

## 2.3 ΘΕΜΑΤΑ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ/ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ

### 2.3.1 Γενικά

Μέρος των επεμβάσεων αποτελούν οι συνδέσεις παλαιών και νέων ράβδων οπλισμού οι οποίες και αποτελούν συχνή πρακτική στις ενισχύσεις των κατασκευών. Για τις συνδέσεις παλαιών και νέων ράβδων οπλισμού, μία από τις πρακτικές που εφαρμόζονται είναι η συγκόλληση, η οποία τα τελευταία χρόνια υιοθετείται ολοένα και περισσότερο λόγω της ευελιξίας της και της αποτελεσματικότητας της, έχει δε υιοθετηθεί από όλους τους εν χρήσει κανονισμούς.

Προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η χρησιμότητα της συγκόλλησης κατά την διάρκεια επισκευών σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, παρουσιάζονται παρακάτω συνοπτικά, συγκεκριμένα παραδείγματα:

#### α) Τοπικές αποκαταστάσεις ίσης διατομής

Επεμβάσεις με καθαίρεση και αποκατάσταση ίσης διατομής εφαρμόζονται όταν οι βλάβες είναι σοβαρές, όταν δηλαδή εμφανίζεται αποδιοργάνωση του σκυροδέματος ή διάρρηξη που ακολουθείται από άνοιγμα ή διάρρηξη των συνδετήρων και λυγισμό των διαμήκων ράβδων. Συχνά μετά από μία επισκευή τέτοιου είδους ακολουθεί η ενίσχυση με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

Μεταξύ των ενεργειών που απαιτούνται, είναι το κόψιμο των τμημάτων των διαμήκων ράβδων που έχουν λυγίσει και η ηλεκτροσυγκόλληση νέων τμημάτων διαμήκων ράβδων.

#### β) Ενισχύσεις υποστυλωμάτων

Η τεχνική της κατασκευής μανδυνών σε υποστυλώματα Ο.Σ. είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος εφόσον απαιτείται αύξηση της πλαστιμότητας του φορέα, αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος (Dritsos et al, 1997, 1998a, 1998b, Dritsos and Georgakopoulou 1999), αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και όταν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των κατακόρυφων οπλισμών στην περιοχή υπερκάλυψης τους.

Κατά την κατασκευή μανδυνών προβλέπεται η τοποθέτηση και η συγκόλληση χαλύβδινων παρεμβλημάτων σύνδεσης των παλαιών και νέων οπλισμών (αναρτήσεις).

Επίσης, στην περίπτωση που επιβάλλεται μικρό πάχος μανδύα πρέπει τα άκρα των συνδετήρων να συγκολλώνται σε εναλλασσόμενες πλευρές του υποστυλώματος.

#### γ) Επισκευές - ενισχύσεις τοιχωμάτων

Η επισκευή ή ενίσχυση των τοιχωμάτων μιας κατασκευής αποτελεί συνήθη ανάγκη στον αντισεισμικό ανασχεδιασμό και οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αντίστοιχες αυτών για τα υποστυλώματα.

Και στην περίπτωση αυτή συγκολλούνται οι αναρτήρες και οι συνδετήρες όπου αυτό κρίνεται σκόπιμο.

δ) Επισκευές-ενισχύσεις πλακών, δοκών και κόμβων δοκών- υποστυλωμάτων  
Για τις επισκευές πλακών, δοκών ή κόμβων σε περίπτωση σοβαρών βλαβών χρησιμοποιείται η τεχνική της αποκατάστασης ίσης διατομής, όπως και στην περίπτωση των υποστυλωμάτων.

Στην πράξη, ανάλογα με την απόσταση των ράβδων χρησιμοποιούνται δύο τύποι συνδέσμων: α) οι "δύσκαμπτοι" και β) οι "εύκαμπτοι" (CEB Bul.162, 1983).

Στην πρώτη περίπτωση, λέμε ότι η συγκόλληση γίνεται με λωρίδες ή με άλλα δομικά στοιχεία ενώ στην δεύτερη περίπτωση πρόκειται για συγκόλληση με επικάλυψη (ή με παράθεση). Η συγκόλληση και στις δύο περιπτώσεις γίνεται με επικάλυψη (ή με παράθεση) μόνο που στην μία περίπτωση παρατίθεται ράβδος ενώ στην δεύτερη κάποιο άλλο δομικό στοιχείο (χάλυβα).

Από τα παραπάνω καθίσταται φανερό ότι η συγκόλληση αποτελεί χρήσιμο αν όχι αναγκαίο εργαλείο κατά την επισκευή κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η πλέον διαδεδομένη συγκόλληση στους χάλυβες οπλισμού κατά τις επισκευές είναι με παράθεση (ή επικάλυψη) που εφαρμόζεται στην συγκόλληση των αναρτήρων, των συνδετήρων και στην άμεση σύνδεση δύο ράβδων. Παρόλο που από τους κανονισμούς που αναφέρονται στις συγκολλήσεις των χαλύβων οπλισμού προβλέπονται και άλλου τύπου συνδέσεις, στην παρούσα φάση, δεν κρίνεται σκόπιμο να εξετασθούν παρά το γεγονός ότι θα μπορούσε σε ορισμένες περιπτώσεις ένα συγκεκριμένο είδος σύνδεσης να παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι κάποιου άλλου. Κρίνεται περισσότερο κρίσιμο σε πρώτο στάδιο να ελεγχθούν και να μελετηθούν επαρκώς οι περισσότερες διαδεδομένες σύνδεσεις που χρησιμοποιούνται στις εργασίες επισκευών.

Καταρχάς συνοψίζονται στοιχεία που αφορούν αποκλειστικά την τεχνολογία των συγκολλήσεων όπως προκύπτει από τα υπάρχοντα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Η επίδραση των συγκολλήσεων στους χάλυβες οπλισμού καθώς και άλλα ζητήματα συγκολλησιμότητας τους. Συγκεκριμένα προβλήματα που μπορεί να παρουσιάζονται σε ορισμένους χάλυβες οπλισμού μετά από βλάβες ή ζημιές εξετάζονται στην συνέχεια. Παράλληλα παρατίθεται η υπάρχουσα ερευνητική δραστηριότητα που έχει πραγματοποιηθεί για κάθε θέμα έτσι ώστε να διασαφηνιστεί το πεδίο μελλοντικής έρευνας.

### 2.3.2. Τεχνολογία Συγκολλήσεων Οπλισμού Σκυροδέματος

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι συγκολλησιμοι με διάφορους τύπους σύνδεσης (σταυρωτά, με επικάλυψη και μετωπικά) με διάφορες τεχνικές συγκόλλησης. Οι μέθοδοι συγκόλλησης καθώς και οι επιτρεπόμενες διαστάσεις των χαλύβων οπλισμού για κάθε τύπο σύνδεσης δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.3.1 (DIN-4099 1985).

Η τεχνική σύνδεσης με φλόγα οξυγόνου-ακετυλινίου ή άλλου μίγματος δεν επιτρέπεται να εφαρμόζεται στην περίπτωση σύνδεσης των ράβδων οπλισμού σκυροδέματος (ΕΛΟΤ-971 1994) λόγω των τοπικών υπερθερμάνσεων στις ράβδους που πρόκειται να συγκολληθούν και του κινδύνους εξανθράκωσης (καύσης του άνθρακα) των χαλύβων που έχει σαν αποτέλεσμα να αλλοιώνονται σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων. Η τεχνική συγκόλλησης με φλόγα οξυγόνου-ακετυλενίου δεν πρέπει να συγχέεται με την τεχνική συγκόλλησης με αέριο και πίεση (gas pressure welding) η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί με ειδικό εξοπλισμό και όχι στα εργοτάξια όπου παρουσιάζεται η ανάγκη επισκευής (για τον λόγο αυτό και δεν αναπτύσσεται).

Όσον αφορά στις συγκολλήσεις των χαλύβων οπλισμού με παράθεση (ή με επικάλυψή) καθώς και με άλλα δομικά στοιχεία σημειώνονται τα εξής:

#### Συγκόλληση με Επικάλυψη

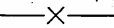
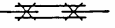
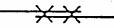
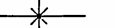
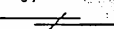
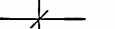
Όσον αφορά στο μήκος της ραφής της συγκόλλησης με επικάλυψη εκτελείται μόνον από την μία πλευρά με δύο ραφές μήκους  $5d$  (όπου  $d$  η διάμετρος του οπλισμού) που χωρίζονται από διάκενο  $20\text{mm}$  περίπου (ΕΛΟΤ-959 1990, ΕΛΟΤ-971 1994, ΥΠΕΧΩΔΕ 2000). Αυτό είναι γενικά αποδεκτό και από άλλα πρότυπα παρόλο που όσον αφορά το μήκος και το αν θα εκτελείται από την μία ή και τις δύο πλευρές σημειώνονται διαφοροποιήσεις. Σε άλλες περιπτώσεις το ελάχιστο μέγεθος ραφής είναι ίσο με  $2 \times 4d$  και διάκενο τουλάχιστον  $2d$ . Τα παραπάνω ισχύουν για διαμέτρους ράβδων οπλισμού μικρότερες από  $20\text{mm}$ . Στην περίπτωση που η διάμετρος του οπλισμού ξεπερνάει τα  $20\text{mm}$  τότε το συνολικό μήκος ραφής πρέπει να είναι τουλάχιστον  $15d$  (DIN-4099 1985). Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις η συγκόλληση εκτελείται σε ένα πέρασμα και έχει συνολικό μήκος  $10d$ . Στην περίπτωση που η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από  $25\text{mm}$  τότε αντί ενός μπορούν να πραγματοποιηθούν δύο περάσματα, το καθένα μήκους  $5d$  με διάκενο  $20\text{mm}$  μεταξύ τους (NF-A-35017 1996). Για να αποφευχθεί τυχούσα υπερθέρμανση της ράβδου οπλισμού προτείνεται το μέγιστο μήκος ραφής να μην ξεπερνάει τα  $5d$ . Εάν απαιτείται μεγαλύτερο μήκος ραφής θα πρέπει να εκτελείται σε διακεκομμένα περάσματα ελάχιστου μήκους  $1,5d$  και με ενδιάμεσο διάκενο μεγαλύτερο από  $5d$  (CEN-247 1997).

Το πάχος της ραφής πρέπει να είναι τουλάχιστον  $0,3d$ . Η αντοχή της ραφής και κατ' επέκταση το μήκος της ραφής της συγκόλλησης, μπορούν να εκτιμηθούν με την βοήθεια αριθμητικών τύπων (CEN-247 1997).

Όσον αφορά στο μήκος της ραφής έχειδειχθεί ότι επιτυγχάνεται πλήρης αντοχή με μήκος ραφής  $5d$  (και όχι  $2 \times 5d$ ), χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια ρουτιλίου (Corderoy and Pearson 1983). Άλλωστε και σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 4099, η δοκιμή εφελκυσμού προβλέπεται για μήκος ραφής  $4d$ , ενώ το συνολικό μήκος της συγκόλλησης είναι το διπλάσιο.

Table 1. Welding processes, welded joints and permissible nominal bar diameters

	1 Welding process	2 Type of weld joint <sup>7)</sup>	3 Range of nominal bar diameters, in mm, <sup>1)</sup> for loadbearing joints				4 for non-loadbearing joints		5 Single bars	6 Fabric bars
			Single bars	Fabric bars	Single bars	Fabric bars	Single bars	Fabric bars		
1	Manual arc welding (E) and metal active-gas welding (MAG)	Butt joint	20 to 28	—	—	—	—	—	—	—
2		Strap joint	6 to 28	8 (6) <sup>1)</sup> to 12	—	—	—	—	—	—
3		Lap joint	6 to 28	8 (6) <sup>1)</sup> to 12	6 to 28	8 (6) <sup>1)</sup> to 12 <sup>2)</sup>	—	—	—	—
4		Cruciform joint	6 to 16 <sup>2)</sup>	8 (6) <sup>1)</sup> to 12 <sup>2)</sup>	6 to 28 <sup>3)</sup>	8 (6) <sup>1)</sup> to 12 <sup>2)</sup> *)	—	—	—	—
5		Joint with other steel components (S+52-3)	6 to 28	—	6 to 28	—	—	—	—	—
6	Gas pressure welding (GP)	Butt joint	14 to 28 <sup>2)</sup>	—	—	—	—	—	—	—
7	Flash welding (RA)	Butt joint	6 to 28 <sup>4)</sup>	—	—	—	—	—	—	—
8	Resistance spot welding (RP)	Lap joint	—	—	6 to 12	4 to 12	—	—	—	—
9		Cruciform joint	6 to 16 <sup>2)</sup>	4 to 12 <sup>2)</sup>	6 to 28 <sup>3)</sup>	4 to 12 <sup>2)</sup>	—	—	—	—

1) If single bars and fabric bars are specified in the same line, these may also be joined with one another. The values in ( ) apply to the MAG process.  
2) Fabric bars of 5 mm nominal diameter and upwards may also be used for welded joints with nominal bar diameters of not less than 16 mm.  
3) The maximum difference in nominal diameter of the bars to be joined shall be 3 mm.  
4) Only bars of the same nominal diameter may be joined.  
5) The permissible ratio of the nominal diameters of crossed bars shall be not less than 0,57; see also subclause 4.1.3.  
6) The permissible ratio of the nominal diameters of crossed bars shall be not less than 0,28; see also subclause 4.1.3.  
7) Symbolic representation of types of joint:  
Loadbearing joints  
Butt joint  Strap joint   
Lap joint  Cruciform joint   
Non-loadbearing joints:  
Lap joint  Cruciform joint 

Πίνακας 2.3.1: Μέθοδοι συγκόλλησης, τύποι σύνδεσης και επιτρεπόμενες διαστάσεις (DIN-4099 1985)

Προτείνονται ηλεκτρόδια με βασική ή με όξινη (ρουτιλίου) επένδυση που τα χαρακτηριστικά τους να είναι αντίστοιχα με εκείνα του βασικού μετάλλου. Όταν πρόκειται να συγκολληθούν διαφορετικής αντοχής χάλυβες το μέταλλο προσθήκης διαλέγεται έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στην χαμηλότερη αντοχή. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η συνεχής αύξηση των αντοχών στις ράβδους οπλισμού σκυροδέματος με ειδικές τεχνικές, έχει ξεπεράσει τις αντοχές που διαθέτουν τα μή κραματωμένα ηλεκτρόδια (π.χ. ρουτιλίου, E6013). Αντιθέτως διατίθενται κραματωμένα ηλεκτρόδια βασικής επένδυσης (π.χ.

