

Συγκολλήσεις ηλεκτρικού τόξου ΙΙΙ – Συγκολλήσεις με δέσμη υψηλής πυκνότητας ενέργειας

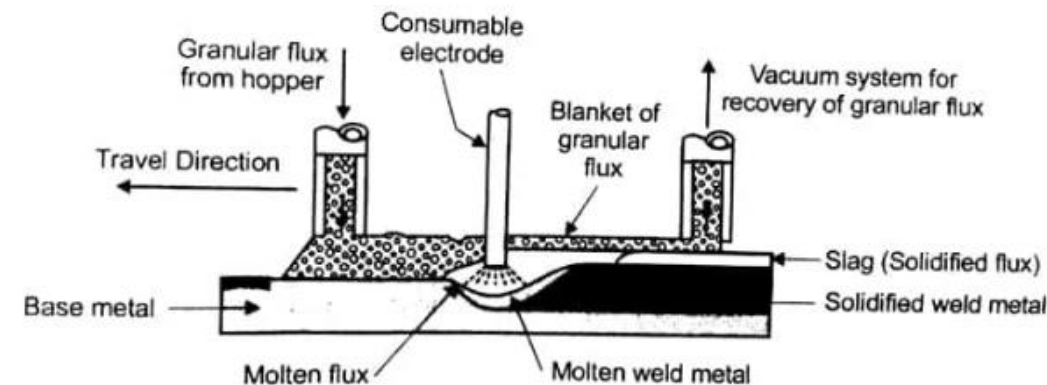
ΔΙΑΛΕΞΗ 5

ΜΕΡΟΣ Α

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

Συγκολλήσεις βυθισμένου τόξου (SAW)

- ❑ Αποτελείται από τηκτόμενο ηλεκτρόδιο και
- ❑ Σκόνη βόρακα πάνω από το μητρικό υλικό
- ❑ Προστατεύοντας το τόξο από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- ❑ Χαρακτηρίζεται από τιμές υψηλών εντάσεων ρεύματος και διείσδυσης
- ❑ Συνήθως απαιτείται η χρήση επικαλύπτρας



SUBMERGED ARC WELDING

Σκόνη βόρακα

- ❑ Αποτελείται κυρίως από οξείδια
- ❑ Σε στερεή κατάσταση είναι κακός αγωγός θερμότητας και ηλεκτρισμού
- ❑ Προστατεύοντας το τόξο από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- ❑ Σε υγρή κατάσταση η σκόνη βόρακα ιονίζεται εύκολα και διαπερνά μεγάλη ένταση ρεύματος
- ❑ Μεταλλουργικά παράγει σκωρία καθώς αντιδρά με το οξυγόνο, η οποία αναδύεται πάνω από το μέταλλο συγκόλλησης

Σκόνη βόρακα

Συμβολισμός ISO 14174	Ονομασία	Ενδεικτική χημική σύσταση / κύρια οξείδια	References
<i>MS</i>	Μαγγανιούχο-πυριτικό	Πλούσιο σε MnO και SiO₂	ESAB handbook 9τύπου «MS»· (Express Weldcare Services)
<i>CS</i>	Ασβεστούχο-πυριτικό	CaO (ασβεστίτης) + SiO₂	ESAB handbook (πίνακας τύπων). (Express Weldcare Services)
<i>ZS</i>	Ζirkονιούχο-πυριτικό	ZrO₂ + SiO₂	ESAB handbook (τύπος ZS). (Express Weldcare Services)
<i>RS</i>	Ρουτιλιούχο-πυριτικό	TiO₂ (ρουτίλιο) + SiO₂	ESAB handbook (τύπος RS). (Express Weldcare Services)
<i>AR</i>	Αλουμινούχο-ρουτιλιούχο	Al₂O₃ + TiO₂	ESAB handbook (τύπος AR)· (Express Weldcare Services)
<i>AB</i>	Αλουμινούχο-βασικό	Al₂O₃ + βασικά οξείδια (CaO , MgO) συχνά με CaF₂	ESAB handbook (τύπος AB)· (Express Weldcare Services)
<i>AS</i>	Αλουμινούχο-πυριτικό	Al₂O₃ + SiO₂	ESAB handbook (τύπος AS). (Express Weldcare Services)
<i>CB</i>	Ασβεστο-μαγνησιούχο (βασικό)	CaO + MgO	ISO 14174:2019, Πίνακας τύπων (CB = Calcium-magnesium basic). (cdn.standards.iteh.ai)
<i>FB</i>	Βασικό φθοριούχο	CaF ₂ , CaO, MgO, μικρές ποσότητες Al ₂ O ₃	ESAB handbook (τύπος FB). (Express Weldcare Services)

Ηλεκτρόδια SAW

- ❑ Το υλικό των ηλεκτροδίων επιλέγεται ανάλογα με το μητρικό υλικό
- ❑ Η διάμετρος τους ποικίλει από 1.6 έως 6.4 mm
- ❑ Τα χαλύβδινα ηλεκτρόδια είναι συχνά επιχαλκωμένα για καλύτερη ηλεκτρική επαφή με την τροφοδοσία
- ❑ Και προστασία από οξείδωση

Μηχανές SAW

- ❑ Συνεχούς ρεύματος με εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες των 700 A
- ❑ Εναλλασσόμενου ρεύματος με εντάσεις ρεύματος μεγαλύτερες των 400 A
- ❑ Χαρακτηριστικές μηχανής σταθερής τάσης όταν η ταχύτητα τροφοδοσίας είναι σταθερή
- ❑ Σταθερού ρεύματος όταν χρησιμοποιείται μηχανισμός τροφοδοσίας ηλεκτροδίου που προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο ηλεκτρόδιο

Αριθμός ηλεκτροδίων

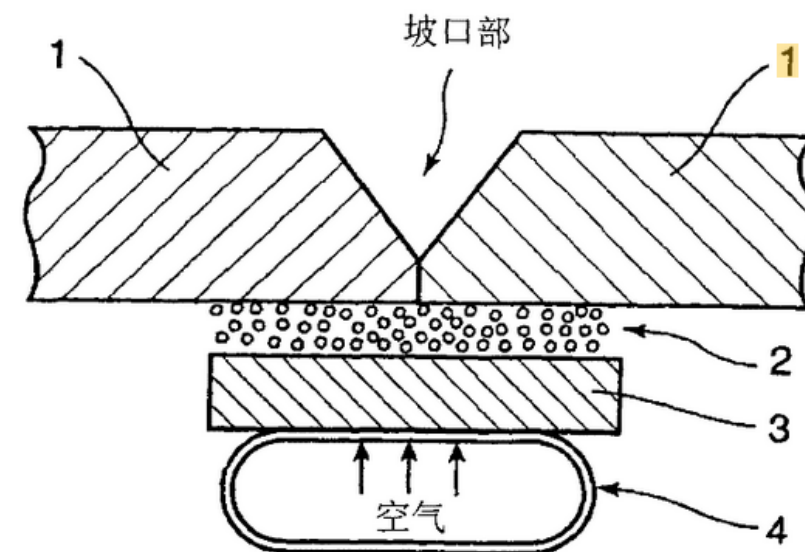
- ❑ Πολλαπλά ηλεκτρόδια συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους
- ❑ Δύο ηλεκτρόδιο σε σειρά
- ❑ Πολλαπλά ηλεκτρόδια με πολλαπλές γεννήτριες ρεύματος

Μονόπλευρη συγκόλληση

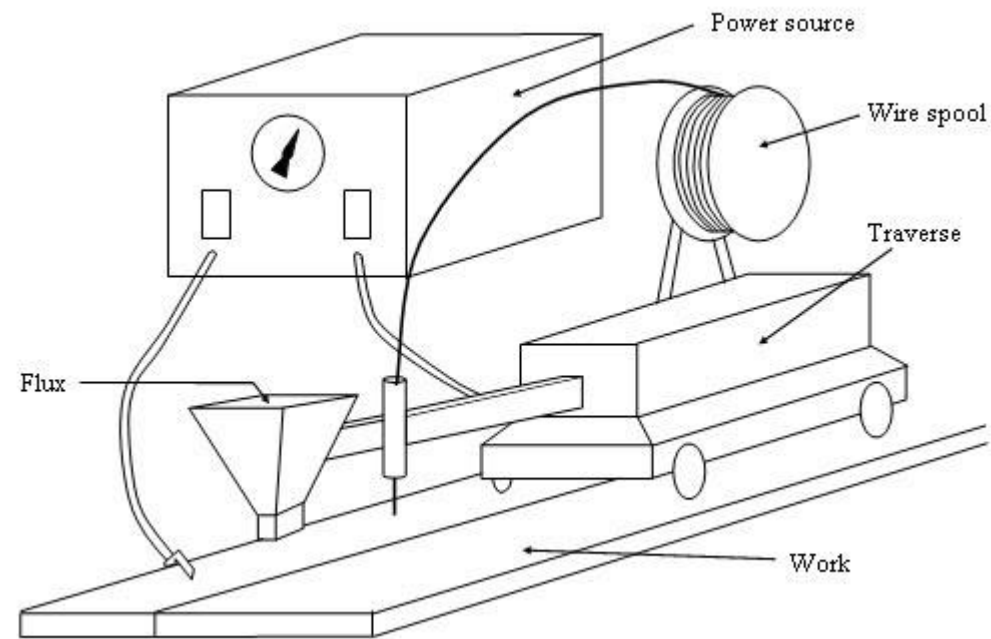
- ❑ Χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση σε μεγάλες διαστάσεις και πάχος ελασμάτων
- ❑ Αυξάνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης
- ❑ Είναι αυτοματοποιημένες ή ημι-αυτοματοποιημένες
- ❑ Όμως απαιτούνται μεγάλες τιμές εντάσεων ρεύματος
- ❑ Δημιουργώντας μεγάλο όγκο τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης
- ❑ Το οποίο παραμένει τηγμένο για σημαντικό χρονικό διάστημα
- ❑ Έτσι απαιτείται μέθοδος στήριξης του τήγματος στη ρίζα της συγκόλλησης

