

Συγκολλησιμότητα χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

Ιωάννης Νικολάου

Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

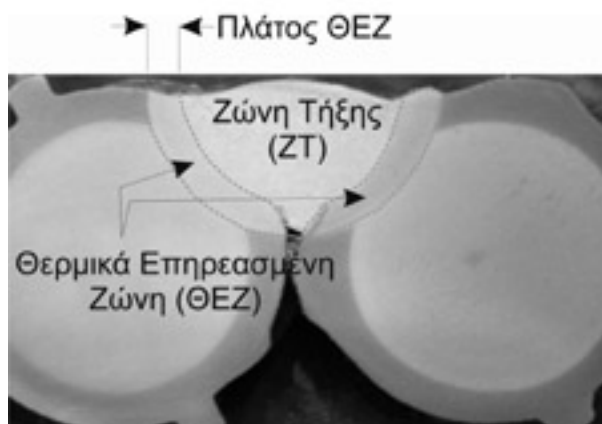
Αναπρωτής Διευθυντής Ποιότητας, ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε.



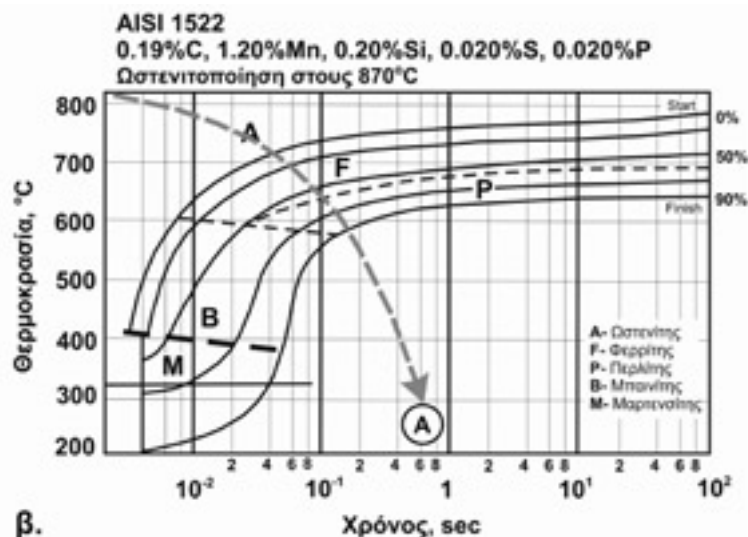
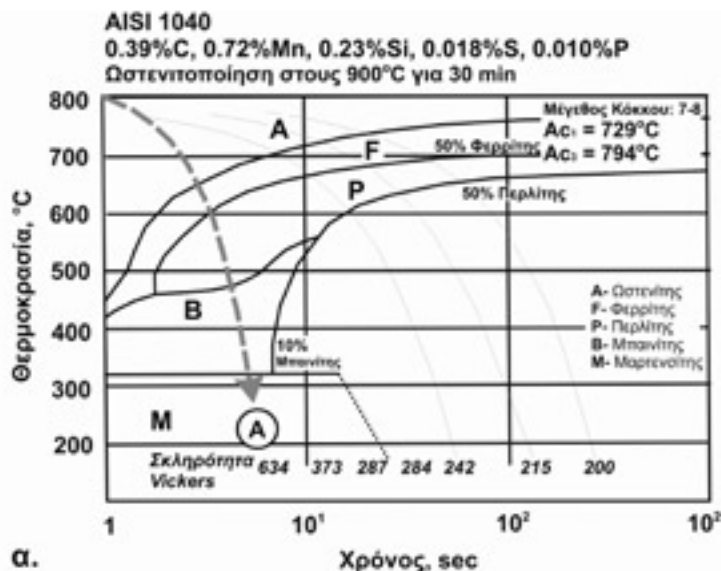
Εισαγωγή

Κάθε διαδικασία συγκόλλησης, επιφέρει μεταβολές στην μικροδομή του μετάλλου, η έκταση των οποίων εξαρτάται από τον τύπο του χάλυβα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και από την θερμική παροχή που προσφέρεται κατά την συγκόλληση. Γενικά, οι ιδιότητες του μετάλλου βάσης, μεταβάλλονται σε μια μικρή περιοχή, που ονομάζεται Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη (ΘΕΖ, Σχήμα 1). Στην περιοχή αυτή εστιάζονται οι κυριότερες μεταβολές της μικροδομής, της μικροσκληρότητας, των μηχανικών ιδιοτήτων και η εμφάνιση παραμενουσών τάσεων. Η έκταση των παραπάνω μεταβολών συνδέεται

