

ΕΠΙΡΡΟΗ ΥΠΟΚΡΙΣΙΜΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ ΙΔΙΑ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗ

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

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

Βασίλειος Σκαράκης
Υπεύθυνος παραγωγής, Χαλυβουργική Α.Ε. Βιομηχανία Χάλυβα, 20ο χιλ. ΕΟΑΚ, 19200, Ελευσίνα

Αριάδνη Γερακάρη
Απόφοιτος Τμήματος Πολιτικών Δομικών Έργων, Τ.Ε.Ι. Πειραιά-ΣΤΕΦ, Π. Ράλλη & Θηβών 250,12244 Αιγάλεω, Αθήνα

Λέξεις κλειδιά: χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος, μηχανικές ιδιότητες, εργοσκλήρυνση, αναθέρμανση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Η έκθεση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος σε υποκρίσιμες θερμοκρασίες, προκαλεί αλλαγές στην κρυσταλλική δομή του, με άμεσες συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες του. Εάν, προηγουμένως ο χάλυβας έχει υποστεί τοπική ενδοτράχυνση, η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να εμφανιστεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ή για μικρότερη χρονικά έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία. Δοκίμια από χάλυβα B500C υποβάλλονται σε εφελκυστική ενδοτράχυνση και υφίστανται υποκρίσιμες θερμικές κατεργασίες, με σκοπό την προσομοίωση πραγματικών περιπτώσεων τοπικής αναθέρμανσης. Προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες και εκτιμώνται οι ποσοστιαίες μεταβολές τους σε σχέση με τον βαθμό εργοσκλήρυνσης και την θερμοκρασία αναθέρμανσης.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ράβδοι από χάλυβα B500C με διάμετρο $\Phi 20$ υποβλήθηκαν σε θέρμανση σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Δοκίμια μήκους 450mm κόπηκαν από τυχαίο δέμα ίδιου χυτηρίου. Επιλέγησαν δύο ομάδες των 20 δοκιμίων η καθεμία. Η ομάδα X_{ij} υπέστη θερμικές κατεργασίες σε κατάσταση παραλαβής. Η ομάδα M_{1ij} υπέστη θερμικές κατεργασίες μετά από μικρού βαθμού εργοσκλήρυνση. Οι δείκτες i και j χαρακτηρίζουν την υποκρίσιμη θερμική κατεργασία και τον αριθμό του δοκιμίου αντίστοιχα.

Η εργοσκλήρυνση προκλήθηκε σε μηχανήμα δοκιμής εφελκυσμού με στατική φόρτιση. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε ξεχωριστά δοκίμια «πιλότους» και επιλέχθηκε καταπόνηση στο 10% της ολικής επιμήκυνσης, περίπτωση που αντιστοιχεί σε 7,667 % ποσοστού εργοσκλήρυνσης.

Για την θέρμανση επιλέχθηκαν οι εξής θερμικές κατεργασίες:

1. Θέρμανση στους 250°C, για 2 ώρες, ψύξη στον αέρα.
2. Θέρμανση στους 450°C, για 2 ώρες, ψύξη στον αέρα.
3. Θέρμανση στους 550°C, για 2 ώρες, ψύξη στον αέρα.
4. Θέρμανση στους 650°C, για 2 ώρες, ψύξη στον αέρα.