E7018, E8018) των οποίων τα μηχανικά χαρακτηριστικά συμβαδίζουν με αυτά των ράβδων οπλισμού. Αυτός είναι ένας προβληματισμός που χρειάζεται επαναδιατύπωση και στους κανονισμούς και προϋποθέτει την διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας.

### **Συγκόλληση με Άλλα Στοιχεία από Χάλυβα**

Οι λωρίδες ή τα όποια στοιχεία σύνδεσης είναι από συγκολλησιμο χάλυβα οπλισμού, η συνολική διατομή των οποίων πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την διατομή των ράβδων που συνδέονται (με την ίδια μηχανική αντοχή) ή να έχουν την ίδια φέρουσα ικανότητα.

Η συγκόλληση εκτελείται μόνον από την μία πλευρά με τέσσερις ραφές (δύο για κάθε λωρίδα) μήκους τουλάχιστον  $4d$  (όπου  $d$  η διάμετρος του οπλισμού) που χωρίζονται από διάκενο τουλάχιστον  $2d$  (ΕΛΟΤ-971 1994). Με βάση όμως το πρότυπο CEN 247 (1997) η συγκόλληση μπορεί να εκτελεσθεί και από τις δύο πλευρές και δεν προβλέπεται το ελάχιστο διάκενο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στους υφιστάμενους κανονισμούς και πρότυπα παρέχονται αρκετά στοιχεία για τον υπολογισμό του μήκους της συγκόλλησης, της αντοχής της καθώς επίσης και της εκτέλεσης της. Όπως αναφέρθηκε, ο ΥΠΕΧΩΔΕ 2000 συμφωνεί σε γενικές γραμμές με τα περισσότερα διεθνή πρότυπα αλλά για λόγους απλοποίησης δεν επεκτείνεται. Όμως έχει αποδειχθεί από προκαταρκτικές έρευνες στο Ε.Μ.Π. (Παπαδημητρίου και Νικολάου 2001) είναι δυνατή η διαφοροποίηση του σχεδιασμού των συγκολλήσεων από τις προδιαγραφές των προτύπων χωρίς να παραβλέπεται η ποιότητα των συγκολλήσεων. Στην πράξη στις επισκευές συχνά δεν είναι δυνατή η εκτέλεση των συγκολλήσεων σύμφωνα με τα παραπάνω και για το λόγο αυτό διαφοροποιήσεις είναι απαραίτητες. Πρέπει συνεπώς να ερευνηθεί ποιές είναι οι επιπτώσεις τέτοιων διαφοροποιήσεων έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ποιότητα των συγκολλήσεων. Η αδυναμία ικανής πρόσβασης στο χώρο που απαιτείται η επισκευή ή άλλοι περιορισμοί (ιδιομορφίες υπαρχόντων οπλισμών) μπορούν να οδηγήσουν σε αποκλίσεις από τις προδιαγραφές. Τίθεται συνεπώς το ερώτημα ποιές οι επιπτώσεις τυχαίων αποκλίσεων από τις προδιαγραφές, για παράδειγμα του μήκους ραφής. Επίσης η δυνατότητα εκτέλεσης διαφορετικών τύπων συνδέσεων, π.χ. ραφή από την μία ή τις δύο πλευρές καθώς επίσης και αν αυτή θα είναι συνεχόμενη ή όχι δεν έχει διερευνηθεί σε αυτές τις περιπτώσεις.

Στην περίπτωση συγκόλλησης με επικάλυψη παρατηρείται εκκεντρότητα κατά την φόρτιση και για αυτό το λόγο απαιτείται να χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετος διαμήκης οπλισμός για να μην παρατηρηθεί ρηγμάτωση του σκυροδέματος.

Επίσης στην περίπτωση έμμεσης σύνδεσης του οπλισμού πρέπει η απόσταση μεταξύ των αξόνων να μην υπερβαίνει τα 19mm για να μειώνεται η εκκεντρότητα. Προτείνεται οι συγκολλήσεις με επικάλυψη να περιορίζονται σε διαμέτρους μικρότερες από 20mm περίπου (DIN-4099 1985, NF-A-35017 1996, CEN-247 1997).

Επίσης αναφέρεται ότι ευεργετικό είναι να μοιράζεται το μήκος της ραφής σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μήκος αλλά δεν είναι γνωστό από την βιβλιογραφία ποιοί είναι το ελάχιστο αυτό μήκος έτσι ώστε να αποφεύγεται ο παραπάνω κίνδυνος.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχει πλήθος παραγόντων που δεν έχουν διευκρινιστεί. Για παράδειγμα επιθυμούμε το ελάχιστο ασφαλές (μηχανική αντοχή) μήκος ραφής, το οποίο με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης οδηγεί σε λιγότερο θερμικά επηρεασμένη περιοχή στην ράβδο, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη εκκεντρότητα και διάρρηξη του σκυροδέματος.

Γενικά, απουσιάζουν στοιχεία κατά πόσο αυτές οι υπάρχουσες προδιαγραφές και πρότυπα πληρούν τις ανάγκες των κατασκευών, ποιοί είναι οι συντελεστές ασφαλείας και ποιές είναι οι τυχούσες επιδράσεις που έχουν οι διαφορετικοί τύποι συνδέσεων στην συμπεριφορά της συνολικής κατασκευής.

### **Συγκολλησιμότητα Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος**

Οι χρησιμοποιούμενοι χάλυβες στην Ελλάδα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες (ΕΛΟΤ-959 1990, ΕΛΟΤ-971 1994):

- Στους συγκολλησίμους S400s και S500s
- Στους συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις S220, S400, S500.

Με βάση τον ΥΠΕΧΩΔΕ 2000, η συγκολλησιμότητα των χαλύβων κρίνεται μόνο με βάση την χημική τους σύσταση ( $C_{eq} < 0,53\%$  στο τελικό προϊόν) σε αντιδιαστολή με τους υπό προϋποθέσεις συγκολλησίμους χάλυβες των οποίων η συγκολλησιμότητα ελέγχεται με μηχανικές δοκιμές. Η συγκολλησιμότητα, με βάση τον ΥΠΕΧΩΔΕ 2000, θεωρείται αυταπόδεικτη από την χημική σύσταση του υλικού ( $C_{eq} \leq 0,53\%$ ). Άλλοι περιορισμοί αναφέρονται στις μέγιστες περιεκτικότητες σε θείο, φώσφορο και άζωτο [βλ. σελ.22, ΥΠΕΧΩΔΕ 2000]. Από πολλούς ερευνητές θεωρείται λανθασμένο το κριτήριο του ισοδύναμου άνθρακα σαν αποδεικτικό στοιχείο της συγκολλησιμότητας των χαλύβων διότι η χημική σύσταση δεν ευθύνεται και δεν καθορίζει από μόνη της την ποιότητα των συγκολλήσεων (Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton 1989). Για παράδειγμα, μικροκραματωμένοι χάλυβες με βανάδιο που παράγονται από Ελληνική εταιρεία, παρουσιάζουν ανθεκτικές συγκολλήσεις αν και η συγκολλησιμότητα τους με

κριτήριο το ισοδύναμο σε άνθρακα φαίνεται περιορισμένη ( $C_{eq}=0,481$ , κοντά στο ανώτατο επιτρεπτό όριο του 0,53) (Παπαδημητρίου κ.α. 1999).

Κατά τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται συνεχώς νέες ποιότητες χάλυβα -οι συγκολλησίμες- που παράγονται με διάφορες νέες τεχνικές και κυκλοφορούν παράλληλα προς τις παλαιότερες συμβατικές, βλέπε π.χ. τα σχετικά πρότυπα (ΕΛΟΤ-959 1990, ΥΠΕΧΩΔΕ 2000). Σε κάθε περίπτωση η συγκόλληση συνεπάγεται τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και διαφοροποίηση της δομής και των ιδιοτήτων του χάλυβα στην περιοχή της συγκόλλησης. Η εξασθένιση της αντοχής του χάλυβα από την εμφάνιση μαλακών συστατικών ή αντίθετα η εμφάνιση σκληρών και ψαθυρών συστατικών που προσδίδουν στον χάλυβα ευθραυστότητα εξαρτάται από την χημική σύσταση του χάλυβα, όσο και από την τεχνολογία παραγωγής του και χαρακτηρίζει την συγκολλησιμότητα του) (Παπαδημητρίου κ.α. 1999). Το θέμα της συγκολλησιμότητας, αν και αποτελεί αντικείμενο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας για τα περισσότερα υλικά, ελάχιστα έχει διερευνηθεί για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στις κατηγορίες των υπό προϋπόθεση συγκολλησίμων χαλύβων η συγκολλησιμότητα ελέγχεται με δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης συγκολλημένων δοκιμίων (ΕΛΟΤ-959 1990, ΥΠΕΧΩΔΕ 2000). Στην ίδια εργασία (Παπαδημητρίου κ.α. 1999) χάλυβες που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη συγκολλησιμότητα (S400, S500) με βάση την χημική τους ανάλυση, περνούν με επιτυχία τις δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης. Η μεταλλογραφία όμως αποδεικνύει στην Θ.Ε.Ζ. συστατικά μεγάλης σκληρότητας και ψαθυρότητας. Ως εκ τούτου η εφελκυστική αντοχή βρίσκεται όχι μόνο εντός των αποδεκτών ορίων αλλά είναι και ιδιαίτερα υψηλή. Η θραυστογραφία συμπληρωματικά δείχνει ότι τα προαναφερθέντα συστατικά μειώνουν την δυσθραυστότητα και μπορούν να αποδειχθούν εξαιρετικώς επικίνδυνα στην περίπτωση δυναμικών καταπονήσεων με κρούση ή κόπωση. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα κατά πόσον είναι ενδεδιγμένος και επαρκής ο έλεγχος της συγκολλησιμότητας των χαλύβων αυτών με στατικές μόνο δοκιμές ή αν πρέπει να υιοθετηθούν και δοκιμές δυναμικών καταπονήσεων.

Ανάγκη επισκευών μετά από βλάβες μπορούν να χρειασθούν τόσο σε παλαιότερες όσο και σε νεότερες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις αλλαγές που παρατηρούνται στην αγορά και παραγωγή διαφόρων ποιοτήτων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, συνεπάγεται ότι συχνά στην πράξη κατά τις επισκευές οι ποιότητες των χαλύβων οπλισμού που διατίθενται είναι διαφορετικές. Στην Ελλάδα διατίθεται σχεδόν αποκλειστικά πλέον η κατηγορία χάλυβα S500s και συνεπώς στις επισκευές νέων κατασκευών πρόκειται για τον οπλισμό που συναντάται (μετά το 1993

διατίθεται στην αγορά αποκλειστικά S500s Tempcore και σε μικρότερο βαθμό μικροκραματωμένοι). Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος της κατηγορίας S500s είναι συγκολλησιμοι και είτε είναι προϊόντα θερμής έλασης χωρίς καμία παραπέρα κατεργασία, είτε θερμής έλασης που ακολουθείται από μια άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας. Στη μεν πρώτη περίπτωση η υψηλή αντοχή επιτυγχάνεται με προσθήκη νιοβίου (Nb), βαναδίου (V) ή τιτανίου (Ti) (Μικροκραματωμένοι), ενώ στην δεύτερη περίπτωση με μια επιφανειακή μαρτενσιτική βαφή του χάλυβα (Tempcore) (ΥΠΕΧΩΔΕ 2000).

