

# ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σισμάνης Παναγιώτης

*Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός, Τεχνικό Γραφείο Ομίλου ΣΙΑΕΝΟΡ*

Μαστοράκης Αβραάμ

*Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός, Διεύθυνση Ποιότητας Ομίλου ΣΙΑΕΝΟΡ*

*Λέξεις Κλειδιά: Χάλυβες οπλισμού, ΧΟΣ, κόπωση, αντοχή, κύκλοι φόρτισης*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Αν και στη χώρα μας η δοκιμή κόπωσης για την πιστοποίηση των χαλύβων έγινε υποχρεωτική μόνο μετά το 2005 με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 για την κατηγορία χάλυβα B500C, στη Γερμανία απαιτείται από το 1984 με το πρότυπο DIN 488. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση από παρτίδες που έχουν ελεγχθεί τα τελευταία περίπου δέκα χρόνια από Γερμανικό φορέα πιστοποίησης χαλύβων, στο Μόναχο. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα διαμέτρων  $\varnothing 8-40\text{mm}$ , κάτω από αυστηρότερες πειραματικές συνθήκες από εκείνες που απαιτούνται από τα ισχύοντα κανονιστικά πρότυπα, με επιτυχή αποτελέσματα.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της κόπωσης των ΧΟΣ έχει μελετηθεί τελευταία από θεωρητικής και πρακτικής άποψης. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κόπωση ενός υλικού, εκτός από το είδος του μετάλλου ή του κράματος, είναι:

- Το είδος και το μέγεθος της επαναλαμβανόμενης παραμόρφωσης.
- Η συγκέντρωση της επιβαλλόμενης τάσης η οποία τείνει να ελαττώσει την αντοχή σε κόπωση όπου υπάρχουν οπές, εγκοπές, απότομες μεταβολές της διατομής κλπ.
- Το μέγεθος των κόκκων του πολυκρυσταλλικού υλικού.

- Η συχνότητα των κυκλικών μεταβολών.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας (επιφανειακές ανωμαλίες).
- Κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης. Για παράδειγμα, η θερμική κατεργασία της βαφής και επαναφοράς των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, προκαλεί αύξηση της αντοχής του μετάλλου δεδομένου ότι οι ρωγμές τείνουν να ξεκινήσουν, ως επί το πλείστον, στην επιφάνεια.
- Η θερμοκρασία του υλικού.
- Η παρουσία και δεύτερης φάσης στο υλικό.
- Το πορώδες επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή σε κόπωση ενός δοκιμίου από χάλυβα.
- Το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, όταν ο συνδυασμός υλικού και διαβρωτικού περιβάλλοντος ευνοεί την διάβρωση με βελονισμούς τότε ευνοείται η ανάπτυξη και η διάδοση ρωγμών. Ο συνδυασμός της διαβρωτικής επίδρασης με την κυκλική καταπόνηση στα μέταλλα, είναι γνωστός ως «κόπωση διάβρωσης».

Σημαντικός αριθμός πειραμάτων έχει δείξει ότι η αντοχή σε κόπωση των ΧΟΣ εξαρτάται και από την διάμετρό τους. Χάλυβες μικρής διαμέτρου παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από τους χάλυβες ίδιας ποιότητας αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου. Επιπροσθέτως, στο βρετανικό πρότυπο BS4449 σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ευρωπαϊκά πρότυπα, προβλέπονται για τον έλεγχο σε κόπωση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος διαφορετικές συνθήκες φόρτισης ανά διάμετρο. Στην παρούσα μελέτη, η ανάλυση των αποτελεσμάτων φαίνεται να συμφωνεί με την εν λόγω άποψη και ως εκ τούτου, δικαιολογείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε ομάδες μικρών (Φ8, Φ10, Φ12), μεσαίων (Φ16, Φ20, Φ25) και μεγάλων (Φ32 και Φ40) διαμέτρων.

Στην πράξη δεν έχουν βεβαιωθεί φαινόμενα αστοχίας από κόπωση στους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Τεχνικές έρευνες σε κτίρια που έχουν καταρρεύσει από σεισμό έχουν δείξει ότι η πλέον συνήθης μορφή λύσεως της συνοχής του μεταλλικού οπλισμού είναι αυτή της τελικής διαρροής και θραύσεως τμημάτων του φέροντος οπλισμού, χωρίς να εμφανιστούν σημεία κόπωσης κάποιου στελέχους του φέροντος μεταλλικού οπλισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα κτίρια ποτέ δεν εξαντλείται ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων εναλλασσόμενης φόρτισης του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, που είναι της τάξεως των  $2 \cdot 10^6$ , προτού καταρρεύσουν.