Μέθοδοι στήριξης Μονόπλευρη συγκόλληση

1. Συστήματα με χάλκινη επικάλυψη
 - ❑ Σταθερές ράβδοι ή φύλλα χαλκού
 - ❑ Σταθερά πέλματα χαλκού
2. Συστήματος επικάλυψης με σκόνη



Συστήματα με χάλκινη επικάλυψη



SUBMERGED ARC welding system

- Decrease Your Cycle Times
- Higher Deposition Rates

WATCH NOW

SAW

Πλεονεκτήματα SAW

- ❑ Χαρακτηρίζεται από υψηλές εντάσεις ρεύματος που οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς απόθεσης και μεγάλη διείδυση
- ❑ Δυνατότητα συγκολλήσεων μεγάλου πάχους
- ❑ Υψηλή ποιότητα συγκόλλησης
- ❑ Δεν απαιτεί ιδιαίτερες ικανότητες χειριστή
- ❑ Ελάχιστες αναθυμιάσεις

Μειονεκτήματα SAW

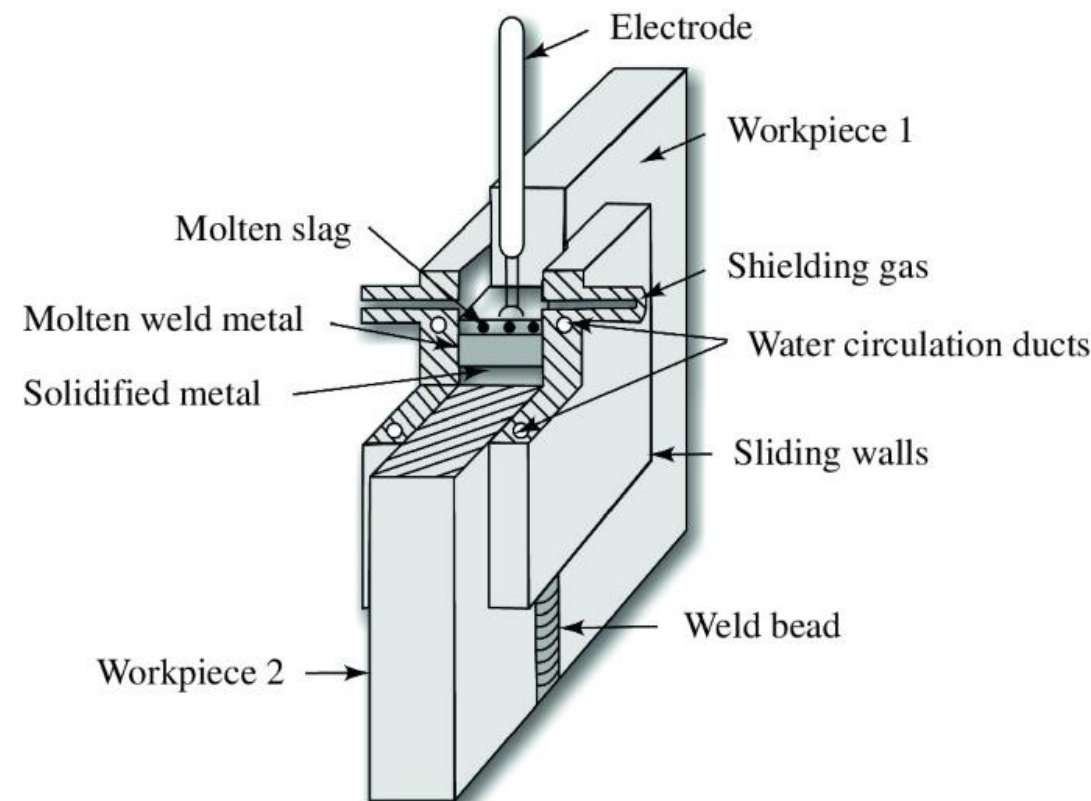
- ❑ Χρήση επικαλύπτρας
- ❑ Απαιτείται ευθυγράμμιση των τεμαχίων
- ❑ Περιορίζεται σε επίπεδες και οριζόντιες συγκολλήσεις
- ❑ Ιδανική για χρήση μόνο σε μαλακούς, μέση περιεκτικότητας σε άνθρακα και χαμηλής κραμμάτωσης χάλυβες
- ❑ Απαιτεί την αφαίρεση σκωρίας
- ❑ Ακριβός εξοπλισμός που απαιτεί μεγάλο όγκο παραγωγής για να γίνει οικονομικά συμφέρουσα

Εφαρμογές SAW

- ❑ Ναυπηγική
- ❑ Σιδηροδρομικές κατασκευές
- ❑ Δομικές κατασκευές (γέφυρες, υπεράκτιες πλατφόρμες εξόρυξης)
- ❑ Δοχεία πίεσης (λέβητες, δοχεία πυρηνικών αντιδραστήρων)
- ❑ Σωληνώσεις
- ❑ Βαρέως τύπου εξοπλισμό

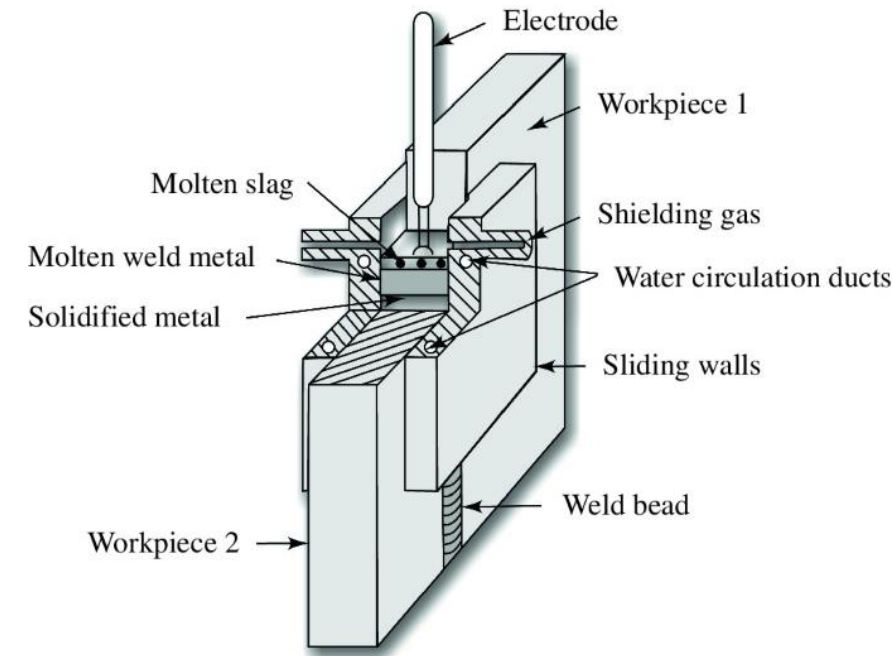
Συγκόλληση ηλεκτροσκωρίασης (ESW)

- ❑ Αποτελείται από τηκτόμενο ηλεκτρόδιο και
- ❑ Σκόνη πάνω από το μητρικό υλικό
- ❑ Λόγω του ηλεκτρικού τόξου από τη σκόνη σχηματίζεται σκωρία η οποία παραμένει τηγμένη
- ❑ Και προστατεύει το μητρικό υλικό από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- ❑ Η τήξη του προστιθέμενου υλικού και του μητρικού οφείλεται στην τηγμένη σκωρία



