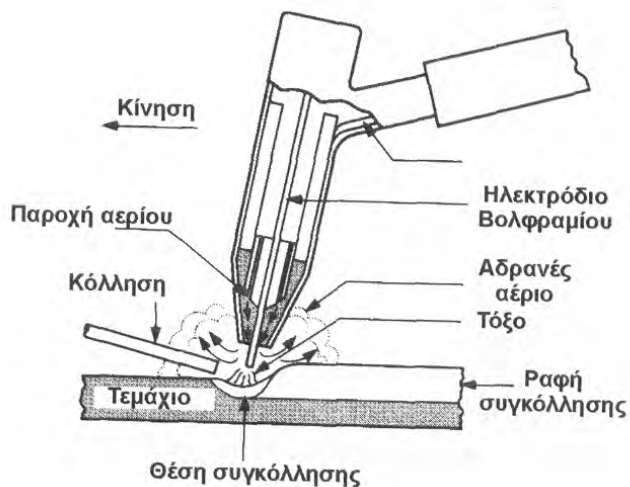
Σχήμα 8.14: Συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο (GMAW).

Η μέθοδος GMAW έχει ευρεία εφαρμογή στην κατασκευαστική βιομηχανία για την συγκόλληση σιδηρούχων και μη υλικών. Είναι ταχεία, πολλαπλών χρήσεων και οικονομική με παραγωγικότητα διπλάσια της τεχνικής SMAW. Η εκπαίδευση των τεχνιτών είναι σχετικά απλή και η μέθοδος δύναται εύκολα να αυτοματοποιηθεί οδηγώντας σε ρομποτικά συστήματα συγκολλήσεων.

8.2.6 Συγκόλληση τόξου με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο (GTAW ή TIG)

Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση μη αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Περιγράφεται με τα ακρωνύμια GTAW (gas tungsten-arc welding) ή TIG (Tungsten Inert Gas).

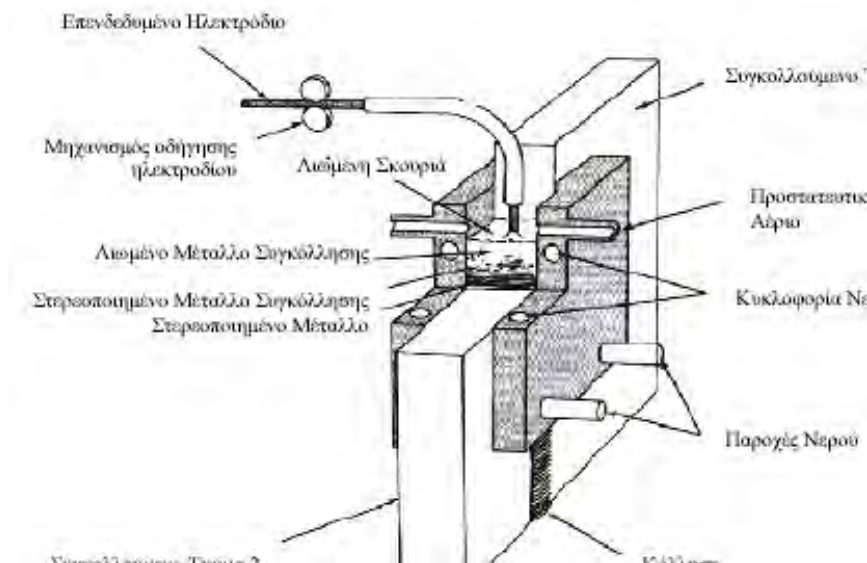
Το τόξο δημιουργείται μεταξύ μιας ακίδας/ηλεκτροδίου βολφραμίου που συγκρατείται στην λαβίδα και του προς συγκόλληση αντικειμένου. Λόγω του υψηλού σημείου τήξης του βολφραμίου, το ηλεκτρόδιο δεν φθείρεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Το πρόσθετο υλικό συγκόλλησης είναι κράμα παρόμοιο με τα συγκολλούμενα τεμάχια σε μορφή ράβδου/σύρματος χωρίς επικάλυψη. Σε λεπτά τεμάχια τοποθετημένα χωρίς μεγάλο διάκενο (close fit joints) η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς πρόσθετο υλικό. Η ροή του προστατευτικού αερίου (αργόν, ήλιον ή μίγμα αυτών με προσθήκη αζώτου ή/και υδρογόνου) γίνεται μέσω της λαβίδας συγκόλλησης όπως και στη μέθοδο GMAW. Η αρχή της μεθόδου εικονίζεται στο Σχήμα 8.15. Η έναυση του τόξου πραγματοποιείται με μικρής διάρκειας βραχυκύκλωμα του ηλεκτροδίου (επαφή και απόσυρση) με το αντικείμενο. Η διέλευση του ρεύματος και η διατήρηση του τόξου γίνεται μέσω του ιονισμένου αερίου. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς κυμαίνεται μεταξύ 8-20 kW και η χρησιμοποιούμενη πηγή είναι είτε συνεχούς είτε εναλλασσόμενου ρεύματος. Γενικά, το εναλλασσόμενο ρεύμα προτιμάται για την συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου ενώ το συνεχές (με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στον αρνητικό πόλο της γεννήτριας – ορθή πολικότητα) για την συγκόλληση κραμάτων χαλκού, νικελίου και ανοξείδωτους χάλυβες. Με την μέθοδο TIG επιτυγχάνονται ραφές συγκόλλησης πολύ καλής ποιότητας.



Σχήμα 8.15: Συγκόλληση τόξου με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο (GTAW ή TIG).

8.2.7 Ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση (electroslag welding/ESW)

Η ηλεκτροσκωριακή (electroslag welding) συγκόλληση αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1950-ως βελτίωση της συγκόλλησης βυθισμένου τόξου. Εφαρμόζεται για αυτόματη μετωπική συγκόλληση σε κατακόρυφη θέση και αναγόμευση. Η κόλληση γίνεται με ένα πέρασμα (κορδόνι) γεγονός που έχει θετική επίδραση τόσο από άποψη κόστους όσο και λόγω της μείωσης των παραμενουσών τάσεων και των επαγόμενων παραμορφώσεων. Η αρχή της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.16.



Σχήμα 8.16: Η τεχνική της ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης (ESW).

Η περιοχή της συγκόλλησης περικλείεται με υδρόψυκτα χάλκινα επικαλύμματα (πέλματα) που χρησιμεύουν για την συγκράτηση του τηγμένου μετάλλου και της τηγμένης σκουριάς που δημιουργείται από το συλλίπασμα. Τα πέλματα κινούνται κατακόρυφα μαζί με την μηχανή συγκόλλησης. Εντός του χώρου συγκόλλησης τροφοδοτείται το ηλεκτρόδιο/σύρμα (ένα ή περισσότερα) και το συλλίπασμα (flux). Η διαδικασία ξεκινά με την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που θερμαίνει το συλλίπασμα και το τήκει, μετατρέποντας το σε σκουριά (slag). Κατόπιν το τόξο σβήνει και η αγώγιμη σκουριά παραμένει τηγμένη με την βοήθεια της ωμικής της αντίστασης στο ρεύμα που διοχετεύεται μεταξύ του ηλεκτροδίου και των ελασμάτων. Η σύντηξη των μετάλλων προκαλείται με την βοήθεια της τηγμένης σκουριάς που τήκει το προστιθέμενο μέταλλο και τις επιφάνειες των προς συγκόλληση ελασμάτων.

Το τηγμένο ηλεκτρόδιο και υλικό των ελασμάτων συγκεντρώνεται κάτω από την τηγμένη σκουριά και σιγά-σιγά στερεοποιούνται για να σχηματίσουν την ραφή συγκόλλησης. Η σταδιακή αυτή στερεοποίηση γίνεται από κάτω προς τα άνω ώστε

διαρκώς να υπάρχει τηγμένο μέταλλο πάνω από την στερεοποιημένη ραφή. Η τηγμένη σκουριά προστατεύει το τηγμένο μέταλλο από ακαθαρσίες και την επαφή με τον αέρα.

Η ηλεκτροσκοριακή συγκόλληση εφαρμόζεται για ελάσματα πάχους μεταξύ 50-900 mm (2-36 in). Η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνεται, ανάλογα με τον εξοπλισμό, από 12 έως 36 mm/min, η δε ένταση του ρεύματος κυμαίνεται περί τα 600 A με τάση 30-60 V. Η ποιότητα της ραφής είναι καλή και η μέθοδος εφαρμόζεται στη συγκόλληση βαρέων οχημάτων και μηχανών, στην κατασκευή δοχείων πίεσης και ιδιαίτερα στη ναυπηγική βιομηχανία.

Παραλλαγή της μεθόδου ESW αποτελεί η τεχνική electrogas (electrogas welding/EGW) όπου η τηκόμενη σκόνη αντικαθίσταται από εξωτερική παροχή προστατευτικού αερίου.

8.2.8 Συγκόλληση με δέσμη υψηλής ενέργειας (high energy beam welding)

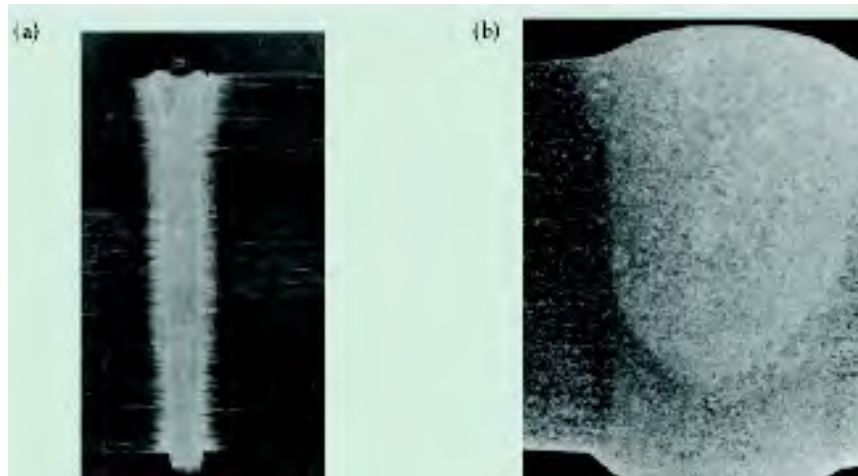
Το χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών είναι ότι η απαιτούμενη θερμότητα για την τήξη των μετάλλων στη ζώνη συγκόλλησης, παρέχεται από δέσμη σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Οι συγκολλήσεις του τύπου αυτού έχουν αυξανόμενη εφαρμογή στη κατασκευαστική βιομηχανία (κυρίως αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία) διότι επιτυγχάνουν υψηλή ποιότητα, ελάχιστες παραμορφώσεις (distortion) και διαθέτουν, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα.

