

## ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΔΕΛΕ ΜΑΡΙΝΑ**  
**ΔΗΜΟΓΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ**

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που έχουν οι ανοξείδωτοι χάλυβες οπλισμού αναφορικά με τη χρήση τους στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Παρουσιάζεται η υπεροχή τους απέναντι στη διάβρωση καθώς και οι ιδιαιτερότητες που εμφανίζουν στον εφελκυσμό, τη συγκόλληση, την ολκιμότητα, τη χρήση τους σε συνεργασία με τον κοινό χάλυβα, τη διαθεσιμότητα και το κόστος απόκτησης.*

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Εικόνα 1: Ράβδοι ανοξείδωτου χάλυβα οπλισμού (Valbruna Stainless Steel)<sup>(8,11)</sup>.

Η διάβρωση του σιδηροοπλισμού οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας. Το ίδιο το σκυρόδεμα αρχικά αποτελεί ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον γύρω από τον οπλισμό (με PH 10-13)<sup>1</sup>. Η μείωση όμως της αλκαλικότητας λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος ή η λόγω διεύδυσης των χλωριόντων καταστροφή του προστατευτικού στρώματος οξειδίων του οπλισμού, οδηγούν στην ανάπτυξη διαβρωτικής δράσης (mehta and monteiro 2005). Έτσι, ιδίως όταν το περιβάλλον της κατασκευής είναι έντονα διαβρωτικό πρέπει να εξετάζεται η λήψη κατάλληλων προστατευτικών μέτρων. Η προστασία αυτή μπορεί να είναι εξωτερικά επιβαλλόμενη (π.χ. καθοδική προστασία) ή να παρέχεται από τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου υλικού (π.χ. ράβδοι ανοξείδωτου χάλυβα, Εικόνα 1). Στις περισσότερες περιπτώσεις η προστασία που παρέχεται από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους (επικαλύψεις, εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση) είτε παύει να υφίσταται είτε περιορίζεται αν διακοπεί με

οποιοδήποτε τρόπο η επιβολή της (π.χ. απομάκρυνση ή αποκόλληση επικάλυψης, διαφοροποίηση της επιβαλλόμενης τάσης καθοδικής προστασίας)<sup>2</sup>.

Με τη χρήση ανοξειδωτων χαλύβων επιτυγχάνεται προστασία των οπλισμών από τη διάβρωση<sup>(3,4)</sup> :

- σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως παραθαλάσσιες περιοχές και λιμενικά έργα
- σε κατασκευές σε χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων
- σε περιπτώσεις στήριξης και ενίσχυσης κατασκευών ή ανακατασκευής μνημείων και αγαλμάτων (από μάρμαρο ή πέτρα), ιδιαίτερα όταν οι δυσκολίες προσπελάσεως ή η αδυναμία κλεισίματος(π. χ. σε αυτοκινητόδρομους γεφυρών) αποτρέπουν τη συχνή επέμβαση αποκατάστασης και συντήρησης
- σε περιπτώσεις όπου η χρήση ελαφροσκυροδέματος απαιτείται για μείωση του ιδίου βάρους κατασκευής ή για θερμική μόνωση
- σε κατασκευές όπου απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής, π.χ. 75 έως 100 χρόνια (π.χ. γέφυρες)<sup>5</sup>
- σε κατασκευές σε υγρό περιβάλλον (σύραγγες μετρό ή τρένων, υπόγειες διαβάσεις, οχετοί, οπλισμός θεμελίων σε υπόγεια νερά) ή και σε ειδικές κατασκευές (π.χ. πισίνες)
- λόγω χρήσης NaCl κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε γέφυρες αυτοκινητοδρόμων (π.χ. Βόρεια Ευρώπη)<sup>5</sup>.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι χάλυβες με κράμα γενικώς πλούσιο σε νικέλιο(Ni) και χρώμιο(Cr),στοιχεία που τους καθιστούν σχεδόν πλήρως απρόσβλητους από την οξειδωση. Το χρώμιο συγκεκριμένα σχηματίζει επιφανειακό στρώμα οξειδίου, το οποίο προστατεύει την επιφάνεια του χάλυβα (παθητικοποίηση επιφανείας).

Υπάρχουν πάνω από 60 κατηγορίες ποιότητας ανοξειδωτων χαλύβων.<sup>1</sup> Η επιλογή εξαρτάται από την απαιτούμενη κάθε φορά αντίσταση στη διάβρωση, τις αναγκαίες μηχανικές αντοχές και οπωσδήποτε το κόστος.

Κατατάσσονται σε τέσσερις βασικούς τύπους ανάλογα με τη μικρογραφική τους δομή :

- Μαρτενσιτικοί (π.χ. AISI 410, AISI 431)
- Φερριτικοί (π.χ. AISI 430, AISI 446)
- Ωστενιτικοί (AISI 304, AISI 316)
- Ειδικά κράματα (χάλυβες DUPLEX, Inco Alloys, νέοι τύποι φερριτικών, μαρτενσιτικών, ωστενιτικών χαλύβων κλπ.)