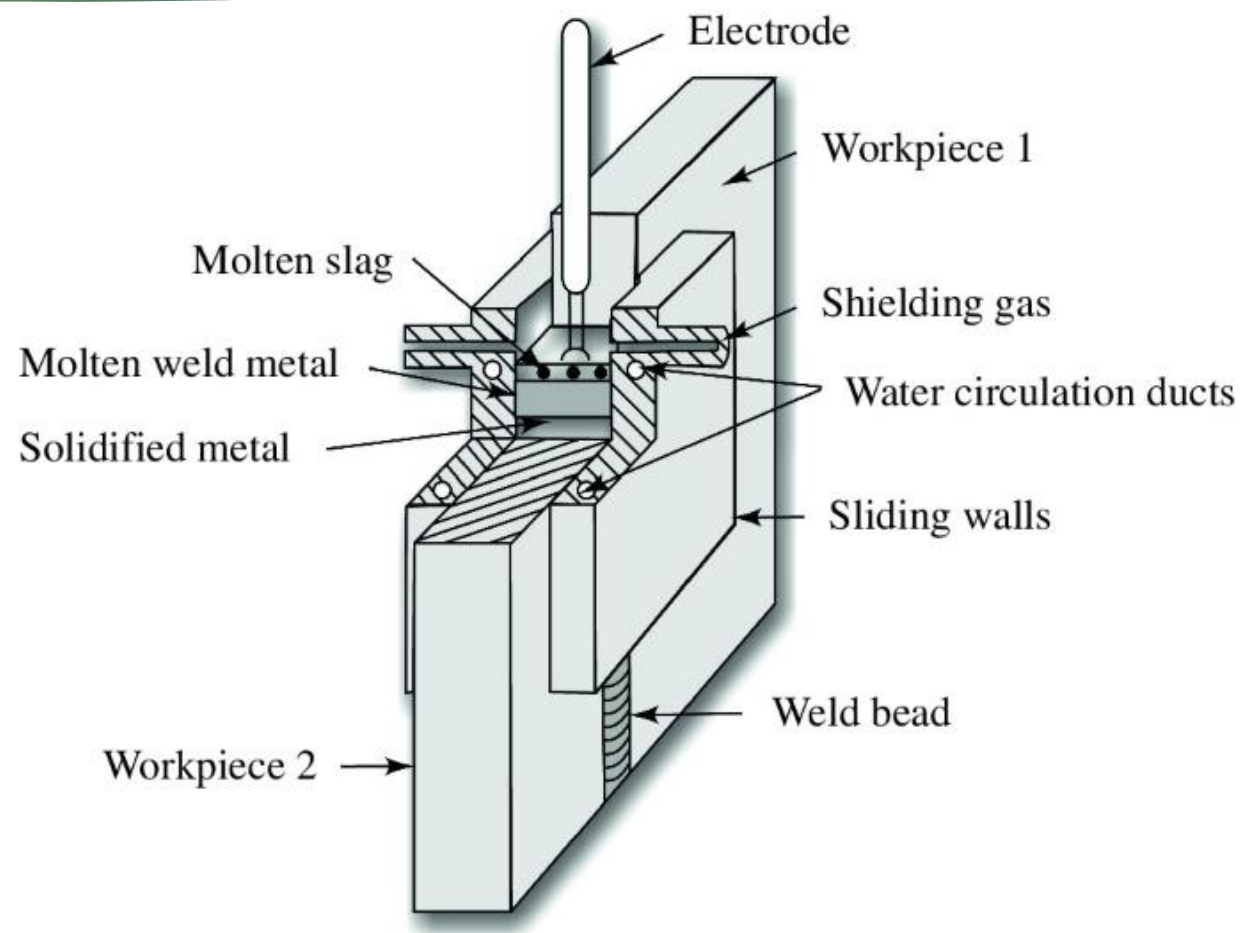
Μηχανισμός ESW

- ❑ Λόγω της τηγμένης σκωρίας το τόξο σβήνει
- ❑ Η σκωρία παραμένει έπειτα τηγμένη λόγω του ρεύματος που διαδίδεται σε αυτή από το ηλεκτρόδιο προς το μητρικό υλικό (φαινόμενο Joule)
- ❑ Η θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule πρέπει να είναι αρκετή για να προκαλέσει την τήξη του μητρικού υλικού αλλά και του ηλεκτροδίου
- ❑ Η σκωρία πρέπει να είναι πιο ελαφριά από τους τηγμένους όγκους ηλεκτροδίου και μητρικού υλικού
- ❑ Έτσι ώστε το τήγμα ηλεκτροδίου να βυθίζεται προς το τήγμα μητρικού,
- ❑ Αλλά και η σκωρία να αναδύεται πάνω από το τήγμα μητρικού υλικού
- ❑ Το μέταλλο συγκόλλησης παράγεται μετά από ψηξη



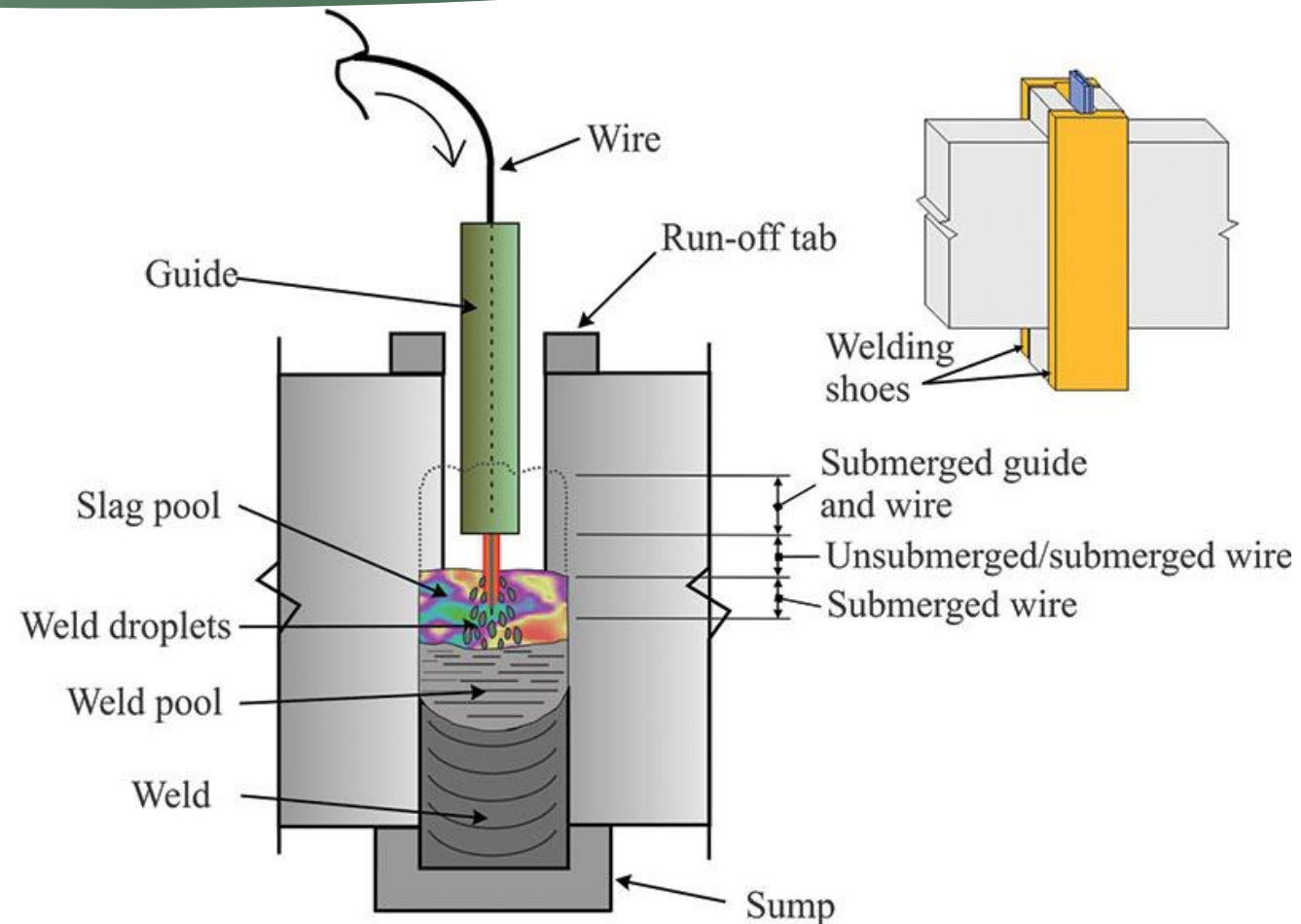
Διατάξεις ESW

- ❑ Τα υδρόψυκτα πέλματα τοποθετούνται πλευρικά της ένωσης
- ❑ Και κινούνται μαζί με τη μηχανή συγκόλλησης ανάλογα με τον ρυθμό τήξης του ηλεκτροδίου
- ❑ Περισσότερα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν



Διατάξεις ESW

- ❑ Παραλλαγή για κατακόρυφες συγκολλήσεις
- ❑ Τα πέλματα και ο οδηγός παραμένουν σταθερά
- ❑ Ο οδηγός είναι ηλεκτρικά αγωγίμος



Μηχανές ESW

- ❑ Συνεχούς ρεύματος
- ❑ Με χαρακτηριστικές σταθερές τάσης (750 – 1000 A και 30-35 V)
- ❑ Χρήση και εναλλασσόμενου ρεύματος



21

ESW

Πλεονεκτήματα ESW

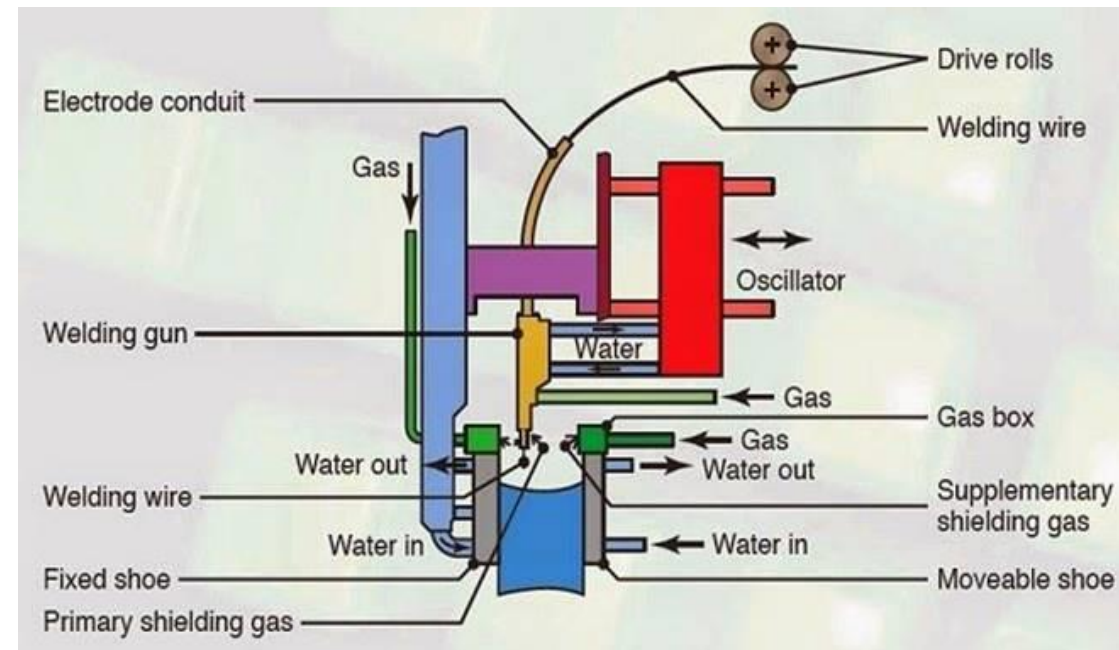
- ❑ Ημι-αυτοματοποιημένη μέθοδος με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και υψηλό ρυθμό απόθεσης
- ❑ Προστασία της λίκνης συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα
- ❑ Μικρό ποσοστό σφαλμάτων
- ❑ Ιδανική για ελάσματα μεγάλου μήκους και πάχους

Μειονεκτήματα ESW

- ❑ Απαιτεί μεγάλα ποσά θερμότητας και έτσι δημιουργείται μεγάλη ΘΕΖ
- ❑ Λόγω της αργής στερεοποίησης απαιτείται χρήση ψυκτικών συστημάτων
- ❑ Μόνο οριζόντιες και κατακόρυφες συγκολλήσεις
- ❑ Πρέπει να πραγματοποιείται συνεχόμενα χωρίς διακοπή για την αποφυγή ανωμαλιών
- ❑ Χρήση μόνο σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας (π.χ. ελάσματα στο κοίτος του πλοίου)

