

Σχεδιασμός συγκολλήσεων με επικάλυψη σε χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος

Ι. Νικολάου

Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π., ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε.

Ε. Μπούριθης

Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π., ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε.

Γ.Δ.. Παπαδημητρίου

Καθηγητής, Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Σχολή Μηχανικών Μετ./Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Λέξεις κλειδιά: συγκόλληση, επικάλυψη, παράθεση, Tempcore

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσφέρει έναν οδηγό ασφαλούς εκτέλεσης των συγκολλήσεων με επικάλυψη. Το βασικό ερώτημα που συχνά αντιμετωπίζει ο Επιβλέπων μηχανικός είναι με ποιο τρόπο μπορεί να εκτελέσει μια «υγιή» συγκόλληση για δεδομένο μήκος αναμονής και διάμετρο ράβδου που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού, κατασκευάστηκαν χάρτες στους οποίους ανάλογα με το διαθέσιμο μήκος επικάλυψης (L_0) και διάμετρο των ράβδων, προτείνεται ο βέλτιστος τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων, δηλαδή καθορίζεται ο σχεδιασμός της συγκόλλησης, το μήκος ραφής, η τεχνική και το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επικάλυψη των ράβδων οπλισμού και η μεταφορά των δυνάμεων μέσω του σκυροδέματος απαιτεί σχετικά μεγάλα μήκη παράθεσης και δεν είναι σπάνιο το φαινόμενο οι αναμονές να έχουν ιδιαίτερα μικρό μήκος που να μην επαρκεί. Στις περιπτώσεις αυτές ένας ιδιαίτερα αποτελεσματικός τρόπος σύνδεσης είναι η συγκόλληση των αναμονών με τις νέες ράβδους οπλισμού κατά την οποία γίνεται η μεταφορά των δυνάμεων από την μία ράβδο στην άλλη μέσω της συγκόλλησης. Η ανάγκη για μεταφορά των δυνάμεων μπορεί να παρουσιαστεί τόσο στην περίπτωση επέκτασης μιας υπάρχουσας αναμονής ράβδου οπλισμού όσο και σε επεμβάσεις κατά την αντικατάσταση τμήματος διαβρωμένης ή λυγισμένης ράβδου. Τίθεται συνεπώς το ερώτημα σε ποιο βαθμό η συγκολλημένη σύνδεση μπορεί να ανταπεξέλθει λειτουργικά στις απαιτήσεις του δομικού στοιχείου.

Σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα και κανονισμούς, η συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τεχνικές: τη χειρωνακτική ηλεκτροσυγκόλληση τόξου με επενδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW) και την ημιαυτόματη ηλεκτροσυγκόλληση τόξου με κουλούρα σύρματος και προστατευτικό μίγμα αερίου CO_2-Ar (GMAW-MAG). Ανάλογα με την σχετική θέση των ράβδων οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε α) μετωπικές (άκρο με άκρο) και με επικάλυψη (παράθεση των ράβδων). Οι συγκολλήσεις με επικάλυψη είναι περισσότερο εύχρηστες σε σχέση με τις μετωπικές και αφετέρου αποτελούν συχνά την μόνη δυνατή επιλογή μιας και σε μικρές διαμέτρους ράβδων (διάμετρο μικρότερη από 20mm) η μετωπική συγκόλληση είναι πρακτικά αδύνατη. Η εκτέλεση τους εξ' άλλου δεν απαιτεί ιδιαίτερες ικανότητες εκ μέρους του συγκολλητή.

Στοιχεία για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής των συγκολλήσεων με επικάλυψη (παράθεση) παρέχονται από διάφορους σχετικούς κανονισμούς και δημοσιευμένες εργασίες (Issa C.A et al: 2005). Με βάση τον CEN 247 (1989), η αντοχή της ραφής της συγκόλλησης είναι ανάλογη με την αντοχή σε διάτμηση του ηλεκτροδίου, το μήκος της ραφής και του πάχους της και

δεν επηρεάζεται από τον σχεδιασμό της. Δηλαδή, για δεδομένη διάμετρο ράβδου, αντοχή ηλεκτροδίου και μήκος ραφής, μια συγκόλληση που πραγματοποιείται μονόπλευρα, συνεχής ή διακεκομμένη, και αμφίπλευρα χαρακτηρίζεται από την ίδια εφελκυστική αντοχή. Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 971 (1994), η εφελκυστική αντοχή μιας συγκόλλησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 90% της αρχικής αντοχής (όριο θραύσης) των χαλύβων οπλισμού. Από το prEN 17660 (2002) απαιτείται η εφελκυστική αντοχή να είναι τουλάχιστον ίση ή μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής των χαλύβων οπλισμού που έχουν συγκολληθεί. Επίσης προδιαγράφονται απαιτήσεις μόνο σχετικά με τις μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις, παρά το γεγονός ότι προβλέπονται και άλλοι σχεδιασμοί από άλλους ξένους σχετικούς κανονισμούς και πρότυπα και δεν γίνεται καμία αναφορά στην ολκιμότητα των συνδέσεων ή και στο όριο διαρροής, παράγοντες που καθορίζουν την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης των συγκολλημένων ράβδων.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα υπάρχοντα σχετικά πρότυπα ορίζουν διαφορετικές απαιτήσεις αλλά και διαφορετικούς τρόπους εκτέλεσης των συγκολλήσεων με αποτέλεσμα να επικρατεί συχνά σύγχυση τόσο στην εκτέλεση όσο και στις απαιτήσεις αντοχής των συγκολλήσεων. Στην πράξη είναι συχνά απαραίτητο να διαφοροποιηθεί ο σχεδιασμός της συγκόλλησης σε σχέση με τις προδιαγραφές που θέτουν τα πρότυπα. Είναι επίσης πιθανόν, το μήκος της ελεύθερης ράβδου που πρόκειται να συγκολληθεί να μην επαρκεί για την εκτέλεση του μήκους που προβλέπεται, ή επίσης να προκύπτουν προβλήματα πρόσβασης στο χώρο του δομικού στοιχείου ή άλλοι περιορισμοί (ιδιομορφίες στην γεωμετρία υπαρχόντων οπλισμών). Καθώς η συγκόλληση αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευέλικτο εργαλείο σύνδεσης των ράβδων, το βασικό ερώτημα που καλείται να απαντήσει ο Επιβλέπων μηχανικός είναι με ποιο τρόπο μπορεί να εκτελέσει μια «υγιή» συγκόλληση για δεδομένο μήκος αναμονής και διάμετρο ράβδου που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της κατασκευής.

