

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΡΑΒΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΡΑΒΔΩΝ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Α.Φ. Φωτόπουλος

Εργαστηριακός συνεργάτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Δ.Γ. Παπαγεωργίου

Εργαστηριακός συνεργάτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Β.Α. Σκαράκης

Διευθυντής παραγωγής, Χαλυβουργική Α.Ε. Βιομηχανία Χάλυβα, 20ο χιλ. ΕΟΑΚ,19200,Ελευσίνα

Κ. Μέντρεα

Εργαστηριακός συνεργάτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Λέξεις κλειδιά: Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος, μηχανικές ιδιότητες, θερμικές κατεργασίες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συγκολλησίμος χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος B500c παράγεται με θερμή έλαση, επιφανειακή βαφή και αυτο-επαναφορά. Η διατομή του χάλυβα παρουσιάζει ανομοιογένεια δομής και κατά συνέπεια και σκληρότητας. Η παρούσα εργασία επιχειρεί την αντιστοίχιση της κρυσταλλικής δομής και της σκληρότητας συγκεκριμένου σημείου διατομής της ράβδου αναφοράς (όπως παρέχεται στο εμπόριο) με ράβδο του ίδιου χάλυβα (ράβδος προσομοίωσης) μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. Η χαρτογράφηση των μηχανικών ιδιοτήτων κατά μήκος της διαμέτρου και η μελέτη της συμπεριφοράς σε εφελκυστική φόρτιση των δύο ακραίων κυρίων δομών έχει σκοπό την εύρεση της κατανομής των δυο στρωμάτων (πάχος, σκληρότητα).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ποιότητα των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος χαίρεται ιδιαίτερη προσοχή λόγω της έντονης ανοικοδόμησης. Οι προδιαγραφές περιγράφουν με αυστηρότητα τους χάλυβες ως προς το μέγεθος, το βάρος, την χημική σύσταση, την συγκολλησιμότητα, την συνδεσμολογία, τους ελέγχους και τις αντοχές τους (Trevorrow, 1984).

Στην Ελλάδα, ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος αναφέρεται αναλυτικά στις γενικές και ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται στην παραγωγή τους (KTX, 2007). Η αύξηση των απαιτήσεων του πελάτη και ο ανταγωνισμός μεταξύ παραγωγών προκαλεί τους ερευνητές στην συνεχή βελτίωση των χαλύβων. Μελέτες διεξάγονται με σκοπό την αύξηση της αντοχής σε διάβρωση (Αποστολόπουλος, 2007, Παπαδόπουλος, 2007, Γαλανού, 2007) στην βελτίωση συνδεσμολογίας (Campione, 2005, Kayali, 2000) ή στην χρήση χάλυβα για ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Lee, 2003, Wen, 2000).

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε χάλυβα B500C. Ράβδοι κυκλικής διατομής παράγονται από μπιγέτες με κατά σειρά έλαση εν θερμό. Στο τελευταίο στάδιο της παραμόρφωσης το υλικό υφίσταται επιφανειακή θερμική κατεργασία με βαφή σε νερό και αυτό-επιαναφορά. (ΕΛΛΟΤ EN 2001). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η διατομή του χάλυβα παρουσιάζει ένα εξωτερικό φλοιό επαναφερμένου μαρτενσίτη και ένα πυρήνα φερριτοπεριλιτικής δομής. Η σύνθετη αυτή δομή μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις των προδιαγραφών, τόσο ως προς τις αντοχές, όσο και ως προς την ολκιμότητα και την συγκολλησιμότητα, εφόσον εξασφαλίζεται συγκεκριμένη κατανομή των δύο στρωμάτων. Η ακριβής μικροδομή είναι συνάρτηση της χημικής σύστασης της μπιγιέτας, της διαμέτρου της ράβδου, της θερμοκρασίας έλασης, της έντασης της ψύξης στο πρώτο στάδιο και της θερμοκρασίας στην οποία εξισώνονται οι θερμοκρασίες εξωτερικού φλοιού και πυρήνα (Μαυροειδής, 2005). Στην εργασία επιχειρείται η χαρτογράφηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της δομής κατά μήκος της διαμέτρου ράβδου όπως παράγεται στην βιομηχανία, με σκοπό την εύρεση της κατανομής των δυο στρωμάτων (πάχος, σκληρότητα).

