

ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ

UHX
G2S

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‘ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΑΜΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ
ΟΠΛΙΣΜΟΥ’

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Δρ Κ. Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΟΝ/ΜΟ :ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Α.Μ.:33906

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε μια χώρα που σεισμική δραστηριότητα είναι έντονη το ενδιαφέρον των τεχνικών επιστημόνων όπως των μηχανολόγων και των πολιτικών μηχανικών είναι έντονη. Από τα παλαιότερα χρόνια μέχρι σήμερα στο χώρο της κατασκευής του χάλυβα έχουν αλλάξει πολλά και σίγουρα προς το καλύτερο. [1] Αυτό λοιπόν έχει σαν συνέπεια να καταλαβαίνουν όλο και περισσότεροι την πολύ μεγάλη σημασία της καλυτέρευσης της ποιότητας του οπλισμένου σκυροδέματος. Για πρώτη φορά λοιπόν συντάχθηκε στην ΕΛΛΑΔΑ και τέθηκε σε εφαρμογή ο <<ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (Κ.Τ.Χ.) >>, ο οποίος θέτει απαιτήσεις όχι μόνο για την ποιότητα των χάλυβων οπλισμού αλλά και για το πώς θα πρέπει αυτοί να διαμορφώνονται και να τοποθετούνται εκεί όπου χρησιμοποιούνται.

Βεβαία το κακό σε μια τόσο γρήγορη σε ρυθμούς κοινωνία είναι ότι όλα γύρω μας αλλάζουν μέρα με την μέρα. Αυτό σίγουρα επηρεάζει και την γνώση μας πάνω στον οπλισμένο σκυροχάλυβα (μετέβεργα όπως είναι η κοινή της ονομασία), έτσι λοιπόν αφού δεν μπορούμε να κατανοήσουμε και να συγκρατήσουμε όλη αυτήν την γνώση έχουμε δημιουργήσει διαφορετικές ειδικότητες οι οποίες είναι κυρίως δυο (2). Αυτοί που είναι ειδικοί στις ιδιότητες του υλικού και αυτοί που είναι ειδικοί στην εφαρμογή και χρήση τους

Βέβαια δεν πρέπει να μελετάμε μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χάλυβα αλλά και τα οικονομικά χαρακτηριστικά του. Έτσι λοιπόν σύμφωνα με μια πρόσφατη έρευνα από τις οικονομικές αναλύτριες Φραγκίσκα Βουμβάκη, Μαρία Σάββα και Αθανασία Κουτούζου, εκπόνησαν μελέτη που εστιάζει στις εξελίξεις στην παγκόσμια αγορά σιδηρομεταλλεύματος (iron ore) καθώς και στις επιδράσεις αυτών στις ελληνικές επιχειρήσεις. [2]

Οι τιμές του σιδηρομεταλλεύματος, υλικό εξαιρετικά σημαντικό για τη βιομηχανία και τις κατασκευές διεθνώς διπλασιάστηκαν στις αρχές του δεύτερου τριμήνου του 2010 σε σχέση με τα επίπεδα που βρίσκονταν στις αρχές του έτους. Βασική αιτία αποτελεί η αλλαγή του τρόπου τιμολόγησης του σιδηρομεταλλεύματος με στόχο την αποτελεσματικότερη αποτύπωση των συνθηκών ζήτησης και προσφοράς.

Η επακόλουθη αύξηση των τιμών επηρεάζει σημαντικούς κλάδους της ελληνικής οικονομίας, κυρίως τις κατασκευές και τη βιομηχανία χάλυβα. Αυτό το σύντομο σημείωμα (i) περιγράφει τις ανακατατάξεις στη δομή του κλάδου που οδήγησαν στην αλλαγή του τρόπου τιμολόγησης, (ii) εμπεριέχει προβλέψεις για τις τιμές σιδηρομεταλλεύματος και χάλυβα, και (iii) εκτιμά την επίδραση στα περιθώρια κέρδους των δύο άμεσα επηρεαζόμενων κλάδων (όπως αναφέρθηκαν παραπάνω).

Οι δύο αγορές σιδηρομεταλλεύματος: Τα συμβόλαια και οι τρέχουσες τιμές Αρχικά, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι τα τελευταία χρόνια ουσιαστικά «συνυπήρχαν» δύο αγορές σιδηρομεταλλεύματος:

1) η παραδοσιακή αγορά βάσει ετήσιων συμβολαίων :

Η μεγάλη συγκέντρωση τόσο από την πλευρά των ορυχείων σιδηρομεταλλεύματος όσο και από την πλευρά των παραγωγών χάλυβα επέτρεπε τη διαπραγμάτευση βάσει ετήσιων συμβολαίων, προσφέροντας εύλογα περιθώρια κέρδους στους παραγωγούς χάλυβα και σταθερές χρηματαγορές στα ορυχεία (στοιχείο σημαντικό για τον προγραμματισμό επενδύσεων).

2) Η νέα αγορά βάσει τρεχουσών τιμών (spot αγορά) :

Η ταχύτατη ανάδειξη της Κίνας σε βασικό αγοραστή του σιδηρομεταλλεύματος δημιούργησε ανισοροπίες ζήτησης-προσφοράς. Αυτό οδήγησε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 στη δημιουργία μιας – αρχικά ρηχής – spot αγοράς χαμηλής ποιότητας σιδηρομεταλλεύματος με βασικούς εταίρους: μικρούς παραγωγούς Ινδίας και μικρά χυτήρια χάλυβα στην Κίνα (τα οποία ούτως ή άλλως δεν μπορούσαν να εξασφαλίσουν απευθείας μακροχρόνια συμβόλαια με τα μεγάλα ορυχεία). Η πτώση της ζήτησης τα έτη 2008-2009 από τους παραδοσιακούς αγοραστές σιδηρομεταλλεύματος (που είχαν μακροπρόθεσμα συμβόλαια) ανάγκασε τα μεγάλα ορυχεία να στραφούν στην spot αγορά όπου υπήρχε ισχυρή ζήτηση από Κίνα (η οποία όπως προαναφέραμε λόγω του κατακερματισμένου κλάδου της σε μεγάλο βαθμό αγόραζε σε τρέχουσες τιμές). Έτσι η αγορά αυτή απέκτησε μεγαλύτερη ρευστότητα, καλύπτοντας το 40-50% των εμπορικών συναλλαγών το 2009.

Έτσι λοιπόν έχουμε το νέο σύστημα τιμολόγησης σιδηρομεταλλεύματος

Η είσοδος της Κίνας άλλαξε τους κανόνες του παιχνιδιού, καθώς περιόρισε το βαθμό συγκέντρωσης των παραγωγών χάλυβα και συνεπώς τη διαπραγματευτική τους δύναμη. Έτσι, τον Απρίλιο του 2010, κλείστηκαν τα πρώτα τριμηνιαία συμβόλαια μεταξύ των ορυχείων Vale και BHP Billiton και ιαπωνικών βιομηχανιών χάλυβα (όπως η Nippon Steel) σε τιμή βάσει του μέσου όρου του προηγούμενου τριμήνου

στην spot αγορά (κοντά στα \$120/τόνος από \$60/τόνος για την περίοδο Απρίλιος 2009- Μάρτιος 2010). Σε αυτή τη βάση, τα συμβόλαια που ακολούθησαν κλείστηκαν σε τριμηνιαία βάση και σε τιμή παρόμοια με του προαναφερθέντος συμβολαίου. Η εκτόξευση αυτή των τιμών προέκυψε καθώς το προηγούμενο σύστημα τιμολόγησης οδήγησε στη μεγέθυνση των διαρθρωτικών ανισοροπιών προσφοράς-ζήτησης της παρούσας συγκυρίας. Με άλλα λόγια, το μέγεθος της υπερβάλλουσας ζήτησης δε μετακυλούσαν σε αντίστοιχες αυξήσεις τιμών. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις μας, μια άνοδος της υπερβάλλουσας ζήτησης (όπως αποτυπώνεται στο βαθμό χρησιμοποίησης της παραγωγικής δυναμικότητας σιδηρομεταλλεύματος) κατά 10% αύξανε την τιμή των ετήσιων συμβολαίων (βάσει προγενέστερου συστήματος τιμολόγησης) μόλις κατά 6%. Σημειώνουμε ότι αν οι τιμές είχαν αυξηθεί περισσότερο, η αυξημένη κερδοφορία των ορυχείων θα τους είχε οδηγήσει σε περισσότερες επενδύσεις για αύξηση της παραγωγής – περιορίζοντας έτσι το βαθμό υπερβάλλουσας ζήτησης.

Σήμερα όμως έχουμε ανοδικές πιέσεις ασκούνται στις τιμές σιδηρομεταλλεύματος και συνεπώς χάλυβα άρα επιχειρώντας να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση του νέου τρόπου τιμολόγησης στην πορεία των τιμών, εκτιμήσαμε ένα οικονομετρικό υπόδειγμα προσδιορισμού των spot τιμών με βασική προσδιοριστική μεταβλητή το βαθμό χρησιμοποίησης της παραγωγικής δυναμικότητας σιδηρομεταλλεύματος (ως δείκτη υπερβάλλουσας ζήτησης). Η ελαστικότητα της τιμής ως προς την υπερβάλλουσα ζήτηση είναι υψηλή (1,4) – επιβεβαιώνοντας ότι το νέο σύστημα τιμολόγησης αποτυπώνει αποτελεσματικά τις συνθήκες αγοράς.

Καθώς ο βαθμός χρησιμοποίησης των ορυχείων εκτιμάται ότι θα προσεγγίσει το 98% το 2010 πριν επιστρέψει σταδιακά στο μακροχρόνιο μέσο όρο του 96,5% το 2012, αναμένεται ότι θα ασκηθούν ανοδικές πιέσεις στις τιμές βραχυπρόθεσμα. Βάσει του υποδείματός μας, οι τιμές σιδηρομεταλλεύματος θα προσεγγίσουν τα \$130/τόνος το 2010-2011 και τα \$115/τόνος το 2012.

Παράλληλα με το σιδηρομετάλλευμα, αντίστοιχη πορεία τιμών αναμένεται και στη δεύτερη σημαντικότερη πρώτη ύλη παραγωγής σιδήρου: τον μεταλλουργικό άνθρακα (metallurgical coal). Συγκεκριμένα, ο τρόπος τιμολόγησής του αλλάζει επίσης, η πορεία ζήτησής του είναι κοινή ενώ η προσφορά του είναι βραχυπρόθεσμα ανελαστική.

Ενσωματώνοντας τις αυξημένες τιμές των δύο αυτών υλικών στο κόστος παραγωγής χάλυβα και θεωρώντας ότι οι παραγωγοί χάλυβα θα τις μετακυλήσουν στην τελική

τιμή, εκτιμούμε ότι η τιμή χάλυβα (βάσει του δείκτη HRC) θα αυξηθεί σε €500/τόνος το 2010, σε €530/τόνος το 2011 και σε €500/τόνος το 2012 (από €380/τόνος το 2009).

Πώς όμως επηρεάζονται οι ελληνικές εταιρείες από αυτές τις τιμές:

Η προβλεπόμενη αύξηση των τιμών σιδήρου εκτιμάται ότι θα επηρεάσει την ελληνική οικονομία – κυρίως τη βιομηχανία χάλυβα και τις κατασκευές. Βάσει της ιστορικής σχέσης των περιθωρίων κέρδους των δύο αυτών κλάδων με την τιμή του σιδήρου, εκτιμούμε ότι η ανοδική πορεία των τιμών σιδήρου κατά μέσο όρο την τριετία 2010-2012 θα αυξήσει κατά 3 ποσοστιαίες μονάδες το μεικτό περιθώριο κέρδους της βιομηχανίας χάλυβα (στο 17% το 2010-2012 από 14% το 2009), καθώς το περιθώριο μεικτού κέρδους ακολουθεί τις μεταβολές των διεθνών τιμών λόγω της χρονικής υστέρησης μεταξύ αγοράς πρώτων υλών και πώλησης του τελικού προϊόντος.

θα περικόψει 1,5 ποσοστιαίες μονάδες από το μεικτό περιθώριο του κλάδου κατασκευών (στο 7% το 2010-2012 από 8,5% το 2009), καθώς αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους παραγωγής (5%-10%)

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής είναι να μπορέσει να παρουσιάσει με πιο απλό τρόπο την γνωριμία με όλες τις μηχανικές ιδιότητες ,την κραμματική ανάλυση του και την κατασκευή των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος η αλλιώς στην κοινή της ονομασία 'μπετόβεργα' σύμφωνα με τα νέα πρότυπα του ΕΛΟΤ και με την βοήθεια των ερευνών εγκεκριμένων μηχανικών και καθηγητών που ασχολήθηκαν παλαιότερα με αυτό το θέμα.

Το πόσο θα επιτευθεί αυτός ο στόχος δεν το γνωρίζω αλλά ίσως είναι μια πολύ καλή προσπάθεια να μεταφέρω όσες περισσότερες γνώσεις μπορώ σε όσους περισσότερους συναδέλφους μηχανικούς η μη που γνωρίζω.

Βέβαια δεν θα παρέλειπα ποτέ να ευχαριστήσω την Δρα. **KARMEN MENTREA** που με βοήθησαν με το μάθημα του Π.Ε.Τ.ΥΛ. όπως επίσης και όποτε τους χρειάστηκα να με συμβουλευσουν με τις γνώσεις τους αλλά πάνω από όλους τν καθηγητή μου Δρ. **Κ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟ**

Ο οποίος μου συμπαραστάθηκε και μου χάρισε αμέτρητες γνώσεις πάνω στις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Ο **χάλυβας** (κοινώς *ατσάλι*) είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φώσφορου, θείου και οξυγόνου. Οι κραμματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων. Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. [3]

Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες». Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα .

Η ιστορία του χάλυβα ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Πάντως οι Χετταίοι γνώριζαν πώς να παράγουν χάλυβα ήδη από το 2300 π.Χ. Την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας πολλοί μεσογειακοί λαοί, αλλά και οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν την τέχνη της παραγωγής σπογγώδους σιδήρου και χάλυβα, καθώς και την τέχνη της σκλήρυνσης του χάλυβα με θέρμανση και απότομη ψύξη («βαφή»). Περίφημα ήταν τα σφυρήλατα χαλύβδινα δαμάσκηνα σπαθιά, που κατασκευάζονταν κατά τον Μεσαίωνα στη Συρία αλλά και σε τόπους πιο μακρινούς όπως στην Ιαπωνία.

Η σύγχρονη ιστορία του χάλυβα αρχίζει στα μέσα του 19ου αι., όταν ο Άγγλος εφευρέτης Χένρι Μπέσσεμερ, ανακάλυψε πως να μετατρέπει τον τηγμένο χυτοσίδηρο σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο («μεταλλάκτη») επενδυμένο με βασικά πυρίμαχα τούβλα. Την ίδια εποχή ανακαλύφθηκε η μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα σε καμίνοους ανοικτής εστίας (κάμινος SIEMENS-MARTIN). Σήμερα, η ανακάλυψη του Μπέσσεμερ χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την

απανθράκωση του χυτοσιδήρου. Η κάμιнос Siemens-Martin εγκαταλείφθηκε ως πιο ενεργοβόρος και λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.

Οι M. K. Lee και B.I.G. Barr [4] στην έρευνα τους για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος με νευρώσεις η οποία έγινε με την συνήθη βιομηχανική ανάμιξη , συμπίεση , και συνθήκες σκλήρυνσης. Δυο χαρακτηριστικά , η αντοχή (θλιπτική και εφελκυστική) και η θραύση (μετρήσεις σκληρότητας) έχουν διερευνηθεί με ελέγχους σε δείγματα διαμορφωμένων ράβδων 5 m SFRC .Οι ράβδοι αυτοί είναι από χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος που έχουν παραχθεί με το συνήθη τρόπο .Μικρές διαφορές στις αντοχές εφελκυσμού παρατηρήθηκαν λόγω της ύπαρξης προσανατολισμού των νευρώσεων. Καμπτικές δοκιμές σε δοκάρια με εγκοπές είχαν καλύτερη επαναληψιμότητα στις δοκιμές από εκείνες που έγιναν σε δοκάρια χωρίς εγκοπές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών στρέψης έδειξαν ότι η δοκιμή είναι μια καλή μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό και στο μέτρο ελαστικότητας. Η μέθοδος είναι σχετικά απλή και έδειξε ότι είναι αποτελεσματική και έχει επαναληψιμότητα.

Ο C.A.Apostolopoulos [5] στην μελέτη του αναφέρει ότι η διάβρωση έχει αρνητική συνεισφορά σχετικά με την δομική ακεραιότητα του σκυροδέματος και οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ράβδων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος .Η έκθεση στο χλώριο , το θαλασσινό νερό και των χημικών επιδράσεων του περιβάλλοντος αποδυναμώνουν τον χάλυβα οπλισμού. Ένας σημαντικός παράγοντας αντοχής του διασπαστικού χάλυβα B500c (μαρτενσίτη - φερριτοπερλίτη) θεωρείται ότι είναι το πάχος του εξωτερικού φλοιού μερτενσίτη , που ποικίλλει ανάλογα με την διατομή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της διάβρωσης και του μεγέθους της περιοχής για τις μηχανικές ιδιότητες του B500c χάλυβα , διενεργήθηκε μια πειραματική έρευνα για νευρώσεις με διατομές 8,12,16 και 18 mm , οι οποίες έχουν διαβρωθεί τεχνικά για 10,20,30,45,60,90 και 120 μέρες.

Εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι η διάρκεια της διάβρωσης και το μέγεθος της διατομής του οπλισμού έχει σημαντική επίπτωση στην υποβάθμιση της αντοχής και της ολκιμότητας των δειγμάτων . Η εφελκυστική αντοχή πριν και μετά την διάβρωση ανέφερε σταδιακή μεταβολή και κατακόρυφη πτώση της αξίας τους.

