

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΛΙΓΟΚΥΚΛΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΤΥΠΟΥ Χ**

υπό

Γιανναγάς Μηνάς-Αλέξανδρος

Επιβλέπων

Ζερβάκη Άννα

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων
για την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2023

©2023 Γιανναγός Μηνάς-Αλέξανδρος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

Εγκρίθηκε από τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής:

(Επιβλέπων)

Δρ. Άννα Ζερβάκη

Επίκουρη Καθηγήτρια Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δεύτερος Εξεταστής:

Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Σπυρίδων Καραμάνος

Καθηγητής Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, την επίκουρο καθηγήτριά κ. Άννα Ζερβάκη για την βοήθεια κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε για την εξασφάλιση της ομαλής διεκπεραίωσής της. Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την άδεια να αξιοποιήσω τα μηχανήματα του εργαστηρίου υλικών του ΠΘ. Επιπλέον, ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Σπύρο Καραμάνο και Δρ. Δημήτρη Χατζηιωάννου για την πρόσβαση που παρείχαν στην έρευνά τους. Ευχαριστώ, τέλος την οικογένειά μου που παρείχε τα εφόδια ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και τους φίλους που μου στάθηκαν στα χρόνια της φοίτησής μου.

Περίληψη

Ο τομέας των κατασκευών στις μέρες μας αξιοποιεί τις σωληνωτές δομές σε ευρεία βάση, ιδίως στις υπεράκτιες εφαρμογές. Η μεγάλη ανάγκη για πράσινη ενέργεια οδήγησε στην αξιοποίηση της θάλασσας για την ανέγερση αιολικών πάρκων, χρησιμοποιώντας τις δομές αυτές. Αυτή η κίνηση έχει δημιουργήσει νέες προκλήσεις κατασκευαστικά και σχεδιαστικά καθώς είναι αναγκαίο να διασφαλιστεί η επάρκεια των δομών αυτών. Η διπλωματική αυτή έχει ως αφορμή αυτή την ανάγκη να επικυρωθεί η αντοχή αυτών των κατασκευών υπό ακραίες συνθήκες καταπόνησης. Οι συνθήκες αυτές προσομοιώνονται μέσω ολιγοκυκλικής κόπωσης με πολύ μικρό αριθμό κύκλων και μεγάλες φορτίσεις (ULCF). Στα πλαίσια αυτού, κατασκευάστηκαν τρία δείγματα από χάλυβα S700 σε σχήμα Χ. Στόχος ήταν να προσομοιώνουν τις συγκολλητές συνδέσεις στη βάση των πλατφορμών στήριξης των υπερθαλάσσιων ανεμογεννητριών, σε βάθη μέχρι 55μ., σε κλίμακα 1:3. Στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε κυκλική κάμψη(ULCF) με τάσεις που ξεπερνούσαν το όριο διαρροής και τελικά αστόχησαν σε λιγότερους από εκατό κύκλους φόρτισης. Έπειτα, έγινε μεταλλουργική αξιολόγηση των δειγμάτων η οποία περιελάμβανε μακροσκοπικό έλεγχο, μεταλλογραφία στα σημεία ενδιαφέροντος και μικροσκληρομετρήσεις. Τέλος, καταλήγουμε στους λόγους για τους οποίους αστόχησαν τα δείγματα καθώς και τα σημεία έναρξης των ρωγμών.