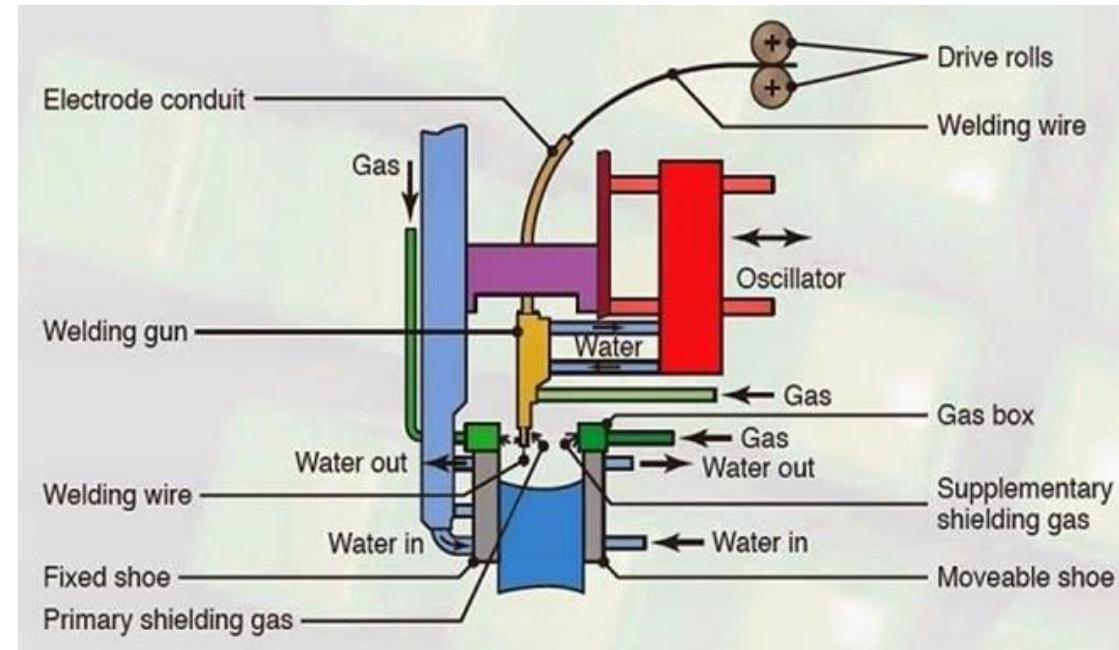
Ηλεκτροαέρια Συγκόλληση (EGW)

- ❑ Συνδεσμολογικά αποτελεί παραλλαγή της ESW
- ❑ Ως προς το μηχανισμό συγκόλλησης αποτελεί παραλλαγή των GMAW και FCAW
- ❑ Για να καταστεί δυνατή η συγκόλληση σε κατακόρυφη θέση
- ❑ Είναι δυνατή η προσθήκη προστατευτικών αερίων



Μηχανισμός EGW

- ❑ Το τόξο παρέχει το απαραίτητο ποσό θερμότητας
- ❑ Το ηλεκτρόδιο τήκεται και προωθείται
- ❑ Καθώς το διάκενο γεμίζει η μηχανή και τα πέλματα συγκράτησης προωθούνται
- ❑ Συνήθη αέρια προστασίας αποτελούν CO_2 και μίγμα $\text{Ar} - \text{CO}_2$
- ❑ Το τηγμένο μέταλλο ψύχεται και στεροοποιείται
- ❑ Περισσότερα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν



Μηχανές EGW

- ❑ Συνεχούς ρεύματος με ανάστροφη πολικότητα
- ❑ Με χαρακτηριστικές σταθερής τάσης και έλεγχο της ταχύτητας προώθησης του ηλεκτροδίου καθώς και τις κίνησης των πελμάτων
- ❑ Είτε με χαρακτηριστικές σταθερού ρεύματος



Σύγκριση EGW με ESW

- ❑ Η EGW απαιτεί χαμηλότερα ποσά θερμότητας
- ❑ Δημιουργώντας μικρότερη ΘΕΖ, αλλά και πιο εκλεπτυσμένη μικροδομή
- ❑ Για μεγάλες επιφάνειες το προστατευτικό αέριο πιθανόν να μην παρέχει επαρκής προστασία παράγοντας ελαττώματα

Πλεονεκτήματα EGW

- ❑ Οικονομική για ελάσματα με μεγάλο μήκος και πάχος
- ❑ Δυνατότητα χρήσης ηλεκτροδίων πολλών και διαφόρων υλικών
- ❑ Καλή ποιότητα ραφής
- ❑ Υψηλός ρυθμός απόθεσης
- ❑ Συγκόλληση με ένα μόνο πέρασμα
- ❑ Μικρή απαίτηση εξειδίκευσης του συγκολλητή

Μειονεκτήματα EGW

- ❑ Πολυσύνθετη και δύσκολη παραμετροποίηση , ειδικά της ταχύτητας συγκόλλησης
- ❑ Σε συγκολλήσεις με χαμηλή ταχύτητα συγκόλλησης, παρατηρείται μερική ψύξη και το μέταλλο συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από μεγάλους κόκκους
- ❑ Χαμηλές τιμές σκληρότητας, εκτός εάν γίνει χρήση ειδικών κραμματικών ηλεκτροδίων
- ❑ Πιθανόν να απαιτηθεί θερμική κατεργασία για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του μετάλλου συγκόλλησης

Εφαρμογές EGW

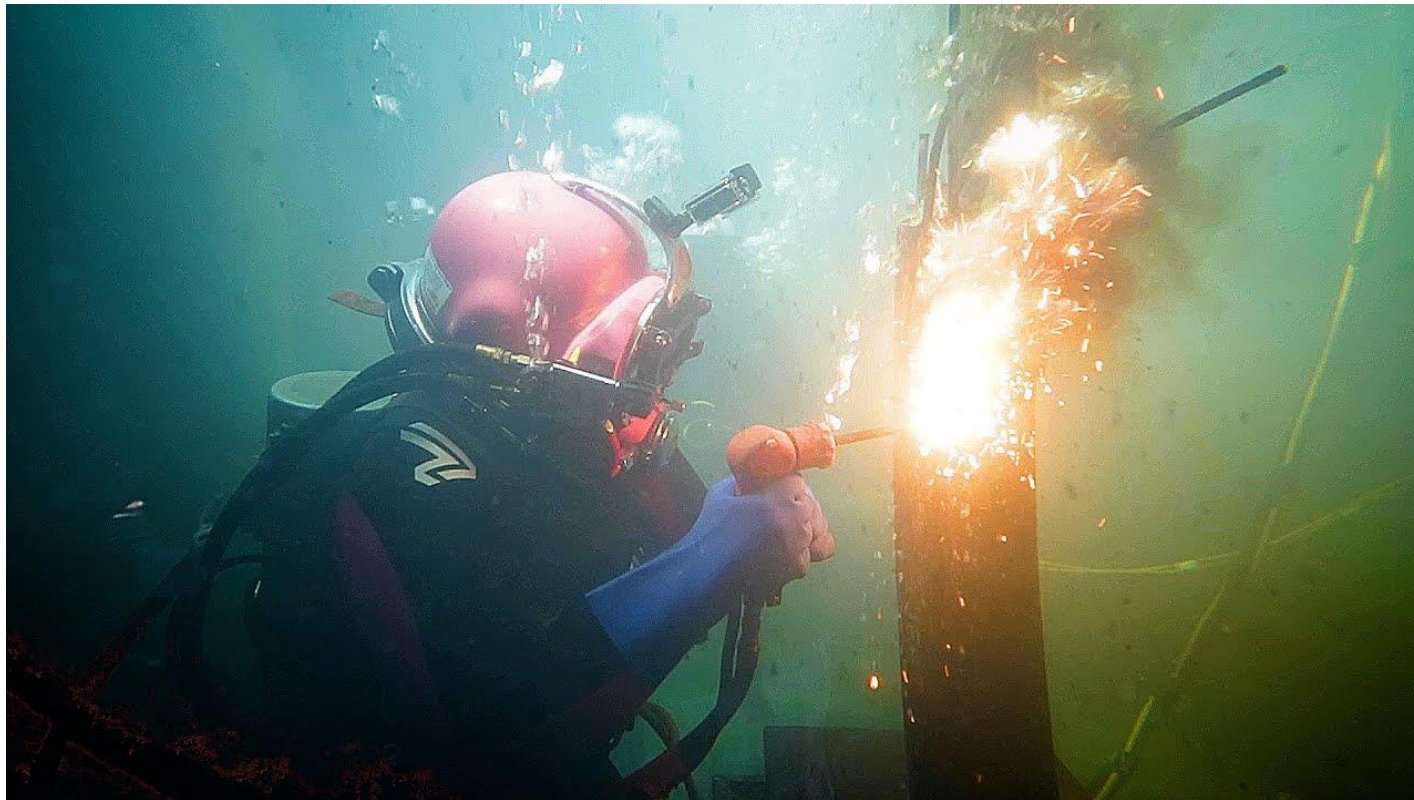
- ❑ Στον κατασκευαστικό τομέα για δεξαμενές αποθήκευσης, πιεστικά δοχεία, κλιβάνους, πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου κ.α.
- ❑ Σε εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας
- ❑ Ναυπηγικές κατασκευές
- ❑ Ελάσματα με πάχος 10-100mm

Υποβρύχιες συγκολλήσεις

Χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, στις

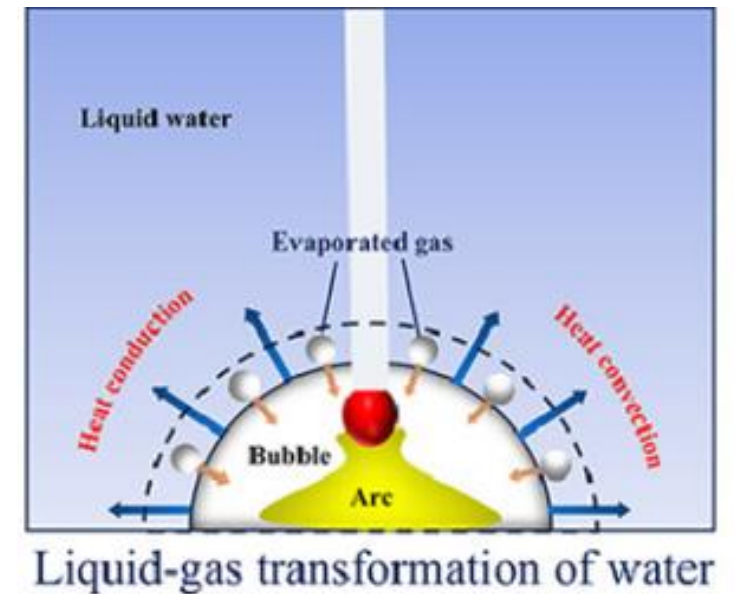
- ❑ Υποβρύχιες υγρές συγκολλήσεις (UWW)
- ❑ Υποβρύχιες στεγανές συγκολλήσεις (UDW)