Η παρατεταμένη έκθεση στο περιβάλλον άλατος ενισχύει την ζημιά και δημιουργεί

κοιλότητες και εγκοπές με αποτέλεσμα να έχουμε την δημιουργία τάσεων στα σημεία και προοδευτική μείωση της ολκιμότητας.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός και οι κώδικες που αγνοούν την επίδραση του μεγέθους της διατομής, το βαθμό της διάβρωσης και την μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε απρόβλεπτες επιδόσεις κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

Η έρευνα αυτή κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

1. Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από το μέγεθος της διατομής του οπλισμού και το επίπεδο της διάβρωσης
2. Ο ρυθμός μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα οπλισμού B500c κατά την διάρκεια της ταχείας έκθεσης του σε διαβρωτικό περιβάλλον δεν είναι το ίδιο για όλες τις διατομές. Η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων για της μεγάλης διαμέτρου χάλυβα οπλισμού φαίνεται να είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές για τα μικρότερης διαμέτρου δείγματα.
3. Η διακύμανση του χάλυβα στις μηχανικές ιδιότητες της αντοχής και της ολκιμότητας σε σχέση με τη διάσταση του χάλυβα B500c πρέπει να επανεκτιμηθεί και να ενθαρρύνουν την περαιτέρω έρευνα προκειμένου να αποκτήσουν πρόσθετες γνώσεις για πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό.

Επίσης ο Ο C.A.Apostolopoulos[6] παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της βαθμιαίας συσσώρευσης βλάβης από διάβρωσης, λόγω της διάβρωσης από εργαστηριακό άλας, στην μηχανική συμπεριφορά των ράβδων χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος S500s tempcore, όταν υποβάλλεται σε εναλλασσόμενους κύκλους χαμηλής κόπωσης. Η παρουσία του εργαστηριακού άλατος και η κόπωση που του υποβάλλεται, προσομοιώνουν την φυσική διάβρωση σε παράκτιες περιοχές και τα φορτία λόγω σεισμών στις κατασκευές αντίστοιχα, με ικανοποιητικό τρόπο. Τα αποτελέσματα της δοκιμής της κόπωσης, δείχνουν ότι η διάβρωση χαλύβδινων ράβδων εμφανίζουν τη σταδιακή μείωση τόσο της φέρουσας ικανότητας καθώς και της διαθέσιμης ενέργειας. Δοκιμές εφελκυσμού επιβεβαίωσαν την βαθμιαία αύξηση της ευθραυστότητας που εμφανίζεται λόγω της διάβρωσης του χάλυβα. Επιπλέον παρατηρήθηκε μείωση του αριθμού των κύκλων κόπωσης μέχρι την θραύση, υπό συνθήκες χαμηλού κύκλου

κόπωσης .Δεδομένου ότι και οι δύο παραπάνω παράγοντες είναι συναρτήσει του χρόνου και υποβαθμίζουν την αξιοπιστία των ράβδων του χάλυβα S500s tempcore.

Η πειραματική μελέτη καταλήγει στα εξής:

- Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την αναμενόμενη συμπεριφορά των διαβρωμένων ράβδων χάλυβα S500s οι οποίοι χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στις μέρες μας στις κατασκευές.
- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χάλυβας S500s έχει σημαντική μείωση της πλαστικότητας καθώς και του αριθμού των κύκλων κόπωσης μέχρι την θραύση καθώς το επίπεδο της διάβρωσης αυξάνει δυσθραυστότητα των ράβδων επιβεβαιώθηκε από τις δοκιμές του εφελκυσμού ,που έδειξε σημαντική μείωση της επιμήκυνσης του υλικού πριν την θραύση.
- Το μέγιστο φορτίο φέρουσας ικανότητας μειώνεται κατά την διάρκεια της κόπωσης .Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στην περίπτωση που το υλικό έχει διαβρωθεί .Έτσι στην περίπτωση των παλιών κατασκευών σε ενεργά σεισμικές περιοχές δεν θα πρέπει να αναμένουμε μια σταθερή φέρουσα ικανότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Η παρατηρούμενη υποβάθμιση του υλικού θα πρέπει να εξετάζεται σε κάθε μελλοντική ρύθμιση σχετικά με την επισκευή και συντήρηση των κατασκευών.

Οι C.A.Apostolopoulos και M.P.Papadopoulos [7] όμως εκαναν και μια άλλη ερευνα, ετσι λοιπον διεξήγαν μια πειραματική μελέτη για την αξιολόγηση της υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων του εφελκυσμού , για τους χάλυβες κατηγορίας S400 , που προκαλείται από ταχεία αλατονέφωση (salt spreay) η οποία δημιουργήθηκε τεχνητά στο εργαστήριο. Επιπλέον οι χάλυβες έχουν υποστεί μια ελαφρά κόπωση, για να προσομοιώσουν τις συνθήκες φόρτισης από σεισμούς , τόσο σε μη διαβρωμένους, όσο και σε χάλυβες που έχουν διαβρωθεί και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού έδειξαν σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων με την πάροδο της διάβρωσης. Ακόμα , οι δοκιμές δείχνουν ότι η υποβάθμιση του υλικού μπορεί να είναι πιο σοβαρή όταν λαμβάνεται η απώλεια μάζας, ως μέτρο της βλάβης που προκαλείται από τη διάβρωση.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης είναι τα ακόλουθα :

- Η έκθεση του χάλυβα S400 (ελληνικό ισοδύναμο B420s) σε περιβάλλον άλατος οδηγεί σε σημαντική απώλεια μάζας η οποία αυξάνει με την αύξηση της διάρκειας έκθεσης. Μια έκθεση σε περιβάλλον άλατος στο εργαστήριο για 90 μέρες ή περισσότερο είναι ρεαλιστική για την προσομοίωση της φυσικής διάβρωσης που γίνεται σε παλιά κτήρια κοντά σε παράκτιες περιοχές.
- Η έκθεση σε περιβάλλον άλατος έχουν μεν περιορισμένο αντίκτυπο στην αντοχή του χάλυβα ποιότητας S400 , ωστόσο κατά την εξέταση της εμφανούς καταπόνησής τους το όριο ελαστικότητας του υλικού μειώνεται σε τιμές που βρίσκονται κάτω από την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή που καθορίζονται από τα πρότυπα μετά από περίπου 105 μέρες και λόγω της έκθεσης αυτής έχουμε μια απώλεια μάζας περίπου 9%.
- Η έκθεση σε περιβάλλον άλατος έχει αισθητή επίδραση στην ολκιμότητα του υλικού. Για μια παραμονή 47 μέρες , η επιμήκυνση σε θραύση βρίσκεται κάτω από το $ef = 14\%$, που αποτελεί το όριο που απαιτεί η προδιαγραφή.
- Η μείωση της ολκιμότητας έχει αρνητικές συνέπειες για τη συμπεριφορά κόπωσης του υλικού. Μια απώλεια μάζας κάτω του 2% προκαλεί μείωση 22% των κύκλων κόπωσης μέχρι να αστοχήσει, ενώ ένα 3% της απώλειας μάζας, οδηγεί σε ένα ποσοστό μείωσης 47%.
- Τα σημερινά πρότυπα υπολογισμού της αντοχής του οπλισμού σκυροδέματος δεν λαμβάνουν υπόψη την αισθητή υποβάθμιση του χάλυβα οπλισμού που οφείλεται στη βαθμιαία συσσώρευση της διάβρωσης. Μια αναθεώρηση των προτύπων αυτών ώστε να λαμβάνουν υπόψη τους τις παραπάνω συνέπειες της διάβρωσης για τις ιδιότητες των υλικών φαίνεται να είναι απαραίτητες, δεδομένου ότι πολλά έργα αποκατάστασης, εκτελούνται σε κτήρια που έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας κατηγορίας S400 και δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της διάβρωσης.

Οι J.Nikolaou και G.D.Papadimitriou [8], μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος οι οποίοι παρήχθησαν με τρεις μεθόδους

1. Με την διαδικασία tempcore

2. Με μικροκραματωμένους (micro alloying)
3. Με εργοσκληύρυνση

Οι οποίοι όλοι ανήκουν στην κατηγορία B500s, επιλέχθηκαν για την έρευνα , με στόχο να αντιπροσωπεύουν ένα ευρύ φάσμα χαλύβων που διατίθενται σήμερα στον κλάδο των κατασκευών στην Ευρώπη. Τόσο στους μικροκραματωμένους με βανάδιο όσο και στους χάλυβες με εργοσκληύρυνση ερευνήθηκαν οι τυπικές διάμετροι. Τα δείγματα των παραπάνω τύπων χαλύβων θερμαίνονται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 200 °C έως 800 °C για 1 ώρα και στην συνέχεια ψύχονται στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια , οι υπόλοιπες τους ιδιότητες αξιολογήθηκαν από μετρήσεις σκληρότητας ,εφελκυσμού και δόκιμες κρούσης V-CHARPY. Η μεταλλογραφική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε για να συσχετίσει τις μηχανικές ιδιότητες με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής.

Από την παραπάνω έρευνα , έγιναν τα συμπεράσματα ότι οι χάλυβες tempcore παρουσιάζουν την πιο σταθερή συμπεριφορά σε θερμοκρασίες μέχρι 500 °C, ενώ οι μικροκραματωμένοι χάλυβες αν και παρουσίασαν πολύ ικανοποιητικές εφελκυστηκές ιδιότητες , εμφανίζουν πολύ χαμηλή ανθεκτικότητα λόγω της εκτράχυνσης των καρβιδίων βαναδίου.Οι χάλυβες με εργοσκληύρυνση εμφάνισαν συνεχή μείωση των ιδιοτήτων τους από τους 250 °C περίπου και παρουσιάζουν πρόβλημα από ευθραυστότητα στην θερμοκρασία των 200 °C λόγω γήρανσης. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Η αντοχή της συγκεκριμένης δομής δεν εξαρτάται μόνο από το βαθμό αντοχής του χάλυβα οπλισμού αλλά και από την διαδικασία κατασκευής του χάλυβα.
- Η θέρμανση των μικροκραματωμένων χαλύβων έχει ως αποτέλεσμα την εκτράχυνση(coarsening) των υφιστάμενων ιζημάτων , κατά μήκος των ορίων των κόκκων του φερριτη. Αυτό οδηγεί σε μια μικρή αύξηση του ορίου διαρροής μεταξύ 200 °C και 600 °C.
- Οι χάλυβες από εργοσκληύρυνση δείχνουν μια συνεχή μείωση της απόδοσης και της αντοχής που αρχίζει από τους 200 °C και τους 300 °C ,αντιστοίχως, μαζί με μια συνεχή αύξηση της σκληρότητας .Μια μικρή αύξηση της σκληρότητας και μια έντονη μείωση της ολκιμότητας σε επίπεδα του 40% της

αρχικής τιμής, μετά την θέρμανση σε 200 °C ,δείχνουν την ευαισθησία αυτού του είδους χάλυβα στο φαινόμενο της γήρανσης.

- Οι χάλυβες τύπου tempcore δείχνουν μια από σταθερή συμπεριφορά από τους άλλους τύπους χάλυβα μέχρι την θερμοκρασία των 500 °C.
- Η κραματοποίηση του χάλυβα με μαγγάνιο ή με πολύ μικρές προσθήκες βαναδίου , προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή στον πυρήνα ,παράγοντας ράβδους tempcore που εμφανίζουν σχεδόν σταθερές μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού μέχρι τους 500 °C.

Επίσης J.Nikolaou και G.D.Papadimitriou [9], στην έρευνα τους αναφέρουν ότι η "απευθείας μέτρηση" των επιπτώσεων της σκληρότητας στους tempcore και στους μικροκραματομένους με βανάδιο χάλυβες οπλισμού, της ίδιας κατηγορίας αντοχής (500 MPa ονομαστική τάση διαρροής) έχει διερευνηθεί.

Ο όρος " άμεση μέτρηση" σημαίνει ότι τα δείγματα V-notched (εγκοπές) με την αρχική μορφή των ράβδων και όχι με το ορθογωνικό πρότυπο)που χρησιμοποιείται, αναφέρονται εδώ ως δείγματα V-notched(DVN). Οι κυριότερες επιπλοκές που ανέκυψαν είναι η χρήση μη τυποποιημένης γεωμετρίας (Charpy V-notched, CVN), το μεταβλητό μέγεθος των ράβδων και η σύνθετη μικροδομή του tempcore χάλυβα οπλισμού. Έχει αποδειχθεί ότι τα χαρακτηριστικά της σκληρότητας του χάλυβα οπλισμού μπορούν να εκτιμηθούν από τις επιπτώσεις της δοκιμή CVN με τη χρήση δειγμάτων (DVN). Διαπιστώνεται ότι, εάν η εγκοπή υπερβεί ένα κρίσιμο βάθος, μπορούμε να λάβουμε ουσιαστικές μετρήσεις, ανεξάρτητα από τη διάμετρο του χάλυβα οπλισμού και ότι η θερμοκρασία μετάπτωσης μπορεί να εκτιμηθεί από την εναπομένουσα γωνία της ρωγμής του δείγματος (DVN). Οι μικροκραματομένοι με βανάδιο χάλυβες οπλισμού έχουν μικρότερο εύρος θερμοκρασίας μετάπτωσης (transition tempcore) από όλκιμο σε ψαθυρό (-100 °C), σε σύγκριση με τον 1020 AISI χάλυβα (-30 °C).

- Έχει αποδειχθεί ότι τα χαρακτηριστικά της σκληρότητα του χάλυβα οπλισμού μπορεί να εκτιμηθεί από τον έλεγχο (CVN που χρησιμοποιούν (DVN) δείγματα. Διαπιστώνεται ότι, εάν η εγκοπή υπερβεί ένα κρίσιμο βάθος, μπορούμε να λάβουμε ακριβής μετρήσεις, ανεξάρτητα από τη διάμετρο του οπλισμού χάλυβα. Το αποτέλεσμα αυτό ισχύει και για τους δύο χάλυβες οπλισμού, είτε tempcore, είτε θερμής έλασης μικροκραματομένους (microalloyed) με βανάδιο.

- Οι μικροκραματομένοι χάλυβες έχουν μικρότερες συνέπειες από την σκληρότητα από τους χάλυβες tempcore παρά το γεγονός ότι και οι δύο χάλυβες οπλισμού παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά αντοχής, ειδικά στην περίπτωση των μικρών εγκοπών που αντιστοιχεί σε περισσότερες περιοχές του κατάγματος.
- Σύμφωνα με τις δοκιμές DVN , ο χάλυβας οπλισμού tempcore έχει μια θερμοκρασία μετάβασης περίπου -50°C , ενώ οι microalloyed με βανάδιο η θερμοκρασία μετάβασης είναι -35°C .
- Σύμφωνα με τα πρότυπα δείγματα CVN, οι microalloyed με βαναδίου χάλυβες οπλισμού έχουν χαμηλότερο φάσμα θερμοκρασιών για τη μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση (-10°C), σε σύγκριση με το 1020 AISI χάλυβα, που δόθηκε στο βανάδιο μικρο-προσθήκες, αλλά είναι υψηλότερη σε σύγκριση με το χάλυβα tempcore (-30°C).
- Η θερμοκρασία μετάβασης μπορεί να εκτιμηθεί με τη μέτρηση της γωνίας κάμψης της ρωγμής των δειγμάτων DVN μετά την αντιστοίχιση των σπασμένων κομματιών τους. Το εύρος της θερμοκρασίας μετάβασης από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση συμπίπτει με την θερμοκρασία στην οποία η γωνία της ρωγμής παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο σε θερμοκρασία -30°C για τον tempcore χάλυβα οπλισμού και σε -10°C για τους microalloyed χάλυβες με βανάδιο.
- Οι μικροκραματομένοι χάλυβες οπλισμού έχουν μικρότερη πλαστικότητα, όταν φορτώνονται δυναμικά απ' ότι οι χάλυβες tempcore, αν και έχουν παρόμοια απόδοση, αλλά υψηλότερη τελική.

Οι Oguzhan Kelesternur κ.α. [10], διεξήγαν έρευνα στον διφασικό(dual phase, DP) χάλυβα 5AE1010, ο οποίος έχει χαμηλό κόστος και ευρύ φάσμα χρήσης στον κλάδο των κατασκευών, τον υπέβαλαν σε κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, με σκοπό να διερευνηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες κάτω από διάφορες συνθήκες βαφής. Εφαρμόστηκε στο χάλυβα οπλισμού η θερμική κατεργασία της ανόπτησης (intercritical annealing), προκειμένου να αποκτήσουν DP χάλυβα με διαφορετικό ποσοστό μαρτενσίτη. Επιπλέον, οι χάλυβες αυτοί, υπόκεινται βαφή στους 200°C ,

300 °C και 400 °C, για 45 λεπτά και στη συνέχεια ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου. Εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες όπως, εφελκυστική αντοχή, όριο διαρροής, συνολική επιμήκυνση, μέτρο δυσθραυστότητας και η σκληρότητα. Επιπλέον θραυστογραφία (fractographic), έχει γίνει με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), καθώς και μεταλλογραφική εξέταση. Ως αποτέλεσμα αυτής της μελέτης, διαπιστώνεται ότι οι μηχανικές ιδιότητες του διφασικού χάλυβα (DP) έχουν αλλάξει ανάλογα με τη σκληρότητα και το ποσοστό αναλογία του μαρτενσίτη. Ακόμα, η εφελκυστική αντοχή, το όριο διαρροής και το μέτρο δυσθραυστότητας έχουν μειωθεί. Αντίθετα η συνολική επιμήκυνση και η σκληρότητα έχουν αυξηθεί.

- ❖ Διαπιστώνεται ότι η αντοχή του χάλυβα οπλισμού θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά με τη διφασική θερμική κατεργασία.
- ❖ Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παραπάνω θερμική κατεργασία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, μεγαλύτερης από 0,1% και για δείγματα με πάχος μεγαλύτερο του 1,0. Το κλειδί όμως της διαδικασίας είναι η γρήγορη ταχύτητα ψύξης.
- ❖ Το ποσοστό της φάσης και το μέγεθος των κόκκων έχουν αλλάξει, ανάλογα με τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης. Το ποσοστό του μαρτενσίτη έχει αυξηθεί και ο μέσος όρος του μεγέθους των κόκκων μειώθηκε με την αύξηση της διάρκειας ωστενιτοποίησης.
- ❖ Οι τιμές της μικροσκληρότητας (microhardnesses) των φάσεων του φερρίτη και του περλίτη στην μικροδομή των διφασικών χαλύβων έχουν αλλάξει, ανάλογα με τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης και τη θερμοκρασία βαφής. Έχουμε μείωση της σκληρότητας λόγω της μείωσης της φάσης του μαρτενσίτη και της αντίστοιχης αύξησης της φάσης του φερρίτη, λόγω της αύξησης της διάρκειας ωστενιτοποίησης.
- ❖ Η αντοχή των διφασικών χαλύβων έχει αλλάξει ανάλογα με της μικροτάσεις και την αναλογία της φάσης του μαρτενσίτη. Διαπιστώνεται ότι τα δείγματα που υπέστησαν βαφή μετά από 40 λεπτά ωστενιτοποίησης δείχνουν μια αύξηση του ορίου διαρροής, της εφελκυστικής αντοχής και της σκληρότητας.
- ❖ Η εφελκυστική αντοχή, το όριο διαρροής και το μέτρο δυσθραυστότητας μειώνονται, ενώ η συνολική επιμήκυνση και η σκληρότητα αυξάνουν.