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η μελέτη αναφέρεται σε χάλυβα B500c, κυκλικής ονομαστικής διατομής Φ20. Ομάδες τεσσάρων δοκιμίων (ράβδοι προσομοίωσης) υποβάλλονται σε θερμικές κατεργασίες, με σκοπό την επίτευξη δομής που παρουσιάζει ο χάλυβας παραγωγής σε ορισμένα σημεία, κατά μήκος της διατομής του. Οι θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν είναι:

1. Μαρτενσιτική βαφή: προθέρμανση στους 650°C για 45 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 905°C για 42 λεπτά, ψύξη σε νερό.

2. Μαρτενσιτική βαφή με προθέρμανση στους 650°C για 45 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 905°C για 42 λεπτά ,ψύξη σε νερό και επαναφορά στους 550°C για 2 ώρες.

3. Μαρτενσιτική βαφή με προθέρμανση στους 650°C για 45 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 905°C για 42 λεπτά ,ψύξη σε νερό και επαναφορά στους 650°C για 2 ώρες

4. Ανόπτηση εξομάλυνσης με προθέρμανση στους 650°C για 45 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 905°C για 42 λεπτά και ψύξη στον αέρα.

5. Προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση με προθέρμανση στους 650°C για 45 λεπτά, ωστενιτοποίηση στους 905°C για 42 λεπτά , απόψυξη για τις πρώτες 3 ώρες με ρυθμό 10 °C/h στο φούρνο , εν συνεχεία απόψυξη στο φούρνο.

Για την δειγματοληψία επιλέχτηκε δέμα μιας βέργας από τυχαίο χυτήριο της γραμμής παραγωγής. Τα δοκίμια κόπηκαν με περιστρεφόμενο τροχό σε μήκος 290 mm και ταυτοποιήθηκαν με αριθμούς από το 1 έως το 30(οι οποίοι χαραχθηκαν στις δύο εκατέρωθεν διατομές).

Εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες με δοκιμή εφελκυσμού με στατική φόρτιση και με μετρήσεις σκληρότητας .Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε με σταθερό ρυθμό φόρτισης..Η σκληρότητα μετρήθηκε βάσει προδιαγραφών, με την μέθοδο HRC και HRB και εκτιμάται ως μέσος όρος 4 μετρήσεων.