Κατά την δοκιμή εφελκυσμού οι χάλυβες υποβάλλονται σε στατικά φορτία, δηλαδή σε φορτία που έχουν σταθερή τιμή ή σε φορτία αυξανόμενα κατά τρόπο μονότονο και με αργό ρυθμό. Εάν όμως ένα τμήμα ΧΟΣ υποβληθεί σε εναλλασσόμενες περιοδικές και συνεχείς καταπονήσεις, είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε θραύση για τιμές τάσεων κατά πολύ μικρότερες της αντοχής του σε εφελκυσμό ( $f_t$  ή  $R_m$ ) ή ακόμη και του ορίου διαρροής του ( $f_y$  ή  $R_e$ ). Η θραύση τότε επέρχεται χωρίς προηγούμενη παραμόρφωση, παρουσιάζοντας χαρακτηριστική όψη σε δύο ζώνες και οφείλεται στο φαινόμενο της κόπωσης του μετάλλου.

Ο προσδιορισμός της αντοχής σε κόπωση ενός δοκιμίου χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος γίνεται σε μια μηχανή εφελκυσμού που οδηγείται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού και αυτοματισμού. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμών κόπωσης είναι:

- Η μέγιστη  $\sigma_{max}$  και η ελάχιστη  $\sigma_{min}$  καταπόνηση.
- Το εύρος της καταπόνησης:  $2\sigma_A = (\sigma_{max} - \sigma_{min})$
- Η μέση τιμή της καταπόνησης:  $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2$ .

Ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και οι παράμετροι R και A, όπως:

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} \quad (1) \quad \text{και} \quad A = \sigma_A / \sigma_m = (1-R) / (1+R) \quad (2)$$

Ενδιαφέρουσες περιπτώσεις εναλλασσόμενης φόρτισης είναι οι:

- Εναλλασσόμενες συμμετρικές, όταν  $\sigma_m = 0$  και  $R = -1$ .
- Κυματοειδείς, όταν  $\sigma_m > \sigma_A$  και  $0 < R < 1$ .

Οι εναλλασσόμενες συμμετρικές (completely reversed stress) χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στη θεωρία και στην ανάπτυξη μοντέλων. Η περίπτωση δοκιμής αντοχής σε κόπωση για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ανάγεται σε μια κυματοειδή μορφή καταπόνησης.

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος EN 10080:2005, το προϊόν υποβαλλόμενο σε αξονική φόρτιση θα πρέπει να αντέχει έναν καθορισμένο αριθμό κύκλων. Η τάση θα μεταβάλλεται με ημιτονοειδή μορφή εντός του καθορισμένου διαστήματος τάσεων ( $\sigma_{min}$  έως  $\sigma_{max}$ ) με εύρος  $2\sigma_A$  και μέγιστη τιμή  $\sigma_{max}$ . Οι τιμές των δυνάμεων που αντιστοιχούν στο εύρος ( $2\sigma_A$ ) και στη μέγιστη τιμή ( $\sigma_{max}$ ) αντίστοιχα, θα υπολογίζονται με βάση την ονομαστική διατομή της ράβδου ή του σύρματος.

Ο Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-1:2004) προτείνει, για χάλυβες κλάσης ολκιμότητας C, εύρος διακύμανσης τάσεων  $2\sigma_A$  150 MPa και μέγιστη τιμή  $\sigma_{max}$  ίση με το 60% του ονομαστικού ορίου διαρροής. Συνεπώς για τον χάλυβα B500C η προτεινόμενη τιμή  $\sigma_{max}$  είναι 300 MPa.

Το ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3:2007 λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απαιτήσεις των παραπάνω ευρωπαϊκών προτύπων υιοθέτησε τις προτεινόμενες τιμές για τα  $2\sigma_A$  και  $\sigma_{max}$  και προβλέπει ότι ένα κατάλληλο δείγμα ΧΟΣ τοποθετημένο σε μηχανή εφελκυσμού περνάει επιτυχώς τον έλεγχο κόπωσης όταν υφίσταται εναλλασσόμενη φόρτιση με παραμέτρους:

- Η μέγιστη τάση  $\sigma_{max}$  θα είναι 300 MPa. Το εύρος διακύμανσης τάσεων,  $2\sigma_A$  θα είναι 150 MPa, οπότε  $\sigma_{min} = 150$  MPa.
- Ο καθορισμένος αριθμός κύκλων στον οποίο θα πρέπει να αντέχει το δοκίμιο, θα είναι  $2 \cdot 10^6$ .
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση από 200 Hz.
- Το ελάχιστο ελεύθερο μήκος δοκιμίου θα είναι το  $\max(140\text{mm}, 14d)$ .