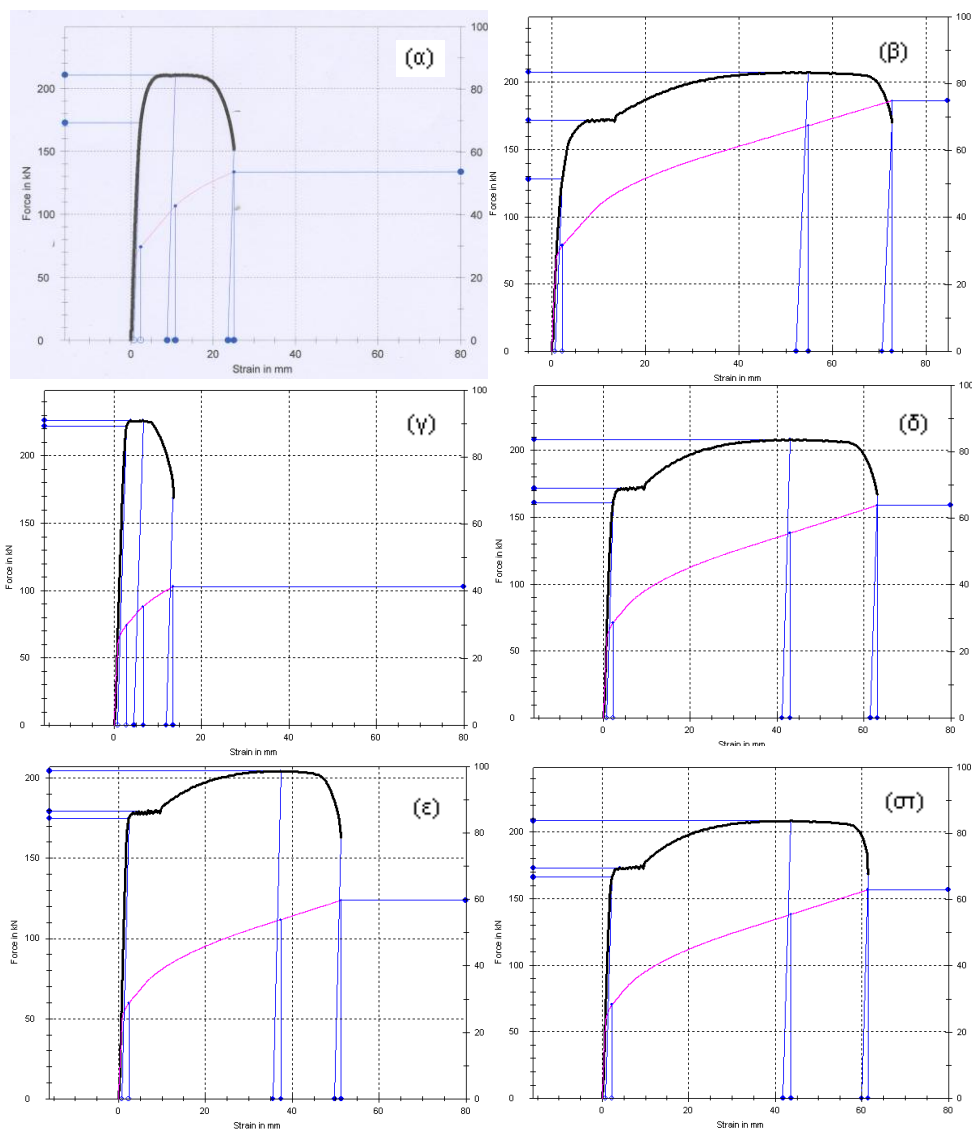
Για την μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μετά από ενδεχόμενη θέρμανση καθώς και η επιρροή του βαθμού εργοσκλήρυνσης στην ενδεχόμενη μεταβολή, όλοι οι ράβδοι υπέστησαν δοκιμή εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα μιας ομάδας ράβδων σε κατάσταση παραλαβής. (Ως έχει, από την παραγωγή).

Συνολικά εφελκύθηκαν δέκα ομάδες των τεσσάρων δοκιμίων, πέντε ομάδες για την απλή αναθέρμανση και πέντε ομάδες για την εργοσκλήρυνση. Οι ράβδοι προχαράχθηκαν ανά διαστήματα των 5mm πριν την εργοσκλήρυνση και επαναχαράχθηκαν εκ νέου σε διαφορετικό σημείο πριν την δοκιμή εφελκυσμού μέχρι θραύσης.