Συνεπώς στις επισκευές παρουσιάζονται οι εξής περιπτώσεις:

1. Ενώσεις με συγκολλήσεις χάλυβων οπλισμού διαφορετικής κατηγορίας (αφορά στις παλαιότερες κατασκευές, πριν το 1993).
2. Ενώσεις χαλύβων οπλισμού ίδιας κατηγορίας (στον ελλαδικό χώρο αφορά στη ποιότητα S500s και τις νεότερες κατασκευές, μετά το 1993).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η κατηγορία S500s, διακρίνεται στους χάλυβες TEMP CORE και στους Μικροκραματωμένους. Αν και οι δύο αυτές ποιότητες υπάγονται στην ίδια κατηγορία, δεν έχουν διευκρινιστεί οι διαφοροποιήσεις τους ως προς την συγκολλησιμότητα τους.

### **Επίδραση των Συγκολλήσεων στους Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος και στην Κατασκευή**

Κατά την διάρκεια σύνδεσης των χαλύβων με συγκόλληση τόξου το μέταλλο υποβάλλεται σε θερμικό κύκλο τόσο στην επαφή του με την ζώνη τήξης όσο και στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Το γεγονός αυτό είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των συνδέσεων καθώς επίσης και στην συμπεριφορά της όλης κατασκευής.

Το αποτέλεσμα των υψηλών ρυθμών θέρμανσης και ψύξης κατά την διάρκεια της συγκόλλησης έχει γενικά τις εξής επιπτώσεις:

1. Αύξηση της σκληρότητας στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη
2. Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων
3. Μεταβολή της μικροδομής
4. Εμφάνιση παραμενουσών τάσεων

Στόχος κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων είναι να ελαχιστοποιήσουν τις παραπάνω δυσμενείς επιπτώσεις. Έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην Ολλανδία έδειξαν ότι είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό η διαφορά στην ολκιμότητα του μετάλλου βάσης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (The Netherlands Institute of Welding). Από άλλες έρευνες έχουν συναχθεί τα ακόλουθα (Kochanowski 1996):



1. Πτώση του ορίου διαρροής της ράβδου (περίπου 3%) σε σχέση με το αρχικό όριο ανάλογα με τις παραμέτρους της συγκόλλησης
2. Μείωση 50% της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο.

Η συμπεριφορά των συγκολλημένων συνδέσεων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο κατά την διάρκεια δυναμικών καταπονήσεων. Η αντοχή στην κόπωση φαίνεται ότι επηρεάζεται περισσότερο από τον σχεδιασμό της συγκόλλησης απ' ό,τι η στατική τους αντοχή που ελέγχεται με την δοκιμή εφελκυσμού (Haferkorn and Kuflewski 1986). Η αντοχή σε κόπωση των συνδέσεων μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τις ασυγκόλλητες ράβδους (Defourny et al 1982). Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται και από τον Pasko (1973). Επίσης έχει αποδειχθεί ότι μετά από δυναμικές καταπονήσεις, η ολκιμότητα των συγκολλημένων αλλά ακόμα και ασυγκόλλητων δοκιμίων μειώνεται (Salah el Din and Lovegrove 1980). Δοκιμές κόπωσης σε ράβδους οπλισμού εγκιβωτισμένες σε σκυρόδεμα παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία (Narayanaswamy et al 1977). Όμως, αντίστοιχες δοκιμές σε συγκολλημένες συνδέσεις δεν αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

Η αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων κατά την συγκόλληση έχει μελετηθεί και από τον Y.L.Mo et al (1995) (πρέπει να σημειωθεί ότι η έρευνα αφορά σε σταυρωτές συγκολλήσεις) σε χάλυβα της κατηγορίας Grade 60 (ποιότητα που παρουσιάζει ομοιότητες στην αντοχή και σύνθεση με την κατηγορία St III ή S400) έδειξαν σημαντική μείωση της ολκιμότητας (μέχρι 50%).

Έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Ε.Μ.Π. έδειξε ότι η σκληρότητα στη ζώνη τήξης εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό του ηλεκτροδίου ενώ στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη από την χημική σύσταση, την αρχική δομή του μετάλλου όσο και από τις παραμέτρους συγκόλλησης (Ταπαδημητρίου και Νικολάου 2001).

### **Ποιότητα των Συγκολλήσεων**

Η αξιοπιστία κατά την διάρκεια της ζωής της συγκόλλησης και κατά συνέπεια της κατασκευής ορίζεται από την ποιότητά της. Στην πράξη, σπάνια οι συγκολλήσεις θεωρούνται τέλειες και απαλλαγμένες από σφάλματα και συνεπώς τίθεται το ερώτημα σε ποιο βαθμό μια συγκόλληση που δεν είναι ιδανική μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για τις οποίες προορίζεται. Για τον λόγο αυτό έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια η φιλοσοφία της λεγόμενης «καταλληλότητας για την επιδιωκόμενη χρήση» (fitness for purpose), που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αποδοχή ορισμένων σφαλμάτων (defect tolerance). Η ανοχή αυτή, καθορίζεται με βάση ορισμένους κανόνες ή πρότυπα που έχουν θεσπιστεί από οργανισμούς όπως π.χ. American Welding Society, American Society for Testing Materials, British Welding Institute. Με βάση τα

παραπάνω, για την αποδοχή μιας συγκόλλησης ως κατάλληλης θα πρέπει πρώτα να ανιχνευθούν τα τυχόν σφάλματα με μια μη καταστροφική μέθοδο και στη συνέχεια να αξιολογηθούν με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης που δίνονται από τα διεθνή πρότυπα.

Με βάση τον Structural Welding Code 1992 (για τον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος) προτείνεται πριν από κάθε δοκιμή η συγκόλληση να ελέγχεται μακροσκοπικά και αν είναι δυνατόν με ραδιογραφία. Ρωγμές, ατελής τήξη, ατελής διείσδυση και υποκοπή («κάψιμο» του μετάλλου) εάν υπερβαίνει το 1mm καθιστούν την συγκόλληση ακατάλληλη. Όσον αφορά στη ραδιογραφία, τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για πόρους είναι διαμέτρου  $0,125d$  (3mm max) και εγκλείσματα σκουριάς μέγιστου μήκους 10mm και πάχους 2mm.

Έχει αποδειχθεί ότι η ύπαρξη σφαλμάτων στις συγκολλήσεις δεν συνεπάγεται αναγκαστικά σε μειωμένη αντοχή. Η επίδραση των σφαλμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο σύνδεσης (Ταπαδημητρίου κ.α. 2000). Η αποδοχή των σφαλμάτων στις συγκολλήσεις πρέπει να ελεγχθεί περισσότερο συστηματικά στην περίπτωση δυναμικών φορτίσεων και από την βιβλιογραφία απουσιάζουν σχετικές εργασίες. Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι πρέπει να διερευνηθούν διάφοροι παράγοντες και να εξετασθεί σε ποιο βαθμό μία συγκόλληση είναι ευαίσθητη στη μεταβολή τους.

### **Προθέρμανση**

Οποιαδήποτε προθέρμανση ή μεταθέρμανση απαγορεύεται βάσει του ΥΠΕΧΩΔΕ 2000. Η προθέρμανση όμως, προβλέπεται εφόσον δεν έχουν διενεργηθεί δοκιμές συγκολλησιμότητας σύμφωνα με το πρότυπο CEN-247 (1997)- BS 7123 (1989). Η προθέρμανση εξαρτάται από τον ισοδύναμο άνθρακα του χάλυβα και τον τύπο σύνδεσης. Τα ηλεκτρόδια με ελεγχόμενη περιεκτικότητα σε υδρογόνο απαιτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες προθέρμανσης.

Η θερμοκρασία προθέρμανσης δεν πρέπει να πέσει σε καμία στιγμή της συγκόλλησης κάτω από την προδιαγραφόμενη και η θερμοκρασία των δοκιμών δεν πρέπει να ξεπεράσει σε καμία περίπτωση τους  $325^{\circ}\text{C}$  σε απόσταση 25mm από την συγκόλληση (ΕΛΟΤ-971 1994, CEN-247 1997).

Σημειώνεται ότι η παραπάνω απαίτηση για διατήρηση της θερμοκρασίας σε κατώτερα επίπεδα από  $325^{\circ}\text{C}$  σε απόσταση 25mm απαιτεί σε ορισμένες περιπτώσεις (ανάλογα με την διάμετρο του οπλισμού) προσεκτική επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης και εκτέλεσης της συγκόλλησης (Ταπαδημητρίου και Νικολάου 2001).

### **Ιδιότητες Χαλύβων σε Υψηλές Θερμοκρασίες - Πυρκαγιά**

Κατά την διάρκεια μίας πυρκαγιάς, μέρος του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος είναι δυνατόν να εκτεθεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το φαινόμενο γίνεται περισσότερο έντονο εφόσον επέλθει αποφλοίωση του σκυροδέματος και αποκάλυψη του οπλισμού.

Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί λίγες ερευνητικές προσπάθειες που είναι αξιοποιήσιμες για τον ποσοτικό καθορισμό αυτών των μεταβολών που συμβαίνουν στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων οπλισμού. Τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών δείχνουν σημαντική πτώση στην αντοχή του χάλυβα οπλισμού μετά από θέρμανση σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C-600°C (Neves et al 1996) για χάλυβα οπλισμού με 400MPa όριο διαρροής ενώ αναφέρεται από τους Holmes et al (1982) ότι για χάλυβες θερμής έλασης και ορίου διαρροής της τάξης των 500MPa, η πτώση στις μηχανικές ιδιότητες ξεκινάει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (400°C-500°C). Από την άλλη μεριά η διαφοροποίηση των κατηγοριών χάλυβα οπλισμού ανάλογα με την χημική τους σύσταση και την διαδικασία παραγωγής τους δεν επιτρέπει ασφαλή συμπεράσματα στην περίπτωση του χάλυβα οπλισμού S500s που διατίθεται σήμερα στην Ελλάδα (Θερμής έλασης με άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία (TEMPCORE) και θερμής έλασης (Μικροκραματωμένοι)).

Η θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς στην οποία υποβάλλονται οι χάλυβες οπλισμού S500s TEMPCORE και κατά συνέπεια η τελική μικροδομή του υλικού επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων αυτών. Οι μεταβολές αυτές συμβαδίζουν με τις μεταβολές που συμβαίνουν στην μικροδομή του υλικού μετά από την θέρμανση τους στις παραπάνω θερμοκρασίες. Η θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασίες πλησίον των 700°C, οδηγεί σε έντονη επαναφορά του υλικού με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται σημαντικά οι μηχανικές του ιδιότητες. Οι Μικροκραματωμένοι χάλυβες οπλισμού της κατηγορίας S500s παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερες τιμές αντοχής κατά την δοκιμή εφελκυσμού σε σχέση με τους χάλυβες TEMPCORE (Παπαδημητρίου και Νικολάου 2001).

Η εκτίμηση της επίδρασης μίας ενδεχόμενης θέρμανσης στις ράβδους οπλισμού πρέπει να συγκριθεί με ενδεχόμενες μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων τους μετά από αντίστοιχη θέρμανση.

Από τα παραπάνω καθίσταται φανερό ότι είναι κρίσιμη τόσο η εκτίμηση μιας πιθανής βλάβης από πυρκαγιά στους χάλυβες οπλισμού ώστε να μπορεί να αποφασιστεί ενδεχόμενη επισκευή. Ο προσδιορισμός της θέσης του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα, προκειμένου να εκτελεστεί επισκευή, μπορεί να προσδιορισθεί με μη καταστροφικές μεθόδους (π.χ. υπερήχους) σε συνδυασμό με κατάλληλες τομές σε επιλεγμένα θέσεις των στοιχείων από Ο.Σ.. Επίσης, οι

ιδιότητες των χαλύβων που έχουν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες τόσο στην κόπωση όσο και στην κρούση (δυναμικές καταπονήσεις) δεν αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

### **Γήρανση**

Κατά DIN-1045, το σκυρόδεμα δεν επιτρέπεται να εκτεθεί επί πολύ χρόνο σε θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 250C. Η γήρανση στους χάλυβες είναι φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο στους χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα και ως εκ τούτου το θέμα αφορά το αντικείμενο των επισκευών αφού οι χάλυβες οπλισμού που διατίθενται σήμερα στην Ελλάδα για να επιδέχονται συγκόλληση καθίσταται απαραίτητο η περιεκτικότητα σε άνθρακα (και του ισοδύναμου άνθρακα) να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ( $C_{eq} < 0.50$ ).

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 υπήρξε μια προσπάθεια από την Βρετανία για την εκτίμηση της επίδρασης της γήρανσης στους χάλυβες οπλισμού η οποία έχει υιοθετηθεί και από τον ΥΠΕΧΩΔΕ 2000 σχεδιάζοντας την δοκιμή κάμψης-ανάκαμψης. Μετά την κάμψη των ράβδων, βυθίζονται σε νερό εν βρασμώ και στην συνέχεια ελέγχεται η μείωση στην ολκιμότητα. Τέτοιες δοκιμές σε μικροκραματωμένους χάλυβες δείχνουν ότι υπάρχει στενή συσχέτιση της περιεκτικότητας σε άνθρακα και του θείου (Campilio et al 1996) αλλά και σε νιόβιο με την θραύση μετά από γήρανση. Επίσης η ύπαρξη βαναδίου (μικροκραματωμένοι με βανάδιο) οδηγεί μετά από γήρανση σε αύξηση της θερμοκρασίας μετάπτωσης των χαλύβων από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση (Erasmus and Puessegoda 1977).