Στα γερμανικά πρότυπα για τους χάλυβες και τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα διαφαίνεται μία βαθμιαία μείωση των απαιτήσεων για αντοχή σε κόπωση. Το πρότυπο DIN 488:1984 προέβλεπε αρχικά αυστηρότερα κριτήρια για την κόπωση των χάλυβων, με εύρος τάσεων  $2\sigma_A$  215 MPa και μέγιστη τάση  $\sigma_{max}$  ίση με το 70% του πραγματικού ορίου διαρροής. Στη συνέχεια, με το πρότυπο DIN 1045-1:2001 οι απαιτήσεις για αντοχή σε κόπωση μειώθηκαν με το εύρος τάσεων να γίνεται 180 MPa. Το αναθεωρημένο DIN 488, που θα εκδοθεί στις αρχές του 2008 θα είναι εναρμονισμένο με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 2 και του EN 10080, έχοντας τα ίδια κριτήρια με αυτά του ΕΛΟΤ 1421-3, δηλαδή  $2\sigma_A$  150 MPa και  $\sigma_{max}$  300 MPa.

Στο βρετανικό πρότυπο BS 4449, που εκδόθηκε το 2005, δεν υπήρξε καμία αλλαγή σε σχέση με το πρότυπο του 1988, αν και υπήρξε διαφοροποίηση στην αντοχή του χάλυβα (κατηγορίες B500B και B500C αντί για την παλαιότερη κατηγορία grade 460B). Οι απαιτήσεις για την αντοχή διαφοροποιούνται ανά ομάδα διαμέτρων σύμφωνα με τον Πίνακα 1 και ο αριθμός κύκλων στον οποίο θα πρέπει να αντέχει το δοκίμιο είναι  $5 \cdot 10^6$ . Όπως είναι φανερό τα κριτήρια για την κόπωση του βρετανικού προτύπου σε σχέση με αυτά του Ευρωκώδικα 2 και του EN 10080 περιλαμβάνουν χαμηλότερες τιμές για την μέγιστη τάση και μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης.

Πίνακας 1 – Συνθήκες δοκιμής κόπωσης κατά BS 4449:2005

Διάμετρος ράβδου, (mm)	$2\sigma_A$ , (MPa)	$\sigma_{max}$ , (MPa)
$\leq 16$	200	250
$>16, \leq 20$	185	230
$>20, \leq 25$	170	212,5
$>25, \leq 32$	160	200
$>32$	150	187,5

Δανειζόμενοι μερικά στοιχεία από τη θεωρία (Dieter 1988; Shigley & Mischke 1989) αποδείχτηκε (Σισμάνης & Μαστοράκης 2007a; Sismanis 2007b) ότι πράγματι οι ΧΟΣ αντέχουν τουλάχιστον  $2 \cdot 10^6$  κύκλους φόρτισης υπό μέση εφελκυστική τάση  $\sigma_m = 225$  MPa και εύρος της καταπόνησης  $2 \cdot \sigma_A = 150$  MPa ή αλλιώς, εναλλασσόμενη τάση  $\sigma_A = 75$  MPa.