Στην ομάδα αυτή εντάσσονται οι ακόλουθες μέθοδοι:

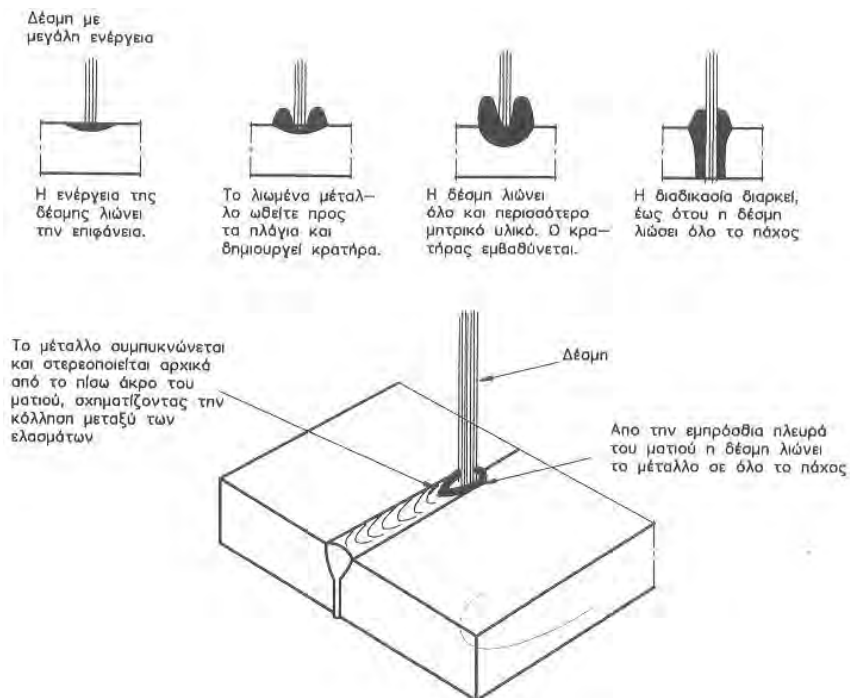
- Συγκόλληση πλάσματος (plasma arc welding/PAW)
- Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam welding/EBW)
- Συγκόλληση με δέσμη Laser (laser beam welding/LBW)

Η κύρια διαφορά των μεθόδων συγκόλλησης με δέσμη υψηλής ενέργειας από τις συνήθεις μεθόδους συγκόλλησης τόξου είναι το μέγεθος του λουτρού συγκόλλησης (ζώνη συγκόλλησης), βλέπε Σχήμα 8.17. Η τυπική διάμετρος του λουτρού στις μεθόδους συγκόλλησης με δέσμη υψηλής ενέργειας είναι 1-2 mm. Στο σημείο που προσπίπτει η δέσμη συμβαίνει ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας και τήξη του μετάλλου. Το λιωμένο μέταλλο ωθείται από τη δέσμη και δημιουργείται κρατήρας στο σημείο πρόσπτωσης (τεχνική keyhole). Η μετατόπιση της δέσμης κατά μήκος της σύνδεσης σχηματίζει ζώνη ρευστού μετάλλου σε όλο το βάθος της σύνδεσης. Με τον τρόπο αυτό παράγονται συγκολλήσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλο λόγο βάθος προς πλάτος συγκόλλησης (έως 30:1), συνήθως μ' ένα πέρασμα (πάσο), εξαιρετική

ποιότητα συγκόλλησης και ελάχιστες παραμορφώσεις. Η αρχή εφαρμογής της τεχνικής keyhole παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.18



Σχήμα 8.17: Μέγεθος της ζώνης συγκόλλησης (welding bead), συγκριτικά – (a) συγκόλληση με δέσμη υψηλής ενέργειας και (b) συμβατική συγκόλληση τήξης (συγκόλληση GMAW/TIG).
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)



Σχήμα 8.18: Αρχή λειτουργίας της τεχνικής keyhole).
(προέλευση: Διαμαντούδης, 2000)

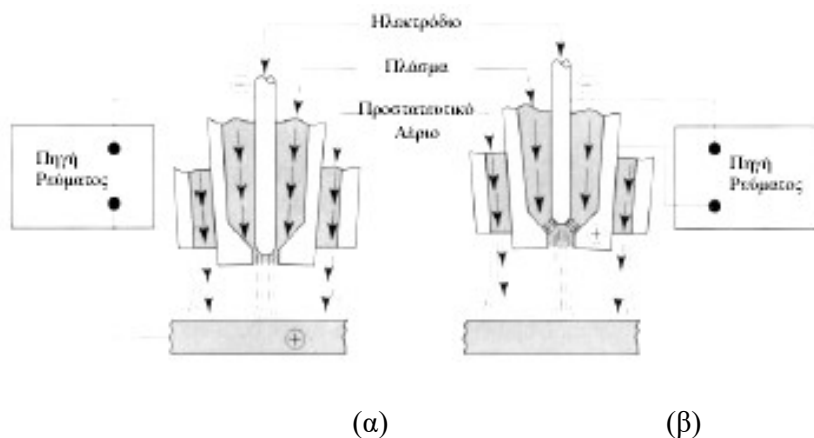
⇒ Συγκόλληση πλάσματος (plasma arc welding/PAW)

Κατά τα γνωστά πλάσμα είναι ιονισμένο αέριο σε υψηλή θερμοκρασία που περιέχει τον ίδιο περίπου αριθμό ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων. Το τόξο που σχηματίζεται στο περιβάλλον πλάσματος έχει σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία από μία συνήθη συγκόλληση τόξου σε περιβάλλον προστατευτικού αερίου. Επιπλέον, το τόξο είναι εστιασμένο σε σχέση με την τεχνική GTAW με την οποία η συγκόλληση πλάσματος προσομοιάζει ιδιαίτερα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- α) η υψηλή θερμοκρασία
- β) η σταθερότητα του εστιασμένου τόξου ανεξάρτητα από την απόσταση του, ηλεκτροδίου από το συγκολλούμενο αντικείμενο.
- γ) οι υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης (από 120 έως 1000 mm/min).

Στην συγκόλληση πλάσματος, όπως και στην τεχνική GTAW, το τόξο σχηματίζεται σε περιβάλλον αργού αλλά το ηλεκτρόδιο βολφραμίου βρίσκεται στο εσωτερικό του ακροφυσίου παροχής του αργού. Στο Σχήμα 8.19 παρουσιάζονται οι δύο παραλλαγές της συγκόλλησης πλάσματος η τεχνική του μεταφερόμενου τόξου (transferred arc) και η τεχνική του μη μεταφερόμενου τόξου πλάσματος (non-transferred arc). Στη μέθοδο του μεταφερόμενου τόξου το συγκολλούμενο τεμάχιο αποτελεί μέρος του κυκλώματος που δημιουργεί το ηλεκτρικό τόξο, βλέπε Σχήμα 8.18(α). Στη μέθοδο του μη-μεταφερόμενου τόξου η θερμότητα μεταφέρεται στο τεμάχιο όχι μέσω του τόξου που δημιουργείται ανάμεσα στο ακροφύσιο και το ηλεκτρόδιο αλλά με το πλάσμα που εξέρχεται του ακροφυσίου, βλέπε Σχήμα 8.18(β). Η τεχνική αυτή, ως προς την αρχή λειτουργίας της, προσομοιάζει στον θερμικό ψεκασμό.

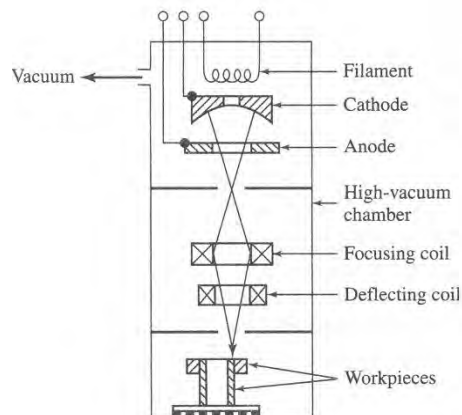
Η συγκόλληση με πλάσμα αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1960 και έκτοτε χρησιμοποιείται στη συγκόλληση τεμαχίων με πάχος μικρότερο των 6mm, ενώ η ικανότητα συγκόλλησης της δέσμης πλάσματος φθάνει και τα 20 mm για ορισμένα κράματα τιτανίου και αλουμινίου. Επισημαίνεται ότι όλα τα υλικά που συγκολλούνται με TIG, γενικά, συγκολλούνται και με PAW, με αύξηση ταχύτητας παραγωγικότητα) μέχρι 100 %.



Σχήμα 8.18: Παραλλαγές της συγκόλλησης πλάσματος- (α) τεχνική μεταφερόμενου τόξου και (β) τεχνική μη-μεταφερόμενου τόξου.

⇒ Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam welding/EBW)

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960. Η θερμότητα που απαιτείται για την συγκόλληση προέρχεται απ' την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του προς συγκόλληση τεμαχίου. Η μέθοδος απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για την δημιουργία και την εστίαση της δέσμης σε περιβάλλον κενού, βλέπε Σχήμα 8.19. Τα ηλεκτρόνια δημιουργούνται μέσω θερμιονικής εκπομπής σε γεννήτρια ηλεκτρονίων (electron gun) και εν συνεχεία επιταχύνονται και συγκλίνουν σε μία εστιασμένη δέσμη διαμέτρου υψηλής πυκνότητας ενέργειας (μέχρι 10 kW/mm^2 για συγκόλληση και μέχρι 200 kW/mm^2 για κοπή). Η παραγωγή της δέσμης γίνεται πάντα εν κενώ (σε vacuum chamber) Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν και τα προς συγκόλληση τεμάχια βρίσκονται σε χώρο «υψηλού κενού» (HV: 10^{-4} - 10^{-1} Pa). Ωστόσο, σήμερα είναι εφαρμόσιμη η χρήση «μεσαίου κενού» (MV: 0,1-3 Pa) ή η συγκόλληση χωρίς κενό (NV - non vacuum).



Σχήμα 8.19: Αρχή της μεθόδου συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW).

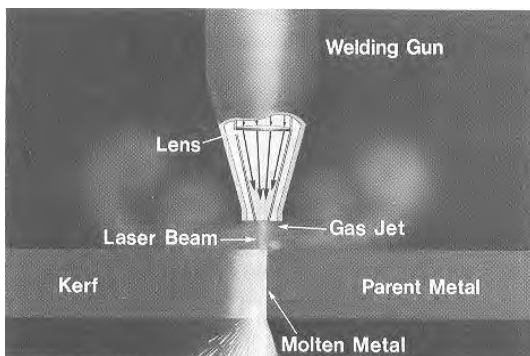
(προέλευση: Schey, 2000)

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση όλων σχεδόν των μετάλλων, χωρίς προστατευτικά αέρια, συλλίπασμα ή πρόσθετο υλικό (filler material). Χρησιμοποιείται για πάχος μετάλλου μέχρι 150 mm (6 in) με ταχύτητα συγκόλλησης που δύναται να φτάσει, ανάλογα με τον εξοπλισμό, τα 12 m/min. Οι συνήθεις εφαρμογές αφορούν συγκολλήσεις πάχους 0,1-30 mm.

Η ποιότητα της συγκόλλησης που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο EBW είναι πολύ καλή, με μικρή ΘΕΖ και λόγο βάθος προς πλάτος συγκόλλησης 10-30. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη καθαρότητα της ραφής και οι μικρές παραμορφώσεις των μετάλλων γύρω από την ζώνη συγκόλλησης, η δυνατότητα πρόσβασης σε «δύσκολες» θέσεις συγκόλλησης και η εύκολη αλλαγή των παραμέτρων κατά των εξέλιξη της διαδικασίας. Οι παράμετροι συγκόλλησης, όπως η ένταση, η διάμετρος και η εστίαση της δέσμης καθώς και η πίεση στη θέση συγκόλλησης και η ταχύτητα συγκόλλησης ρυθμίζονται στις σύγχρονες διατάξεις μέσω μικροϋπολογιστών. Η μέθοδος έχει ευρείες εφαρμογές στην αεροναυπηγική, την ηλεκτρονική και την πυρηνική βιομηχανία ενώ η χρήση της επεκτείνεται και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επισημαίνεται ότι ο εξοπλισμός EBW παράγει ακτίνες -x, και κατά συνέπεια τίθεται θέμα αυστηρής συντήρησης και έλεγχου του εξοπλισμού και λήψη μέτρων ακτινοπροστασίας.

⇒ Συγκόλληση με δέσμη Laser (laser beam welding/LBW)

Η συγκόλληση με δέσμη Laser αξιοποιεί τη ροή φωτονίων υψηλής ισχύος ως πηγή θερμότητας για την τήξη της περιοχής επαφής των προς συγκόλληση εξαρτημάτων. Η τήξη πραγματοποιείται με ένα ή περισσότερα περάσματα, με ή χωρίς πρόσθετο υλικό. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για βαθιές και λεπτές συνδέσεις με λόγο βάθος προς πλάτος από 4 έως 10. Η αρχή της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.20.