Τα παραπάνω δεν έχουν ελεγχθεί στους ελληνικής ποιότητας χάλυβες οπλισμού ούτε στην περίπτωση των μικροκραματωμένων που εισάχθηκαν σχετικά πρόσφατα στην αγορά καθώς επίσης και στους χάλυβες Tempcore.

### **2.3.3. Επίδραση των Συγκολλήσεων στις Μηχανικές Ιδιότητες των Χαλύβων Οπλισμού των Κατηγοριών S500s (Tempcore) και S400**

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Ε.Μ.Π. (Νικολάου, 2004) ελέγχθηκε η επίδραση των κατά παράθεση συγκολλήσεων στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων οπλισμού των κατηγοριών S400 και S500s. Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με διαφορετικές τεχνικές και συνθήκες συγκόλλησης (λειτουργικές παράμετροι και θερμοκρασία προθέρμανσης).

### **Πειραματική Διαδικασία**

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των συγκολλήσεων στην μικροδομή των χαλύβων αλλά και στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων συγκολλήθηκαν

καβίλιες ράβδων χάλυβα Tempcore S500s διαμέτρου 16mm στο μέσο ράβδων οπλισμού

- i) S400 διαμέτρου 25Φ και
- ii) S500s, Tempcore διαμέτρου 20Φ.

Αν και η χρήση χάλυβα S400 διαμέτρου 20mm είναι περισσότερο διαδεδομένη από την διάμετρο των 25mm η οποία εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η επιλογή αυτή κρίνεται ότι καθιστά δυσκολότερη την αποφυγή σκληρών και ψαθυρών συστατικών κατά την διάρκεια μιας συγκόλλησης (διότι μεγαλύτερη μάζα μετάλλου απορροφά γρηγορότερα την θερμότητα που προσφέρεται κατά τη συγκόλληση με αποτέλεσμα να παρατηρείται εντονότερος ρυθμός απόψυξης που είναι και υπεύθυνος για την δημιουργία σκληρών συστατικών). Η αποφυγή συνεπώς ψαθυρών φάσεων στην περίπτωση αυτή ικανοποιεί και την περίπτωση συγκόλλησης μικρότερων διαμέτρων χαλύβων οπλισμού (παρόμοιας χημικής σύστασης).

Και στις δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν τα εξής:

α) Εξετάσθηκαν δύο τεχνικές συγκόλλησης, i) με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW) και ii) με προστατευτική ατμόσφαιρα δραστικού αερίου (Ar-CO<sub>2</sub>) και καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο (GMAW).

Η τεχνική GMAW (γνωστή και ως MAG) παρέχει την ευελιξία ευχερέστερου ελέγχου των συνθηκών συγκόλλησης μιας και πρόκειται για μια ημιαυτόματη τεχνική συγκόλλησης (γεγονός που μειώνει τις πιθανότητες διαβάθμισης της ποιότητας της συγκόλλησης ανάλογα με τον ηλεκτροσυγκολλητή). Αφ' ετέρου είναι ιδιαίτερη παραγωγική, εύχρηστη και παράγονται υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις.

Για την εκτέλεση των συγκολλήσεων χρησιμοποιήθηκε για τις συγκολλήσεις με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου, η μηχανή συγκόλλησης KEMPI - Mat 4000 (GMAW) ενώ για τις συγκολλήσεις με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, μηχανή KEMPI Master 2800 (SMAW).

β) Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδη θέση και σε ένα πέρασμα (πάσο-κορδόνι).

γ) Οι διάφορες περιοχές των συγκολλήσεων μελετήθηκαν μεταλλογραφικά.

δ) Πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρομετρήσεις στις διάφορες ζώνες των συγκολλήσεων (μικροσκληρόμετρο SHIMADJU).

ε) Προσδιορίσθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων μετά τις συγκολλήσεις.

Η συγκόλληση διαφορετικών κατηγοριών χαλύβων προϋποθέτει κατάλληλη επιλογή των συνθηκών συγκόλλησης (ένταση ρεύματος, τάση, ταχύτητα

προχώρησης, προώθηση σύρματος-MAG, προθέρμανση). Προκειμένου να καθορισθούν αυτές οι συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται τα εξής:

α) Να μην δημιουργούνται ψαθυρά συστατικά στις διάφορες περιοχές της συγκόλλησης

β) Να δημιουργούνται ικανοποιητικές συγκολλήσεις από γεωμετρικής άποψης, δηλαδή να αποφεύγεται «κάψιμο» του μετάλλου ή ατελή τήξη και σύνδεση.

Το ζητούμενο από την διερεύνηση ήταν να ορισθούν αυτές οι συνθήκες συγκόλλησης που θα ικανοποιούν τα παραπάνω ταυτόχρονα και για τις 3 εξετασθείσες διαμέτρους ράβδων οπλισμού αλλά και για τις δύο κατηγορίες χαλύβων.

A / A	Τεχνική Συγκόλλησης	Τύπος Ηλεκτροδίου	Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)	Ενταση Ρεύματος (A)	Τάση (V)	Θερμοκρ. Προθέρμ. (°C)
<b>G I</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	190	21	-
<b>G I-1</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	190	21	100
<b>G I-2</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	190	21	200
<b>G II</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	140	17	-
<b>G III</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	240	26	-
<b>G III-1</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	240	26	100
<b>G III-2</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	240	26	200
<b>G IV</b>	GMAW	ER-70S6	1.2	260	33	-
<b>S I</b>	SMAW	E 6013	4	160	29	-
<b>S I-1</b>	SMAW	E 6013	4	160	29	100
<b>S I-2</b>	SMAW	E 6013	4	160	29	200
<b>S II</b>	SMAW	E 6013	4	180	35	-
<b>S III</b>	SMAW	E 6013	3.25	100	21	-
<b>S IV</b>	SMAW	E 6013	3.25	130	24	-
<b>S IV-1</b>	SMAW	E 6013	3.25	130	24	100
<b>S IV-2</b>	SMAW	E 6013	3.25	130	24	200

Πίνακας 2.3.2: Τεχνικές και παράμετροι συγκόλλησης που εξετάστηκαν σε χάλυβες οπλισμού των κατηγοριών S400 και S500s

Α/Α	Μεταλλογραφία	Μικροσκληρομετρήσεις	Εφελκυσμοί	
	S400-S500s (Φ25 - Φ16)	S400-S500s (Φ25 - Φ16)	S400-S500s (Φ25 - Φ16)	S500s-S500s (Φ20 - Φ16)
G I	O	O	O	O
G I-1	O			
G I-2	O		O	O
G II	O	O		
G III	O	O	O	O
G III-1	O			
G III-2	O		O	O
G IV	O	O		
S I	O	O	O	O
S I-1	O	O		
S I-2	O	O	O	O
S II	O	O		
S III	O			
S IV	O	O	O	O
S IV-1	O	O		
S IV-2	O	O	O	O

Πίνακας 2.3.3: Συνολική πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε

Προκειμένου να διερευνηθεί ένα ευρύ πεδίο παραμέτρων λειτουργίας της συγκόλλησης των ράβδων και με τις δύο τεχνικές (SMAW και GMAW) δημιουργήθηκε ικανός αριθμός συγκολλημένων δοκιμίων τα οποία μελετήθηκαν μεταλλογραφικά και στα οποία πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρότητες για την ανίχνευση σκληρών (ψαθυρών) συστατικών. Οι παράμετροι συγκόλλησης συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.2. Η επιλογή των παραμέτρων έγινε έτσι ώστε να μελετηθεί το εύρος διακύμανσης των συνθηκών συγκόλλησης που επιτρέπει την δημιουργία ικανοποιητικών συγκολλήσεων.

Η συνολική πειραματική διαδικασία συνοψίζεται στον Πίνακα 2.3.3.

### Μεταλλογραφία

Οι χημικές συστάσεις των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 2.3.4.

	D (mm)	C	Mn	Si	N	Ni	Cu	Cr	S	P	Ceq
S 400	25	0.370	1.278	0.288	0.007	0.066	0.194	0.087	0.030	0.022	0.62
S 500s	20	0.225	1.055	0.207	0.009	0.114	0.435	0.080	0.069	0.027	0.46
S 500s	16	0.182	0.908	0.179	0.052	0.103	0.379	0.115	0.040	0.022	0.39

Πίνακας 2.3.4: Χημικές αναλύσεις χαλύβων οπλισμού

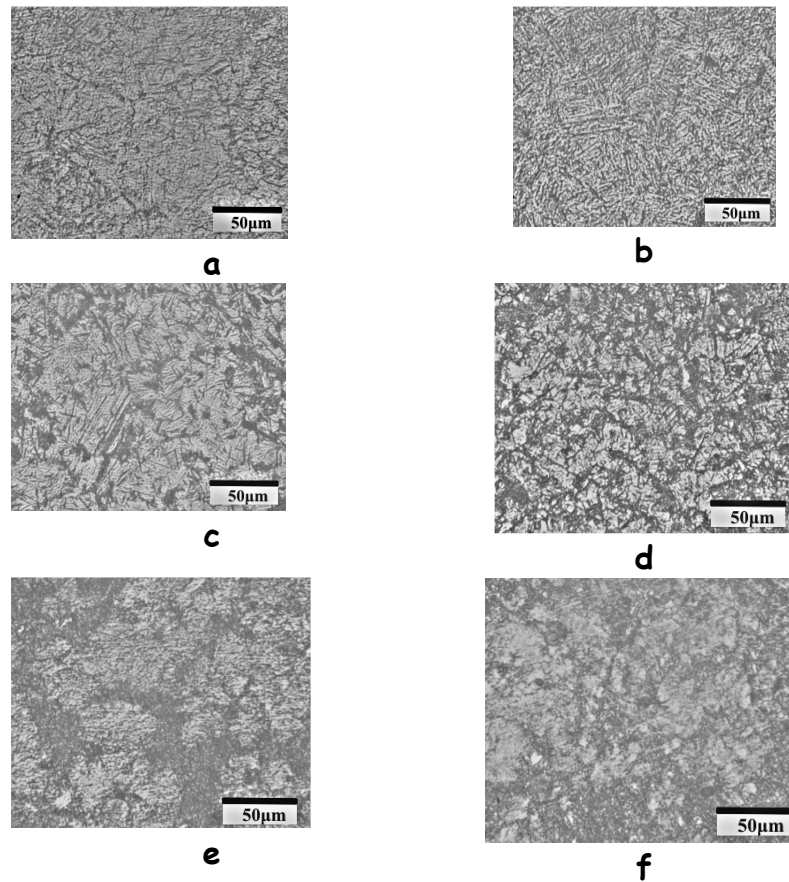
Όπως αναφέρθηκε με τον όρο θερμικά επηρεασμένη ζώνη εννοούμε την περιοχή του μετάλλου που συνορεύει με την ζώνη τήξης (δηλαδή το τηγμένο μέταλλο) το οποίο έχει θερμανθεί σε μια θερμοκρασία κατώτερη από το σημείο τήξης αλλά υψηλότερη από κρίσιμες θερμοκρασίες μεταλλουργικών μετασχηματισμών. Οι μικροδομές στην ζώνη αυτή εξαρτώνται από τον ρυθμό απόψυξης από αυτήν την θερμοκρασία θέρμανσης και από την χημική σύσταση.

Ως εκ τούτου η εφελκυστική αντοχή βρίσκεται όχι μόνο εντός των αποδεκτών ορίων αλλά είναι και ιδιαίτερα υψηλή. Η θραυστογραφία συμπληρωματικά δείχνει ότι τα προαναφερθέντα συστατικά μειώνουν την δυσθραυστότητα και μπορούν να αποδειχθούν εξαιρετικώς επικίνδυνα στην περίπτωση δυναμικών καταπονήσεων με κρούση ή κόπωση.

Για την αποφυγή συνεπώς εσφαλμένων συμπερασμάτων πριν την διενέργεια μηχανικών δοκιμών αντιπροσωπευτικά δοκίμια ελέγχθηκαν μεταλλογραφικά έτσι ώστε να εξαλειφθεί η παρουσία ψαθυρής φάσης στις διάφορες περιοχές των συγκολλήσεων. Συνολικά εξετάσθηκαν μεταλλογραφικά 16 συγκολλημένα δοκίμια (8 συνθήκες συγκόλλησης με την τεχνική SMAW και 8 συνθήκες με την τεχνική GMAW).

Μια ενδεδειγμένη μέθοδος ελαχιστοποίησης των ρυθμών απόψυξης και κατά συνέπεια της δημιουργίας σκληρών μικρογραφικών δομών, είναι η προθέρμανση των τεμαχίων (ράβδων) αν και απαγορεύεται με βάση τον ΚΤΧ 2000 και για τον λόγο αυτό ο αρχικός στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η δημιουργία ικανοποιητικών συγκολλήσεων μόνο με την χρήση κατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης. Αποδείχτηκε ότι, η συγκόλληση των χαλύβων οπλισμού της κατηγορίας S400 ανεξάρτητα από την επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, οδηγεί στην δημιουργία σκληρών και ψαθυρών συστατικών στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δηλαδή την περιοχή του μετάλλου που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο τήξης.