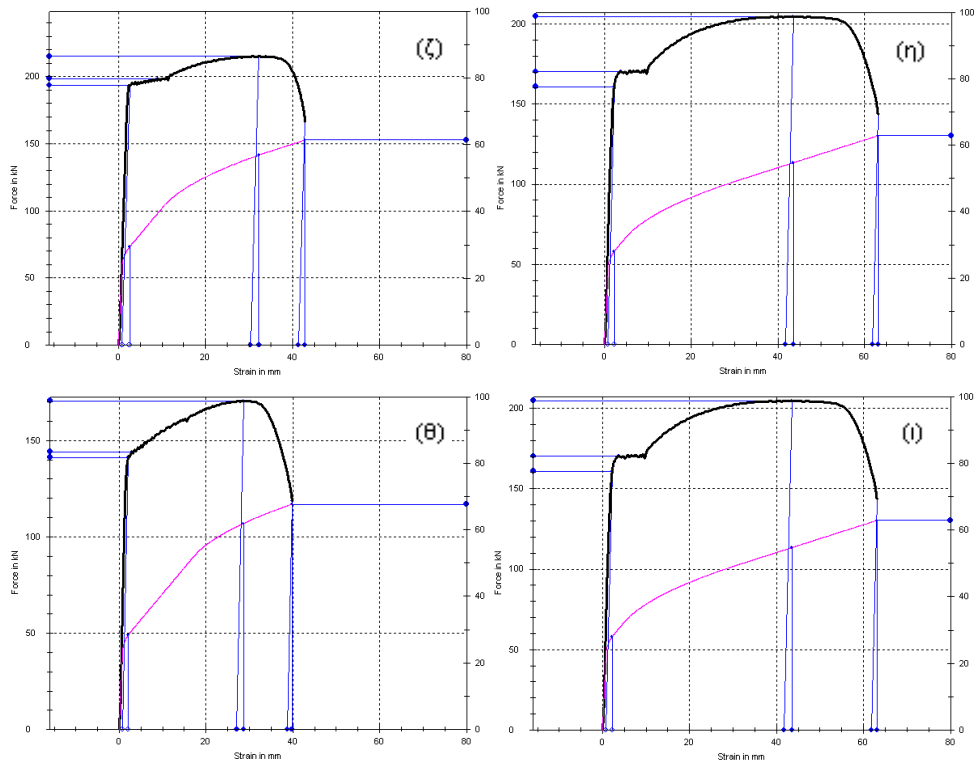
Η δειγματοληψία, η κοπή των ράβδων και οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας της Χαλυβουργικής Α.Ε. Οι θερμικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει τα διαγράμματα εφελκυσμού και οι Πίνακες 1 και 2 δίνουν τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες μετά την δοκιμή εφελκυσμού στην περίπτωση απλής θέρμανσης και θέρμανσης μετά από ενδοτράχυνση, αντίστοιχα.



Εικόνα1. Διάγραμμα εφελκυσμού: α) μόνο εργοσκλήρυνση, β) ως έχει γ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 250⁰C , δ) αναθέρμανση στους 250⁰C, ε) αναθέρμανση στους 450⁰C, στ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 450⁰C. ζ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 550⁰C , η) αναθέρμανση στους 550⁰C, θ) αναθέρμανση στους 650⁰C, ι) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 650⁰C.



Εικόνα 1. Διάγραμμα εφελκυσμού: α) μόνο εργοσκλήρυνση, β) ως έχει γ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 250°C, δ) αναθέρμανση στους 250°C, ε) αναθέρμανση στους 450°C, στ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 450°C. ζ) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 550°C, η) αναθέρμανση στους 550°C, θ) αναθέρμανση στους 650°C, ι) εργοσκλήρυνση και αναθέρμανση στους 650°C.

Στην περίπτωση δοκιμών όπως προέρχονται από την παραγωγή, το συμβατικό όριο διαρροής αυξάνεται κατά 26% για την θέρμανση στους 250°C, κατά 28% για την θέρμανση στους 450°C, κατά 24% για την θέρμανση στους 550°C και κατά 7.5% για την θέρμανση στους 650°C.

Το φανερό όριο διαρροής δεν αλλάζει για τις πρώτες θερμικές κατεργασίες (αυξάνεται κατά 1% για θέρμανση στους 450°C ενώ μειώνεται κατά 1% για θέρμανση στους 550°C) ενώ μειώνεται κατά 17.5% για θέρμανση στους 650°C. Η δραστική μείωση οφείλεται στην αύξηση των φερριτο-περλιτικών κοκκών της καρδιάς του χάλυβα. Η θέρμανση στους 650°C καθιστά τον χάλυβα εκτός προδιαγραφών KTX 2007 ($F_y = 451 \text{ N/mm}^2 < 485 \text{ N/mm}^2$).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού χωρίς εργοσκήρυση.

