

Συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης – συγκολλήσεις συνδετικού μέσου – συγκολλήσεις στερεής κατάστασης

ΔΙΔΑΣΚΕΙΝ 6

Περιεχόμενα

- ✓ Συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης
- ✓ Συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου
- ✓ Συγκολλήσεις στερεής κατάστασης

ΜΕΡΟΣ Α

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

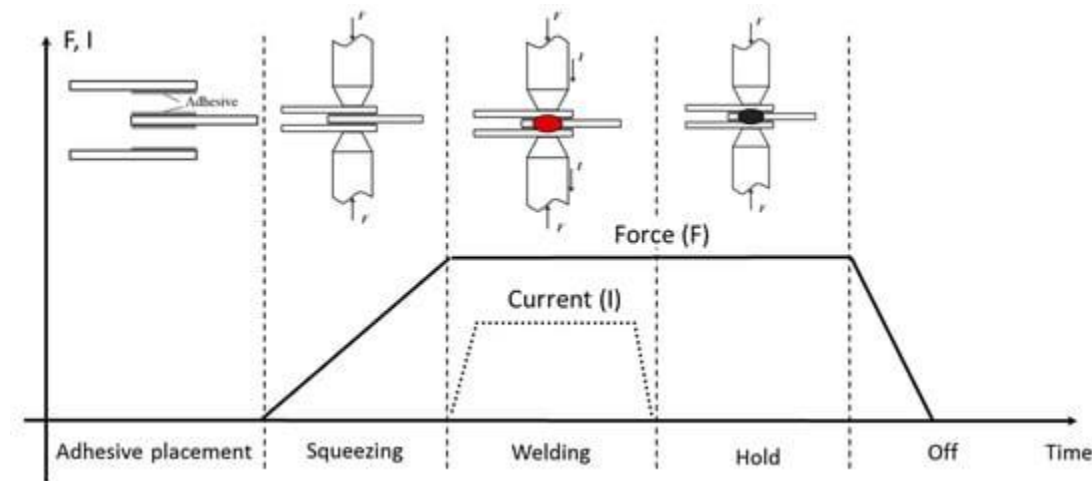
Συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης

- ❑ Συγκολλήσεις τήξης του μητρικού υλικού
- ❑ Η πρόσδοση θερμότητας γίνεται μέσω διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος των τεμαχίων
- ❑ Ιδιαίτερα στη διεπαφή των τεμαχίων η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται
- ❑ Επίσης πίεση ασκείται στα τεμάχια έτσι ώστε να βρίσκονται σε επαφή

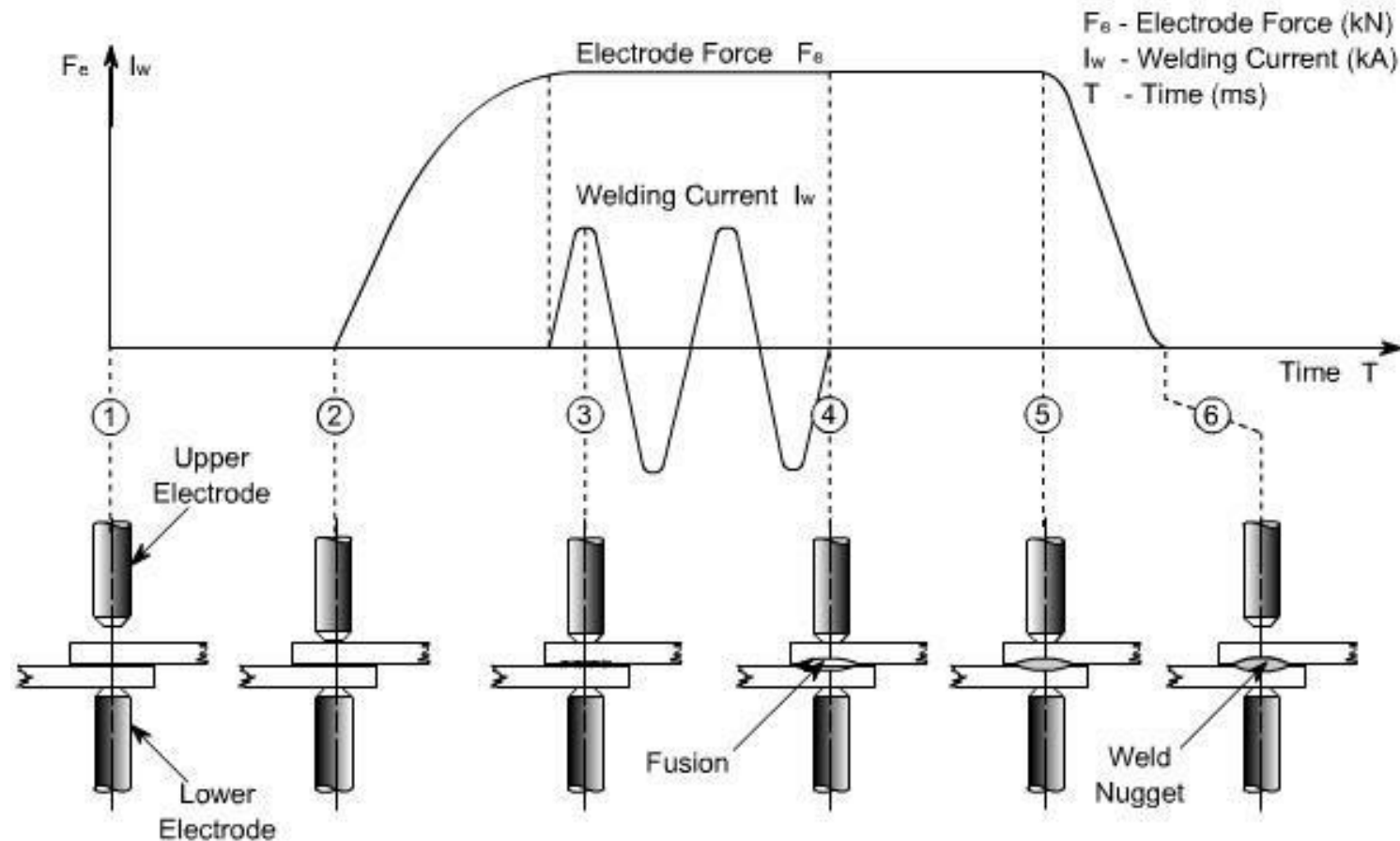
$$Q = I^2 R t$$

Διαδικασία Συγκολλήσεων ηλεκτρικής αντίστασης

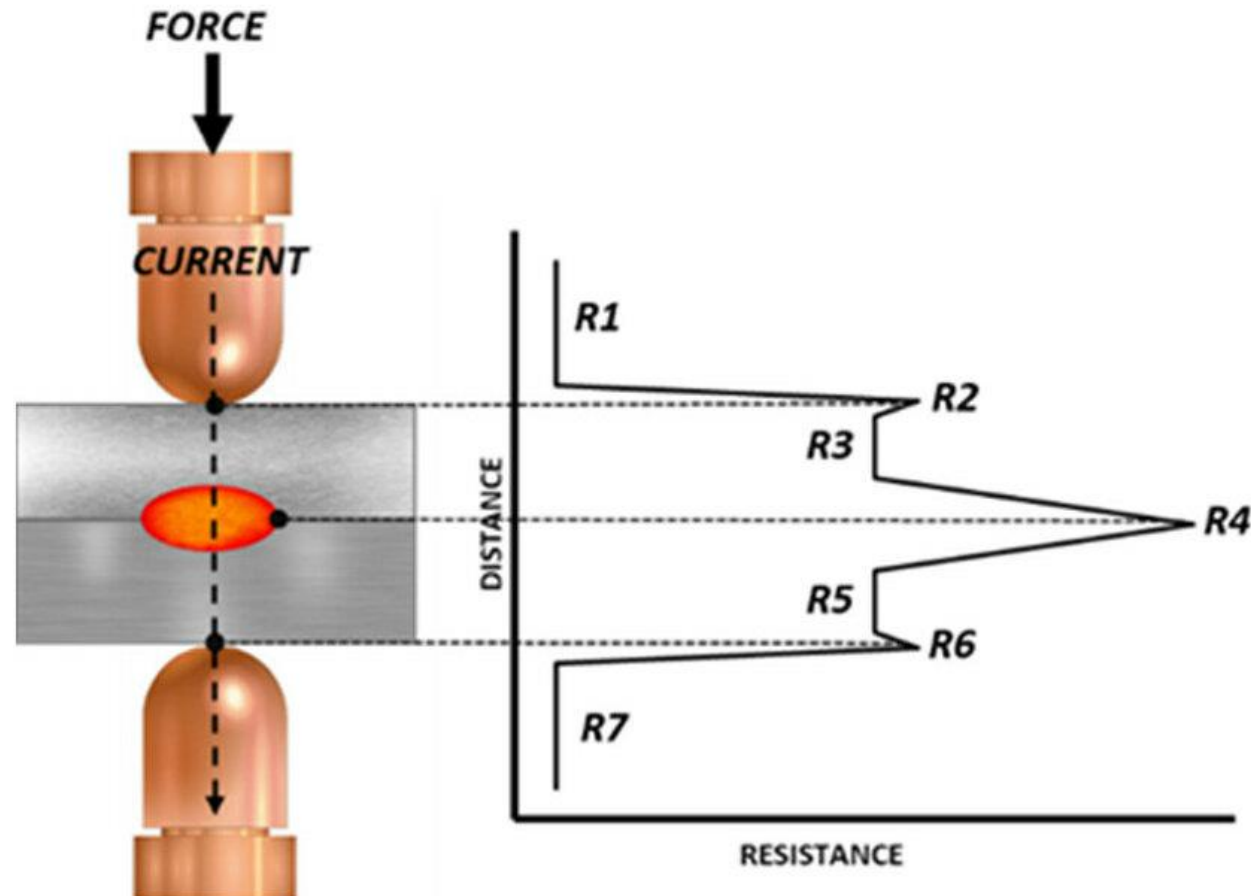
- Κατά την περίοδο της σύνδεσης ασκείται πίεση μέχρι να διαρραγούν επιφανειακά στρώματα οξειδίων
- Έπειτα εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα για να παραχθεί η συγκόλληση
- Ενώ η πίεση ασκούμενη πίεση παραμένει σταθερή ή μειώνεται προοδευτικά
- Η σύνδεση των ελασμάτων προκύπτει από την στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης



Διαδικασία Συγκολλήσεων ηλεκτρικής αντίστασης



Συγκολλήσεις ηλεκτρικής αντίστασης

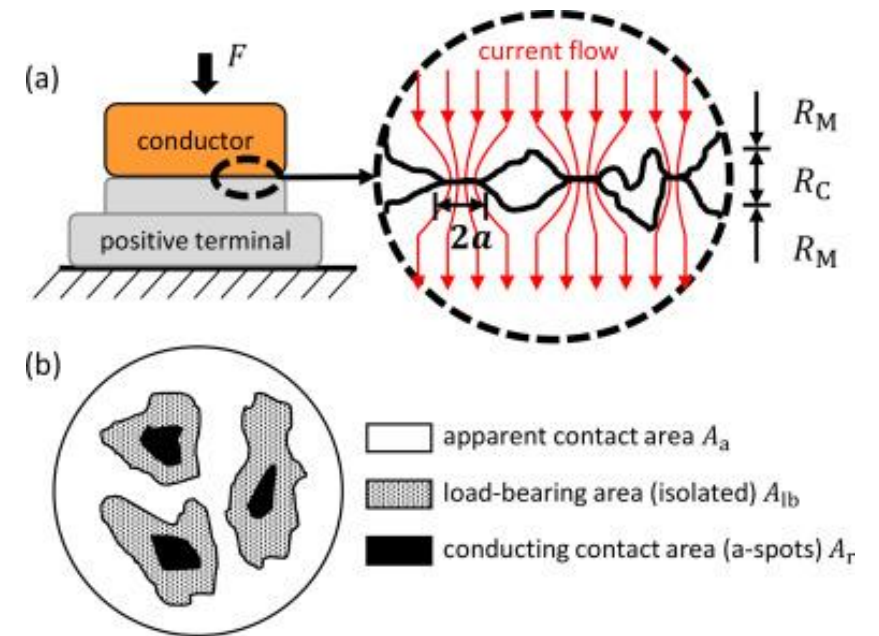
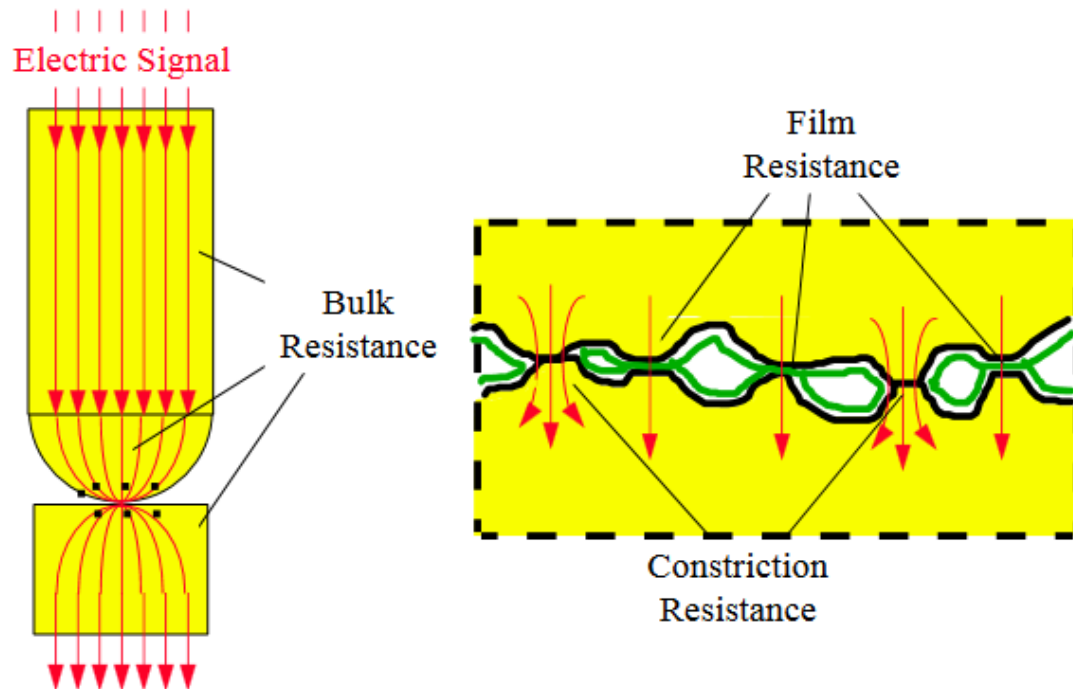


Ηλεκτρική αντίσταση επαφής

- Η ηλεκτρική αντίσταση στην επαφή οφείλεται σε άθροισμα δύο παραγόντων
- Της ηλεκτρικής αντίστασης συστολής της ροής (flow constriction resistance) καθώς και
- Της ηλεκτρικής αντίστασης υμενίου (film resistance)

