

# ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ

Δημήτρης Δεληγιάννης

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

Άρης Φωτόπουλος

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

Βασίλης Σκαράκης

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

Κάρμεν Μέντρεα

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

*Λέξεις κλειδιά: χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος, μηχανικές ιδιότητες, κάμψη, ανάκαμψη, θραύση*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος B500C παρουσιάζει στην διατομή του μία σκληρή εξωτερική στεφάνη επαναφερμένου μαρτενσίτη και μια όλκιμη, φερριτο-περλιτική καρδιά. Η τοποθέτηση του σε μία κατασκευή προϋποθέτει σε ορισμένες περιπτώσεις την τοπική διαμόρφωσή του με κάμψη. Μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις προκαλούν τοπικές παραμορφώσεις ή και θραύση. Η εργασία παρουσιάζει την μελέτη της συμπεριφοράς σε ενδεχόμενη αντικανονική καταπόνηση με κάμψη – ανάκαμψη κατά την διάρκεια της διαμόρφωσης – τοποθέτησης του οπλισμού της κατασκευής. Εκτιμώνται οι επιπτώσεις του βαθμού καταπόνησης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έντονη σεισμική δραστηριότητα του τόπου μας στρέφει το ενδιαφέρον των μελετητών και παραγωγών προς την συνεχή βελτίωση των δομικών υλικών. Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος περιγράφει αναλυτικά τις γενικές και ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται στην παραγωγή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος

(σχέδιο KTX 2007, ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ EN 10002). Ο χάλυβας B500C (ΘΕ-ΘΚ) επικρατεί στην παραγωγή λόγω του μειωμένου κόστους σε σχέση με τις ιδιότητες του (Μαυροειδείς, Π. 2005). Παράγεται σε ράβδους κυκλικής διατομής, με θερμή έλαση και με άμεση εν σειρά επιφανειακή βαφή με νερό και αυτό-επαναφορά. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υλικό παρουσιάζει μία σκληρή εξωτερική στεφάνη επαναφερμένου μαρτενσίτη και μια όλκιμη φερριτο-περλιτική καρδιά. Το εξωτερικό στρώμα προσδίδει στο χάλυβα πολύ καλές αντοχές, ενώ η καρδιά του εξασφαλίζει την απαιτούμενη ολκιμότητα. Μειονέκτημα αυτής της σύνθετης δομής αποτελεί η δυσκολία διαμόρφωσης του. Η μεγάλη σκληρότητα της εξωτερικής στιβάδας επηρεάζει σε ορισμένες περιπτώσεις την διεργασία κάμψης.

Η καταπόνηση της κάμψης – ανάκαμψης (επανευθυγράμμισης) εφαρμόζεται στα τεχνικά έργα, για λόγους «εργασιακής ευκολίας» ή από σφάλμα. Αν και ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων απαγορεύει ρητά την επανευθυγράμμιση καμφθεισών ράβδων, αυτό γίνεται συχνά. Η περίπτωση της παράθεσης από ένα υποστύλωμα σε ένα άλλο, μικρότερων διαστάσεων αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της καταπόνησης με κάμψη – ανάκαμψη (επανευθυγράμμιση) και των επιπτώσεων εφαρμογής της στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος B500C.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην εργασία επιχειρείται προσομοίωση των εργοταξιακών κατεργασιών διαμόρφωσης στα οικοδομικά έργα, με σκοπό την επίτευξη αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων σε συνθήκες και ακραίες καταπονήσεις εργοταξιακών κατεργασιών. Για το λόγο αυτό οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται δεν γίνονται πάντα όπως αναφέρονται στις αντίστοιχες προδιαγραφές.