Προκειμένου να απαντήσουμε σε αυτό το βασικό ερώτημα πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε συγκολλήσεις χαλύβων οπλισμού με επικάλυψη. Οι κυριότεροι παράμετροι που εξετάζονται περιλαμβάνουν το μήκος ραφής, τον σχεδιασμό της σύνδεσης, την διάμετρο της ράβδου οπλισμού, την τεχνική συγκόλλησης και την αντοχή του ηλεκτροδίου. Με βάση τα διαγράμματα εφελκυσμού των συγκολλήσεων (σύμφωνα με το PrEN 15630, 1998) καθορίστηκαν η αντοχή (R_e , R_m) και η ολκιμότητα, όπως καθορίζεται από το μέγεθος A_{gt} (ομοιόμορφη ελαστοπλαστική παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο). Στόχος των παραπάνω είναι να προσφέρουν έναν οδηγό ασφαλούς εκτέλεσης των συγκολλήσεων έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά τους να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2 ΥΛΙΚΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Κατά τον εφελκυσμό μιας συγκόλλησης με επικάλυψη παρατηρείται κάμψη της λόγω της αναπτυσσόμενης ροπής. Το φαινόμενο της κάμψης της συγκόλλησης με επικάλυψη εξαρτάται από την διάμετρο των ράβδων (d) και το μήκος επικάλυψης (L_o) των ράβδων. Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκαν 3 διαμέτροι ράβδων οπλισμού (8, 14, 20 mm) Tempcore της κατηγορίας B500C (ΕΛΟΤ 1421, 2005).

Η διατμητική αντοχή της ραφής συγκόλλησης αυξάνει με αύξηση της επιφάνειας της διατομής της, δηλαδή με αύξηση του μήκους (L_w), και του πάχους (tw) της ραφής, βλ. Σχήμα 1. Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση του μήκους ραφής, προετοιμάστηκαν συγκολλήσεις των οποίων το μήκος ραφής ήταν 2, 4, 6 και 8 φορές την διάμετρο της ράβδου. Αν και από τον KTX 2000 προβλέπεται μήκος ραφής $5d$, επιλέχθηκε το μήκος $4d$ που καλύπτει και τις απαιτήσεις του DIN 488 (1984). Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με δύο τεχνικές συγκόλλησης (GMAW, SMAW).

Η διατμητική αντοχή της ραφής εξαρτάται από την διατμητική αντοχή του ηλεκτροδίου. Γενικά αύξηση της εφελκυστικής αντοχής συνδέεται με αύξηση της διατμητικής αντοχής. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με το CEN 247 (1989) για ηλεκτρόδια με αντοχή σε εφελκυσμό μεγαλύτερη από 400 MPa, λαμβάνεται αντοχή σε διάτμηση ίση με 160 MPa. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν για κάθε τεχνική συγκόλλησης δύο ηλεκτρόδια διαφορετικής αντοχής. Η χημική σύσταση και τα

μηχανικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 1. Στην περίπτωση της τεχνικής GMAW χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις ηλεκτρόδιο διαμέτρου 1,2 mm ενώ στην περίπτωση της τεχνικής SMAW χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια διαμέτρου 2, 2,5 και 3,25 mm για διάμετρο οπλισμού 8, 14 και 20 mm, αντίστοιχα. Οι παράμετροι συγκόλλησης με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις, δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.

Με βάση τους κανονισμούς για δεδομένη διάμετρο ράβδου, αντοχή ηλεκτροδίου και μήκος ραφής μια συγκόλληση που πραγματοποιείται μονόπλευρα (συνεχής - διακεκομμένη) ή αμφίπλευρα χαρακτηρίζεται από την ίδια εφελκυστική αντοχή. Μια βασική διαφορά μεταξύ των διαφόρων σχεδιασμών είναι ότι το μήκος επικάλυψης (L_o) ράβδων δεν ταυτίζεται με το συνολικό μήκος ραφής (L_w). Το μήκος επικάλυψης ταυτίζεται με το συνολικό μήκος ραφής της συγκόλλησης μόνο στην περίπτωση των μονόπλευρων συνεχών συγκολλήσεων. Στις αμφίπλευρες συνεχείς συγκολλήσεις το μήκος ραφής είναι το διπλάσιο του μήκους επικάλυψης (μιας και εκτελείται και από τις δύο πλευρές) ενώ στις μονόπλευρες διακεκομμένες το μήκος ραφής είναι κατά 2cm (διάκενο μεταξύ συγκολλήσεων) μικρότερο από το μήκος επικάλυψης. Επίσης σημειώνεται ότι μήκος ραφής συγκόλλησης (L_w) μήκους 8d σε μια μονόπλευρη συνεχή ραφή αντιστοιχεί σε δύο συγκολλήσεις μήκους 4d στην περίπτωση μιας μονόπλευρης διακεκομμένης ή στην περίπτωση μιας αμφίπλευρης συνεχούς συγκόλλησης. Αντιθέτως το μήκος επικάλυψης των ράβδων (L_o) μιας μονόπλευρης ραφής με μήκος ραφής $L_w = 4d$ είναι ίσο με το μήκος επικάλυψης αμφίπλευρης συνεχούς συγκόλλησης συνολικού μήκους ραφής $L_w = 8d$.

Πίνακας 1. Μηχανικά χαρακτηριστικά ηλεκτροδίων συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν.

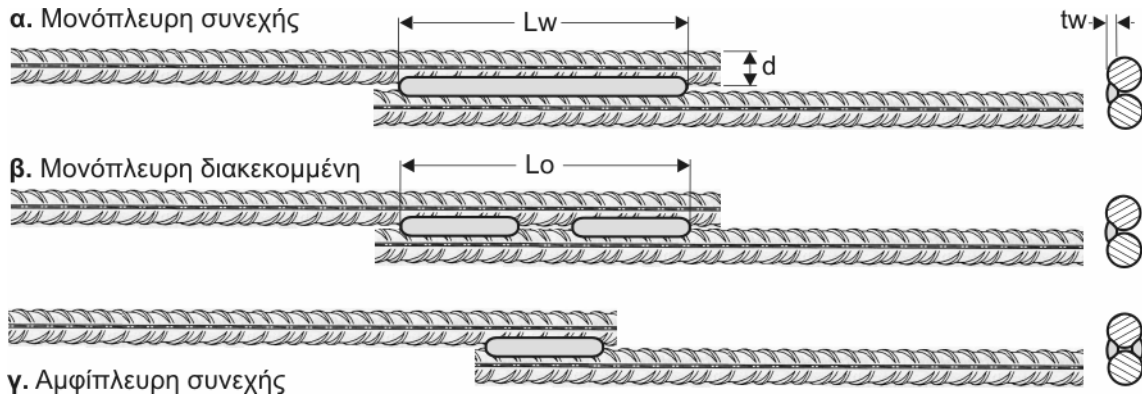
Τύπος Ηλεκτροδίου	Τεχνική Συγκόλλησης	Όριο Διαρροής (MPa)	Όριο Θραύσης (MPa)	Παραμόρφωση Θραύσης (ϵ_s^1)
ER 70S-6 (SG 2), AWS A 5.18	GMAW	420	540	25
ER 80S-G (SG 3), AWS A 5.1		500	580	25
E 6013, AWS A 5.1	SMAW	420	510	22
E 9018-G, AWS A 5.5		500-540	590-620	20

Πίνακας 2. Παράμετροι συγκόλλησης με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις.