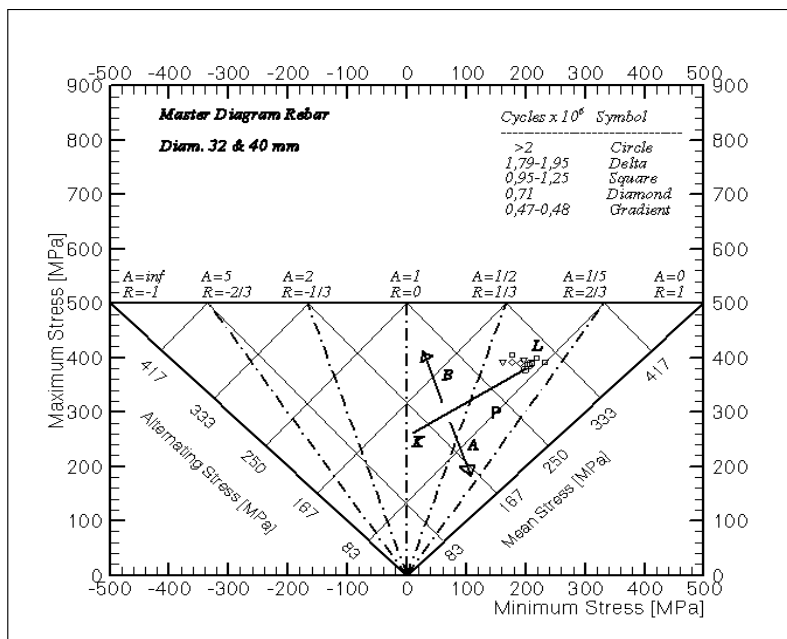
Στους Γερμανικούς οίκους πιστοποίησης ποιότητας προϊόντων ΧΟΣ, πολλές φορές προτιμούν να υποβάλλουν τα δείγματα σε εναλλασσόμενες τάσεις  $2 \cdot \sigma_A$  μεγαλύτερες της τιμής 150 MPa, συνήθως στην τιμή  $2 \cdot \sigma_A = 180$  MPa (ή και παραπάνω), και καταγράφουν τους κύκλους αστοχίας του υλικού. Δημιουργώντας κύρια διαγράμματα, master diagrams (MSH 1983; Hornikova et al 2005) μπορούν να εντοπιστούν περιοχές τάσεων στις οποίες το προϊόν ΧΟΣ δεν θα έχει κανένα πρόβλημα από πλευράς κόπωσης, όπως θα φανεί στο παρακάτω κεφάλαιο.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 1 δίνονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση για δοκίμια ΧΟΣ διαμέτρων 32 και 40 mm, από την περίοδο 2001-2006. Για εύρος εναλλασσόμενης φόρτισης  $2 \cdot \sigma_A = 150$  MPa, τα δοκίμια διαμέτρου 40 mm αστοχούν σε αριθμό κύκλων φόρτισης πολύ μεγαλύτερο των  $2 \cdot 10^6$ . Η στατιστική επεξεργασία έδωσε ότι για  $2 \cdot \sigma_A = 180$  MPa τα δοκίμια  $\varnothing 40$  mm αστοχούν οριακά στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους και άνω. Οι Γερμανικοί οίκοι μελετούν την αντοχή σε κόπωση και σε δοκίμια που έχουν υποστεί κάμψη. Αυτό φυσικά δεν το απαιτούν οι συνήθειες ισχύοντες κανονισμοί. 5 δοκίμια  $\varnothing 32$  mm εκάμθησαν και η στατιστική επεξεργασία έδωσε γι' αυτά τα δοκίμια ότι οι  $2 \cdot 10^6$  κύκλοι υπερβαίνονται οριακά με  $2\sigma_A = 140$  MPa.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, τα αποτελέσματα για τα δοκίμια  $\varnothing 32$  mm και  $\varnothing 40$  mm αποδίδονται στη μορφή ενός κυρίου διαγράμματος (master

diagram). Το πλεονέκτημα αυτών των διαγραμμάτων, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον έλεγχο αντοχής σε κόπωση στρατιωτικού υλικού, έγκειται στο γεγονός ότι όλες οι κύριες παράμετροι της κόπωσης παρουσιάζονται μέσα σ' ένα διάγραμμα και μπορεί κανείς πολύ εύκολα να ορίσει περιοχές τάσεων εντός των οποίων ικανοποιούνται συγκεκριμένοι κύκλοι εναλλασσόμενης φόρτισης. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 1, ο έλεγχος κόπωσης δοκιμών ΧΟΣ κατά ΕΛΟΤ 1421-3 αντιπροσωπεύεται από το σημείο P.

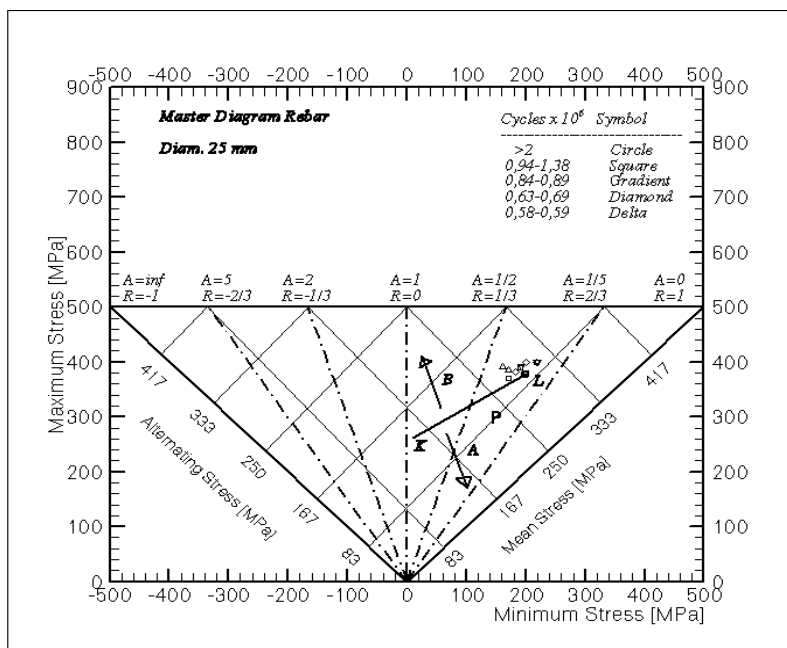


Σχήμα 1- Κατασκευή κύριου διαγράμματος για προϊόντα ΧΟΣ διαμέτρων 32 και 40 mm. (Περίοδος 2001-2006).