Ομάδες δοκιμίων από χάλυβα B500C, κυκλικής ονομαστικής διατομής Φ20 και μήκους 0.50m υποβάλλονται σε δοκιμή κάμψης – ανάκαμψης με ίδιο τύμπανο (ράουλο) ίδιας διαμέτρου και με διαφορετικούς βαθμούς παραμόρφωσης (γωνία κάμψης / ανάκαμψης). Οι ομάδες αποτελούνται από 6 δοκίμια (5+1 εφεδρικό με το χαρακτηριστικό 'Ε' στην ταυτοποίησή και σήμανση του). Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά ράουλα και εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές γωνίες κάμψης. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με σταθερό ρυθμό φόρτισης. Για την προσέγγιση της συνήθους εργοταξιακής πρακτικής, πριν την ανάκαμψη δεν εφαρμόστηκε η τεχνική γήρανση που αναφέρουν τα πρότυπα. Για σύγκριση μια ομάδα δοκιμίων εξετάζεται χωρίς προηγούμενη καταπόνηση (όπως προέρχεται από την παραγωγή). Τα δοκίμια προέρχονται από συνεχόμενες βέργες

παραγωγής του ίδιου χυτηρίου για να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων σε όλα τα δοκίμια.

Μια συνεχόμενη ράβδος, συνολικού μήκους 42 m κόπηκε αμέσως μετά την έλασή της σε 3 τεμάχια των 14 m (Α,Β,Γ). Τα δοκίμια από κάθε τεμάχιο των 14 m υφίσταται διαφορετική κάμψη. Οι ράβδοι τεμαχίστηκαν στην συνέχεια σε τέσσερις ράβδους μήκους 3.50 m και τελικώς, κόπηκαν 7 διαδοχικά δοκίμια σε κομμάτια των 0.50m ώστε να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιομορφία των αρχικών ιδιοτήτων τους. Παράλληλα με την κοπή πραγματοποιήθηκε η σήμανση των δοκιμίων κατά τον ακόλουθο τρόπο: Τα δοκίμια που προέρχονταν από την 1η βέργα των 14 m ανήκουν στην ομάδα ΜΑ<sub>xy</sub>, από την 2η βέργα, στην ΜΒ<sub>xy</sub> και από την 3<sup>η</sup> βέργα στην ομάδα ΜΓ<sub>xy</sub> αντίστοιχα (Πίνακας 1). Τα δοκίμια τα οποία δεν υποβλήθηκαν σε καταπόνηση της κάμψης - ανάκαμψης κόπηκαν στην αρχή της κάθε ομάδας και συμβολίζονται με το χαρακτηριστικό Χ και την ομάδα από την οποία προέρχεται (ΧΑ ,ΧΒ, ΧΓ ).

Πίνακας 1.Ομάδες δοκιμίων

Διάμετρος Ράουλου	Γωνία κάμψης - ανάκαμψης		
	30°	60°	90°
D	ΜΑ1y	ΜΑ2y	ΜΑ3y
1,5 D	ΜΒ1y	ΜΒ2y	ΜΒ3y
2 D	ΜΓ1y	ΜΓ2y	ΜΓ3y

Όπου: Μ: δοκίμιο με καταπόνηση, Α,Β,Γ: τα αντίστοιχα στελέχη της κάμψης (κύλινδροι, ράουλα) και οι αρχικές 14 μετρες βέργες, 1,2,3: οι γωνίες κάμψης / ανάκαμψης (30°, 60°, 90° αντίστοιχα), y: ο αριθμός του δοκιμίου εντός της ομάδας (από 1 έως 5).

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν, μετά την ανάκαμψη για ευθυγράμμιση του τα ΜΑ, ΜΒ, ΜΓ, σε δοκιμή εφελκυσμού με στατική φόρτιση. Η δοκιμή πραγματοποιείται με σταθερό τον ίδιο ρυθμό φόρτισης και προσδιορίστηκαν εργαστηριακά οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Τέλος, εκτιμήθηκαν οι ποσοστιαίες μεταβολές των αρχικών μηχανικών χαρακτηριστικών και η επιρροή της ενδοτράχυνσης λόγω κάμψης – ανάκαμψης στην συμπεριφορά του χάλυβα παραγωγής.