Υποβρύχιες υγρές συγκολλήσεις



Υποβρύχιες υγρές συγκολλήσεις

- ❑ Αποτελούν συγκολλήσεις σε επαφή με το θαλασσινό νερό
- ❑ Επομένως πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη πίεση από την ατμοσφαιρική
- ❑ Ανάλογα με το βάθος μεταβάλλεται η ταχύτητα ψύξης του τηγμένου μετάλλου
- ❑ Έτσι σε συγκολλήσεις μαλακού χάλυβα ανάλογα με το βάθος της θάλασσας δημιουργείται μέταλλο συγκόλλησης με διαφορετική σύσταση



Σχηματισμός φάσεων χάλυβα ανάλογα με τη θερμοκρασία ψύξης

Φάση	Θερμοκρασία στερεοποίησης (°C)	Ιδιότητες (αντοχή, θραύση, κόπωση, σκληρότητα, ψαθυρότητα)	Αιτίες / Ερμηνεία μεταλλουργικά	Πηγές (με link)
<i>Μαρτενσίτης</i>	≈ 300–400 °C (εξαρτάται από C%)	♦ Πολύ υψηλή αντοχή (>1200 MPa) ♦ Πολύ υψηλή σκληρότητα (>400 HV) ♦ Πολύ χαμηλή ανθεκτικότητα σε θραύση ♦ Πολύ χαμηλή αντοχή σε κόπωση (εύθραυστος)	Μετασχηματισμός diffusionless , εγκλωβισμός C στο πλέγμα, υψηλές εσωτερικές τάσεις, μεγάλος αριθμός δυστοκιών → εξαιρετικά σκληρό αλλά ψαθυρό.	Bhadeshia (2015), Bainite in Steel Xiao et al., Metals, 10(8):95 (2020)
<i>Ανω μπαϊνίτης (Upper Bainite)</i>	~400–550 °C	♦ Υψηλή αντοχή (700–900 MPa) ♦ Σκληρότητα 250–350 HV ♦ Μέτρια έως χαμηλή ανθεκτικότητα ♦ Περιορισμένη ολκιμότητα, αυξημένη ψαθυρότητα	Σχηματίζεται με μερική διάχυση — πλάκες φερρίτη με στρώσεις τσιμεντίτη (Fe ₃ C) → αυξημένες δυστοκίες, εμπόδια σε παραμόρφωση, μειωμένο toughness.	Costin et al., MSJ 4 663 (2016) Bhadeshia & Honeycombe (2017)

Φάση	Θερμοκρασία στερεοποίησης (°C)	Ιδιότητες (αντοχή, θραύση, κόπωση, σκληρότητα, ψαθυρότητα)	Αιτίες / Ερμηνεία μεταλλουργικά	Πηγές (με link)
<i>Πλακοειδής φερρίτης (Acicular Ferrite)</i>	~550–700 °C	♦ Ισορροπία αντοχής και ολκιμότητας ♦ Σκληρότητα ~200–280 HV ♦ Υψηλή ανθεκτικότητα σε θραύση ♦ Καλή αντοχή σε κόπωση	Βελόνες φερρίτη με τυχαίο προσανατολισμό κρυστάλλων κόκκων, λεπτόκοκκη δομή, υψηλή πυκνότητα ορίων κόκκων → σταματούν διάδοση ρωγμών· επαρκείς δυστοκίες για αντοχή χωρίς ψαθυρότητα.	Costin et al., MSJ 4 663 (2016) Kou (2003), Welding Metallurgy
<i>Πεικροσταλλικός φερρίτης (Polygonal Ferrite)</i>	~700–850 °C	♦ Χαμηλή αντοχή (300–450 MPa) ♦ Πολύ χαμηλή σκληρότητα ♦ Πολύ υψηλή ολκιμότητα ♦ Πολύ χαμηλή ψαθυρότητα ♦ Καλή αντοχή σε κόπωση λόγω ολκιμης συμπεριφοράς	Σχηματίζεται με πλήρη διάχυση του C , μεγάλοι κόκκοι, λίγες δυστοκίες → μαλακή, ολκιμη δομή· εύκολη ολίσθηση δυστοκιών και απορρόφηση ενέργειας.	Bhadeshia & Honeycombe (2017) Zhao et al., J. Mater. Sci., 53 (2018)

Σύσταση χαλύβδινου μετάλλου συγκόλλησης σε χειροκίνητες συγκολλήσεις

<i>Βάθος (m)</i>	<i>Θερμική συμπεριφορά</i>	<i>Επικρατούσα φάση</i>	<i>Παρατηρήσεις</i>	<i>Πηγή</i>
0–10 m	Έντονος βρασμός, θερμή φυσαλίδα → αργή ψύξη	Περικρυσταλλικός φερρίτης	Η φυσαλίδα ατμού δρα ως μόνωση → καθυστέρηση ψύξης	Hrivnák (1992), Masubuchi (1980)
10–30 m	Πίεση ↑ → σταθεροποίηση τόξου, ταχύτερη ψύξη	Πλακοειδής φερρίτης	Δημιουργείται ινώδης φερρίτης με τυχαίο προσανατολισμό.	Hrivnák (1992); AWS D3.6M:2017 Annex C
>30–50 m	Ακόμη υψηλότερη πίεση, ψυχρό νερό → γρηγορότερη ψύξη	άνω μπαινίτης	Εμφανίζονται λεπτές στρώσεις Fe_3C .	Hrivnák (1992), Ibarra & Moore (1986)
>50 m	Σταθεροποιημένο θερμικό περιβάλλον	Μίγμα πλακοειδούς φερρίτη και ανώτερου μπαινίτη (σταθερό)	Η μικροδομή σταθεροποιείται – δεν αλλάζει σημαντικά με περαιτέρω βάθος.	Hrivnák (1992); Masubuchi (1980)

Σύσταση χαλύβδινου μετάλλου συγκόλλησης σε μηχανικές συγκολλήσεις

Βάθος (m)	Θερμική συμπεριφορά	Επικρατούσα φάση / μικροδομή	Παρατηρήσεις	Πηγές
0–10 m	Πολύ έντονη κυκλοφορία, βρασμός και φυσαλίδες → πολύ γρήγορη ψύξη (20–35 °C/s)	Μαρτενσίτης + Άνω μπαινίτης	Η έντονη ανάδευση νερού αυξάνει την αποβολή θερμότητας· η ραφή είναι σκληρή (>350 HV) και πορώδης· μειωμένη σκληρότητα.	Liu et al., <i>J. Mater. Process. Technol.</i> , 233 (2016), 12–20; Cui et al., <i>Appl. Sci.</i> , 9 (2019), 4080
10–25 m	Πίεση ↑ → σταθερότερο τόξο, μειωμένη φυσαλίδωση → μέτρια ψύξη (10–15 °C/s)	Πλακοειδής φερρίτης	Η μείωση της φυσαλίδωσης ευνοεί τον πλακοειδή φερρίτη· καλή ισορροπία αντοχής–ολκιμότητας (~250 HV).	Liu et al. (2016); TWI Job Knowledge No. 78 (2021)
25–40 m	Ελάχιστη ροή, αυξημένη πίεση → πιο αργή ψύξη (3–8 °C/s)	Περικρυσταλλικός φερρίτης + περλίτης	Το λουτρό διατηρείται θερμό περισσότερο· προλαβαίνει διάχυση C· χαμηλότερη σκληρότητα (180–220 HV).	Liu et al. (2016); AWS D3.6M:2017 Annex C
40–60 m	Θερμοκρασία νερού ↓, θερμική αγωγιμότητα ↑ → ελαφρά ταχύτερη ψύξη (8–12 °C/s)	Πλακοειδής και Περικρυσταλλικός φερρίτης	Επανεμφανίζεται acicular ferrite, σταθεροποιείται η μικροδομή· καλή ομοιομορφία και εμφάνιση ραφής.	Cui et al. (2019); TWI (2021)
>60 m	Σταθερές θερμικές συνθήκες, ψυχρό νερό → σταθερός ρυθμός ψύξης (~10 °C/s)	Σταθερό μείγμα Πλακοειδή φερρίτη + μπαινίτη	Το θερμικό πεδίο ισορροπεί· οι μεταβολές φάσεων μικρές· ιδιότητες σχεδόν ανεξάρτητες βάθους.	Liu et al. (2016); Cui et al. (2019); TWI (2021)

Μορφολογία UW



Πορώδες σε υγρές συγκολλήσεις

- ❑ Το πορώδες επιδρά αρνητικά στην αντοχή σε κόπωση
- ❑ Αυτό αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης άρα και του βάθους
- ❑ Με σταθερό ρεύμα και αύξηση της πίεσης αλλάζει σχήμα από σφαιρικό σε μακρόστενο
- ❑ Το πορώδες μειώνεται με την αύξηση του καθοδικού ρεύματος
- ❑ Όπως και με τόξο μικρότερης διαμέτρου και υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης

Πλεονεκτήματα UWW

- ❑ Χαμηλό κόστος
- ❑ Υψηλή προσαρμοστικότητα αφού ο δύτης φτάνει στα πιο δυσπρόσιτα σημεία
- ❑ Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης

Μειονεκτήματα UWW

- ❑ Χαμηλή ορατότητα
- ❑ Ρωγμάτωση στη ΘΕΖ λόγω είτε απορρόφησης υδρογόνου (HIC), είτε της μικροδομής της ΘΕΖ ή παραμένουσων τάσεων στην ένωση
- ❑ Γρήγορη ψύξη με εισροή μεγάλης ποσότητας υδρογόνου (ψαθυροποίηση ή/και HIC)
- ❑ Σχηματισμός πορώδους που ελαττώνει την αντοχή σε κυκλική φόρτιση