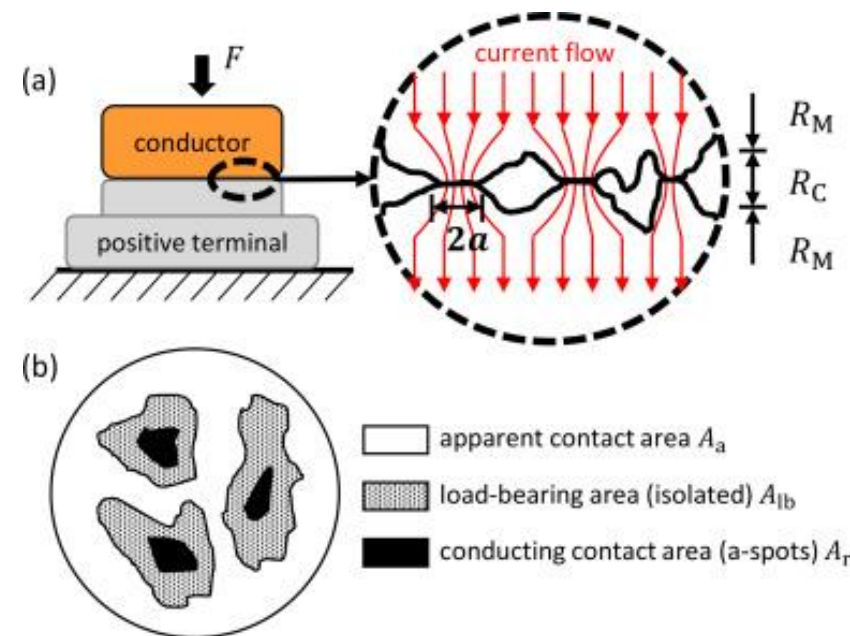
$$R_{inter} = R_{constriction} + R_{film}$$

Ηλεκτρική αντίσταση επαφής



Ηλεκτρική αντίσταση συστολής της ροής

- Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει από το ένα τεμάχιο στο άλλο μέσω εξογκωμάτων που βρίσκονται σε επαφή
- Εκεί το ηλεκτρικό ρεύμα διογκώνεται και έτσι προκαλείται
- Συστολή της ηλεκτρικής ροής με
- Ταυτόχρονη αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης που ονομάζεται ηλεκτρική αντίστασης συστολής της ροής



Ηλεκτρική αντίσταση συστολής της ροής

- Κατά τον Holm που διατύπωσε το φαινόμενο το 1946 όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι αρκετά υψηλή, η θερμότητα αυτή μπορεί να **υπερβεί το σημείο τήξης** του μετάλλου, οδηγώντας σε **τοπική τήξη και συγκόλληση**
- Η ηλεκτρικής αντίσταση συστολής της ροής είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας a του σημείου επαφής

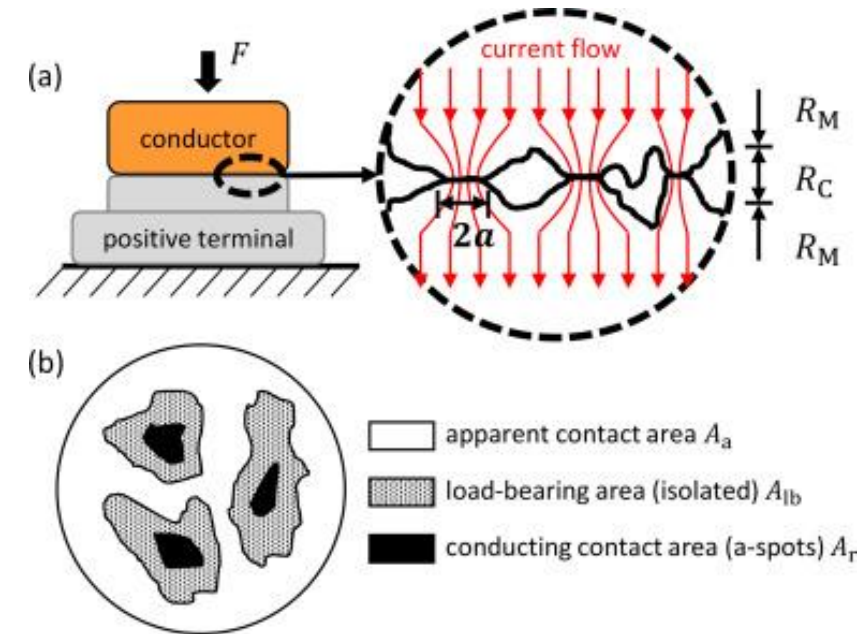
Electric Contacts Theory and Application

By

Ragnar Holm
Ph. D., hon. Dr. Techn.

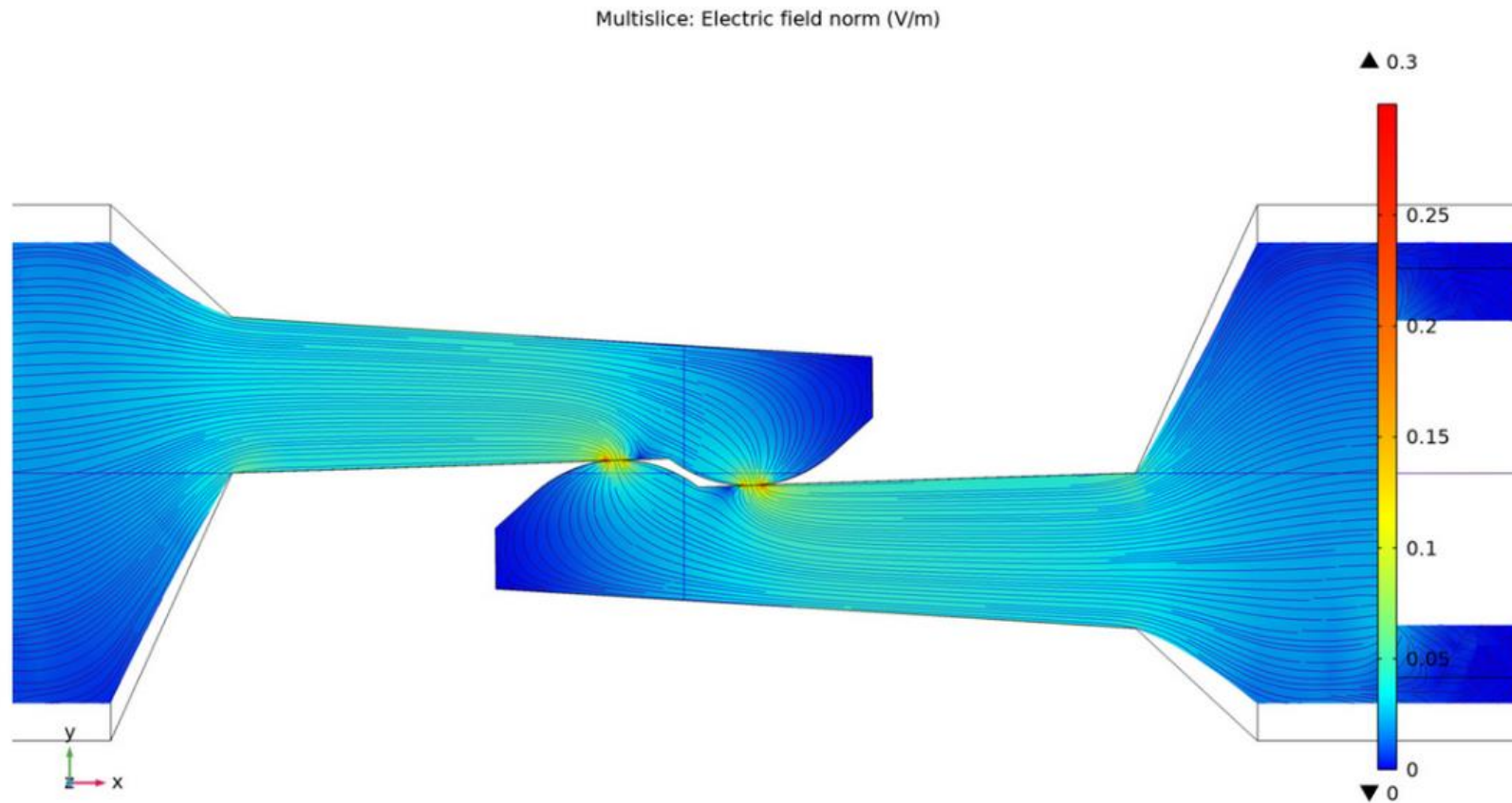
in collaboration with Else Holm Ph. D.
both of St. Marys (Pa.)

$$R_{constriction} = \frac{\rho}{2a}$$



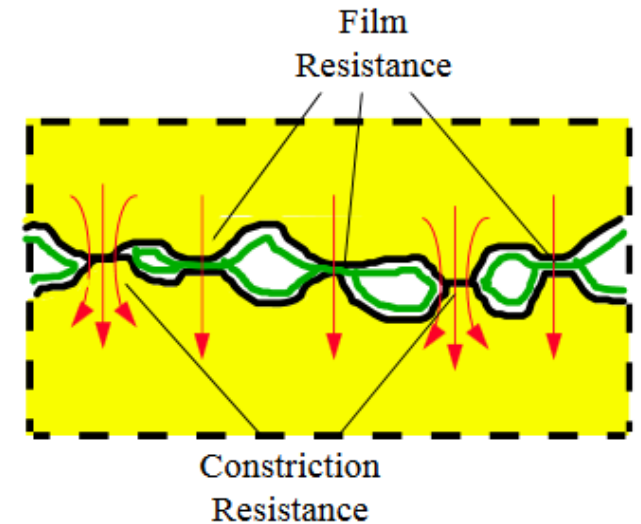
Ηλεκτρική αντίσταση συστολής της ροής

12



Ηλεκτρική αντίσταση υμενίου

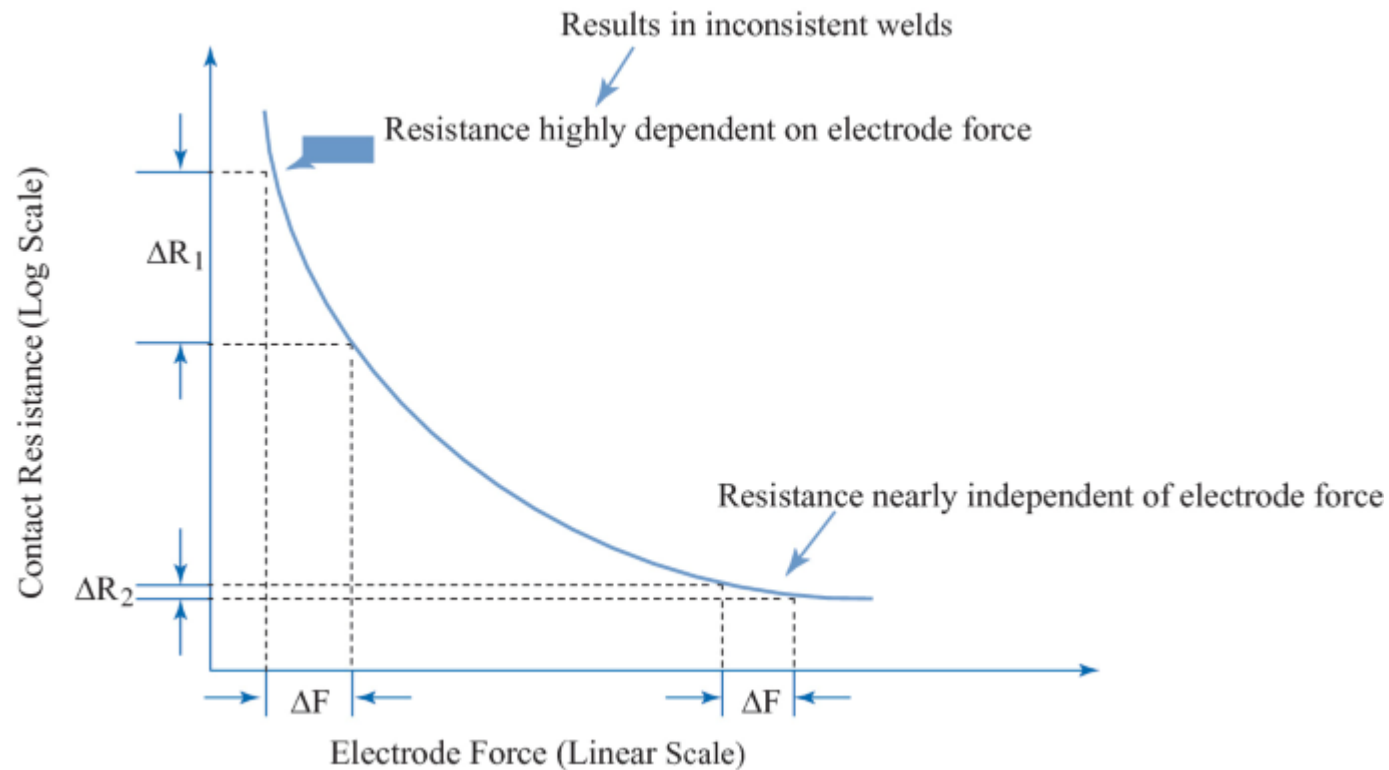
- ❑ Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει από το ένα τεμάχιο στο άλλο μέσω εξογκωμάτων που βρίσκονται σε επαφή
- ❑ Συχνά στην επιφάνεια των εξογκωμάτων υπάρχουν είτε οξείδια προστατευτικές επιστρώσεις
- ❑ Που είτε είναι μη αγώγιμα ή ημι-αγώγιμα
- ❑ Δηλαδή έχουν μια πολύ μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση
- ❑ Η ηλεκτρική αντίσταση αυτή ονομάζεται ηλεκτρική αντίσταση υμενίου



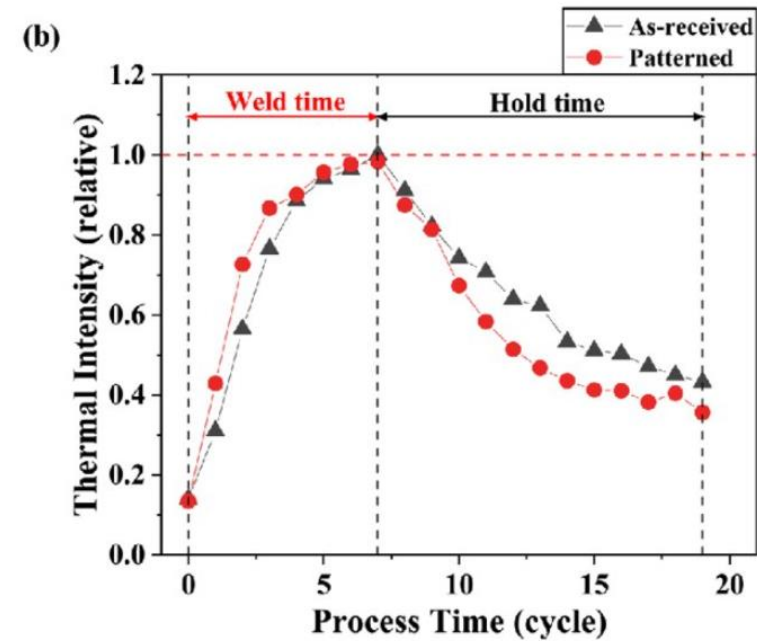
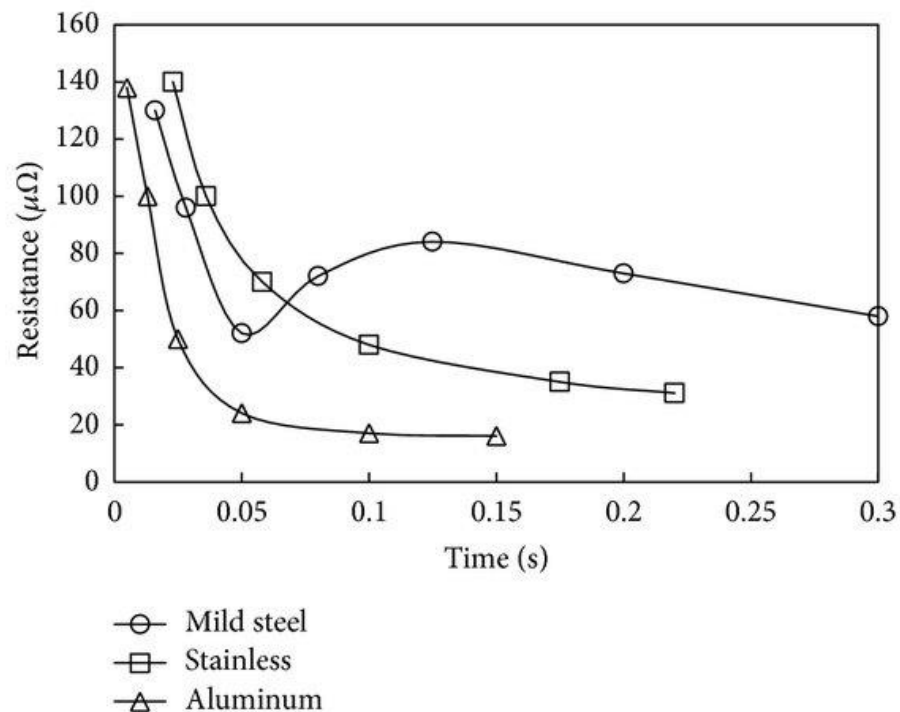
Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στην ηλεκτρική αντίσταση επαφής