Σχήμα 2.3.1: Μικρογραφική δομή στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη των χαλύβων S400 με τις ακόλουθες συνθήκες συγκόλλησης α: SI, b: SIV, c: SI-1, d: SIV-1, e: SI-2, f : SIV-2.

Η αδυναμία εξάλειψης μαρτενσιτικών δομών στη ΘΕΖ με κατάλληλη χρήση παραμέτρων συγκόλλησης οδήγησε στην ανάγκη προθέρμανσης των ράβδων. Η αποτελεσματικότητα της θερμοκρασίας προθέρμανσης στην εξάλειψη σκληρών και ψαθυρών συστατικών (εκτός από την χημική σύσταση του χάλυβα) εξαρτάται από τις παραμέτρους συγκόλλησης.

Προθέρμανση των ράβδων στην ίδια θερμοκρασία (π.χ. 100°C) στην περίπτωση συγκόλλησης με διαφορετικές συνθήκες οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την πρακτική εφαρμογή της συγκόλλησης στο εργοτάξιο ανάλογα με τον υπό συγκόλληση χάλυβα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις. Τίθεται συνεπώς το ερώτημα σε ποιο βαθμό μπορεί να είναι αξιόπιστη μια διαδικασία συγκόλλησης (δηλαδή η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης και η προθέρμανση). Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν προθερμάνσεις στους 100°C και στους 200°C και

επιλέχθησαν εκείνες οι συνθήκες συγκόλλησης στις οποίες παρατηρείται και η μέγιστη σκληρότητα (περίπου 600HV), SI και SIV. Όπως φαίνεται στις μικρογραφίες του Σχήματος 2.3.1, όλες οι συγκολλήσεις που έγιναν χωρίς προθέρμανση (SI-SIV) καθώς και αυτές που έγιναν με προθέρμανση στους 100°C (SI-1, SIV-2) έδωσαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) σκληρές μαρτενσιτικές δομές. Αντιθέτως όταν προηγήθηκε προθέρμανση στους 200°C στη ΘΕΖ εμφανίζονται μαλακά συστατικά φερριτοπερλιτικής δομής. Αποδεικνύεται, μεταλλογραφικά ότι η ελάχιστη θερμοκρασία προθέρμανσης των ράβδων πρέπει να είναι 200°C.

### **Μικροσκληρότητες**

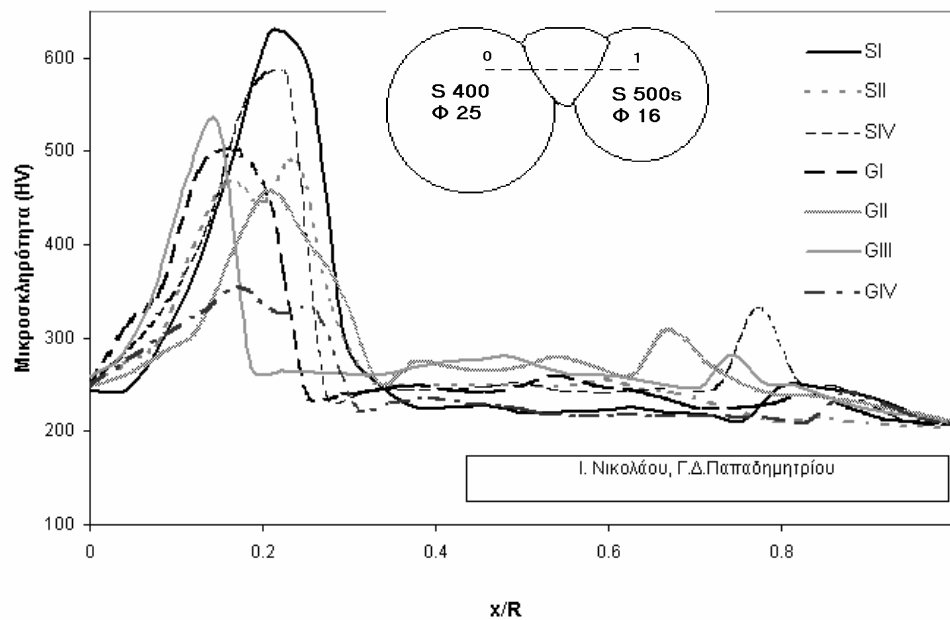
Παράλληλα με την μεταλλογραφική παρατήρηση των ζωνών συγκόλλησης, σε όλα τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρότητες κατά μήκος των ζωνών συγκόλλησης σε όλα τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν δίχως προθέρμανση εκτός του SIII στο οποίο παρατηρήθηκε μεταλλογραφικά ατελής τήξη και απορρίφθηκε.

Οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του Γραφήματος 1, πάνω σε μια ευθεία σε μια κάθετη τομή στον διαμήκη άξονα των ράβδων. Το βήμα μεταξύ δύο διαδοχικών μικροσκληρομετρήσεων ήταν 0,5mm και η απόσταση από το σημείο 0 προς το σημείο 1 ήταν περίπου 20mm ( $x = \text{βήμα μικροσκληρομέτρησης}$ ,  $R = 20\text{mm}$ ), ανάλογα με τις συνθήκες συγκόλλησης. Τα σημεία 0 και 1 αποτελούν και το τέλος της ΘΕΖ στους δύο χάλυβες. Στον Πίνακα 2.3.4, δίνεται για κάθε περίπτωση η αντιστοιχία των τιμών X/R με τις διάφορες περιοχές συγκόλλησης (ΘΕΖ S400, Ζώνη Τήξης, ΘΕΖ S500s).

Οι μικροσκληρομετρήσεις δίνονται συγκεντρωτικά για όλες τις περιπτώσεις που δεν έχει προηγηθεί προθέρμανση στο Σχήμα 2.3.1. Οι μικροσκληρότητες εξαρτώνται από τις παραμέτρους συγκόλλησης τόσο στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του χάλυβα S400 όσο και στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη του χάλυβα S500s. Σε όλες τις περιπτώσεις, μικροσκληρότητα η οποία ξεπερνάει τους 300HV, θεωρείται μη αποδεκτή και κατά συνέπεια καμία επιλογή παραμέτρων δεν μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά την αυξημένη σκληρότητα στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη του χάλυβα S400.

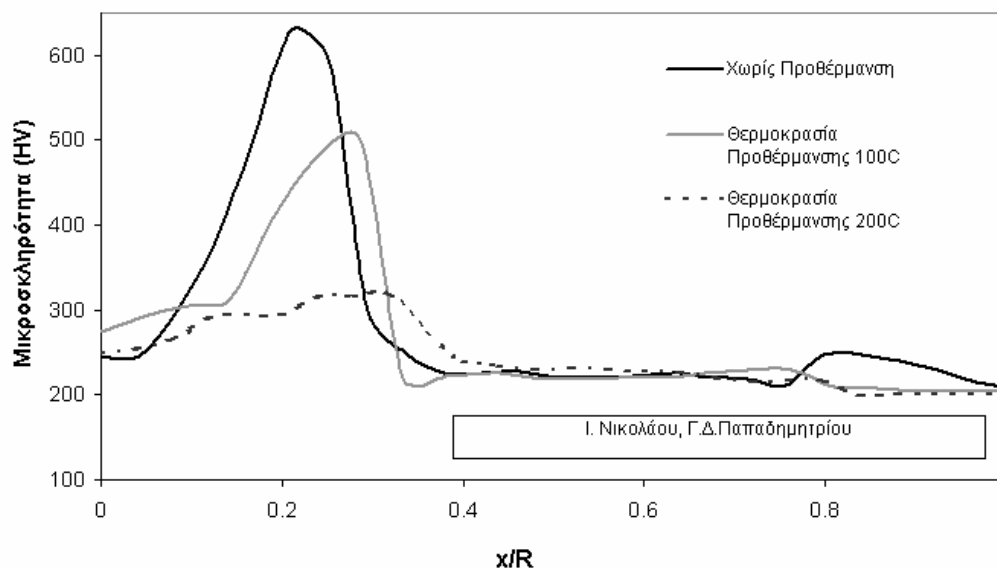
Προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση προθέρμανσης, επιλέχθησαν εκείνες οι παράμετροι συγκόλλησης στις οποίες παρατηρείται μέγιστη σκληρότητα (SI, SIV). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.3.2 και 2.3.3. Βάσει αυτών αποδεικνύεται ότι η προθέρμανση στους 100°C δεν εξαλείφει την παρουσία δομών με σκληρότητα χαμηλότερη από 300HV αλλά αυτό επιτυγχάνεται οριακά μόνο με προθέρμανση στους 200°C.

Συνοπτικά, οι παρατηρήσεις που προέκυψαν μεταλλογραφικά και με βάση τις μικροσκληρομετρήσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.6.

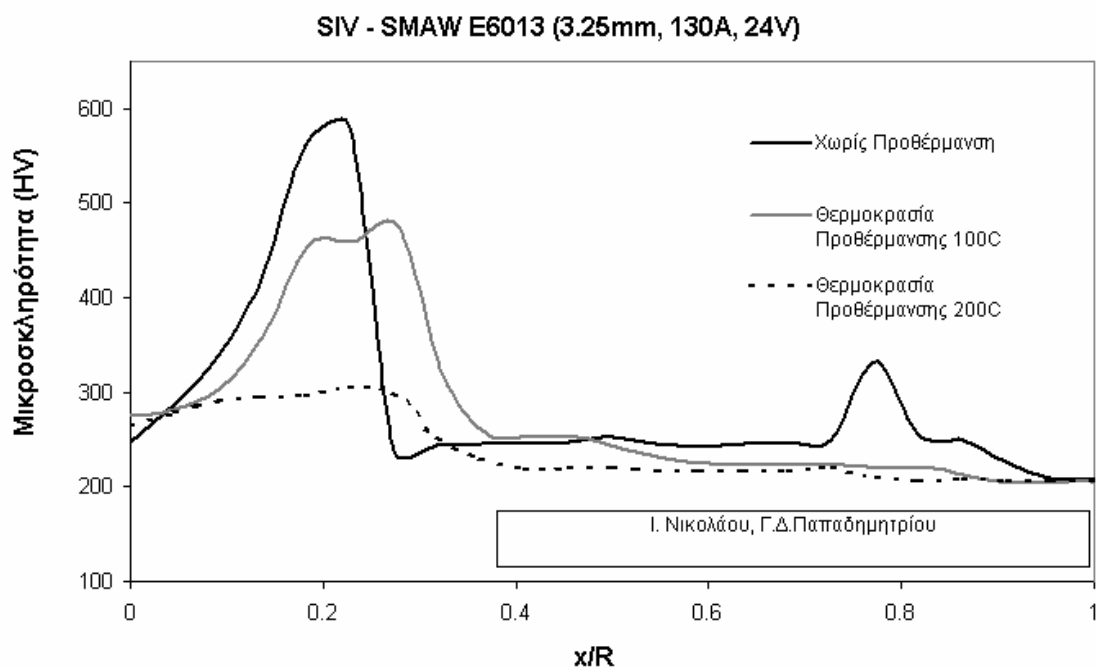


Σχήμα 2.3.2: Προφίλ μικροσκληροτήτων των συγκολλημένων δοκιμίων (χωρίς προθέρμανση) σε τομή κάθετη στον διαμήκη άξονα των ράβδων

SI - SMAW E6013 (4mm, 160A, 29V)



Σχήμα 2.3.3: Επίδραση της προθέρμανσης των ράβδων στην μικροσκληρότητα συγκολλημένων δοκιμίων σε τομή κάθετη στον διαμήκη άξονα των ράβδων  
(Α/Α SI, SI-1, SI-2, βλ. Πίνακα 2.3.2)



Σχήμα 2.3.4: Επίδραση της προθέρμανσης των ράβδων στην μικροσκληρότητα συγκολλημένων δοκιμίων σε τομή κάθετη στον διαμήκη άξονα των ράβδων  
(Α/Α SIV, SIV-1, SIV-2, βλ. Πίνακα 2.3.2)

A / A	Θ.Ε.Ζ S400	Ζώνη Τήξης	Θ.Ε.Ζ S500s
	X / R		
G I	0 - 0.25	0.25 - 0.83	0.83 - 1
G II	0 - 0.3	0.3 - 0.63	0.63 - 1
G III	0 - 0.15	0.15 - 0.67	0.67 - 1
G IV	0 - 0.27	0.27 - 0.84	0.84 - 1
S I	0 - 0.23	0.23 - 0.73	0.73 - 1
S I-1	0-0.28	0.28-0.75	0.75 - 1
S I-2	0 - 0.28	0.28 - 0.64	0.64 - 1
S II	0 - 0.33	0.33 - 0.77	0.77 - 1
S IV	0 - 0.23	0.23 - 0.73	0.73 - 1
S IV-1	0 - 0.28	0.28 - 0.74	0.74 - 1
S IV-2	0 - 0.28	0.28 - 0.63	0.63 - 1

Πίνακας 2.3.5: Αντιστοιχία των τιμών (X / R) των οποίων η μικροσκληρότητα δίνεται στα Σχήματα 2.3.1, 2.3.2 και 2.3.3 με τις διάφορες ζώνες συγκόλλησης.