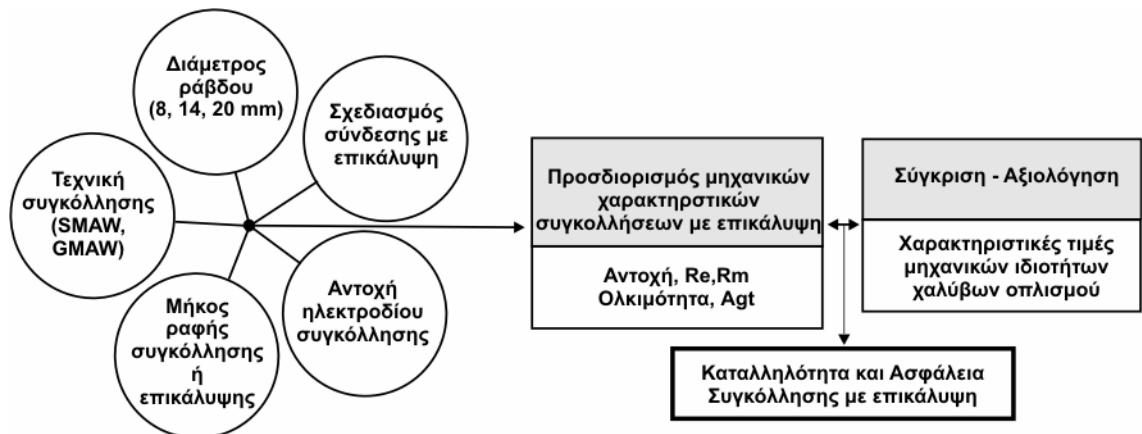
Διάμετρος Ράβδου (mm)	Τεχνική Συγκόλλησης	Ηλεκτρόδιο	Διάμετρος Ηλεκτροδίου (mm)	Ένταση ρεύματος (A)	Τάση (V)
8	GMAW	ER 70S-6	1,2	138	17
8		ER 80S-G	1,2	138	17
8	SMAW	E 6013	2,5	90	17
8		E 9018	2,5	90	17
14	GMAW	ER 70S-6	1,2	198	21
14		ER 80S-G	1,2	198	21
14	SMAW	E 6013	3,25	130	24
14		E 9018	3,25	130	24
20	GMAW	ER 70S-6	1,2	240	26
20		ER 80S-G	1,2	240	26
20	SMAW	E 6013	4	160	29
20		E 9018	4	160	29

Σύμφωνα με το εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 1421 (2005) και κανονισμό KTX 2000, προδιαγράφονται απαιτήσεις μόνο για τις μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις. Στην πράξη, είναι δυνατόν το διαθέσιμο μήκος επικάλυψης των ράβδων να μην επαρκεί για να εκτελεστεί το απαιτούμενο μήκος ραφής μιας μονόπλευρης διακεκομμένης συγκόλλησης, αλλά να επαρκεί για την εκτέλεση μιας αμφίπλευρης συνεχούς. Καθώς το μήκος επικάλυψης (L_o) των συγκολλήσεων

με επικάλυψη επηρεάζει και την γωνία κάμψης κατά τον εφελκυσμό εξετάστηκαν συγκολλήσεις διαφορετικού σχεδιασμού (μονόπλευρη συνεχής ραφή, μονόπλευρη διακεκομμένη ραφή και αμφίπλευρη συνεχής) προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν διαφοροποιήσεις (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Σχεδιασμός συγκολλήσεων με επικάλυψη (παράθεση) που εξετάστηκαν.



Σχήμα 2. Παραμετρικός χώρος διερεύνησης για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των συγκολλήσεων με επικάλυψη (παράθεση).

Από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (Σχήμα 2) προέκυψαν περίπου 100 διαφορετικές συγκολλήσεις οι οποίες ελέγχθησαν σε εφελκυσμό. Με βάση τα διαγράμματα εφελκυσμού προσδιορίστηκαν η αντοχή των συγκολλήσεων (R_e , R_m) και η ολκιμότητα, όπως καθορίζεται από τα μεγέθη A_{gt} (ομοιόμορφη ελαστοπλαστική παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης της αντοχής των συγκολλήσεων με επικάλυψη και με των χαλύβων B500C με στόχο να καθορισθεί το απαιτούμενο μήκος συγκόλλησης που επιτρέπει την ανάπτυξη επαρκούς αντοχής στις ράβδους οπλισμού ανάλογα με τον σχεδιασμό, την διάμετρο της ράβδου οπλισμού, την τεχνική και το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο συγκόλλησης.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά συγκολλήσεων με επικάλυψη

Η δοκιμή εφελκυσμού των συγκολλήσεων με επικάλυψη δεν αποτελεί μια πραγματικά πρότυπη δοκιμή εφελκυσμού αν και προβλέπεται από όλους τους σχετικούς κανονισμούς συγκολλήσεων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Τούτο συμβαίνει πρώτον διότι η σύνδεση χαρακτηρίζεται από εκκεντρότητα, δεύτερον διότι το εφελκυστικό φορτίο που επιβάλλεται στα άκρα της ράβδου μετατρέπεται σε φορτίο κυρίως διατμητικό κατά μήκος της συγκόλλησης και τρίτον διότι η διατομή του δοκιμίου που ελέγχεται δεν είναι σταθερή καθ' όλο το μήκος (στην περιοχή επικάλυψης των ράβδων η διατομή είναι τουλάχιστον διπλή σε σχέση με την περιοχή των ελεύθερων άκρων).