Εφαρμογές UWW

Χρησιμοποιείται κυρίως σε επισκευές

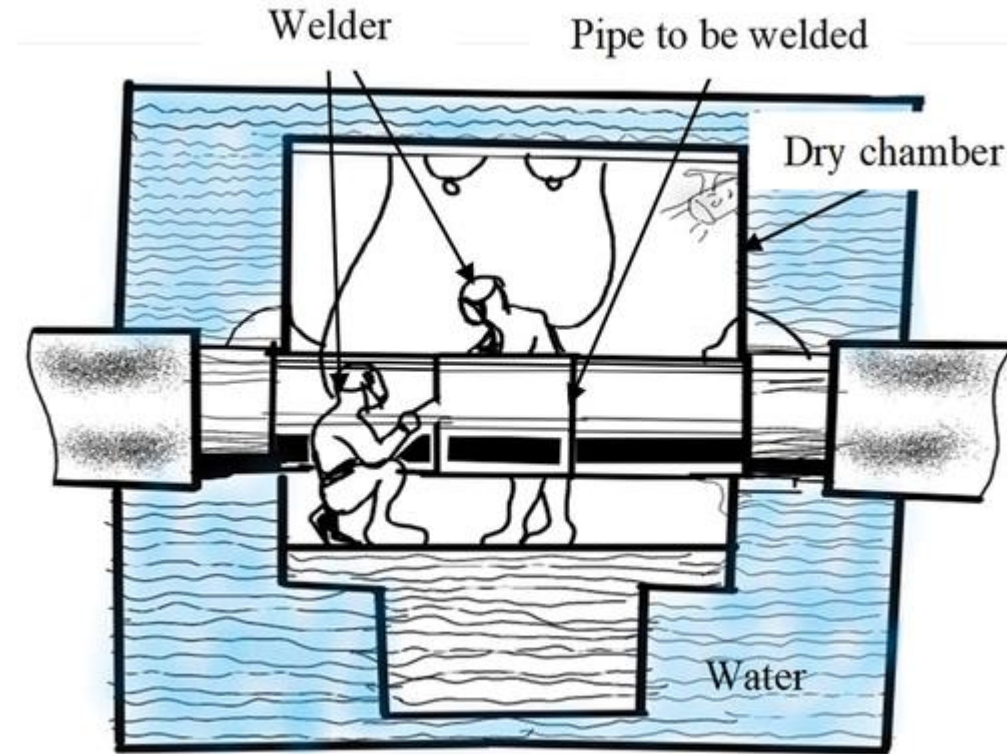
- ❑ Παράκτιων κατασκευών λόγω διάβρωσης
- ❑ Πλατφορμών εξόρυξης
- ❑ Υποθαλάσσια συστήματα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων
- ❑ Λιμενικές εγκαταστάσεις
- ❑ Πυρηνικές εγκαταστάσεις
- ❑ Πλοία (προσωρινές επισκευές)



HOW IT WORKS
UNDERWATER WELDING ?

Υποβρύχιες στεγανές συγκολλήσεις (UDW)

- ❑ Υπερβαρικού τύπου
- ❑ Σε θάλαμο ειδικά κατασκευασμένο ανάλογα την περιοχή της συγκόλλησης
- ❑ Ο θάλαμος γεμίζει με αδρανές αέριο (συνήθως He)
- ❑ Σε λίγο μεγαλύτερη πίεση από την υδροστατική
- ❑ Η συγκόλληση έχει τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της ξηρής συγκόλλησης



Πλεονεκτήματα UDW

- ❑ Στεγανό περιβάλλον
- ❑ Άριστη ορατότητα
- ❑ Υψηλής ποιότητας συγκόλληση
- ❑ Παρέχει ασφάλεια στον συγκολλητή
- ❑ Δυνατότητα θερμικής κατεργασίας

Μειονεκτήματα UDW

- ❑ Ακριβή μέθοδος
- ❑ Περιορισμένη προσβασιμότητα
- ❑ Απαιτεί ειδική εκπαίδευση του συγκολλητή καθώς συνήθως εφαρμόζεται σε πολύ μεγάλος βάθος

Εφαρμογές UDW

Χρησιμοποιείται κυρίως σε επισκευές, και στο 80% των υποβρυχίων συγκολλήσεων, και κυρίως σε χάλυβες

- ❑ Παράκτιων κατασκευών λόγω διάβρωσης
- ❑ Πλατφόρμες εξόρυξης
- ❑ Υποθαλάσσια συστήματα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων
- ❑ Λιμενικές εγκαταστάσεις
- ❑ Πυρηνικές εγκαταστάσεις
- ❑ Πλοία (προσωρινές επισκευές)

Ερωτήσεις απορίες

ΜΕΡΟΣ Β

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ
LASER

Συγκολλήσεις με δέσμη Laser (LBW)

Light Amplification by Stimulated Emission of radiation ή **LASER**. Δηλαδή στα ελληνικά σημαίνει ενίσχυση φωτός από εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας

- ❑ Άρχισε να αναπτύσσεται μετά το 1970 όταν και ανακαλύφθηκε το φαινόμενο της κλειδαρότρυπας
- ❑ Παρέχει υψηλή παραγωγικότητα και μεγάλη ευελιξία
- ❑ Μείωση των παραμορφώσεων στο μέταλλο συγκόλλησης
- ❑ Χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες τιμές παρεχόμενης πυκνότητας ενέργειας στο μητρικό μέταλλο

Ταξινόμηση ακτινοβολίας με βάση το μήκος κύματος

<i>Ακτινοβολία</i>	<i>Μήκος κύματος</i>
<i>Ακτίνες Χ</i>	0.01 – 10 nm
<i>Υπεριώδης ακτινοβολία (UV)</i>	10 – 380 nm
<i>Ορατό φως</i>	380 – 750 nm
<i>Υπέρυθρη ακτινοβολία (IR)</i>	750nm – 1000μm
<i>Μικροκύματα</i>	mm - cm

- ✓ Όσο η τιμή του μήκους κύματος ελαττώνεται, η ενέργεια των φωτονίων αυξάνεται

Μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στα μέταλλα

Η δέσμη Laser αλληλοεπιδρά με το μέταλλο και

- ❑ Όταν το μήκος κύματος κύματος είναι μεγάλο (IR) τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στα άτομα του μετάλλου
- ❑ Δηλαδή εκείνα τα οποία βρίσκονται στο νέφος ηλεκτρονίων που δημιουργούν το δεσμό σε κάθε κόκκο (ζώνη αγωγιμότητας)
- ❑ Ταλαντώνονται και απορροφούν αυτή την ενέργεια
- ❑ Με λίγα λόγια η ενέργεια της δέσμης γίνεται θερμική στο μέταλλο

Μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στα μέταλλα

Δηλαδή όταν το μήκος κύματος κύματος είναι μεγάλο (IR) τότε

- ❑ Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στα άτομα του μετάλλου ταλαντώνονται εύκολα λόγω του ηλεκτρικού πεδίου της δέσμης
- ❑ Παράγοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο στην διεπιφάνεια μετάλλου - δέσμης
- ❑ που αντιτίθεται στο εισερχόμενο κύμα
- ❑ Έτσι παρατηρείται ανάκλαση του φωτός (μεταλλική γυαλάδα)
- ❑ Ο παραπάνω μηχανισμός ονομάζεται μοντέλο Drude

Μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στα μέταλλα

Η δέσμη Laser αλληλοεπιδρά με το μέταλλο και

- ❑ Όταν το μήκος κύματος κύματος είναι μικρό (UV) τότε τα ηλεκτρόνια διεγείρονται σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες,
- ❑ Προς τη ζώνη αγωγιμότητας
- ❑ Αυτό ο μηχανισμός προκαλεί μεγάλη απορρόφηση διότι υπάρχει μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων, και πολλές μεταβάσεις που μπορούν να συμβούν

Μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στα μέταλλα

Όταν το μήκος κύματος κύματος είναι μικρό (UV) τότε

- ❑ τα ηλεκτρόνια του νέφους δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν συλλογικά στο ηλεκτρικό πεδίο της δέσμης
- ❑ Κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες,
- ❑ Μείωση του φαινομένου της ανάκλασης, συνεπώς αύξηση της απορρόφησης
- ❑ Ο παραπάνω μηχανισμός ονομάζεται Interband

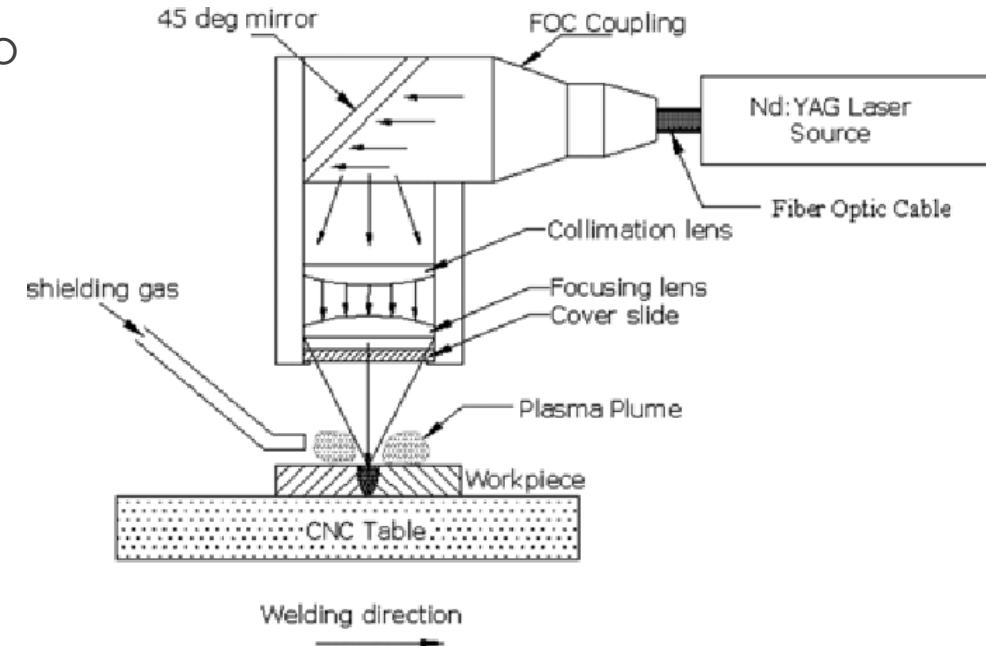
Αρχή λειτουργίας Laser

Το Laser αποτελείται από

- ❑ Το ενεργό στοιχείο (π.χ. αέριο μίγμα, ημιαγωγός)
- ❑ Την πηγή άντλησης ενέργειας
- ❑ Το οπτικό στοιχείο ή κοιλότητα συντονισμού