Ως χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος χρησιμοποιούνται συνήθως οι ωστενιτικοί AISI 304, AISI 316 που χουν ενδεικτικές συνθέσεις όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί. Γενικά έχουν μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα(C), αλλά και σε θείο(S) και φωσφόρο(P), ενώ περιέχουν χρώμιο(Cr) και νικέλιο(Ni),γι αυτό και αναφέρονται και ως χρωμιονικελιούχοι και ενδεχομένως μολυβδένιο (Mo),σε σχετικά χαμηλές περιεκτικότητες για βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Γενικά, ο AISI 316 έχει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον (αντοχή σε προσβολή σε περιβάλλον χλωριόντων).<sup>2</sup>

Στοιχείο	Περιεκτικότητα % κ.β. Κατηγορίες	
	AISI 304	AISI 316
C	<0.08	<0.08
Si	<1	<1
Mn	<2	<2
Ni	8-12	10-14
Cr	18-20	16-18
Mo	(----)	2-3
S	<0.03	<0.03
P	<0.045	<0.045

Πίνακας 1: Χημική σύσταση ωστενιτικών χαλύβων AISI 304 και AISI 316 <sup>2</sup>

## ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

### Γενικά

Έχουν καλή εργασιμότητα, καλή διαμορφωσιμότητα εν ψυχρώ και εν θερμώ και υψηλό συντελεστή ενδοτράχυνσης (ενδοτράχυνση είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο ένα μέταλλο, που υφίσταται ψυχρή πλαστική καταπόνηση, εμφανίζει αυξανόμενη αντίσταση σε περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση). Τα εν ψυχρώ κατεργασμένα μέταλλα που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση παρουσιάζουν αύξηση σκληρότητας, ορίου διαρροής, εφελκυστικής αντοχής και μείωση της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας (η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την αστοχία του υλικού και το μέτρο της αποδίδεται από το εμβαδόν της καμπύλης του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων). Ανεξαρτήτως του τρόπου κατεργασίας τους, έχουν υψηλή αντιδιαβρωτική αντίσταση, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες που για τους κοινούς χάλυβες θεωρούνται καταστροφικές (>600 -1000°C) , συνεπώς και μεγάλη αντοχή σε φωτιά. Επίσης έχουν εξαιρετική συμπεριφορά σε ακραίες χαμηλές θερμοκρασίες (έως και -100°C) και μεγαλύτερη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης (σε εν ψυχρώ διαμορφωμένους χάλυβες) καθώς και μικρότερο ποσοστό μείωσης της εν θερμώ αντοχής σε θερμοκρασίες μέχρι 550 σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες.

Ωστόσο, οι ωστενιτικοί είναι χάλυβες ευαίσθητοι στη διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion) σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα αλογονούχων ιόντων, κυρίως χλωριόντων, αλλά σε λιγότερο βαθμό από τους υπόλοιπους (ειδικά οι περιέχοντες υψηλό ποσοστό Ni και Mb) <sup>(2,3)</sup> . Τέλος, οι απαιτήσεις για τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά είναι ίδιες με εκείνες των κοινών χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και διατίθενται με ή χωρίς νευρώσεις (λείοι).<sup>2</sup>

### Ιδιότητες σε εφελκυσμό

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, ανεξαρτήτως χημικής σύνθεσης. Οι ιδιότητες σε εφελκυσμό των χαλύβων αυτών δίνονται στους ακόλουθους πίνακες, σύμφωνα με το υπό επεξεργασία Ευρωπαϊκό Πρότυπο XP A 35-014(E) (Πίνακας 2) και τον Βρετανικό Κανονισμό BS 6744:2001 αντίστοιχα (Πίνακας 3).

Steel grade	0.2% proof strength $R_{p0.2}$ (MPa)		Ratio $R_m/R_{p0.2}$		Total elongation at maximum force, $A_{gt}$ (%)	
	Fractile Value	Minimum Value	Fractile Value	Minimum Value	Fractile Value	Minimum Value
InE235	235	220	1.15	1.12	8	7
InE500	500	475	1.10	1.08	5	4
InE650	650	625	1.10	1.08	5	4
InE800	800	775	1.10	1.08	5	4

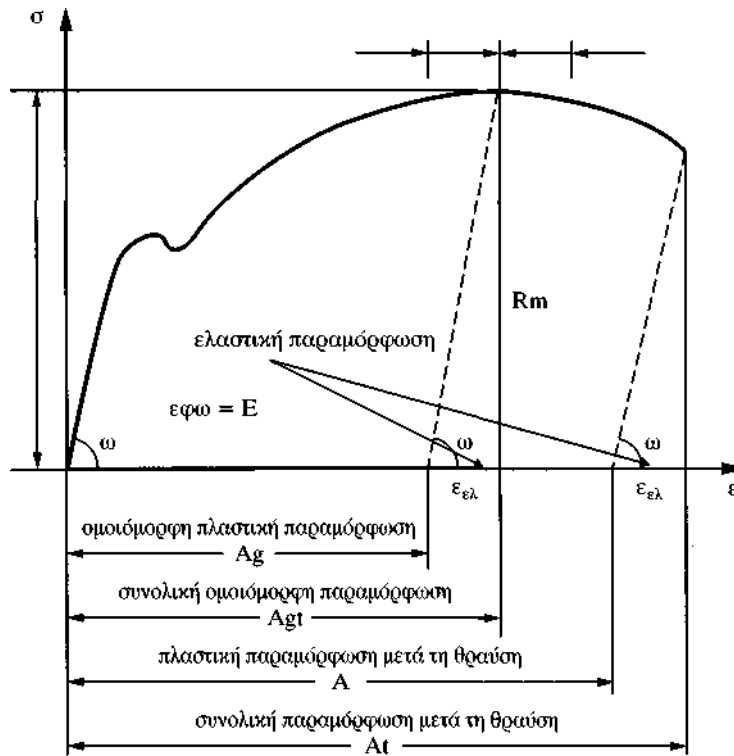
Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό. Ευρωπαϊκό Πρότυπο XP A 35-014(E).