με την συγκολλησιμότητα των υλικών. Η συγκολλησιμότητα ενός μετάλλου δεν αντιστοιχεί σε κάποιο συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος αλλά εκφράζει την ευκολία με την οποία μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ικανοποιητικές συγκολλήσεις. Όπως αναφέρεται και στο NF A 35-018 (Produits sidérurgiques - Armatures pour béton armé - Aptitude au soudage, 1978), «οι χάλυβες που θεωρούνται συγκολλησιμοι δεν προϋποθέτουν ειδικές συνθήκες συγκόλλησης και ειδικευμένους συγκολλητές».



Σχήμα 1. Περιοχές συγκόλλησης σε κατάλληλη μεταλλογραφική τομή κατά παράθεση συγκόλλησης ράβδων οπλισμού (Tempcore). Στην ΘΕΖ εστιάζονται κατά κανόνα τα προβλήματα συγκολλησιμότητας των χάλυβων.



Σχήμα 2. Διαγράμματα συνεχούς απόψυξης (CCT) α) για χάλυβα υπό προϋποθέσεις συγκολλησιμο και β) χάλυβα συγκολλησιμο. Στα διαγράμματα με την καμπύλη Α απεικονίζεται ένας τυπικός ρυθμός απόψυξης στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) μιας συγκόλλησης.

Συγκολλησιμότητα χαλύβων

Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα (Ceq, Carbon Equivalent) ενός χάλυβα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συγκολλησιμότητας του. Η κραμάτωση των χαλύβων, δηλαδή η προσθήκη διάφορων κραματικών στοιχείων, έχει σαν σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων στους χάλυβες. Υψηλότερες συγκεντρώσεις στοιχείων, όπως άνθρακα, μαγγάνιο κλπ τείνουν να αυξήσουν την σκληρότητα των χαλύβων αυξάνοντας παράλληλα την αντοχής τους αλλά αντίθετα μειώνοντας την συγκολλησιμότητα τους. Αυτό συμβαίνει διότι, αυξάνοντας την αντοχή του χάλυβα (με κραμάτωση) αυξάνεται αναπόφευκτα και η εμβραπτότητα του. Κάθε κραματικό στοιχείο έχει συγκεκριμένη και ξεχωριστή επίδραση τόσο στην σκλήρωση αλλά και στην συγκολλησιμότητα. Επίσης, υπάρχει τεράστιος αριθμός προϊόντων χάλυβα που προορίζονται για διαφορετικές εφαρμογές και χρήσεις και διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στο είδος των κραματικών στοιχείων όσο και στην περιεκτικότητά τους. Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ χαλύβων με διαφορετική χημική σύσταση, χρησιμοποιείται η περιεκτικότητα σε ισοδύναμο άνθρακα αλλά υπάρχουν και άλλα πρότυπα σύγκρισης όπως η τιμή ισοδύναμου νικελίου ή χρωμίου που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των ανοξείδωτων χαλύβων (Shaefler-Delong διαγράμματα). Αύξηση της τιμής του ισοδύναμου άνθρακα, συνοδεύεται από μείωση της συγκολλησιμότητας των χαλύβων. Ο ισοδύναμος άνθρακας είναι ένα μέγεθος που φανερώνει την συνδυασμένη επίδραση των κραματικών στοιχείων ενός χάλυβα στη συγκολλησιμότητα του.