- ❖ Οι θραυστογραφικές μελέτες, με χρήση ηλεκτρικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δείχνουν ότι σπάσιμο εμφανίζεται στους χάλυβες που μετά τη βαφή δεν υπέστησαν επαναφορά.

Οι Barbara Maffela, κ.α. [11] διεξήγαν μια εργασία με αφορμή την συνεχόμενη αύξηση ενδιαφέροντος περί της βελτιστοποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού, ιδιαίτερα δε αυτών που προσδιορίζονται για χρήση σε αντισεισμικές κατασκευές, οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια ευρεία μελέτη πάνω στην ικανότητα χρήσης πρωτοποριακών τύπων χαλύβων οπλισμού σχεδιασμένων για αντισεισμική χρήση. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν χάλυβες μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα και ελαφρά κραμματομένοι με μαγγάνιο και πυρίτιο υπό την μορφή χάλυβα οπλισμού, οι οποίοι είχαν υποβληθεί σε ενδοκρίσιμη βαφή (θερμοκρασιακά εύρη θέρμανσης βαφής 740 – 820 °C) με σκοπό να αποκτήσουν διαφορετικές διαφασικές δομές φερρίτη- μαρτενσίτη. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές και στην συνέχεια χαρακτηρίστηκαν από μηχανικές δοκιμές και μεταλλογραφικές αναλύσεις. Με κριτήριο βαρύτητας τα αποτελέσματα ολκιμότητας και μηχανικών ιδιοτήτων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποίησε η ομάδα μελέτης χαρακτήρισαν τα δοκίμια και τα κατέταξαν. Συγκεκριμένα κατέληξαν ότι η ολική επιμήκυνση σε δύναμη Agt καθώς και την αναλογία τάσεως-παραμορφώσεως (K) ενός χάλυβα οπλισμού παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του ορίου ελαστικότητας των χαλύβων. Έπειτα συνοψίζονται σε πίνακες οι μηχανικές ιδιότητες που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές των υπό εξέταση χαλύβων (table 5) και επαληθεύουν την υπόθεσή τους για πιθανά πλεονεκτήματα χρήσης τους έναντι των ήδη χρησιμοποιούντων χαλύβων τεχνολογίας tempcore (των όποιων τις μηχανικές ιδιότητες συνοψίζουν επίσης σε πίνακα – table 9) τόσο μέσω σύγκρισης των μηχανικών ιδιοτήτων όσο και μέσω χρήσης ενός πειραματικού υπολογιστικού μοντέλου που οι ίδιοι ανέπτυξαν. Τα αποτελέσματα (που παρουσιάζονται και εικονικά – εικόνα 17) τονίζουν την μεγαλύτερη ολκιμότητα που χαρακτηρίζει τους διαφασικούς χάλυβες σε σχέση με τους χάλυβες tempcore.

Τέλος οι Lakshamma Rao Bhagavathi, κ.α. [12], στην παρών εργασία, με αφορμή την όλο και αυξανόμενη χρήση των διφασικών χαλύβων αλλά και την έλλειψη ερευνών στον αντίστοιχο τομέα, οι συγγραφείς πειραματίστηκαν με διφασικούς χάλυβες διαφορετικής περιεκτικότητας σε μαρτενσίτη (MVF, martensite volume fraction) ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες, δίνοντας ιδιαίτερη βάση στην

Αντίσταση που παρουσιάζουν στην διάβρωση. Για την απόκτηση διαφορετικών MVF χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί χρόνοι παραμονής σε ενδοκρίσιμη θερμοκρασία 740 °C μετρήθηκαν μηχανικές ιδιότητες όπως σκληρότητα vickers και ικανότητα εφελκυσμού (βάση προδιαγραφών ASTM), ενώ οι αντιδιαβρωτικές ικανότητες υπολογίστηκαν μέσω πειραμάτων ποτενσιοδυναμικής πόλωσης και Πειραμάτων βύθισης των δοκιμίων. Τα αποτελέσματά τους για τον κάθε χάλυβα έπειτα από σύγκριση μεταξύ τους ανέδειξαν σημαντικές παρατηρήσεις, τόσο στις μηχανικές όσο και στις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Από μηχανικών ιδιοτήτων, αρχικά παρατηρείται ότι η σκληρότητα των διφασικών χαλύβων είναι μεγαλύτερη από την σκληρότητα αντίστοιχων "SA steel". Επίσης, με την αύξηση του MVF, παρατηρείται αύξηση σημείου UTS, ενώ παράλληλα τα δοκίμια παρουσίασαν μείωση της ολκιμότητας τους διατηρώντας όμως σημαντική σλκιμότητα. Σχετικά με την αντίστασή τους σε διάβρωση, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διφασικοί χάλυβες παρουσιάζουν χαμηλότερο ρυθμό διάβρωσης (ταχύτητα διάβρωσης) από χάλυβες φερρίτη - περλίτη (θερμοκρασία υποκρίσιμης θέρμανσης), την οποία αποδίδουν στην διαφορετική μικροδομή τους.

Ορισμοί για τους Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος[13]

Σίδηρος (καθαρός): Ως καθαρός σίδηρος χαρακτηρίζεται συνήθως κράμα με περιεκτικότητα σε άνθρακα και λοιπά κραματικά στοιχεία μικρότερη από 0,05%.

Χάλυβας: Κράμα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2% και προσθήκες άλλων στοιχείων.

Χάλυβας οπλισμού: Χάλυβας με κυκλική ή πρακτικά κυκλική διατομή, για τον οπλισμό του σκυροδέματος.

Χάλυβας οπλισμού με νευρώσεις: Χάλυβας οπλισμού με δύο τουλάχιστον σειρές πλάγιων ανάγλυφων νευρώσεων, ομοιόμορφα κατανεμημένων κατά μήκος.

Λείος χάλυβας οπλισμού: Χάλυβας οπλισμού με πρακτικά λεία επιφάνεια.

Χάλυβας οπλισμού με έγλυφες αυλακώσεις: Χάλυβας οπλισμού με καθορισμένες αυλακώσεις, ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος.

Μορφοσίδηρος (δομικός χάλυβας - structural steel): Χάλυβας κατασκευών σε διάφορες μορφές διατομής.

Ολκή (drawing): Ψυχρή κατεργασία μιας ράβδου από χάλυβα η οποία ελκόμενη διέρχεται μέσα από κατάλληλη μήτρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής και συνακόλουθη αύξηση της αντοχής.

Έλαση (rolling): Διαδικασία διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ ενός μεταλλικού αντικειμένου με τη χρήση αντίρροπα περιστρεφόμενων κυλίνδρων.

Παρτίδα ελέγχου: Ποσότητα χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος της ίδιας διατομής, προερχομένη από την ίδια χύτευση, σε ευθύγραμμες ράβδους ή κουλούρες, που έχει παραχθεί από την ίδια μονάδα παραγωγής και προσφέρεται για εξέταση οποιαδήποτε στιγμή.

Ονομαστικές διάμετροι: Τυποποιημένες διάμετροι χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος τις οποίες δέχεται ο παρών Κανονισμός. Στον σχεδιασμό των κατασκευών χρησιμοποιείται η ονομαστική διάμετρος και η ονομαστική διατομή.

Ονομαστική διατομή: Το εμβαδόν πλήρους κυκλικής διατομής, διαμέτρου ίσης με την ονομαστική.

Χημική αλλοίωση (deterioration): Τροποποίηση της χημικής σύστασης τμήματος του υλικού.

Διάβρωση (corrosion): Κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής φύσεως, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, αλλοίωση της επιφάνειας μετάλλων ή κραμάτων, η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού και άλλες συνέπειες.

Ομοιόμορφη διάβρωση: Η διάβρωση κατά την οποία πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου ή κράματος δημιουργείται ένα ομοιόμορφο (περίπου ισοπαχή) στρώμα προϊόντος διάβρωσης ή μία περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας.

Βελλανοειδές διάβρωση (pitting): Η διάβρωση κατά την οποία πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου ή κράματος σχηματίζεται εκλεκτικά, τοπικά, προϊόν διάβρωσης ή διαλύεται εκλεκτικά, τοπικά το μέταλλο ή το κράμα.

pH: Ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των κατιόντων υδρογόνου (H⁺).

Φυσική γήρανση (aging): Οι μεταβολές στα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος που συμβαίνουν αργά μεν σε θερμικές κατεργασίες δε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Οι αλλαγές αυτές οδηγούν σε αυξημένες τιμές του ορίου διαρροής και κατά μικρότερο βαθμό ,της ελκυστικής αντοχής ,καθώς και σε μείωση της παραμόρφωσης θραύσης .Ευαίσθητοι σε γήρανση είναι οι χάλυβες ψυχρής κατεργασίας.

Τεχνητή γήρανση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος : Διαδικασία προσομοίωσης των επιπτώσεων της φυσικής γήρανσης η οποία γίνεται με θέρμανση (συνήθως τους 100 C για 60 min).

ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται ως εξής [14] :

1) Σύμφωνα με την μέθοδο παράγωγης ,σε :

- Θερμής έλασης , χωρίς καμία άλλη περαιτέρω θερμική η θερμομηχανική κατεργασία οποιαδήποτε μορφής
- Θερμής έλασης που ακολουθείται από μια άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας
- Ψυχρής κατεργασίας με ολική η έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση η με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση η με συνδυασμό όλων των παραπάνω.

2) Σύμφωνα με την μορφή της επιφάνειας της ράβδου σε:

- Λείους χάλυβες κυκλικής διατομής (οι οποίοι όμως δεν καλύπτονται από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3. Τα χαρακτηριστικά αυτών των χαλύβων περιγράφονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ 959 που καταργήθηκε τον Ιανουάριο του 2007.
- Χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις υψηλής συνάφειας.
- Χάλυβες με κοιλότητες (έγλυφες αυλακώσεις οι οποίοι όμως η χρήση τους δεν προβλέπεται από το ΕΚΩΣ).

3) Σύμφωνα με την ολκιμότητα σε:

- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας (B500A)

- Χάλυβες μέσης ολκιμότητας (δεν ορίζονται από το ΕΛΟΤ)
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας (είναι οι χάλυβες B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3, οι οποίοι καλύπτουν τις απαιτήσεις για αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών όπως προβλέπονται από το ΕΚΩΣ και από τους Ευρωκώδικες.

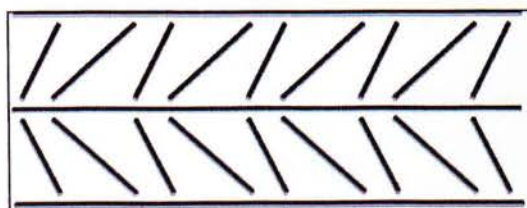
4) Σύμφωνα με την αντοχή τους σε διάβρωση σε:

- Κοινούς χάλυβες που είναι κράματα σιδηρού με άνθρακα (Fe-C) και με άλλα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες.
- Ανοξειδωτους χάλυβες που είναι κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr 12%). Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση. Η αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδαίνιο (Mo), τιτάνιο (Ti). Βέβαια οι ανοξειδωτοι χάλυβες δεν είναι αντικείμενο αυτού του κανονισμού. Ωστόσο στην περίπτωση ειδικών έργων ή έργων σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, ενδέχεται να κριθεί αναγκαία η χρήση τους.

ΣΗΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ [15] ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

- ΣΗΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C φέρουν στην επιφάνεια τους τουλάχιστον 2 σειρές πλαγίων διαδοχικών νευρώσεων αντίθετης κλίσης. Σε κάθε σειρά οι διαδοχικές νευρώσεις έχουν εναλλασσόμενες γωνιές κλίσης ως προς τον διαμήκη άξονα της ράβδου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1**.



Σχήμα 1 Διάταξη νευρώσεων χάλυβα κατηγορίας B500C [15]

- **ΣΗΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Η αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος γίνεται συνήθως , μέσω ενός αριθμητικού συστήματος κανονικών πλαγίων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες πλάγιες νευρώσεις οι οποίες παρουσιάζονται επαναλαμβανόμενες (ανά 0,7 m έως 1,5 m περίπου) στη μια σειρά των πλαγίων νευρώσεων της ράβδου.

➤ **ΣΗΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΕΣ ΡΑΒΔΟΥΣ**

Στην περίπτωση ευθύγραμμων ράβδων , το σύμβολο για την έναρξη της σήμανσης ,καθώς και για την κατεύθυνση της αναγνώρισης , υποδηλώνεται με δύο διαδοχικές ενισχυμένες πλάγιες νευρώσεις.

Μετά την έναρξη , ακολουθεί η σήμανση της χώρας παραγωγής .Το πλήθος των νευρώσεων που συμβολίζει την χώρα παραγωγής δίνεται στον

Πίνακα 1.

ΧΩΡΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΧΩΡΑΣ
Αυστρία, Γερμανία, Πολωνία, Σλοβακία, Τσεχία	1
Βέλγιο, Ελβετία, Λουξεμβούργο, Ολλανδία,	2
Γαλλία, Ουγγαρία	3
Ιταλία,Μάλτα, Σλοβενία	4
Ηνωμ. Βασίλειο, Ιρλανδία, Ισλανδία	5
Δανία, Εσθονία, Λευκορωσία, Λιθουανία, Νορβηγία, Σουηδία, Φινλανδία	6
Πορτογαλία, Ισπανία	7
Ελλάδα, Κύπρος	8
Άλλες χώρες	9

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣΚΑΤΑ ΕΛΟΤ EN 10080[15]

Μετά ακολουθεί η σήμανση της μονάδας παραγωγής του χάλυβα , η οποία γίνεται με κανονικές πλάγιες νευρώσεις ανάμεσα σε ενισχυμένες .Εάν ο αριθμός που δηλώνει την μονάδα παραγωγής είναι διψήφιος (το 10 και τα

πολλαπλάσια του απαγορεύονται) τότε συμβολίζεται με δύο ομάδες πλαγίων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες , εκ των οποίων η πρώτη ομάδα δίνει το πρώτο ψηφίο και η δεύτερη ομάδα το δεύτερο ψηφίο του κωδικού του εργοστάσιου , όμως φαίνεται και στα σχέδια .

Στο πρότυπο ΕΛΟΤ 10080 δίνονται και άλλες μορφές αυτού του αριθμητικού συστήματος σήμανσης.

Οι Ελληνικές βιομηχανίες , πέραν του υποχρεωτικού συστήματος σήμανσης που περιγράφεται , χρησιμοποιούν και πρόσθετο αναγνωριστικό σύμβολο της εταιρείας παραγωγής.

Η χώρα παραγωγής, η μονάδα παραγωγής ή και διαμόρφωσης, η κατηγορία ποιότητας, η μορφή του προϊόντος και ο αριθμός χύτευσης , πρέπει να είναι αναγνωρίσιμα για όλες τις παραδιδόμενες και διακινούμενες παρτίδες χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Ο παραγωγός πρέπει να τηρεί έναν τρόπο για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης για τα προϊόντα που διαθέτει .

Όνομ. διάμετρος (mm)	Πεδίο εφαρμογής			Όνομ. διατομή (mm ²)	Όνομ. μάζα/ μέτρο (kg/m)	Ανοχές μάζας/ μέτρο (%)
	Ράβδοι	Κουλούρες και ευθυγραμμισμένα προϊόντα	Ηλεκτρο-συγκολλημένα πλέγματα και δικτυώματ			
	B500C	B500C	B500C			
5,0				19,6	0,154	±6
5,5				23,8	0,187	±6
6,0	√	√	√	28,3	0,222	±6
6,5				33,2	0,260	±6
7,0				38,5	0,302	±6
7,5				44,2	0,347	±6
8,0	√	√	√	50,3	0,395	±6
10,0	√	√	√	78,5	0,617	±4,5
12,0	√	√	√	113	0,888	±4,5
14,0	√	√	√	154	1,21	±4,5
16,0	√	√	√	201	1,58	±4,5
18,0	√			254	2,00	±4,5
20,0	√			314	2,47	±4,5
22,0	√			380	2,98	±4,5
25,0	√			491	3,85	±4,5

28,0	√			616	4,83	±4,5
32,0	√			804	6,31	±4,5
40,0	√			1257	9,86	±4,5

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Ονομαστικές διαμέτροι , ονομαστικές διατομές , ονομαστική μάζα και ανοχές ως προς την ονομαστική μάζα-Πεδίο εφαρμογής. [16]

ΦΑΣΕΙΣ – ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΠΟΥ ΣΥΝΑΝΤΩΝΤΑΙ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ [17]

Φάσεις είναι οι δομικά διακεκριμένες περιοχές σε ένα σύστημα υλικών. Στο εσωτερικό και μέχρι τα όρια των περιοχών αυτών, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του υλικού δεν διαφοροποιούνται υπό κανονικές συνθήκες.