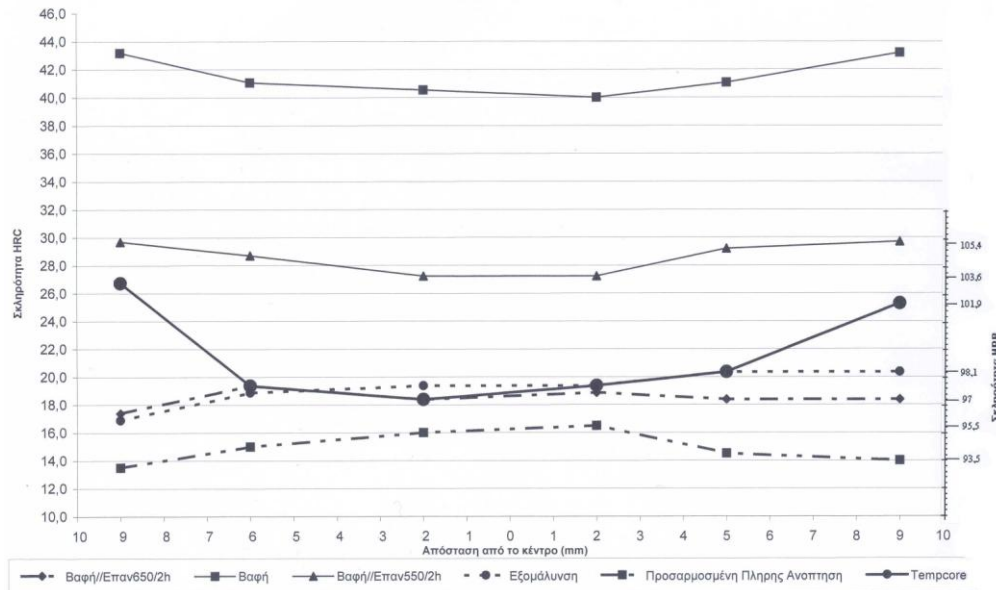
Μία σειρά δοκιμίων Φ20x20mm προετοιμάσθηκε για μεταλλογραφική ανάλυση. Χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων φακών. Τα δοκίμια κόπηκαν από τους ράβδους προσομοίωσης και εγκιβωτίστηκαν εν θερμώ σε θερμοσκληρυνόμενο βακελίτη. Για την χημική προσβολή χρησιμοποιήθηκε Nital 3% .

Μία ομάδα δοκιμίων κατευθείαν από την παραγωγή (ράβδοι αναφοράς) υφίσταται μεταλλογραφικό έλεγχο και προσδιορίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους . Καταγράφονται η δομή και οι μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος της διατομής και πραγματοποιείται χαρτογράφηση της κατανομής τους και αντιστοίχιση με τις ράβδους προσομοίωσης.

Η δειγματοληψία, η κοπή των ράβδων και οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας της Χαλυβουργικής Α.Ε. Οι θερμικές κατεργασίες ,η μετρήσεις σκληρότητας και η μεταλλογραφική ανάλυση πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Τ.Ε.Ι. Πειραιά.Η κοπή των δοκιμίων και ο εγκιβωτισμός πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο της Εταιρείας Olympic Airways.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η σκληρότητα των δοκιμίων κατά μήκος της διατομής τους. Σε όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης η κατανομή σκληρότητας κατά μήκος της διαμέτρου παρουσιάζει απόκλιση ± 1.5 HRC. Η διαφορά θεωρείται αποδεκτή αφού πλησιάζει την απαίτηση προδιαγραφών σε σχέση με την ομοιογένεια των πρότυπων δοκιμίων (± 1.0 HRC).