Abstract

The area of structure nowadays utilizes tubular structures in an ever-growing number of applications. The need for more green power pushed for the exploitation of the sea as a place to build wind turbine parks, utilizing these tubular welded X structures. This option created new challenges in design and manufacturing, as it was necessary to ensure the structural security of these structures. This was the reasoning behind this thesis. That is to ensure the durability of these structures under the extreme stress of such a place. These conditions were simulated by an ultra-low cycle fatigue test with high stress. For that to happen, three specimen were manufactured from hot-rolled tubes of S700 grade steel. The target for them was to simulate welded, X-type, tubular structures found in the jacket structure of wind turbines installed in depth of up to 55m, scaled down to 1:3. Then, they were subjected to a 3 point in-plane bending fatigue test with stresses greater than the yield strength and failed after less than 100 cycles. Afterwards, they were given a metallurgical evaluation, which included macroscopic inspection, metallography on points of interest and microhardness tests. Finally, we speculate on the reasons behind these failures and the starting points of the cracks.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις X (welded tubular X joints).....	9
2.2 Χάλυβας S700	10
2.3 Κόπωση	11
2.4 Συγκολλήσεις	12
2.4.1 Γενικά	12
2.4.2 GMAW	13
2.4.3 FCAW.....	13
2.4.4 Ζώνες Συγκόλλησης	15
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία.....	17
3.1 Περιγραφή δειγμάτων	18
3.2 Συγκόλληση Δοκιμίων.....	20
3.3 Δοκιμή Κόπωσης	22
3.4 Οπτικός Έλεγχος.....	24
3.5 Μεταλλογραφία.....	26
3.6 Μικροσκληρομέτρηση	27
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα	28
4.1 Βασικό Μέταλλο	28
4.2 Οπτικός Έλεγχος.....	30
Δείγμα X5	30
Δείγμα X6	31
Δείγμα X7	32
4.3 Επιφάνειες Θραύσης	32
Δείγμα X5	32
Δείγμα X6	34
Δείγμα X7	35
4.4 Μεταλλογραφία.....	37
Δείγμα X5	37
Δείγμα X6	39
Δείγμα X7	42
4.5 Μικροσκληρομετρήσεις.....	45

5. Συμπεράσματα.....	47
Βιβλιογραφία	48

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Χημική σύσταση S700.....	11
Πίνακας 3.1 Συνθήκες πειράματος κόπωσης.....	20
Πίνακας 4.1 Μετρήσεις Τόξων Κοπόσεως.....	37
Πίνακας 4.2 Μικροσκληρομέτρηση στο Βασικό Μέταλλο.....	45
Πίνακας 4.3 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X5 (πλευρά κόλλησης).....	45
Πίνακας 4.4 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X5 (mirror).....	45
Πίνακας 4.5 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X6 (πλευρά κόλλησης).....	45
Πίνακας 4.6 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X6 (mirror).....	45
Πίνακας 4.7 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X7 (πλευρά κόλλησης).....	46
Πίνακας 4.8 Μικροσκληρομέτρηση στο Δείγμα X7 (mirror).....	46
Πίνακας 4.9 Μικροσκληρομέτρηση HAZ των δειγμάτων.....	46

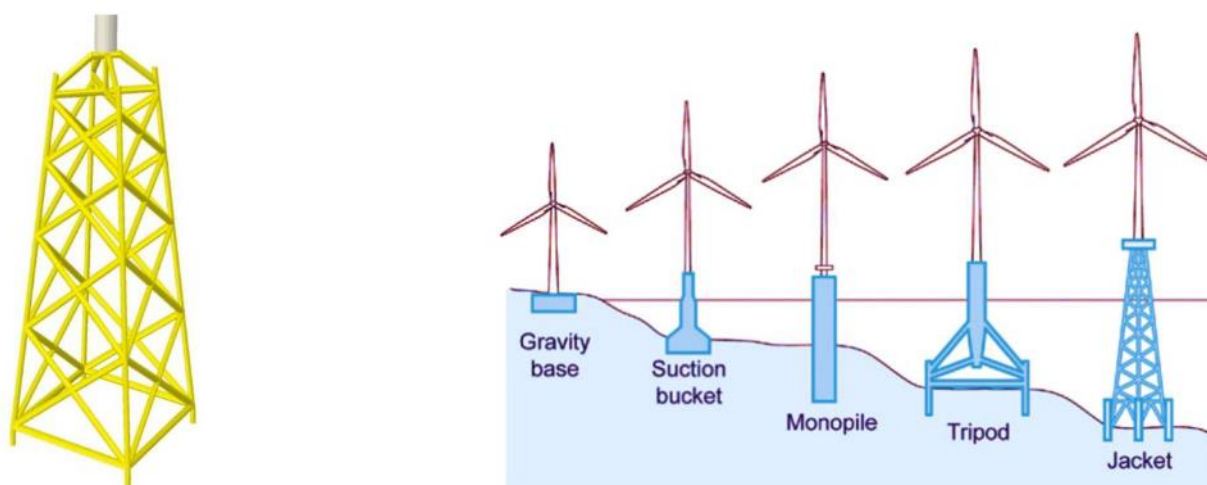
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Οι συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς κλάδους στις μέρες μας, τόσο σε κτίρια όσο και σε άλλου τύπου κατασκευές. Η εφαρμογή όμως που θα ασχοληθούμε, αφορά στις υπεράκτιες κατασκευές, όπου οι ενώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τη στήριξη πλατφορμών ή ανεμογεννητριών.