Τα πειραματικά όμως αποτελέσματα, κατάλληλα επεξεργασμένα οριοθετούν δύο κύριες περιοχές την Α και τη Β, στις οποίες τα δοκίμια μετά από  $2 \cdot 10^6$  κύκλους φόρτισης αντέχουν ή αστοχούν, αντίστοιχα. Εφόσον το σημείο ελέγχου P συμπεριλαμβάνεται στην Α τα δοκίμια διαμέτρων 32 και 40 mm περνούν επιτυχώς το τεστ αντοχής σε κόπωση. Το τμήμα KL είναι εν γένει τμήμα μιας καμπύλης που καταλήγει στο όριο θραύσεως του υλικού ( $f_t$  ή  $R_m$ ) που είναι στην προκειμένη περίπτωση 687 MPa. Προσεγγιστικά όμως μπορεί να θεωρηθεί σαν τμήμα μιας ευθείας που

ορίζεται με γραμμική παλινδρόμηση από τα σημεία που δίνουν  $> 2 \cdot 10^6$  κύκλους και το ζευγάρι τιμών (687, 687). Αυτό γιατί η εν λόγω ευθεία θα πρέπει να τέμνει τον άξονα της μέσης τιμής  $\sigma_m$  των τάσεων ή τον άξονα  $R=1$  ( $\sigma_A=0$ ) -που ορίστηκε στην (1)- στην τιμή του ορίου θραύσεως.

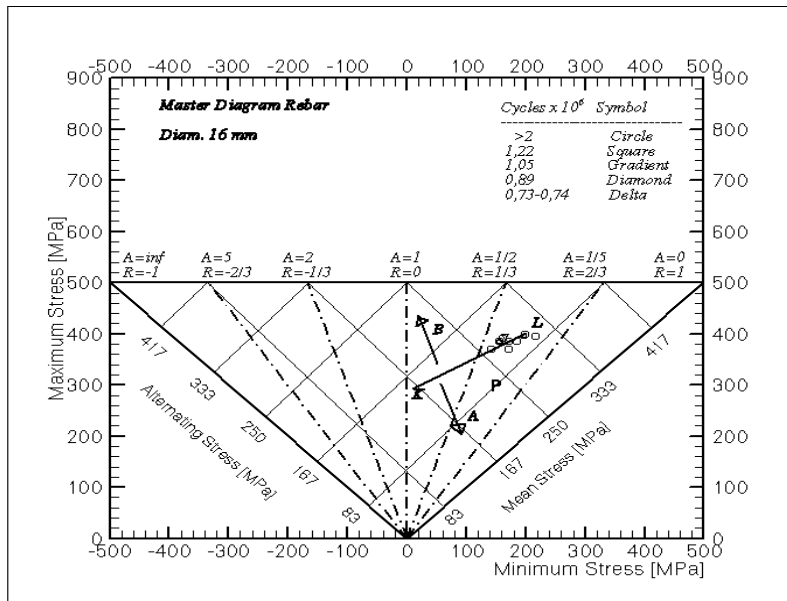
Τα κύρια διαγράμματα αποτελούν ένα σημαντικό βοήθημα για τον σχεδιαστή κατασκευών με απαιτήσεις αντοχής σε κόπωση, επειδή του παρέχουν τη δυνατότητα να γνωρίζει την συμπεριφορά του υλικού σε διάφορες συνθήκες εναλλασσόμενης φόρτισης και όχι μόνο στις συνθήκες (σημείο P) που προδιαγράφονται από το πρότυπο.



Σχήμα 2- Κατασκευή κύριου διαγράμματος για προϊόντα ΧΟΣ διαμέτρου 25 mm. (Περίοδος 2003-2006).