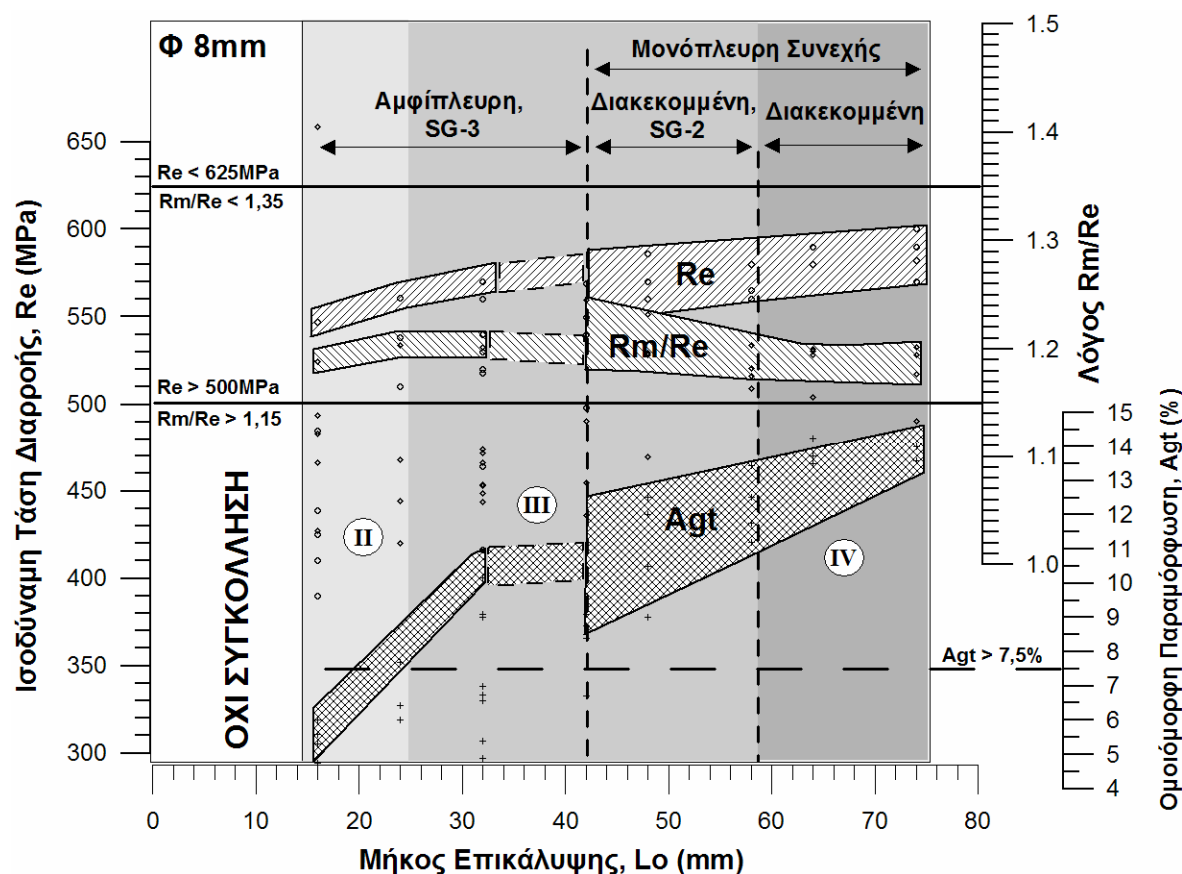
Καθώς η διατομή καθ' όλο το μήκος του συγκολλημένου δοκιμίου δεν είναι σταθερή, έννοιες όπως το όριο διαρροής (Re) ή το όριο θραύσης (Rm) -που στις ασυγκόλλητες ράβδους αποτελούν χαρακτηριστικά μεγέθη- στην περίπτωση των συγκολλήσεων με επικάλυψη δεν αποτελούν πρότυπο μέγεθος. Αντί αυτών, το φορτίο στο οποίο παρατηρείται διαρροή ή εκδήλωση της θραύσης εκφράζει την αντοχή των συγκολλημένων συνδέσεων. Σύμφωνα με το CEN 247 (1989) και PrEN 17660 (2002), η αντοχή της ραφής της συγκόλλησης βασίζεται στην λογική ότι η εφελκυστική τάση στη ράβδο μετατρέπεται σε διατμητική τάση στη ραφή της συγκόλλησης. Για τον λόγο αυτό, παράλληλα με το φορτίο, έχει πρακτικό νόημα η έννοια της «ισοδύναμης τάσης» της συγκόλλησης, που αντιστοιχεί στο φορτίο προς την διατομή της ράβδου που έχει συγκολληθεί. Η χρήση της ισοδύναμης τάσης επιτρέπει αφενός την σύγκριση συγκολλήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές διαμέτρους ράβδων οπλισμού και αφετέρου την σύγκριση της συγκολλημένης σύνδεσης σε σχέση με μια ασυγκόλλητη ράβδο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στα διαγράμματα που ακολουθούν αναφέρεται η τιμή της ισοδύναμης τάσης (MPa). Ανάλογα με το αν το φορτίο αναφέρεται στην εκδήλωση διαρροής ή θραύσης τότε αντιστοιχεί σε μια ισοδύναμη τάση διαρροής ή θραύσης, αντίστοιχα και δεν διευκρινίζεται εάν η θραύση επέρχεται στη ράβδο οπλισμού ή στη συγκόλληση.

Η δυσκολία στον καθορισμό του ορίου διαρροής μιας συγκόλλησης με επικάλυψη καθώς συνδέεται με τη χρήση μη πρότυπων δοκιμίων εφελκυσμού είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο σε όλους τους σχετικούς κανονισμούς και πρότυπα, η μόνη απαίτηση για τις συγκολλήσεις με επικάλυψη αφορά στο φορτίο θραύσης. Παρόλα αυτά, το φορτίο διαρροής στο οποίο αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά η συγκόλληση ή η ράβδος είναι κρίσιμο μιας και στο σημείο αυτό ξεκινάει η αποδιοργάνωση της σύνδεσης. Το φορτίο διαρροής είναι δυνατόν να οριστεί με βάση τα διαγράμματα φορτίου-επιμήκυνσης και έχει νόημα μιας και εκφράζει το φορτίο πέραν του οποίου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση. Στην περίπτωση που η διαρροή εκδηλώνεται στην ράβδο και στην καμπύλη φορτίων-επιμηκύνσεων υπάρχει ανώτερο όριο διαρροής, τότε ο καθορισμός του ορίου διαρροής της ράβδου είναι σχετικά εύκολος. Στην περίπτωση που η πλαστική παραμόρφωση ξεκινήσει στην ραφή της συγκόλλησης, τότε προσδιορίζεται το συμβατικό φορτίο διαρροής ($R_{p0.2}$) και αντιστοιχεί σε μία ισοδύναμη τάση διαρροής και αντιπροσωπεύει την τάση διαρροής μιας ασυγκόλλητης ράβδου στην θέση της συγκόλλησης.

Το φορτίο θραύσης των συγκολλήσεων προσδιορίζεται εύκολα από μια δοκιμή εφελκυσμού ως το μέγιστο φορτίο στην καμπύλη φορτίων-επιμηκύνσεων και ανάλογα με την περιοχή εκδήλωσης της θραύσης, εκφράζει το φορτίο πέραν του οποίου έχουμε πλήρη αστοχία της συγκόλλησης ή της ράβδου. Όπως και στην περίπτωση του φορτίου διαρροής, ανάλογα με το σημείο εκδήλωσης της θραύσης, δηλαδή εάν η θραύση επέλθει στην συγκόλληση ή στην ράβδο εκτός της συγκόλλησης, το φορτίο θραύσης ορίζεται αντίστοιχα ως το μέγιστο φορτίο το οποίο είναι ικανή να φέρει η συγκόλληση ή η ράβδος.