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι ένας ραγδαία αναπτυσσόμενος τομέας της παραγωγής ενέργειας, αφού η θάλασσα αποτελεί έναν αχανή ανεκμετάλλευτο χώρο ο οποίος, με την κατάλληλη τεχνολογία, μπορεί να φιλοξενήσει πολλά αιολικά πάρκα. Μεγάλο μέρος των ανεμογεννητριών αυτών κατασκευάζονται με τη μέθοδο του συστήματος ενός πυλώνα (monopile system). Αυτός ο τύπος στήριξης μπορεί να υποστηρίξει γεννήτριες μέχρι και 4MW αλλά περιορίζεται σε πολύ μικρά βάθη, μέχρι 25m, καθώς η αύξηση του ύψους της απαιτεί ταυτόχρονη αύξηση της διαμέτρου, ώστε να είναι το σύστημα λειτουργικό, με συνέπεια την μεγάλη αύξηση του βάρους και του κόστους. Η ολοένα αναπτυσσόμενη βιομηχανία αιολικής ενέργειας δημιούργησε την ανάγκη για εκμετάλλευση βαθύτερων υδάτων ώστε να αξιοποιηθούν ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης δυναμικότητας. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στη χρήση συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων τύπου X (jacket) που επιτρέπει την αξιοποίηση βάθους έως 50m. Μία άλλη μέθοδος που εφαρμόζεται είναι αυτή του τρίποδου Εικ. 1.2, η οποία όμως και πάλι αυξάνει πολύ το βάρος, ενώ παρουσιάζονται προβλήματα και δυσκολίες στην συγκόλληση του βασικού κόμβου, κυρίως λόγω του μεγέθους που αναγκαστικά πρέπει να έχει [1,2]. Έτσι το σύστημα συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων τύπου X αποτελεί την καλύτερη και πιο συμφέρουσα λύση, καθώς προσφέρει μεγάλη αντοχή χωρίς το περιττό βάρος, έχοντας μάλιστα τα αιολικά πάρκα Beatrice [3] και Alpha Ventus [4] Εικ. 1.1 ως επιτυχή παραδείγματα.



Εικ. 1.2 Αιολικό πάρκο Alpha Venture στη Γερμανία [4]



Εικ. 1.1 Τύποι στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών [5]

Η κατασκευή που υποστηρίζει μία ανεμογεννήτρια υποβάλλεται σε διάφορες φορτίσεις, τόσο εξαιτίας της λειτουργίας του κινητήρα όσο και των φυσικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Οι κυματισμοί αλλά και οι σεισμικές δονήσεις ασκούν κυκλικές φορτίσεις οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν και σε αστοχία της κατασκευής λόγω κόπωσης, σε κρίσιμα σημεία. Σε μία συγκολλητή κατασκευή, οι συγκολλήσεις θεωρούνται εν γένει κρίσιμα σημεία με ευαισθητοποίηση στην κόπωση και είναι το τμήμα στο οποίο πρέπει να δίνεται η μεγαλύτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό.