Grade	0.2%proof strength, $R_{p0.2}$ (Mpa)	Stress Ratio, $R_m/R_{p0.2}$ (min)	Elongation at fracture, $A_5$ (min) %	Total elongation at maximum force, $A_{gt}$ (min) %
200	200	1.10	22	5
500	500	1.10	14	5
650	650	1.10	14	5

Πίνακας 3: Μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό. Βρετανικός Κανονισμός BS 6744:2001.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού ράβδων ανοξείδωτου χάλυβα με νευρώσεις της Ιταλικής Χαλυβουργίας Valbruna Stainless Steel (Εικόνα 2) που πραγματοποιήθηκαν στο ΚΕΔΕ από την Ε. Δικ. Δημακαράκου κατά την εκπόνηση της διπλωματικής της εργασίας υπό την επίβλεψη του καθ. Γ. Δ. Παπαδημητρίου της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες AISI 304 και διαμέτρου Φ10 και Φ14 και ανοξείδωτος ωστενιτικός χάλυβας AISI 316 και διαμέτρου Φ8. Σημειώνεται ότι οι συγκεκριμένες ράβδοι παράγονται ως εξής : αρχικά η ράβδος είναι λεία και κυλινδρική και στη συνέχεια οδηγούνται σε έλαστρο όπου καταπονείται τριαξονικά σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις νευρώσεις. Έτσι, υπάρχει ανομοιομορφία υλικού, γεγονός μη επιθυμητό για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Παρεμβάλλεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων με την επεξήγηση των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν (Σχήμα 1).

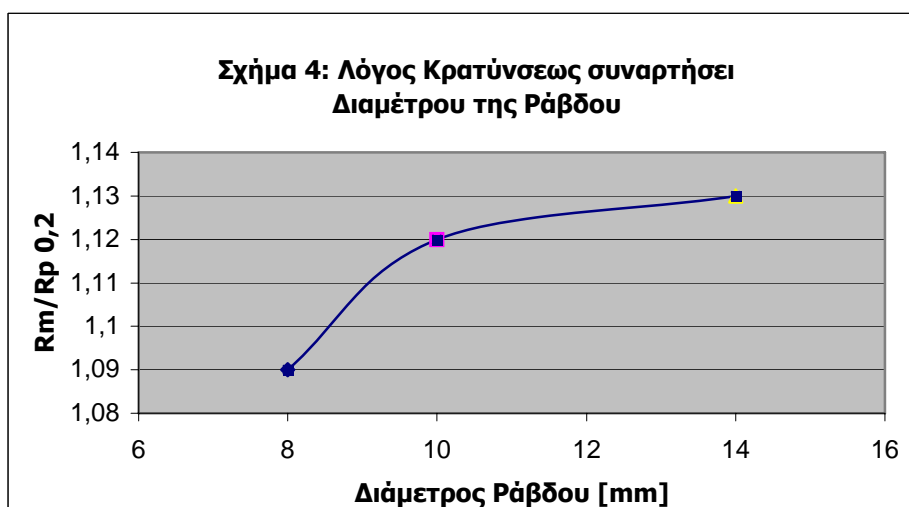
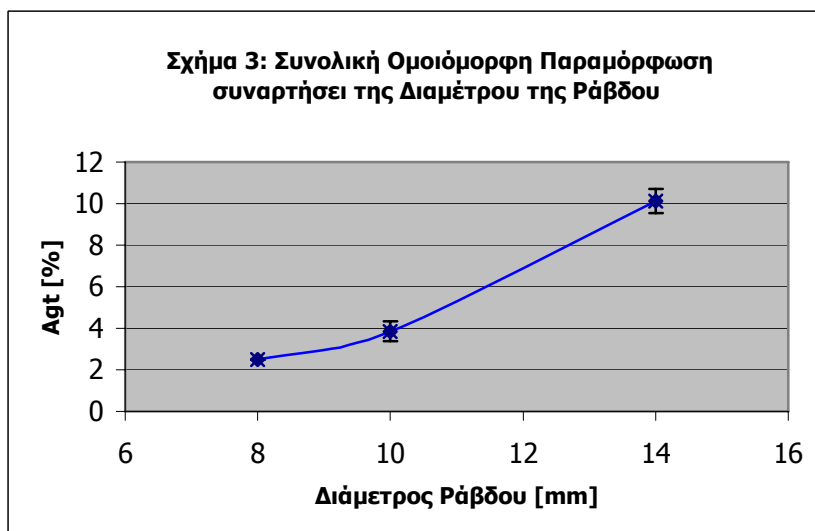
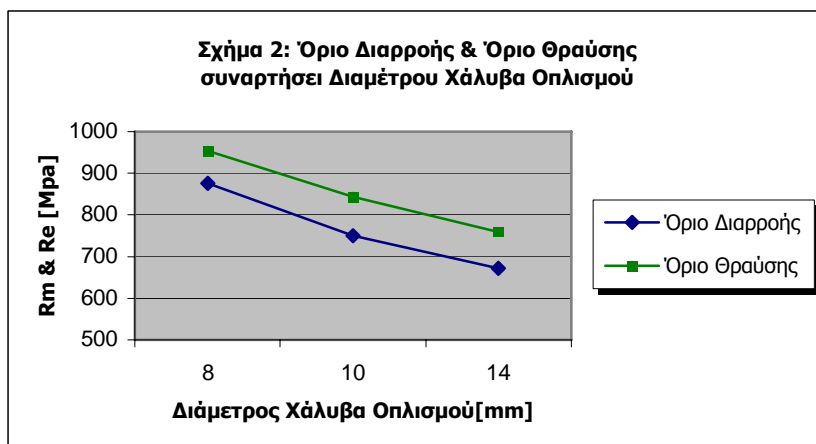