Η δειγματοληψία, η κοπή και οι εργαστηριακές δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας της

Χαλυβουργικής Α.Ε. Στην διεξαγωγή της έρευνας είχαν συμμετοχή και οι Θ. Κούκου και Δ. Παπαγεωργίου, εργαστηριακοί συνεργάτες του εργαστηρίου ΠΕΤΥΛ του ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα δοκίμια που καταπονήθηκαν με γωνία κάμψης  $90^\circ$  και  $60^\circ$  αντίστοιχα, έσπασαν κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης. Στους πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται οι συνθήκες καταπόνησης μέχρι την θραύση. Ως δύναμη κάμψης ορίζεται η δύναμη που επιβλήθηκε στο δοκίμιο, ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή γωνία κάμψης. Ως δύναμη ανάκαμψης ορίζεται η δύναμη που επιβλήθηκε στο δοκίμιο ώστε να επιτευχθεί η επανευθυγράμμιση του. Στα δοκίμια που έσπασαν κατά την ανάκαμψή του η δύναμη ανάκαμψης θεωρείται η δύναμη η οποία προκάλεσε την θραύση τους.

Πίνακας 2. Οι δυνάμεις καταπόνησης σε κάμψη-ανάκαμψη, με γωνία κάμψης / ανάκαμψης  $90^\circ$ .

Δυνάμεις καταπόνησης (KN)								
Στέλεχος κάμψης D			Στέλεχος κάμψης 1.5D			Στέλεχος κάμψης 2D		
Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.	Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.	Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.
MA31	47	4,3	MB31	44	5,8	MG31	58	12
MA32	44	3,9	MB32	46	6,2	MG32	59	6,2
MA33	43	4,5	MB33	46	4,8	MG33	61	4,8
MA34	44	4,4	MB34	47	4,8	MG34	57	4,8
MA35	46	4,3	MB35	46	4,7	MG35	57	4,7
MA3E	46	4,2	MB3E	45	5,6	MG3E	59	5,6

Πίνακας 3. Οι δυνάμεις καταπόνησης σε κάμψη-ανάκαμψη, με γωνία κάμψης / ανάκαμψης  $60^\circ$ .

Δυνάμεις καταπόνησης (KN)								
Στέλεχος κάμψης D			Στέλεχος κάμψης 1.5D			Στέλεχος κάμψης 2D		
Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.	Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.	Δοκίμιο	Κάμψη	Ανάκ.
MA21	45	12,0	MB21	45	14,3	MG21	52	14,5
MA22	45	14,6	MB22	42	14,9	MG22	49	14,6
MA23	44	8,6	MB23	47	14,2	MG23	48	14,6
MA24	43	14,7	MB24	42	9,5	MG24	46	14,9
MA25	45	14,7	MB25	45	14,7	MG25	49	15,6
MA2E	45	14,0	MB2E	46	14,6	MG2E	49	15,0

Παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των δυνάμεων κάμψης και ανάκαμψης. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι οι ράβδοι έχουν σπάσει κατά την

επανεθυγράμμιση τους και πριν την ολοκλήρωση της ανάκαμψης τους. Η δύναμη ανάκαμψης στα δοκίμια που έχουν γωνία κάμψης / ανάκαμψης 90° είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των 60°. Κατά την διάρκεια της κάμψης οι ράβδοι υπέστησαν ενδοτράχυνση δομής και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μειωμένη ολκιμότητα. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στην μεγαλύτερη παραμόρφωση και κατά συνέπεια οι ράβδοι που παραμορφώθηκαν με γωνία κάμψης / ανάκαμψης 90° έσπασαν πιο εύκολα κατά την επανεθυγράμμιση.

Οι Πίνακες 4 - 6 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού ράβδων μετά από καταπόνηση με γωνία κάμψης / ανάκαμψης 30°.

Πίνακας 4. Οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων 'Α' μετά από καταπόνηση με στέλεχος D και γωνία κάμψης / ανάκαμψης 30°.