- ❑ Με την αύξηση της θερμοκρασίας η αντίσταση συστολής της ροής γίνεται πολύ μεγαλύτερη της αντίστασης υμενίου και γίνεται ο κύριος παράγοντας της αντίστασης επαφής
- ❑ Σε μικρές τιμές πίεσης οι τιμές των αντιστάσεων υμενίου και συστολής της ροής να είναι μεγάλες με την αντίσταση υμενίου να κυριαρχεί, αυξάνοντας τοπικά την παραγόμενη θερμότητα
- ❑ Με την αύξηση της πίεσης τα οξείδια σπάνε και τα στρώματα επικαλύψεις διαλύονται έτσι μειώνεται η αντίσταση υμενίου
- ❑ Ομοίως η αντίσταση συστολής της ροής μειώνεται καθώς αυξάνονται τα σημεία επαφής

Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στην ηλεκτρική αντίσταση επαφής

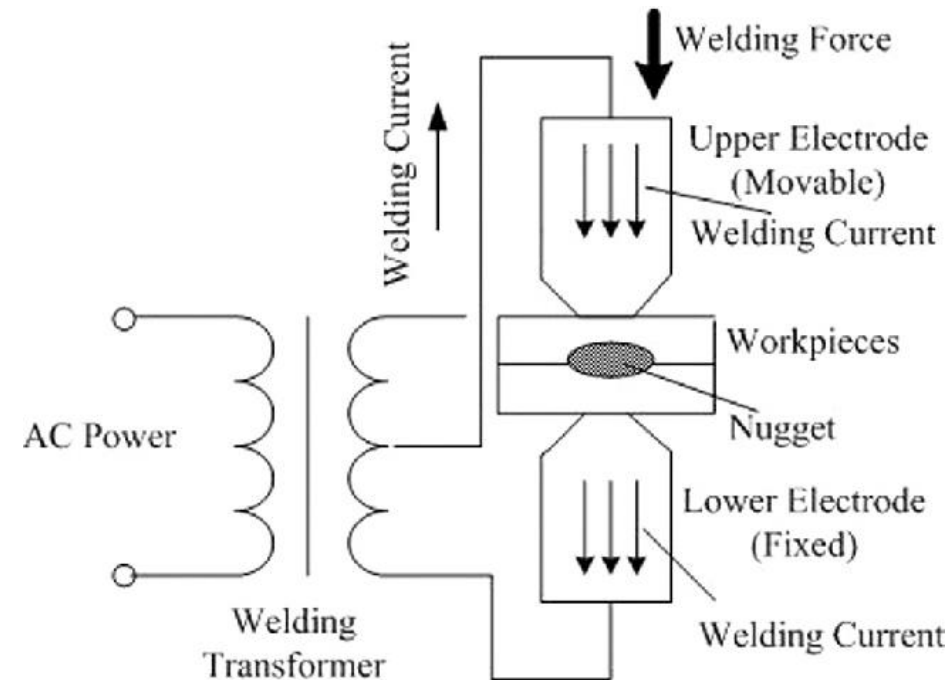


Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στην ηλεκτρική αντίσταση επαφής



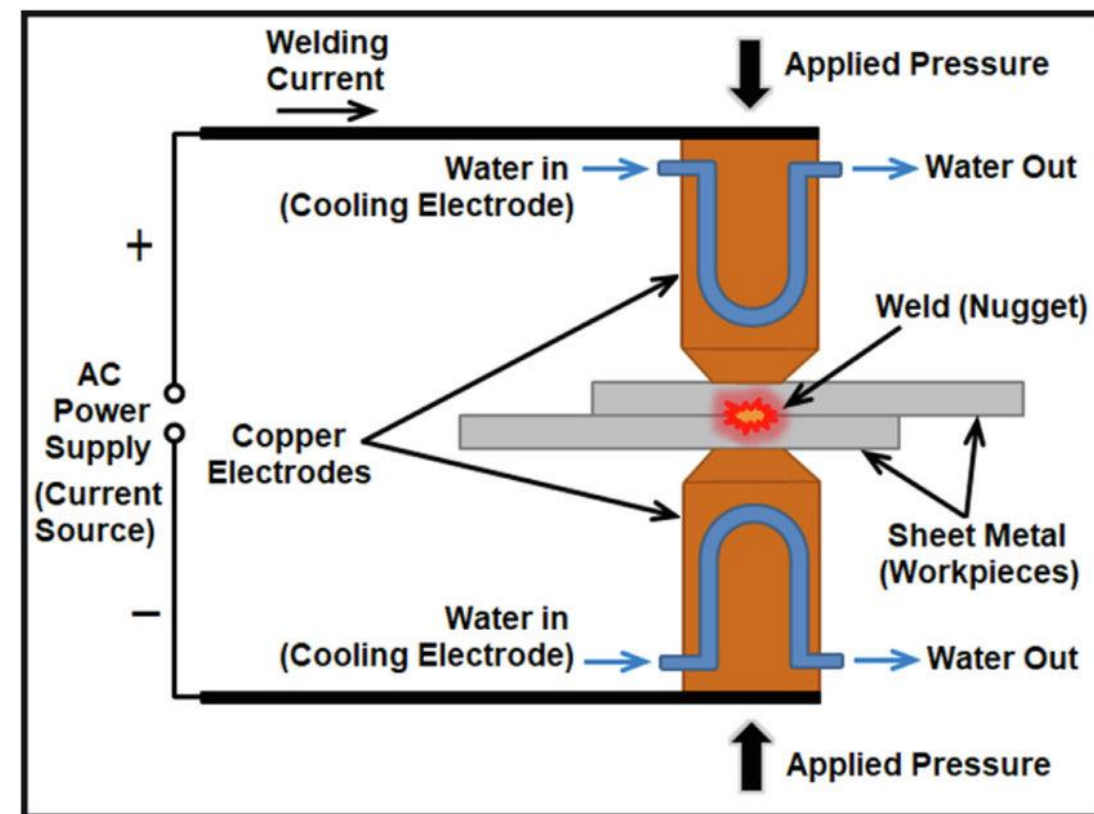
Σημειακές συγκολλήσεις αντίστασης (RSW)

- ❑ Χρήση σε επίπεδα επικαλυμμένα ελάσματα
- ❑ Έχουν αντικαταστήσει τις ηλώσεις στη βιομηχανία
- ❑ Ταχεία και οικονομική μέθοδος
- ❑ Καλή ποιότητα συγκόλλησης



Διαδικασία RSW

- ❑ Τα τεμάχια τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο υδρόψυκτα ηλεκτρόδια, συνήθως από χαλκό
- ❑ Που συγκρατούν τα τεμάχια και παράλληλα διοχετεύουν ηλεκτρικό ρεύμα
- ❑ Λόγω του συστήματος ψύξης η θερμότητα απάγεται στην διεπαφή ηλεκτροδίου – τεμαχίου
- ❑ Όχι όμως και στην διεπαφή των τεμαχίων
- ❑ Τα ηλεκτρόδια συγκρατούν τα τεμάχια έως την ψύξη και στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης



Πλεονεκτήματα RSW

- ❑ Εύκολη, οικονομική και χωρίς απαίτηση εξειδίκευσης συγκόλληση
- ❑ Κατάλληλη για μαζική παραγωγή
- ❑ Η πρόσδοση θερμότητας περιορίζεται τοπικά, έτσι προκύπτουν συγκολλήσεις χωρίς σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις
- ❑ Δεν απαιτεί πληρωτικό υλικό

Μειονεκτήματα RSW

- ❑ Ιδανική για πάχη ελασμάτων έως 3mm
- ❑ Ακριβός και πολύπλοκος εξοπλισμός όταν απαιτείται μαζική παραγωγή
- ❑ Απαιτεί εξειδικευμένους τεχνικούς για την συντήρηση του εξοπλισμού
- ❑ Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση

Συγκολλήσεις αντίστασης ραφής (RSEW)

21

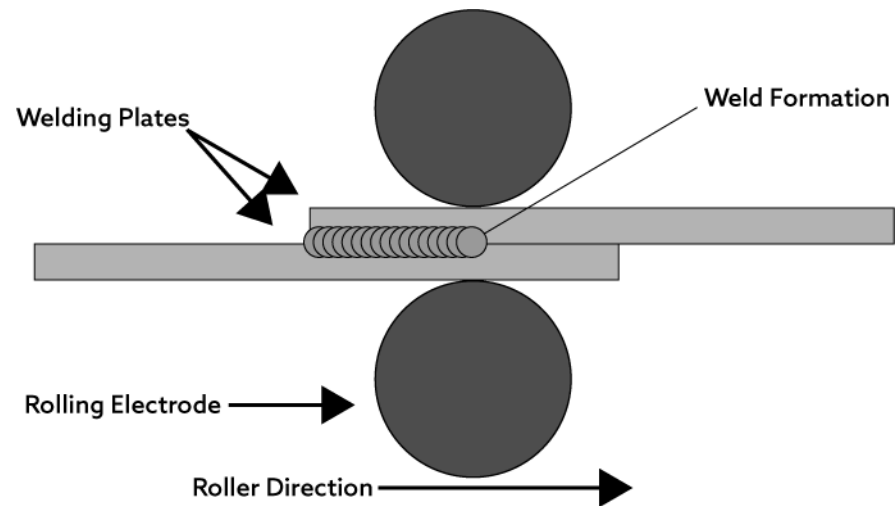
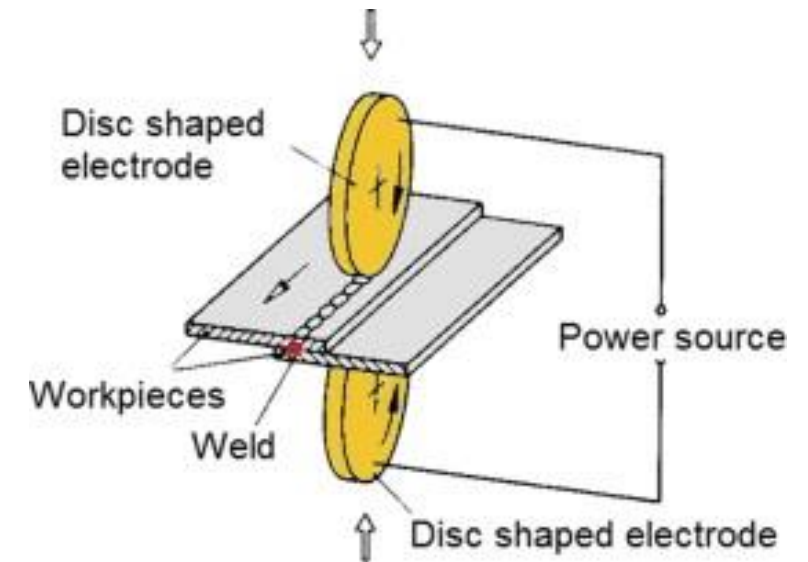
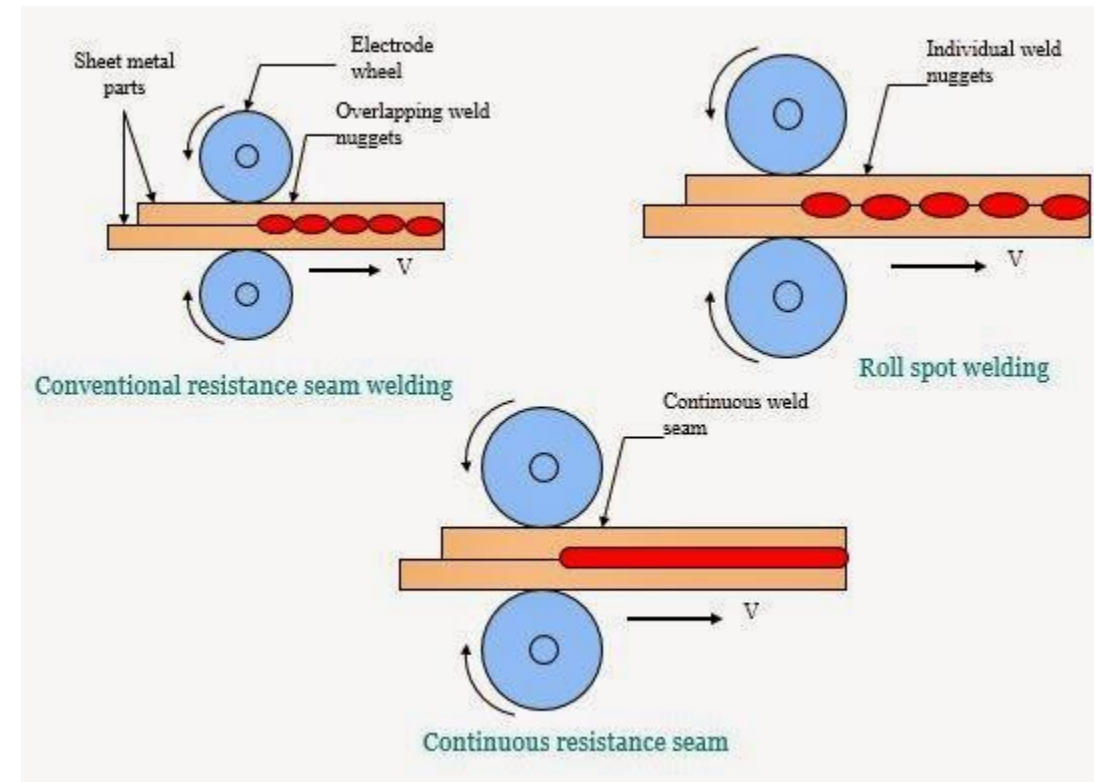


Figure 2: **Seam Welding**



Συγκολλήσεις αντίστασης ραφής (RSEW)

- ❑ Όμοιος μηχανισμός με RSW
- ❑ Τα ηλεκτρόδια περιστρέφονται κατά μήκος των τεμαχίων
- ❑ Έτσι αποτελεί άθροισμα σημειακών συγκολλήσεων αντίστασης
- ❑ Η παροχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να είναι συνεχής ή διακοπτόμενη
- ❑ Χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία, δοχεία νερού, αεροζόλ κ.α.