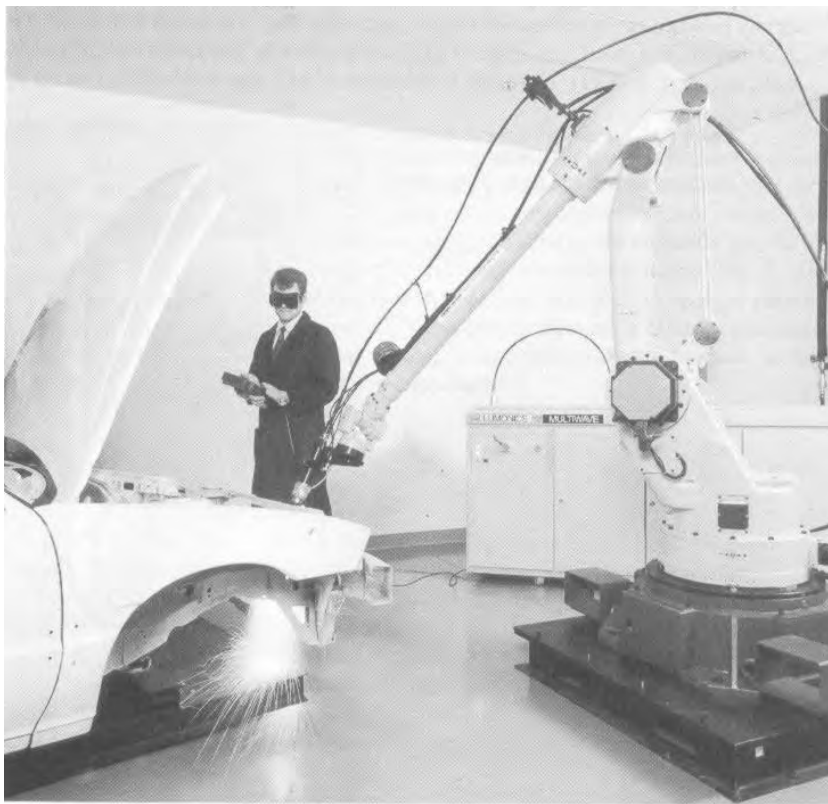


Σχήμα 8.20: Αρχή της μεθόδου συγκόλλησης με δέσμη Laser (LBW).

(προέλευση: Waters, 1996)

Γενικά, το Laser είναι ένα εργαλείο θερμικής φύσης το οποίο, μέσω της εστιασμένης σε συγκεκριμένη θέση δέσμης μονοχρωματικού φωτός, αφαιρεί, τήκει ή τροποποιεί επιφανειακά ένα υλικό. Ανάλογα με τον φορέα δημιουργίας της δέσμης διακρίνουμε Laser στερεάς κατάστασης (solid), αερίου (gas), υγρού (liquid) και ημιαγωγού (semiconductor), ενώ, ανάλογα με τον τρόπο εκπομπής της δέσμης διακρίνουμε συνεχή (continuous mode) και παλμική (pulse mode) εκπομπή.

Για συγκόλληση, από τα Laser στερεάς κατάστασης χρησιμοποιείται το Laser Nd:YAG (τυπική ισχύς 50 W-5 kW) ενώ από τα Laser αερίου το Laser CO₂ (τυπική ισχύς 50 W-2 kW). Η παλμική εκπομπή χρησιμοποιείται για συγκόλληση λεπτών ελασμάτων ή για σημειακές συγκολλήσεις. Laser συνεχούς εκπομπής χρησιμοποιούνται για την επίτευξη βαθέων συγκολλήσεων σε ελάσματα μεγαλύτερου πάχους (μέχρι 25mm). Ειδικά, στα Laser Nd:YAG η ακτίνα «μεταφέρεται» στη επιφάνεια συγκόλλησης μέσω συστήματος οπτικής ίνας, γεγονός που επιτρέπει, σε συνδυασμό με ρομποτικό βραχίονα, τρισδιάστατη προσέγγιση για την εκτέλεση της συγκόλλησης, βλέπε Σχήμα 8.21.



Σχήμα 8.21: Ρομποτική συγκόλληση με δέσμη Laser Nd:YAG και οπτική ίνα.

(προέλευση: Waters, 1996)

Αντιπροσωπευτικά υλικά που συγκολλούνται με LBW είναι τα κράματα νικελίου, τιτανίου και αλουμινίου, τα σιδηρούχα μέταλλα, τα πυρίμαχα και τα υπερκράματα. Η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνεται μεταξύ 2,5-80 m/min για λεπτά ελάσματα. Η αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης με Laser μειώνεται με την αύξηση της ανακλαστικότητας (reflectivity) των προς συγκόλληση επιφανειών. Στην περίπτωση αυτή, για την βελτίωση της απόδοσης διοχετεύεται στη θέση συγκόλλησης αέριο O₂ (για χάλυβες) ή αδρανές αέριο (για τα μη-σιδηρούχα μέταλλα).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με Laser έναντι της συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Δεν απαιτείται η δημιουργία κενού.
- ✓ Δεν παράγονται οι επικίνδυνες ακτίνες -x.
- ✓ Επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης, με ελάχιστες παραμορφώσεις ή άλλα ελαττώματα και με μη εμφάνιση πορώδους..
- ✓ Η μέθοδος LBW είναι γενικά ευκολότερη ως προς τον χειρισμό, τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Ως τυπικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με Laser επισημαίνονται και τα ακόλουθα:

- ✓ Υψηλή παραγωγικότητα και αυτοματοποιημένη παραγωγή
- ✓ Δυνατότητα εκτέλεσης συγκόλλησης από τη μία πλευρά και σε δύσκολες θέσεις

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- Λειτουργία σε σταθερή θέση εργασίας (δεν υπάρχει φορητός/μεταφερόμενος εξοπλισμός LBW).
- Υψηλό κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης.

Επισημαίνεται τέλος ότι το θέμα της υγιεινής και ασφάλειας είναι πρωτεύον κατά την εκτέλεση συγκολλήσεων με Laser δεδομένης της βλαβερής επίδρασης των ακτινών αυτών στο δέρμα και τους οφθαλμούς.

8.3 Μεταλλουργική δομή συγκόλλησης*

Η μελέτη της μικροδομής της συγκόλλησης και η κατανόηση των μεταλλουργικών αλλαγών που συμβαίνουν είναι ουσιώδης παράγων για τον σχεδιασμό

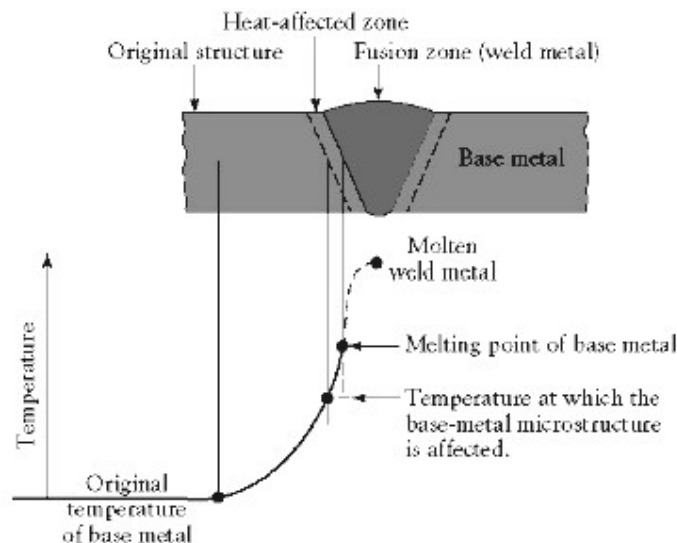
* Επισημαίνεται, με έμφαση, ότι για το εδάφιο είναι απαραίτητη προαπαιτήση η γνώση της δομής των μετάλλων και κραμάτων, τα διαγράμματα φάσεων και οι θερμικές κατεργασίες, δηλαδή απαιτείται η προηγούμενη διδασκαλία ενός τυπικού μαθήματος «τεχνολογίας υλικών» γεγονός που δεν συμβαίνει στο πρόγραμμα της Σ.Ι. Αυτό λαμβάνεται υπόψη και κατά συνέπεια η ανάπτυξη των συναφών θεμάτων παραλείπεται.

και την εκτέλεση συγκολλήσεων που θα διαθέτουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες και την προδιαγεγραμμένη λειτουργική συμπεριφορά.

Αναφορά γίνεται κατ' αρχήν στις *αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης (fusion welding)*, όπου προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα (base materials) μέχρι να συμβεί τήξη, ενώ, συνήθως, προστίθεται στην περιοχή σύνδεσης (πρόσθετο) τηγμένο συγκολλητικό υλικό. Τα προς ένωση ελάσματα θεωρούνται ότι είναι από το ίδιο υλικό ενώ το πρόσθετο υλικό έχει παρόμοια αν όχι ακριβώς την ίδια σύνθεση. Κατά τα γνωστά στη ζώνη συγκόλλησης το υλικό βάσης και το πρόσθετο υλικό τήκονται ταυτόχρονα και εν συνεχεία στερεοποιούνται για να αποτελέσουν ένα σώμα.

Η αναφορά «ένα σώμα» δεν σημαίνει ότι η περιοχή συγκόλλησης είναι ομοιόμορφη και ομοιογενής. Στο Σχήμα 8.22 παρουσιάζονται οι τρεις διακριτές ζώνες που αναγνωρίζονται σε μία τυπική συγκόλληση τήξης. Οι ζώνες αυτές είναι

- Το μέταλλο βάσης [base metal]
- Η ζώνη θερμικής επίδρασης (ΘΕΖ) [heat affected zone – HAZ]
- Η ζώνη τήξης (ΖΤ) [fusion zone - FZ]



Σχήμα 8.22: Διακριτές ζώνες τυπικής συγκόλλησης τήξης.

(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Η μεταλλουργική δομή και οι ιδιότητες της δεύτερης και της τρίτης ζώνης εξαρτώνται από τα προς συγκόλληση μέταλλα (μονοφασικά, διφασικά ή ανόμοια) το είδος του πρόσθετου υλικού, το είδος και τις παραμέτρους της συγκόλλησης, τη θερμική ροή κ.α.

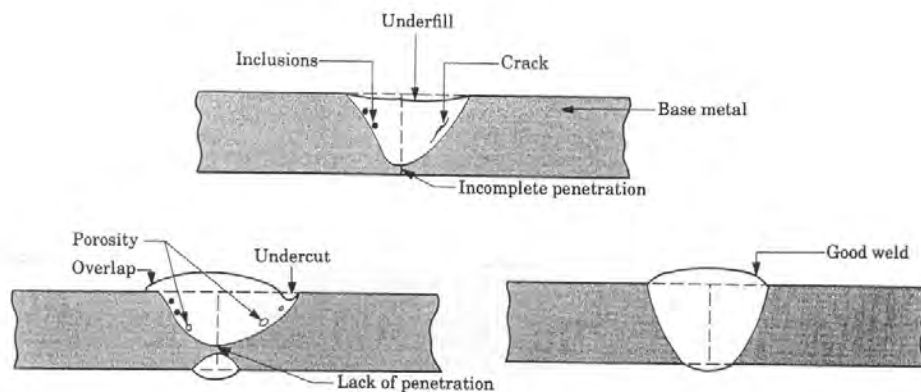
Η μελέτη της μικροδομής και των ιδιοτήτων των ζωνών ΘΕΖ και ΖΤ απαιτεί αυξημένες γνώσεις Μεταλλουργίας και Επιστήμης των Υλικών και σαφώς δεν εμπίπτει στην εδώ παρουσίαση. Για λόγους συνέχειας του κειμένου αναφέρονται μόνον τα ακόλουθα: Η ζώνη τήξης είναι η περιοχή της συγκόλλησης όπου το *τήγμα βασικού και πρόσθετου υλικού* στερεοποιείται. Η ζώνη θερμικής επίδρασης περιβάλλει την ζώνη τήξης. Στη ζώνη αυτή δεν συμβαίνει τήξη και επαναστερεοποίηση ωστόσο η δομή της διαφέρει από αυτή του υλικού βάσης δεδομένου ότι κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δέχεται έντονη θερμική φόρτιση που επηρεάζει την μικροδομή, με μέγιστη όμως θερμοκρασία μικρότερη από την θερμοκρασία τήξης των προς συγκόλληση υλικών, βλέπε και την καμπύλη θερμοκρασιών στο Σχήμα 8.22.