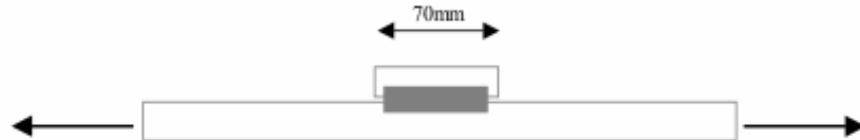
<b>A / A</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
<b>G I</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>G I-1</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>G I-2</b>	Σκληρότητα αποδεκτή. Ικανοποιητική συγκόλληση
<b>G II</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ - Ατελής τήξη
<b>G III</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>G III-1</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>G III-2</b>	Σκληρότητα αποδεκτή. Υποκοπή (κάψιμο) μετάλλου λόγω υψηλής θερμικής παροχής
<b>G IV</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ - υποκοπή "κάψιμο" μετάλλου
<b>S I</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>S I-1</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>S I-2</b>	Σκληρότητα αποδεκτή. Ικανοποιητική συγκόλληση
<b>S II</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>S III</b>	Ατελής τήξη
<b>S IV</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>S IV-1</b>	Μη αποδεκτή λόγω υψηλής σκληρότητας στην ΘΕΖ
<b>S IV-2</b>	Σκληρότητα αποδεκτή. Ικανοποιητική συγκόλληση

Πίνακας 2.3.6: Παρατηρήσεις που αφορούν την ποιότητα των συγκολλήσεων

### Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια ράβδων χαλύβων S400 και S500s στις οποίες είχαν συγκολληθεί καβίλιες μήκους 70 mm (5 X διάμετρο ράβδου, Φ=16mm). Το ωφέλιμο μήκος των εφελκυσόμενων ράβδων (απόσταση μεταξύ αρπαγών) ήταν στην περίπτωση των χαλύβων S400 (Φ=25mm), 410mm, ενώ στην περίπτωση των χαλύβων S500s (Φ20), 290mm. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 16 εφελκυσμοί (8 για κάθε είδος χάλυβα, 4 χωρίς προθέρμανση και 4 με προθέρμανση). Οι παράμετροι συγκόλλησης με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις για την δημιουργία των δοκιμών εφελκυσμών, δίνονται στον Πίνακα 2.3.6. Η επιλογή των συνθηκών συγκόλλησης έγινε σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.5, δηλαδή επιλέχθηκαν οι συνθήκες εκείνες στις οποίες παρατηρείται αποδεκτή σκληρότητα (SI-2, SIV-2, GI-2, GIII-2) και για λόγους αντιπαράθεσης συμπεριλήφθηκαν και οι αντίστοιχες στις οποίες δεν έχει προηγηθεί προθέρμανση και που είναι μη

αποδεκτές (SI, SIV, GI, GIII). Οι περιπτώσεις GII, GIV, SII δεν συμπεριλήφθηκαν διότι οι σκληρότητες που παρατηρούνται είναι μικρότερες σε σχέση με τις SI, SIV, GI, GIII στις οποίες δεν έχει προηγηθεί προθέρμανση και συνεπώς δεν παρουσιάζουν τόσο έντονο το πρόβλημα της ψαθυροποίησης. Συνεπώς οι συνθήκες SI, SIV, GI, GIII εμφανίζουν το εντονότερο πρόβλημα ψαθυροποίησης και συνεπώς έντονο ενδιαφέρον. Αφ' ετέρου οι αντίστοιχες περιπτώσεις στις οποίες έχει προηγηθεί προθέρμανση στους 200°C θεωρούνται με βάση τις μικροσκληρομέτρήσεις αποδεκτές.



Σχήμα 2.3.5: Δοκίμιο εφελκυσμού ράβδου οπλισμού (S400 ή S500s) με συγκολλημένο τεμάχιο ράβδου (καβίλια) χάλυβα Tempcore (D=16mm)

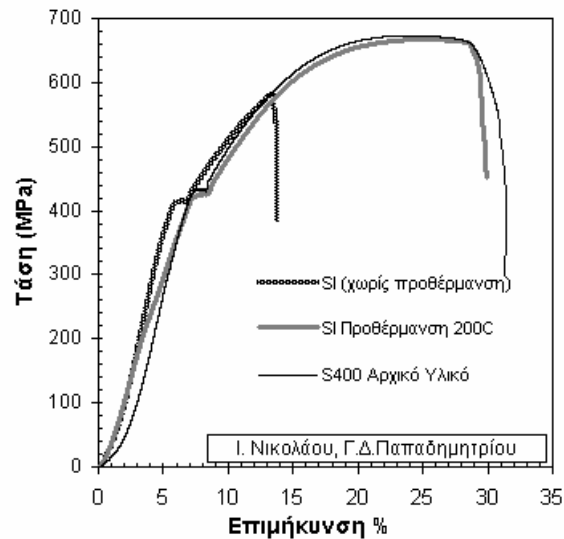
Τεχνική Συγκόλλησης	A / A	Τύπος Ηλεκτροδίου	Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)	Ενταση Ρεύματος (A)	Τάση (V)	Θερμοκρ. Προθέρμ.
GMAW	G I	ER-70S6	1.2	190	21	-
GMAW	G I-2	ER-70S6	1.2	190	21	200
GMAW	G III	ER-70S6	1.2	240	26	-
GMAW	G III-2	ER-70S6	1.2	240	26	200
SMAW	S I	E 6013	4	160	29	-
SMAW	S I-2	E 6013	4	160	29	200
SMAW	S IV	E 6013	3.25	130	24	-
SMAW	S IV-2	E 6013	3.25	130	24	200

Πίνακας 2.3.7: Συνθήκες συγκόλλησης καβίλιων

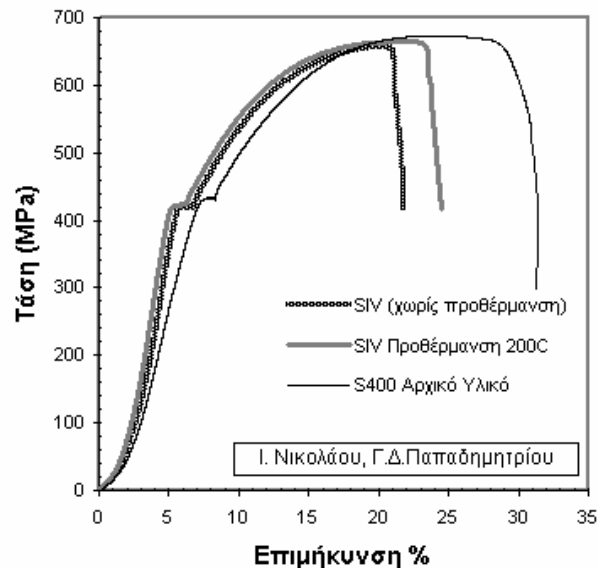
### Επίδραση των Συγκολλήσεων στα Μηχανικά Χαρακτηριστικά των Χαλύβων S400

Οι εφελκυσμοί που αφορούν συγκολλήσεις σε χάλυβες οπλισμού της κατηγορίας S400 δείχνουν ότι, ανεξάρτητα από τις συνθήκες συγκόλλησης το όριο διαρροής των ράβδων παραμένει πρακτικά αναλλοίωτο. Το όριο θραύσης μόνο σε μία περίπτωση (SI) παρουσιάζει πτώση ανεξάρτητα από το αν έχει προηγηθεί προθέρμανση ή όχι. Σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρήθηκε ότι η επίμηκυνση μετά την θραύση επηρεάζεται σημαντικά τόσο από τις παραμέτρους συγκόλλησης όσο και από την θερμοκρασία προθέρμανσης. Θερμοκρασία

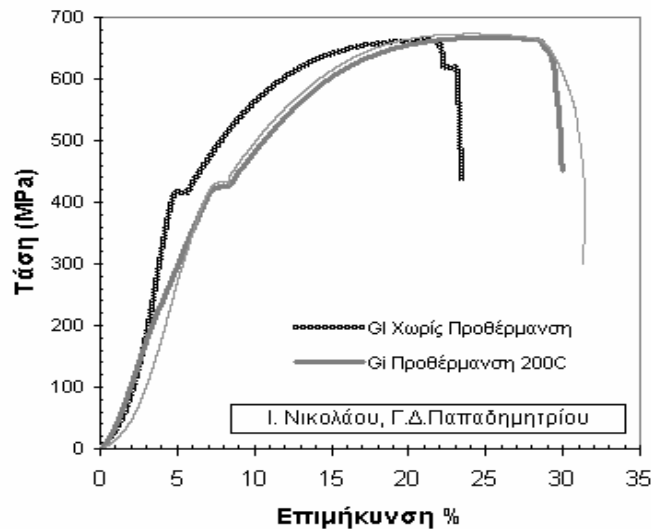
προθέρμανσης 200°C, οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ολκιμότητας και κατά συνέπεια της δυσθραυστότητας των ράβδων.



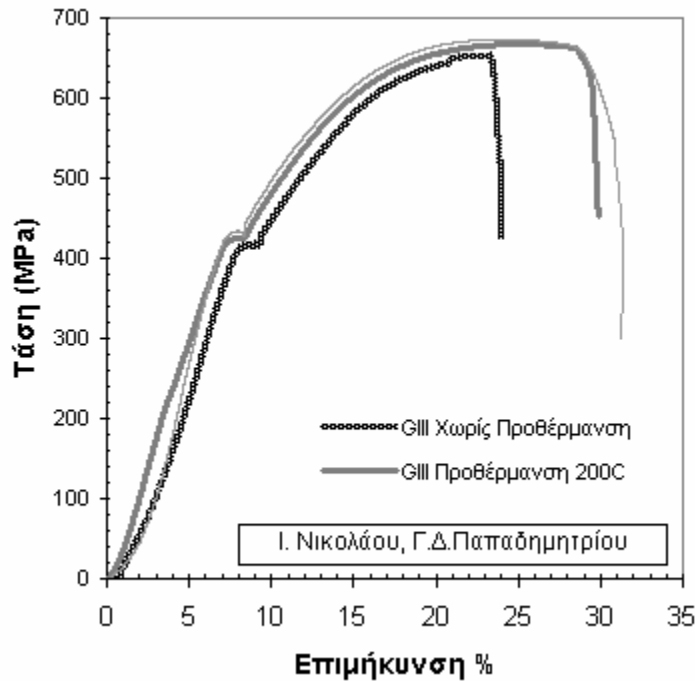
Σχήμα 2.3.6: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S400 (D=25mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης SI και SI-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1. Παρατίθεται και τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα S400 για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 2.3.7: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S400 (D=25mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης SIV και SIV-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1. Παρατίθεται και τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα S400 για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 2.3.8: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S400 (D=25mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης GI και GI-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1. Παρατίθεται και τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα S400 για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 2.3.9: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S400 (D=25mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης GIII και GIII-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1. Παρατίθεται και τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα S400 για λόγους σύγκρισης.



Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού σε χάλυβες της κατηγορίας S400 συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.8.

A / A	Όριο Διαρροής $f_y$ (Mpa)	Όριο Θραύσης $f_t$ (Mpa)	$f_t / f_y$	$e_5$ (%) <sup>1</sup>	$e_{u,t}$ ·% <sup>2</sup>
<b>S400 (KTX)</b>	400	500	>1.05	-	14
<b>S400</b>	419	670	1.60	20	25
<b>G I</b>	418	663	1,58	15	19
<b>G I-2</b>	420	614	1,46	19	24
<b>G III</b>	417	654	1,57	13	17
<b>G III-2</b>	415	667	1,57	16	23
<b>S I</b>	415	582	1,40	5	8,5
<b>S I-2</b>	420	667	1,58	20	24
<b>S IV</b>	420	659	1,57	11	16
<b>S IV-2</b>	418	665	1,59	16	20

<sup>1</sup> παραμόρφωση % στο μέγιστο φορτίο

<sup>2</sup> παραμόρφωση % θραύσης

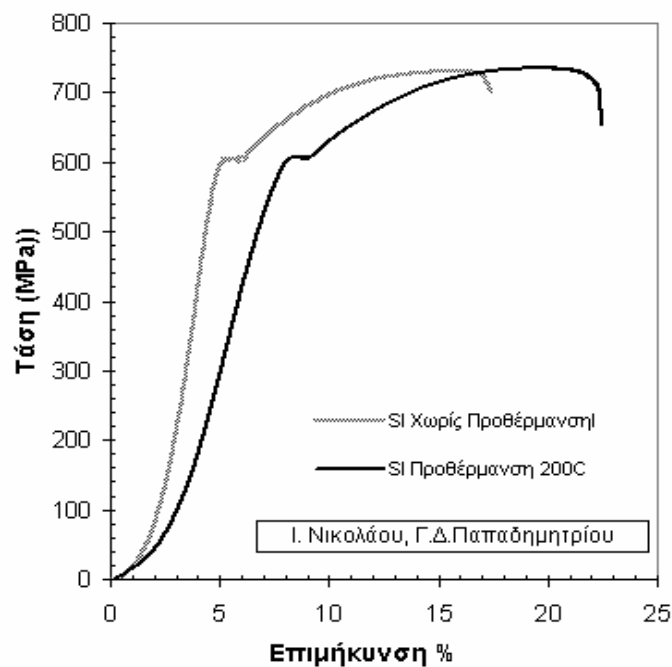
Πίνακας 2.3.8: Μηχανικά χαρακτηριστικά ράβδων οπλισμού S400, οι οποίες φέρουν κατά παράθεση συγκόλληση στο μέσον τους

Στον Πίνακα 2.3.8, δίνονται και οι ελάχιστες απαιτήσεις για τους χάλυβες της κατηγορίας S400 σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (KTX). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές εφελκυσμού με τις προδιαγραφόμενες από τον κανονισμό δείχνει ότι μόνο σε μία περίπτωση τα μηχανικά χαρακτηριστικά δεν ικανοποιούνται (SI) και συγκεκριμένα η επιμήκυνση θραύσης είναι μικρότερη (8,5%) από την προδιαγραφόμενη (14%). Συνεπώς ακόμα και χωρίς προθέρμανση των ράβδων τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων που φέρουν συγκολλήσεις στο μέσο τους ικανοποιούν (με εξαίρεση την περίπτωση SI) τα ονομαστικά μηχανικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας τους.