Πλεονεκτήματα RSEW

- ❑ Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης
- ❑ Αεροστεγής και στεγανές συγκολλήσεις
- ❑ Καλύτερη ποιότητα μετάλλου συγκόλλησης επικαλυμμένου χάλυβα σε σχέση με RSW και με τις συγκολλήσεις με δέσμη Laser

Μειονεκτήματα RSEW

- ❑ Δυνατότητα συγκόλλησης ομοιόμορφων επιφανειών σε ένα μόνο επίπεδο
- ❑ Διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος κατά μήκος της ολοκληρωμένης συγκόλλησης
- ❑ Απαιτείται ψύξη των ηλεκτροδίων καθώς και στη ζώνη συγκόλλησης

Συγκολλήσεις με προεξοχή (RPW)

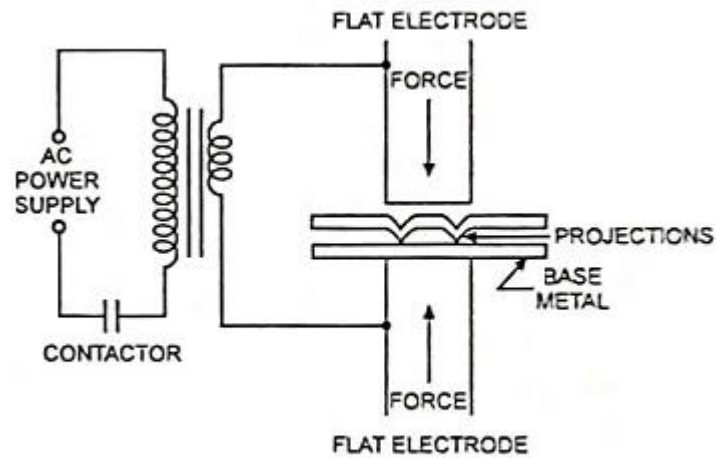
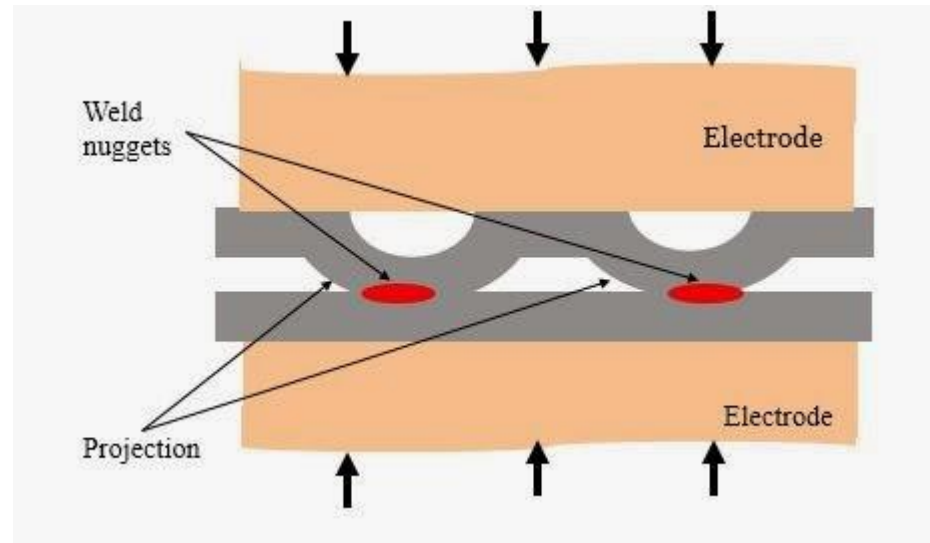


Fig. 6.6. *Projection Welding*



Συγκολλήσεις με προεξοχή (RPW)

- Όμοιος μηχανισμός με RSW
- Η προεξοχή είτε καταρρέει λόγω τήξης είτε λόγω πίεσης

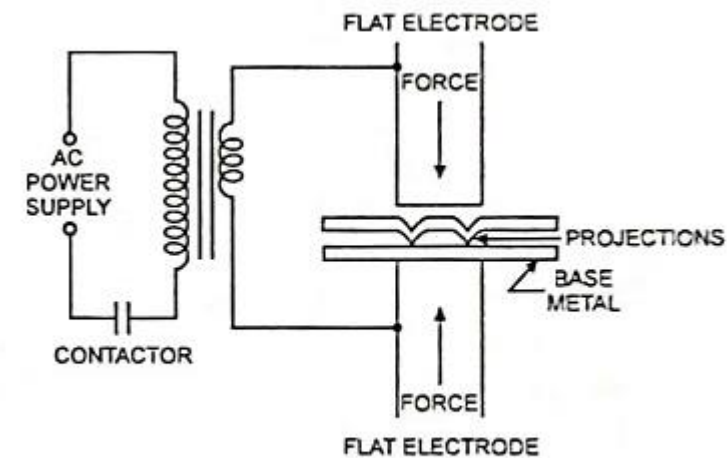


Fig. 6.6. Projection Welding

Πλεονεκτήματα RPW

- ❑ Ιδανική για ελάσματα με δυσκολία συγκόλλησης αλλά και ελάσματα με μεγάλο πάχος
- ❑ Είναι μια αυτοματοποιημένη μέθοδος
- ❑ Δεν απαιτείται πληρωτικό υλικό

Μειονεκτήματα RPW

- ❑ Απαιτείται πρόσθετη εργασία για τον καθορισμό της γεωμετρίας της προεξοχής, καθώς και για την κατασκευή της
- ❑ Δεν είναι κατάλληλη για πολύ λεπτά ελάσματα
- ❑ Ακριβός εξοπλισμός όταν απαιτείται υψηλή δυναμικότητα μαζικής παραγωγής

Συγκολλήσεις αντίστασης με σπινθηρισμούς (FW)

- ❑ Μετωπική συγκόλληση με συνδυασμό τήξης και σφυρηλάτησης
- ❑ Ιδανική για μεγάλες διατομές όπως
- ❑ Αλυσίδες άγκυρας και ράγες
- ❑ Δαχτυλίδια σε κινητήρες α/φών
- ❑ Ανόμοια υλικά

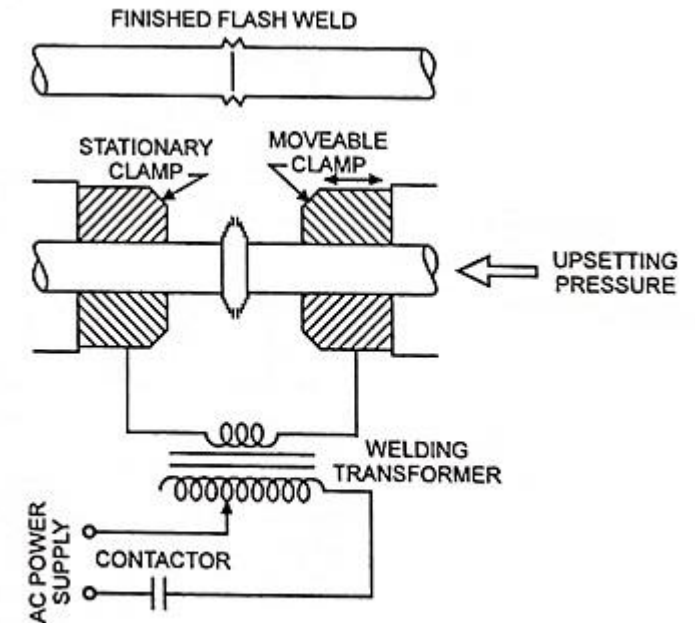
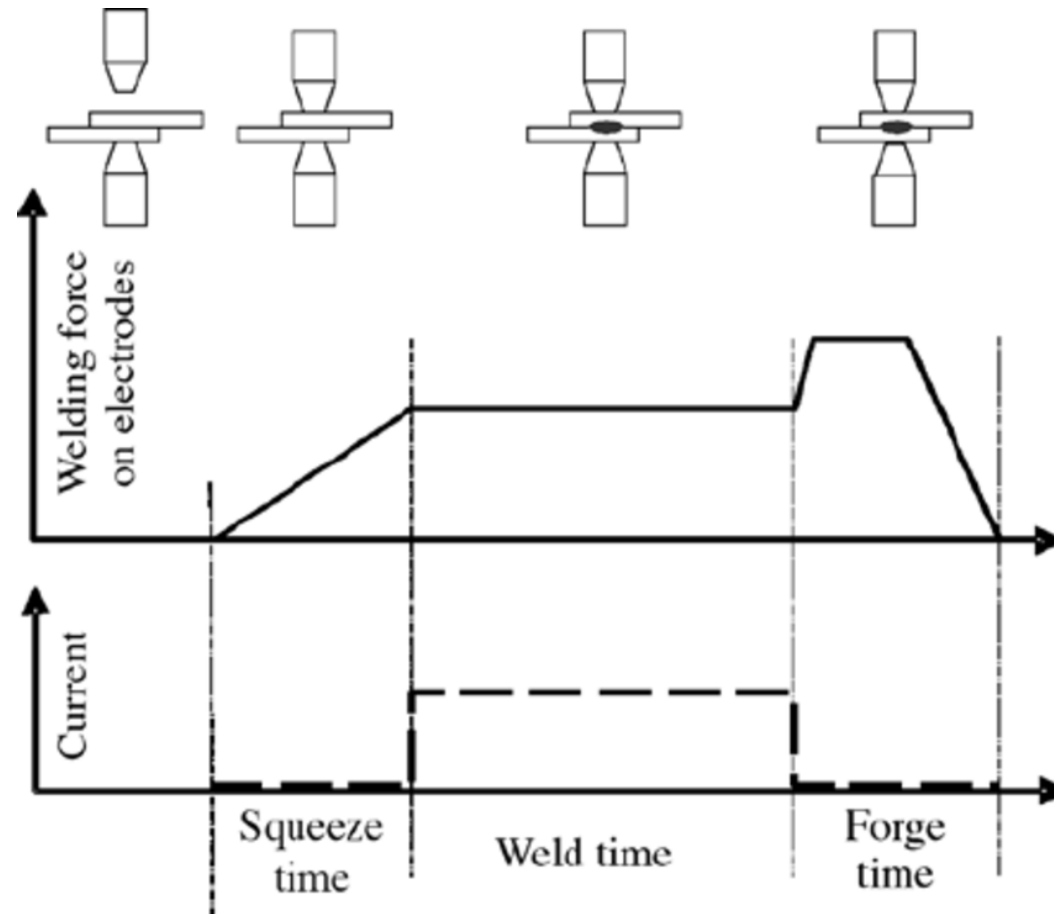


Fig. 6.3. Flash Butt Welding Process

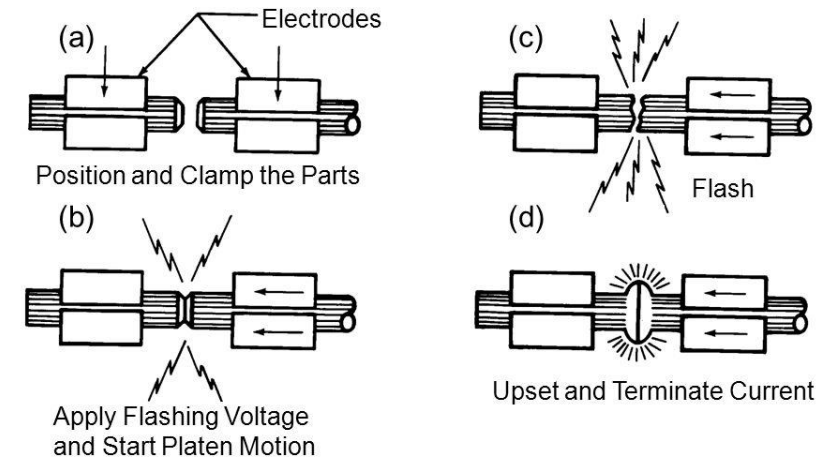
Διαδικασία Συγκολλήσεων ηλεκτρικής αντίστασης



Διαδικασία FW

- ❑ Αρχικά τα τεμάχια προθερμαίνονται με κίνηση μπρος/πίσω ώστε να έρθουν σε επαφή ενώ
- ❑ Ταυτόχρονα διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα
- ❑ Μόλις η θερμοκρασία καταστεί ιδανική για συγκόλληση εφαρμόζεται σταθερή πίεση
- ❑ Όστε τα τεμάχια να βρίσκονται σε επαφή

Basic Steps in Flash Welding

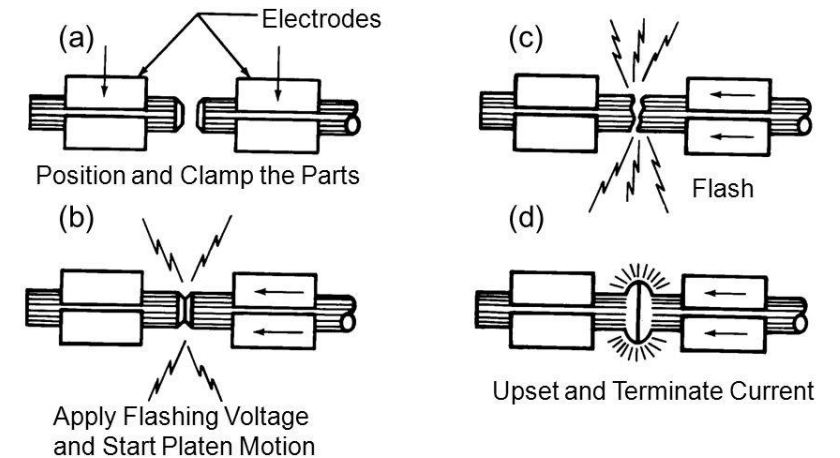


[Reference: Welding Handbook, Volume 2, p.583, AWS]

Διαδικασία FW

- ❑ Έτσι πραγματοποιείται ταχεία τήξη και αεριοποίηση με
- ❑ Ταυτόχρονη συνοδεία σπινθήρων και εκτόξευση υλικού
- ❑ Η ασκούμενη πίεση συνεχίζει να εφαρμόζεται ώστε να εξέλθουν από τη λίμνη συγκόλλησης οξείδια και ρύποι
- ❑ Καθώς ρέουν προς τα έξω

Basic Steps in Flash Welding



[Reference: Welding Handbook, Volume 2, p.583, AWS]

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα FW

- ❑ Γρήγορη και οικονομική συγκόλληση
- ❑ Ποιοτικά βέλτιστες συγκολλήσεις με ίση ή παρόμοια αντοχή με αυτή του μητρικού υλικού
- ❑ Απαιτείται κατάλληλος εξοπλισμός με αντοχή σε υψηλές πιέσεις και δυνάμεις σύσφιξης
- ❑ Απαιτείται επιφανειακή κατεργασία των τεμαχίων πριν τη συγκόλληση
- ❑ Καθώς και ευθυγράμμιση των τεμαχίων

Κρουστικές συγκολλήσεις (PEW)

- ❑ Υλοποιείται καθαρισμός της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση
- ❑ Έπειτα τα τεμάχια στερεώνονται στη μηχανή και εφαρμόζεται ασθενής δύναμη έτσι ώστε να πλησιάσουν τα ελάσματα μεταξύ τους

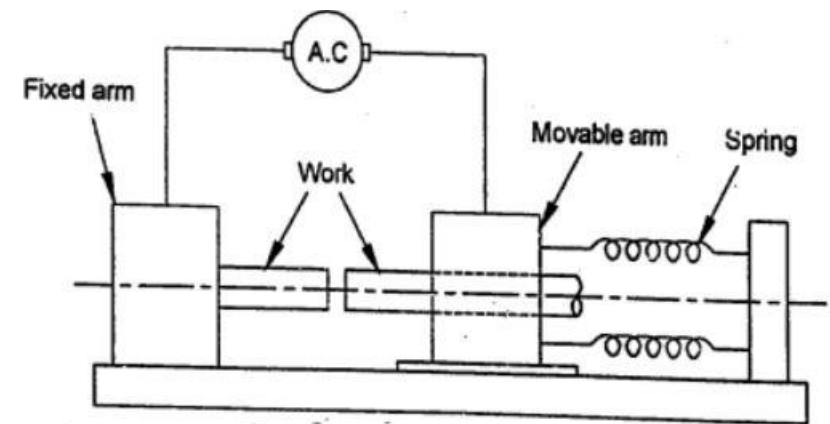


Figure 2.17 Percussion welding

Κρουστικές συγκολλήσεις (PEW)

- ❑ Εφαρμόζεται ρεύμα, και μέσω ταχείας ηλεκτρικής εκκένωσης παράγεται ηλεκτρικό τόξο
- ❑ Ικανό για την πρόσδοση ικανής θερμότητας για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης
- ❑ Αμέσως εφαρμόζεται πίεση ώστε να σβήσει το τόξο
- ❑ Η πίεση εφαρμόζεται μέχρι την ψύξη της λίμνης συγκόλλησης