8.4 Ποιότητα και ελαττώματα συγκολλήσεων

Λόγω του θερμικού κύκλου και των συνεπακόλουθων μεταλλουργικών μεταβολών στη θέση μιας ραφής συγκόλλησης αναπτύσσονται ατέλειες και ασυνέχειες στη σύνδεση (discontinuities), με άμεσες συνέπειες στην ποιότητα της συγκόλλησης. Τα συνηθέστερα ελαττώματα φαίνονται στα Σχήματα 8.23, 8.24 και 8.25 και περιγράφονται στη συνέχεια.

- Η **εμφάνιση πόρων** (porosity), βλέπε Σχήμα 8.23 οφείλεται σε εγκλείσματα αερίων. Τα αέρια αυτά δημιουργούνται κατά την τήξη της περιοχής συγκόλλησης και παγιδεύονται κατά την επαναστερεοποίηση. Γενικά όλες οι συγκολλήσεις περιέχουν κάποιους πόρους οι οποίοι κατά κανόνα έχουν σχήμα σφαιρικό ή μορφή επιμηκυσμένων κοιλοτήτων. Η εμφάνιση των πόρων δεν είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για την λειτουργικότητα της συγκόλλησης εκτός αν υπάρχουν ταυτόχρονα και ρωγμές ή αν το υλικό είναι ψαθυρό ή αν η ραφή καταπονείται σε κόπωση. Το πορώδες των συγκολλήσεων μπορεί να μειωθεί ή να αποφευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:
 - ✓ χρήση αποξειδωτικών μέσων
 - ✓ επίτευξη ικανοποιητικής ρευστότητας του τηγμένου μετάλλου που επιτρέπει στα αέρια που περιέχονται στη συγκόλληση να απελευθερωθούν
 - ✓ τροποποίηση της τεχνικής συγκόλλησης, όπως προθέρμανση της ζώνης συγκόλλησης ή αύξηση του ρυθμού πρόσβασης της θερμότητας.
 - ✓ μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης, ώστε να υπάρχει επαρκής χρόνος για την διαφυγή των αερίων.
 - ✓ ορθή επιλογή ηλεκτροδίων ή συγκολλητικού υλικού.

- Τα **εγκλείσματα σκουριάς** (slag inclusions), βλέπε Σχήμα 8.23, είναι συσσωματώματα από οξειδία, υλικά της επένδυσης του ηλεκτροδίου και αέρια που εγκλωβίζονται στη ζώνη συγκόλλησης. Ακαθαρσίες από το περιβάλλον, όταν η δράση του προστατευτικού αερίου δεν είναι επαρκής είναι δυνατόν να συμβάλουν επίσης στη δημιουργία εγκλεισμάτων. Συγκολλήσεις που εκτελούνται κατά στρώματα πρέπει να ελέγχονται σε κάθε στρώμα ως προς την εναπόθεση σκουριάς και τη δημιουργία εγκλεισμάτων.



Σχήμα 8.23: Ελαττώματα συγκολλήσεων τήξης.

(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

- Η **ελλιπής τήξη και διείσδυση** (incomplete fusion and penetration) γενικά, είναι μια οικογένεια ελαττωμάτων που οδηγούν σε μη αποδεκτή συγκόλληση και οφείλονται σε κακό σχεδιασμό της συγκόλλησης ή σε κακή εκτέλεση αυτής

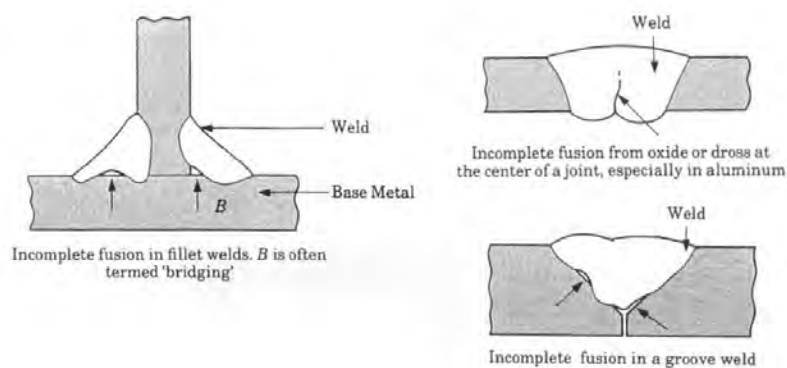
Η **ελλιπής τήξη** (incomplete fusion), βλέπε Σχήμα 8.24 κατά κανόνα οφείλεται σε ανεπαρκές επίπεδο θερμοκρασίας στη ζώνη συγκόλλησης, παρουσία οξειδίων, κακό καθαρισμό των προς συγκόλληση επιφανειών, εσφαλμένο σχεδιασμό του γεωμετρικού τύπου συγκόλλησης κλπ. Το ελάττωμα αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τα ακόλουθα:

- ✓ προθέρμανση του προς συγκόλληση υλικού,
- ✓ προσεκτικό καθαρισμό της ζώνης συγκόλλησης πριν την έναρξη της συγκόλλησης
- ✓ τροποποίηση της σχεδίασης της συγκόλλησης (joint design) και του τύπου του ηλεκτροδίου
- ✓ χρησιμοποίηση κατάλληλου προστατευτικού αερίου

Η **ατελής διείσδυση** της συγκόλλησης (*incomplete penetration / lack of penetration*), βλέπε Σχήμα 8.24 προκαλείται όταν το βάθος της ραφής είναι

ανεπαρκές και οφείλεται κυρίως σε χαμηλή παροχή θερμότητας, υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης και κακή συναρμογή των προς συγκόλληση τεμαχίων. Το ελάττωμα αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τα ακόλουθα:

- ✓ Αύξηση της ροής θερμότητας της ζώνης συγκόλλησης
- ✓ Μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης (π.χ. ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου) κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης
- ✓ τροποποίηση της μορφής της συγκόλλησης
- ✓ τήρηση των προδιαγραφών για τη θέση / συναρμογή των προς συγκόλληση τεμαχίων



Σχήμα 8.24: Ελλιπής τήξη συγκολλήσεων.
(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

- **Σφάλματα μορφής της συγκόλλησης:** Η σωστή μορφή της περιοχής συγκόλλησης (weld profile) είναι ουσιώδης παράγων για την αποδοχή της συγκόλλησης, όχι μόνο γιατί επηρεάζει την αντοχή και την εμφάνιση της συγκολλητής κατασκευής αλλά γιατί σε αντίθετη περίπτωση υποδεικνύει την παρουσία ελαττωμάτων όπως η ελλιπής τήξη και η παρουσία εγκλεισμάτων σε συγκολλήσεις πολλαπλών στρώσεων.

Η **έλλειψη συγκολλητικού υλικού (underfill)**, βλέπε Σχήμα 8.23, συμβαίνει όταν η ζώνη συγκόλλησης δεν τροφοδοτείται με την κατάλληλη ποσότητα πρόσθετου υλικού. Οι **πλάγιες εγκοπές (undercut)** δημιουργούνται όταν το βασικό υλικό από υπερβολική θέρμανση λιώνει και καταρρέει μέσα στη ραφή, ενώ το προσαγόμενο υλικό (κόλληση) δεν συμπληρώνει τα δημιουργούμενα κενά. Η κύρια αιτία του ελαττώματος είναι η υπερβολική ένταση του ρεύματος συγκόλλησης ή η χρήση ακροφυσίου μεγαλύτερης διαμέτρου από την απαιτούμενη (στην περίπτωση συγκόλλησης με φλόγα αερίου). Η **υπερβολική εναπόθεση υλικού (overlap)** είναι επιφανειακή ασυνέχεια που κατά κανόνα οφείλεται σε εσφαλμένη εκτέλεση της

συγκόλλησης (π.χ. χρησιμοποίηση κόλλησης μεγάλης διαμέτρου ή μικρή ταχύτητα μετακίνησης της κόλλησης).

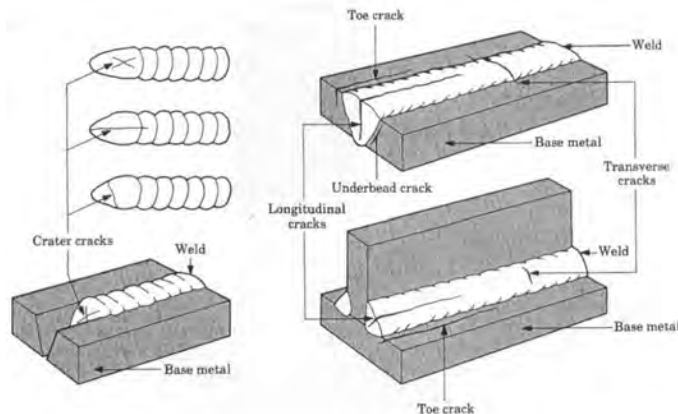
- **Ρωγμές στην περιοχή συγκόλλησης (cracks):** Ρωγμές στη ζώνη συγκόλλησης είναι δυνατόν να εμφανιστούν σε διάφορες θέσεις και σε διάφορες μορφές, βλέπε Σχήμα 8.25. Ανάλογα με την ιστορία της θερμικής ζώνης οι ρωγμές αναπτύσσονται είτε στο σώμα της ραφής είτε στο βασικό μέταλλο (θερμικά επηρεασμένη ζώνη), κοντά στο όριο της ζώνης τήξης (παράπλευρες ρωγμές). Οι τυπικές μορφές των ρωγμών είναι διαμήκεις, εγκάρσιες, επιφανειακές ή εσωτερικές. Η εμφάνιση των ρωγμών αυτών οφείλεται σε έναν ή σε περισσότερα από τα ακόλουθα αίτια:

- θερμοκρασιακές μεταβολές που δημιουργούν θερμικές τάσεις στη ζώνη συγκόλλησης
- διακυμάνσεις της χημικής σύστασης στη ζώνη συγκόλλησης που προκαλούν μη συμβιβαστές μεταξύ τους τοπικές συστολές
- ψαθυροποίηση των ορίων των κόκκων
- ψαθυροποίηση λόγω παρουσίας υδρογόνου (hydrogen embrittlement)
- αδυναμία της ζώνης συγκόλλησης να συσταλθεί κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο αυτό είναι αντίστοιχο με την εμφάνιση των θερμών ρωγμών (hot tears) κατά τη χύτευση.

Ως μέτρα αποφυγής εμφάνισης ρωγμών σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ✓ τροποποίηση της σχεδίασης της συγκόλλησης ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές τάσεις που οφείλονται σε συστολή κατά την ψύξη
- ✓ αλλαγή της ακολουθίας των «πάσων» της συγκόλλησης ή και των παραμέτρων συγκόλλησης
- ✓ προθέρμανση των προς συγκόλληση ελασμάτων
- ✓ αποφυγή της ταχείας ψύξης της συγκολληθείσας κατασκευής.



Σχήμα 8.25: Εμφάνιση ρωγμών σε συγκολλήσεις τήξης.

(προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Τέλος, ως εγγενή ελαττώματα της συγκόλλησης μπορούν να αναφερθούν η **παραμόρφωση (distortion)** της συγκολλητής κατασκευής μετά το πέρας της συγκόλλησης και η ανάπτυξη **εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων** (tensile residual stresses). Η παραμόρφωση μπορεί να αποφευχθεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό της συγκολλητής κατασκευής ενώ η μείωση των παραμενουσών τάσεων μπορεί να επιτευχθεί με αποτατική ανόπτηση (stress revealing).

8.5 Έλεγχος συγκολλήσεων

Με τον έλεγχο των συγκολλήσεων προσδιορίζεται η ποιότητα των ραφών και εντοπίζονται το είδος, η θέση και η σοβαρότητα τυχόν ελαττωμάτων. Για τον έλεγχο των συγκολλήσεων εφαρμόζονται τόσο καταστροφικές όσο και μη- καταστροφικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές είναι κατά κανόνα τυποποιημένες από έγκυρους ή/και διεθνείς φορείς/οργανισμούς (ISO, DIN, AWS, ASTM κ.α).

Οι τυποποιημένες καταστροφικές δοκιμές είναι οι ακόλουθες:

- Δοκιμή εφελκυσμού
- Δοκιμή εφελκυσμού-διάτμησης
- Δοκιμή κάμψης (αναδίπλωσης)
- Δοκιμή δυσθραυστότητας
- Δοκιμή διάβρωσης
- Δοκιμή ερπυσμού.