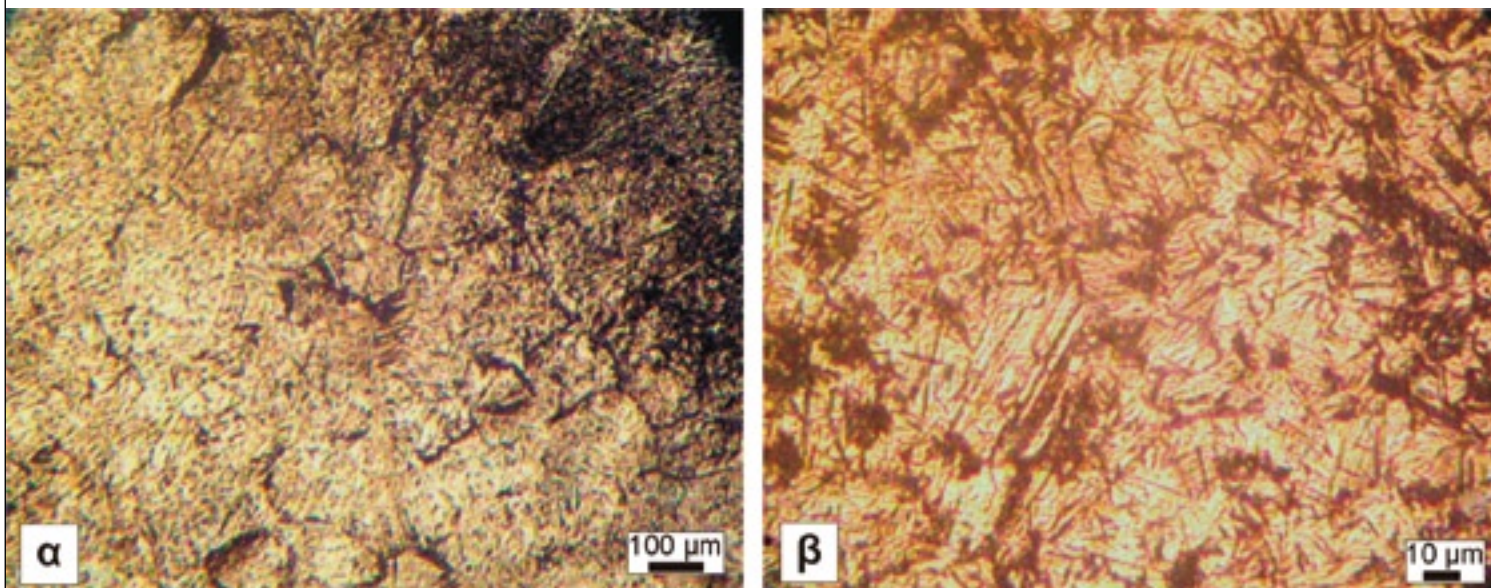
Με βάση ισχύοντα πρότυπα (Κ.Τ.Χ. 2008 και ΕΛΟΤ 1421-3, EN17660), η συγκολλησιμότητα των χαλύβων θεωρείται αποδεκτή μόνο με βάση την χημική τους σύσταση ($C_{eq} < 0,52\%$ στο τελικό προϊόν), όπου:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Εμβραπτότητα χαλύβων