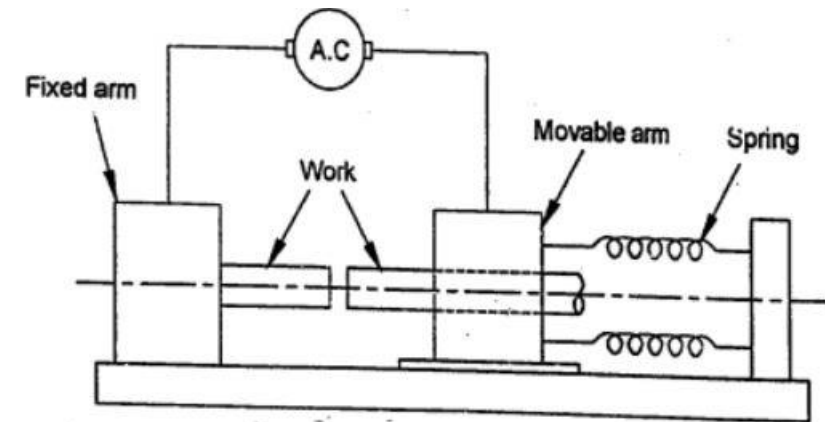


Figure 2.17 Percussion welding

Πλεονεκτήματα PEW

- ❑ Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης
- ❑ Δημιουργεί επιφανειακή τήξη και συνεπώς μικρή ΘΕΖ
- ❑ Δυνατή η πραγματοποίηση συγκόλλησης χωρίς να καταστραφεί προηγούμενη θερμική επιφανειακή κατεργασία
- ❑ Δυνατή η συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων (νικέλιο, αλουμίνιο, χαλκός, άργυρος)

Μειονεκτήματα PEW

- ❑ Πραγματοποίηση μόνο μετωπικών συνδέσεων
- ❑ Απαιτείται επιμελής επιφανειακός καθαρισμός
- ❑ Ιδανική μόνο για συγκολλήσεις μικρών διατομών

Εφαρμογές PEW

- ❑ Λεπτά ελάσματα και μικρά εξαρτήματα όπως πείρους σε αντιστάσεις
- ❑ Στηρίγματα αισθητήρων παρακολούθησης κόπωσης και θραύσης
- ❑ Γενικά χρήση για διάφορα μικρά στηρίγματα

ΜΕΡΟΣ Β

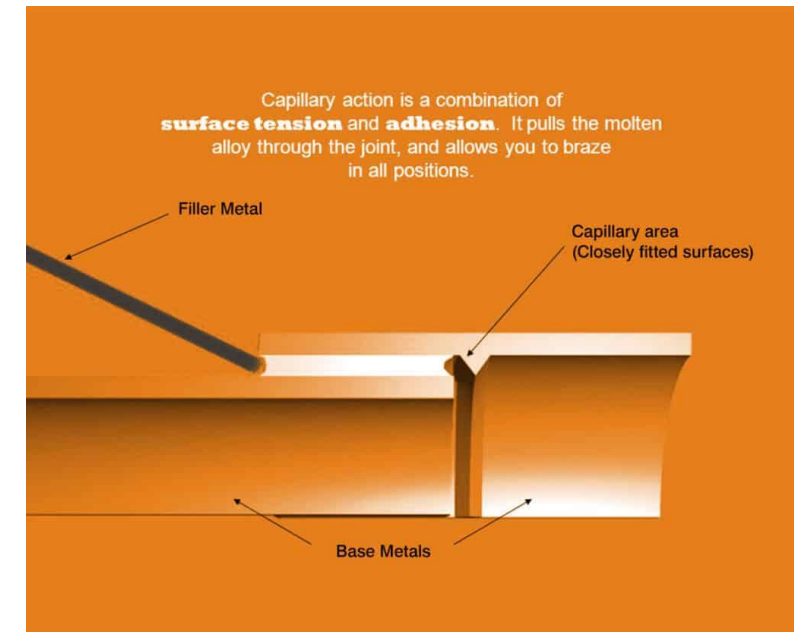
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου

- ❑ Το μητρικό μέταλλο παραμένει σε στερεή κατάσταση
- ❑ Απαιτείται καθαρισμός της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση
- ❑ Προστίθεται πληρωτικό υλικό σε διάφορες μορφές όπως πάστα, σφαίρες, σύρματα, ταινίες, ελάσματα, σταγονίδια κ.α.
- ❑ Το οποίο τήκτεται. Ανάλογα με τη θερμοκρασία διακρίνονται δύο περιπτώσεις:
 - ✓ Χαμηλές θερμοκρασίας (Soldering) όταν $T < 500^{\circ}\text{C}$
 - ✓ Μέσης θερμοκρασίας (Brazing) όταν $500^{\circ}\text{C} < T < 900^{\circ}\text{C}$

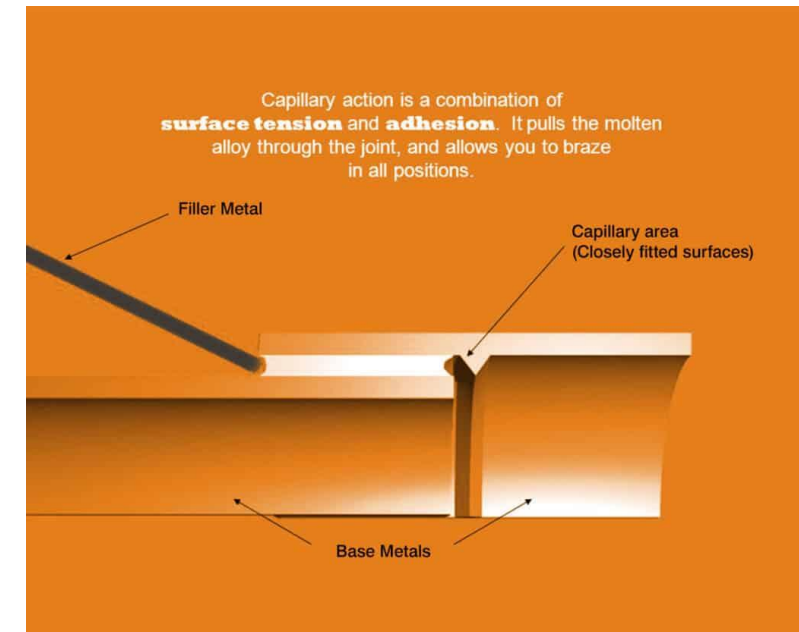
Μηχανισμός Soldering

- ❑ Λόγω τριχοειδούς έλξης το τήγμα πληρωτικού υλικού εισέρχεται στο διάκενο των τεμαχίων
- ❑ Σε Soldering τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πληρωτικού και των τεμαχίων σχηματίζουν μεταλλικό δεσμό (κοινό νέφος ηλεκτρονίων)
- ❑ Συνεπώς ο μηχανισμός Soldering αποτελείται από την τριχοειδή έλξη και τον μεταλλικό δεσμό
- ❑ Έτσι στο μέταλλο συγκόλλησης παρατηρείται συνεχής μετάβαση της σύστασης από πληρωτικό σε μητρικό υλικό



Μηχανισμός Brazing

- ❑ Λόγω τριχοειδούς έλξης το τήγμα πληρωτικού υλικού εισέρχεται στο διάκενο των τεμαχίων
- ❑ Σε Brazing λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας δημιουργείται μια ζώνη διάχυσης των ατόμων του τήγματος πληρωτικού υλικού στον κύριο όγκο των στερεών τεμαχίων
- ❑ Στη ζώνη διάχυσης σχηματίζονται ενδιάμεσες ενώσεις και μεταλλικός δεσμός
- ❑ Συνεπώς ο μηχανισμός Brazing αποτελείται από την τριχοειδή έλξη, την διάχυση και τον μεταλλικό δεσμό
- ❑ Έτσι στο μέταλλο συγκόλλησης παρατηρείται συνεχής μετάβαση της σύστασης από πληρωτικό σε μητρικό υλικό

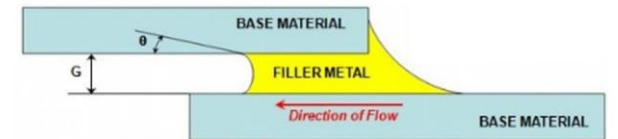
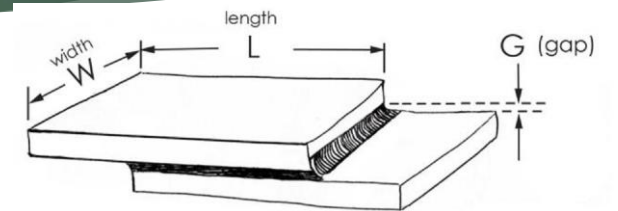


Τριχοειδής έλξη

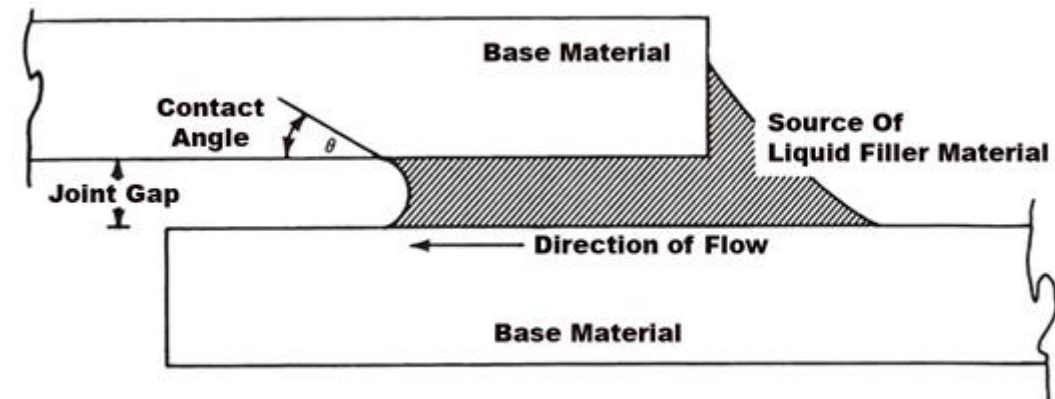
Λόγω του μικρού διάκενου G μεταξύ των τεμαχίων:

- Η γωνιά διαβροχής θ των τεμαχίων από το πληρωτικό υλικό είναι μικρή
- Καθώς και η επιφανειακή τάση μεγαλώνει, εφόσον η επιφάνεια είναι καθαρή από οξείδια
- Προκαλώντας αναρρόφηση του τήγματος πληρωτικού στο διάκενο μεταξύ των τεμαχίων

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{G / 2}$$

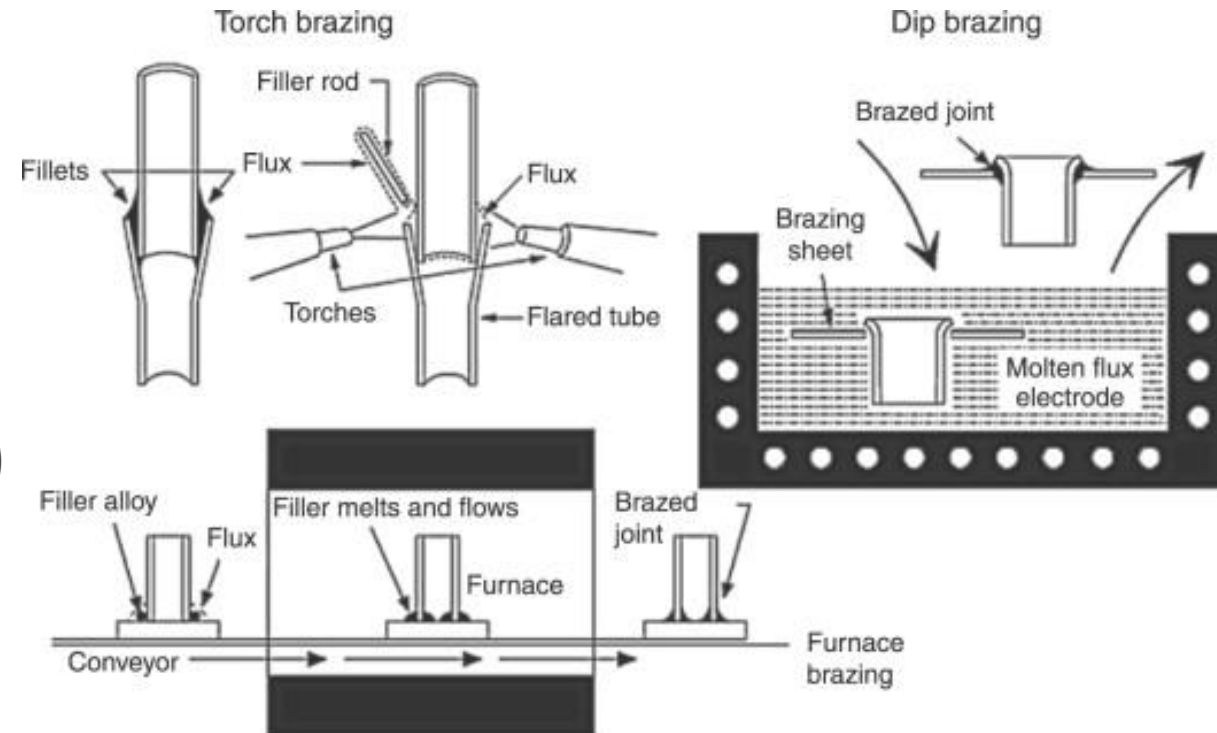


G: JOINT CLEARANCE (GAP)



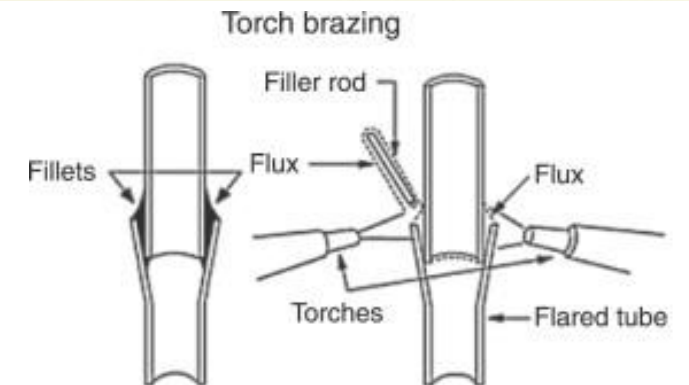
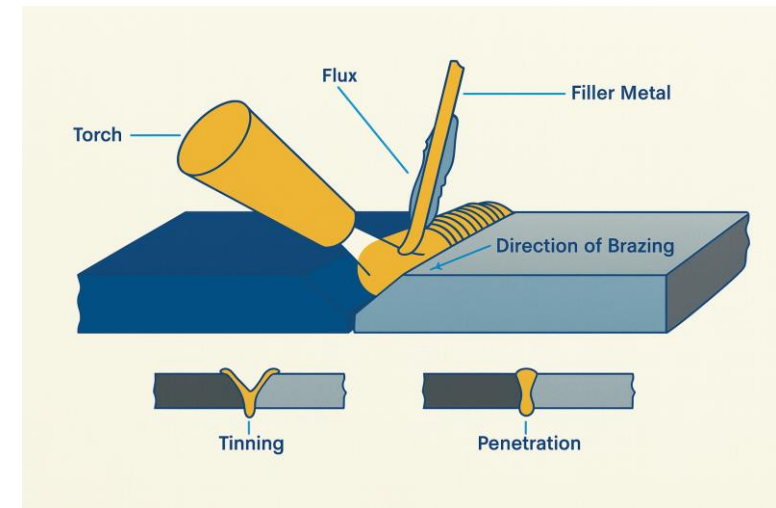
Μηχανισμοί πρόσδοσης θερμότητας

- ❑ Με φλόγα
- ❑ Σε φούρνο
- ❑ Με εμβάπτιση
- ❑ Με ηλεκτρική αντίσταση
- ❑ Με επαγωγή (επαγωγικό κύκλωμα με πηνίο)
- ❑ Υπέρυθρη ακτινοβολία (Brazing)
- ❑ Δέσμη Laser (Soldering)