Οι μη-καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου που εφαρμόζονται περιλαμβάνουν:

- Οπτικό έλεγχο (visual inspection)
- Ραδιογραφικές μεθόδους (ακτίνες -x)
- Έλεγχο με υπερήχους (ultrasonic testing)
- Έλεγχο με διεισδυτικά υγρά (penetrant methods)

Η βιβλιογραφική αναφορά *Halmshaw, 1998* είναι μία πλήρης εισαγωγική μελέτη του μη-καταστροφικού ελέγχου των συγκολλήσεων.

8.6 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (resistance welding/RW)

Όταν ένα σχετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα διέλθει από δύο επιφάνειες σε επαφή, συναντά εσωτερική αντίσταση αναπτύσσοντας έτσι κατά τα γνωστά θερμότητα λόγω αντίστασης, που συγκεντρώνεται τοπικά στην περιοχή σύνδεσης. Αυτή είναι η αρχή της μεθόδου συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση (resistance welding/RW).

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη ζώνη επαφής των δύο ελασμάτων εξαρτάται από την ειδική θερμότητα και την θερμική αγωγιμότητα των υλικών. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για συγκόλληση είτε ίδιων είτε διαφορετικών υλικών. Η ένταση του ρεύματος φθάνει μέχρι 100.000 A ενώ η τάση λειτουργίας είναι πολύ χαμηλή, στην περιοχή 0,5-10 V.

Η μέθοδος RW απαιτεί, κατά κανόνα, εξειδικευμένο εξοπλισμό που μπορεί και να ελέγχεται μέσω H/Y (programmable computer control). Ο εξοπλισμός συνήθως δεν είναι φορητός και η μέθοδος εφαρμόζεται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μηχανουργεία. Οι τεχνικές δεξιότητες του χειριστή/συγκολλητή δεν παίζουν ιδιαίτερο ρόλο ενώ τα μέτρα πρόληψης και ασφάλειας βρίσκονται στο μέσο, τυπικό επίπεδο των συνηθισμένων τεχνικών συγκόλλησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου RW είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται η χρήση αναλίσκόμενων ηλεκτροδίων, προστατευτικών αερίων ή σκόνης προστασίας.

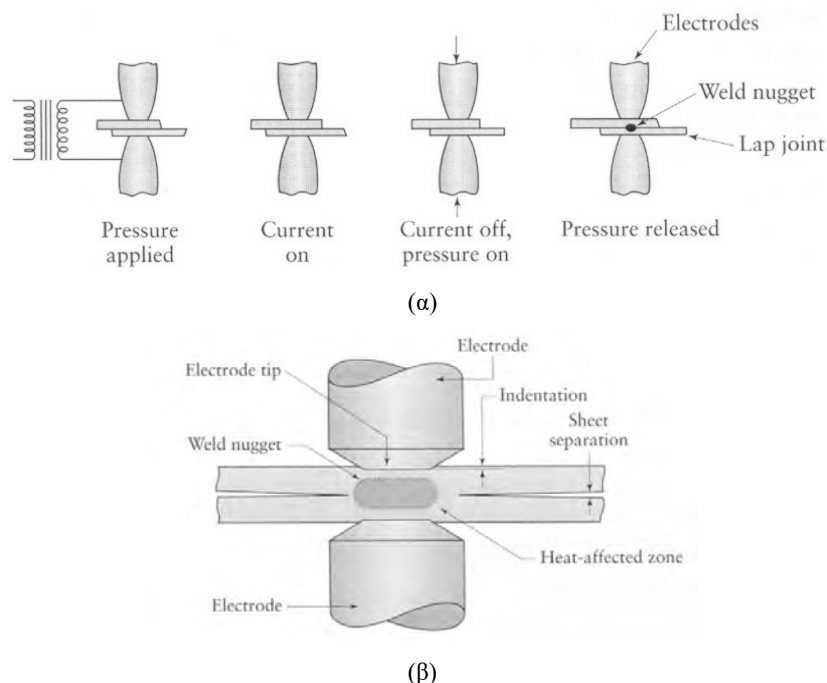
Υπάρχουν τέσσερις κύριες, διαφορετικές τεχνικές που εντάσσονται στην ομάδα των συγκολλήσεων με αντίσταση: σημειακή, γραμμική, προεξοχών και μετωπική. Μία συνοπτική παρουσίαση των τεχνικών αυτών ακολουθεί.

Σημειακή συγκόλληση αντίστασης (resistance spot welding/RSW)

Τα προς συγκόλληση ελάσματα τοποθετούνται μεταξύ των (κυλινδρικών) ηλεκτροδίων τα οποία συγκλίνουν και ασκούν πίεση σ' αυτά. Στη συνέχεια διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα που θερμαίνει τα ελάσματα, λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης στο σημείο που εφάπτονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την δημιουργία σημειακής «λίμνης» συγκόλλησης (weld nugget). Στη συνέχεια η διέλευση του ρεύματος διακόπτεται και η συγκόλληση ψύχεται υπό πίεση. Η αρχή της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.26.

Η αντοχή της συγκόλλησης επηρεάζεται από την καθαρότητα και την τραχύτητα επιφάνειας των ελασμάτων και για τον λόγο αυτό πριν από την κόλληση πρέπει να απομακρύνονται τυχόν ακαθαρσίες (χρώμα, λιπαντικά και στρώματα οξειδωσης).

Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουν την διαδικασία και συμβάλουν στην ποιότητα του αποτελέσματος είναι η πίεση που ασκείται από τα ηλεκτρόδια, η ένταση του ρεύματος και ο χρόνος που διαρκεί η συγκόλληση (διάρκεια αγωγής ρεύματος).

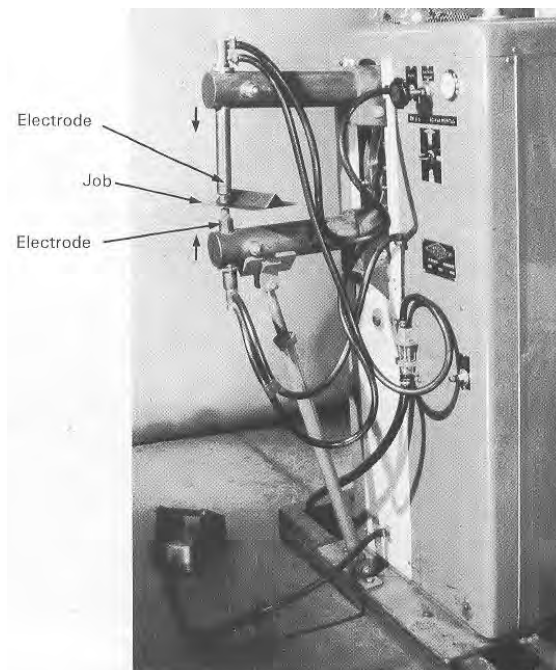


Σχήμα 8.26: Σημειακή συγκόλληση αντίστασης (RSW) – (α): στάδια της μεθόδου, (β) τελικό αποτέλεσμα. (προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Η διάμετρος της «λίμνης συγκόλλησης» είναι 6-10 mm, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) που δημιουργείται, ανάλογα με τη μορφή του ηλεκτροδίου, φθάνει μέχρι και τη διπλάσια διάμετρο. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κυμαίνεται, ανάλογα με το συγκολλούμενο υλικό και το πάχος των ελασμάτων μεταξύ 3.000-40.000 A.

Η τεχνική RSW είναι η απλούστερη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση. Πραγματοποιείται με ένα (συνήθως) ή περισσότερα ηλεκτρόδια και η πίεση που απαιτείται στην περιοχή της κόλλησης παρέχεται από τη μηχανή συγκόλλησης. Η πιο διαδεδομένη μηχανή για συγκόλληση με αντίσταση είναι η ηλεκτροπόντα, βλέπε Σχήμα 8.27. Οι μηχανές αυτές είναι συνήθως σταθερές και ποδοκίνητες διατίθενται όμως και φορητός παρόμοιος εξοπλισμός.

Η σημειακή συγκόλληση εφαρμόζεται ευρύτατα στις συγκολλήσεις ελασμάτων. Αυτόματες μηχανές συγκόλλησης υψηλής ακρίβειας, ελεγχόμενες από Η/Υ και προσαρμοσμένες σε ρομποτικούς βραχίονες, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για τη συγκόλληση αμαξωμάτων, βλέπε Σχήμα 8.28, στην αεροναυπηγική καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής οικιακών συσκευών. Ενδεικτικά σημειώνεται ότι ένα τυπικό αυτοκίνητο φέρει περίπου 10.000 σημειακές συγκολλήσεις αντίστασης



Σχήμα 8.27: Μηχανή σημειακής συγκόλλησης αντίστασης (ηλεκτροπόντα).



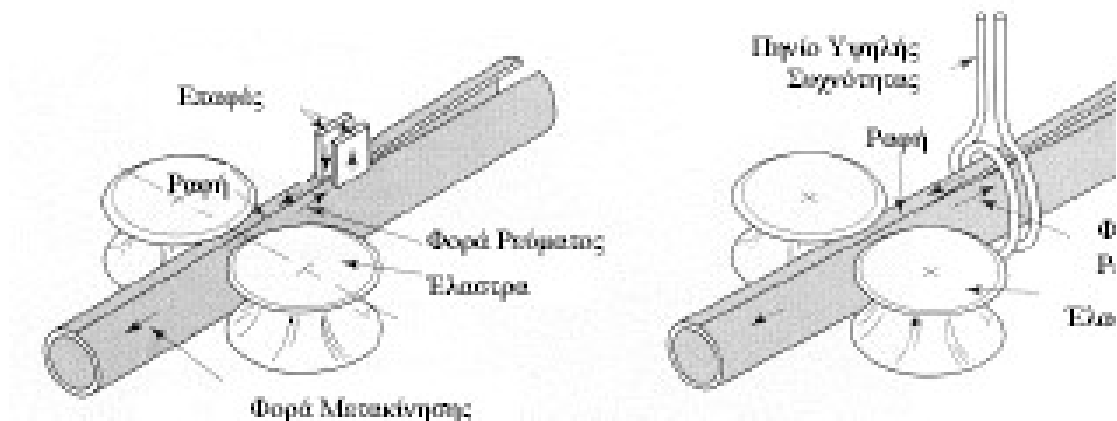
Σχήμα 8.28: Εφαρμογή ρομποτικών συγκολλήσεων αντίστασης στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Γραμμική συγκόλληση αντίστασης (resistance seam welding/RSEW)

Η τεχνική αυτή συνίσταται στη σύνδεση εξαρτημάτων κατά μήκος της γραμμής κύλισης των ηλεκτροδίων που έχουν τη μορφή ράουλων, βλέπε Σχήμα 8.29. Η αρχή λειτουργίας της γραμμικής συγκόλλησης είναι παρόμοια με αυτή της σημειακής. Τα κυκλικά ηλεκτρόδια εφάπτονται στα προς συγκόλληση εξαρτήματα σχηματίζοντας

στιγμιαίες θέσεις συγκόλλησης λόγω διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Καθώς τα ηλεκτρόδια περιστρέφονται και ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους, δημιουργείται **συνεχής** ραφή κόλλησης που είναι υδατοστεγής και αεροστεγής. Η γραμμική συγκόλληση μπορεί να είναι και **διακοπτόμενη**, όταν η διέλευση του ρεύματος πραγματοποιείται περιοδικά με ή χωρίς μετατόπιση των συγκολλούμενων μερών κατά την περίοδο διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Όπως και στη σημειακή συγκόλληση, η ένταση του ρεύματος, ο χρόνος διέλευσής του και η πίεση που ασκείται στα συγκολλούμενα τεμάχια καθορίζουν το μέγεθος της κόλλησης.