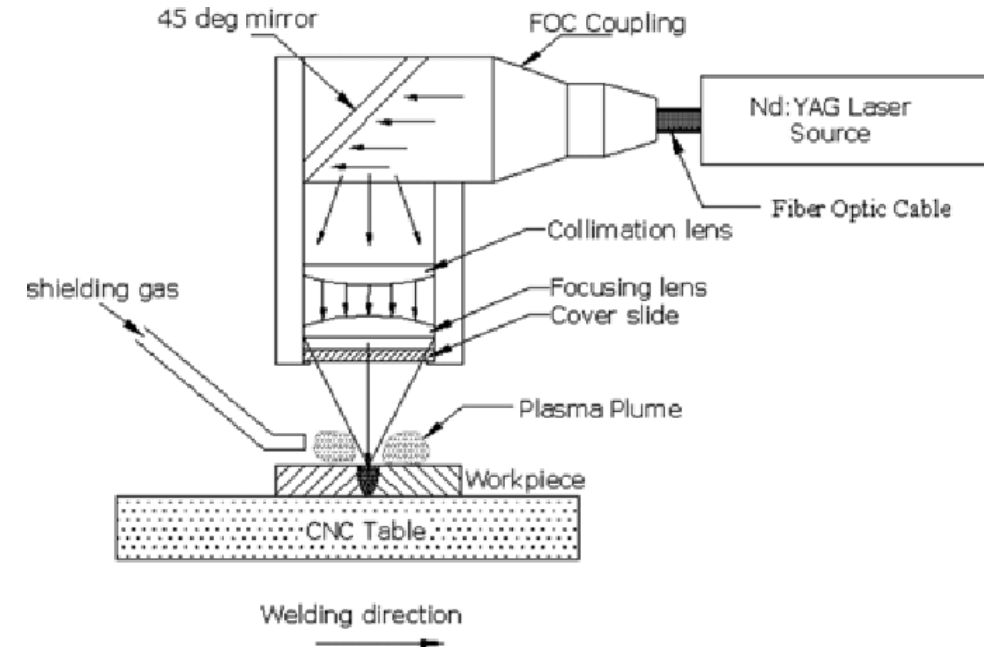
Αρχή λειτουργίας Laser

- ❑ Η πηγή άντλησης ενέργειας διεγείρει το ενεργό στοιχείο και παράγονται φωτόνια
- ❑ Η διέγερση μπορεί να είναι οπτική, χημική, ηλεκτρική, θερμική, ιονίζουσα ακτινοβολία κ.α.
- ❑ Αρχικά η δέσμη έχει μεγάλη διάμετρο και μικρό ποσό ενέργειας
- ❑ Έπειτα λόγω της οπτικής κοιλότητας, η οποία αποτελείται από δύο κατάλληλους καθρέφτες
- ❑ Η δέσμη ενισχύεται



Αρχή λειτουργίας Laser

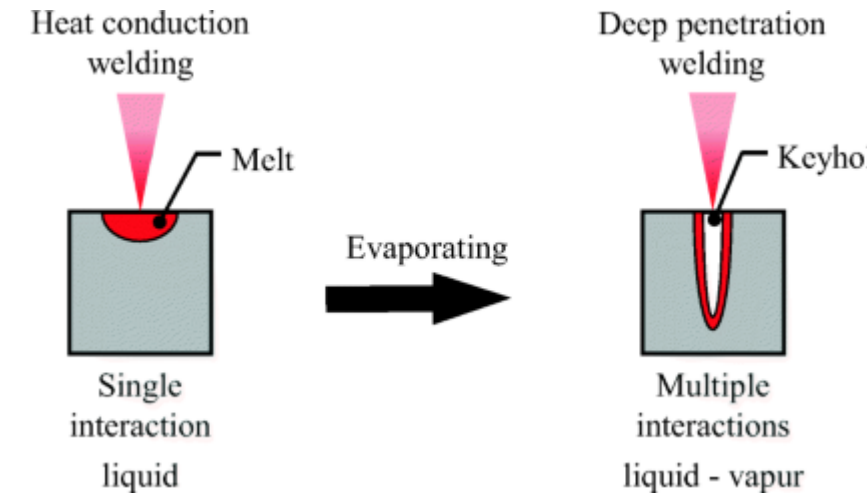
- ❑ Ο πρώτος καθρέφτης είναι πλήρως ανακλαστικός
- ❑ Ο δεύτερος καθρέφτης είναι ημιδιαπεράτος, αφήνοντας μικρό ποσοστό ακτινοβολίας να τον διαπεράσει
- ❑ Έτσι η ακτινοβολία ταλαντώνεται μεταξύ των δύο καθρεπτών
- ❑ Κάθε φορά που ένα φωτόνιο συναντά ένα διεγερμένο αέριο παράγεται όμοιο φωτόνιο
- ❑ Έτσι προκύπτει τελικά μια πολύ στενή κατευθυνόμενη δέσμη



Τύποι συγκόλλησης Laser

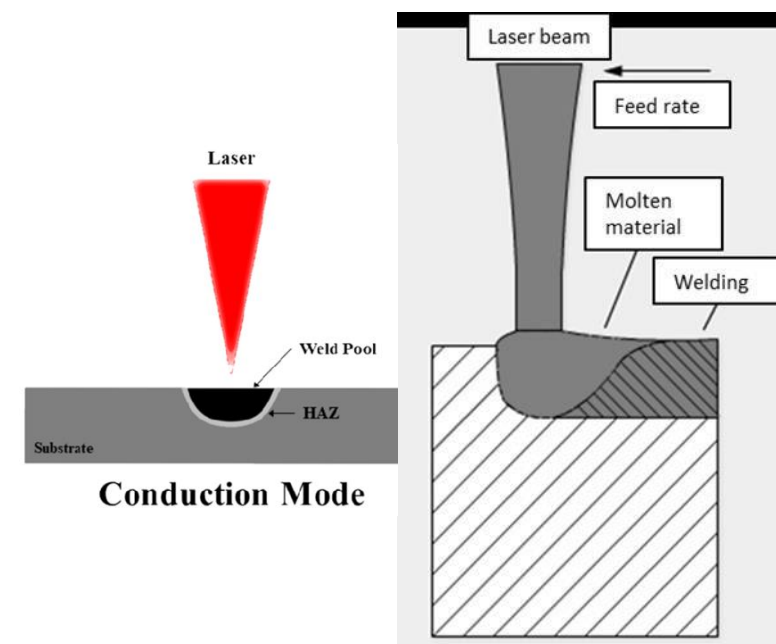
Ανάλογα με την ισχύ και με το μήκος κύματος 2 τύποι συγκόλλησης παρατηρούνται

- Με αγωγή
- Με τη δημιουργία κλειδαρότρυπας



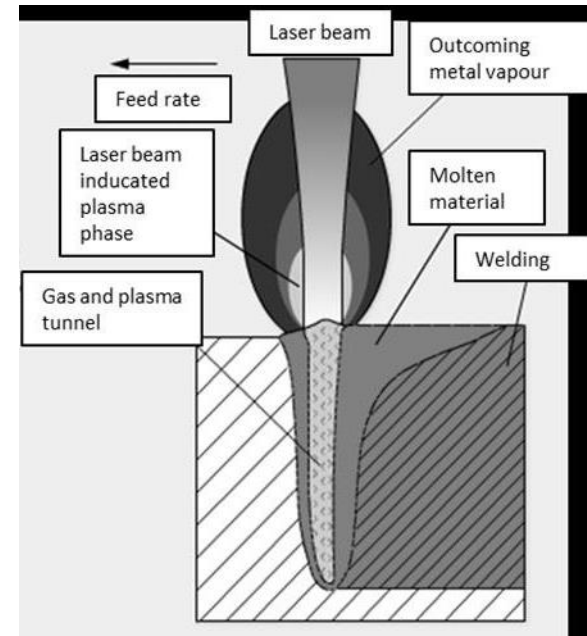
Μηχανισμός συγκόλλησης με αγωγή

- ❑ Συμβαίνει με χαμηλή πυκνότητα ισχύος και συνήθως όταν η δέσμη έχει μεγάλη διάμετρο
- ❑ Η δέσμη αλληλεπιδρά με ένα πολύ λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του μητρικού μετάλλου
- ❑ Η ενέργεια μεταφέρεται με αγωγή από τα άτομα της επιφάνειας προς αυτά στο εσωτερικό του υλικού
- ❑ Δημιουργείται η λίμνη συγκόλλησης και από κάτω της η ΘΕΖ
- ❑ Σε τομή το προφίλ της συγκόλλησης είναι οβάλ, με διείσδυση μικρού βάθους



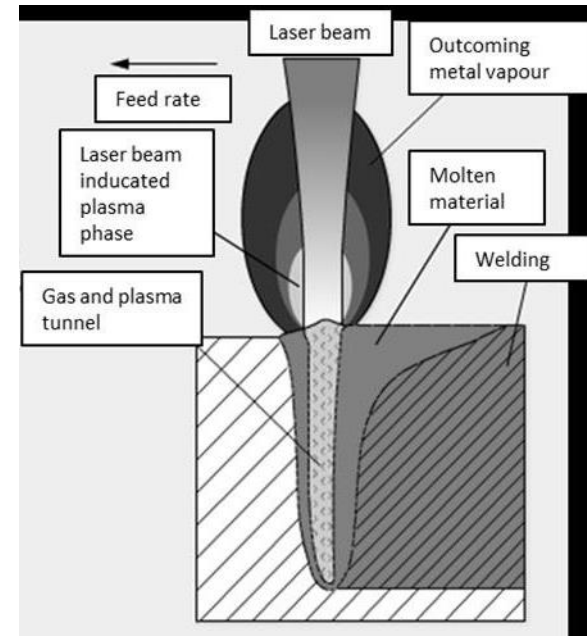
Μηχανισμός συγκόλλησης με δημιουργία κλειδαρότρυπας