Στο Σχήμα 2 δίνονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση για δοκίμια ΧΟΣ  $\phi 25$ mm, από την περίοδο 2003-2006. Η στατιστική επεξεργασία επιβεβαιώνει σε επίπεδο χαρακτηριστικής τιμής την αστοχία στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους με  $2 \cdot \sigma_A = 155$  MPa. Όπως και στο προηγούμενο κύριο διάγραμμα έτσι και σ' αυτό διατηρείται η ίδια φιλοσοφία κατά την εκπόνησή του. Το ευθύγραμμο τμήμα KL είναι τμήμα μιας ευθείας που προκύπτει από την

γραμμική παλινδρόμηση των σημείων ( $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ) των δοκιμών με αντοχή πλέον των  $2 \cdot 10^6$  κύκλων και του ζεύγους ( $f_t$ ,  $f_c$ ) που ορίζει την μέση τιμή του ορίου θραύσης των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Το σημείο P ορίζει τις συνθήκες του τεστ κόπωσης κατά ΕΛΟΤ 1421-3 και όπως επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα, τα δείγματα ΧΟΣ περνάνε επιτυχώς τις απαιτήσεις του προτύπου.

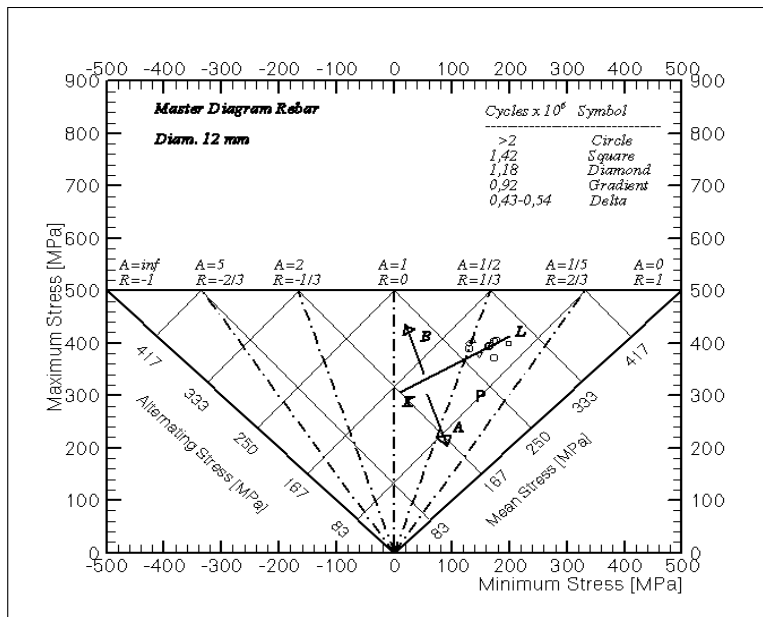


Σχήμα 3- Κατασκευή κύριου διαγράμματος για προϊόντα ΧΟΣ διαμέτρου 16 mm. (Περίοδος 2004-2006).

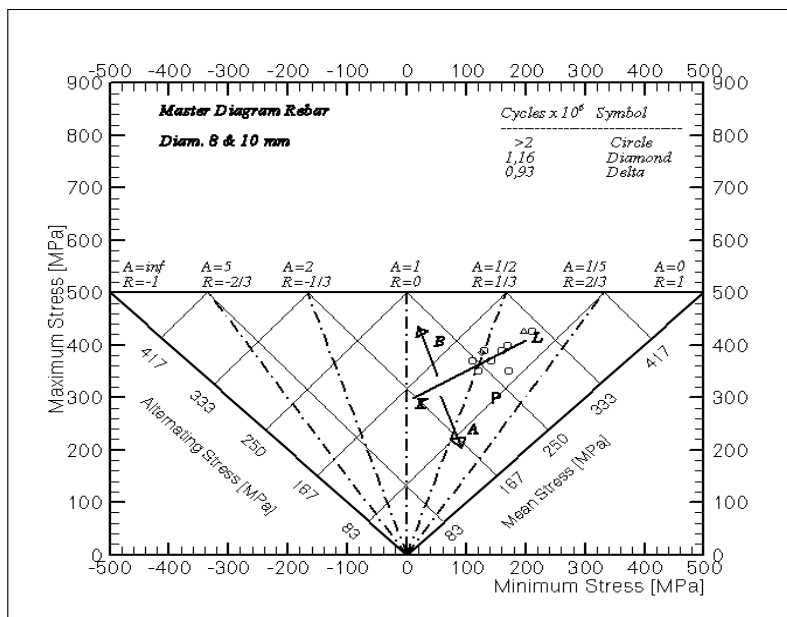
Στο Σχήμα 3 δίνονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση και στατιστική επεξεργασία για δοκίμια ΧΟΣ  $\phi 16$ mm, από την περίοδο 2004-2006. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι για εύρος εναλλασσόμενης φόρτισης  $2 \cdot \sigma_A = 150$  MPa τα δοκίμια  $\phi 16$ mm, εξεταζόμενα στατιστικά, αστοχούν σε αριθμό κύκλων φόρτισης πολύ μεγαλύτερο των  $2 \cdot 10^6$ . Η στατιστική επεξεργασία έδωσε ότι για  $2 \cdot \sigma_A = 180$  MPa τα δοκίμια  $\phi 16$ mm αστοχούν οριακά στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους και άνω.