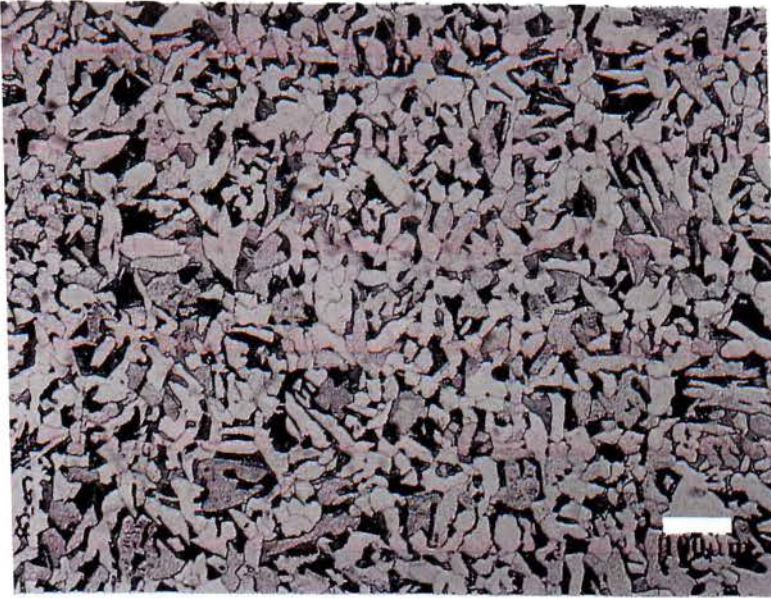
Φάσεις ισορροπίας είναι αυτές που εμφανίζονται ως σταθερές σε ένα διάγραμμα ισορροπίας (διάγραμμα φάσεων) για συγκεκριμένες περιεκτικότητες των κραματικών στοιχείων και σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες (Fe α, Fe γ, Fe₃C). Φάσεις που δεν προβλέπονται στα διαγράμματα ισορροπίας χαρακτηρίζονται και ως “εκτός ισορροπίας” και κατά κανόνα τείνουν να μετατραπούν σε φάσεις ισορροπίας αν υπάρξουν οι κατάλληλες συνθήκες (π.χ. υψηλή θερμοκρασία, χρόνος κ.λπ.).

Οι κυριότερες φάσεις και τα συστατικά που συναντώνται στους Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος είναι :

- **Φερρίτης [18]:** Ο φερρίτης είναι στερεά φάση καθαρού σιδήρου ή στερεό διάλυμα με βασικό συστατικό τον σίδηρο που κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρομένο κυβικό σύστημα. Ο φερρίτης είναι η κύρια φάση στους κοινούς χάλυβες και τους χυτοσιδήρους. Οι ιδιότητες του φερρίτη είναι σχεδόν ίδιες με τις ιδιότητες του καθαρού σιδήρου. Είναι όλκιμος και η εφελκυστική του αντοχή ανέρχεται σε περίπου 280 MPa. Η σκληρότητά του κυμαίνεται από 80 έως 100 HB (Brinell). Είναι επίσης ισχυρά μαγνητικός και μπορεί να αποκτήσει μόνιμη μαγνήτιση (σιδηρομαγνητικός) για θερμοκρασία χαμηλότερη από 770°C (θερμοκρασία Curie). Ο φερρίτης ή α-Fe είναι σταθερός σε θερμοκρασία έως και 910°C. Η μέγιστη περιεκτικότητά του σε άνθρακα ανέρχεται σε 0,021% κ.β. στους 723°C και μειώνεται σε 0,006% κ.β. σε θερμοκρασία δωματίου. Σε θερμοκρασίες από 910 έως 1390°C, ο χωροκεντρωμένος κυβικός φερρίτης μετασχηματίζεται σε εδροκεντρωμένο κυβικό οστενίτη (γ-Fe), που είναι πιο σκληρός και λιγότερο μαγνητικός (παραμαγνητικός). Σε θερμοκρασία ανώτερη από 1390°C έως το σημείο τήξης του σιδήρου (1539°C), ο οστενίτης μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένο κυβικό φερρίτη, που αποκαλείται δ-Fe για να

ξεχωρίζει από τον φερρίτη των χαμηλών θερμοκρασιών. Η μέγιστη περιεκτικότητα του δ-Fe σε άνθρακα φτάνει το 0,09% στους 1493°C. Η διαλυτότητα του άνθρακα στον φερρίτη είναι πολύ περιορισμένη, γιατί στο χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα τα άτομα του άνθρακα καταλαμβάνουν θέσεις παρεμβολής, δηλ. παρεμβάλλονται ανάμεσα στα διατεταγμένα άτομα του σιδήρου και, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους τους, προκαλούν έντονες τοπικές τάσεις. Εκτός από άνθρακα, ο φερρίτης μπορεί να περιέχει και μικρές ποσότητες από χρώμιο, νικέλιο, πυρίτιο ή και φώσφορο. Στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, ο φερρίτης αποτελεί το κύριο συστατικό. Υπό συνθήκες που πλησιάζουν την θερμοδυναμική ισορροπία (π.χ. ανοπτημένους χάλυβες), όταν η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι μικρότερη από 0,76% κ.β. (ευτηκτοειδής σύσταση στο μετασταθές διάγραμμα φάσεων Fe-C), τότε ο φερρίτης σχηματίζει ξεχωριστούς κόκκους (κρυστάλλους) και συνυπάρχει μαζί με τον σεμεντίτη στην πλακοειδή («λαμελοειδή») δομή του περλίτη. Όταν η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι ίση ή μεγαλύτερη από 0,76% κ.β., τότε ο φερρίτης υπάρχει μόνο στον περλίτη. Ο φερρίτης υπάρχει επίσης και σε μετασταθείς δομές που προκύπτουν με απότομη ψύξη («βαφή») των χάλυβων. Μία τέτοια δομή είναι και η *δομή Widmanstätten* (Βιντμανστάτεν) που δημιουργείται όταν ο χάλυβας ψυχθεί απότομα από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε θερμοκρασία κατά λίγο χαμηλότερη. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο δημιουργείται φερρίτης που έχει μορφή μεγάλων σφηνών που διασταυρώνονται, καθώς αναπτύσσεται κατά μήκος ορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Ο φερρίτης είναι επίσης το κύριο συστατικό του μετασταθούς μπαινίτη, ο οποίος δημιουργείται όταν ο ρυθμός ψύξης είναι κάπως μεγαλύτερος, ώστε να αποφευχθεί η δομή *Widmanstätten*. Μαρτενσίτης δεν δημιουργείται όταν η τελική θερμοκρασία ψύξης δεν είναι αρκετά χαμηλή

Παραδειγμα φερριτη όπως φαινεται στην φωτο 1



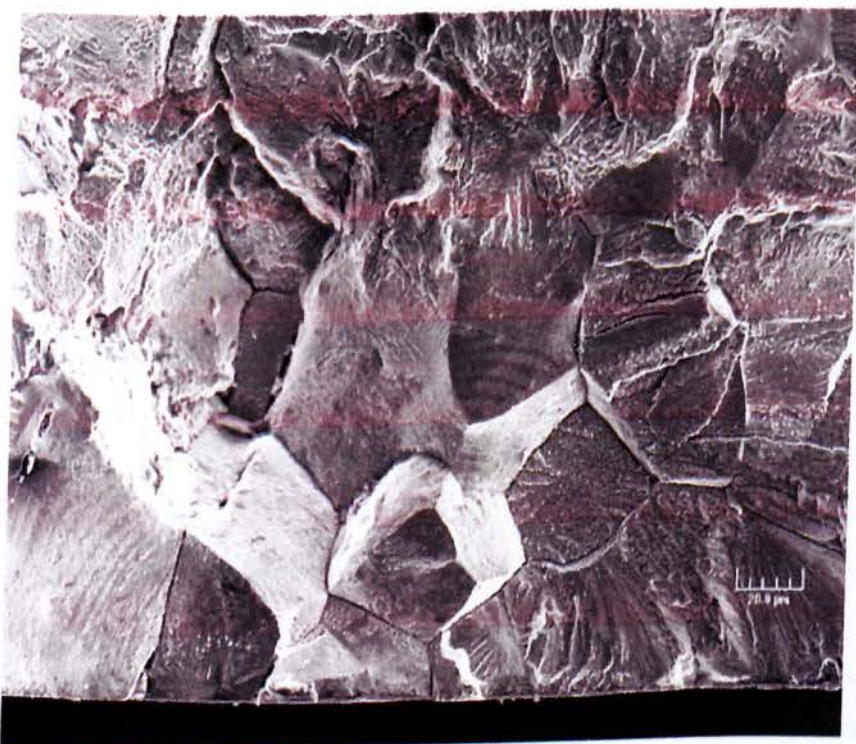
ΦΩΤΟ 1:Κόκκοι φερρίτη (με ανοιχτό γκριζο χρώμα) και περλιτικές δομές (σκοτεινό γκριζο έως μαύρο χρώμα) σε κοινό χάλυβα Α285 (% κ.β.: 0,18 C, 0,43 Mn, 0,009 P, 0,026 S), όπως αυτός παρατηρείται σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο [18]

• **Ωστενίτης [19]:** Ο **ωστενίτης** ή γ -Fe είναι αλλοτροπική μορφή του σιδήρου που κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα. Στην περίπτωση του καθαρού σιδήρου, ο ωστενίτης είναι σταθερός από τους 912 έως τους 1394°C. Όταν ο σίδηρος δεν είναι καθαρός αλλά περιέχει κραματικά στοιχεία, τότε η θερμοκρασιακή ζώνη σταθερότητας του ωστενίτη εκτείνεται ή περιορίζεται.

Ο ωστενίτης ονομάστηκε έτσι από τον βρετανό πρωτοπόρο της μικροσκοπίας *Χένρυ Κλίφτον Σόρμπυ* προς τιμήν του συμπατριώτη του μεταλλουργού Γουίλλιαμ Τσάντλερ Ρόμπερτς-Ωστεν, ο οποίος παρουσίασε το πρώτο διάγραμμα φάσεων Fe-C το 1897. Ο ωστενίτης είναι όλκιμος και η σκληρότητά του κυμαίνεται από 250 έως 300 HB (Brinell). Για θερμοκρασίες χαμηλότερες από 912°C, ο γ -Fe μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένο φερρίτη ή α -Fe. Επίσης, για θερμοκρασίες υψηλότερες από 1394°C, μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένο δ -Fe, που αποκαλείται επίσης φερρίτης. Σε αντίθεση με τον φερρίτη, ο ωστενίτης είναι ελάχιστα μαγνητικός (παραμαγνητικός). Στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, η θερμοκρασιακή ζώνη σταθερότητας του ωστενίτη εξαρτάται από τον περιεχόμενο άνθρακα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα φάσεων Fe-C. Η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα φτάνει και 2,1% κ.β. στους 1153°C. Στους κραματωμένους

χάλυβες, η σταθερότητα του ωστενίτη ευνοείται από την παρουσία ορισμένων στοιχείων, όπως το μαγγάνιο, το νικέλιο και το κοβάλτιο, που αποκαλούνται γάμμα φερρογόνα. Έτσι, π.χ., ο ανοξειδωτος χάλυβας «18/8» (18% κ.β. Cr, 8% κ.β. Ni) είναι ωστενιτικός ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου. Ορισμένα άλλα στοιχεία, όπως το μολυβδαίνιο, το χρώμιο και το πυρίτιο, περιορίζουν την σταθερότητα του ωστενίτη. Με ψύξη του ωστενίτη, και αναλόγως με τον ρυθμό ψύξης και την περιεκτικότητα σε άνθρακα, προκύπτουν διάφορες φάσεις και δομές. Με βραδείς ρυθμούς ψύξης, σχηματίζεται φερρίτης, περλίτης και σεμεντίτης, όπως προβλέπεται από το διάγραμμα φάσεων Fe-C. Με σχετικά υψηλό ρυθμό ψύξης, σχηματίζεται μπαινίτης, ενώ για υψηλούς ρυθμούς ψύξης («βαφή»), σχηματίζεται μαρτενσίτης. Σημειώνεται ότι ωστενίτης μπορεί να υπάρχει σε χάλυβες ή χυτοσιδήρους ακόμα και μετά από βαφή και επαναφορά. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης έχει την μορφή λεπτών στρωμάτων στον χώρο ανάμεσα στους επιμήκεις κόκκους του μαρτενσίτη ή του μπαινίτη. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετασχηματίζεται σε που μπορεί να προκαλέσει εσωτερικές ρωγματώσεις και να κάνει το κράμα εύθρυπτο.

Παράδειγμα ωστενίτη όπως φαίνετε στην φωτό 2



ΦΩΤΟ 2:Ο ωστενίτης σχηματίζει ευμεγέθεις κρυστάλλους (κόκκους) που παρατηρούνται εύκολα στο μικροσκόπιο. Στην φωτογραφία παρουσιάζεται η επιφάνεια θραύσης ανοξειδωτου χάλυβα 304 με χαρακτηριστικούς κόκκους ωστενίτη όπως φαίνετε στο ηλεκτρονικο μικροσκόπιο σε x500 μεγένθυση[19]

• **Σεμεντίτης[20]** : Ο **σεμεντίτης** είναι διμεταλλική ένωση του σιδήρου με τον άνθρακα (καρβίδιο) με χημικό τύπο Fe_3C και σύσταση 93,31% κ.β. Fe και 6,69% κ.β. C. Πρόκειται για σκληρή και εύθραυστη στερεά φάση με ιδιαίτερη σημασία στην μεταλλογνωσία του χάλυβα. Ο σεμεντίτης κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό σύστημα και η σκληρότητά του φτάνει τα 800 HB (Brinell). Σε κοινούς ανθρακούχους χάλυβες υποευθηκτοειδούς σύστασης ($C < 0,77\%$ κ.β.), ο σεμεντίτης εμφανίζεται στην δομή του περλίτη ως γκριζα φύλλα («λαμέλες») εναλλασσόμενα με λευκά φύλλα φερρίτη. Σε χάλυβες υπερευθηκτοειδούς σύστασης παρουσιάζεται στον περλίτη αλλά σχηματίζει και ανεξάρτητους λευκούς φυλλοειδείς κόκκους (κρυστάλλους). Σε χάλυβες που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία («βαφή»), ο σεμεντίτης εμφανίζεται επίσης στην δομή του μπαινίτη, είτε στην μορφή μικρών λεπτών λωρίδων στα όρια των κόκκων του φερρίτη (*ανώτερος μπαινίτης*), είτε στην μορφή βελονοειδών κατακρημνισμάτων μέσα στους κόκκους του φερρίτη (*κατώτερος μπαινίτης*). Ο σεμεντίτης είναι επίσης ένα από τα κύρια συστατικά των χυτοσιδήρων. Ο σεμεντίτης απαντάται στην φύση απαντάται επίσης στην φύση — ειδικά σε μετεωρίτες — ως γκριζο μεταλλικό ορυκτό με το όνομα **κοενίτης** (αγγλ., cohenite) και σύνθεση $(Fe, Ni, Co)_3C$.

• **Μαρτενσίτης[21]** : Ο **μαρτενσίτης** είναι μετασταθής φάση που σχηματίζεται όταν ένας χάλυβας θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης (γ -Fe), και κατόπιν υποστεί απότομη ψύξη. Ο μαρτενσίτης έλαβε το όνομά του από τον γερμανό μεταλλουργό Άντολφ Μάρτενς (1850–1914), που πρώτος παρατήρησε την δομή του μαρτενσίτη στο μικροσκόπιο. Η δομή του μαρτενσίτη είναι βελονοειδής. Σε χάλυβες με λιγότερο από 0,4% κ.β. C, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες με περισσότερο από 0,6% κ.β. C, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή πιο λεπτών πλακιδίων. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4 και 0,6% κ.β., παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενσίτης παρουσιάζει επίσης εσωτερική δομή που χαρακτηρίζεται από διδυμίες και έντονη παρουσία διαταραχών (κρυσταλλικών ατελειών). Η απότομη ψύξη του χάλυβα, που είναι γνωστή ως «βαφή», προκαλεί τον μαρτενσιτικό μετατοπιστικό μετασχηματισμό: τα άτομα του άνθρακα δεν προλαβαίνουν να μετακινηθούν από τις οκταεδρικές θέσεις του ωστενιτικού πλέγματος. Το πλέγμα μετασχηματίζεται από κυβικό εδροκεντρωμένο (γ -Fe) σε τετραγωνικό χωροκεντρωμένο, στο κέντρο του οποίου

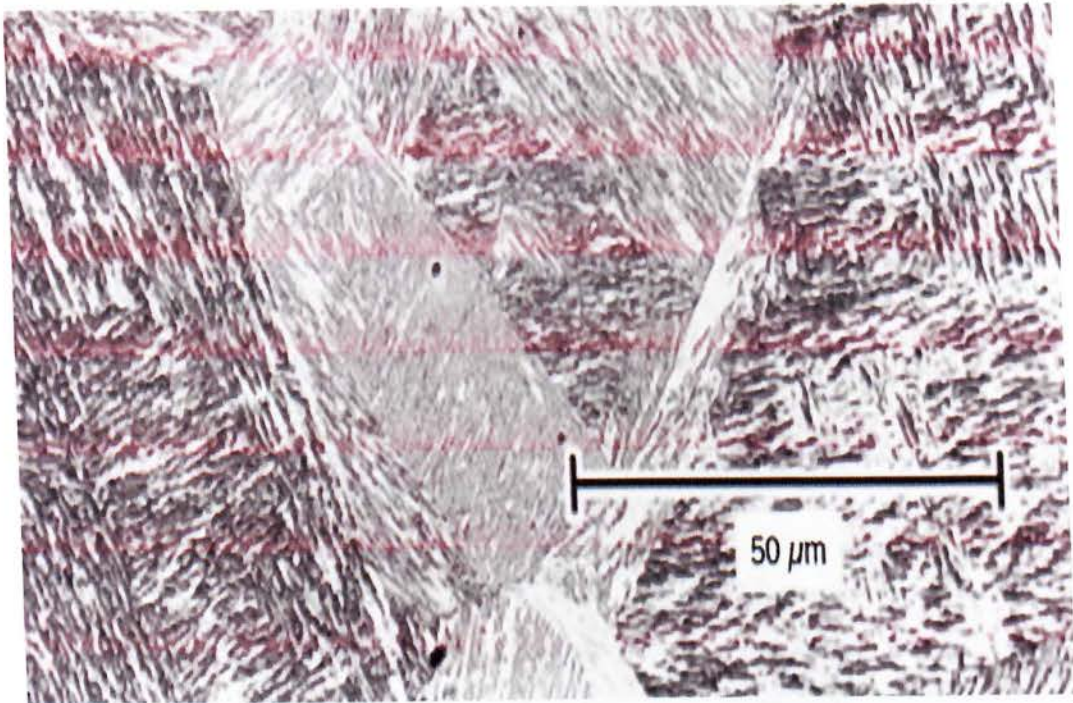
βρίσκεται ο άνθρακας. Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής προκαλεί ασύμμετρη παραμόρφωση στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι λωρίδες και τα πλακίδια του μαρτενσίτη έχουν πολύ μικρό μέγεθος σε σύγκριση με τους μητρικούς κόκκους του ωστενίτη, με συνέπεια την σημαντική αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Επίσης, τα πολλά νέα όρια στην μικροδομή του μαρτενσίτη εμποδίζουν την μετακίνηση των διαταραχών και συμβάλλουν έτσι στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Η βαφή του χάλυβα προκαλεί συχνά παραμορφώσεις και μικρορωγμάτσεις λόγω συσσώρευσης τοπικών τάσεων. Ο βαμμένος χάλυβας γίνεται ψαθυρός από τον περιεχόμενο μαρτενσίτη, και αυτό μπορεί να κάνει το υλικό ακατάλληλο για πολλές εφαρμογές. Γι' αυτό και η κατεργασία της βαφής συνήθως συνοδεύεται από επαναφορά σε θερμοκρασίες 150–650°C, ώστε να γίνει και πάλι ο χάλυβας όλκιμος με μικρή μείωση της σκληρότητάς του. Παρόμοιοι μαρτενσιτικοί μετασχηματισμοί παρατηρούνται και σε άλλα κράματα (π.χ. Cu–Zn, Cu–Sn, Ti–Mo, Au–Cu, κ.ά.), αλλά δεν συνοδεύονται από αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι επίσης μεγάλης σημασίας για τα κράματα μνήμης σχήματος (Cu–Zn–Al, Cu–Al–Ni, Fe–Mn–Si, Ni–Ti, κ.ά.). Για τον σχηματισμό του μαρτενσίτη στους Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος είναι αναγκαίες και ικανές οι παρακάτω προϋποθέσεις/συνθήκες:

1) Να έχει σχηματισθεί ωστενίτης (ωστενίτης σχηματίζεται στους Χ.Ο.Σ. σε θερμοκρασίες 723°C και άνω).