Ο σχεδιασμός των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα βασίζεται στην παραδοχή ότι τα κατασκευαστικά υλικά πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις μηχανικών χαρακτηριστικών. Στην περίπτωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος της κατηγορίας B500C η ελάχιστη τιμή του ορίου διαρροής (Re) είναι 500MPa. Το όριο θραύσης καθορίζεται έμμεσα από τον λόγο

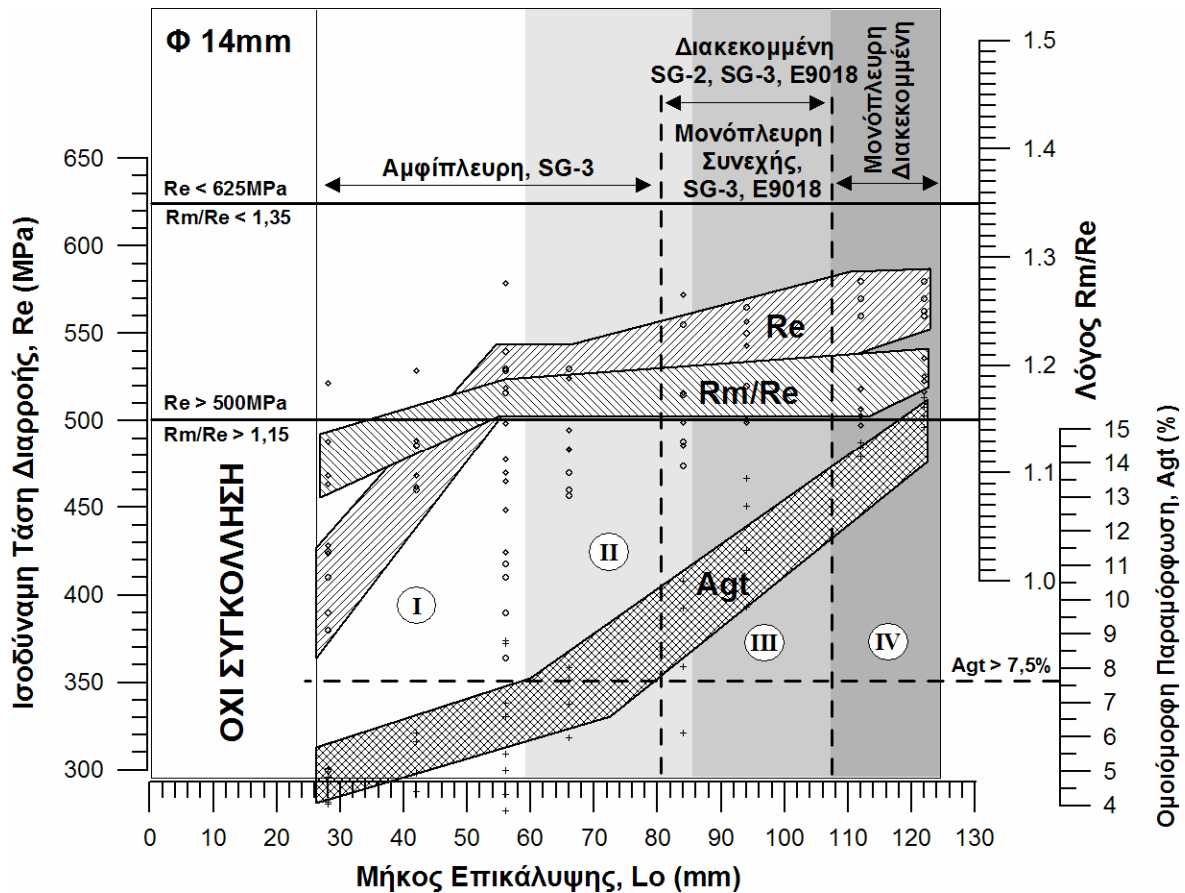
κράτυσης, δηλαδή τον λόγο του ορίου θραύσης (Rm) προς το όριο διαρροής (Re), ο οποίος πρέπει να είναι μεταξύ 1,15 και 1,35. Όσον αφορά στην ολκιμότητα, η ελάχιστη τιμή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης Agt είναι 7,5%. Κατά συνέπεια η καταλληλότητα μιας συγκόλλησης εξαρτάται από τον βαθμό που ικανοποιεί ταυτόχρονα τις απαιτήσεις που αφορούν στους χάλυβες οπλισμού που χρησιμοποιούνται. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι μια συγκόλληση μπορεί να παρουσιάζει αποδεκτό όριο θραύσης παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζεται από μειωμένη ολκιμότητα σε σχέση με την ασυγκόλλητη ράβδο οπλισμού. Αντιθέτως, μια συγκόλληση που ικανοποιεί ταυτόχρονα τις απαιτήσεις αντοχής και ολκιμότητας της κατηγορίας των χάλυβων οπλισμού που έχουν συγκολληθεί κρίνεται ως κατάλληλη. Όπως, προαναφέρθηκε, στα ισχύοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα η μόνη απαίτηση σε σχέση με την αντοχή των συγκολλήσεων αφορά στην εφελκυστική αντοχή (όριο θραύσης) και όχι την ολκιμότητα.



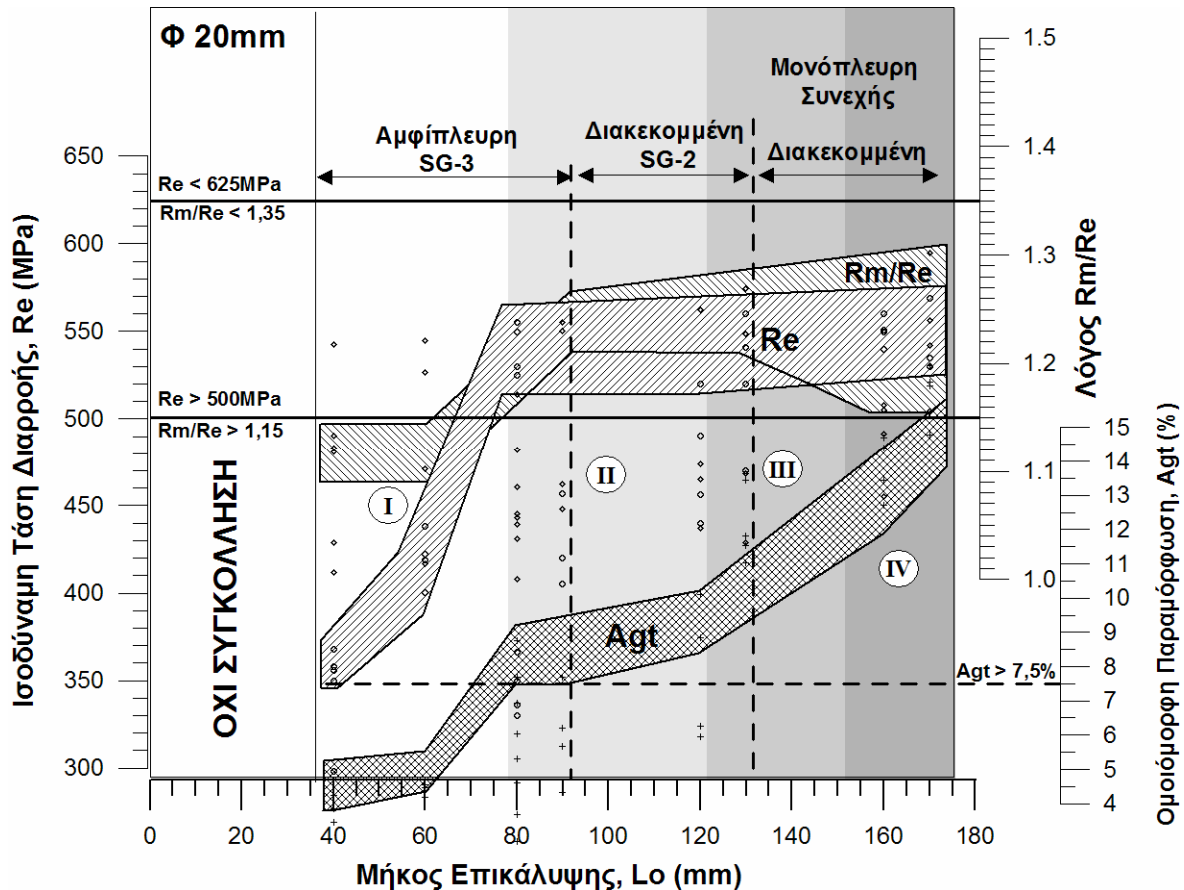
Σχήμα 3. Χάρτης συγκολλήσεων με επικάλυψη σε ράβδους οπλισμού διαμέτρου 8mm (B500C) στον οποίο παρουσιάζεται για δεδομένο διαθέσιμο μήκος επικάλυψης ο βέλτιστος τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων και το εύρος των μηχανικών τους χαρακτηριστικών (διακρίνονται οι περιοχές II: Υψηλή Αντοχή-Χαμηλή Ολκιμότητα, III: Υψηλή Αντοχή-Μέση Ολκιμότητα και IV: Υψηλή Αντοχή-Ολκιμότητα).