Η κόπωση αποτελεί τον πιο συνήθη μηχανισμό αστοχίας στις συγκολλητές κατασκευές. Η συγκόλληση σε ένα μεταλλικό υλικό προκαλεί την αποδυνάμωσή του τοπικά στην κόπωση, καθώς ο συνδυασμός των παραμενουσών τάσεων και των ατελειών που προκαλεί η ίδια η συγκόλληση οδηγούν σε πρόωρη δημιουργία ρωγμής και τελικά αστοχία. Αυτό έχει ως συνέπεια την σημαντική μείωση των φορτίων σχεδιασμού όταν οι κατασκευές πρόκειται να δεχτούν κυκλικές φορτίσεις. Ανάλογα με το μέγεθος των φορτίσεων αλλά και τον αριθμό των κύκλων, η κόπωση μπορεί να είναι πολυκυκλική ή

ολιγοκυκλική. Η πολυκυκλική κόπωση (High Cycle Fatigue) συνήθως αφορά μικρό μέγεθος καταπονήσεων, έτσι ώστε να έχουμε μόνο ελαστικές παραμορφώσεις και μεγάλο κύκλο ζωής, δηλαδή πάνω από 10^4 κύκλους. Στην 2^η περίπτωση έχουμε μεγάλες φορτίσεις και πλαστικές παραμορφώσεις, πράγμα που οδηγεί σε πολύ πιο γρήγορη αστοχία. Η ολιγοκυκλική κόπωση (Low Cycle Fatigue) περιλαμβάνει μία ακραία υποπερίπτωση, όπου οι φορτίσεις είναι πολύ μεγάλες όπως για παράδειγμα σε σεισμό και οι παραμορφώσεις πολύ έντονες, σε σημείο που η αστοχία μπορεί να προκληθεί και σε κάτω από 100 κύκλους φόρτισης. Η υποκατηγορία αυτή ονομάζεται «ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων» (Ultra-Low Cycle Fatigue ή ULCF). [6]

Στις σωληνωτές συγκολλητές ενώσεις που εξετάζονται, έχει βρεθεί ότι στις ανελαστικές φορτίσεις, η ρωγμή ξεκινάει από τους πρώτους κιάλας κύκλους, υπονομεύοντας από τα πρώτα κιάλας στάδια την αντοχή και δυσκαμψία [7]. Η φύση της συγκόλλησης περιλαμβάνει γεωμετρικές ασυνέχειες ιδίως στον πόδα οι οποίες ευνοούν την αρχή ρωγμών υπό την δράση τέτοιων φορτίων. Στα σημεία εκείνα το υλικό βάσης δέχεται μεγάλες παραμορφώσεις οι οποίες οδηγούν στην έναρξη πολλών διαφορετικών ρωγμών[8].

Στις κατασκευές αυτές, η πολυκυκλική κόπωση έχει μελετηθεί εκτενώς στο παρελθόν και από πολλές διαφορετικές πηγές, καθώς αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό πεδίο με πληθώρα αποτελεσμάτων[5,9,10]. Όμως η ολιγοκυκλική κόπωση έχει δεχθεί πολύ μικρότερη προσοχή και ιδίως η περιορισμένου αριθμού κύκλων, παρά τη μεγάλη σημασία της. Αυτό είναι το πλαίσιο με το οποίο θα ασχοληθεί και η παρούσα διπλωματική. Δηλαδή τη συμπεριφορά σε ULCF των συγκολλητών συνδέσμων τύπου Χ που αξιοποιούνται στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Το υλικό που θα εξετάσουμε είναι ο χάλυβας υψηλής αντοχής S700. Οι πλατφόρμες αυτές προορίζονται για βάθος 55m και για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δείγματα κλίμακας 1:3 συγκολλημένα με τη μέθοδο (GMAW) και (FCAW) [11]. Το πείραμα έγινε στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, ενώ η μεταλλουργική αξιολόγηση τους, έγινε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα δείγματα υπέστησαν ακραία κυκλική κάμψη μέχρι αστοχίας σε λιγότερους από 100 κύκλους φόρτισης. Πάνω σε αυτά, μελετήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης, η μικροδομή τους όπως επίσης και τα σημεία εκκίνησης των ρωγμών.

Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή που παρουσιάζει το σκοπό της εργασίας, στο 2^ο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή και δοκιμή των δειγμάτων, σε διάφορες έννοιες που αφορούν στην διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε. Στο 3^ο Κεφάλαιο

επεξηγείται η πειραματική διαδικασία Εικ. 1.3 καθώς και οι διεργασίες που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Υλικών προκειμένου να χαρακτηριστούν τα δείγματα. Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και στο 5^ο γίνεται η σύνοψη τους και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

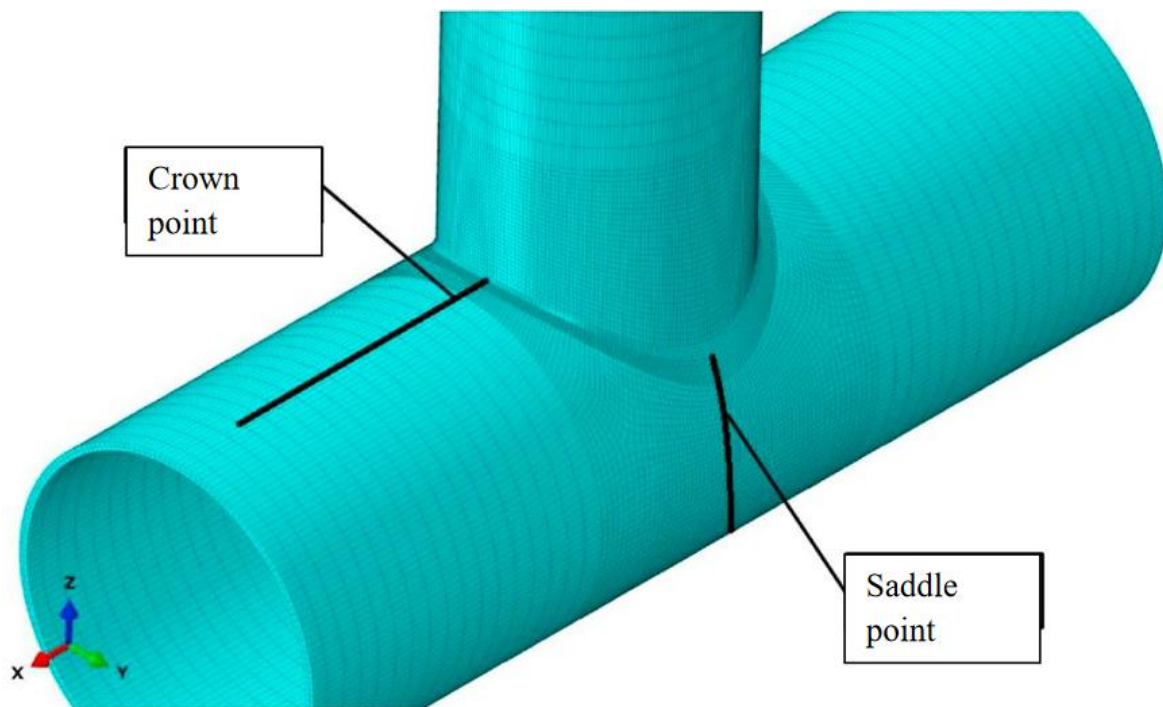
2.1 Συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις X (welded tubular X joints)