2) Η ψύξη του ωστενίτη να γίνεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από μία κρίσιμη χαρακτηριστική (V_c) για την συγκεκριμένη σύνθεση του υλικού. Για τους χάλυβες B500A και B500C η ταχύτητα V_c , είναι της τάξεως εκατοντάδων βαθμών ανά δευτερόλεπτο και μπορεί να επιτευχθεί μόνο με ειδικά μέσα. Για τους χάλυβες τύπου StIII ($C \geq 0,40\%$) η V_c είναι αρκετά μικρότερη και μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και με την ψύξη μιας ράβδου σε νερό.

3) Η θερμοκρασία στην οποία θα φθάσει το υλικό (μετά την γρήγορη ψύξη) να είναι μικρότερη από μια χαρακτηριστική (M_s) για το υλικό θερμοκρασία. Για τους Χ.Ο.Σ. η M_s είναι στην περιοχή των 300°C.

Παραδειγμα σεμεντιτη όπως φαινετε στην φωτο 3



ΦΩΤΟ 3: Φακοειδείς λωρίδες («βελόνες») μαρτενσίτη σε κοινό χάλυβα όπως φαίνεται σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο στην $\times 500$ μεγέθυνση. [22]

• **Περλίτης [23]:** Ο **περλίτης** είναι μικρογραφική δομή του χάλυβα που αποτελείται από εναλλασσόμενα φύλλα («λαμέλες») φερρίτη (α -Fe) και σεμεντίτη (Fe_3C). Η σύστασή του είναι: 88,5% κ.β. φερρίτης και 11,5% κ.β. σεμεντίτης.

Ο περλίτης σχηματίζεται κατά τον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό του ωστενίτη (γ -Fe), όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 727°C . Η ευτηκτοειδής σύσταση του ωστενίτη είναι 0,77% κ.β. C.

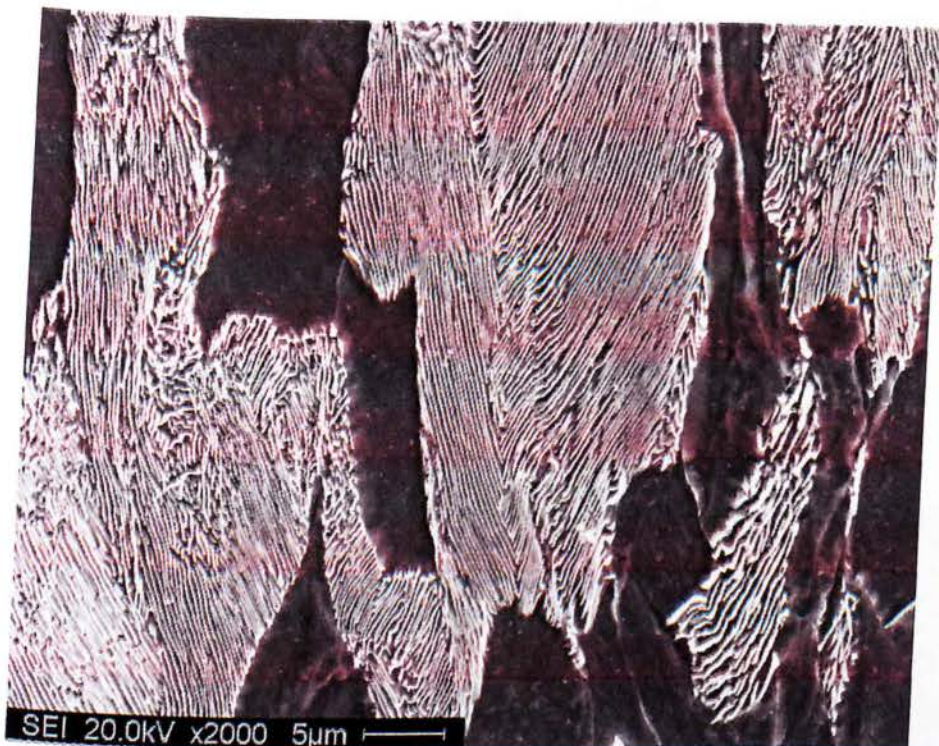
Η ονομασία του περλίτη οφείλεται στο γεγονός ότι στο μικροσκόπιο παρουσιάζει λαμπερή εμφάνιση με ζώνες όπως το μάργαρο (σεντέφι), το υλικό δηλαδή που κάνει τα μαργαριτάρια να αστράφτουν.

Επειδή περιέχει πολύ φερρίτη, ο περλίτης είναι και αυτός όλκιμος. Η σκληρότητά του είναι κάπως υψηλότερη και κυμαίνεται από 200 έως 250 HB (Brinell).

Μια άλλη μικρογραφική δομή παρόμοια με τον περλίτη είναι ο μπαινίτης. Ωστόσο, οι λωρίδες («λαμέλες») του μπαινίτη είναι πολύ πιο λεπτές από τα φύλλα του περλίτη.

Συνεπώς, ο μπαινίτης δεν λάμπει όπως ο περλίτης. Ο μπαινίτης σχηματίζεται με μετατοπιστικό μηχανισμό όταν η ταχύτητα ψύξης του χάλυβα είναι κάπως υψηλή. Αντιθέτως, ο περλίτης σχηματίζεται αργά με την διάχυση των ατόμων του άνθρακα από το πλέγμα του ωστενίτη.

Παραδειγμα περλίτη όπως φαίνεται στην φωτό 4



ΦΩΤΟ 4: Χαρακτηριστική περλιτική δομή σε υποευτηκτοειδή χάλυβα, όπως φαίνεται σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης σε x2000 μεγένθυση. Η σκοτεινή περιοχή είναι φερρίτης. [23]

• **Μπαινίτης [24]** : Προϊόν μετασχηματισμού του ωστενίτη, αποτελούμενο από μίγμα φερρίτη και καρβιδίων. Γενικά σχηματίζεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες εκείνων στις οποίες σχηματίζεται ο πολύ λεπτόκοκκος περλίτης και μεγαλύτερες εκείνων όπου αρχίζει ο μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη (300° - 500°C για τους Χ.Ο.Σ.). Η μορφή του μοιάζει με φτερά στην ανώτερη περιοχή (ανώτερος μπαινίτης) και με βελόνες εφόσον σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (κατώτερος μπαινίτης). Παρουσιάζει αντοχές σχεδόν παραπλήσιες του μαρτενσίτη, αλλά πολύ καλύτερη διαμορφωσιμότητα.

Κατά την απότομη ψύξη του χάλυβα, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται μετατοπιστικά δίνοντας πλακίδια ή λωρίδες φερρίτη προσανατολισμένες προς μία κατεύθυνση, όπως συμβαίνει και κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Ωστόσο, εξαιτίας της σχετικά

υψηλής θερμοκρασίας του, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, ο άνθρακας προλαβαίνει να διαφύγει από το πλέγμα του ωστενίτη και σχηματίζει σεμεντίτη (Fe_3C).

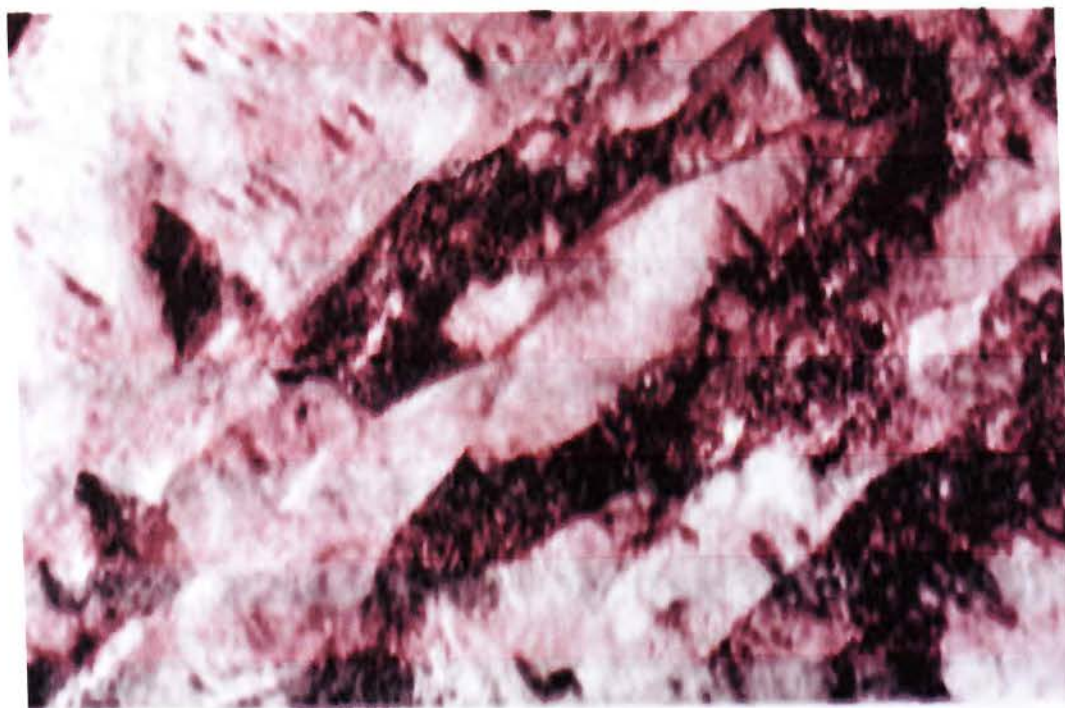
Για τελικές θερμοκρασίες $400\text{--}550^\circ\text{C}$, ο σεμεντίτης σχηματίζεται ανάμεσα στις προσανατολισμένες λωρίδες του φερρίτη, οπότε γίνεται λόγος για *ανώτερο μπαινίτη*.

Για τελικές θερμοκρασίες $250\text{--}400^\circ\text{C}$, ο άνθρακας σχηματίζει βελόνες σεμεντίτη μεγέθους της τάξης του $0,5\ \mu\text{m}$, μέσα στις προσανατολισμένες λωρίδες του φερρίτη, οπότε γίνεται λόγος για *κατώτερο μπαινίτη*.

Η θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού του μπαινίτη (B_s) εξαρτάται από την παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων και υπολογίζεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$B_s(^{\circ}\text{C}) = 830 - 270(\%C) - 90(\%Mn) - 37(\%Ni) - 70(\%Cr) - 83(\%Mo). [24]$$

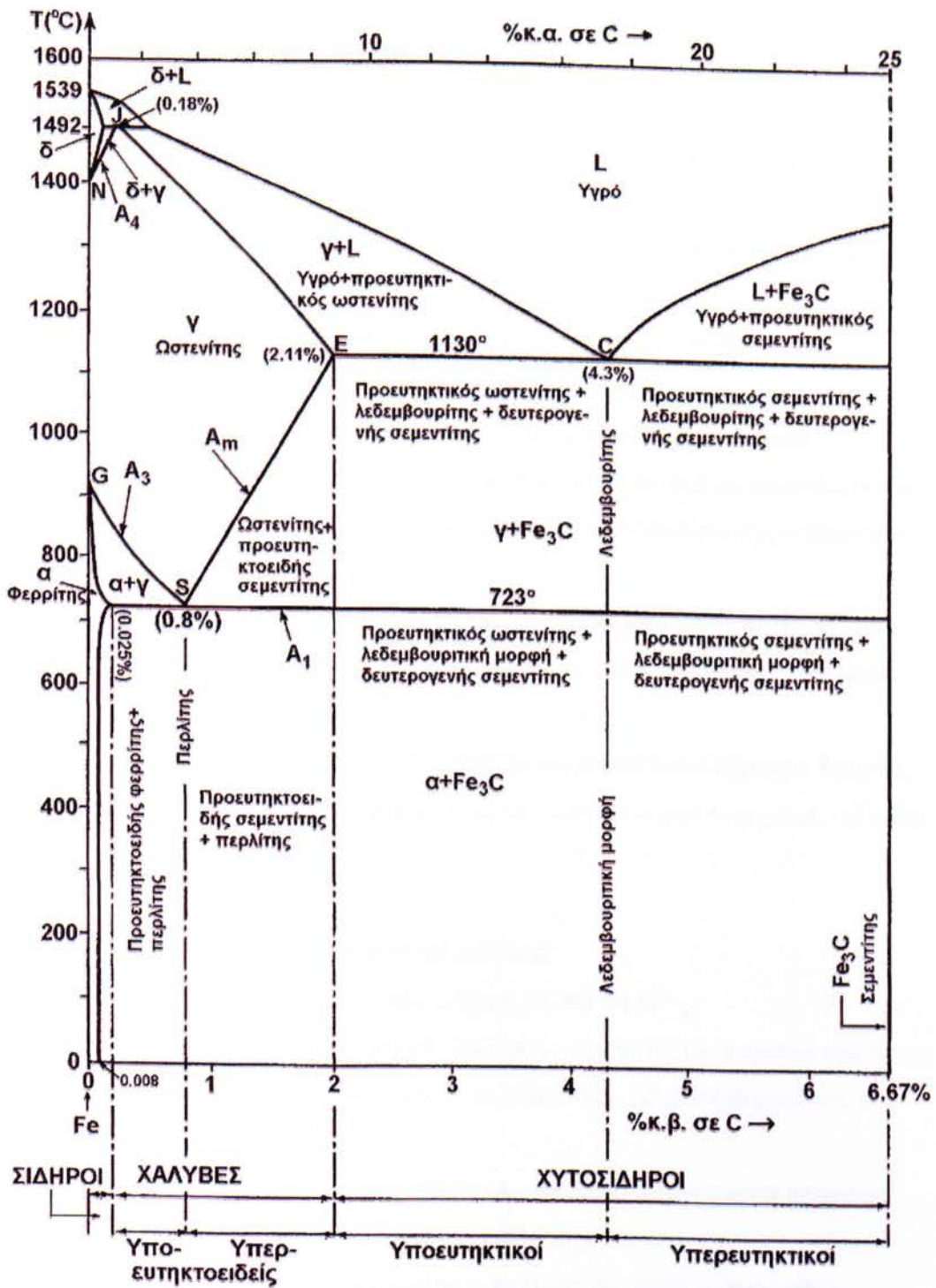
Παράδειγμα μπαινίτη όπως φαίνεται στην φωτό 5



4 μm

ΦΩΤΟ 5: Μπαινιτική μικροδομή όπως παρατηρείται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σε $\times 800$ μεγέθυνση διερχόμενης δέσμης. Διακρίνονται μεγάλα λευκά πλακίδια φερρίτη, μεταξύ των οποίων υπάρχει σεμεντίτης. [25]

ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Fe-C [26]



Ο σίδηρος (Fe) είναι αλλοτροπικό στοιχείο με σημείο τήξης (σ.τ.) 1539 C.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται με τις εξής μορφές:

1. Μέχρι τη θερμοκρασία των 910 C: Χαρακτηρίζεται ως Fe-α και κρυσταλλώνεται στο σύστημα bcc.
2. Στην θερμοκρασιακή περιοχή (910, 1400): Χαρακτηρίζεται ως Fe-γ και κρυσταλλώνεται στο σύστημα fcc.

Οι ανωτέρω μεταβολές επηρεάζονται από τα στοιχεία, με τα οποία σχηματίζει κράματα ο Fe.

Μεταβολές των ιδιοτήτων του Fe παρατηρούνται σε θερμοκρασίες, όπως:

- Κατά την θέρμανση του, διερχόμενος από τη θερμοκρασία των 768 C (θερμοκρασία Curie) μετατρέπεται από σιδηρομαγνητικό υλικό.
- Κατά την μετατροπή του από Fe-α σε Fe-γ, παρατηρείται συστολή όγκου (το σύστημα fcc έχει μεγαλύτερο συντελεστή συσσώρευσης ατόμων από το σύστημα bcc).

Τέλος ο Fe σχηματίζει με τον άνθρακα (C) στερεά διαλύματα παρεμβολής σε κάθε θερμοκρασία. Η κατάσταση αυτή απεικονίζεται μέσω του διαγράμματος ισορροπίας Fe-C.

Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C είναι το πιο σημαντικό διάγραμμα διμερούς συστήματος, λόγω τεράστιας χρηστικότητας των κραμάτων που περιγράφει (χάλυβες και χυτοσίδηροι)[7]

ΕΙΔΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Fe-C

Το διάγραμμα ισορροπίας Fe-C απεικονίζεται με δύο τρόπους:

1. Ως ευσταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C (σιδήρου-σεμεντίτη) (η ονομασία προέκυψε από το γεγονός ότι ο σεμεντίτης είναι μετασταθής, δηλαδή θερμοδυναμικά ασταθής).
2. Ως ευσταθές διάγραμμα Fe-C (σιδήρου-γραφίτη) (η ονομασία προέκυψε από το γεγονός ότι ο γραφίτης είναι σταθερός).