Σχήμα 1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων.<sup>3</sup>

Το όριο διαρροής ( $R_e$  ή  $f_y$ ) στην περίπτωση χαλύβων οπλισμού ψυχρής όγκης ή ψυχρής έλασης όπως και οι χάλυβες μας, δεν είναι ορατό. Σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζεται το συμβατικό όριο διαρροής  $R_{p0,2}$ , δηλαδή η τάση που αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση 0,2%. Η εφελκυστική αντοχή  $f_t$  συμβολίζεται ως  $R_m$ .

Πίνακας 4: Σύγκριση Μηχανικών ιδιοτήτων διεθνών προτύπων και των Μαρτύρων Φ8, Φ10 & Φ14					
Κανονισμός	Ονομασία Κατηγορίας	Διάμετρος Οπλισμού [mm]	Όριο Διαρροής [Mpa]	Rm/Re	Agt
ΕΛΟΤ 1421 [Κοινά Χάλυβες]	B500A	≥6	≥500	≥1,05	≥2,5
	B500C	6-40	≥500	≥1,15 ≤1,35	≥7,5
ASTM (Η.Π.Α)	300/420/520	9-16	300/420/520 0min		
UNE 36-067(EU)	B500 T/B600T		500/600min	1,10min	
DIN (Γερμανικός)	Bst 500 S/Bst 500 M		500min		
ANFOR A35 – 016 (Γαλλικός)	FeE500-2/FeE500-3		500 min	1,03/1,08 min	2,5/5,0 min
BS (Βρετανικός)	500/650		500/650 min	1,10 min	5 min
Φ8		8	875,88±2,74	1,09	2,5
Φ10		10	750,43±6,30	1,12	3,86
Φ14		14	671,98±30,9	1,13	10,134

Στον Πίνακα 4 έχει γίνει προσπάθεια κατηγοριοποίησης και σύγκρισης των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν, με τα διεθνή πρότυπα για τους ανοξείδωτους και του ΕΛΟΤ 1421 για τους κοινούς.

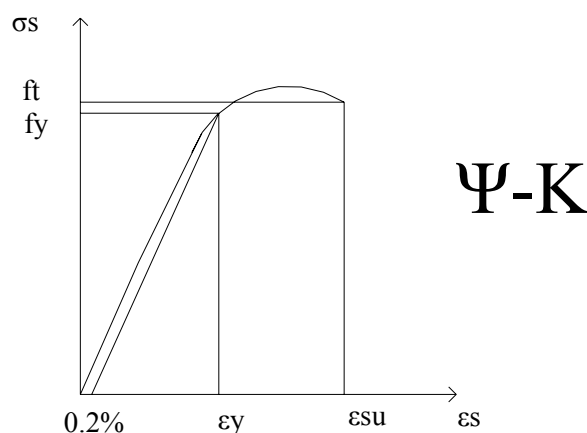


## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Η μικρότερη διάμετρος Φ8 έχει και το υψηλότερο όριο διαρροής και θραύσης (Σχήμα 2).
- Η συνολική ομοιόμορφη παραμόρφωση Agt [%] αυξάνεται όσο αυξάνεται και η διάμετρος της ράβδου (Σχήμα 3).
- Ο λόγος κράτυνσης μεγαλώνει όσο μεγαλύτερη είναι και η διάμετρος της ράβδου (ραγδαία αύξηση από Φ8 σε Φ14!! ,Σχήμα 4).
- Η σκλήρυνση με ενδοτράχυνση που έχουν υποστεί τα δοκίμια είναι εντονότερη στις μικρότερες διαμέτρους (μεγάλος βαθμός ενδοτράχυνσης).
- Η ράβδος Φ14 πληρεί το εύρος τιμών και ανήκει κατά BS στην κατηγορία 650 και κατά ΕΛΟΤ στη B500A.
- Η ολκιμότητα είναι χαμηλή ως οριακά αποδεκτή με βάση τους κανονισμούς (δηλ. χαμηλές τιμές  $R_m / R_e$  και Agt) και συγκεκριμένα είναι μη αποδεκτές οι ράβδοι διαμέτρου μικρότερης των 10mm. Ενώ είναι αποδεκτές από Φ14 και πάνω.

\*Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά των Agt που προέκυψαν από άλλες τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία <sup>(1,5)</sup>. Οι τιμές εκεί ήταν μεγαλύτερες (15-23), γεγονός ενδεχομένως οφειλόμενο στην ύπαρξη αρχικής παραμόρφωσης (λόγω ενδοτράχυνσης) η οποία δε λήφθηκε υπόψη.

\*Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης θα είναι το χαρακτηριστικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για τους χάλυβες που έχουν υποστεί εν ψυχρώ κατεργασία (Σχήμα 5). Σε ένα τέτοιο διάγραμμα παρατηρείται αυξημένη αντοχή, μικρή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα, μείωση του εμβαδού του διαγράμματος (απορροφώμενη ενέργεια) σε σχέση με το συμβατικό χάλυβα και απώλεια του χαρακτηριστικού πλατό (όπως αναμενόταν λόγω ενδοτράχυνσης).