Δοκίμιο Μηχ.Ιδ	MA11	MA12	MA13	MA14	MA15	MA1E
Lc (mm)	300	300	300	300	300	300
So (mm <sup>2</sup> )	308.74	309.28	308.89	309.17	308.23	308.46
Rp 0.2 (MPa)	479.11	444.18	459.99	443.88	475.86	456.17
FReH (KN)	171.712	172.238	172.612	171.908	170.260	170.717
ReH (MPa)	547	548	549	547	542	543
Fm (KN)	211.366	211.613	212.048	211.386	209.847	210.206
Rm (MPa)	673	674	675	673	668	669
Rm/ReH	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
ReH/Re (MPa)	1.09	1.10	1.10	1.09	1.08	1.09
Ag (%)	7.5	7.5	8.5	8.0	10.0	8.0
Ag <sub>t</sub> (%)	7.84	7.84	8.84	8.34	10.33	8.33
Κάμψη (KN)	44.00	44.00	44.00	44.00	42.00	43.00
Ανάκ. (KN)	16.80	14.55	15.20	15.80	15.80	16.20

Πίνακας 5. Οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων ‘B’ μετά από καταπόνηση με στέλεχος 1,5 D και γωνιά κάμψης / ανάκαμψης 30°.

Δοκιμιο Μηχ.Ιδ	MB11	MB12	MB13	MB15	MB1E
Lc (mm)	300	300	300	300	300
So (mm <sup>2</sup> )	308.72	309.02	308.92	308.54	309.51
Rp 0.2 (MPa)	469.69	455.08	485.96	477.28	495.22
FReH (KN)	170.176	170.173	170.556	170.787	171.023
ReH (MPa)	542	542	543	544	544
Fm (KN)	210.327	210.106	210.127	210.421	210.866
Rm (MPa)	669	669	669	670	671
Rm/ReH	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23
ReH/Re (MPa)	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09
Ag (%)	8.0	9.5	9.0	9.5	8.5
Agt (%)	8.33	9.83	9.33	9.83	8.84
Κάμψη (KN)	43.00	41.00	42.00	42.00	42.00
Ανάκ. (KN)	14.50	14.30	14.20	14.30	14.70

Πίνακας 6. Μηχανικές ιδιότητες των ράβδων ‘Γ’ μετά από καταπόνηση κάμψης με στέλεχος 2 D και γωνιά κάμψης / ανάκαμψης 30°.

Δοκιμιο Μηχ.Ιδ	ΜΓ11	ΜΓ12	ΜΓ13	ΜΓ14	ΜΓ15	ΜΓ1E
Lc (mm)	300	300	300	300	300	300
So (mm <sup>2</sup> )	308.26	309.02	308.79	308.72	309.00	309.63
Rp 0.2 (MPa)	469.88	446.65	455.24	470.33	482.47	481.81
FReH (KN)	170.356	170.270	170.532	170.965	172.394	172.142
ReH (MPa)	542	542	543	544	549	548
Fm (KN)	210.070	209.986	210.542	210.507	211.145	211.733
Rm (MPa)	669	668	670	670	672	674
Rm/ReH	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.23
ReH/Re (MPa)	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10
Ag (%)	8.5	8.5	8.0	8.0	8.0	8.0
Agt (%)	8.83	8.83	8.33	8.33	8.34	8.34
Κάμψη (KN)	42.00	44.00	42.00	43.00	44.00	44.00
Ανάκ. (KN)	14.50	14.60	14.60	14.90	14.60	15.00

Από τον πίνακα 4 παρατηρείται η ομοιομορφία των αποτελεσμάτων η οποία επιβεβαιώνει τον πρώτο στόχο της εργασίας, δηλ. την επίτευξη

επαναληψιμότητας των πειραμάτων της ομάδας 'Α' και άρα τον σωστό σχεδιασμό των πειραμάτων. Το φανερό όριο διαρροής του χάλυβα (ReH) παρουσιάζει μια διαφορά 6 MPa (από την ελάχιστη τιμή, 543 MPa έως την μέγιστη τιμή, 549 MPa) και η εφελκυστική αντοχή 9 MPa (από την ελάχιστη τιμή, 668 MPa έως την μέγιστη τιμή, 675 MPa). Απόλυτη ομοιομορφία παρατηρείται στον λόγο της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής ( $R_m / ReH$ ). Στην συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt) παρατηρείται μεγάλη αύξηση στο δοκίμιο MA15 2.5%.