Στο Σχήμα 4 δίνονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση και στατιστική επεξεργασία για δοκίμια ΧΟΣ  $\phi 12$ mm, από την περίοδο 2003-2007. Για τα δοκίμια αυτά η στατιστική επεξεργασία επιβεβαιώνει σε επίπεδο χαρακτηριστικής τιμής την αστοχία στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους με  $2 \cdot \sigma_A = 183$  MPa.





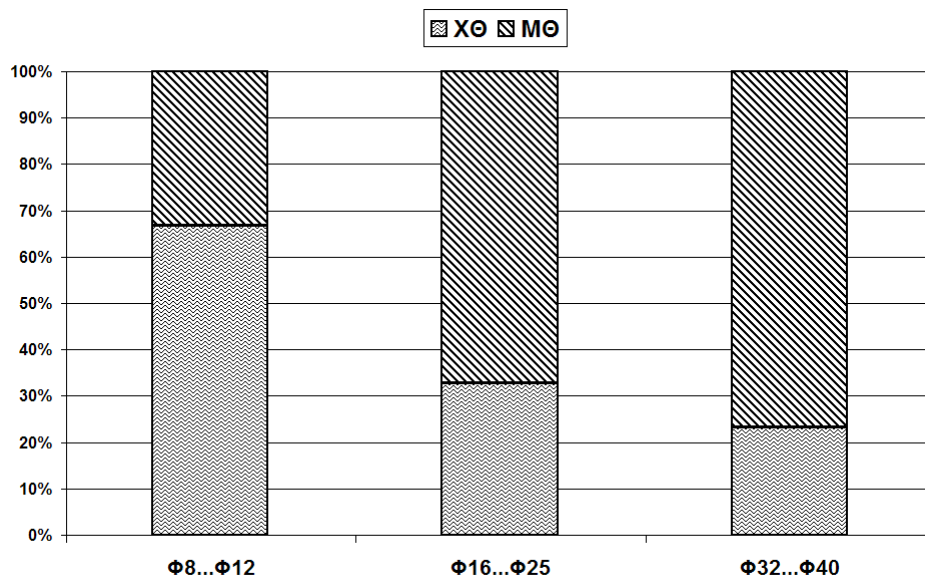
Σχήμα 4- Κατασκευή κύριου διαγράμματος για προϊόντα ΧΟΣ διαμέτρου 12 mm. (Περίοδος 2003-2007).



Σχήμα 5- Κατασκευή κύριου διαγράμματος για προϊόντα ΧΟΣ διαμέτρων 8 και 10 mm. (Περίοδος 2003-2007).

Στο Σχήμα 5 δίνονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κόπωση και στατιστική επεξεργασία για δοκίμια ΧΟΣ  $\varnothing 8$ , και  $\varnothing 10$  mm, από την περίοδο 2003-2007. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι για εύρος εναλλασσόμενης φόρτισης  $2\sigma_A = 150$  MPa τα δοκίμια  $\varnothing 8 + \varnothing 10$  mm, εξεταζόμενα στατιστικά όλα μαζί, αστοχούν σε αριθμό κύκλων φόρτισης πολύ μεγαλύτερο των  $2 \cdot 10^6$ . Η στατιστική επεξεργασία έδωσε ότι για  $2\sigma_A = 205$  MPa τα δοκίμια  $\varnothing 8 + \varnothing 10$  mm αστοχούν οριακά στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους και άνω.

Τα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε κόπωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 6 ομαδοποιημένα σε ομάδες μεγάλων ( $\Phi 32$  και  $\Phi 40$ ), μεσαίων ( $\Phi 16$ ,  $\Phi 20$ ,  $\Phi 25$ ) και μικρών ( $\Phi 8$ ,  $\Phi 10$ ,  $\Phi 12$ ) διαμέτρων, ανάλογα με το ποσοστό των δειγμάτων που άντεξαν 2 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης χωρίς θραύση.