Σχήμα 5: Χαρακτηριστικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για εν ψυχρώ κατεργασμένους χάλυβες.<sup>6</sup>



Εικόνα 2: Μακροσκοπική Παρατήρηση δοκιμής εφελκυσμού σε ράβδο Φ14. Δημιουργία μικρού λαιμού (αριστερά), περιοχή θραύσης (δεξιά).<sup>3</sup>

### Συγκολλησιμότητα

Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες είναι εύκολα συγκολλησιμοι σε αντίθεση με τους άλλους και τις περισσότερες φορές συγκολλούνται με ηλεκτρόδιο της ίδιας χημικής σύνθεσης (Πίνακας 5). Οι τεχνικές συγκόλλησης είναι ίδιες με αυτές των ανθρακούχων.<sup>2</sup>

Κατηγορία	Περιεκτικότητα %κ.β.								Ηλεκτρόδιο
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Άλλα Στοιχεία	
<b>304</b>	0,08	2	1	18-20	8-10,5	0,045	0,03		308
<b>304L</b>	0,03	2	1	18-20	8-12	0,045	0,03		308L
<b>308</b>	0,08	2	1	17-19	10,5-13	0,045	0,03		308
<b>316</b>	0,08	2	1	16-18	10-14	0,045	0,03	Mo 2÷3	316
<b>316L</b>	0,03	2	1	16-18	10-14	0,045	0,03	Mo 2÷3	316L
<b>316Ti</b>	0,08	2	1	16-18	10-14	0,045	0,03	5x%(C+N)min ως 0,70 max Ti 2-3 Mo,0,10N	318
<b>316 Cb ή Nb</b>	0,08	2	1	16-18	10-14	0,045	0,03	10x%C min ως 1,10 maxNb= Ta 2-3 Mo,0,10N	318
<b>321</b>	0,08	2	1	17-19	9-12	0,045	0,03	5%C min Ti	321
<b>347</b>	0,08	2	1	17-19	9-12	0,045	0,03	10x%C min Nb	347

Πίνακας 5: Χημική σύνθεση συνήθων ωστενιτικών χάλυβων και κατάλληλων για τη συγκόλλησή τους ηλεκτροδίων.<sup>2</sup>

Οι 304, 308, 316 εμφανίζουν κατά τη συγκόλληση το πρόβλημα της θερμικής ευαισθητοποίησης (thermal sensitization), δηλαδή μείωση της αντοχής τους στη διάβρωση γύρω από τη συγκόλληση (αποσάθρωση υλικού). Οι 304L και 316L δεν παρουσιάζουν το πρόβλημα αυτό λόγω της πολύ χαμηλής τους περιεκτικότητας σε άνθρακα. Η δέσμευση του άνθρακα μπορεί να επιτευχθεί με ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία, τιτάνιο(Ti), νιόβιο(Nb) Ta, όπως στις κατηγορίες 316Ti, 316Nb, 321, 347.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η θερμή ρηγματώση (hot shortness, hot cracking, μικρή αντοχή του ημιστερεοποιημένου μετάλλου στη ραφή) που εκδηλώνεται σε μια συνήθως ορατή εξωτερική ρωγμή κατά μήκος της συγκόλλησης. Αντιμετωπίζεται με χρήση ηλεκτροδίου που δίνει μικρή ποσότητα φερρίτη μαζί με τον ωστενίτη, μειώνοντας όμως σε ένα μικρό βαθμό την αντοχή σε διάβρωση της συγκόλλησης.



Οι περιοχές συγκόλλησης ενδέχεται να υποστούν διάβρωση με βελονισμό (pitting) εξαιτίας ανομοιομορφίας του υλικού, πράγμα ανεπιθύμητο διότι οι βελονισμοί είναι σημεία συγκέντρωσης τάσεων και διευκολύνουν τη δημιουργία ρηγμάτων.<sup>2</sup>

<b>Πίνακας 6: Δοκιμές Εφελκυσμού Συγκολλημένων κατά Παράθεση Ράβδων Φ10</b>					
<b>Δοκίμιο</b>	<b>Όριο Διαρροής 0,2% [MPa]</b>	<b>Όριο Θραύσης [MPa]</b>	<b>Rm/Rp 0,2</b>	<b>Agt [%]</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
<b>I10WP_1</b>	791.47	868.49	1.10	5,47	Θραύση κοντά στη Συγκόλληση
<b>I10WP_2</b>	789.28	854.50	1.08	2.29	Θραύση μακριά από τη Συγκόλληση
<b>I10WP_3</b>	740.62	848.82	1.15	2.31	Θραύση κοντά στη Συγκόλληση
<b>M. O. I10WP</b>	773,79 ±24,74	857,27 ±10,12	1,11 ±0,030	3,35 ±1,83	Συγκόλληση
<b>M. O. I10</b>	750,43 ±06,30	842,96 ±02,60	1,12 ±0,007	3,86 ±0,48	Μάρτυρας

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού που έγινε σε συγκολλημένες κατά παράθεση ράβδους Φ10. Παρατηρούμε ότι η συγκόλληση δε μείωσε την αντοχή του υλικού, έδωσε ανομοιόμορφα αποτελέσματα ως προς το Agt και Rm/Rp0,2