Από τον πίνακα 5 παρατηρείται αύξηση της καμπυλότητας παραμόρφωσης του τυμπάνου (ράουλου) που μειώνει το εύρος των τιμών. Το φανερό όριο διαρροής του χάλυβα (ReH) παρουσιάζει μια διαφορά μόλις 2 MPa (από την ελάχιστη τιμή, 542 MPa έως την μέγιστη τιμή, 544 MPa), η εφελκυστική αντοχή 2 MPa (από την ελάχιστη τιμή, 669 MPa έως την μέγιστη τιμή, 671 MPa), ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής ( $R_m / ReH$ ) παρουσιάζει μια διαφορά μόλις 0.01% και η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt) 1%.

Το δοκίμιο MB14 δεν τοποθετήθηκε σωστά στην μηχανή εφελκυσμού και δεν αναφέρεται στον πίνακα 4.

Στην περαιτέρω αύξηση της καμπυλότητας παραμόρφωσης του ράουλου το φανερό όριο διαρροής του χάλυβα (ReH) παρουσιάζει μια διαφορά μόλις 5 MPa, η εφελκυστική αντοχή 5 MPa, ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής ( $R_m / ReH$ ) μόλις 0.01% και η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt) 0.5%. Η οπτική επιθεώρηση όλων των δοκιμίων δεν έδειξε ύπαρξη ρωγμών στην επιφάνεια τους.

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού της ομάδας δοκιμίων όπως αυτά διατίθενται στην αγορά χωρίς την καταπόνηση της κάμψης / ανάκαμψης. Τα δοκίμια αυτά πάρθηκαν στο τέλος της κάθε ομάδας 'M' και έτσι προέρχονται από 3 διαφορετικές ράβδους 14 μετρες βέργες. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ομοιομορφία των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε. Οι ράβδοι που προέρχονται από το ίδιο χυτήριο έχουν την ίδια χημική σύσταση και οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται αποκλειστικά από την μεταλλογραφική δομή τους. Στην περίπτωση μιας σύνθετης δομής όπως του B500C η ομοιομορφία των μηχανικών ιδιοτήτων αποδεικνύει τον απόλυτο έλεγχο της αναλογίας των δύο στρωμάτων (επαναφερμένος μαρτενσίτης και φερίτο-περλίτης) καθ' όλη τη γραμμική παραγωγή.

Πίνακας 7. Μηχανικές ιδιότητες των ράβδων σε κατάσταση παραλαβής.

Δοκιμιο	XA1	XA2	XA3
Μηχ.Ιδ			
Lc (mm)	300	300	300
So (mm <sup>2</sup> )	309.28	309.00	308.74
Rp 0.2 (MPa)	512.68	483.35	446.39
FReH (KN)	172.003	170.724	170.924
ReH (MPa)	548	543	544
Fm (KN)	210.806	209.829	209.453
Rm (MPa)	671	668	667
Rm/ReH	1.23	1.23	1.23
ReH/Re (MPa)	1.10	1.09	1.09
Ag (%)	13.0	11.0	10.0
Agt (%)	13.34	11.33	10.33

Ο πίνακας 8 παρουσιάζει τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού των ράβδων που έχουν καταπονηθεί σε σύγκριση με τις ράβδους παραγωγής και με τις ελάχιστες επιβαλλόμενες από τις προδιαγραφές τιμές (ΕΛΟΤ). Στην περίπτωση της κάμψης – ανάκαμψης τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το φανερό όριο διαρροής (Re), ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής (Rm/Re) και ο λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του φανερού ορίου διαρροής (Re,act/Re,nom) δεν παρουσιάζουν απολύτως καμία μεταβολή με την καταπόνηση της κάμψης - ανάκαμψης με γωνία κάμψης / ανάκαμψης 30° ανεξάρτητα από την διάμετρο του στελέχους κάμψης. Η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt) παρουσιάζει μια μείωση ~ 3%. Η μείωση οφείλεται στην ενδοτράχυνση της «καρδίας» του υλικού. Παρόλη την μείωση το Agt συνεχίζει να πληρεί τις προϋποθέσεις των προδιαγραφών. Στην περίπτωση των χαλύβων όπως αυτοί προέρχονται από την παραγωγή παρατηρείται μια αύξηση όλων των απαιτούμενων τιμών: Το όριο διαρροής παρουσιάζει μια αύξηση κατά 45 MPa (9%) και η συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο μια αύξηση κατά 4.37%.