Κατά κανόνα, χρησιμοποιείται το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας, παρόλο που δεν είναι ένα πραγματικό διάγραμμα ισορροπίας (αλλά μετασταθές), διότι παρέχει την ευχέρεια καλύτερης παρακολούθησης των μεταλλογραφικών μετασχηματισμών κατά την θέρμανση ή την ψύξη ενός κράματος Fe-C

ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Fe-C

1. Η ταχύτητα απόψυξης στο ευσταθές διάγραμμα είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του μετασταθούς
2. Η ευτηκτική θερμοκρασία στο ευσταθές διάγραμμα είναι 1135 C , ενώ στο μετασταθές 1130 C.
3. Η ευτηκτική περιεκτικότητα σε C στο ευσταθές διάγραμμα είναι 4,25% , ενώ στο μετασταθές 4,30%.
4. Η ευτηκτοειδής θερμοκρασία στο μετασταθές διάγραμμα είναι 738 C, ενώ στο μετασταθές 723C.
5. Η ευτεκτοειδής περιεκτικότητα σε C στο ευσταθές διάγραμμα είναι 0,69% ενώ στο μετασταθές 0,80%
6. Οι χυτοσίδηροι του ευσταθούς διαγράμματος ονομάζονται φαιοί χυτοσίδηροι και έχουν κύριο συστατικό γραφίτη υπό μορφή φυλλιδίων και περιεκτικότητα σε πυρίτιο $\pi(\text{Si}) > 0,7\%$ κ.β., ενώ οι χυτοσίδηροι του μετασταθούς διαγράμματος ονομάζονται λευκοί χυτοσίδηροι , έχουν κύριο συστατικό το σεμεντίτη υπό μορφή δενδριτική και $\pi(\text{Si}) < 0,5$ κ.β.[4,7]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Fe-C

A) Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε C

- **Περιοχή καθαρού σιδήρου :** $\pi(\text{C}) < 0,008\%$
- **Περιοχή χαλύβων :** $0,008 < \pi(\text{C}) < 2,14\%$ (στην πράξη σπανίως χρησιμοποιείται $\pi(\text{C}) > 1\%$)
- **Περιοχή χυτοσιδήρων :** $2,14 < \pi(\text{C}) < 6,67\%$ (στην πράξη εφαρμόζεται $\pi(\text{C}) < 4,5\%$).[4]

B) Ανάλογα με τις εμφανιζόμενες φάσεις

- **Υγρή φάση (L):** Πρόκειται για υγρό διάλυμα C στον Fe.[4]
- **δ-φάση (δ-φερρίτης):** Πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe-δ Κρυσταλλικό σύστημα :fcc.[20]
Σταθερή φάση στη θερμοκρασιακή περιοχή 1400-1539 C.
Μέγιστη $\pi(\text{C}) = 0,1\%$ στους 1492 C.

- **γ-φάση (ωστενίτης):** Στερεό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe-γ.
Κρυσταλλικό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe-γ.
Κρυσταλλικό σύστημα: fcc
Σταθερή φάση στη θερμοκρασιακή περιοχή 911-1400 C.
Μεγίστη $\pi(C)=2,11\%$ στους 1130 C.
Μαλακό και όλκιμο υλικό. [4,7]
- **α-φάση(φερρίτης):** Πρόκειται για στερεό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe-α
Κρυσταλλικό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe-α
Κρυσταλλικό σύστημα: bcc
Σταθερή φάση στη θερμοκρασιακή περιοχή 0-912 C

Μεταλλοτεχνικές κατεργασίες των Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος

Έλαση : Διαδικασία διαμόρφωσης εν θερμώ ή εν ψυχρώ ενός μεταλλικού υλικού με τη χρήση αντίρροπα περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Στη θερμή έλαση, το μέγεθος, το σχήμα και οι μεταλλουργικές ιδιότητες του χάλυβα μεταβάλλονται με επανειλημμένη συμπίεση του θερμού μετάλλου (θερμοκρασία κυμαινόμενη από 1050 έως 1300 Co) μεταξύ ηλεκτροκίνητων κυλίνδρων. Ο προσαγόμενος για θερμή έλαση χάλυβας ποικίλει από πλευράς μορφής και σχήματος - χελώνες (*ingots/blooms*), πλατέα, μπιγέτες, σιδηροδοκοί - ανάλογα με το προς κατασκευή προϊόν. Τα λαμβανόμενα από τη θερμή έλαση προϊόντα κατατάσσονται, συνήθως, σε δύο βασικούς τύπους ανάλογα με το σχήμα τους: επίπεδα και μακρά προϊόντα. [27]

Ολκή : Ψυχρή κατεργασία μιας ράβδου ή ενός σύρματος, τα οποία ελκούμενα διέρχονται μέσα από κατάλληλη μήτρα με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής τους (και επακόλουθο την αύξηση της αντοχής). Κατά την ψυχρή κατεργασία δημιουργείται ενδοτράχυνση. Με τον όρο ενδοτράχυνση (*work hardening, strain hardening* εννοούμε την αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας ενός μεταλλικού υλικού (μετάλλου ή κράματος) με παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής. Η ενδοτράχυνση έχει ιδιαίτερη σημασία στην μεταλλοτεχνία του χάλυβα, όταν το μέταλλο αυτό υποβληθεί σε ψυχρή κατεργασία, δηλ. σε πλαστική παραμόρφωση υπό θερμοκρασία χαμηλότερη από το μισό της θερμοκρασίας τήξης. Η παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής οδηγεί σε δραματική αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών — γραμμικών και διεπιφανειακών — στο εσωτερικό

των κρυστάλλων του υλικού. Για παράδειγμα, σε ένα ανοπτημένο μεταλλικό υλικό, η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{10}/\text{m}^2$, ενώ σε ένα υλικό που έχει πάθει ψυχρή ολκή ή έλαση, η πυκνότητα διαταραχών είναι της τάξης των $10^{15}/\text{m}^2$. Καθώς μεγαλώνει η παραμόρφωση του υλικού, οι διαταραχές μετακινούνται (ολισθαίνουν), τέμνονται, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συσσωρεύονται σε ορισμένα σημεία, με αποτέλεσμα να εμποδίζει η μία την κίνηση της άλλης. Με την αύξηση της πυκνότητας των ατελειών, την αλλαγή της κατανομής τους και την παρεμπόδιση της κίνησής τους, το υλικό χάνει την ολκιμότητά του και γίνεται πιο σκληρό.

Μακροσκοπικά, η ενδοτράχυνση παρατηρείται εύκολα, όταν πάρουμε ένα μεταλλικό σύρμα και προσπαθήσουμε να το λυγίσουμε μερικές φορές. Αφού το λυγίσουμε μία φορά και το ισιώσουμε, την δεύτερη φορά πιθανότατα δεν θα λυγίσει στο ίδιο σημείο. Αν καταφέρουμε να το λυγίσουμε ξανά στο ίδιο σημείο, θα νοιώσουμε ότι το σύρμα είναι πιο δύσκαμπτο. Αυτό συμβαίνει επειδή το σημείο καμπής του σύρματος έχει πάθει ενδοτράχυνση. Εάν επαναλάβουμε το λύγισμα μερικές φορές ακόμα, το σύρμα γίνεται ολοένα και πιο δύσκαμπτο και στο τέλος σπάζει. Κατά τρόπο πιο επιστημονικό, η ενδοτράχυνση παρατηρείται όταν υποβληθεί σε δοκιμή εφελκυσμού ένα υλικό το οποίο είχε υποβληθεί προηγουμένως σε παρόμοια δοκιμή μέχρι να πάθει πλαστική παραμόρφωση. Κατά την δεύτερη δοκιμή εφελκυσμού, το υλικό θα παρουσιάσει μεγαλύτερο όριο ελαστικής παραμόρφωσης και μεγαλύτερο όριο διαρροής. Μάλιστα, εάν πρόκειται για κοινό χάλυβα, κατά την δεύτερη δοκιμή εφελκυσμού η πλαστική παραμόρφωση είναι ομαλή και δεν παρατηρείται διαρροή. Η διαρροή παρατηρείται ξανά μόνον όταν, ανάμεσα στην πρώτη και την δεύτερη δοκιμή εφελκυσμού, το υλικό αναθερμανθεί γύρω στους 120°C και επέλθει *εργογήρανση*. [27]

Θερμικές κατεργασίες των Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος

Μαρτενσιτική βαφή : Μαρτενσιτική βαφή στους χάλυβες ονομάζεται η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη με αποτέλεσμα πολύ μεγάλη αύξηση της αντοχής (σκληρότητας), αλλά και ταυτόχρονη μείωση της ολκιμότητας. Η μετατροπή αυτή γίνεται με (ταχύτατη) ψύξη του ωστενίτη εφόσον τηρούνται ορισμένες αναγκαίες και ικανές συνθήκες, όπως π.χ. ταχύτητα ψύξης μεγαλύτερη από μια κρίσιμη (V_c) για το

συγκεκριμένο υλικό ή ψύξη σε θερμοκρασία χαμηλότερη από μια χαρακτηριστική επίσης θερμοκρασία για το ίδιο υλικό (M_s).

Η κρίσιμη ταχύτητα ψύξης (V_c) μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα και σε μαγγάνιο (αλλά και σε άλλα από τα στοιχεία που συναντώνται ως προσμίξεις στους Χ.Ο.Σ.). Για χάλυβες π.χ. με περιεκτικότητα σε $C \approx 0,40\%$ και σε $Mn > 0,60\%$, ταχύτητες ψύξης μεγαλύτερες από την κρίσιμη μπορούν να δημιουργηθούν κατά τη ψύξη μιας ράβδου με απλή εμβάπτιση σε νερό ή κατά τη ψύξη στη διάρκεια και μετά το πέρας μιας συγκόλλησης.

Για τους Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος, η θερμοκρασία αρχής του μετασχηματισμού σε μαρτενσίτη (M_s) είναι μεγαλύτερη των $300^\circ C$.

Η ψύξη από θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $723^\circ C$ σε θερμοκρασία κάτω από $300^\circ C$, με ταχύτητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη, συνεπάγεται πάντοτε δημιουργία μαρτενσίτη, με επακόλουθο την ψαθυροποίηση του χάλυβα.

Για τους χάλυβες της κατηγορίας B500C (συγκολλησίμους) δεν είναι εύκολο να γίνει μαρτενσιτική βαφή επειδή (λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, η κρίσιμη ταχύτητα είναι πολύ μεγάλη και δεν μπορεί να επιτευχθεί με τα συνήθη μέσα (όπως π.χ. με εμβάπτιση σε νερό ή με απλό κατάβρεγμα).

Οι χαλυβουργίες που εκμεταλλεύονται τη μαρτενσιτική βαφή για την αύξηση της αντοχής των Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος (Tempcore κ.λπ.) χρησιμοποιούν ειδικές διατάξεις προκειμένου να εξασφαλίσουν τις εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες ψύξης που απαιτούνται (μεγαλύτερες από την αντίστοιχη κρίσιμη ταχύτητα V_c). Οι υψηλές αντοχές οι οποίες δημιουργούνται στο υλικό με τη μαρτενσιτική βαφή, δεν μπορούν να αξιοποιηθούν αυτοτελώς λόγω της μείωσης της ολκιμότητας που συνεπάγονται. Για αυτό η μαρτενσιτική βαφή στους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ακολουθείται πάντοτε από αναθέρμανση του μαρτενσίτη (επαναφορά). [27]

Επαναφορά

Θέρμανση του μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες μικρότερες των $723^\circ C$ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Η θέρμανση του χάλυβα που περιέχει μαρτενσίτη, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καταστάσεων στη δομή του μετάλλου που τείνουν να αποκαταστήσουν την “ισορροπία” με επακόλουθο τη μείωση της σκληρότητας (που προέρχεται από το μαρτενσίτη) και ταυτόχρονη σημαντική αύξηση της ολκιμότητας του υλικού. Από συγκεκριμένης χημικής σύστασης υλικό, με επιλογή κατάλληλων θερμοκρασιών επαναφοράς, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν προϊόντα με ενδιάμεσες

τιμές μηχανικών ιδιοτήτων (συνδυάζοντας τη μείωση αντοχής με αύξηση ολκιμότητας).

Στην τεχνολογία παραγωγής των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος η επαναφορά γίνεται “αυτόματα”: δηλαδή ο μαρτενσίτης που δημιουργείται με την κατάλληλη ψύξη στην επιφάνεια π.χ. μιας ράβδου, “επαναφέρεται” με την έκθεσή του στη θερμοκρασία που δημιουργείται με τη ροή της θερμότητας από το εσωτερικό της ράβδου προς την περιφέρεια.

Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των μεταβολών (ή και αντιδράσεων) κατά τη διάρκεια της επαναφοράς σε ορισμένη θερμοκρασία, είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων (π.χ. κραματικά στοιχεία κ.ά.). Για τις θερμοκρασίες όμως των 550°C περίπου όπου συνήθως - ανάλογα και με την τεχνολογία του εκάστοτε παραγωγού - “επαναφέρεται” ο μαρτενσίτης των Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ο απαιτούμενος χρόνος για ολοκλήρωση των αντιδράσεων είναι της τάξης δευτερολέπτων. Ο χρόνος και η θερμοκρασία επαναφοράς είναι παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού σε ενδεχόμενες μεταγενέστερες αναθερμάνσεις. Μετά την επαναφορά σε ορισμένη θερμοκρασία (π.χ. κατά τη διαδικασία παραγωγής), κάθε επόμενη θέρμανση στην ίδια ή χαμηλότερη θερμοκρασία δεν θα έχει ουσιαστική επίπτωση στις ιδιότητες του υλικού.

Συνοπτικά, η επαναφορά του χάλυβα περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. *Διάσπαση του μαρτενσίτη* (200–400°C) — Κατακρημνίζεται η περίσσεια του άνθρακα, αρχικά στην μορφή καρβιδίου $Fe_2,4C$ και κατόπιν στην μορφή σεμεντίτη (Fe_3C). Ο χάλυβας χάνει μέρος της εφελκυστικής του αντοχής, αλλά μειώνεται κάπως και η σκληρότητά του.
2. *Ανάπτυξη του σεμεντίτη* (400–500°C) — Τα κατακρημνίσματα του σεμεντίτη γίνονται πιο μεγάλα, ενώ μειώνεται πολύ και η πυκνότητα των κρυσταλλικών διαταραχών. Έτσι μειώνονται σημαντικά η εφελκυστική αντοχή και η σκληρότητα του χάλυβα.
3. *Ανάπτυξη του φερρίτη* (> 500°C) — Σχηματίζονται ευμεγέθεις ισοαξονικοί κόκκοι φερρίτη και το υλικό γίνεται ακόμα πιο μαλακό.

Κατά το τρίτο στάδιο της επαναφοράς, ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν *δευτερογενή σκλήρυνση*, η οποία οφείλεται στην κατακρήμνιση νέων σκληρών καρβιδίων. Αυτό συμβαίνει, π.χ., σε χάλυβες που περιέχουν τα στοιχεία

βανάδιο, βολφράμιο, μολυβδαίνιο και χρώμιο, τα οποία, κατά το τελικό στάδιο της επαναφοράς, σχηματίζουν αντιστοίχως τα καρβίδια: VC, W₂C, Mo₂C και Cr₂₃C₆. [28]

Αποτακτική Ανόπτηση

Με τον όρο αυτό περιγράφεται η θέρμανση του υλικού σε θερμοκρασίες πρακτικά μεγαλύτερες των 80-100°C και αναφέρεται σε ορισμένες περιπτώσεις με τον ανεπιτυχή όρο “γήρανση” του υλικού. Η κατεργασία αυτή διευκολύνει την εξομάλυνση των τάσεων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του μετάλλου έπειτα από “ψυχρή κατεργασία”, και συνεπάγεται μικρές διαφοροποιήσεις αντοχής (αύξηση ή μείωση του ορίου διαρροής κ.λπ.), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις και για ορισμένες θερμοκρασίες συνεπάγεται αξιοσημείωτη αύξηση της ολκιμότητάς του. [29]

Ανακρυστάλλωση (ή και ανόπτηση για ανακρυστάλλωση)

Πρόκειται για θερμική κατεργασία (θέρμανση) σε τέτοια θερμοκρασία ώστε να προκύψουν νέοι κρύσταλλοι (των επί μέρους φάσεων ή συστατικών του μετάλλου) απαλλαγμένοι από τις εσωτερικές τάσεις που έχουν αναπτυχθεί σ’ αυτούς έπειτα από “ψυχρή” κατεργασία. Ο χρόνος ανακρυστάλλωσης είναι της τάξης δευτερολέπτων. Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης δεν είναι συγκεκριμένη για κάθε υλικό, επηρεάζεται δε από την καθαρότητα (όσο πιο καθαρό τόσο χαμηλότερη) και το βαθμό της “εν ψυχρώ” παραμόρφωσης (όσο μεγαλύτερος τόσο χαμηλότερη) που έχει προηγηθεί.

Προϋποθέσεις για την έναρξη και την ολοκλήρωση της ανακρυστάλλωσης είναι:

A) Ο προϋπάρχων βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης (ενδοτράχυνση)

B) Η θέρμανση πάνω από ορισμένη θερμοκρασία (θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης).

Η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης οριοθετεί και τη “ψυχρή” από τη “θερμή” κατεργασία. Αν δηλαδή η κατεργασία διαμόρφωσης γίνεται σε θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, πρόκειται για “ψυχρή” κατεργασία.

Αν η κατεργασία διαμόρφωσης γίνεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, πρόκειται για “θερμή” (“εν θερμώ”) κατεργασία.

[30]

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η διαμόρφωση / κατεργασία γίνεται σε μονάδες διαμόρφωσης που είναι είτε ανεξάρτητες είτε ενταγμένες στο εργοτάξιο. Οι μονάδες διαμόρφωσης πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις οργάνωσης, εξοπλισμού και τεχνικής στελέχωσης που καθορίζονται στη συνέχεια.