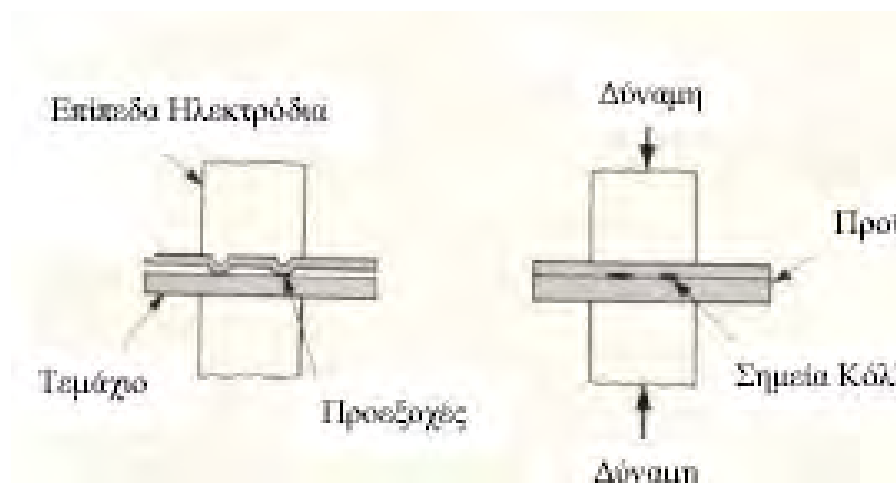
Η μέθοδος της γραμμικής συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση εφαρμόζεται συνήθως, στη συγκόλληση σωλήνων με ραφή, βλέπε Σχήμα 8.29, με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής συχνότητας (έως και 450 kHz).



Σχήμα 8.29: Γραμμική συγκόλληση αντίστασης (RSEW)

Συγκόλληση προεξοχών (resistance projection welding/RPW)

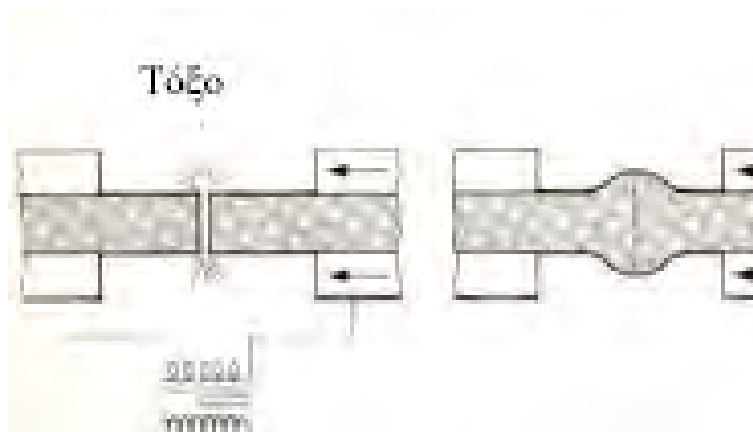
Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στη σύνδεση εξαρτημάτων σε ένα ή περισσότερα σημεία επαφής συγχρόνως, βλέπε Σχήμα 8.30. Τα σημεία επαφής είναι κατάλληλα διαμορφωμένες προεξοχές (dimples/projections), συνήθως μέσω κοίλανσης (embossing), στο ένα από τα δυο συγκολλούμενα εξαρτήματα. Το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσω επίπεδων χάλκινων ηλεκτροδίων και θερμαίνει το τμήμα της προεξοχής που εφάπτεται στην επίπεδη επιφάνεια του εξαρτήματος. Στο σημείο εκείνο δημιουργείται ο πυρήνας της συγκόλλησης ενώ το υπόλοιπο τμήμα της προεξοχής που έχει μαλακώσει λόγω της θέρμανσης παραμορφώνεται πλαστικά και γίνεται επίπεδο υπό την επίδραση πίεσης. Η σωστή εφαρμογή της διαδικασίας εξαρτάται από τη μορφή και τη διαστατική ακρίβεια των προεξοχών. Ο εξοπλισμός της σημειακής συγκόλλησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τεχνική RPW με κατάλληλο επανασχεδιασμό/τροποποίηση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 8.30: Συγκόλληση προεξοχών (RPW).

Μετωπική συγκόλληση αντίστασης (flash welding/FW)

Στην περίπτωση αυτή η συγκόλληση γίνεται μετωπικά σε όλη την επιφάνεια επαφής. Η θερμότητα που απαιτείται προέρχεται από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται στην περιοχή της επαφής. Άνω μιας ορισμένης θερμοκρασίας οι επιφάνειες των συγκολλούμενων εξαρτημάτων μαλακώνουν και με ελεγχόμενη εφαρμογή πίεσης σχηματίζεται η σύνδεση που συνοδεύεται από πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή συγκόλλησης, βλέπε Σχήμα 8.31. Η μετωπική συγκόλληση διακρίνεται στη συγκόλληση βραχυκύκλωσης και στη συγκόλληση σπινθήρα. Χαρακτηριστική είναι η διόγκωση που προκαλείται και με τις δύο μεθόδους στη θέση της σύνδεσης, βλέπε Σχήμα 8.31. Η μετωπική συγκόλληση χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για τη σύνδεση σωλήνων και κυλινδρικών τεμαχίων διαμέτρου 1-75 mm. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στην τεχνική FW είναι μεγάλες σε όγκο και συνήθως αυτόματες με ονομαστική ισχύ 10-1500 kVA.



Σχήμα 8.31: Μετωπική συγκόλληση αντίστασης (FW).

8.7 Ψυχρές συγκολλήσεις (cold welding)

Στις μεθόδους της ομάδας αυτής η συνένωση των δύο επιφανειών επιτυγχάνεται με την άσκηση πίεσης (δύναμης), συνήθως μέσω καλουπιών ή ράουλων. Στον βαθμό που η ένωση των επιφανειών πραγματοποιείται μέσω *πλαστικής παραμόρφωσης* θα πρέπει τουλάχιστον το ένα και κατά προτίμηση και τα δύο υλικά να είναι *όλκιμα*. Μεταξύ άλλων μεθόδων στην ομάδα αυτή εντάσσονται οι ακόλουθες:

- Συγκόλληση με έλαση (roll bonding ή roll welding)
- Συγκόλληση με χρήση υπερήχων (ultrasonic welding/USW)
- Συγκόλληση τριβής (friction welding/FRW)

Οι μέθοδοι αυτές δεν συζητούνται εδώ, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά *Kalpakjian and Schmid, 2003*.

8.8 Άλλες μέθοδοι συγκόλλησης

Εδώ εντάσσονται οι μέθοδοι:

- Συγκόλληση διάχυσης (diffusion bonding)
- Εκρηκτική συγκόλληση (explosive welding)

Οι μέθοδοι αυτές δεν συζητούνται εδώ, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά, *Nicholas, 1998* και *Crossland, 1982*, αντίστοιχα.

Οι συγκολλήσεις των ενοτήτων 8.7 και 8.8 εντάσσονται στην ομάδα των συγκολλήσεων στερεάς φάσης, βλέπε ενότητα 8.1.

8.9 Ετερογενείς συγκολλήσεις (soldering and brazing)

Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του Κεφαλαίου, το κύριο χαρακτηριστικό των ετερογενών συγκολλήσεων είναι η διαφορετική χημική σύνθεση του συγκολλητικού υλικού από εκείνη του βασικού μετάλλου. Η σύνδεση των τεμαχίων στην ετερογενή συγκόλληση επιτυγχάνεται κυρίως με την διείσδυση της ρευστοποιημένης κόλλησης μέσα στους πόρους των συγκολλούμενων μεταλλικών επιφανειών και την ανάπτυξη μοριακών δυνάμεων (πρόσφυση/capillary action) με τον σχηματισμό κραμάτων στην περιοχή της σύνδεσης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία μιας ετερογενούς συγκόλλησης είναι ο απόλυτος καθαρισμός των επιφανειών συγκόλλησης και η αποφυγή εισόδου αέρα στην ραφή. Τούτο επιτυγχάνεται με την χρήση κατάλληλου υλικού καθαρισμού.

Ανάλογα με το σημείο τήξης του συγκολλητικού υλικού, οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε:

- μαλακές συγκολλήσεις (soldering), όπου το σημείο τήξης της κόλλησης κυμαίνεται περί τους 450°C,
- σκληρές συγκολλήσεις (brazing), όπου το σημείο τήξης της κόλλησης υπερβαίνει τους 450°C.

Οι ετερογενείς συγκολλήσεις χρησιμοποιούνται συνήθως:

- ✓ Όταν για διάφορους λόγους αποκλείεται η αυτογενής συγκόλληση, όπως π.χ. σε διαφορετικά συγκολλούμενα μέταλλα, για αποφυγή υπερθέρμανσης των τεμαχίων που έχει επιπτώσεις στην αντοχή τους.
- ✓ Όταν επιδιώκεται θέρμανση των τεμαχίων σε θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο τήξης τους, π.χ. κατά την συγκόλληση (λεπτότοιχων) μεταλλικών δοχείων συσκευασίας.
- ✓ Σε περιπτώσεις παραγωγής όταν η αντοχή της ετερογενούς συγκόλλησης κρίνεται ικανοποιητική, π.χ. κονσερβοποιία.

8.9.1 Μαλακές ετερογενείς συγκολλήσεις

Η πλέον τυπική περίπτωση μαλακής ετερογενούς συγκόλλησης είναι η κασσιτεροκόλληση. Το συγκολλητικό υλικό (solder) είναι συνήθως, κράμα κασσίτερου και μολύβδου σε διάφορες αναλογίες, με μικρή ποσότητα αντιμονίου, που καθιστά την κόλληση πιο ανθεκτική, αλλά και σκληρότερη. Η επιλογή της χρήσης κράματος κασσίτερου ως συγκολλητικού υλικού βασίζεται σε δύο κυρίως λόγους: την ευχερή εξάπλωση της κόλλησης πάνω στα τεμάχια και την αποφυγή χρήσης κραμάτων μολύβδου λόγω περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Ως προσμίξεις του κασσίτερου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα μέταλλα όπως π.χ. κάδμιο, βισμούθιο ή άργυρος. Στον Πίνακα 8.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συνηθέστεροι τύποι συγκολλητικού υλικού που χρησιμοποιούνται στις μαλακές ετερογενείς κολλήσεις. Η σύσταση των υλικών solder και η κωδικοποίηση τους ακολουθεί την προδιαγραφή ISO 3677 (1992).

Πίνακας 8.4: Συνδετικό υλικό μαλακών ετερογενών συγκολλήσεων μετάλλων και κραμάτων. (προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

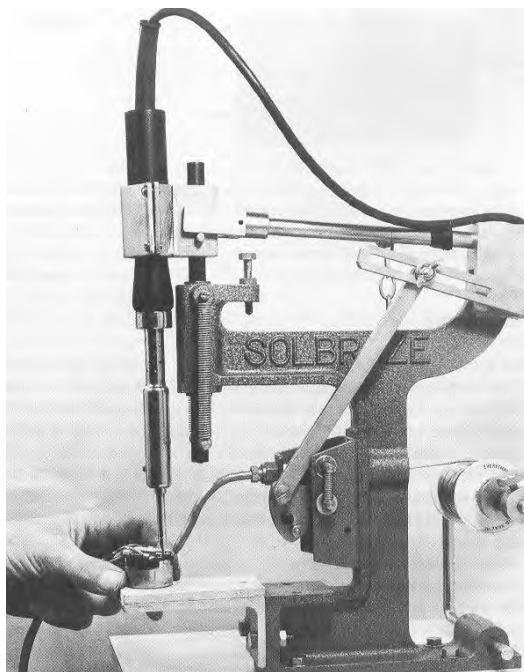
Tin-lead	General purpose
Tin-zinc	Aluminum
Lead-silver	Strength at higher than room temperature
Cadmium-silver	Strength at high temperatures
Zinc-aluminum	Aluminum; corrosion resistance
Tin-silver	Electronics
Tin-bismuth	Electronics

Η αντοχή των μαλακών ετερογενών κολλήσεων είναι μικρή και κατά συνέπεια αυτές αποφεύγονται σε εξαρτήματα με υψηλά τασικά πεδία ενώ αντίθετα εφαρμόζονται ευρέως στην ηλεκτρονική βιομηχανία. Οι κολλήσεις soldering αποφεύγονται συνήθως σε σύνδεση κατά συμβολή (butt joint). Τονίζεται τέλος ότι με την μέθοδο soldering δεν κολλώνται σιδηρούχα υλικά.