Εικόνα 1.Κατανομή της σκληρότητας κατά μήκος της διατομής

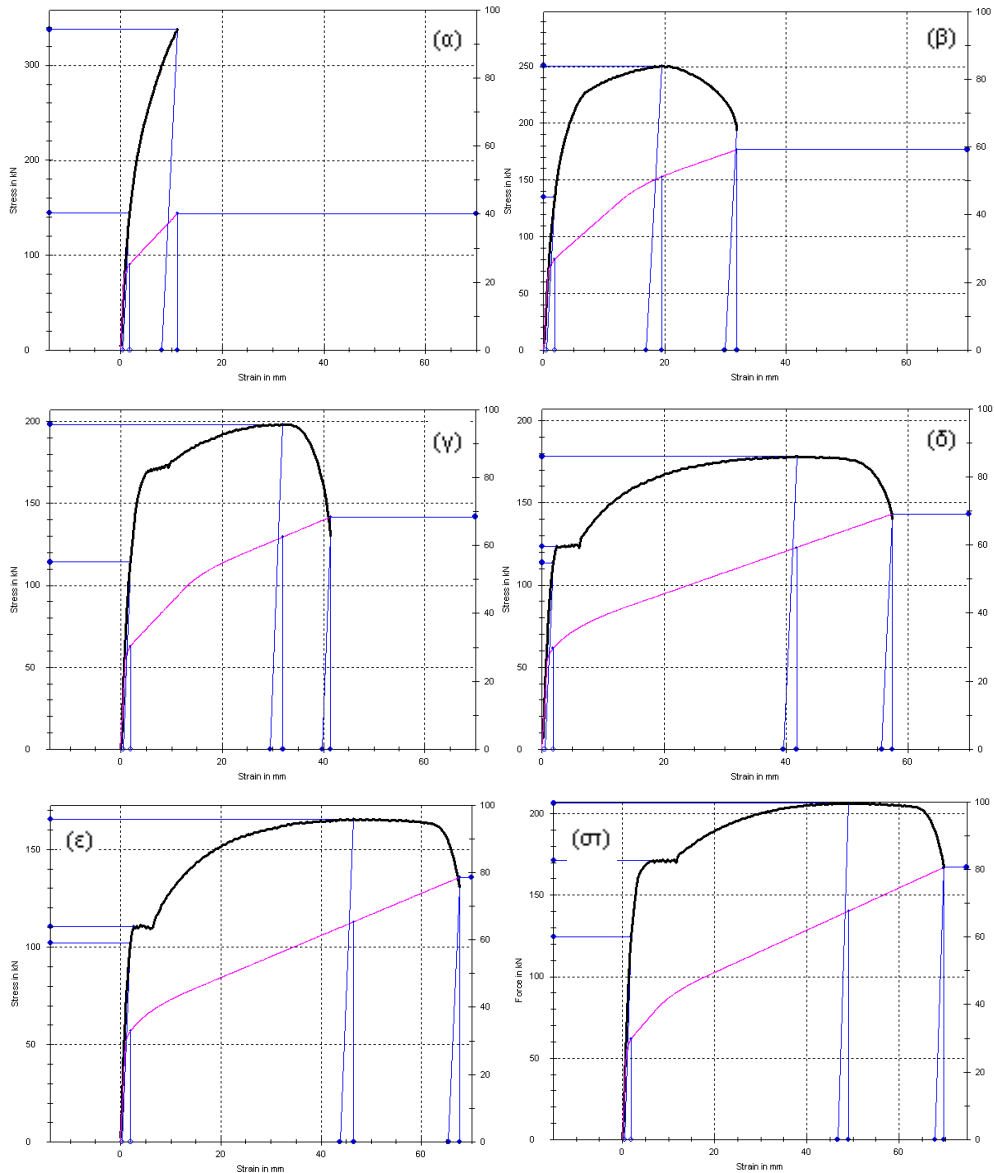
Η σκληρότητα που αποκτάται μετά την βαφή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την σκληρότητα που παρουσιάζει η ΘΕ-Θ στα άκρα της διαμέτρου (29,7 HRC αντί για 43,2 HRC) αλλά χαμηλότερη σε σχέση με την σκληρότητα που παρουσιάζει ο μάρτενσίτης σε χάλυβα με την ίδια χημική σύσταση (54, 5 HRC αντί για 43 HRC). Η μεγάλη αυτή διαφορά αποδεικνύει ότι η θερμοκρασία της καρδιάς της ράβδου μετά τον ψεκασμό με νερό, είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίζει την επαναφορά και ο παραγόμενος χάλυβας δεν μπορεί να παρουσιάζει σε καμία περίπτωση μαρτενσιτική δομή στην εξωτερική στεφάνη.

Η βαφή με επαναφορά στους 550 °C έδωσε σκληρότητα που προσεγγίζει την σκληρότητα της ράβδου αναφοράς στα άκρα της διατομής και η δομή της μπορεί να αναζητηθεί στην περιοχή αυτή.

Στην περίπτωση της εξομάλυνσης και της βαφής με επαναφορά στους 650 °C οι τιμές σκληρότητας πλησιάζουν πάρα πολύ την σκληρότητα της καρδιάς της ράβδου αναφοράς (την φερριτοπερλιτική περιοχή).