Η κοπή, η κάμψη και η εν γένει διαμόρφωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος θα γίνεται σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια και τις απαιτήσεις του ΕΚΩΣ.

- **ΚΑΜΨΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ**

Κάμψη οπλισμού

Η κάμψη πρέπει να γίνεται με μία διάμετρο, D , του κυλινδρικού στελέχους (τυμπάνου), έτσι ώστε να αποφεύγεται εξάντληση της παραμόρφωσης θραύσης του χάλυβα και να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του σκυροδέματος από τις αναπτυσσόμενες τοπικά, στην περιοχή της καμπύλωσης, ισχυρές πιέσεις άντυνας.

Οι μονάδες διαμόρφωσης και τα εργοτάξια υποχρεούνται να διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό για την κάμψη των χαλύβων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Κανονισμών.

Απαραίτητως πρέπει να υπάρχουν κυλινδρικά στελέχη με όλες τις απαιτούμενες διαμέτρους που χρησιμοποιούνται για την κάμψη. Οι ελάχιστες διαμέτρους καμπύλωσης για τους χάλυβες κατηγορίας B500C λαμβάνονται από το ΕΚΩΣ.

Η κάμψη των ράβδων πρέπει να γίνεται αποκλειστικά με μηχανικά μέσα, με χρήση κυλινδρικών στελεχών κάμψης, έτσι ώστε το καμπύλο τμήμα της ράβδου να έχει σταθερή ακτίνα καμπυλότητας. Η κάμψη θα γίνεται με σταθερή ταχύτητα χωρίς κραδασμούς.

Γενικώς, απαγορεύεται η κάμψη των ράβδων με φλόγα, διότι ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της εφελκυστικής αντοχής και της παραμόρφωσης θραύσης .

Γενικώς, απαγορεύεται η επανευθυγράμμιση καμφθείσας ράβδου, με ή χωρίς φλόγα, διότι οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών, που είχε προκληθεί με την προηγηθείσα κάμψη. [31]

ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να προστατεύεται από τη διάβρωση, τόσο πριν από την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα όσο και μετά από αυτήν.

Ειδικότερα όσον αφορά τη διάβρωση του χάλυβα πριν από την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα.

Κατά την τοποθέτηση στην τελική θέση, ο χάλυβας πρέπει να είναι απαλλαγμένος από εμφανείς απολεπίσεις, αλλοιώσεις ή αθέλητες παραμορφώσεις και πληγές, οι οποίες εκτός των άλλων επιταχύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης.

Όσον αφορά την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση μετά την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα, αυτή γενικώς καλύπτεται από την παθητική προστασία που του προσδίδει το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος (όσο το pH είναι μεγαλύτερο από 9,5) και από την επικάλυψη στεγανότητας του σκυροδέματος.

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας
- Την μείωση του pH
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κ.λπ.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα.

Οι συχνές μεταβολές των πιο πάνω παραγόντων επηρεάζουν περαιτέρω την ταχύτητα της διάβρωσης.

Άλλοι παράγοντες αύξησης της ταχύτητας διάβρωσης είναι:

- Η ύπαρξη ενεργών “κέντρων” στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως π.χ. οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας κ.λπ.)
- Η ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης
- Η ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κ.λπ.)
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος.

Τα μέτρα αυτά έχουν διαφορετικό κόστος και εξασφαλίζουν διαφορετική διάρκεια προστασίας από τη διάβρωση και το καθένα τους μπορεί να εφαρμοσθεί κατά

περίπτωση. Ενδέχεται όμως να έχουν και δυσμενείς συνέπειες, που πρέπει να μελετώνται εξαρχής. [32]

Έλεγχος της κατάστασης του χάλυβα από πλευράς διάβρωσης και ανθεκτικότητας

Η κατάσταση του χάλυβα από πλευράς διάβρωσης εκτιμάται κατ' αρχάς με τον οπτικό έλεγχο. Αν η διαδικασία σχηματισμού οξειδίων του σιδήρου έχει ήδη προχωρήσει, τότε το πιθανότερο είναι τα αποτελέσματα της οξειδωσης να είναι ορατά στην επιφάνεια του σκυροδέματος (ακόμη και αν ο χάλυβας βρίσκεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος) από τις κηλίδες σκουριάς, από τη διόγκωση (τα οξείδια του σιδήρου έχουν μεγαλύτερο όγκο από την αντίστοιχη ποσότητα μετάλλου από το οποίο προήλθαν) και από τις χαρακτηριστικές ρωγμές (παράλληλα προς τον οπλισμό) που προκαλεί η διόγκωση.

Σ' αυτή την περίπτωση, πρέπει να ερευνηθεί η έκταση του φαινομένου και η ανάγκη λήψης μέτρων. Για τον σκοπό αυτό:

- Θα αποκαλυφθεί τοπικά η ράβδος ή οι ράβδοι του οπλισμού, με τρόπο που να καθίσταται εφικτή η διαπίστωση της βλάβης
- Θα εκτιμηθεί ο βαθμός προσβολής, κατ' αρχάς οπτικά ή και με μέτρηση της απώλειας διατομής της ράβδου.

Αν εκτιμηθεί ότι από την προσβολή έχει μειωθεί ουσιαστικά η διατομή ή η συνάφεια ή η γεωμετρία των νευρώσεων, θα πρέπει να γίνει επέμβαση αποκατάστασης.

Ενδεικτικά σημειώνεται ότι η μείωση της διατομής κατά 5% ή της διαμέτρου κατά 0,5mm, θα μπορούσε να οδηγήσει ενδεχομένως σε επέμβαση. Η ενδεχόμενη αλλοίωση της γεωμετρίας των νευρώσεων θα εκτιμηθεί οπτικά ή με κάθε άλλον πρόσφορο τρόπο.

Οι υποδείξεις ισχύουν μόνο για την περίπτωση τοπικής βλάβης και μόνο σε αδυναμία εκτέλεσης ακριβέστερων εργαστηριακών ελέγχων. Το πλήθος αυτών των θέσεων και το είδος των δομικών στοιχείων στα οποία εμφανίζονται, θα ληφθούν υπόψη στην λήψη της τελικής απόφασης, για τον βαθμό και την έκταση της επέμβασης. [33]

περιοχή. Τέλος, για έναν σημειακό προσδιορισμό του βάθους ενανθράκωσης, μπορεί να εφαρμοσθεί και η ακόλουθη τεχνική:

Διανοίγεται μικρή οπή (π.χ. Φ8mm) στο στοιχείο με ηλεκτρικό δράπανο, συλλέγεται η σκόνη η οποία ψεκάζεται με το διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Αν η σκόνη δεν αλλάξει χρώμα, σημαίνει ότι η ενανθράκωση έχει προχωρήσει μέχρι το διατηρηθέν βάθος. Συνεχίζεται η διάτρηση στην ίδια οπή μέχρις ότου προκύψει ερυθρή απόχρωση το οποίο σημαίνει ότι το σκυρόδεμα στην συγκεκριμένη θέση είναι υγιές.
[36]

• Μέτρηση περιεκτικότητας χλωριόντων.

Για τον σκοπό αυτό αποκόπτονται τεμάχια σκυροδέματος, από την περιοχή της επικάλυψης των οπλισμών, και αποστέλλονται σε ειδικευμένο εργαστήριο, όπου συνήθως μετριέται η συνολική

ποσότητα χλωριόντων (ελεύθερων και δεσμευμένων) κατά βάρος σκυροδέματος.

Σημείωση: Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν τα εξής:

Δεν υπάρχουν σαφή όρια, για την κατά βάρος τιμέντου περιεκτικότητα ελεύθερων χλωριόντων, η υπέρβαση των οποίων οδηγεί σε διάβρωση των οπλισμών. Τα μόνα όρια, και αυτά όχι διεθνώς αποδεκτά, αφορούν την παρουσία των χλωριόντων στην αρχική σύνθεση του σκυροδέματος τα οποία οφείλονται στα συστατικά στοιχεία του σκυροδέματος (αδρανή, νερό κ.λπ.). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, κατά το όριο αυτό ορίζεται σε 0,4% κ.β. τιμέντου. Όσον όμως αφορά τα χλωριόντα που έχουν εισχωρήσει στο σκυρόδεμα μετά την σκλήρυνσή του, είναι ακόμη δυσκολότερο να καθορισθεί όριο, κάτω του οποίου δεν υπάρχει διάβρωση του οπλισμού, διότι το όριο αυτό εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, των οποίων η δράση δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή. Ενδεικτικά, το ACI 222R-85 προτείνει ως μέγιστη συγκέντρωση χλωριόντων διαλυτών στο νερό, σε ήδη σκληρυμένο σκυρόδεμα ηλικίας 28 ημερών και για σκυρόδεμα το οποίο θα προστατεύεται από την υγρασία: 1,0% κ.β. τιμέντου

Δεν είναι τα συνολικά χλωριόντα (δεσμευμένα και ελεύθερα) τα οποία είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση του οπλισμού. [34]

Από τα συνολικά χλωριόντα που υπάρχουν στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, ένα μέρος είναι χημικώς δεσμευμένο από τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου, ένα άλλο μέρος είναι φυσικώς δεσμευμένο στην επιφάνεια των πόρων του τσιμεντοπολτού, και είναι το τρίτο μέρος, που είναι ελεύθερο, το οποίο είναι το υπεύθυνο για την διάβρωση του οπλισμού. Το ποσοστό των ελεύθερων χλωριόντων ως προς τα

συνολικά μπορεί να κυμαίνεται από 20% έως 50% των συνολικών χλωριόντων. Στις χημικές αναλύσεις όμως εκείνο το οποίο συνήθως μετριέται είναι το συνολικό ποσοστό χλωριόντων.

Τέλος, αν τα ποσοστά των χλωριόντων αναφέρονται κατά βάρος σκυροδέματος, τότε θα πρέπει να γίνει αναγωγή σε βάρος τσιμέντου γνωρίζοντας την περιεκτικότητα σε τσιμέντο του σκυροδέματος (π.χ. 300kg/m³) καθώς και το ειδικό βάρος του άοπλου σκυροδέματος (π.χ. 2200 έως 2300 kg/m³).

Η ενανθράκωση και η διεισδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθότι η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη. Το Ca(OH)₂ του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό κάτω από την οριακή συγκέντρωση του 0,4% έως 0,6% που απαιτείται για τη διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Όταν όμως το υδροξείδιο του ασβεστίου μετατραπεί με την ενανθράκωση σε CaCO₃, τα χλωριόντα που έχει δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα. [35].

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ

Εφελκυσμός

Εφελκυσμός είναι το φαινόμενο εκείνο που το δοκίμιο τείνει αρχικά να μηκυνθεί (αυξήσει το μήκος του) και μετά πιθανώς να διασπαστεί (υποστεί θραύση) υπό την επενέργεια δυο ίσων και αντίθετων δυνάμεων που επενεργούν στα αντίθετα άκρα του ή υπό την επενέργεια μιας δύναμης που επενεργεί στο ένα άκρο όταν το άλλο άκρο είναι πακτωμένο (σταθερά συνδεδεμένο) με κάποιο σώμα.

όπου:

- P σε N, ή σε οποιαδήποτε άλλη μονάδα του ίδιου

συστήματος, η εφελκυστική δύναμη κατά τη διάρκεια της καταπόνησης

- $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ σε mm, ή σε οποιαδήποτε άλλη μονάδα του ίδιου συστήματος, η αντίστοιχη μήκυνση ράβδου μετάλλου που ονομάζεται επιμήκυνση

- L σε mm ή σε οποιαδήποτε άλλη μονάδα του ίδιου συστήματος, το αρχικό μήκος της ράβδου.

A. Ορθή Τάση (σ)

Προκύπτει από το λόγο της εκάστοτε εφαρμοζόμενης δύναμης P προς την αρχική διατομή του δοκίμιου που συμβολίζεται με F. Επειδή η ορθή τάση προέρχεται από την αντίστοιχη εφελκυστική δύναμη, ονομάζεται ορθή εφελκυστική τάση και ισούται με:

$$\sigma = P/F \text{ (σε N/mm}^2\text{)}$$

B. Ανηγμένη επιμήκυνση (ϵ)

Προκύπτει από το λόγο της εκάστοτε επιμήκυνσης Δl προς το αρχικό μήκος L .

$\epsilon = \Delta l / l$ (αναφέρεται συνήθως σε % ποσοστό, καθαρός αριθμός)

Γ. Διατομή κυκλικού δοκιμίου

$$F = \pi d^2 / 4 \quad (\text{σε mm})$$

Δ. Διατομή πρισματικού δοκιμίου

$$F = a \times b \quad [37]$$

B. Νόμος του Hooke

Έστω μια πρισματική αβαρής ράβδος AB, η οποία καταπονείται από αξονική εφελκυστική δύναμη F που ασκείται στο κέντρο βάρους της και έστω A το εμβαδό της διατομής της ράβδου.

Με την επενέργεια της εφελκυστικής δύναμης η ράβδος θα επιμηκυνθεί κατά Δl και τελικά το σημείο εφαρμογής της δύναμης θα μετατοπιστεί δεξιότερα, οπότε και το τελικό μήκος της ράβδου θα γίνει $(l + \Delta l)$.

Πειραματικά αποδεικνύεται ότι για πρισματικές ράβδοι, υποβαλλόμενες σε εφελκυσμό εντός της ελαστικής περιοχής, η επιμήκυνση Δl της ράβδου είναι ανάλογη τόσο προς την δύναμη εφελκυσμού F , όσο και προς το αρχικό μήκος της l και αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της διατομής της A .

Η πλήρης μαθηματική διατύπωση του νόμου του Hooke είναι:

$$\Delta l = Pl / EF$$

Ο νόμος του Hooke ισχύει εφόσον ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- 1) Ο άξονας της ράβδου είναι ευθύγραμμος.
- 2) Η δύναμη δρα στη διεύθυνση και στον άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- 3) Οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- 4) Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.
- 5) Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιμηκύνεται το ίδιο.

6) Οι διατομές που είναι αρχικά επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.

7) Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από την τάση αναλογίας του υλικού. Δηλαδή ο νόμος του Hooke ισχύει μόνο εντός της γραμμικά ελαστικής περιοχής[37]

Ιδιότητες σε εφελκυσμό [38]

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΣΗΜΑΣΙΑ
m (g)	Μάζα
L(mm)	Αρχικό ολικό μήκος (πριν τον εφελκυσμό)
Lo(mm)	Αρχικό καταπονούμενο μήκος
P(kg/m ³)	Πυκνότητα
F _{0,2} (KN)	Δύναμη στο συμβατικό όριο διαρροής
F _v (KN)	Δύναμη στο όριο διαρροής
A	Ονομαστική διατομή
A act	Πραγματική διατομή
A	Γωνία κλίσης πλάγιας πλευράς νευρώσεις
A _r	Ανοιγμένη επιφάνεια προβολής νευρώσεων
B	Πλάτος πλάγιας νεύρωσης
C	Απόσταση μεταξύ πλαγίων νευρώσεων
C _{eq}	Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα
X _k	Χαρακτηριστική τιμή του μεγέθους X
d(η Φ)	Ονομαστική διάμετρος
E _u	Συνολική ανοιγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο
E _s	Ανοιγμένη παραμόρφωση μετά την θραύση, μετρούμε σε μήκος δ στην περιοχή θραύσης (κατά τα καταργηθέντα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971)
E	Μέτρο ελαστικότητας
H	Ύψος πλαγίων νευρώσεων στην κορυφή
F _t	Ελκυστική αντοχή χάλυβα
F _y	Όριο διαρροής χάλυβα
F _{0,2}	Συμβατικό όριο διαρροής για παραμένουσα παραμόρφωση
F _{y act}	Πραγματικό όριο διαρροής χάλυβα
F _{y nom}	Ονομαστικό όριο διαρροής χάλυβα
F _s	Διατηρητική δύναμη
A _g (%)	Ανοιγμένη επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο
ε ₀ (%)	Ολική ανοιγμένη παραμόρφωση
S _r	Συντελεστής διάτμησης
T _a	Θερμοκρασία

ΠΙΝΑΚΑΣ 3:ΤΑ ΣΥΜΒΟΛΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΟΥΝ ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΤΟΥ ΕΛΟΤ 656 ΚΑΙ ISO 3898

Τα υποχρεωτικά όρια των μηχανικών χαρακτηριστικών σε εφελκυσμό των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος δίνονται στον Πίνακα 4

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	B500C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	≥ 500
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	$\leq 1,25$
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Συνολική ανοιγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο ϵ_u (%)	$\geq 7,5$

ΠΙΝΑΚΑΣ 4:Ορια μηχανικών ιδιοτήτων σε εφελκυσμό κατά ΕΛΟΤ 1421-2 & 1421-3.[39]

Για το όριο διαρροής f_y , οι αναφερόμενες στον Πίνακα 4 τιμές είναι χαρακτηριστικές, ποσοστημορίου 95%. Για τη συνολική ανοιγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , για τον λόγο f_t/f_y και για τον λόγο $f_{y,act}/f_{y,nom}$ οι αναφερόμενες στον Πίνακα τιμές είναι χαρακτηριστικές, ποσοστημορίου 90%.

Οι τιμές των f_y και f_t υπολογίζονται με βάση την ονομαστική διατομή.

Όταν δεν υπάρχει διακριτό όριο διαρροής, θα προσδιορίζεται το συμβατικό όριο διαρροής $f_{0,2}$.

Το όριο διαρροής (R_e), είναι το βασικό μέγεθος σχεδιασμού σε ότι αφορά τις μηχανικές αντοχές των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Καθορίζεται με την πραγματοποίηση δοκιμής εφελκυσμού, όπου ένα δοκίμιο μήκους 40-60 εκατοστών εφελκύεται σε ειδική μηχανή. Με την προοδευτική αύξηση του φορτίου, οι αρπάγες της μηχανής απομακρύνονται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της δοκιμής και το δοκίμιο επιμηκύνεται. Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε για τη δοκιμή εφελκυσμού μεταλλικών υλικών, μέχρις κάποια συγκεκριμένη τιμή φορτίου, η επιμήκυνση είναι ανάλογη με αυτό. Η παραπάνω μεταβολή σχεδόν ταυτίζεται με τον ευθύγραμμο κλάδο του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων, η κλίση του οποίου μας δίνει το μέτρο ελαστικότητας (E).