Τα υλικά καθαρισμού (fluxes) των μαλακών συγκολλήσεων διακρίνονται σε:

- όξινα (υδροχλωρικό οξύ, χλωριούχος ψευδάργυρος, χλωριούχο αμμώνιο),
- ουδέτερα (ρητινώδη αποξειδωτικά υλικά με βάση το κολοφώνιο που προέρχεται από την ρητίνη όταν απομακρυνθεί το τερεβινθέλαιο με απόσταξη).

Βασικό εξάρτημα εκτέλεσης των κασσιτεροκολλήσεων είναι ο συγκολλητήρας (κολλητήρι) που παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για την θέρμανση των μετάλλων και την τήξη της κόλλησης στην περιοχή της σύνδεσης. είτε άμεσα με φλόγα είτε με ηλεκτρική αντίσταση. Στο Σχήμα 8.32 εικονίζεται ένας ηλεκτρικός συγκολλητήρας soldering μαζί με τις απαραίτητες ιδιοσυσκευές.



Σχήμα 8.32: Ηλεκτρικός συγκολλητήρας soldering.

8.5.2 Σκληρές ετερογενείς συγκολλήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το συγκολλητικό υλικό των σκληρών ετερογενών συγκολλήσεων τήκεται σε θερμοκρασία άνω των 450°C αλλά σαφώς χαμηλότερη από την θερμοκρασία τήξη των μετάλλων προς συγκόλληση. Η διεργασία αυτή είναι

τελείως διαφορετική από την τυπική συγκόλληση τήξης και κατά συνέπεια προβλήματα συνυφασμένα με την δημιουργία ζώνης θερμικής επίδρασης, παραμορφώσεις και ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων είναι στην περίπτωση αυτή σαφώς ολιγότερα.

Η αντοχή μιας σκληρής ετερογενούς συγκόλλησης εξαρτάται αφ' ενός από την γεωμετρία της σύνδεσης και αφ' ετέρου από την πρόσφυση των υλικών στην διεπιφάνεια αντικειμένου και συγκολλητικού υλικού. Οι επιφάνειες που θα συγκολληθούν πρέπει να καθαρισθούν απόλυτα, με μηχανικό ή χημικό τρόπο, η χρήση υλικών καθαρισμού κατά συνέπεια είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τέτοια υλικά είναι ο βόρακας (σε θερμοκρασίες συγκόλλησης ≥ 750 °C) το βορικό οξύ (σε θερμοκρασίες συγκόλλησης ≥ 880 °C) ή μίγμα από χλωρίδια και φθορίδια με ή χωρίς βόρακα και ενώσεις φωσφόρου (σε θερμοκρασίες ≤ 800 °C).

Οι πιο συνηθισμένες σκληρές ετερογενείς συγκολλήσεις είναι η *μπρουντζοκόλληση* και η *ασημοκόλληση*. Η μπρουντζοκόλληση χρησιμοποιεί ως συνδετικό υλικό κράμα χαλκού και ψευδαργύρου με μικρές περιεκτικότητες σε κασσίτερο και άργυρο. Στην ασημοκόλληση χρησιμοποιούνται ως συνδετικό υλικό κράματα που περιέχουν άργυρο (σε περιεκτικότητα τουλάχιστον 8 %), χαλκό, ψευδάργυρο, κασσίτερο και κάδμιο. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άργυρο μειώνει το σημείο τήξης της κόλλησης, άρα επιτρέπει συγκόλληση σε χαμηλότερη θερμοκρασία, γεγονός που κατά κανόνα είναι επιθυμητό. Η ασημοκόλληση είναι σημαντικά ακριβότερη της μπρουντζοκόλλησης αλλά έχει καλλίτερες ιδιότητες και συνεπώς προτιμάται σε κολλήσεις υψηλών λειτουργικών απαιτήσεων. Το συνδετικό υλικό (filler material) κυκλοφορεί στο εμπόριο σε διάφορες μορφές (σύρμα, έλασμα, σκόνη κ.λπ) ενώ η επιλογή συγκεκριμένης σύνθεσης συνδετικού υλικού εξαρτάται κυρίως από το προς συγκόλληση υλικό, βλέπε Πίνακα 8.5. Η κωδικοποίησή του ακολουθεί, επίσης, την προδιαγραφή ISO 3677 (1992).

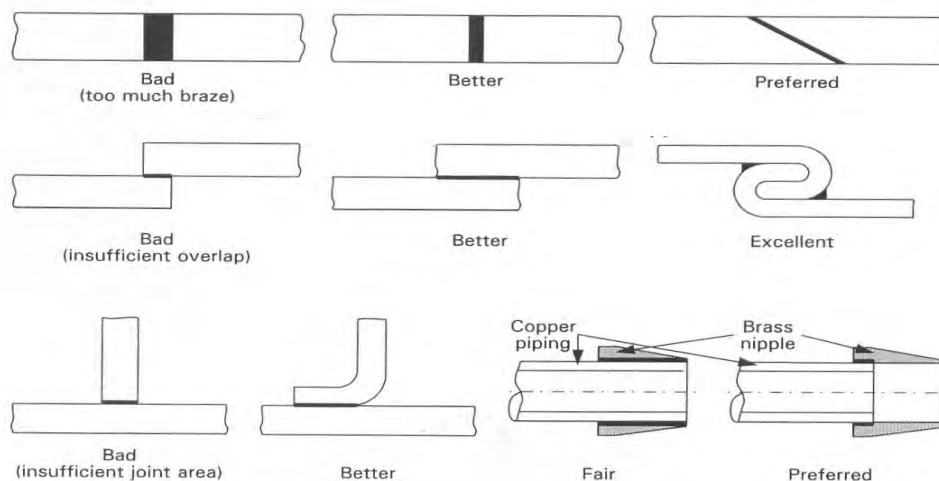
Πίνακας 8.5: Συνδετικό υλικό σκληρών ετερογενών συγκολλήσεων μετάλλων και κραμάτων. (προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

BASE METAL	FILLER METAL	BRAZING TEMPERATURE (°C)
Aluminum and its alloys	Aluminum-silicon	570-620
Magnesium alloys	Magnesium-aluminum	580-625
Copper and its alloys	Copper-phosphorus	700-925
Ferrous and nonferrous alloys (except aluminum and magnesium)	Silver and copper alloys, copper-phosphorus	620-1150
Iron-, nickel-, and cobalt-base alloys	Gold	900-1100
Stainless steels, nickel- and cobalt-base alloys	Nickel-silver	925-1200

Για την εκτέλεση σκληρών ετερογενών συγκολλήσεων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως:

- Συγκόλληση με καμινευτήρα, π.χ καμινευτήρας οξυγόνου-ασετυλίνης (torch brazing).
- Συγκόλληση με εμβάπτιση των τεμαχίων σε δοχείο που περιέχει κόλληση σε υγρή κατάσταση (dip brazing)
- Συγκόλληση με επαγωγή (induction brazing)
- Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (resistance brazing).

Κατά την εκτέλεση σκληρών ετερογενών συγκολλήσεων προτιμάται η γεωμετρία σύνδεσης με επικάλυψη ενώ πρέπει να αποφεύγεται η σύνδεση κατά συμβολή. Στο Σχήμα 8.33 παρουσιάζονται ορθές και εσφαλμένες γεωμετρίες σύνδεσης κατά την εφαρμογή κολλήσεων brazing. Επισημαίνεται ότι το διάκενο (clearance) μεταξύ των προς συγκόλληση επιφανειών είναι ουσιώδης παράμετρος της διαδικασίας δεδομένου ότι καθορίζει την αντοχή της σύνδεσης. Η μείωση του διάκενου αυξάνει την διατμητική αντοχή της σύνδεσης, ωστόσο απαιτείται ένα ορισμένο μέγεθος διάκενου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μέγιστη αντοχή (UTS).



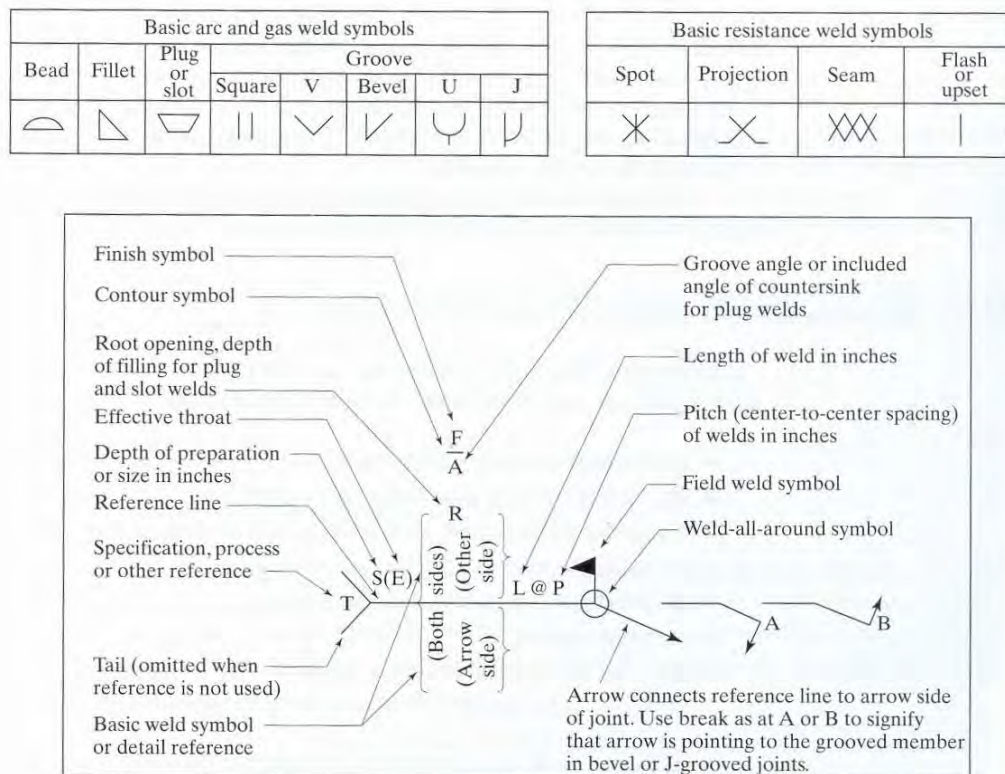
Σχήμα 8.33: Γεωμετρία σύνδεσης κατά την εκτέλεση κολλήσεων brazing.

(προέλευση: Waters, 1996)

8.10 Σχεδίαση συγκόλλησης

Η σχεδίαση των συγκολλήσεων γίνεται με απλοποιημένο τρόπο σύμφωνα με τους κανονισμούς του «Μηχανολογικού Σχεδίου». Στα σχέδια συγκολλητών κατασκευών προβλέπεται, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές (ISO), τις Γερμανικές

(DIN) ή τις Αμερικανικές (ANSI/AWS), ο συμβολισμός όλων των κυρίων παραμέτρων της συγκόλλησης, όπως η μέθοδος και ο τύπος της συγκόλλησης, το πάχος και το μήκος της «ραφής», το είδος του πρόσθετου υλικού (π.χ. ηλεκτρόδιο) και η τυχόν απαιτούμενη επεξεργασία μετά την συγκόλληση. Οι κύριοι τύποι συγκόλλησης με τον αντίστοιχο συμβολισμό παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.34 που συμφωνεί κατά βάση με τους κανονισμούς AWS. Παρόμοιες, γενικά είναι και οι προδιαγραφές ISO 2553 (1993) και DIN 1912-4(1981).



Σχήμα 8.34: Τυποποιημένα σύμβολα συγκολλήσεων (κατά AWS).

8.11 Υπολογισμός αντοχής συγκόλλησης

Για να ελεγχθεί η επάρκεια μιας ραφής συγκόλλησης ως προς την αντοχή πρέπει να υπολογισθούν οι μέγιστες ορθές διατμητικές, καμπτικές και στρεπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στη σύνδεση από την εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση. Οι τάσεις αυτές στη συνέχεια συγκρίνονται με τις λεγόμενες επιτρεπόμενες τάσεις.