Πίνακας 8. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος με και χωρίς προηγούμενη καταπόνηση (μέση τιμή).

	Στέλεχος κάμψης D	Στέλεχος κάμψης 1,5 D	Στέλεχος κάμψης 2 D	Κατάσταση παραλαβής	ΕΛΟΤ 1421 – 3	EN
Όριο διαρροής $R_e$ (MPa)	546	543	545	545	$\geq 500$	
Λόγος $R_m/R_e$	1.23	1.23	1.23	1.23	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$	
Agt (%)	8.59	9.23	8.50	11.67	$\geq 7,5$	
$R_{e,act}/R_{e,nom}$	1.09	1.09	1.09	1.09	$\leq 1,25$	

Πίνακας 9. Επιμήκυνση εφελκόμενης ίνας (%) συναρτήσει της γωνίας κάμψης / ανάκαμψης και του στέλεχους κάμψης (ράουλο).

	Γωνία κάμψης 30°	Γωνία κάμψης 60°	Γωνία κάμψης 90°
Στέλεχος κάμψης D	13	34	43
Στέλεχος κάμψης 1.5 D	13	33	42
Στέλεχος κάμψης 2 D	13	32	35

Στον πίνακα 9 παρατηρούμε πως η επιμήκυνση της εφελκόμενης ίνας τείνει να μειώνετε όσο μεγαλώνει το στέλεχος κάμψης. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται ανάμεσα στο στέλεχος κάμψης 1.5 D και στο 2 D όταν έχουμε γωνία κάμψης 90°. Σ' αυτή την περίπτωση η μείωση της επιμήκυνσης της εφελκόμενης ίνας είναι 17%.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Όλα τα δοκίμια τα οποία καταπονήθηκαν με γωνίες κάμψης / ανάκαμψης 90° και 60°, ανεξάρτητα από το στέλεχος της κάμψης, παρουσίασαν ψαθυρή θραύση. Μια τέτοια συμπεριφορά προκαλεί την αστοχία του υλικού.

Η υπέρμετρη επιμήκυνση στη εξωτερική ίνα είναι και η βασική αιτία που προκαλεί τη θραύση στο σημείο της κάμψης.

Τα δοκίμια τα οποία καταπονήθηκαν με γωνία κάμψης / ανάκαμψης 30°, δεν παρουσίασαν σημεία ρηγμάτωσης, ανεξάρτητα από το στέλεχος κάμψης (ράουλο) που χρησιμοποιήθηκε, ούτε και μεταβολές της αντοχής. Η συγκεκριμένη καταπόνηση προκάλεσε την μείωση της επιμήκυνσης στο μέγιστο φορτίο της τάξης του 3%, λόγω της ενδοτράχυνσης που υφίσταται

ο χάλυβας. Η υψηλή ποιότητα του χάλυβα που παράγεται σε σχέση με τις απαιτήσεις ισορρόπησε την αρνητική επιρροή της καταπόνησης. Στην περίπτωση χαλύβων με οριακή τιμή ως προς το Agt, η εφαρμογή της κάμψης / ανάκαμψης θα τους καθιστούσε πλέον ακατάλληλους για κάμψεις / ανακάμψεις του είδους αυτού.

Αξίζει να σημειωθεί πως το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10080 αναφέρει πως για την καταπόνηση σε κάμψη το στέλεχος της κάμψης πρέπει να είναι 6 D και για την ανάκαμψη 8 D.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο εντοπισμός της γωνίας κάμψης / ανάκαμψης κατά την οποία το υλικό περνά σε ψαθυρή συμπεριφορά και αποτελεί στόχο επόμενης μελέτης / έρευνας.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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

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

ΕΛΟΤ EN 10080 : 2005 (E), Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις.

ΕΛΟΤ 1421 – 3 : Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C.

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