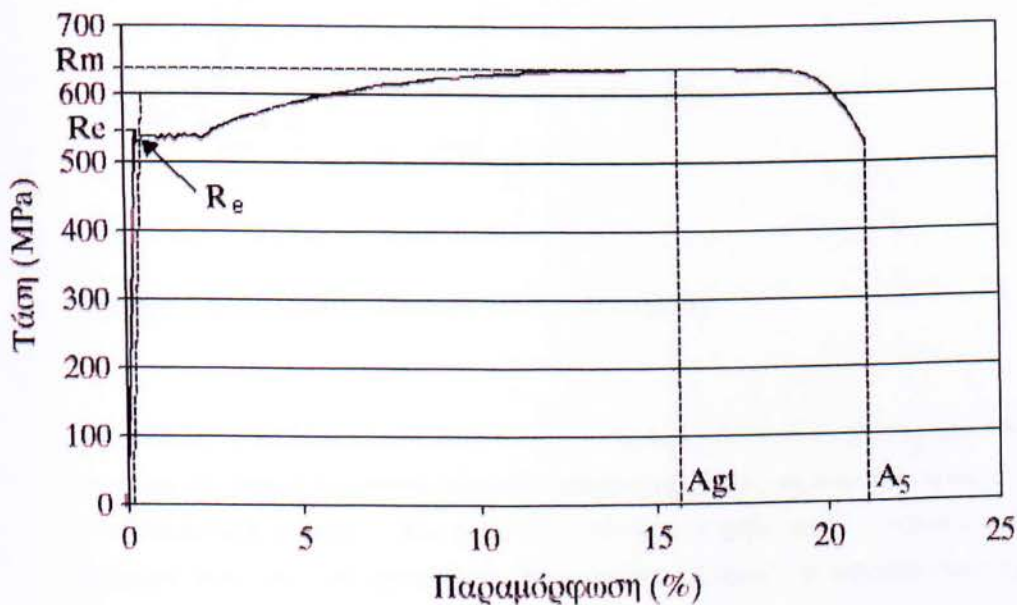
Φόρτιση, πέρα από το σημείο διαρροής, προκαλεί στο δοκίμιο της ράβδου πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή οι παραμορφώσεις που προκαλούνται είναι μόνιμες.

Στα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων, οι τάσεις υπολογίζονται με τη διαίρεση του εκάστοτε φορτίου με την αρχική διατομή του δοκιμίου ($\sigma=F/A$), όπου λαμβάνεται είτε η ονομαστική τιμή αυτής είτε η πραγματική. Στον άξονα των παραμορφώσεων, σημειώνονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις, που προκύπτουν από το πηλίκο της μεταβολής μήκους, προς το αρχικό επιμετρούμενο μήκος ($\epsilon=\Delta l/l_0$). Το επιμετρούμενο μήκος δεν είναι ολόκληρο το μήκος του δοκιμίου, αλλά τμήμα αυτού, που καθορίζεται από τα διάφορα Πρότυπα.

Το σημείο διαρροής, σε δοκίμια χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος θερμής έλασης (Tempcore/Thermex) ή μικροκραματωμένοι με βανάδιο, είναι σχεδόν πάντα ορατό. Σε αυτήν την περίπτωση, μόλις το σημείο διαρροής προσεγγιστεί, η επιμήκυνση αυξάνει απότομα, με ρυθμό μεγαλύτερο της αύξησης του φορτίου ή και χωρίς αύξηση φορτίου.

Παρουσιάζεται έτσι ένα χαρακτηριστικό πλατό (Σχήμα 2)

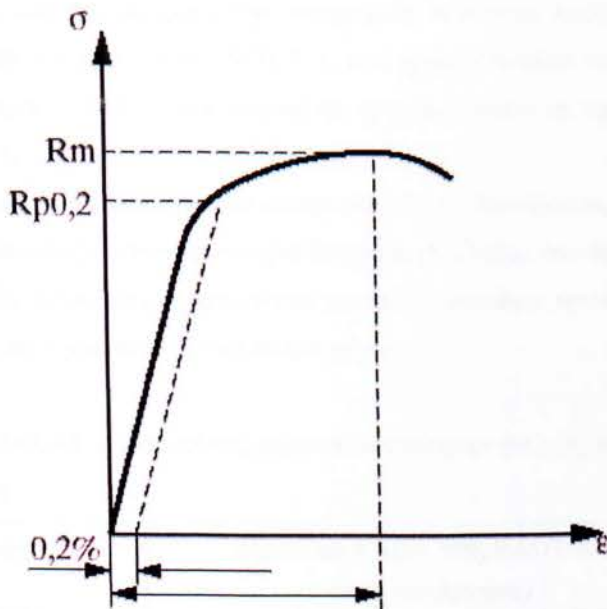
ΣΧΗΜΑ 2: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δοκιμίου χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος θερμής έλασης[40]



Στην περίπτωση που εμφανίζεται ανώτερο και κατώτερο σημείο διαρροής, ως τιμή του ορίου διαρροής, λαμβάνεται πάντοτε το ανώτερο.

Στην περίπτωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ψυχρής ολκής ή ψυχρής έλασης, το σημείο διαρροής δεν είναι ορατό. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε μικροκραματωμένους χάλυβες, ανάλογα με τη συνδυασμένη παρουσία χημικών στοιχείων σε συγκεκριμένες

αναλογίες. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, προσδιορίζεται το συμβατικό όριο διαρροής $R_{p0,2}$, δηλαδή η τάση που αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση 0,2% (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Υπολογισμός συμβατικού Ορίου Διαρροής[40]

Με αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου πέραν της τιμής που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής, η αντοχή της ράβδου αυξάνεται, λόγω **ενδοτράχυνσης**, μέχρις μιας ανώτερης τιμής, που είναι η **εφελκυστική αντοχή – R_m** (Σχήμα 2). Μετά το σημείο αυτό, η παραμόρφωση του δοκιμίου παύει να είναι ομοιόμορφη, δημιουργείται “**λαιμός**”, η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου μειώνεται και τελικά αυτό θραύεται. Το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο της θραύσης ονομάζεται **φορτίο θραύσης** και η αντίστοιχη τάση, **τάση θραύσης**.

Συχνά δημιουργείται κάποια σύγχυση με τη χρήση των παραπάνω εννοιών και αυτό διότι στο Πρότυπο ΕΛΟΤ 971 για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, η εφελκυστική αντοχή, αναφέρεται ως όριο θραύσης, που ασφαλώς δεν είναι σωστό.

Οι τάσεις συνήθως μετρούνται σε MPa.

$$1\text{MPa} = 1\text{N/mm}^2 \quad 1\text{MPa} = 10\text{Kp/cm}^2$$

Ανάλογα με τις τιμές που ορίζονται για το όριο διαρροής και την εφελκυστική αντοχή, υπάρχουν χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διαφόρων αντοχών. Οι προδιαγραφές των

Προτύπων σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές ποικίλλουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής και τη χρήση που πρόκειται να έχουν οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος.

Οι παλιές και νέες απαιτήσεις των ελληνικών Προτύπων και Κανονισμών σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές και την ολκιμότητα, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3, όπου έχει γίνει και υπογράμμιση των κατηγοριών που στην πράξη μας ενδιαφέρουν: Η κατηγορία **S500s** του Προτύπου ΕΛΟΤ 971, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σχεδόν ως τώρα και η κατηγορία **B500C**, που κυρίως θα χρησιμοποιείται με την εφαρμογή του Προτύπου ΕΛΟΤ 1421.

Επισημαίνεται ότι, για την κατηγορία **B500C**, θεσπίζονται, εκτός από τα ελάχιστα και ανώτατα όρια τόσο για το όριο διαρροής (625MPa), όσο και για το λόγο R_m/R_e (μέγιστο 1,35). Η πρόβλεψη αυτή γίνεται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ικανοτικού ελέγχου και την προστασία έναντι υπεραντοχών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος
[40]

Μέγεθος	Πρότυπα ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971 (υπό κατάργηση)					Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421 (υπό έγκριση)	
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500C	B500A
Όριο διαρροής, R_e (MPa)	220	400	500	400	500	500	500
Εφελκυστική αντοχή, R_m (MPa)	340	500	550	440	550	Δεν ορίζεται. Τίθεται έμμεση απαίτηση μέσω των περιορισμών για τις τιμές του λόγου R_m/R_e	Δεν ορίζεται. Τίθεται έμμεση απαίτηση μέσω των περιορισμών για τις τιμές του λόγου R_m/R_e
Ανηγγμένη παραμόρφωση μετά την θραύση, A_5 (%)	24	14	12	14	12	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται
Ανηγγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, A_{gt} (%)	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	$A_{gt} \geq 7,5$	$A_{gt} \geq 2,5$
Λόγος εφελκυστικής αντοχής προς Όριο διαρροής, R_m/R_e	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	1,05	1,05	$1,15 \leq R_m/R_e \leq 1,25$	$R_m/R_e \geq 1.05$

Λόγος πραγματικής τιμής Ορίου διαρροής προς ονομαστική τιμή Ορίου διαρροής, ($R_{e,act}/R_{e,nom}$)	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	$R_{e,act}/R_{e,nom} \leq 1,35$	Δεν ορίζεται
---	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------------------------	--------------

Με το Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421, αλλάζει ο τρόπος υπολογισμού των αντοχών. Το όριο διαρροής και η εφελκυστική αντοχή θα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το εμβαδόν της ονομαστικής διατομής του προϊόντος και όχι της πραγματικής, που χρησιμοποιούταν μέχρι τώρα.

Η αλλαγή αυτή δημιουργεί νέα δεδομένα, φέρνοντας πιο κοντά τις ιδιότητες του υλικού στις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Ορισμένα παραδείγματα για τις συνέπειες: α) Η οποιαδήποτε μείωση διατομής στην περίπτωση έντονης διάβρωσης, θα συνεπάγεται μείωση των πειραματικά υπολογιζόμενων αντοχών και συνεπώς θα αυξάνει την πιθανότητα απόρριψης του υλικού λόγω διάβρωσης β) Αυξάνει η πιθανότητα απόρριψης υλικών λόγω μη επαρκούς αντοχής σε σχέση με παρελθόν, καθώς δεν θα είναι πλέον δυνατόν με μείωση της διατομής, να αυξάνεται (τεχνητά) η αντοχή, π.χ. στους χάλυβες ψυχρής ολκής.

Συμπεριφορά σε κόπωση [41]

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. 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 $2\sigma_A = 215 \text{ MPa}$, μέγιστη τάση σ_{\max} ίση με το 70% του πραγματικού ορίου διαρροής και αντοχή σε 2.10^6 κύκλους φόρτισης. 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 2009 θα είναι εναρμονισμένο με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 2 και του EN 10080, έχοντας τα ίδια κριτήρια με αυτά του ΕΛΟΤ 1421-3, δηλαδή $2\sigma_A = 150 \text{ MPa}$ και $\sigma_{\max} = 300 \text{ MPa}$

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3, και τον Ευρωκώδικα EN 1992-1-1, το προϊόν υποβαλλόμενο σε αξονική φόρτιση θα πρέπει να αντέχει ένα καθορισμένο αριθμό κύκλων. Η τάση θα μεταβάλλεται με ημιτονοειδή μορφή εντός του καθορισμένου διαστήματος τάσεων (σ_{\min} έως σ_{\max}) με εύρος $2\sigma_A$ και μέγιστη τιμή σ_{\max} . Οι τιμές των δυνάμεων που αντιστοιχούν στο εύρος ($2\sigma_A$) και στη μέγιστη τιμή (σ_{\max}) αντίστοιχα, θα υπολογίζονται με βάση την ονομαστική (και όχι την πραγματική) διατομή της ράβδου ή του σύρματος.

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3, ένα κατάλληλο δείγμα ΧΟΣ τοποθετημένο σε μηχανή εφελκυσμού περνάει επιτυχώς τον έλεγχο κόπωσης όταν υφίσταται εναλλασσόμενη φόρτιση με παραμέτρους:

- Η μέγιστη τάση σ_{\max} θα είναι 300 MPa . Το εύρος διακύμανσης τάσεων, $2\sigma_A$ θα είναι 150 MPa , οπότε $\sigma_{\min} = 150 \text{ MPa}$.
- Ο καθορισμένος αριθμός κύκλων στον οποίο θα πρέπει να αντέχει το δοκίμιο, θα είναι 2.10^6 .
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση από 200 Hz .
- Το ελάχιστο ελεύθερο μήκος δοκιμίου θα είναι το $\max(140\text{mm}, 14d)$. [42]

Γενικώς, σύμφωνα με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080 και ΕΛΟΤ 1421-3, οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος θα πρέπει να αντέχουν σε ένα καθορισμένο πλήθος κύκλων επαναλαμβανόμενης αξονικής ελκυστικής καταπόνησης με τάσεις κυμαινόμενες από σ_{\min} έως σ_{\max} , ημιτονοειδείς μεταβαλλόμενες, με εύρος διακύμανσης:

$$2\sigma_A = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Ο έλεγχος κόπωσης εφαρμόζεται μόνον στους χάλυβες κατηγορίας B500C

Οι ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος κατηγορίας B500C πρέπει να αντέχουν, σε δοκιμή κόπωσης, 2×10^6 κύκλους φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη τάση $\sigma_{max} = 300 \text{ MPa}$
- Εύρος διακύμανσης τάσεων $2\sigma_A = 150 \text{ MPa}$
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση με 200 Hz

Προσεγγιστικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του σιδήρου, E, συναρτήσει της θερμοκρασίας Τα δίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 5

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Προσεγγιστικές τιμές E. [43]

T σε °C	20	200	425	550	650
E σε GPa	200	185	155	135	125

Οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση κυμαίνονται από 76 έως 82 GPa. Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως μέτρο διάτμησης ή μέτρο ολίσθησης. Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας και με τον λόγο Poisson με τη σχέση:

$$G = E / [2(1 + \nu)]$$

Μέτρο διόγκωσης (bulk modulus), ορίζεται ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της επιβεβλημένης υδροστατικής πίεσεως, p, και της μεταβολής του όγκου του υλικού $\Delta V/V$: $K = p : [\Delta V/V]$

Οι τιμές του μέτρου διόγκωσης κυμαίνονται από 160 έως 169 GPa

Τιμές από 0,27 έως 0,33 έχουν αναφερθεί για τον λόγο Poisson, με τον μέσο όρο 0,30 ως την πλέον αποδεκτή τιμή για πρακτικές εφαρμογές. [43]

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 ($\varnothing 8$ - $\varnothing 12 \text{ mm}$) 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.

Στην παρούσα μελέτη έγινε επίσης μια προσπάθεια θεωρητικής ερμηνείας του ελέγχου αντοχής σε κόπωση, σύμφωνα με το ισχύον πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3, αλλά και με το Βρετανικό πρότυπο BS4449. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εξάρτηση της αντοχής σε κόπωση από την διάμετρο του χάλυβα. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν εκτός από την κλασική μορφή με τις καμπύλες Wöhler και 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 [42]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Νέος Κανονισμός οπλισμού σκυροδέματος κεφ. 1 εισαγωγή .
- [2] Banking News(internet), Δελτία τύπου, Άρθρο <<ΝΕΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΔΙΕΘΝΗ ΑΓΟΡΑ ΣΙΔΗΡΟΜΕΤΑΛΕΥΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΟΥΝ ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ>>.
- [3] Χάλυβας – Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/χάλυβας).
- [4] ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ , Γ.Δ Χρυσουλάκης –Δ. Ι Παντελής , εκδ. Παπασωτηρίου , p 320.
- [5] STEEL HEAT TREATMENT-Metallurgy & Technologies , George E Totten , Taylor & Francis Group , p. 137.
- [6] H.Foll, ‘A brief history of steel’.
- [7] Steel Heat Treatment-Metallurgy & Technologies ,George E. Totten , Taylor & Francis Group , p.178.
- [8] Carbon Steel Handbook, E.P.R.I. 2006, p 15.
- [9] Steel Forming and Heat Treating Handbook, Antonio Augusto Gorni, 2009, p 47.
- [10] JP.Birat, ‘Alternative ways of making steel :Retrospective and prospective’.
- [11] Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών , Γ.Δ. Χρυσουλάκης - Δ.Παντελίδης , εκδ. ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ , p 318-319.
- [12] Carbon Steel Handbook, E.P.R.I. 2006, p 44.
- [13] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 1.6
- [14] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 2.1
- [15] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 2.4
- [16] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παράγραφος 3.1
- [17] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-Παράρτημα 1.3.1
- [18] ΦΕΡΡΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/φερριτης).
- [19] ΩΣΤΕΝΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/ωστενιτης).
- [20] ΣΕΜΕΝΤΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/σεμεντιτης).
- [21] ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/μαρτενστιτης).
- [22] Carbon Steel Handbook-παράρτημα 4, p 52
- [23] ΠΕΡΛΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/περλιτης).
- [24] ΜΠΑΙΝΙΤΗΣ- Βικιπαιδεία (www.el.wikipedia.org/wiki/μπαϊνιτης).
- [25] Carbon Steel Handbook-παράρτημα 4, p 51
- [26] Δικτυακός Τόπος Σελίδων Μαθημάτων Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π
- [27] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-παράρτημα 1.3.2
- [28] ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ – Βικιπαιδεία ([http://el.wikipedia.org/wiki/Επαναφορα_\(μεταλλουργια\)](http://el.wikipedia.org/wiki/Επαναφορα_(μεταλλουργια)))
- [29] ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ-Τεχνολογικό Ιδρυμα Κρήτης , παράρτημα 5.2.1

- [30] ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ-Τεχνολογικό Ιδρυμα Κρήτης ,
 παραρτημα 5.2.2
- [31] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 6.5
- [32] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ 10.1
- [33] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008- Κεφαλαιο 10
- [34] Neville: 1995 "Properties of concrete"
- [35] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-Παραρτημα7.4.3
- [36] Τάσιος, Αλγιζάκη: 1993 "Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος"
- [37] ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ-Κεφαλαιο 3
- [38] ΑΣΚΗΣΗ 4 ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ
 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ -
 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ
 ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
- [39] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παράγραφος 3.2.1
- [40] ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ , "ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ: ΝΕΕΣ
 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ"
- [41] 3^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
 ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ 2008 ,Άρθρο 1785
- [42] 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής
 Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1785
- [43] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008-ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παράγραφος 3.2.4