Η προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση έδωσε χαμηλότερη σκληρότητα και η δομή της δεν μπορεί να αναζητείται στην διατομή της ράβδου αναφοράς.

Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα εφελκυσμού των ράβδων προσομοίωσης σε σχέση με την ράβδο αναφοράς (ΘΕ-Θ) και στον Πίνακα 1 δίνονται οι τιμές των αντίστοιχων μηχανικών ιδιοτήτων.



Εικόνα 2. Διαγράμματα εφελκυσμού σ - ϵ , μετά από (α) βαφή , (β) βαφή και επαναφορά στους $550^{\circ}\text{C}/2\text{h}$, (γ) βαφή και επαναφορά στους $650^{\circ}\text{C}/2\text{h}$, (δ) εξομάλυνση , (ε) προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση , (στ) ως έχει (ΘΕ-Θ).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά μεγέθη μετά την δοκιμή εφελκυσμού.

Θερμική κατεργασία Μηχ. Ιδιότητες	Βαφή	Βαφή & Επαναφορά (550 ⁰ C/2h)	Βαφή & Επαναφορά (650 ⁰ C/2h)	Εξομάλυνση	Προσαρμοσμένη Πλήρης Ανόπτηση	ΘΕ-Θ
$f_{0,2}$ (N/mm ²)	391	416	383	349	329	390
f_y (N/mm ²)	-----	747	523	568	526	547
$F_{y,nom}$ (N)	-----	234.745	164.329	124.323	110.974	171.817
f_t (N/mm ²)	1126,3	796,5	606,1	567,7	526,0	658,5
F_t (N)	353.880	250.247	190.439	178.376	165.261	206.899
f_t/f_y	-----	1,07	1,16	1,43	1,49	1,20
K_s (J/mm ³)	0,0803	0,0694	0,0615	0,1119	0,1112	0,0953
Agt(%)	6,31	9,33	10,69	19,19	19,57	13,97

Τα συμβατικά όρια διαρροής δεν δίνουν σαφή εικόνα για την κάθε περίπτωση. Τα φανερά όρια διαρροής παρουσιάζουν ομοιότητες. Οι τιμές βρίσκονται σχετικά κοντά στην μετά από την βαφή με επαναφορά στους 650⁰C/2h και μετά από την προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση και είναι κατά 3% χαμηλότερες σε σχέση με το ΘΕ-Θ. Η εξομάλυνση έχει υψηλότερη τιμή κατά 3.8 % σε σχέση με το ΘΕ-Θ. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση της βαφής με επαναφορά στους 550⁰C/2h που παρουσιάζει μεγάλη αύξηση (κατά 36.5%). Σε όλες τις περιπτώσεις το όριο διαρροής πλήρη την απαίτηση του KTX 2007 ($f_{y,min} = 485 \text{ N/mm}^2$).

Το όριο θραύσης μετά την βαφή είναι πολύ μεγαλύτερο, σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η βαφή με επαναφορά στους 550⁰C/2h παρουσιάζει αύξηση 21%, η βαφή με επαναφορά στους 650⁰C/2h, μείωση 8%, η εξομάλυνση, μείωση 13,8% και η προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση μείωση 23.3% σε σχέση με τους ράβδους αναφοράς (ΘΕ-Θ).