<b>Πίνακας 7: Δοκιμές Εφελκυσμού Συγκολλημένων κατά Παράθεση Ράβδων Φ14</b>					
	<b>Όριο Διαρροής 0,2% [MPa]</b>	<b>Όριο Θραύσης [MPa]</b>	<b>Rm/Rp 0,2</b>	<b>Agt [%]</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
<b>I14WP_1</b>	641.08	716.21	1.03	6.96	Θραύση μακριά από τη Συγκόλληση
<b>I14_2WP</b>	652.39	721.72	1.00	1.38	
<b>I14_3WP</b>	765.56	767.87	1.00	4.47	
<b>I14_4WP</b>	686.61	767.90	1.03	7.38	
<b>I14_5WP</b>	672.06	770.84	1.02	6.20	
<b>M.O. I14WP</b>	683,54 ±49,09	748,90 ±27,4	1,01 ±0,01	05,30 ±2,44	
<b>M.O. I14 (μάρτυρας)</b>	671,98 ±30,90	759,69 ±33,2	1,13 ±0,02	10,13 ±0,58	

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού που έγινε σε συγκολλημένες κατά παράθεση ράβδους Φ14 (Εικόνα 3). Παρατηρούμε ότι η συγκόλληση επηρέασε την αντοχή του υλικού κατά πολύ μικρό ποσοστό. Έδωσε ανομοιόμορφα αποτελέσματα ως προς το Agt και Rm/Rp0,2, μεγάλη διασπορά τιμών και ανεπαρκής πλαστιμότητα (Agt μικρότερα του μάρτυρα).

**Πίνακας 8: Δοκιμές Εφελκυσμού Συγκολλημένων κατά Μέτωπον**

	<b>Δοκιμές Όριο Διαρροής 0,2% [MPa]</b>	<b>Όριο Θραύσης [MPa]</b>	<b>Rm/Rp 0,2</b>	<b>Agt [%]</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
<b>I14WM_1</b>	313.93	591.54	1.88	5.57	
<b>I14WM_2</b>	-	541.68	-	0.01	
<b>I14WM_3</b>	318.48	619.76	1.95	7.54	
<b>I14WM_4</b>	290.80	606.31	2.08	9.12	Θραύση στην Συγκόλληση
<b>I14WM_5</b>	309.77	550.02	1.78	4.31	
<b>M.O. I14 WM</b>	308,24 ±12,16	581,86 ±34,48	1,92 ±0,12	06,63 ±2,12	
<b>M.O. I14</b>	671,98 ±30,90	759,69 ±33,20	1,13 ±0,02	10,13 ±0,58	

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού που έγινε σε συγκολλημένες κατά μέτωπον ράβδους Φ14. Από τις δοκιμές εφελκυσμού διαπιστώνουμε ότι οι όλες μετωπικές συγκολλήσεις αστόχησαν. Η αντοχή είναι αισθητά μειωμένη σε σχέση με αυτή του μάρτυρα. Το ίδιο και η ολκιμότητα, όπου έχουμε και μεγάλη διασπορά τιμών.



Εικόνα 3: Μακροσκοπική Παρατήρηση Συγκόλλησης κατά Παράθεση Ράβδου Φ14 (θραύση μακριά από τη συγκόλληση)<sup>3</sup>

## ΑΛΛΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

### Γαλβανικά Φαινόμενα

Σε περιπτώσεις όπου ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον κοινό χάλυβα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σημειακή διάβρωση γαλβανικού τύπου (εντονότερη στον ανοξείδωτο, Εικόνα 4). Έτσι, θα πρέπει να αποφεύγονται οι προσεγγίσεις ή η επαφή διαφόρων τύπων χαλύβων. Ιδιαίτερα ευπαθείς σε τέτοιου είδους διάβρωση, είναι οι περιοχές των συγκολλήσεων, για αυτό πρέπει να αποφεύγονται.

Αν η επαφή είναι αναγκαία, πρέπει να εξασφαλίζεται "ηλεκτρική μόνωση" μεταξύ των υλικών με χρήση "μονωτικών υλικών" (π.χ. ρητίνες) ή μεγαλώνοντας το πάχος του παρεμβαλλόμενου σκυροδέματος.<sup>2</sup>

Παρόλα αυτά, αν ο κοινός χάλυβας δεν έχει υποστεί αποπαθητικοποίηση, δε θα διαβρωθεί από την επαφή του με τον ανοξείδωτο. Επιπλέον, αν η επιφάνεια του κοινού είναι μεγάλη συγκριτικά με αυτήν του ανοξείδωτου, τα γαλβανικά φαινόμενα είναι ασήμαντα.<sup>5</sup>

Άλλωστε, ο κίνδυνος διάβρωσης λόγω επαφής είναι λιγότερο σημαντικός από ότι όταν έχουμε μόνο κοινό χάλυβα.<sup>7</sup>



Εικόνα 4: Ανοξειδωτή ράβδος με εμφανή σκουριά μετά από επαφή με κοινό, ανθρακούχο χάλυβα και αφού αυτός έχει πλέον απομακρυνθεί.<sup>8</sup>

Να σημειωθεί ότι η αυξημένη ανθεκτικότητα των ανοξειδωτων χαλύβων **δεν** επιτρέπει μείωση του απαιτούμενου πάχους επικάλυψης των οπλισμών.<sup>2</sup>