Ο υπολογισμός της αντοχής μιας συγκόλλησης τυπικά ανήκει στη γνωστική περιοχή των «Στοιχείων Μηχανών». Η μέθοδος που εφαρμόζεται συνήθως βασίζεται στη θεώρηση της ραφής συγκόλλησης ως γραμμής χωρίς πάχος (treating weld as a line), στον υπολογισμό της μέγιστης αναπτυσσόμενης δύναμης ανά μονάδα μήκους και

τελικά στον καθορισμό των απαιτούμενων διαστάσεων της ραφής, βλέπε ενδεικτικά *Mott, 2004*.

Οι συγκολλήσεις δομικών κατασκευών υπολογίζονται και ελέγχονται με ειδικούς τυποποιημένους κώδικες, ενδεικτικά αναφέρονται οι “American Institute of Steel Construction (AISC) code for building construction” και “Ευρωκώδικας 3” η εφαρμογή του οποίου είναι υποχρεωτική στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

8.12 Οικονομικά στοιχεία συγκόλλησης

Η συγκόλληση και ιδιαίτερα η συγκόλληση τόξου αποτελεί σήμερα μια τυποποιημένη μέθοδο ως προς την πρακτική, τα υλικά που χρησιμοποιεί και τον χρόνο που απαιτείται για την υλοποίηση μιας συγκόλλησης συγκεκριμένου τύπου και μορφής. Κατά συνέπεια, είναι σχετικά εύκολο να υπολογισθούν τυπικά κόστη (standard costs) και εξ’ αυτών να προκύψει το κόστος δεδομένης συγκολλητής κατασκευής.

Τυπικά, το κόστος συγκόλλησης περιλαμβάνει το άμεσο κόστος υλικών (material cost) και εργατικών (labor) και το έμμεσο κόστος (overhead). Το άμεσο κόστος υλικών περιλαμβάνει το κόστος του προστιθέμενου μετάλλου, του αερίου προστασίας, της σκόνης προστασίας και άλλων υλικών, ανάλογα με την μέθοδο συγκόλλησης. Ως βάση για την εκτίμηση του άμεσου κόστους υλικών λαμβάνεται συνήθως η μάζα του μετάλλου συγκόλλησης που εναποτίθεται ή όταν δεν υπάρχει εναπόθεση μετάλλου το ολικό μήκος συγκόλλησης. Το άμεσο κόστος εργατικών περιλαμβάνει το τμήμα του εργατικού κόστους που συνδέεται άμεσα με την διαδικασία συγκόλλησης. Ως βάση για την εκτίμηση του άμεσου κόστους εργατικών λαμβάνεται ο χρόνος συγκόλλησης.

Το έμμεσο κόστος περιλαμβάνει όλες τις έμμεσες επιβαρύνσεις της παραγωγής, όπως το έμμεσο εργατικό κόστος, το έμμεσο κόστος υλικών και το κόστος των διαφόρων υπηρεσιών, τις αποσβέσεις, τους φόρους και τα γενικά και διοικητικά έξοδα. Ο τρόπος με τον οποίο το έμμεσο κόστος επιμερίζεται στις διάφορες συγκολλήσεις εξαρτάται από την πρακτική και το σύστημα κοστολόγησης της συγκεκριμένης εταιρείας. Συνήθως ο επιμερισμός του έμμεσου κόστους γίνεται ανάλογα με το άμεσο κόστος εργατικών του προϊόντος (συγκόλληση) με βάση ένα προκαθορισμένο ποσοστό έμμεσου κόστους.

Επισημαίνεται ότι το κόστος των συγκολλήσεων δεν είναι το μόνο κόστος που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους μιας συγκολλητής κατασκευής. Σ’ αυτό προστίθενται το κόστος προετοιμασίας (διαμόρφωση των άκρων), το κόστος των θερμικών κατεργασιών μετά την συγκόλληση και το κόστος των κατεργασιών αποπεράτωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**A) Συγγράμματα-Δημοσιεύσεις**

- Αντωνιάδης, Α, Πανταζόπουλος, Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία II*, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 1999.
- Βαξεβανίδης, Ν.Μ., *Μηχανολογική Σχεδίαση*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), Πάτρα, 2003.
- Δαργενίδης, Β.Δ., *Μηχανολογικό Εργαστήριο II*, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 1993.
- Διαμαντούδης, Θ.Α., *Συγκολλήσεις Μετάλλων*, 2^η εκδ., Θεσσαλονίκη, 2000.
- De Garmo, P., Temple Black, J. and Kohser, R.A., *Materials and Processes in Manufacturing*, Macmillan Publishing Co, 7th ed., New York, 1988.
- Gellerman, M., *Η πρακτική των Συγκολλήσεων*, εκδ. ΙΩΝ, Αθήνα, 1997.
- Μάμαλης, Α.Γ., *Κατεργασίες των Υλικών -II*, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα, 1985.
- Ορφανός, Ι.Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία*, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 1994.
- Παπάζογλου, Β.Ι., Παπαδημητρίου, Γ., *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων*, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα, 1994.
- *ASM Handbook*, vol. 6: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, 1993.
- Chryssolouris, G., *Manufacturing Systems –Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, 1992.
- Doyle, L.E., Keyser, C.A., Leach, J.L., Schrader, G.F., Singer, M.B., *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*, Prentice Hall, 3rd ed., N. Jersey, 1985.
- Halmslaw, R., *Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints*, Abington Publishing, 2nd ed., Cambridge, 1998.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Prentice Hall, 4th ed., New Jersey, 2003.
- Masubushi, K., *Analysis of Welded Structures-Residual Stresses and Distortion and their Consequences*, Pergamon, N. York, 1980.
- Mott, R.L., *Machine Elements in Mechanical Design*, Pearson-Prentice Hall, 4th ed., 2004.
- Rao, P.N., *Manufacturing Technology*, Tata Mc-Graw Hill, 2nd ed., N.Delhi, 1998.
- Rybakov, V., *Arc and Gas Welding*, MIR Publishers, Moscow, 1986.
- Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, Mc-Graw Hill, 3rd ed., N.York, 2000.
- Swift, K.G. and Booker, J.D., *Process Selection: from Design to Manufacture*, Arnold, London, 1997.
- *TC 9-237: Welding theory and application*, Dept. of the Army, Washington D.C., 1993.
- Waters, F., *Fundamentals of Manufacturing Engineers*, UCL Press, London, 1996

B) Προδιαγραφές

- DIN 1910-1(1983): *Welding; concepts, classification of welding processes*.
- DIN 1910-2 (1983): *Welding; Welding of Metals, Processes*.
- DIN 2559-1 (1973): *Edge Preparation for Welding; Directions regarding Edge Forms, Fusion Welding of Butt Joints in Steel Tubes*.

- DIN 32520-1 (1987): *Graphical symbols for welding; basic graphical symbols and principles.*
- DIN 8505-3 (1983): *Brazing and soldering; Classification of processes according to energy transfer media; Description of processes.*
- DIN 8515-1 (1979): *Defects in Metallic Solder Joints; Brazing Joints and High-temperature Solder Joints; Classification, Designations, Explanatory Notes.*
- DIN 8524-3 (1975): *Defects in Metallic Welded Joints; Cracks, Classification, Denominations, Explanatory Notes.*
- ISO 544 (1989): *Filler materials for manual welding - Size requirements.*
- ISO 669 (2000): *Resistance welding - Resistance welding equipment - Mechanical and electrical requirements.*
- ISO 857-1 (1998): *Welding and allied processes - Vocabulary - Part 1: Metal welding processes.*
- ISO 2560 (2002): *Welding consumables -Covered electrodes for manual metal arc welding of non-alloy and fine grain steels – Classification.*
- ISO 3580 (1975): *Covered electrodes for manual arc welding of creep-resisting steels - Code of symbols for identification.*
- ISO 3677 (1992): *Filler metal for soft soldering, brazing and braze welding – Designation.*
- ISO 3834-1 (1994): *Quality requirements for welding -Fusion welding of metallic materials - Part 1: Guidelines for selection and use.*
- ISO 3834-2 (1994): *Quality requirements for welding -Fusion welding of metallic materials - Part 2: Comprehensive quality requirements.*
- ISO 3834-3 (1994): *Quality requirements for welding - Fusion welding of metallic materials - Part 3: Standards quality requirements.*
- ISO 3834-4 (1994): *Quality requirements for welding - Fusion welding of metallic materials - Part 4: Elementary quality requirements.*
- ISO 4850 (1979): *Personal eye-protectors for welding and related techniques -Filters - Utilisation and transmittance requirements.*
- ISO 5175 (1987): *Equipment used in gas welding, cutting and allied processes -- Safety devices for fuel gases and oxygen or compressed air -- General specifications, requirements and tests.*
- ISO 5187 (1985): *Welding and allied processes - Assemblies made with soft solders and brazing filler metals - Mechanical test methods.*
- ISO 6520-1 (1998): *Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 1: Fusion welding.*
- ISO 6520-2 (2001): *Welding and allied processes - Classification of geometric imperfections in metallic materials - Part 2: Welding with pressure.*
- ISO 6947 (1990): *Welds -- Working positions -- Definitions of angles of slope and rotation.*
- ISO 9692 (1992): *Metal-arc welding with covered electrode, gas-shielded metal-arc welding and gas welding - Joint preparations for steel.*
- ISO 9956-1 (1995): *Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Part 1: General rules for fusion welding.*
- ISO 9956-2 (1995): *Specification and approval of welding procedures for metallic materials - Part 2: Welding procedure specification for arc welding.*
- ISO 13919-1 (1996): *Welding - Electron and laser-beam welded joints - Guidance on quality levels for imperfections - Part 1: Steel.*
- ISO 14112 (1996): *Gas welding equipment - Small kits for gas brazing and welding.*

- ISO 14175 (1997): *Welding consumables - Shielding gases for arc welding and cutting.*
- ISO 14554-1 (2000): *Quality requirements for welding - Resistance welding of metallic materials - Part 1: Comprehensive quality requirements.*
- ISO 15609-2 (2001): *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 2: Gas welding.*
- ISO 15615 (2002): *Gas welding equipment - Acetylene manifold systems for welding, cutting and allied processes - Safety requirements in high-pressure devices.*
- ISO 15620 (2000): *Welding - Friction welding of metallic materials.*
- ISO 17658 (2002): *Welding - Imperfections in oxyfuel flame cuts, laser beam cuts and plasma cuts – Terminology.*
- ISO 17659 (2002): *Welding - Multilingual terms for welded joints with illustrations.*
- ISO/TR 17671-1 (2002): *Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 1: General guidance for arc welding.*
- ISO/TR 17671-2 (2002): *Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels.*
- ISO/TR 17671-3 (2002): *Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 3: Arc welding of stainless steels.*
- ISO/TR 17671-4 (2002): *Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 4: Arc welding of aluminium and aluminium alloys.*

Προτεινόμενη (προαιρετική) βιβλιογραφία εμβάθυνσης

- Παπάζογλου, Β.Ι., Παπαδημητρίου, Γ., *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων*, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα, 1994.
- *ASM Handbook*, vol. 6: *Welding, Brazing and Soldering*, ASM International, 1993.
- Crossland, B., *Explosive Welding of Metals and its application*, Clarendon Press, Oxford, 1982
- Halmshaw, R., *Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints*, Abington Publishing, 2nd ed., Cambridge, 1998.
- Lancaster, J.F, *The Metallurgy of Welding*, Chapman & Hall, 1993.
- Nicholas, M.G., *Joining Processes: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding*, Chapman & Hall, 1998.
- *Welding Handbook*, 8th ed., 3 vols, American Welding Society, 1987.

Πηγές στο Διαδίκτυο (Internet)

Φορέας/Εταιρεία/Θέμα	Δικτυακός τόπος
TWI (The Welding Institute)	http://www.twi.co.uk/j32k/index.xtp
American Welding Society	http://www.aws.org
Ασφάλεια και Υγιεινή Εργασίας κατά την εκτέλεση συγκολλήσεων	http://www.osha-slc.gov/SLTC/weldingcuttingbrazing/
Lincoln Electric Company	http://www.lincolnelectric.com/