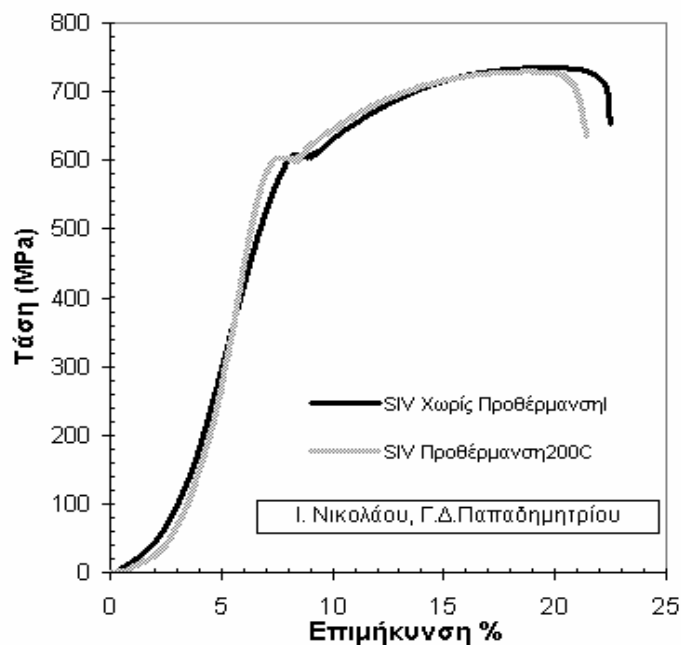
Η προθέρμανση των ράβδων οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ολκιμότητας των ράβδων δηλαδή αυξάνεται η επιμήκυνση θραύσης. Αφετέρου, με την εφαρμογή προθέρμανσης δεν αλλοιώνονται πρακτικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αρχικής ράβδου και συνεπώς ο χάλυβας οπλισμού με την συγκολλημένη καβίλια στο μέσο του συμπεριφέρεται σαν αυτόν που δεν φέρει καμία συγκόλληση (αρχικό υλικό).

## Επίδραση των Συγκολλήσεων στα Μηχανικά Χαρακτηριστικά των Χαλύβων S500s

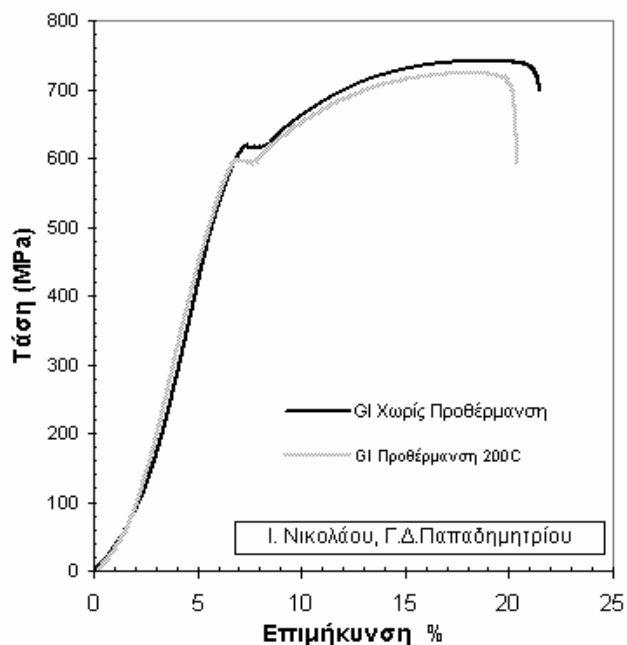
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις συγκολλήσεις σε χάλυβες οπλισμού της κατηγορίας S500s. Οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων της κατηγορίας αυτής δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές ανάλογα με τις συνθήκες συγκόλλησης. Παρόλ' αυτά η συγκόλληση με υψηλές θερμικές παροχές (GIII) θα πρέπει να αποφεύγεται διότι αν και δεν παρατηρούνται ψαθυρά συστατικά στην μικροδομή οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν τον κίνδυνο της υποκοπής με αποτέλεσμα να παρατηρείται μειωμένη ολκιμότητα (Σχήμα 2.3.13).



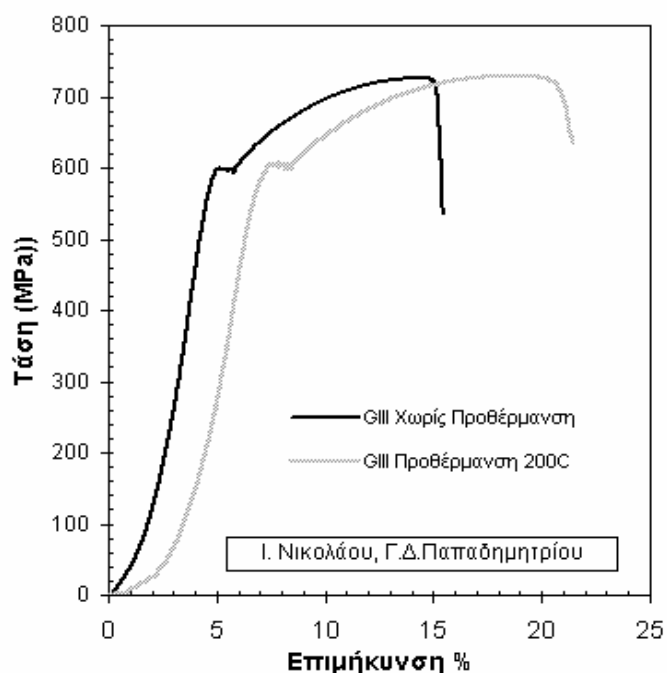
Σχήμα 2.3.10: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S500s (D=20mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης GI και GI-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.11: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S500s (D=20mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης SIV και SIV-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.12: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S500s (D=20mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης GI και GI-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.13: Διαγράμματα εφελκυσμού σε ράβδους χάλυβα S500s (D=20mm), στις οποίες έχει συγκολληθεί καβίλια χάλυβα S500s (D=16mm) με παραμέτρους συγκόλλησης GIII και GIII-2 σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3.1.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού σε χάλυβες της κατηγορίας S500s συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.9.

A / A	Όριο Διαρροής $f_y$ (Mpa)	Όριο Θραύσης $f_t$ (Mpa)	$f_t / f_y$	$e_5$ (%) <sup>1</sup>	$e_{u,t}$ % <sup>2</sup>
S500s (KTX)	500	550	>1,05	-	12
S500s	609	741	1,21	15	18
G I	609	741	1,21	12	14
G I-2	616	729	1,18	13	14,5
G III	600	725	1,21	9,5	12
G III-2	602	729	1,21	15	17
S I	604	730	1,21	11	13
S I-2	607	734	1,21	13	15,5
S IV	606	705	1,16	15	18
S IV-2	635	740	1,16	13	16

<sup>1</sup> παραμόρφωση % στο μέγιστο φορτίο

<sup>2</sup> παραμόρφωση % θραύσης

Πίνακας 2.3.9: Μηχανικά χαρακτηριστικά ράβδων οπλισμού S500s, οι οποίες φέρουν κατά παράθεση συγκόλληση στο μέσον τους

Στον Πίνακα 2.3.9, δίνονται και οι ελάχιστες απαιτήσεις για τους χάλυβες της κατηγορίας S500s σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές εφελκυσμού με τις προδιαγραφόμενες από τον κανονισμό δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων ράβδων βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με τον ΚΤΧ. Σε μία περίπτωση (GIII) η επιμήκυνση βρίσκεται σε οριακά επίπεδα (12%) και ο κύριος λόγος είναι η υποκοπή (το κάψιμο) του μετάλλου λόγω υψηλού ρεύματος συγκόλλησης (240A). Σε αυτή τη περίπτωση και ο χάλυβας διαμέτρου 16mm (καβίλια) παρουσιάζει έντονο το πρόβλημα υποκοπής και συνεπώς αναμένεται να έχει μικρότερη αντοχή και επιμήκυνση.

Η προθέρμανση των ράβδων δεν επηρεάζει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων της κατηγορίας S500s. Αυτό άλλωστε ήταν και αναμενόμενο μιάς και οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων της κατηγορίας αυτής δεν είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητες κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων.

#### **2.3.4 Σύνοψη και Συμπεράσματα**

Οι συγκολλήσεις αποτελούν χρήσιμο και συχνά αναγκαίο εργαλείο κατά την επισκευή-ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Στην πράξη, σπάνια οι συγκολλήσεις θεωρούνται τέλειες και απαλλαγμένες από σφάλματα και συνεπώς τίθεται το ερώτημα σε ποιο βαθμό μια συγκόλληση που δεν είναι ιδανική μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις για τις οποίες προορίζεται. Για τον λόγο αυτό έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια η φιλοσοφία της λεγόμενης «καταλληλότητας για την επιδιωκόμενη χρήση» (fitness for purpose), που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αποδοχή ορισμένων σφαλμάτων (defect tolerance). Κρίνεται συνεπώς σκόπιμο να καθορισθούν οι ανοχές αποδοχής σφαλμάτων που παρουσιάζονται κατά την συγκόλληση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Απαιτείται λοιπόν περαιτέρω διερεύνηση στην επίδραση που έχουν στην συγκόλληση αποκλίσεις κατά τον σχεδιασμό και την εκτέλεση τους από τα υπάρχοντα πρότυπα και κανονισμούς. Όμως όπως έχει αποδειχθεί από προκαταρκτικές έρευνες στο Ε.Μ.Π. (Νικολάου, 2004) είναι δυνατή η διαφοροποίηση του σχεδιασμού των συγκολλήσεων από τις προδιαγραφές των προτύπων χωρίς να παραβλέπεται η ποιότητα των συγκολλήσεων.

Σημαντικά ερωτηματικά παραμένουν στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να ελεγχθεί η αντοχή των συγκολλήσεων με τον κατάλληλο σχεδιασμό σε δυναμικές καταπονήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αποδοχή των σφαλμάτων στις

συγκολλήσεις πρέπει να ελεγχθεί περισσότερο συστηματικά στην περίπτωση δυναμικών φορτίσεων.

Κατά την διάρκεια των συνδέσεων με συγκόλληση οι μηχανικές ιδιότητες και η μικροδομή παρουσιάζουν μεταβολές. Στην πειραματική έρευνα που διεξήχθη στο Ε.Μ.Π. (Νικολάου κ.α., 2004) ελέγχθηκε η επίδραση των κατά παράθεση συγκολλήσεων στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων οπλισμού των κατηγοριών S400 και S500s. Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με διαφορετικές τεχνικές και συνθήκες συγκόλλησης (λειτουργικές παράμετροι και θερμοκρασία προθέρμανσης).

Καθορίσθηκαν οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης με δύο τεχνικές (SMAW – GMAW) με τις οποίες ικανοποιούνται τα εξής:

α) Δεν δημιουργούνται ψαθυρά συστατικά στις διάφορες περιοχές της συγκόλλησης

β) Δημιουργούνται ικανοποιητικές συγκολλήσεις από γεωμετρικής άποψης, δηλαδή να αποφεύγεται «κάψιμο» του μετάλλου ή ατελή τήξη και σύνδεση.

Με τις παραπάνω συνθήκες ικανοποιούνται τα παραπάνω ταυτόχρονα και για τις 3 εξετασθείσες διαμέτρους ράβδων οπλισμού αλλά και για τις δύο κατηγορίες χαλύβων.

Οι συνθήκες συγκόλλησης επηρεάζουν σημαντικά τόσο την μικροδομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης όσο και των μετρούμενων μικροσκληροτήτων. Με τον όρο θερμικά επηρεασμένη ζώνη εννοούμε την περιοχή του μετάλλου που συνορεύει με την ζώνη τήξης (δηλαδή το τηγμένο μέταλλο) το οποίο έχει θερμανθεί σε μια θερμοκρασία κατώτερη από το σημείο τήξης αλλά υψηλότερη από κρίσιμες θερμοκρασίες μεταλλουργικών μετασχηματισμών. Οι μικροδομές στην ζώνη αυτή εξαρτώνται από τον ρυθμό απόψυξης από αυτήν την θερμοκρασία θέρμανσης και από την χημική σύσταση.