Μηχανικές Ιδιότητες Περίπτωση	$f_{p0,2}$ (N/mm ²)	F _y (N)	f _y (N/mm ²)	F _m (N)	f _m (N/mm ²)	f _m /f _y	Agt (%)
Ως έχει	408,7	171.821,5	547	207.034,8	659	1,20	15,47
Αναθερμανση 250°C/2h	514,5	171.925,3	547	208.115,2	662	1,21	12,52
Αναθερμανση 450°C/2h	522,5	173.413	552	208.369,0	663	1,20	12,73
Αναθερμανση 550°C/2h	508,2	170.479,3	543	204.825	652	1,20	12,67
Αναθερμανση 650°C/2h	439,7	141.596,3	451	174.160,3	555	1,23	13,54

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού μετά την εργοσκήρυση.

Μηχανικές Ιδιότητες Περίπτωση	$f_{p0,2}$ (N/mm ²)	F _y (N)	f _y (N/mm ²)	F _m (N)	f _m (N/mm ²)	f _m /f _y	Agt (%)
Ως έχει	408,7	171.821,5	547	207.034,8	659	1,20	15,47
Αναθερμανση 250°C/2h	708,1	226.961,2	722	226.976	722	1,00	4,36
Αναθερμανση 450°C/2h	615,1	197.805	630	215.239,3	685	1,08	9,87
Αναθερμανση 550°C/2h	556,6	178.259,5	568	203.310,8	647	1,14	8,75
Αναθερμανση 650°C/2h	449,6	144.156,8	459	171.482,8	546	1,19	11,74

Η εφελκυστική αντοχή αντίστοιχα, ουσιαστικά δεν αλλάζει μετά από τις πρώτες θερμικές κατεργασίες (αυξάνεται κατά 0.5% για θέρμανση στους 250°C, κατά 0.6% για θέρμανση στους 450 °C ενώ μειώνεται κατά 1% για θέρμανση στους 550°C), αλλά μειώνεται κατά 15.7% για θέρμανση στους 650°C .

Ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής παραμένει σταθερός με εξαίρεση την θέρμανση στους 650°C όπου παρουσιάζει μικρή αύξηση (κατά 3%). Η αύξηση αυτή οφείλεται στην μείωση του ορίου

διαρροής. Σε όλες της περιπτώσεις η τιμή του συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις KTX 2007 ($1,13 < f_t/f_y < 1,37$).

Η ποσοστιαία ολική επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο μειώνεται λόγω θέρμανσης αλλά παραμένει εντός των απαιτήσεων του κανονισμού KTX07, σε όλες τις περιπτώσεις αναθέρμανσης ($A_{gt,min}=7\%$).

Στην περίπτωση θέρμανσης δοκιμίων μετά από ελαφριά εργοσκλήρυνση, το συμβατικό όριο διαρροής αυξάνεται κατά 73% για την θέρμανση στους 250°C, κατά 50% για την θέρμανση στους 450°C, κατά 36% για την θέρμανση στους 550°C και κατά 10% για την θέρμανση στους 650°C.

Το φανερό όριο διαρροής αυξάνεται κατά 32% για θέρμανση στους 250°C, κατά 15% για θέρμανση στους 450°C, κατά 4% για θέρμανση στους 550°C ενώ μειώνεται κατά 16% για θέρμανση στους 650°C. Ο χάλυβας που θερμάνθηκε στους 650°C είναι εκτός απαιτήσεων κανονισμού KTX 2007.

Η εφελκυστική αντοχή αυξάνεται κατά 9.5% για θέρμανση στους 250°C, κατά 4% για θέρμανση στους 450°C ενώ μειώνεται κατά 2% για θέρμανση στους 550°C και κατά 17% για θέρμανση στους 650°C.