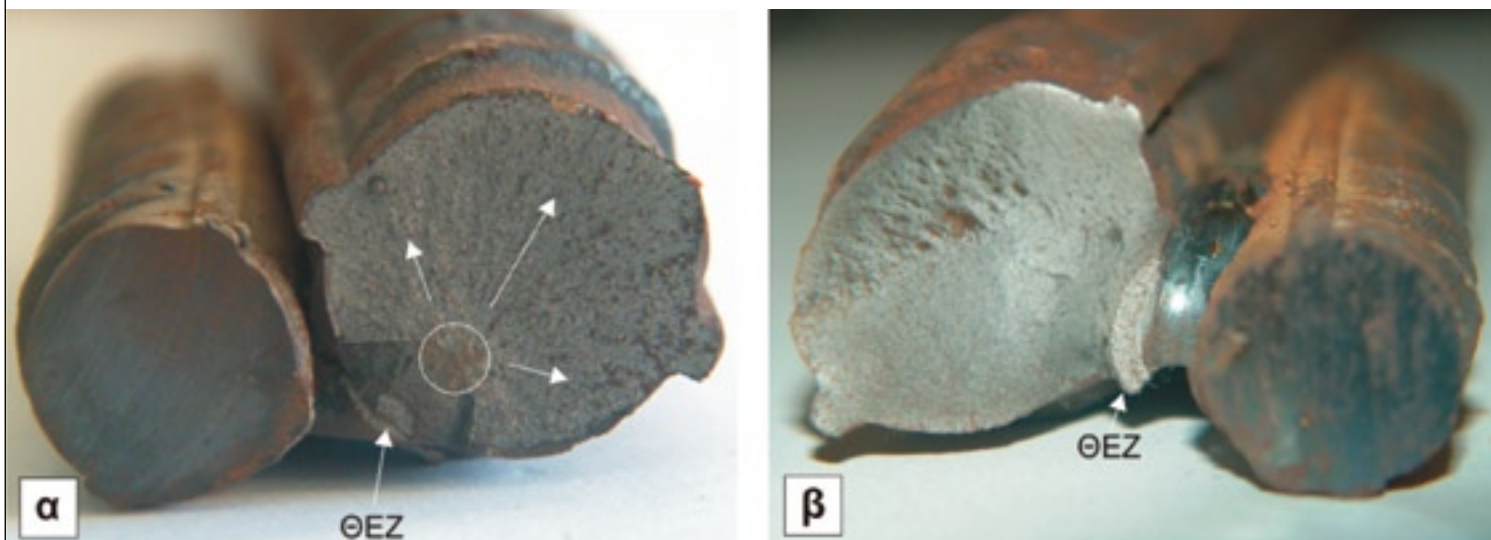
Η εμβραπτότητα ενός χάλυβα συνδέεται με την ευκολία με την οποία δύναται να σκληρύνει δηλαδή να αυξηθεί η αντοχή του με θερμική κατεργασία. Η εμβραπτότητα, όπως και η συγκολλησιμότητα, μπορεί να εκτιμηθεί από την τιμή του ισοδύναμου άνθρακα (Ceq, Carbon Equivalent) ενός χάλυβα. Η εμβραπτότητα ενός χάλυβα περιγράφεται με κατάλληλα διαγράμματα ορισμένα από τα οποία είναι γνωστά ως Διαγράμματα Συνεχούς Απόψυξης (Continuous Cooling Transformation, CCT). Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της μικρογραφικής δομής ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης ενός αντικειμένου δεδομένης χημικής σύστασης και κατ' επέκταση για την πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών. Πρακτικά ο ίδιος χάλυβας μπορεί να παρουσιάζει διαφορετική μικρογραφική δομή και μηχανικά χαρακτηριστικά ανάλογα με τον ρυθμό απόψυξης (°C/sec) που θα του επιβάλλουμε. Η αρχική θερμοκρασία που πρέπει να θερμανθεί ένας χάλυβας πριν την οποιαδήποτε ψύξη είναι συγκεκριμένη και κρίσιμη και καλείται θερμοκρασία ωστενιτοποίησης.

Η εμβραπτότητα των χαλύβων είναι κρίσιμη ιδιότητα διότι κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων παρατηρούνται ταχύτατοι ρυθμοί θέρμανσης και ψύξης. Κάθε περιοχή μιας συγκόλλησης υπόκειται σε έναν κύκλο θέρμανσης και στην συνέχεια ψύξης. Τούτο έχει σαν συνέπεια, στην ΘΕΖ, ο θερμός χάλυβας να ψύχεται με πολύ μεγάλους ρυθμούς (ψύξη από τους 800 οC στους 100 οC σε περίπου 8 sec). Για αυτούς τους ρυθμούς απόψυξης, ένας χάλυβας με υψηλή εμβραπτότητα θα σκληρύνει σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με έναν χάλυβα χαμηλής εμβραπτότητας, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη διαφορετικών μικρογραφικών συστατικών. Ένας χάλυβας με μεγάλη εμβραπτότητα θα εμφανίζει σκληρές και ψαθυρές μικρογραφικές δομές (μαρτενίθης, μπαϊνίθης) ενώ ένας χάλυβας με μικρή εμβραπτότητα θα εμφανίζει λιγότερο σκληρές αλλά περισσότερο όλκιμες φάσεις (Σχήμα 2). Η παρουσία σκληρών δομών στην ΘΕΖ (Σχήμα 3), που οφείλεται στην μεγάλη εμβραπτότητα και άρα στην μειωμένη συγκολλησιμότητα των χαλύβων, ευθύνεται για την ψαθυρή συμπεριφορά των συγκολλήσεων. Αντίθετα, συγκολλησιμοί χάλυβες ($C_{eq} < 0,52\%$) που χαρακτηρίζονται από χαμηλή εμβραπτό-



Σχήμα 3. Οπτικές μικρογραφίες στο όριο της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ) και της Ζώνης Τήξης (ΖΤ) συγκολλήσεων με επικάλυψη, σε χάλυβες οπλισμού μη συγκολλησίμων χάλυβων α) γενική άποψη και β) μεγαλύτερη μεγέθυνση της ΘΕΖ. Παρατηρείται η τυπική βελονοειδής μαρτενιτική δομή που συνδέεται με αυξημένη σκληρότητα αλλά μειωμένη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης (ψαθυρότητα), γεγονός που αποδεικνύει την μειωμένη συγκολλησιμότητα των χάλυβων.