Αποδείχτηκε ότι, η συγκόλληση των χαλύβων οπλισμού της κατηγορίας S400 ανεξάρτητα από την επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, οδηγεί στην δημιουργία σκληρών και ψαθυρών συστατικών στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δηλαδή την περιοχή του μετάλλου που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο τήξης. Η αδυναμία εξάλειψης μαρτενσιτικών δομών στη ΘΕΖ με κατάλληλη χρήση παραμέτρων συγκόλλησης οδήγησε στην ανάγκη προθέρμανσης των ράβδων. Η αποτελεσματικότητα της θερμοκρασίας προθέρμανσης στην εξάλειψη σκληρών και ψαθυρών συστατικών (εκτός από την χημική σύσταση του χάλυβα) εξαρτάται από τις παραμέτρους συγκόλλησης.

Προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση προθέρμανσης, έγινε επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης στις οποίες παρατηρείται μέγιστη σκληρότητα (SI, SIV). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.3.3 και 2.3.4. Βάσει

αυτών αποδεικνύεται ότι η προθέρμανση στους 100°C δεν εξαλείφει την παρουσία δομών με σκληρότητα χαμηλότερη από 300HV αλλά αυτό επιτυγχάνεται οριακά μόνο με προθέρμανση στους 200°C.

Ακόμα και χωρίς προθέρμανση των ράβδων τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων (S400) που φέρουν συγκολλήσεις στο μέσο τους ικανοποιούν (με εξαίρεση την περίπτωση SI) τα ονομαστικά μηχανικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας τους.

Η προθέρμανση των ράβδων οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ολκιμότητας των ράβδων (S400) δηλαδή αυξάνεται η επιμήκυνση θραύσης. Αφετέρου, με την εφαρμογή προθέρμανσης δεν αλλοιώνονται πρακτικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αρχικής ράβδου και συνεπώς ο χάλυβας οπλισμού με την συγκολλημένη καβίλια στο μέσο του συμπεριφέρεται σαν αυτόν που δεν φέρει καμία συγκόλληση (αρχικό υλικό).

Με βάση τα διαγράμματα εφελκυσμού, για τους χάλυβες της κατηγορίας S400, στην περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί προθέρμανση μεγαλύτερες θερμικές παροχές συγκόλλησης δείχνουν βελτίωση της ολκιμότητας και αύξηση του ορίου θραύσης. Η βελτίωση αυτή δεν είναι σημαντική και αφετέρου η συγκόλληση με χρήση υψηλών θερμικών παροχών αυξάνει τον κίνδυνο δημιουργίας γεωμετρικών σφαλμάτων και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται. Στην περίπτωση που έχει προηγηθεί προθέρμανση των ράβδων, αντίθετα φαίνεται ότι μικρότερες θερμικές παροχές οδηγούν σε βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, προτείνεται οι συγκολλήσεις να πραγματοποιούνται εφόσον έχει προηγηθεί προθέρμανση στους 200°C με μικρότερες ταχύτητες προχώρησης και χαμηλότερες θερμικές παροχές.

Με βάση τα παραπάνω, πραγματοποιούνται ικανοποιητικές συγκολλήσεις στους χάλυβες οπλισμού S400. Ελέγχθηκε η επίδραση αυτών των συνθηκών συγκόλλησης στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων S500s. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συγκολλήσεις που βελτιστοποιούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων S400 (Σχήμα 2.3.6 και 2.3.8), είναι απολύτως ικανοποιητικές και στην περίπτωση των χαλύβων S500s (Γράφημα 2.3.10 και 2.3.12).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές εφελκυσμού με τις προδιαγραφόμενες από τον κανονισμό δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων ράβδων (S500s) βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με τον ΚΤΧ.

Προτείνεται με βάση τα παραπάνω όταν πρόκειται να συγκολληθούν χάλυβες της κατηγορίας S400 να πραγματοποιούνται τα εξής:

1. Προθέρμανση των ράβδων στους 200°C
2. Συγκόλληση με τις συνθήκες της περίπτωσης SIV (SMAW) και GI (GMAW)
3. Η έναυση και το σβήσιμο του τόξου θα πρέπει να γίνεται επί της καβίλιας (η οποία είναι συγκολλησίσιμης ποιότητας) και όχι στον χάλυβα S400.
4. Συγκόλληση σε ένα μόνο πέρασμα (κορδόνι-πάσο)

Επιπλέον η έκθεση των χαλύβων οπλισμού σε υψηλές θερμοκρασίες και η παραμένουσα αντοχή τους κατά την απόψυξη τους επηρεάζεται κυρίως από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα. Η επίδραση της θέρμανσης στους χάλυβες οπλισμού έχει διερευνηθεί από διάφορους ερευνητές. Από την άλλη μεριά η διαφοροποίηση των κατηγοριών χάλυβα οπλισμού ανάλογα με την χημική τους σύσταση και την διαδικασία παραγωγής τους δεν επιτρέπει ασφαλή συμπεράσματα στην περίπτωση του χάλυβα οπλισμού S500s που διατίθεται σήμερα στην Ελλάδα (Θερμής έλασης με άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία (TEMPCORE) και θερμής έλασης (Μικροκραματωμένοι με βανάδιο)). Επίσης, οι ιδιότητες των χαλύβων που έχουν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες τόσο στην κόπωση όσο και στην κρούση (δυναμικές καταπονήσεις) δεν αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Η εκτίμηση της επίδρασης μίας ενδεχόμενης θέρμανσης στις ράβδους οπλισμού πρέπει να συγκριθεί με ενδεχόμενες μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων τους μετά από αντίστοιχη θέρμανση.

Τέλος η γήρανση στους χάλυβες είναι φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο στους χάλυβες με χαμηλό ποσοστό άνθρακα. Οι χάλυβες οπλισμού που διατίθενται σήμερα στην Ελλάδα για να επιδέχονται συγκόλληση καθίσταται απαραίτητο η περιεκτικότητα σε άνθρακα (και του ισοδύναμου άνθρακα) να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ( $C_{eq} < 0.50$ ). Η συμπεριφορά των χαλύβων της κατηγορίας S500s (Μικροκραματωμένοι και Tempcore) αλλά και παλαιότερων κατηγοριών που συναντώνται σε κατασκευές που έχουν υποστεί γήρανση δεν έχει διερευνηθεί.

### **Βιβλιογραφία**

- 2.3-1 **Δρίτσος Σ.** (2000, 2001): "Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα", σελ. 309, Βιβλ. Παπασωτηρίου.
- 2.3-2 **ΕΛΟΤ-959** (1990), "Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος"
- 2.3-3 **ΕΛΟΤ-971** (1994), "Συγκολλησιμοί Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος"
- 2.3-4 **Νικολαού Ι.** (2004), Διδακτορική Διατριβή.



- 2.3-5 **Παπαδημητρίου Γ.** (1990), "Εισαγωγή στην Μεταλλουργία, την Τεχνολογία και τον Έλεγχο των Συγκολλήσεων".
- 2.3-6 **Παπαδημητρίου Γ., Σούτης Σ., Μπούριθης Ε. & Μουγιάκος Σ.** (1999), "Πειραματική Μελέτη της Συγκολλησιμότητας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος", Πρακτικά 13ο Συνέδριο Σκυροδέματος, σελ. 481-488.
- 2.3-7 **Παπαδημητρίου Γ., Κορδάτος Ι., Νικολάου Ι. & Μιχαλουδάκη Μ.** (2000), "Ραδιογραφικός Έλεγχος Συγκολλήσεων σε Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος", Πρακτικά 2ο Εθνικό Συνέδριο ΕΛΕΜΚΕ.
- 2.3-8 **Παπαδημητρίου Γ., Νικολάου Ι.** (2001), "Αντοχή Χάλυβα Οπλισμού Σκυροδέματος Μετά από Θέρμανση", Πρακτικά 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών.
- 2.3-9 **ΥΠΕΧΩΔΕ** (2000), Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων "Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος", ΦΕΚ 381/Β/24-3-2000 και Εν.Δελτ.ΤΕΕ τεύχ.2100, 41-112, Αθήνα.
- 2.3-10 **American Welding Society** (1992), "Structural Welding Code - Reinforcing Steel", A.W.S. Miami, Florida.
- 2.3-11 **Campillo B., Perez R. & Martinez L.** (1996), "Study of Aging and Emrittlement of Microalloyed Steel Bars", Journal of materials engineering and Performance, Vol 5, pp 615-620.
- 2.3-12 **Corderoy D.J.H., Pearson H.** (1983), Australian Welding Research, Vol.8, February 1980, pp 46-49.
- 2.3-13 **CEB Bulletin No 162** (1983), "Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading", Paris.
- 2.3-14 **CEN-247** (1997), British Standart Specifications for "Metal Arc Welding of Steel for Concrete Reinforcement" (BS 7123:1989).
- 2.3-15 **Defourny J., D'Hayer R & Van de Brink S.H.** (1982), "Weldability and the Fatigue Resistance of FeB500 Concrete Reinforcing Steels", Revue de la Soudure, Vol 38, pp 61-82.
- 2.3-16 **Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton** (1989), Structural Welding Code - Reinforcing Steel (1992), ANSI/AWS D1,4-92.
- 2.3-17 **DIN 4099** (1985), "Welding of Reinforcing Steel - Execution of Welding Work and Testing".
- 2.3-18 **Dritsos S., Taylor C. & Vadoros K.** (1997), "Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Structures by Concrete Jacketing", Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repair, Vol.3, 391-402, Edinburgh.

- 2.3-19 **Dritsos S., Vadoros K. & Taylor C.** (1998a), "Shaking Table tests on a Retrofitted, Small Scale, R.C. Model Building" Proc. of the 6<sup>th</sup> CECED Conference: Seismic Design Practice into the Next Century, 525-533, Oxford.
- 2.3-20 **Dritsos S., Vadoros K. & Taylor C.** (1998b), "Retrofitting of Reinforced Concrete Frame Buildings" CD Proc. of IABSE Colloquium, Paper No 2102, Berlin.
- 2.3-21 **Dritsos S., Georgakopoulou M.** (1999), "Concrete Jacketing for Seismic Strengthening", CD Proc. of fib Symposium 1999: Structural Concrete-The Bridge Between People, Paper No 395, Prague. 60B, No 1, March, pp7-13.
- 2.3-22 **Erasmus L.A., Puessegoda L.N.** (1977), "Strain Age Embrittlement of Reinforcing Steels", NZ Eng., Vol 32, August 1977, pp 178-183.
- 2.3-23 **Haferkorn H., Kuflewski A-C.** (1986), "Fatigue Strength of Concrete Reinforcement Welds", Schweisstechnik (Berlin), Vol 36, Issue 11, pp 498-500.
- 2.3-24 **Holmes M., Anchor R. D., Cook G. M. E. & Crook R. N.** (1982), "The Effects of Elevated Temperatures on the Strength Properties of Reinforcing and Prestressing Steels", The Structural Engineer.
- 2.3-25 **ISO/CD 15630-1** (1998), "Steel for the Reinforcement and Prestressing of Concrete - Test Methods, Part I: Reinforcing Bars and Wires".
- 2.3-26 **Kochanowski, J.** (1996), "Effects of Welding on the Properties of joints made in reinforcing steels", Welding International, Vol 10(11), pp867-870.
- 2.3-27 **Mo Y.L., Kuo J.Y.** (1995), "Effect of Welding on Ductility of Rebars", Journal of Materials in Civil Engineering, November 1995, pp 283-285.
- 2.3-28 **Narayanaswamy V.P., Gupta V.K., Chhauda J.N. & Rajaraman A.** (1977), "Experimental Investigations on the Fatigue Behaviour of Cold-Worked Deformed Bars", Mater Constr Mater Struct, Vol 10, May-June, pp 153-158.
- 2.3-29 **Neves I. J., Rodrigues J.P.C. & Loureiro A.P.** (1996), "Mechanical Properties of Reinforcing and Prestressing Steels After Heating", Journal of Materials in Civil Engineering, November 1996, pp189-194.

- 2.3-30 **NF-A-35017** (1996), "Armatures pour Béton Armé - Barres et Couronnes soudables à Verrous de nuance FeE500", AFNOR.
- 2.3-31 **Pasko T.J.** (1973), "Fatigue of Welded Reinforcing Steel", ACI Journal. November, pp757-758.
- 2.3-32 **RILEM-FIP-CEM** (1973), "Reinforcement for Reinforced and Presented Concrete, Tentative Recommendations." Mat. Struct. Res. Testing (Paris), 79-118.
- 2.3-33 **Salah el Din A., Lovegrove J.M.** (1980), "Formation and Growth of Fatigue Cracks in Reinforcing Steel for Concrete", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol 3, pp 315-323.
- 2.3-34 **The Netherlands Institute of Welding** "The Weldability of Reinforcing Steel", IIW IX-916-88.