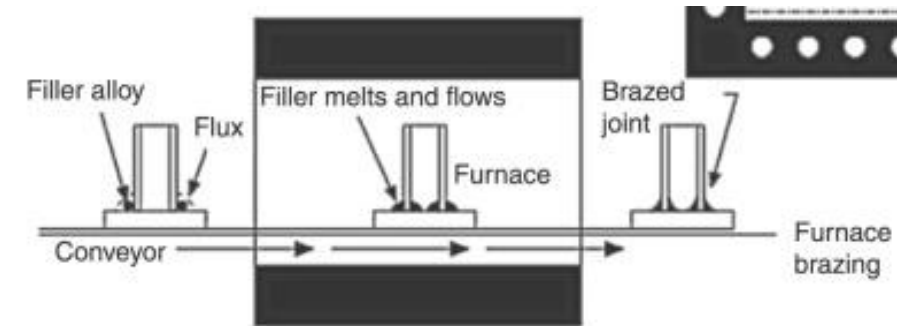
Πρόσδοση θερμότητας με φλόγα

- ❑ Χρήση καμινέτου ή ακροφυσίου οξυγονοκόλλησης
- ❑ Το πληρωτικό υλικό είτε προστίθεται πριν την έναρξη της συγκόλλησης ή
- ❑ Τροφοδοτείται σταδιακά
- ❑ Στην δεύτερη περίπτωση προστίθεται και σκόνη συλλιπάσματος για την προστασία της συγκόλλησης απ' τον ατμοσφαιρικό αέρα και την βελτίωση των ιδιοτήτων τήξης του πληρωτικού υλικού
- ❑ Απαιτείται καθαρισμός των οξειδίων μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης



Πρόσδοση θερμότητας με φούρνο

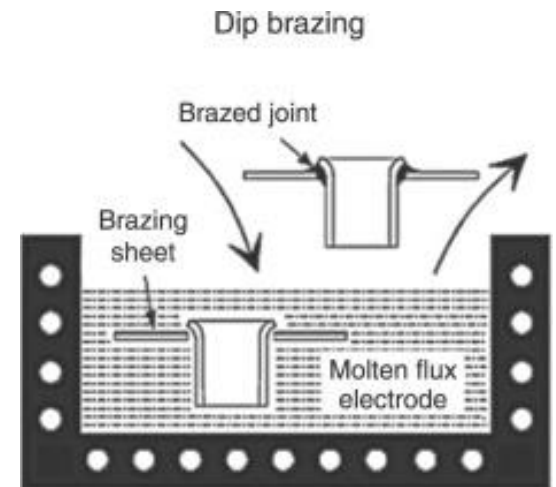
- ❑ Απαιτείται τοποθέτηση του πληρωτικού υλικού πριν την είσοδο των τεμαχίων στο φούρνο
- ❑ Η λειτουργία του φούρνου μπορεί να είναι συνεχής ή διακοπτόμενη
- ❑ Πρόκειται για μια αυτοματοποιημένη μέθοδο
- ❑ Που όμως παρουσιάζει μεγάλο κόστος
- ❑ Αλλά και μεγάλη ΘΕΖ
- ❑ Προστατευτικά ενεργά ή αδρανή αέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διεργασία συγκόλλησης στον φούρνο



Πρόσδοση θερμότητας με εμφάπτιση

Υπάρχουν 2 τύποι εμφάπτισης:

- ❑ Εμφάπτιση σε λουτρό αλάτων
 - ✓ Απαιτείται η προ-τοποθέτηση του πληρωτικού υλικού
 - ✓ Παρέχει προστασία από την οξείδωση
- ❑ Εμφάπτιση σε λουτρό τηγμένου μετάλλου
 - ✓ Το τηγμένο μέταλλο είναι το πληρωτικό υλικό
 - ✓ Φθηνή μέθοδος για μικρά τεμάχια
 - ✓ Παρέχοντας ισχυρές συνδέσεις, με λίγες παραμένουσες παραμορφώσεις
 - ✓ Απαιτείται συγκράτηση των τεμαχίων κατά την αφαίρεση από το λουτρό έως την πλήρη στερεοποίηση του πληρωτικού υλικού



Πληρωτικά υλικά

- ❑ Σε Brazing η βάση των πληρωτικών υλικών αποτελείται από χαλκό και ψευδάργυρο με μικρή περιεκτικότητα σε άργυρο κασίτερο και νικέλιο. Έτσι ανάλογα με τη σύσταση τους οι συγκολλήσεις χαρακτηρίζονται ως
 - ❑ Μπρουτζοκολλήσεις με $Ag < 8\%$
 - ❑ Ασιμοκολλήσεις με $Ag > 8\%$
- ❑ Σε Soldering τα υλικά βάσης αποτελούν ο κασσίτερος, αλλά και ο μόλυβδος, ο άργυρος, το αντιμόνιο, το ίνδιο και το βισμούθιο.
- ❑ Κατά βάση σε Soldering συναντιούνται κασσιτεροκολλήσεις.

Εφαρμογές συγκολλήσεων συνδετικού μέσου

- ❑ Συγκολλήσεις χαλκού σε σωληνώσεις χάλυβα σε συστήματα ψύξης – κλιματισμού
- ❑ Σε ποδήλατα και μέρη αυτοκινήτου (με φλόγα)
- ❑ Σε δοχεία κενού, κινητήρες jet, συστήματα πυρηνικής τεχνολογίας (σε φούρνο)
- ❑ Σε συστήματα α/φών (με επαγωγή)
- ❑ Σε ιατρικά εργαλεία (Υπέρυθρη ακτινοβολία)
- ❑ Σε κατασκευές σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα (Υπέρυθρη ακτινοβολία)
- ❑ Σε θερμαντικά σώματα και ψυγεία (Soldering)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Brazing

- ❑ Κατάλληλη για μεγάλο πάχος και μήκος ελασμάτων
- ❑ Κατάλληλη για σύνθετες διαμορφώσεις και ανομοιογενή μέταλλα με διαφορετικό πάχος
- ❑ Κατάλληλη για πορώδη μεταλλικά εξαρτήματα
- ❑ Κατάλληλη για τη συγκόλληση μετάλλων με αμέταλλα
- ❑ Εφαρμόζεται μόνο σε καθαρές επιφάνειες
- ❑ Η παρατεταμένη θέρμανση μεγάλων περιοχών καταστρέφει προηγούμενες θερμικές επιφανειακές κατεργασίες

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Soldering

- ❑ Απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας (θερμότητας) σε σχέση με Brazing
- ❑ Δημιουργούνται συνδέσεις με καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- ❑ Συνδέσεις χαμηλής αντοχής, επομένως δεν εφαρμόζονται σε κατασκευές υπό υψηλή τάση ή/και θερμοκρασία

ΜΕΡΟΣ Γ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΗΣ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Συγκολλήσεις στερεής κατάστασης

- ❑ Το μητρικό μέταλλο παραμένει σε στερεή κατάσταση
- ❑ Λόγω πλαστικής παραμόρφωσης δημιουργείται κρυσταλλική μεταλλουργική σύνδεση, μέσω άσκησης πίεσης
- ❑ Διακρίνονται 3 μεγάλες κατηγορίες:
 - ✓ Εν ψυχρώ, με πλαστική παραμόρφωση
 - ✓ Εν θερμώ, με πλαστική παραμόρφωση
 - ✓ Εν θερμώ, χωρίς πλαστική παραμόρφωση

Συγκολλήσεις στερεής κατάστασης

- ❑ Η απουσία τήξης συνεπάγεται και απουσία ΘΕΖ
- ❑ Χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων
- ❑ Απαιτεί ιδιαίτερη προετοιμασία και εξειδικευμένο εξοπλισμό, που συχνά δεν είναι αυτοματοποιημένος
- ❑ Απαιτεί καθαρισμό της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση
- ❑ Η επιθεώρηση τέτοιων συγκολλήσεων είναι πολύ δύσκολη
- ❑ Πρακτικά αδύνατη η διόρθωση σφαλμάτων της

Συγκολλήσεις εν ψυχρώ με πλαστική παραμόρφωση

- ❑ Υλοποιούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ❑ Τουλάχιστον το ένα υλικό των δύο τεμαχίων απαιτείται να χαρακτηρίζεται από υψηλή ολκιμότητα
- ❑ Χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων
- ❑ Απαιτεί καθαρισμό της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση

Συγκολλήσεις πίεσης εν ψυχρώ (CPW)

Μηχανισμός σύνδεσης

- ❑ Προκύπτει λόγω της στενής επαφής των μετάλλων η οποία οφείλεται στην μεγάλης πλαστική παραμόρφωση τους
- ❑ Έτσι δημιουργείται κοινό νέφος ηλεκτρονίων, δηλαδή μεταλλικός δεσμός
- ❑ Τοπικά λόγω υπερθέρμανσης μπορεί να προκληθεί διάχυση ατόμων σε περιορισμένο βαθμό, άρα και ανακρυστάλλωση.
- ❑ Όμως ο κύριος μηχανισμός σύνδεσης είναι ο μεταλλικός δεσμός

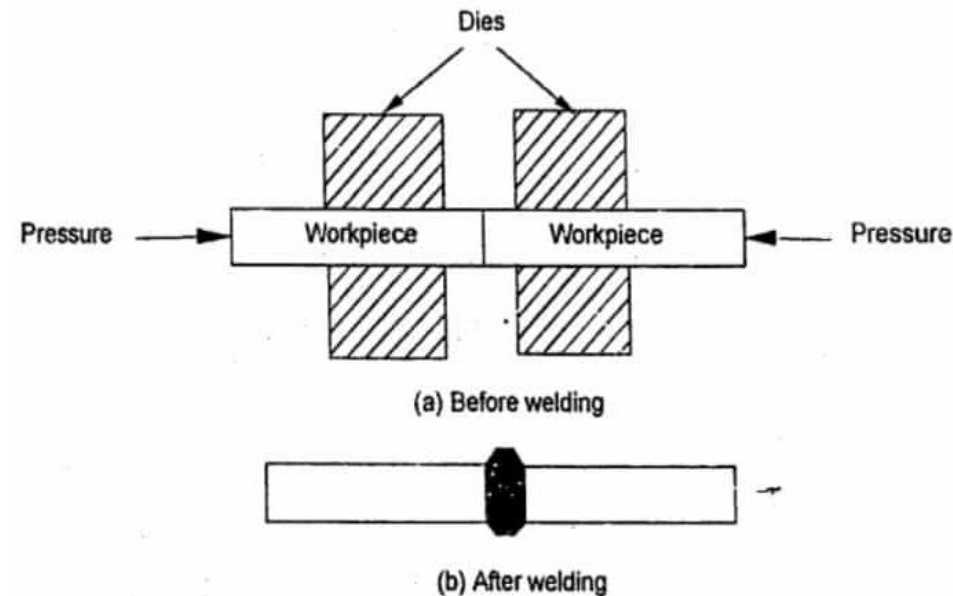


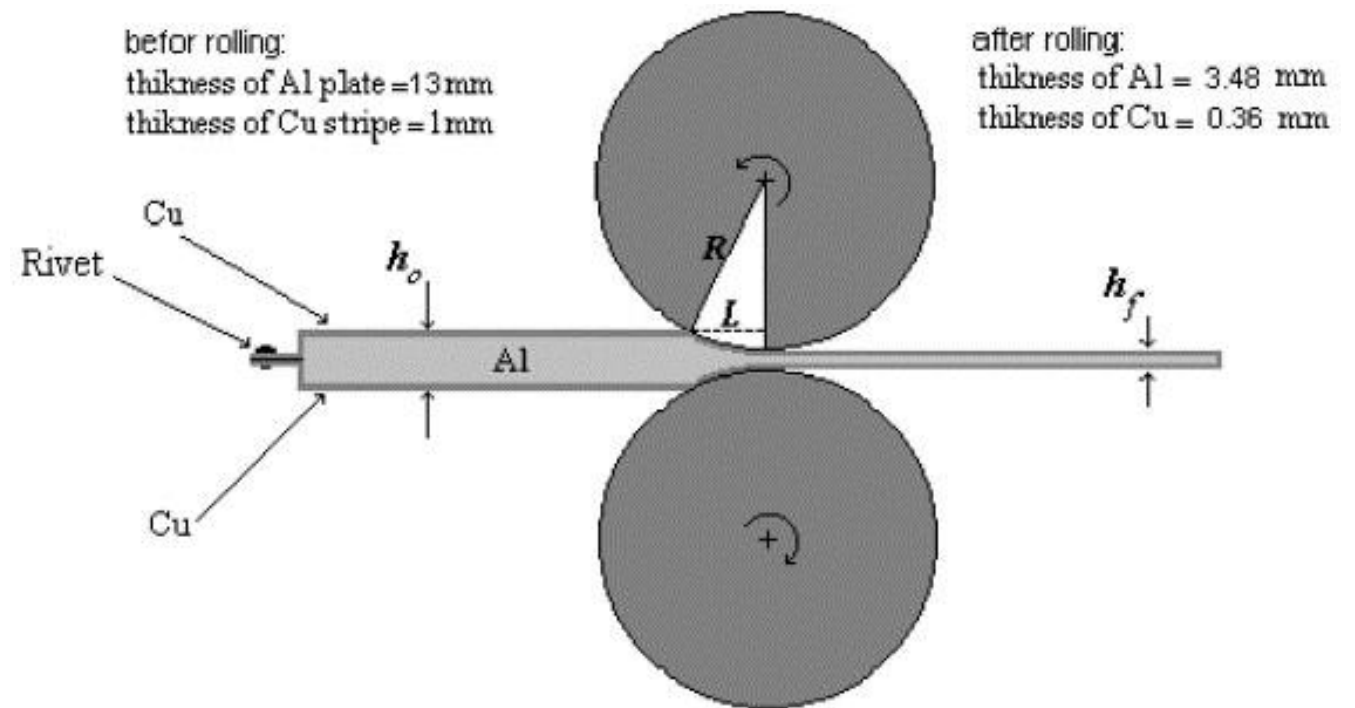
Figure 3.2 Cold welding

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα CPW

- ❑ Εύκολη υλοποίηση χωρίς πολύπλοκο και ακριβό εξοπλισμό
- ❑ Εφαρμογή σε συνδυασμούς μετάλλων που παρουσιάζουν είτε δυσκολία συγκόλλησης ή μη συγκολλησιμότητα
- ❑ Χρήση μόνο σε λείες επιφάνειες
- ❑ Χρήση κυρίως σε ενώσεις αλουμινίου και χαλκού με ανοξείδωτο χάλυβα και τιτάνιο σε
- ❑ Συνδέσεις καλωδίων Al, ηλεκτρολυτικών κελίων και εναλλακτών θερμότητας

Συγκολλήσεις με έλαση (RW)

- Όμοιος μηχανισμός σύνδεσης με CPW
- Απαιτείται ευθυγράμμιση των τεμαχίων



Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα RW

- ❑ Δυνατότητα συγκόλληση πολύπλοκων διαμορφώσεων
- ❑ Χρήση θήκης για την προστασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- ❑ Μεγάλο κόστος προετοιμασίας όταν χρησιμοποιείται θήκη
- ❑ Ακατάλληλη για τεμάχια με μεγάλο μήκος