Οι συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις στις μέρες μας αποτελούν κατασκευαστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε πολλούς διαφορετικούς τομείς του χώρου των κατασκευών, καθώς απαντώνται σε κτίρια γέφυρες ή ακόμα και πινακίδες. Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας του μικρού βάρους χρειάζεται για να αποκτήσουν την κατασκευαστική και δομική ακεραιότητα που απαιτείται από τις εκάστοτε εφαρμογές. Πολλές υπεράκτιες κατασκευές κατασκευάζονται με αυτό τον τρόπο. Οι πλατφόρμες εξόρυξης ορυκτών πόρων αποτελούν παράδειγμα ενώ μια πολύ σημαντική εφαρμογή είναι η στήριξη ανεμογεννητριών σε μεγάλα βάθη, συγκεκριμένα στο κάτω μέρος τους. [12]

Η παρούσα Διπλωματική εργασία ερευνά την εφαρμογή των ανεμογεννητριών και συγκεκριμένα την συγκόλληση των σωληνωτών αυτών κατασκευών(X-Joints). Ο ένας σωλήνας από τους 2 διαμορφώνεται έτσι ώστε να συγκολληθεί στον άλλο στην διάταξη της εικόνας [2.1] και ονομάζεται brace, ενώ ο ενιαίος λέγεται chord. Στην εικόνα [2.2] απεικονίζονται τα κρίσιμα σημεία της σύνδεσης που είναι το crown και το saddle, ενώ στο πείραμα κοπώσεως με το οποίο ασχολούμαστε μας ενδιαφέρει τόσο το crown όσο και η περιοχή του πόδα της συγκόλλησης ανάμεσα στο crown και saddle που αναφέρεται ως “in between”[13,5].



Εικ. 2.1 Απεικόνιση Chord & Brace [1]



Εικ. 2.2 Απεικόνιση Crown και Saddle [10]

2.2 Χάλυβας S700

Ο Χάλυβας είναι κράμα Fe-C με περιεκτικότητα του δεύτερου μέχρι 2.06%, ενώ συναντάμε και Μαγγάνιο (Mn), πυρίτιο (Si), φωσφόρο (P), θείο (S) και οξυγόνο (O). Η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία του αναλόγως τις περιεκτικότητες των κραματικών του στοιχείων, τον έχει καθιερώσει ως το βασικό δομικό μέταλλο για κάθε είδους κατασκευή, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί σχεδόν σε όλες τις απαιτήσεις με σχετικά μικρό κόστος. [14]

Ο S700 είναι χάλυβας με περιεκτικότητα 0.12% σε άνθρακα και ποσοστά μαγγανίου κοντά στο 2.1% ενώ σε μικρότερα ποσοστά περιέχει και Si, V, Ti, Mo (πίνακας 2.1). Βρίσκει εφαρμογές σε δοκούς, δικτυώματα καθώς και ψυχρά διαμορφωμένα κομμάτια. Πρόκειται για χάλυβα υψηλής αντοχής, χαμηλής κραμάτωσης και με λεπτόκοκκη μικροδομή φερρίτη-μπαϊνίτη [19]. Ο βασικός μηχανισμός ισχυροποίησης είναι η παρεμβολή των κραματικών στοιχείων Mn, Si και C στο στερεό διάλυμα, καθώς και η σκλήρυνση καθίζησης στοιχείων όπως Ti, Nb και V. Επίσης, συνεισφέρει και η παρουσία μπαϊνίτη-μαρτενσίτη καθώς και η εκλέπτυνση των κόκκων. Έχει τη δυνατότητα συγκόλλησης με οποιαδήποτε

ηλεκτρικού τύπου συγκόλληση χωρίς μεγάλη αύξηση της σκληρότητας στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας ισοδύναμου άνθρακα (carbon equivalent) που οδηγεί και σε καλύτερες επιφάνειες. Αυτό επίσης σημαίνει πως χρειάζεται μικρότερη ή και καθόλου προθέρμανση του βασικού μετάλλου. Η χρήση τέτοιων μετάλλων μειώνει την επιφάνεια προς κόλληση και άρα την ποσότητα filler και τον χρόνο κόλλησης. Στο πείραμα που εξετάζουμε χρησιμοποιήθηκε ο S700MC με yield strength 700Mpa και Tensile strength 750-950Mpa. [15]