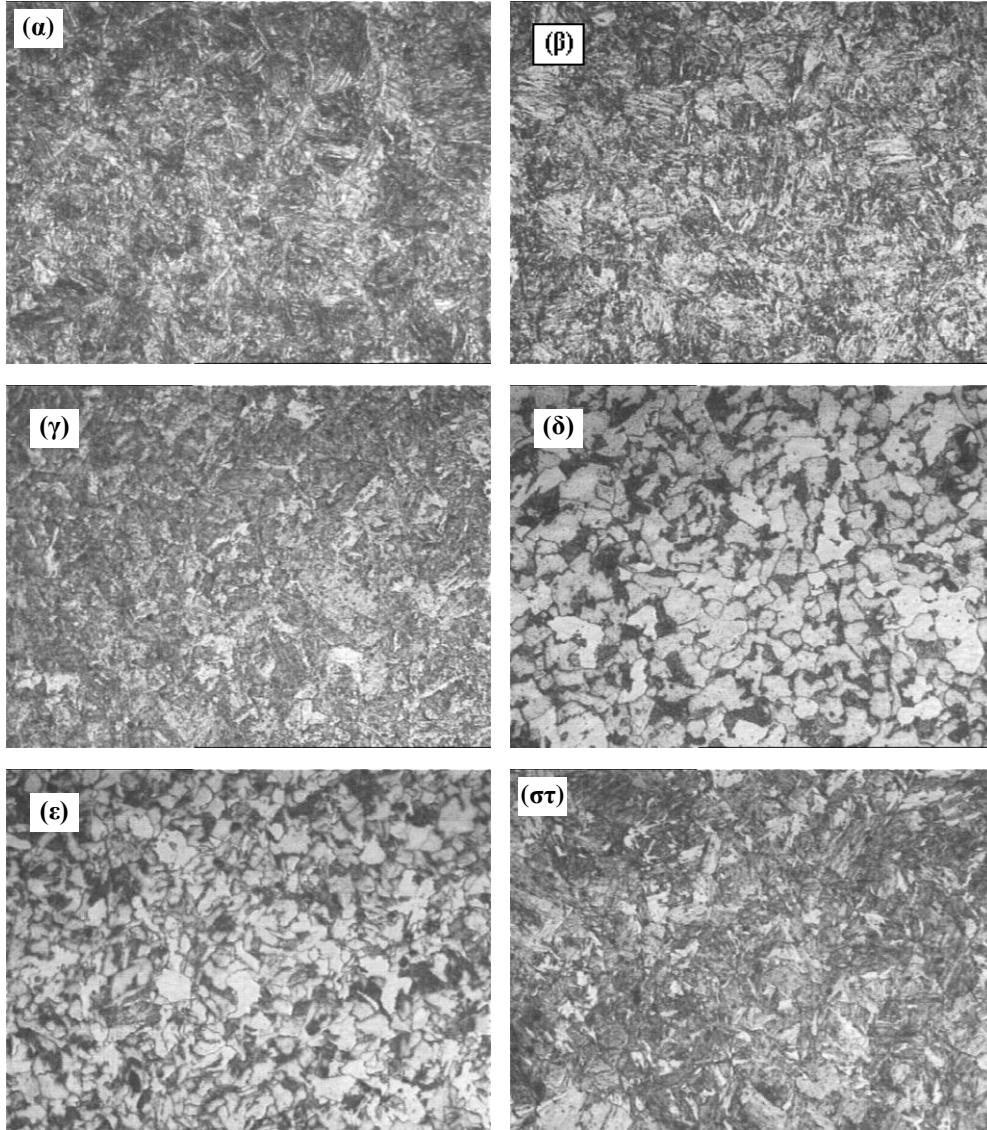
Ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής σε μία περίπτωση προσομοίωσης συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις KTX 2007 ($1,13 < f_t/f_y < 1,37$).

Η στατική δυσθραυστότητα στις περιπτώσεις της επιβελτίωσης παρουσιάζει τις ελάχιστες τιμές (μείωση κατά 27% και 35% αντίστοιχα). Η αύξηση της δυσθραυστότητας μετά την βαφή δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω ψαθυρής συμπεριφοράς του υλικού. Η εξομάλυνση και η προσαρμοσμένη πλήρη ανόπτηση παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές και μικρή αύξηση σε σχέση με την περίπτωση ΘΕ-Θ (κατά 17%).

Η ποσοστιαία ολική επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο παίρνει τιμές εντός κανονισμού KTX 07, σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης με εξαίρεση την

βαφή ($A_{gt,min}=7\%$). Μετά την επιβελτίωση οι τιμές είναι χαμηλότερες σε σχέση με τους ράβδους αναφοράς, ενώ μετά από την εξομάλυνση και την πλήρη ανόπτηση (όλκιμες δομές) είναι υψηλότερες.