Βασίζόμενοι στα παραπάνω, από τις δοκιμές εφελκυσμού προσδιορίστηκαν οι ισοδύναμες τάσεις διαρροής (Re) και θραύσης (Rm), η ομοιόμορφη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (Agt) και υπολογίστηκε ο λόγος κράτυσης (Rm/Re). Στη πράξη, όταν παρουσιάζεται η ανάγκη συγκόλλησης χάλυβων οπλισμού, το διαθέσιμο μήκος καθώς και η διάμετρος των ράβδων οπλισμού είναι γνωστό. Για τον λόγο αυτό, τα διαγράμματα έχουν κατασκευαστεί κατά τέτοιο

τρόπο έτσι ώστε στον οριζόντιο άξονα εκφράζεται το (διαθέσιμο) μήκος επικάλυψης των συγκολλήσεων που ταυτίζεται με το ελεύθερο μήκος των ράβδων που υπάρχει προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια συγκόλληση. Όπως έχει αναφερθεί, στα σχετικά πρότυπα και κανονισμούς προδιαγράφονται απαιτήσεις που αφορούν μόνο το φορτίο θραύσης των συγκολλήσεων. Παρόλ' αυτά, καθώς στο νέο Εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 1421 (2005), ορίζεται ότι το όριο διαρροής των χαλύβων πρέπει να είναι τουλάχιστον 500MPa (και μικρότερο από 625MPa) με λόγο κράτνσης (R_m/Re) μεταξύ 1,15 και 1,35. Για τον λόγο αυτό, στα διαγράμματα έχει χαραχθεί η ισοδύναμη τάση διαρροής αντί της εφελκυστικής αντοχής, η οποία προκύπτει έμμεσα σε συνδυασμό με τον λόγο κράτνσης (R_m/Re). Από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού επιλέχθηκαν οι συγκολλήσεις οι οποίες για δεδομένο μήκος ραφής (και κατ' επέκταση μήκους επικάλυψης) παρουσιάζουν τον καλύτερο συνδυασμό μηχανικών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3, η συγκόλληση ράβδων οπλισμού διαμέτρου 8mm με διαθέσιμο μήκος επικάλυψης μικρότερο από 42mm όταν πραγματοποιείται με αμφίπλευρη συγκόλληση και ηλεκτρόδιο συγκόλλησης SG-3 (και κατ' επέκταση με την ημιαυτόματη τεχνική GMAW, βλ. Πίνακα 2) προσφέρει τον πιο αξιόπιστο και βέλτιστο τρόπο. Ο βέλτιστος τρόπος συγκόλλησης δεν συνεπάγεται υποχρεωτικά και «αποδεκτά» μηχανικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 4. Χάρτης συγκολλήσεων με επικάλυψη σε ράβδους οπλισμού διαμέτρου 14mm (B500C) στον οποίο παρουσιάζεται για δεδομένο διαθέσιμο μήκος επικάλυψης ο βέλτιστος τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων και το εύρος των μηχανικών τους χαρακτηριστικών (διακρίνονται οι περιοχές I: Χαμηλή Αντοχή-Ολκιμότητα, II: Υψηλή Αντοχή-Χαμηλή Ολκιμότητα, III: Υψηλή Αντοχή-Μέση Ολκιμότητα και IV: Υψηλή Αντοχή-Ολκιμότητα).



Σχήμα 5. Χάρτης συγκολλήσεων με επικάλυψη σε ράβδους οπλισμού διαμέτρου 20mm (B500C) στον οποίο παρουσιάζεται για δεδομένο διαθέσιμο μήκος επικάλυψης ο βέλτιστος τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων και το εύρος των μηχανικών τους χαρακτηριστικών (διακρίνονται οι περιοχές I: Χαμηλή Αντοχή-Ολκιμότητα, II: Υψηλή Αντοχή-Χαμηλή Ολκιμότητα, III: Υψηλή Αντοχή-Μέση Ολκιμότητα και IV: Υψηλή Αντοχή-Ολκιμότητα).

Οι απαιτήσεις για αυξημένη πλαστιμότητα των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, προδιαγράφουν αντίστοιχες απαιτήσεις ολκιμότητας για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Η χρήση των συγκολλήσεων με επικάλυψη -για παράδειγμα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος σχεδιασμένες σύμφωνα με αντισεισμικούς κανονισμούς- προϋποθέτει ότι η συγκόλληση είναι ικανή να αναπτύσσει εκτός από την απαιτούμενη αντοχή και σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά, οι συγκολλήσεις χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες που απεικονίζονται, στους χάρτες των Σχημ.3-5, με διαφορετική σκιαγράφηση και συμβολισμούς: I, Χαμηλή αντοχή-ολκιμότητα, II: Υψηλή αντοχή-Χαμηλή ολκιμότητα, III: Υψηλή αντοχή-Μέση ολκιμότητα και IV: Υψηλή αντοχή-Υψηλή ολκιμότητα. Η διάκριση μεταξύ «Χαμηλής» και «Υψηλής» αντοχής συγκολλήσεων βασίζεται στο αν καλύπτονται οι απαιτήσεις αντοχής σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 1421 (2005), δηλαδή η ισοδύναμη τάση διαρροής να είναι τουλάχιστον 500MPa και ο λόγος Rm/Re 1,15. Αφετέρου, η διάκριση μεταξύ «Μέσης» και «Υψηλής» ολκιμότητας γίνεται μεταξύ συγκολλήσεων που η ομοιόμορφη παραμόρφωση, Agt, ξεπερνάει το 7,5 και 11%, αντίστοιχα. Η διάκριση αυτή καλύπτει και τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού αντισεισμικού κανονισμού EC8 (1998) που προδιαγράφει για κατασκευές μέσης (κατηγορία M) και υψηλής πλαστιμότητας (κατηγορία Y) συνολική (ελαστική-πλαστική) ομοιόμορφη παραμόρφωση Agt τουλάχιστον 6 και 9%, αντίστοιχα. Αφετέρου, σύμφωνα

με το ΕΛΟΤ 1421 (2005), η παραμόρφωση Agt στους χάλυβες της κατηγορίας B500C πρέπει να είναι τουλάχιστον 7,5%.