Σχήμα 6- Ποσοστό δειγμάτων χωρίς θραύση (ΧΘ) μετά από 2 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης, για δείγματα ΧΟΣ διαφόρων διαμέτρων, (ΜΘ: με θραύση).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το ποσοστό των δειγμάτων χωρίς θραύση αυξάνει, όσο το μέγεθος των διαμέτρων βαίνει μειούμενο. Περίπου, το 67% των δειγμάτων με διαμέτρους  $\Phi 8$ - $\Phi 12$  mm δεν υφίσταται θραύση στους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους φόρτισης. Αντίστοιχα, τα ποσοστά για τις διαμέτρους

Φ16-Φ25 και Φ32-Φ40 είναι 33% και 23%. Είναι πολύ πιθανό στα Βρετανικά εργαστήρια να έχουν καταλήξει σε παρόμοια συμπεράσματα και ίσως για τον λόγο αυτό να έχουν συμπεριλάβει το μέγεθος της διαμέτρου στις συνθήκες της δοκιμής κόπωσης (Πίνακας 1).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συνεχής παρακολούθηση της αντοχής σε κόπωση των προϊόντων ΧΟΣ του ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ έχει δείξει ότι οι εφαρμοζόμενες πρακτικές παραγωγής (μέθοδος παραγωγής, γεωμετρία νευρώσεων, μορφή επιφανείας, έλεγχος γεωμετρικών χαρακτηριστικών) είναι οι πλέον ενδεδειγμένες. Γενικά τα χαμηλής διαμέτρου προϊόντα ( $\varnothing 8$ - $\varnothing 12$  mm) δεν παρουσιάζουν κανένα πρόβλημα ακόμα και σε απαιτήσεις ελέγχων κόπωσης πολύ πιο αυστηρές από εκείνες του προτύπου ΕΛΟΤ 1421-3, ενώ ακόμα και σε προϊόντα μεγάλων διαμέτρων ( $\varnothing 32$  και  $\varnothing 40$  mm) ο έλεγχος κρίνεται απόλυτα ικανοποιητικός σύμφωνα με το ισχύον πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν σε κάποιο βαθμό μια μικρή εξάρτηση της αντοχής σε κόπωση από την διάμετρο του χάλυβα. Είναι προφανές ότι όσο μικραίνει η διάμετρος των ΧΟΣ τόσο αυξάνει η τιμή του εύρους της εναλλασσόμενης φόρτισης για την οποία αντέχουν τους  $2 \cdot 10^6$  κύκλους φόρτισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν υπό τη μορφή των κυρίων διαγραμμάτων (master diagrams), από τα οποία φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η γραμμή KL που οριοθετεί την αντοχή σε κόπωση για  $2 \cdot 10^6$  κύκλους και άνω, είναι καθαρά πάνω από το σημείο P που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες των δοκιμών σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3. Συνεπώς, τα προϊόντα ΧΟΣ αντέχουν και σε δυσμενέστερες συνθήκες κόπωσης από εκείνες του εν λόγω προτύπου.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

*Άρθρα δημοσιευμένα σε πρακτικά συνεδρίων*

Σισμάνης, Π., Μαστοράκης, Α., «Αντοχή σε κόπωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος-πειραματικά αποτελέσματα & συμπεράσματα», 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών (Πάτρα 6-7 Δεκεμβρίου, 2007), (2007a) 117-123

Sismanis P., “Fatigue for Rebars-Theoretical & Practical Considerations”, 10<sup>th</sup> National Conference for Metallurgy with International Participation, Union of Metallurgists, Varna, Bulgaria, (2007b)

### *Βιβλία*

- Dieter G. E., “Mechanical Metallurgy”, McGraw-Hill Book Co. (1988)  
Shigley J. E., Mischke, C., R. “Mechanical Engineering Design”, 5<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, Inc. (1989)

### *Πρότυπα*

- BS 4449 (2005), Steel for the reinforcement of concrete-Weldable reinforcing steel-Bar, coil and de-coiled product-Specification  
DIN 488 (1984), Reinforcing steel (Grades, properties, marking)  
Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5D, Department of Defense, USA, (1983)  
Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5G, Department of Defense, USA, (1983)  
ΕΛΟΤ EN 10080 (2005), Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, Συγκολλησιμοι χάλυβες-Γενικές απαιτήσεις  
ΕΛΟΤ 1421-2 (2007), Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες-Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A  
ΕΛΟΤ 1421-3 (2007), Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες-Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C  
EN 1992-1-1 (2005), Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα - Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για κτίρια (Ευρωκώδικας 2)

### *Τεχνικές εκθέσεις*

- Hornikova J., Sandera P., Pokluda J., “Influence of Tempering Temperature on Mechanical Properties of Ultra-High Strength Low-Alloy Steels”, Brno University of Technology, project MSM0021630518, Czech Republic (2005)  
Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, ΚΕΔΕ-ΥΠΕΧΩΔΕ, αναθεώρηση (2007)