#### Μη μαγνήτιση ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων

Οι ωστενιτικοί χάλυβες δεν μαγνητίζονται. Κάποιες φορές η ιδιότητά τους αυτή χρησιμοποιείται ως κριτήριο διαχωρισμού από τους υπόλοιπους (φερριτικούς, μαρτενσιτικούς και κοινούς χάλυβες). Μετά από ειδική κατεργασία είναι δυνατόν να εμφανιστεί και σε αυτούς μαγνήτιση, η οποία και μπορεί να αποτελέσει μέτρο εκτίμησης του βαθμού παραμόρφωσης του υλικού με ψυχρή κατεργασία.<sup>2</sup> Ως μη μαγνητικά προϊόντα μπορούν να φανούν χρήσιμα σε κάποιες ειδικές κατασκευές όπως αεροδρόμια, τράπεζες, νοσοκομεία.<sup>4</sup>

## **ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ**

Η επιλογή κατάλληλης κατηγορίας βάσει της επιθυμητής αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς κάθε φορά προσδιορίζεται ενίοτε με τη χρήση εμπειρικών τύπων. Μπορεί όμως να εκτιμηθεί και αθροίζοντας τα παρακάτω μεγέθη:

- την % περιεκτικότητα σε C1 πολλαπλασιασμένη με 1,
- την % περιεκτικότητα σε Ni πολλαπλασιασμένη με 16,
- την % περιεκτικότητα σε Mo πολλαπλασιασμένη με 3.3<sup>2</sup>

## **ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ**

Στην Ελλάδα δεν παράγεται ανοξειδωτος χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος παρά μόνο εισάγεται (και μάλιστα από μεμονωμένες εταιρίες<sup>(4,9)</sup>). Είναι δαπανηροί γιατί απαιτείται για την παραγωγή τους υψηλή ποιότητα και καθαρότητα πρωτογενούς χάλυβα για την αποφυγή του φαινομένου της θερμικής ευαισθητοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι 1kg κοινού χάλυβα κοστίζει περίπου 0,50 € ενώ 1kg ανοξειδωτου τουλάχιστον 6 €, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9 στον οποίο παρουσιάζεται κατάλογος τιμών για ανοξειδωτο χάλυβα AISI 304 που διατίθεται στην Ελλάδα.<sup>9</sup>

Διατομή	Ευρώ/χγρ	Χγρ/μμ	Διαστάσεις σε χιλ	Ημερ. παράδοσης
Φ1,2(λείο)	10,00€	0,009	σύρμα πρόσδεσης	άμεση, σε στοκ
Φ2,2(λείο)	8,00€	0,030	σύρμα πρόσδεσης	άμεση, σε στοκ
Φ3	8,00€	0,056	6,000 έως 7,000	15 ημέρες
Φ4	7,00€	0,100	6,000 έως 7,000	άμεση σε στοκ
Φ5	6,50€	0,156	6,000 έως 7,000	15 ημέρες
Φ6	6,30€	0,225	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ8	6,00€	0,400	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ10	6,00€	0,624	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ12	6,00€	0,899	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ14	6,00€	1,224	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ16	5,90€	1,598	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ18	5,90€	2,023	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ20	5,90€	2,498	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
Φ25	6,00€	3,902	6,000 έως 7,000	άμεση, σε στοκ
ποιότητα 316L βαρύτερο κατά		1,26%		

Πίνακας 9: Χάλυβας INOX με νευρώσεις – Ποιότητα AISI 304<sup>9</sup>

Το επιπλέον κόστος εξαρτάται από τον τύπο και την ποσότητα του ανοξείδωτου χάλυβα καθώς και από τον τύπο της εφαρμογής.<sup>10</sup> Εν τούτοις, τεχνοοικονομικές αναλύσεις για μεγάλο αριθμό μελετών που χουν εκπονηθεί σε Β.Αμερική και ευρωπαϊκές χώρες (π.χ. Ελβετία)<sup>10</sup>, απέδειξαν ότι η χρήση σπλισμού ανοξείδωτου χάλυβα είναι μια ενδιαφέρουσα, από οικονομικής άποψης, λύση αν η βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους συντήρησης είναι επιθυμητή. Προέκυψε δηλαδή ότι η χρήση ανοξείδωτου κατά τη φάση του σχεδιασμού των έργων είναι οικονομικότερη των πολυέξοδων διαδικασιών επιθεώρησης, παρακολούθησης, συντήρησης και επισκευής αφού προσδίδει ανθεκτικότητα στο χρόνο και εξοικονόμηση υλικού (συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος).<sup>(4,10)</sup>

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την παραλαβή των μετεόβερων στο εργοτάξιο. Πρέπει να έχουν την ετικέτα της χαλυβουργίας παραγωγής, η οποία και πρέπει να είναι πιστοποιημένη κατά τα πρότυπα της χώρας προέλευσης της. Απαραίτητη είναι και η αναγραφή του τύπου και του ονόματος του χάλυβα, της χημικής του σύστασης, των μηχανικών του ιδιοτήτων και των τεχνικών του χαρακτηριστικών.

Το χρώμα της επιφάνειάς τους δεν είναι πάντα το ίδιο. Μπορεί να είναι ομοιόμορφο γκρι-ασημί, αρκετά λαμπερό ή μουντό. Αν ο χάλυβας δεν είναι γκριζός αλλά ξεθωριασμένος ή έχει ανωμαλίες στην επιφάνειά του ίσως κάτι να έχει πάει στραβά κατά την παραγωγή και διαμόρφωση του, γεγονός που τον κάνει μη αποδεκτό.<sup>8</sup> Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα αποδεκτών και μη επιφανειών.