Είναι φανερό ότι, για κάθε διάμετρο ράβδου οπλισμού, υπάρχει ένα ελάχιστο μήκος επικάλυψης (ίσο περίπου με 2d) το οποίο είναι απαραίτητο για να πραγματοποιηθεί συγκόλληση. Σε όλα τα διαγράμματα η περιοχή που αντιστοιχεί σε μήκη επικάλυψης μικρότερα από 16, 28 και 40mm, για διαμέτρους οπλισμού 8, 14 και 20mm, αντίστοιχα, σημειώνεται ως «ΟΧΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ». Οι συγκολλήσεις στα παραπάνω μήκη επικάλυψης θα πρέπει να θεωρούνται πάντα μη φέρουσες καθώς η ισοδύναμη τάση διαρροής και ολκιμότητα (Agt) δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατηγορίας B500C.

Στα Σχήμ.4, 5 για μήκος επικάλυψης λιγότερο από 56 και 80mm (δηλαδή 4d), η ισοδύναμη τάση διαρροής ή ο λόγος κράτυνσης είναι μικρότερα από αυτά που ορίζονται για την κατηγορία B500C. Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως «ΧΑΜΗΛΗ ΑΝΤΟΧΗ-ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑ». Σε αυτά τα μήκη επικάλυψης συγκόλληση με την ημιαυτόματη τεχνική GMAW, ισχυρό ηλεκτρόδιο (SG-3) και αμφίπλευρη συνεχή συγκόλληση αποτελεί το βέλτιστο σχεδιασμό. Στις συγκολλήσεις ράβδων διαμέτρου 8mm, μήκος επικάλυψης 16mm (ή 2d) προσφέρει ιδιαίτερα αυξημένη αντοχή σε σχέση με συγκολλήσεις ράβδων μεγαλύτερης διαμέτρου (14 και 20mm) στις οποίες, για την επίτευξη ίδιας αντοχής, απαιτείται μήκος επικάλυψης τουλάχιστον 4d.

Καθώς αυξάνεται το διαθέσιμο μήκος επικάλυψης, αυξάνεται και η φέρουσα ικανότητα των συγκολλήσεων με αποτέλεσμα να υπάρχουν τρόποι συγκόλλησης με τους οποίους να επιτυγχάνεται ισοδύναμη τάση διαρροής και λόγος κράτυνσης εντός κανονιστικών ορίων (περιοχή «ΥΨΗΛΗ ΑΝΤΟΧΗ-ΧΑΜΗΛΗ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑ»). Τα παραπάνω ισχύουν για συγκολλήσεις με την ημιαυτόματη τεχνική GMAW, ισχυρό ηλεκτρόδιο (SG-3) και αμφίπλευρη συνεχή συγκόλληση. Σε συγκολλήσεις ράβδων διαμέτρου (d) 20mm η συγκόλληση μπορεί να εκτελεστεί και με την ημιαυτόματη τεχνική GMAW, μονόπλευρη διακεκομμένη ραφή (2 x 2d) και ηλεκτρόδιο χαμηλότερης αντοχής (SG-2). Στις περιοχές αυτές καλύπτονται οι απαιτήσεις αντοχής (Re, Rm/Re) αλλά οι συγκολλήσεις χαρακτηρίζονται από χαμηλή ολκιμότητα που οριακά ξεπερνάει το 7,5% (ελάχιστο όριο για την κατηγορία B500C:ΕΛΟΤ 1421, 2005).

Περαιτέρω αύξηση του μήκους επικάλυψης των ράβδων διατηρεί την αυξημένη αντοχή και επιτρέπει παράλληλα στην επίτευξη υψηλότερης ολκιμότητας. Η περιοχή «ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ-ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ» περιλαμβάνει συγκολλήσεις οι οποίες επιτρέπουν στην επίτευξη υψηλής αντοχής αλλά επιπρόσθετα και ολκιμότητας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το μήκος επικάλυψης των ράβδων να υπερβαίνει τα 60, 110 και 150mm για ράβδους διαμέτρου 8, 14 και 20mm αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το μήκος επικάλυψης των ράβδων και κατά συνέπεια και το διαθέσιμο μήκος συγκόλλησης, τόσο βελτιώνεται η ολκιμότητα των συγκολλήσεων. Οι μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις παρουσιάζουν την βέλτιστη παραμόρφωση Agt σε σχέση με τους άλλους τύπους σχεδιασμού, απαιτούν όμως παράλληλα και μεγαλύτερο διαθέσιμο μήκος επικάλυψης των ράβδων. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 971 (1994) και κανονισμός ΚΤΧ 2000 προβλέπουν στις συγκολλήσεις με επικάλυψη να εκτελούνται μόνο με μονόπλευρες διακεκομμένες ραφές, συνολικού μήκους $L_w:10d$ (2 x 5d).

3.2 Εκτίμηση αντοχής συγκολλήσεων με επικάλυψη

Η ισοδύναμη τάση διαρροής για όλες τις συγκολλήσεις με επικάλυψη, υπερβαίνει για όλα τα εξεταζόμενα μήκη ραφής το προδιαγραφόμενο φορτίο θραύσης που ορίζει το CEN 247 (1989). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν βασιστούμε στο εν λόγω πρότυπο για τον υπολογισμό του φορτίου θραύσης της συγκόλλησης και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό του απαιτούμενου μήκους ραφής, τότε η συγκόλληση δεν πρόκειται να υποστεί πλαστική παραμόρφωση μιας και το φορτίο που θα υπολογίσουμε δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το πραγματικό φορτίο διαρροής της συγκόλλησης.

Μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών εφελκυσμού, προκύπτουν ορισμένοι εμπειρικοί τύποι οι οποίοι προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ελάχιστης αντοχής των συγκολλήσεων με επικάλυψη.