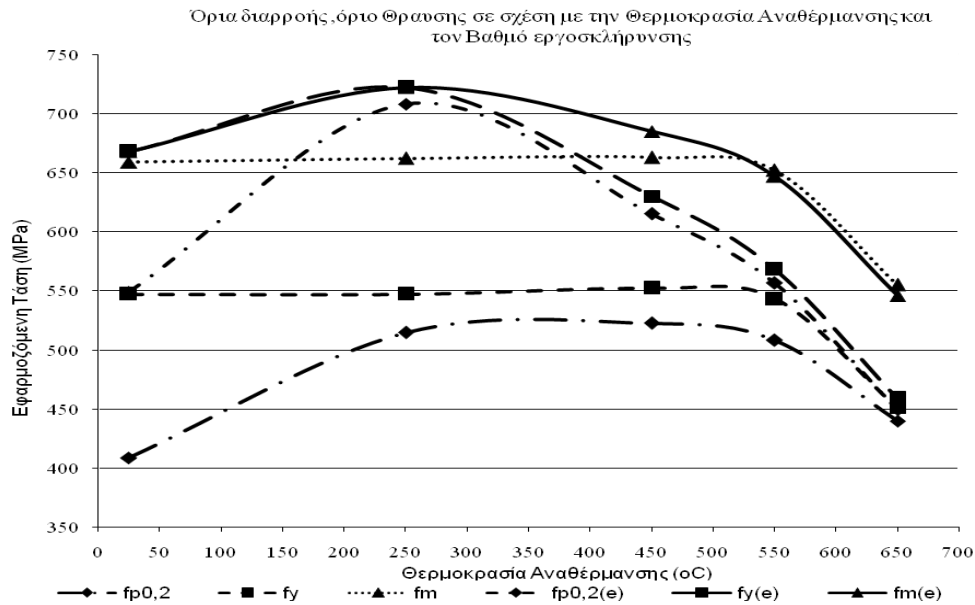
Ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής δεν πληρεί τις απαιτήσεις του κανονισμού για θέρμανση στους 250°C και 450°C και ελαττώνεται στις άλλες περιπτώσεις.

Η ποσοστιαία ολική επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο παρουσιάζει σημαντική μείωση (9%) για θέρμανση στους 250°C και βγάζει τον χάλυβα εκτός προδιαγραφών. Στις υπόλοιπες, ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης αλλά σε αποδεκτές τιμές.

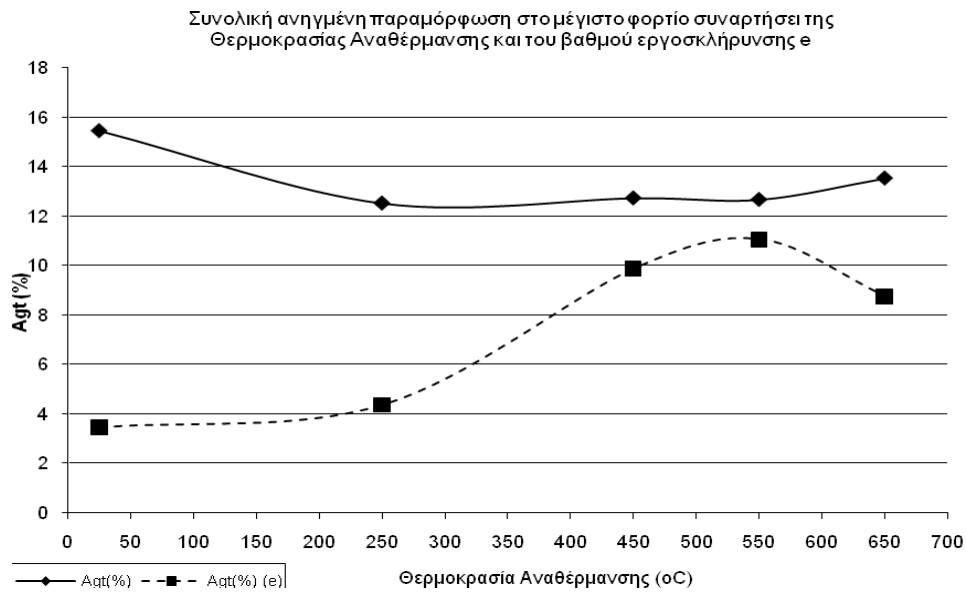
Οι εικόνες 2 και 3 παρουσιάζουν συνοπτικά την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε σχέση με την θερμοκρασία θέρμανσης με και χωρίς εργοσκλήρυνση.