Κατά τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους δεν πρέπει να τοποθετούνται κοντά σε ράβδους από συμβατικό χάλυβα προς αποφυγήν γαλβανικών φαινομένων. Τέλος, παρότι ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι εύκολα αναδιπλούμενος καλό θα ήταν να μην αποθηκεύεται ως κουλούρα γιατί η χρήση λάθος εξοπλισμού ευθυγράμμισης μπορεί να επιφέρει μείωση της διαβρωτικής αντοχής του.<sup>8</sup>



Εικόνα 5: Ενδεικτικά παραδείγματα αποδεκτών και μη επιφανειών.<sup>8</sup>

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι πολύ καλό και μόνιμο αντιοξειδωτικό μέτρο εξασφαλίζοντας μεγάλη διάρκεια ζωής στις κατασκευές.
- Οι εν ψυχρώ κατεργασμένοι και έντονα ενδοτραχυμένοι χάλυβες (όπως αυτοί που διατίθενται) έχουν υψηλό όριο διαρροής και θραύσης ενώ χαμηλή ως οριακά αποδεκτή ολκιμότητα. Επομένως οι φορείς στους οποίους χρησιμοποιείται παρουσιάζουν χαμηλή πλαστιμότητα και δεν ενδείκνυται για κατασκευές σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας, όπως στη χώρα μας. Η παρατήρηση αυτή αντιτίθεται σε όσα αναφέρονται από ορισμένες εταιρείες.<sup>(1,4)</sup>
- Όσο μικρότερη είναι η ράβδος τόσο μικρότερη ολκιμότητα έχει ,έτσι οι διάμετροι κάτω των 10mm δεν είναι αποδεκτές με βάση τα διεθνή πρότυπα.
- Είναι γενικά συγκολλησιμοι. Οι κατά παράθεση συγκολλήσεις έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την αντοχή σε σχέση με τις μετωπικές όπου η μείωση της αντοχής ήταν αισθητή(γεγονός που οφείλεται και στη χρήση μικρών διαμέτρων, κάτω των 20mm). Και στις δυο περιπτώσεις όμως η πλαστιμότητα ήταν ανεπαρκής. Έτσι καλό είναι οι συγκολλήσεις να αποφεύγονται ή να εξετάζονται κατά περίπτωση, τουλάχιστον μέχρις ότου υπάρξουν μελέτες μακροχρόνιας συμπεριφοράς.<sup>1</sup>
- Εξαιτίας του υψηλού τους κόστους συνιστώνται σε μεγάλης διάρκειας ζωής κατασκευές (π.χ. γέφυρες) και σε περιβάλλοντα όπου η χρήση κοινού χάλυβα μακροχρόνια θα κοστίσει περισσότερο λόγω συντήρησης και επισκευής. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε μικρότερες κατασκευές(π.χ. κατοικίες, στα εξωτερικά τους μέλη, μπαλκόνια, εξωτερικά υποστυλώματα και δοκοί) σε συνδυασμό με τον κοινό χάλυβα και αφού ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας έναντι των γαλβανικών φαινομένων.
- Τέλος, εξαιτίας αβεβαιοτήτων (τρόπος παραγωγής, μεταφορά, αποθήκευση, επαφή με κοινό χάλυβα, συγκολλήσεις) καλό θα ήταν να γίνεται εκτεταμένος έλεγχος των ράβδων στο εργοτάξιο.<sup>12</sup>

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π. Μαυροειδής, Ε. Ρακαντά, Γ. Μπατής, **Ανοξειδωτοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: Μηχανικές Ιδιότητες και συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση**, 15<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος-Αλεξανδρούπολη 2006.
2. **Πληροφοριακό Παράρτημα του υπό επεξεργασία Ελληνικού Κανονισμού για τους ανοξειδωτους χάλυβες.**
3. Ε. Δ. Δημακαράκου, **Συγκολλήσεις Δομικών Πλεγμάτων και Οπλισμού Σκυροδέματος από Ανοξειδωτο Χάλυβα**, Διπλωματική Εργασία υπό την καθοδήγηση του καθηγητή Γ. Δ. Παπαδημητρίου της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.
4. <http://www.steelcenter.gr/tbl121.php?lang=gr>
5. D.J.Cochrane. **Efficient use of stainless steel-Reinforcement for bridge structures**, Infrastructure Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life through better Construction-A Vision for the Next Millenium-Proceedings of International Conference held at the University of Sheffield, p.497-505.
6. Κ. Γ. Τρέζος, **Απαιτήσεις από τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος και επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες**, Τεχνικές Ημερίδες Χαλυβουργικής, Πάτρα, Νοέμβριος 2006, σελ.11.
7. **Stainless Steel Reinforcement-A Survey**.Ulf Nurnberger.Otto-Graf-Journal Vol.16,2005, p 111-138. ([www.mpa.uni-stuttgart.de](http://www.mpa.uni-stuttgart.de))
8. <http://www.mto.gov.on.ca/english/pubs/research/stainless/stainless.htm>
9. [info@moatsos.com](mailto:info@moatsos.com)
10. Dr.F.Hunkeler, **Use of stainless steel rebars for reinforced concrete structures**, Technische Forschung und Beratung fur Zement und Beton(TFB),CH-5103 Wildegg,Switzerland.([www.tfb.ch](http://www.tfb.ch))
11. <http://www.valbruna-stainless-steel.com>
12. **Προσωπική επαφή** με Σ. Μουγιάκο, Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.