Σχήμα 4. Μακροσκοπική άποψη της επιφάνειας θραύσης συγκολλημένης ράβδου χάλυβα α) ψαθυρή θραύση μη συγκολλησίμου ($C_{eq} \sim 0,60 \%$), και β) όγκιμη θραύση συγκολλησίμου ($C_{eq} < 0,52\%$).



τητα εμφανίζουν μειωμένο τον κίνδυνο δημιουργίας σκληρών (και άρα ψαθυρών) δομών με αποτέλεσμα παρά τους ταχύτατους ρυθμούς απόψυξης που παρατηρούνται κατά τις συγκολλήσεις να επιτυγχάνονται υγιείς συγκολλήσεις.

Συγκολλησίμοι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αύξηση της κραμάτωσης ενός χάλυβα οδηγεί σε σκλήρωση του, δηλαδή σε αύξηση της αντοχής του. Στην περίπτωση των χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος, η εφελκυστική αντοχή τους όσο και η τάση διαρροής τους εξαρτάται σε με-

γάλο βαθμό από την περιεκτικότητά τους σε κραματικά στοιχεία. Η επίτευξη της επιθυμητής αντοχής στους χάλυβες μόνο με κραμάτωση θα τους καθιστούσε συγκολλησίμους μόνο με ειδικές συνθήκες συγκόλλησης (μη συγκολλησίμους) καθώς αύξηση της αντοχής με κραμάτωση επιδρά αρνητικά στην συγκολλησιμότητα. Η υιοθέτηση των συγκολλήσεων με την ταυτόχρονη ζήτηση χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (από το 1960 και μετά), οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης ποιοτήτων χάλυβα που να συνδυάζουν υψηλή αντοχή και ικανοποιητική συγκολλησιμότητα. Γενικά, η συγκολλησιμότητα των χάλυβων βρίσκεται σε αντίθεση με την απαίτηση αύξησης της αντοχής στο γεγονός ότι η κραμάτωση των χάλυβων με σκοπό την αύξηση της αντοχής μειώνει ταυτόχρονα την συγκολλησι-



μότητα του χάλυβα. Για τον λόγο αυτό, στις αρχές της δεκαετίας του '70, αναπτύσσεται στο Βέλγιο από τους Econopopoulos et al (1975) μία παραγωγική διαδικασία χαλύβων οπλισμού που για βασίζεται σε συγκεκριμένη θερμική κατεργασία παραγωγής. Η μέθοδος αξιοποιεί την μειωμένη εμβαπτότητα των χαλύβων για αύξηση της αντοχής τους διατηρώντας σε χαμηλές τιμές (<0,50%) την περιεκτικότητα σε ισοδύναμο άνθρακα. Η μέθοδος αποτελεί την πλέον οικονομική λύση για την παραγωγή υψηλής ποιότητας χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος που συνδυάζουν υψηλή αντοχή, υψηλή ολκιμότητα και εξαιρετική συγκολλησιμότητα (χάλυβες Tempcore). Δεν είναι τυχαία η σχεδόν πλήρης επικράτηση της παραγωγικής μεθόδου καθώς η συντριπτική πλειονότητα των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος στην Ελλάδα και στην Ευρώπη παράγονται με μεθόδους θερμικής κατεργασίας που βασίζονται στην μέθοδο Tempcore.

Βιβλιογραφία

1. Defourny J., Bragard A. "Guide for the welding and weldability of reinforcing steels for concrete structures" *Welding in the World*, Vol. 24 (11/12) 1986, pp.260-276.
2. ACI Committee 439 "Steel Reinforcement-Physical Properties and U.S. Availability", *ACI Materials Journal*, January-February 1989, pp: 63-76.
3. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.) 2008.
4. ENV 10080/98 "Steel for the reinforcement of concrete – Weldable ribbed reinforcing steel B 500 – Technical delivery conditions for bars, coils and weldable fabric" 1998.
5. prEN ISO 17660 "Welding of reinforcing steel" 2002.
6. Econopopoulos M., Respen Y., Lessel G., Steffes G. "Application of the Tempcore Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Bars", C.R.M. No. 45, December 1975, pp: 1-17.
7. J. Nikolaou, G. D. Papadimitriou "Mechanical properties of lap-welded reinforcing steel bars used for repairing damaged reinforced concrete structures" *Materials & Structures* 37 (274) (2004) 698-706.