Μονόπλευρες Συνεχείς Συγκολλήσεις:	$Re \text{ (MPa)} = (1,17d + 32)n + (363-12d)$ (1)
	$Rm \text{ (MPa)} = 60n - 9d + 305$ (2)
Αμφίπλευρες Συνεχείς Συγκολλήσεις:	$Re \text{ (MPa)} = (1,25d + 22)n + (500-18d)$ (3)
	$Rm \text{ (MPa)} = 30n - 5,5d + 375$ (4)
Μονόπλευρες Διακεκομμένες Συγκολλήσεις:	$Re \text{ (MPa)} = (1,75d - 3,5)n + (620-15,5d)$ (5)
	$Rm \text{ (MPa)} = (2,17d + 8,5)n - 18,5d + 635$ (6)

Όπου d: η διάμετρος της ράβδου οπλισμού και n: το μήκος ραφής συγκόλλησης που εκφράζεται σαν πολλαπλάσιο (n) της διαμέτρου της εκάστοτε ράβδου.

Τα παραπάνω ισχύουν και συνάγονται από συγκολλήσεις με επικάλυψη που πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον Πίνακα 2 για n: $2 < n < 8$, και d: $8\text{mm} < d < 20\text{mm}$.

3.3 Κάμψη συγκολλήσεων με επικάλυψη

Κατά τον εφελκυσμό της συγκόλλησης με επικάλυψη παρατηρείται, κάμψη της λόγω της αναπτυσσόμενης ροπής και εκφράζεται από τη γωνία που σχηματίζουν οι άξονες των ράβδων οπλισμού κατά την φόρτιση. Το φαινόμενο της κάμψης της συγκόλλησης με επικάλυψη είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση μικρών σχετικά μηκών ραφής (L_w) και προκύπτει ότι η γωνία κάμψης μεταξύ δύο ράβδων διαμέτρου 8 και 20 mm θα είναι ίση εφόσον το μήκος ραφής είναι κοινό πολλαπλάσιο της διαμέτρου. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα (Νικολάου Ι., 2005).

3.4 Επίδραση του σχεδιασμού συγκολλήσεων με επικάλυψη

Σύμφωνα με τα πρότυπα WM186-M1990 (1998), ANSI/AWS D1.4-92 (1992) το φορτίο θραύσης των συγκολλήσεων δεν εξαρτάται από τον σχεδιασμό τους. Στην περίπτωση μιας αμφίπλευρης συγκόλλησης, το φορτίο θραύσης θεωρείται ότι ταυτίζεται με την αντοχή μιας αντίστοιχης μονόπλευρης συνεχούς συγκόλλησης, ίδιου συνολικού μήκους. Παρόλ' αυτά από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι μεταξύ των μονόπλευρων και των αμφίπλευρων συνεχών συγκολλήσεων ίδιου μήκους συγκόλλησης (L_w) υπάρχει σημαντική διαφορά στην μετρούμενη αντοχή θραύσης και στην ολκιμότητα τους. Τούτο συμβαίνει, διότι στα παραπάνω πρότυπα, αν και η φέρουσα ικανότητα των συγκολλήσεων είναι ίδια, δεν λαμβάνεται υπόψη η κάμψη που εκδηλώνεται κατά την φόρτιση και η οποία επηρεάζει αρνητικά την αντοχή και την ολκιμότητα της ράβδου στο σημείο κάμψης.

Καθώς η γωνία κάμψης ελάχιστα εξαρτάται από την διάμετρο της ράβδου που έχει συγκολληθεί, αλλά είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους επικάλυψης των ράβδων (L_o), για δεδομένο συνολικό μήκος ραφής (L_w), οι μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις, παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις μονόπλευρες συνεχείς που με την σειρά τους εμφανίζουν καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις αμφίπλευρες συνεχείς. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του μήκους επικάλυψης (L_o) των συγκολλήσεων για δεδομένο συνολικό μήκος ραφής της συγκόλλησης (L_w). Αύξηση του μήκους επικάλυψης (L_o), μειώνει την γωνία κάμψης και έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η τοπική καταπόνηση στην περιοχή κάμψης της ράβδου στα άκρα της επικάλυψης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσφέρει έναν οδηγό ασφαλούς εκτέλεσης των συγκολλήσεων με επικάλυψη, έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά τους να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι κυριότεροι παράμετροι που

εξετάζονται περιλαμβάνουν το μήκος ραφής, τον σχεδιασμό της σύνδεσης, την διάμετρο της ράβδου οπλισμού, την τεχνική συγκόλλησης και την αντοχή του ηλεκτροδίου.

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού, κατασκευάστηκαν χάρτες στους οποίους ανάλογα με το διαθέσιμο μήκος επικάλυψης (L_o) και διάμετρο των ράβδων, προτείνεται ο βέλτιστος τρόπος εκτέλεσης των συγκολλήσεων, δηλαδή καθορίζεται ο σχεδιασμός της συγκόλλησης, το μήκος ραφής, η τεχνική και το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης.
- Όσο αυξάνεται το μήκος επικάλυψης των ράβδων και κατά συνέπεια και το διαθέσιμο μήκος συγκόλλησης, τόσο αυξάνεται η αντοχή και βελτιώνεται η ολκιμότητα των συγκολλήσεων.
- Η ισοδύναμη τάση διαρροής για όλες τις συγκολλήσεις με επικάλυψη, υπερβαίνει για όλα τα εξεταζόμενα μήκη ραφής το προδιαγραφόμενο φορτίο θραύσης που ορίζει το CEN 247 (1989). Αν βασιστούμε στο εν λόγω πρότυπο τότε η συγκόλληση δεν πρόκειται να υποστεί πλαστική παραμόρφωση μιας και το φορτίο που θα υπολογίσουμε δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το πραγματικό φορτίο διαρροής της συγκόλλησης.
- Οι μονόπλευρες διακεκομμένες συγκολλήσεις παρουσιάζουν την βέλτιστη παραμόρφωση Agt σε σχέση με τους άλλους τύπους σχεδιασμού, απαιτούν όμως παράλληλα και μεγαλύτερο διαθέσιμο μήκος επικάλυψης των ράβδων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ANSI/AWS D1.4-92. 1992. Structural Welding Code – Reinforcing Steel.

CEN 247 /BS 7123. 1989. Metal Arc Welding of Steel for Concrete Reinforcement.

DIN 488. 1984. Reinforcing steel - grades, properties, marking.

Eurocode No8.1998. Common unified rules for structures in seismic regions. Final revised draft.

Issa C.A., Nasr A., 2005. An experimental study of welded splices of reinforcing bars, *Building & Environment*, article in press.

ISO/CD 15630-1. 1998. Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars and wires.

prEN ISO 17660. 2002, Welding of reinforcing steel.

W186 – M1990. 1998. Welding of Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Structures.

ΕΛΟΤ 1421. 2005. Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλήσιμοι χάλυβες.

ΕΛΟΤ 971. 1994. Συγκολλήσιμοι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Νικολάου Ι., 2004. Λειτουργικές ιδιότητες χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και οι συγκολλήσεις τους. *Διδακτορική διατριβή. Ε.Μ.Π.*, Αθήνα.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 2000. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.).