Εφαρμογές RW

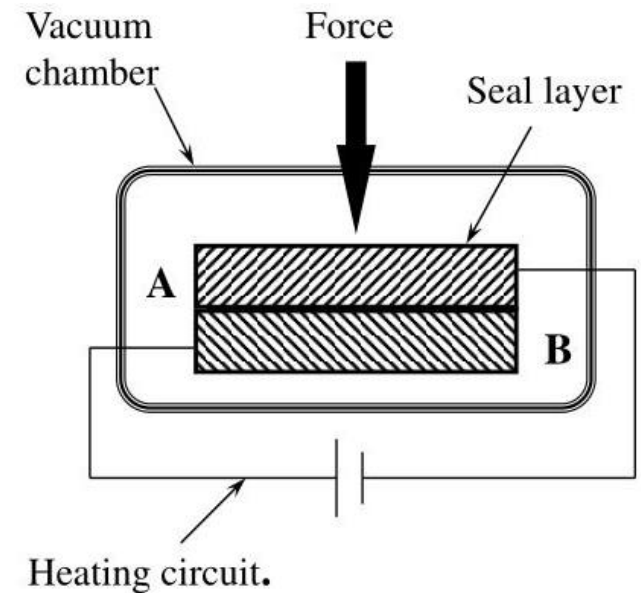
- ❑ Πιεστικά δοχεία και ψυκτικές εγκαταστάσεις
- ❑ Συστήματα α/φών
- ❑ Νομίσματα Cu-Ni και κοσμήματα
- ❑ Σύρματα

Συγκολλήσεις εν θερμώ με πλαστική παραμόρφωση

- ❑ Παροχέτευση θερμότητας, χωρίς τήξη και εφαρμογή πίεσης
- ❑ Ένωση των τεμαχίων που βρίσκονται σε στενή επαφή λόγω της έντονης πλαστικής παραμόρφωσης
- ❑ Δεν απαιτεί πληρωτικό υλικό
- ❑ Υλοποίηση υπό κενό ή με χρήση προστατευτικών αερίων
- ❑ Χρησιμοποιείται συνήθως στην αεροδιαστημική και στην πυρηνική ενέργεια

Συγκολλήσεις πίεσης εν θερμώ (HPW)

- ❑ Θέρμανση σε μέση θερμοκρασία $T < 0.5 T_m$, όπου T_m η θερμοκρασία τήξης
- ❑ Λόγω της θέρμανσης παρατηρείται διάχυση των ατόμων στη διεπιφάνεια των τεμαχίων
- ❑ Σε περιοχές με υψηλή πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται η πυκνότητα δυστοκιών και η ελεύθερη ενέργεια λόγω της αποθήκευσης ενέργεια παραμόρφωσης
- ❑ Έτσι σε αυτές τις περιοχές δημιουργείται μεταλλουργική σύνδεση με ανακρυστάλλωση



Ανακρυστάλλωση

- ❑ Σε περιοχές με υψηλή πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται η πυκνότητα δυστοκιών και η ελεύθερη ενέργεια λόγω της αποθήκευσης ενέργεια παραμόρφωσης
- ❑ Έτσι σε αυτές τις περιοχές δημιουργούνται πυρήνες νέων κόκκων
- ❑ Οι οποίοι αναπτύσσονται εις βάρος των παραμορφωμένων μέσω της διάχυσης των ατόμων τοπικά.
- ❑ Έως ότου αντικαθιστούν πλήρως την παραμορφωμένη περιοχή.
- ❑ Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ανακρυστάλλωση
- ❑ Η οποία ελαχιστοποιεί την ελεύθερη ενέργεια δημιουργώντας υλικά σε θερμοδυναμική ισορροπία

Πλεονεκτήματα HPW

- ❑ Δεν απαιτεί εξειδίκευση
- ❑ Παράγει συγκολλήσεις καλής ποιότητας, χωρίς σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις
- ❑ Είναι αυτοματοποιημένη μέθοδος
- ❑ Κατάλληλη για τεμάχια με περίπλοκη γεωμετρία

Μειονεκτήματα HPW

- ❑ Μεγάλο κόστος εξοπλισμού
- ❑ Απαιτεί καλό καθαρισμό της επιφάνειας πριν τη συγκόλληση
- ❑ Απαιτεί ειδική ατμόσφαιρα συγκόλλησης
- ❑ Χρονοβόρα και άρα ακατάλληλη για μαζική παραγωγή

Συγκόλληση με θερμή σφυρηλασία (HF)

- ❑ Σφυρηλασία για την εδραίωση των προς συγκόλληση τεμαχίων
- ❑ Θέρμανση σε 0.8 – 0.9 Tm
- ❑ Σφυρηλασία για την δημιουργία πλαστικής παραμόρφωσης, και την συγκόλληση των τεμαχίων
- ❑ Χρήση για την κατασκευή χειροποίητων αλυσίδων, πλαισίων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.



Συγκόλληση
με θερμή
σφυρηλασία

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HF

- ❑ Φθηνή, καλής ποιότητας συγκόλληση χωρίς την απαίτηση εξειδίκευσης
- ❑ Συγκόλληση πολύπλοκων εξαρτημάτων
- ❑ Έντονη χειρωνακτική εργασία και άρα αργός ρυθμός παραγωγής
- ❑ Που περιορίζει το μέγεθος των εφαρμοζόμενων δυνάμεων
- ❑ Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του συγκολλητή

Συγκόλληση δια τριβής (FRW)

- ❑ Ανάπτυξη θερμοκρασίας δια τριβής
- ❑ Εφαρμόζεται σε βαλβίδες ΜΕΚ, άξονες και πτερύγια σε τουρμπίνες, πιεστικά δοχεία κ.α.
- ❑ Οι σημαντικότερες τεχνικές αποτελούν τις
 - ✓ Συγκολλήσεις με περιστροφή συνεχούς οδήγησης ή με αδρανεια
 - ✓ Συγκολλήσεις με ανάδευση

Μηχανισμός μεταλλουργικής σύνδεσης σε υψηλές θερμοκρασίες

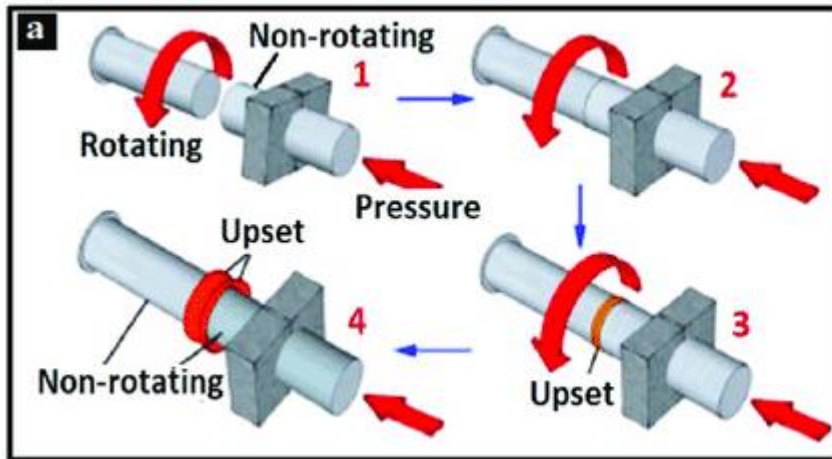
- ❑ Σε εύρος θερμοκρασιών $0.8-0.9T_m$ (HF) και $0.7 - 0.9T_m$ (FRW)
- ❑ Αυξάνεται δραματικά η πυκνότητα δυστοκιών
- ❑ Λόγω της θερμότητας λαμβάνει χώρα τοπική διάχυση των ατόμων και πυρογέννεση νέων κόκκων σε περιοχές με υψηλή ενέργεια παραμόρφωσης
- ❑ Οι νέοι κόκκοι αναπτύσσονται δυναμικά, ενώ η πλαστική παραμόρφωση συνεχίζει να υφίσταται.
- ❑ Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται δυναμική ανακρυστάλλωση

Μηχανισμός μεταλλουργικής σύνδεσης σε υψηλές θερμοκρασίες

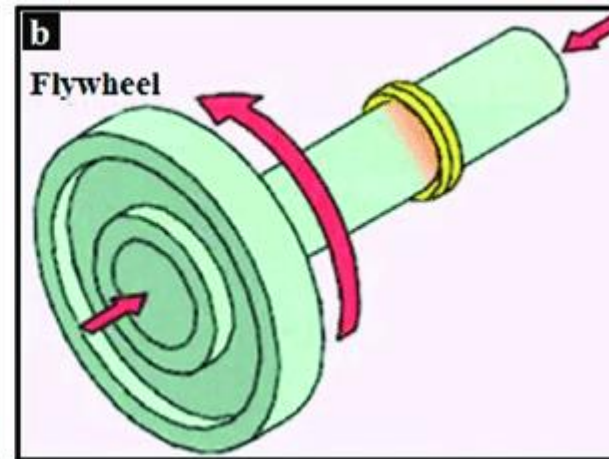
- ❑ Λόγω της δυναμικής ανακρυστάλλωσης
- ❑ «Γεφυρώνεται» η διεπιφάνεια των τεμαχίων και εξαφανίζεται το όριο μεταξύ τους
- ❑ Προκύπτει λεπτόκοκκη και ενιαία μικροδομή μετάλλου συγκόλλησης

Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή

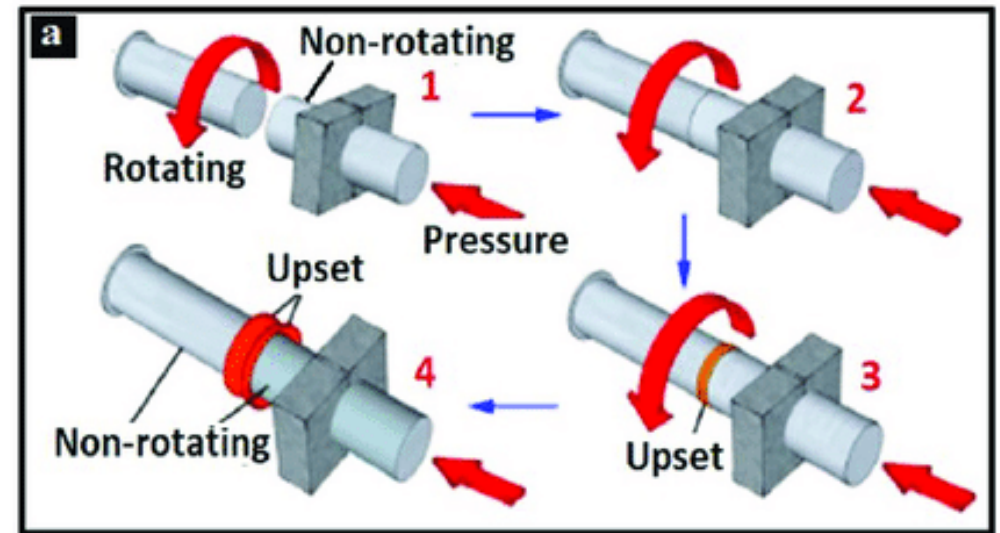
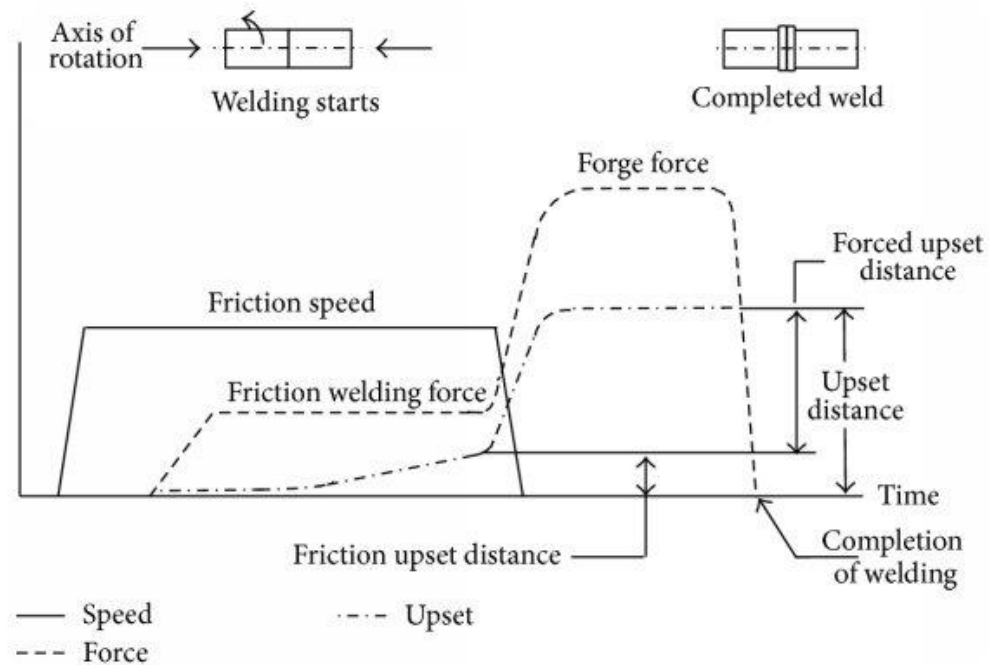
Συνεχούς οδήγησης



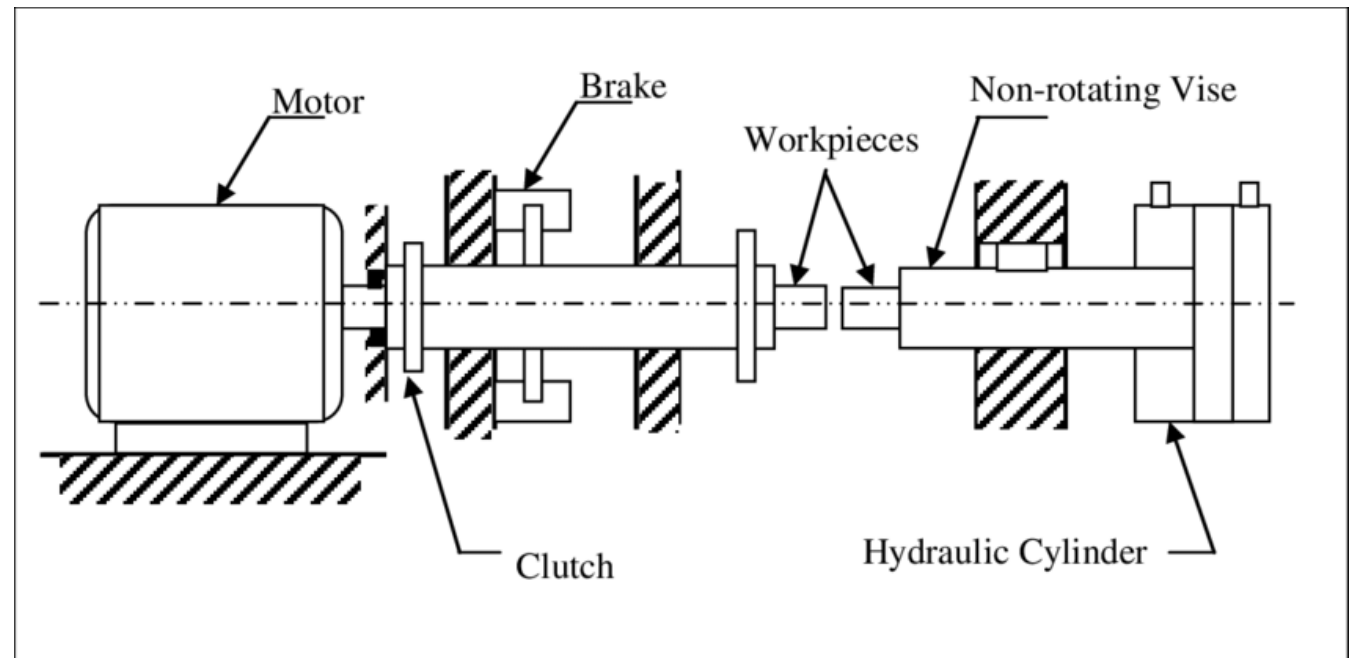
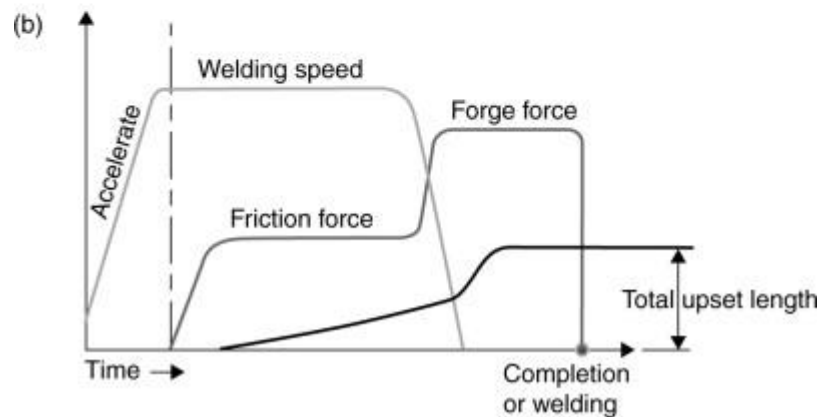
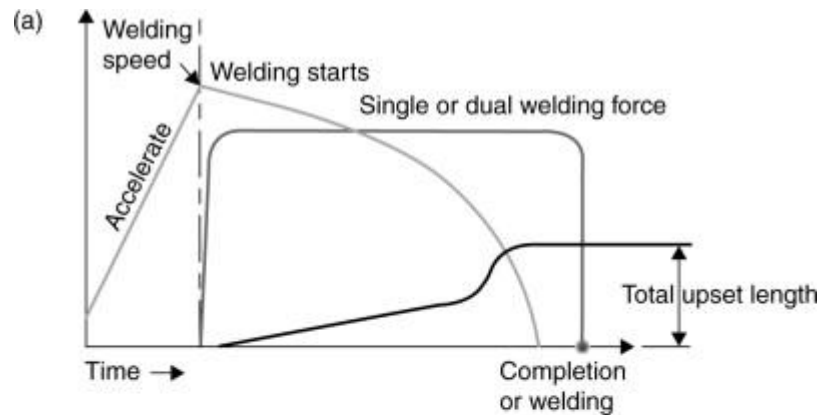
Με αδράνεια



Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή συνεχούς οδήγησης

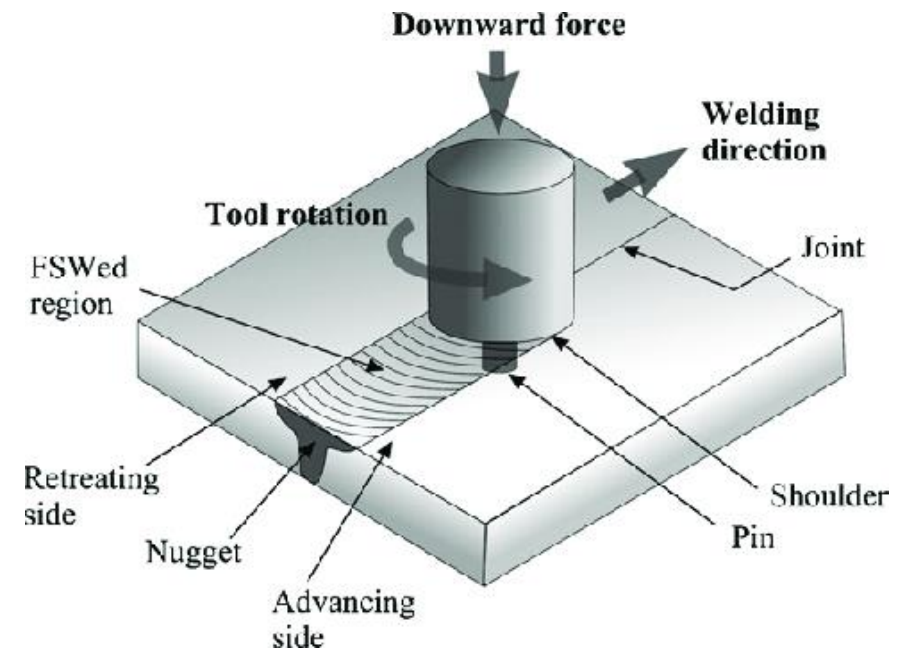


Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή με αδράνεια



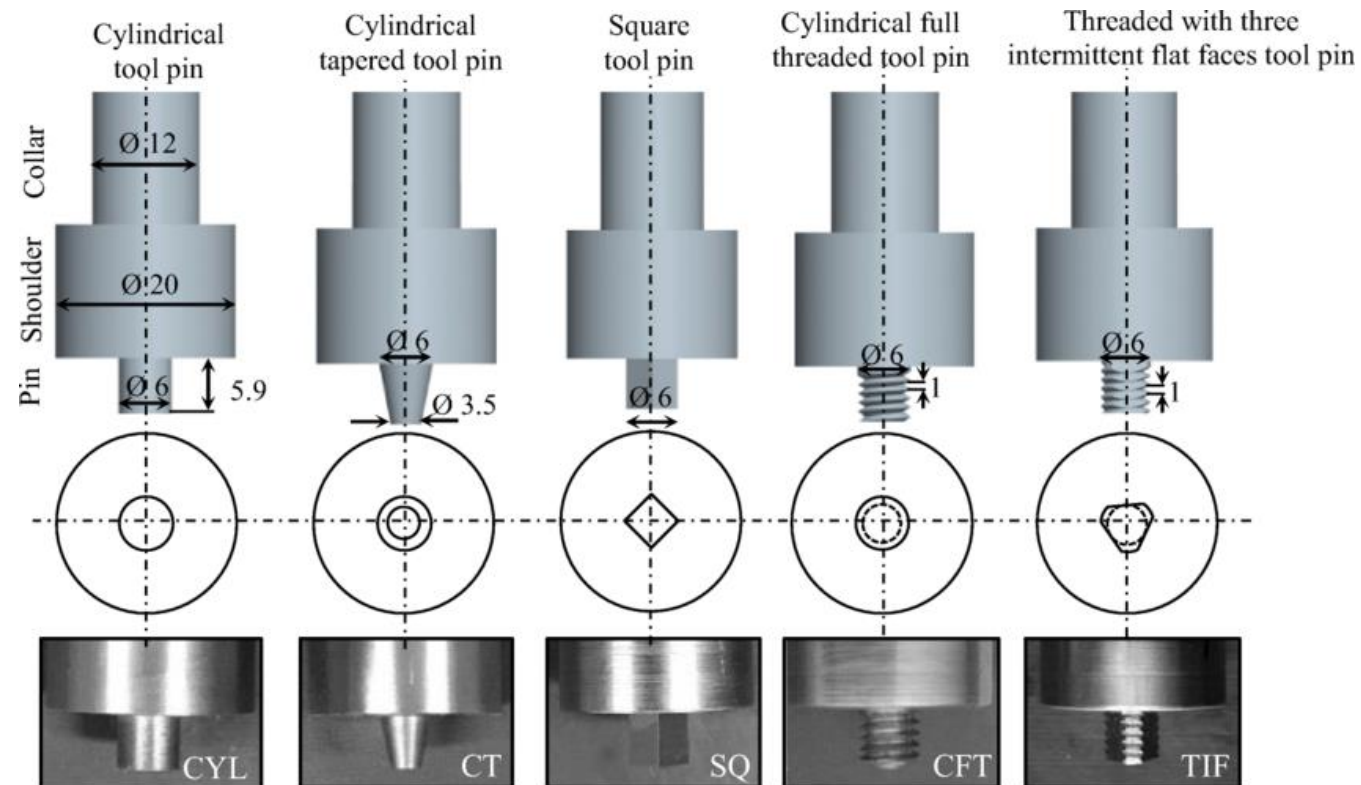
Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW)

- ❑ Ανάπτυξη θερμοκρασίας δια τριβής
- ❑ Το εργαλείο της συγκόλλησης θερμαίνει τα τεμάχια και βοηθά στη ροή υλικού
- ❑ Από αυτό εξαρτάται:
 - ❑ Η ποιότητα της συγκόλλησης
 - ❑ Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα συγκόλλησης
 - ❑ Η παραγωγή θερμότητας



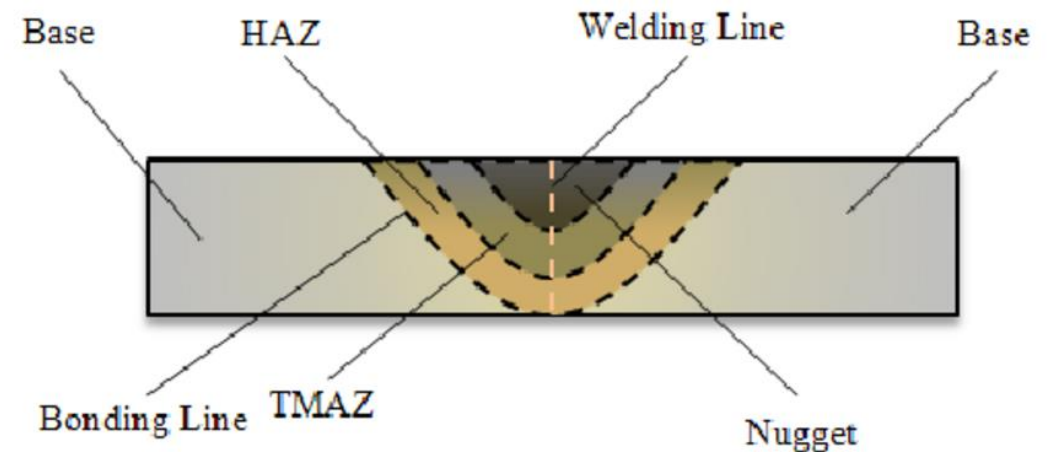
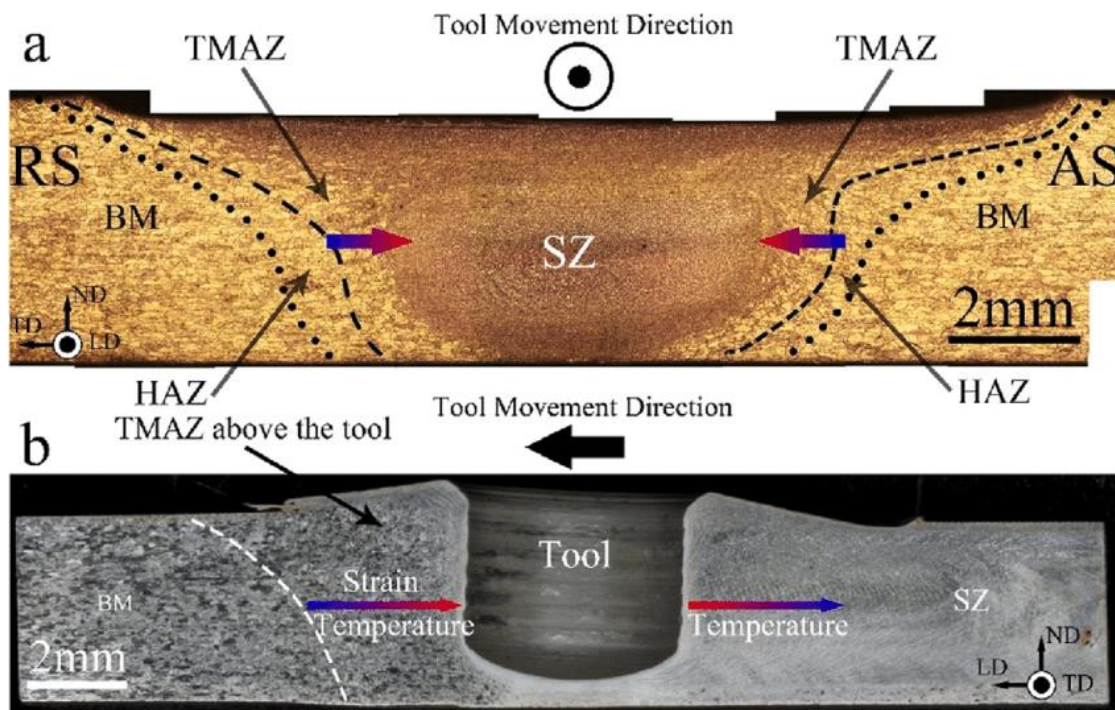
Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW)

76



Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW)

77



Πλεονεκτήματα FSW

- ❑ Χρήση σε ανόμοια μέταλλα
- ❑ Δεν απαιτεί επιφανειακή κατεργασία πριν και μετά τη συγκόλληση
- ❑ Πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης με ομοιόμορφη κοκκομετρία και μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις
- ❑ Δεν εμφανίζει ρωγμάτωση
- ❑ Μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση
- ❑ Χαμηλό κόστος εκπαίδευσης προσωπικού αλλά και καταναλισκόμενης ενέργειας

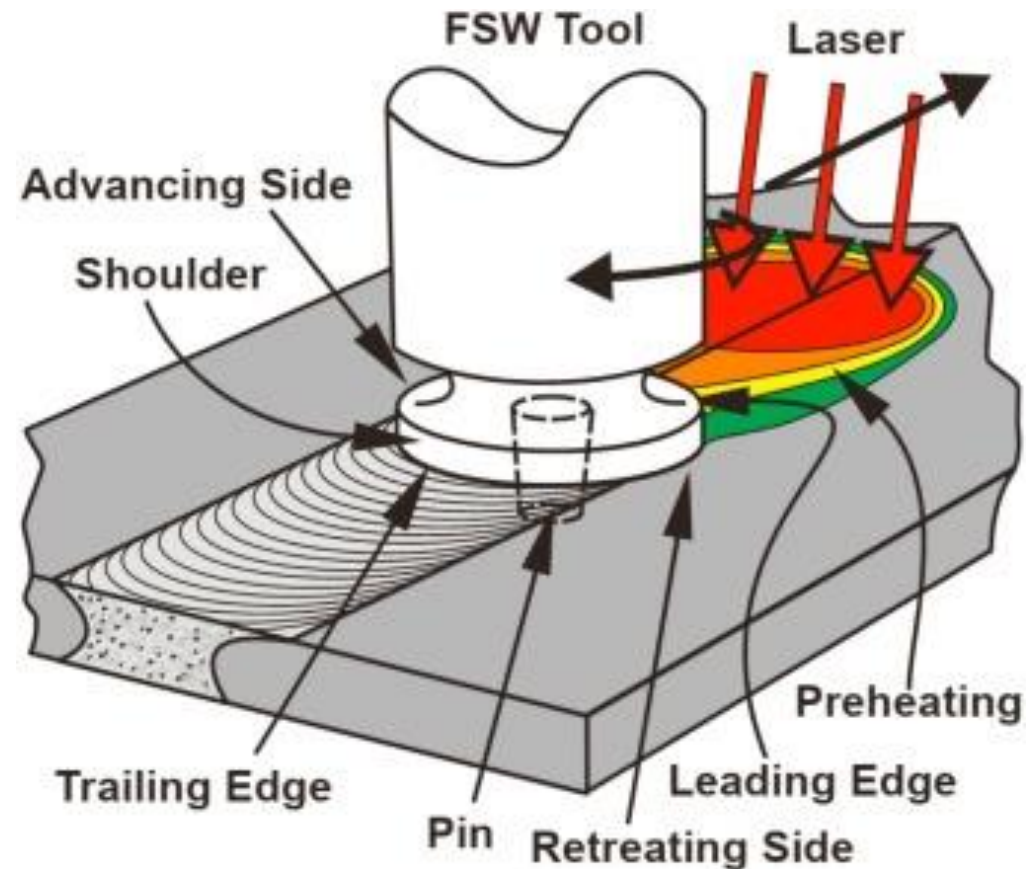
Μειονεκτήματα FSW

- ❑ Υψηλή φθορά εργαλείου συγκόλλησης
- ❑ Σχετικά αργή
- ❑ Υψηλό κόστος αγοράς εξοπλισμού

Εφαρμογές FSW

- ❑ Στη ναυπηγική σε γάστρες, πλευρές και καταστρώματα πλοίων
- ❑ Αεροδιαστημική και αεροναυτική
- ❑ Παράκτιες και υπεράκτιες κατασκευές ενέργειας και εξόρυξης υδρογονανθράκων

Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση υποβοηθούμενη με δέσμη Laser



Ερωτήσεις - Απορίες