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει την μεταλλογραφική δομή κάθε περίπτωσης προσομοίωσης σε σχέση με την ράβδο αναφοράς



Εικόνα 3. Κρυσταλική δομή των ράβδων μετά από α) Βαφή Mx500 β) Βαφή με Επαναφορά 550°C/2h Mx500 γ) Βαφή με Επαναφορά 650°C/2h Mx500 δ) Εξομάλυνση Mx500 ε) ΘΕ-Θ, Κέντρο διατομής Mx500 στ) ΘΕ-Θ, άκρη διατομής Mx500 [Nital 3%]

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πλήρης βαφή του χάλυβα B500c δεν επιτεύχθηκε λόγω του χαμηλού ποσοστού άνθρακα. Μικρή ποσότητα ωστενίτη μετασηματίστηκε σε φερρίτη ,με συνέπεια την μείωση της σκληρότητας και την εμφάνιση μίας μικρής πλαστικής παραμόρφωσης πριν την ψαθυρή θραύση.

Το κέντρο της διατομής της ράβδου αναφοράς έχει ίδια σκληρότητα με τις περιπτώσεις εξομάλυνσης και βαφής με επαναφορά στους 650⁰C. Παράλληλα, η μεταλλογραφική ανάλυση έδειξε στο κέντρο της ράβδου αναφοράς ίδια δομή με την εξομάλυνση ενώ στην εξωτερική στοιβάδα , ίδια δομή με την περίπτωση της βαφής με επαναφορά στους 650⁰C. Σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να παρουσιάζει μαρτενσιτική δομή.

Η εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων αποδεικνύει ότι ο χάλυβας παραγόμενος με ΘΕ-Θ παρουσιάζει μια μεικτή, απόλυτα ισορροπημένη , συμπεριφορά που συνδυάζει τις περιπτώσεις επιβελτίωσης στην εξωτερική στεφάνη και εξομάλυνσης στην καρδιά.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Apostolopoulos, Ch. Alk., "Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore under low cycle fatigue", Construction and Building materials, No21(2007)1447-1456.

Camione, G., Cucchiara, L., La Mendola , M., Papia, M., "Steel-concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions", Engineering Structures, No 27 (2005)881-890.

Γαλανού, Μ., Μπατής, Γ., Σιδεράς, Κ.Κ., " Προστασία χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος εντός και εκτός σκυροδέματος ,με αναστολές διάβρωσης", στα Πρακτικά του 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μεταλλικών Υλικών(Πάτρα,Ελλάδα,06-07 Δεκεμβρίου2007)495-500.

Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ,ΚΤΧ Αθήνα,(2007) .

Kayali,O., Stephen,R.Y., :Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete", Cement and Concrete compositesNo22(2000)459-467.

Lee, M.K., Barr, B.I.G., "Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete", Cement & ConcreteNo25(2003) 321-332.

Μαυροειδής, Π., " Μέθοδοι παραγωγής χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ", στο "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος", Εκδ. Παπασωτηρίου , Αθήνα (2005),35-62.

Παπαδόπουλος, Μ., Αποστόλόπουλος, Χ.,” Επίδραση της διάβρωσης και του μεγέθους διατομής στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα B500c”, στα Πρακτικά του 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μεταλλικών Υλικών(Πάτρα,Ελλάδα,06-07 Δεκεμβρίου2007)551-556.

Trevorrow, A., “Type of steel reinforcement”, in”Steel reinforcement”, ed. Construction Press, New York, USA,(1984)14-32.

Wen, S., Chung, D.D.L., “Enhancing the vibration reduction ability of concrete by using steel reinforcement and steel surface treatments”, Cement and Concrete Research, No 30 (2000) 327-330.