Η καταπόνηση του χάλυβα προκαλεί την επιμήκυνση των φερριτοπερλιτικών κόκκων και έχει ως συνέπεια την εργοσκλήρυνση της δομής. Η μικρού βαθμού εργοσκλήρυνση προκάλεσε μια σημαντική αύξηση του συμβατικού ορίου διαρροής του χάλυβα. Η αύξηση είναι αισθητή στην κατάσταση παραλαβής (34%) και στην θέρμανση στους 250°C (37%). Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αποκατάσταση ή ανακρυστάλλωση δομής και έχει ως συνέπεια την μείωση της διαφοράς των δύο τιμών. Η θέρμανση στους 450°C παρουσιάζει μία αύξηση του συμβατικού ορίου διαρροής κατά 18%, κατά 10% στους 550°C και κατά 2% στους 650°C. (Εικ.2)

Η εργοσκλήρυνση προκάλεσε αύξηση του φανερού ορίου διαρροής του χάλυβα. Παρατηρείται μικρότερη μεταβολή σε σχέση με το συμβατικό όριο διαρροής. Η εργοσκλήρυνση προκάλεσε αύξηση κατά 22% στην κατάσταση παραλαβής, κατά 32% για θέρμανση στους 250°C, κατά 14% στους 450°C, κατά 5% στους 550°C και κατά 2% στους 650°C (Εικ.2).



Εικόνα 2. Μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού με και χωρίς εργοσκλήρυνση



Εικόνα 3. Η μεταβολή της ποσοστιαίας ολικής επιμήκυνσης στο μέγιστο φορτίο με την θερμοκρασία (με και χωρίς εργοσκλήρυνση)

Η εφελκυστική αντοχή αυξήθηκε κατά 1,5% μετά την εργοσκλήρυνση στην κατάσταση παραλαβής, κατά 9% για θέρμανση στους 250°C, κατά 3% στους 450°C και μειώθηκε κατά 1% στους 550°C και κατά 3% στους 650°C (Εικ.2).

Η ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο παρουσιάζει τελείως διαφορετική συμπεριφορά μετά την εργοσκλήρυνση. Μειώνεται κατά 78% στην περίπτωση απλής εργοσκλήρυνσης, κατά 65% για θέρμανση στους 250°C, κατά 22% στους 450°C, κατά 12% στους 550°C και κατά 35% στους 650°C (Εικ.3).

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δομή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος B500C αποτελείται από την φερριτο-περλιτική καρδιά και μία εξωτερική στεφάνη επαναφερμένου μαρτενσίτη. Τα δυο στρώματα συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά την θέρμανση. Η φερριτο-περλιτική περιοχή παρουσιάζει αύξηση των κόκκων. Η αύξηση είναι ανάλογη με την θερμοκρασία και τον χρόνο θέρμανσης. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται ελάττωση των αντοχών και αύξηση της ολκιμότητας. Η θέρμανση σε χαμηλές θερμοκρασίες ευνοεί την κατακρήμνιση των καρβιδίων του σεμεντίτη και προκαλεί αύξηση αντοχών. Η θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες ευνοεί την ολοκλήρωση της επαναφοράς του μαρτενσίτη και προκαλεί μείωση της σκληρότητας του υλικού. Η σύνθετη δομή συνλειτουργεί.

Η θέρμανση σε χαμηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού στρώματος ευνοεί την κατακρήμνιση του σεμεντίτη ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την περαιτέρω επαναφορά του μαρτενσίτη. Το αποτέλεσμα της μεικτής δομής οδηγεί στην μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε βαθμό που εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία θέρμανσης. Σε κάθε περίπτωση η θέρμανση οδηγεί τον χάλυβα εκτός προδιαγραφών.

Η καταπόνηση του χάλυβα αυξάνει την ευαισθησία του στην μετέπειτα θέρμανση. Παρατηρείται μείωση όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών διαρροής και θραύσης του υλικού όπου η μετάπτωση τους ξεκινά από τους 550°C.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επιρροής του βαθμού εργοσκλήρυνσης στην μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα κατά την θέρμανση του και θα αποτελέσει αντικείμενο μιας επόμενης εργασίας.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Lau, A., Anson, M., “effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete”, *Cement and Concrete*, No 36(2006) 1698-1707.

ΕΛΟΤ EN 10002 – 1: 2001 (Ε), Μεταλλικά υλικά – Δοκιμές εφελκυσμού – Μέρος 1: Μέθοδος δοκιμής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, EN 10002-1:2001 (Ε) ICS:77.040.10-2001 (2001).

Μαυροειδής, Π., «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα (2005).

Σχέδιο Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, ΚΤΧ Αθήνα, (2007) .