- ❑ Συμβαίνει με υψηλή πυκνότητα ισχύος
- ❑ Χαρακτηριστικό παράδειγμα σε UV ακτινοβολία
- ❑ Ταχύτατη θέρμανση, ρήξη των δεσμών ή ηλεκτρονιική διέγερση
- ❑ Με αποτέλεσμα την τήξη και εξάχνωση του μητρικού στο κέντρο της λίμνης (Φωτοαλληλεπίδραση)



Μηχανισμός συγκόλλησης με δημιουργία κλειδαρότρυπας

- ❑ Η εξάχνωση επιτρέπει αντανάκλασεις του φωτός εντός της κλειδαρότρυπας
- ❑ Έτσι πραγματοποιείται μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και σε μεγαλύτερο βάθος
- ❑ Δημιουργείται πλάσμα εντός της κλειδαρότρυπας
- ❑ Που όταν αυτό βρίσκεται σε επαφή με το μητρικό η απορρόφηση ενέργειας πλησιάζει το 100%
- ❑ Έτσι δημιουργείται προφίλ συγκόλλησης με μικρή διατομή αλλά μεγάλο βάθος διείσδυσης



Είδη Laser

- ❑ CO₂ Laser
- ❑ Laser γρανάτη υπτρίου αλουμινίου και ιόντος νεοδημίου (nd:YAG)
- ❑ Laser διόδου υψηλής ισχύος (HPDL)
- ❑ Laser διεγερμένων διμερών (Excimer Laser)

CO₂ Laser

- ❑ Το πιο διαδεδομένο στη βιομηχανία και το πιο αποδοτικό
- ❑ Εκπέμπει IR με μήκος κύματος 10.6μm
- ❑ Αποδίδει έως 25kW
- ❑ Το ενεργό μέσο είναι μίγμα 6% CO₂ + 12% N₂ + 82% He
- ❑ Διεγείρεται με ηλεκτρική εκκένωση
- ❑ Λειτουργεί και συνεχώς και παλμικά

Laser γρανάτη υτρίου αλουμινίου και ιόντος νεοδημίου (nd:YAG)

- ❑ Εκπέμπει IR με μήκος κύματος $1.06\mu\text{m}$
- ❑ Αποδίδει έως 5kW
- ❑ Λειτουργεί και συνεχώς και παλμικά

Laser διόδου υψηλής ισχύος (HPDL)

- ❑ Εκπέμπει IR με μήκος κύματος 808 – 960 nm
- ❑ Αποδίδει έως 10kW
- ❑ Το ενεργό μέσο είναι ημιαγωγός
- ❑ Το μεγάλο του πλεονέκτημα αποτελεί το πολύ μικρό του μέγεθος, η μεγάλη αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής του
- ❑ Λειτουργεί και συνεχώς και παλμικά

Laser διεγερμένων διημερών (Excimer Laser)

- ❑ Εκπέμπει UV με μήκος κύματος 193 – 351 nm
- ❑ Αποδίδει έως 750W
- ❑ Το ενεργό μέσο είναι μίγμα ευγενούς αερίων και αλογόνων
- ❑ Διέγερση με ηλεκτρική εκκένωση
- ❑ Λειτουργεί παλμικά

Παράμετροι που επιδρούν στην LBW

- ❑ Παράμετροι της δέσμης
- ❑ Παράμετροι του περιβάλλοντος
- ❑ Παράμετροι των υλικών

Παράμετροι της δέσμης

- ❑ Ενεργειακοί παράμετροι (κατανομή ενέργειας στις διευθύνσεις κάθετες στην επιφάνεια του μητρικού, διάμετρος και ένταση δέσμης)
- ❑ Γωνία πρόσπτωσης
- ❑ Το μήκος κύματος
- ❑ Η ταχύτητα σάρωσης

Επίδραση ταχύτητας σάρωσης

- ❑ Στις συγκολλήσεις με αγωγή παράγεται πλάσμα πάνω από το μητρικό
- ❑ Το οποίο απορροφά σημαντικό μέρος της προδιδόμενης ενέργειας της δέσμης
- ❑ Εάν η ταχύτητα σάρωσης αυξηθεί παράγεται μικρότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια του μητρικού
- ❑ Έτσι παράγεται και λιγότερο πλάσμα στη λίμνη συγκόλλησης
- ❑ Έτσι η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης αυξάνει το συντελεστή απορρόφησης

Επίδραση ταχύτητας σάρωσης

- ❑ Στις συγκολλήσεις με δημιουργία κλειδαρότρυπας
- ❑ Η μείωση της ταχύτητας αυξάνει το συντελεστή απορρόφησης
- ❑ Λόγω των αντανakλάσεων της δέσμης στο εσωτερικό της κλειδαρότρυπας
- ❑ Γενικά με την αύξηση της ταχύτητας η διατομή και το βάθος της συγκόλλησης ελαττώνεται
- ❑ Υπάρχει μια βέλτιστη τιμή που ο λόγος βάθους διείσδυσης προς τη διατομή της συγκόλλησης γίνεται μέγιστος

Περιβαλλοντικοί παράμετροι – προστατευτικά αέρια

- ❑ Σε συγκολλήσεις με αγωγή το He και το Ar ιονίζονται πιο δύσκολα από τα στοιχεία της λίμνη συγκόλλησης
- ❑ Έτσι αποτρέπουν την δημιουργία πλάσματος ή ελαττώνουν το μέγεθος του στην επιφάνεια του μετάλλου
- ❑ Βέβαια με την αύξηση της πυκνότητας ενέργειας το Ar ιονίζεται και ενισχύει το πλάσμα, παράγοντας το αντίθετο από το επιθυμητό αποτέλεσμα

Περιβαλλοντικοί παράμετροι – προστατευτικά αέρια

- ❑ Σε συγκολλήσεις με δημιουργία κλειδαρότρυπας το He και το Ar ιονίζονται πιο δύσκολα από τα στοιχεία στο εσωτερικό της κλειδαρότρυπας
- ❑ Όντας πιο ψυχρά ψύχουν την επιφάνεια του μητρικού
- ❑ Επίσης η ροή τους αποτρέπει την εκτόνωση του πλάσματος στο εσωτερικό της κλειδαρότρυπας
- ❑ Σαν αποτέλεσμα αποτρέπουν το πλάσμα στο εσωτερικό της κλειδαρότρυπας να επεκταθεί και έξω από αυτή
- ❑ Αυξάνοντας έτσι το συντελεστή απορρόφησης

Παράμετροι σχετικά με τα υλικά

- ❑ Κατάσταση της επιφάνειας
- ❑ Απορροφητικές επιστρώσεις
- ❑ Θερμοκρασία
- ❑ Θερμικές ιδιότητες
- ❑ Δομή και σύσταση του υλικού

Κατάσταση της επιφάνειας

<i>Κατάσταση / Κατεργασία επιφάνειας (χάλυβας)</i>	<i>Συντελεστής απορρόφησης A (%) @ $\sim 1.06\text{--}1.07\ \mu\text{m}$</i>	<i>Reference (link)</i>
<i>Τόρνευση / Πλάνισμα (μηχανουργική, λεία)</i>	<i>$\sim 26\text{--}36\%$</i>	<i>Hipp et al., 2019 (PMC) (ResearchGate)</i>
<i>Αμμοβολή (μέτρια τραχύτητα, $Ra \sim 1\text{--}3\ \mu\text{m}$)</i>	<i>$\sim 50\text{--}70\%$</i>	<i>Bergström, 2008 ↑) (diva-portal.org) · Horangic et al., 2024 (ui.adsabs.harvard.edu)</i>
<i>Ελεγχόμενη οξείδωση</i>	<i>$\sim 60\text{--}80\%$</i>	<i>Hipp et al., 2019 (PMC) · Simonds et al., (link.aps.org)</i>
<i>Εκτεταμένη οξείδωση / σκουριά (μπορεί να είναι ασταθής στη συγκόλληση)</i>	<i>$\sim 70\text{--}85\%$</i>	<i>Volpp et al., 2023 (ResearchGate) · Kügler, 2018, 2019 (MDPI)</i>

Πλεονεκτήματα LBW

- ❑ Μικρή ΘΕΖ
- ❑ Σημαντική μείωση παραμορφώσεων
- ❑ Υψηλής ποιότητας συγκόλληση χωρίς ατέλειες
- ❑ Καλή μηχανική αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης, όχι χειρότερη από το μητρικό
- ❑ Δεν απαιτεί ηλεκτρόδιο ή πληρωτικό μέσο

Πλεονεκτήματα UDW

- ❑ Ιδανική για συγκολλήσεις σε περιορισμένους χώρους και μακριά από το τεμάχιο
- ❑ Παρέχει τη δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις
- ❑ Δεν επηρεάζεται από παραμένον μαγνητισμό στους χάλυβες
- ❑ Γρήγορη συγκόλληση με λίγα περάσματα από τη μία πλευρά
- ❑ Υψηλή επαναληψιμότητα λόγω της αυτοματοποίησης μέσω εμπορικών λογισμικών

Μειονεκτήματα LBW

- ❑ Ακριβή μέθοδος
- ❑ Περιορισμένη φορητότητα (εκτός HPDL)
- ❑ Απαιτεί τη λήψη μέτρων προστασίας λόγω της έκθεσης σε ακτινοβολία
- ❑ Απαιτεί ακριβής τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των τεμαχίων

Εφαρμογές LBW

- ❑ Αεροδιαστημική
- ❑ Αυτοκινητοβιομηχανία
- ❑ Ναυπηγική
- ❑ Ηλεκτρονικά



Ερωτήσεις απορίες