Πίνακας 2.1 Χημική σύσταση του χάλυβα S700

C (max %)	Si ¹⁾ (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al _{tot} (min %)	Nb ²⁾ (max %)	V ²⁾ (max %)	Ti ²⁾ (max %)
0.12	0.21	2.10	0.020	0.010	0.015	0.09	0.20	0.15

2.3 Κόπωση

Η κόπωση είναι η καταπόνηση υλικών με την εφαρμογή επαναλαμβανόμενων ή και χρονικά μεταβαλλόμενων τάσεων, λόγω των οποίων μπορούν να οδηγηθούν σε αστοχία ακόμα και σε πολύ χαμηλότερες τάσεις του ορίου θραύσης. Η διάρκεια ζωής του υλικού χωρίζεται σε 2 φάσεις. Την N_i που είναι ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία ρωγμής και την N_p που είναι ο χρόνος από την δημιουργία της ρωγμής μέχρι την αστοχία. Συνολικά ο χρόνος ζωής του υλικού, σε κύκλους φόρτισης, είναι $N_f = N_i + N_p$. Η κόπωση μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το μέγεθος της εφαρμοσμένης τάσης σε σύγκριση με το όριο διαρροής. Την πολυκυκλική και την ολιγοκυκλική.

- **Ολιγοκυκλική (low-cycle fatigue)** είναι η κόπωση που οι τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής και ως εκ τούτου το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση σε κάθε φόρτιση. Λόγω αυτού οι κύκλοι φόρτισης κυμαίνονται σε αριθμούς χαμηλότερους του 10^4 , ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις (ultra-low cycle fatigue) μπορεί να φτάσουν και τους 100.
- **Πολυκυκλική (high-cycle fatigue)** είναι η κόπωση που οι τάσεις δε ξεπερνούν το όριο διαρροής και άρα το υλικό υφίσταται ελαστική μόνο παραμόρφωση, με τους κύκλους φόρτισης να ξεπερνούν τους 10^4 .

Στην περίπτωση που εξετάζεται υπάρχει συγκόλληση, η οποία μειώνει την αντοχή σε κόπωση και συνήθως είναι η αιτία αστοχίας. Έτσι, είναι αποδεκτή η υπόθεση πως υπάρχουν ήδη ρωγμές και έτσι $N_i = 0$ [6]. Η περίπτωση κόπωσης που εξετάζεται έχει σκοπό να προσομοιώσει την επίδραση ενός

σεισμού ή ισχυρού κυματισμού στην κατασκευή, κι έτσι οι τάσεις λαμβάνουν ακραίες τιμές, πράγμα που μας οδηγεί στην **ultra-low cycle fatigue** (ulcf), όπου οι εφαρμοζόμενες τάσεις παίρνουν ακραίες τιμές και κύκλοι φόρτισης είναι ακόμα και λιγότεροι από 100. Η δημιουργία και η διάδοση της ρωγμής σε αυτή την περίπτωση γίνεται σχεδόν άμεσα (1^ο-6^ο κύκλο φόρτισης) μειώνοντας δραστικά την δυσκαμψία και την αντοχή[1,7].

2.4 Συγκολλήσεις

2.4.1 Γενικά

Ως συγκόλληση ορίζεται η ένωση δύο ή περισσότερων μετάλλων με δημιουργία συνέχειας. Η ένωση αυτή επιτυγχάνεται με τήξη των μετάλλων και ένωσή τους με τη βοήθεια ή όχι προσθετικού μετάλλου (filler). Ως τεχνολογία η συγκόλληση γνωρίζει μεγάλη εξέλιξη και σταδιακά αντικαθιστά άλλες παραδοσιακές μηχανικές συνδέσεις σε μια πληθώρα εφαρμογών καθώς τα πολλά πλεονεκτήματα και τα όλο και λιγότερα μειονεκτήματα που προσφέρει, επιβάλλουν την αξιοποίησή της:

- Δύναται να φτάσει μέχρι και 100% της αντοχής του βασικού μετάλλου
- Μονώνει την κατασκευή
- Μειώνει το βάρος καθώς δεν απαιτείται χρήση ήλων ή βιδών
- Μειώνει το χρόνο κατασκευής και δίνει δυνατότητα για περίπλοκες γεωμετρίες

Η χρήση της όμως επιφέρει και τις αντίστοιχες συνέπειες:

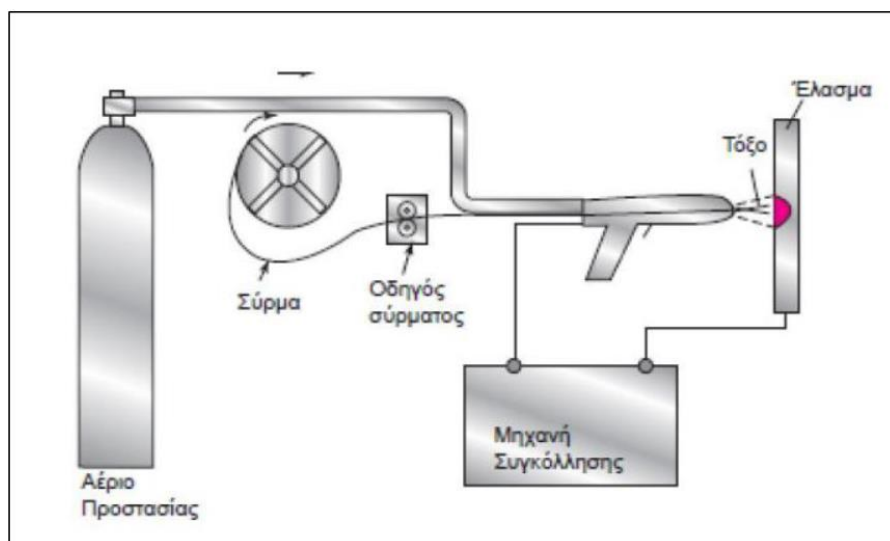
- Οι τύποι αστοχιών που προκαλεί ανιχνεύονται δύσκολα
- Δεν δύναται επιλογή λύσης της κατασκευής
- Δεν έχουν όλα τα κράματα την ίδια συγκολλησιμότητα μεταξύ τους
- Δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις/παραμορφώσεις

Μία συγκόλληση, μπορεί να διεκπεραιωθεί με πολλές μεθόδους. Κυριότερες είναι η θερμοχημική τήξη, το ηλεκτρικό τόξο, η ηλεκτρική αντίσταση, οι δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας, καθώς και ετερογενώς, με χρήση συνδετικού μέσου. Από τις πολλές μεθόδους συγκόλλησης που αναφέρθηκαν, εδώ θα αναλυθούν οι Gas Metal Arc Welding (GMAW) και Flux Cored Arc Welding (FCAW) οι οποίες

ανήκουν στην οικογένεια των συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου και χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση των δοκιμών. [6]

2.4.2 GMAW

Πρόκειται για συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου (εικ. 2.3) στην οποία σχηματισμός του τόξου γίνεται μεταξύ των μετάλλων προς συγκόλληση και αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου. Για την προστασία της λίμνης συγκόλλησης από οξείδωση χρησιμοποιείται ροή αδρανούς αερίου (π.χ. CO₂/Ar). Προτιμάται χρήση συνεχούς ρεύματος και ανάστροφης πολικότητας για σταθερότερο τόξο, βαθύτερη διείσδυση και πιο ομαλή ροή. Είναι αποδοτική μέθοδος με μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης και δυνατότητα συγκόλλησης ευρέος φάσματος υλικών. Είναι εύκολη και παράγει καθαρές, χωρίς σκουριές, ραφές. Στην εικόνα παρουσιάζεται μια τυπική συνδεσμολογία συγκόλλησης GMAW.[6]

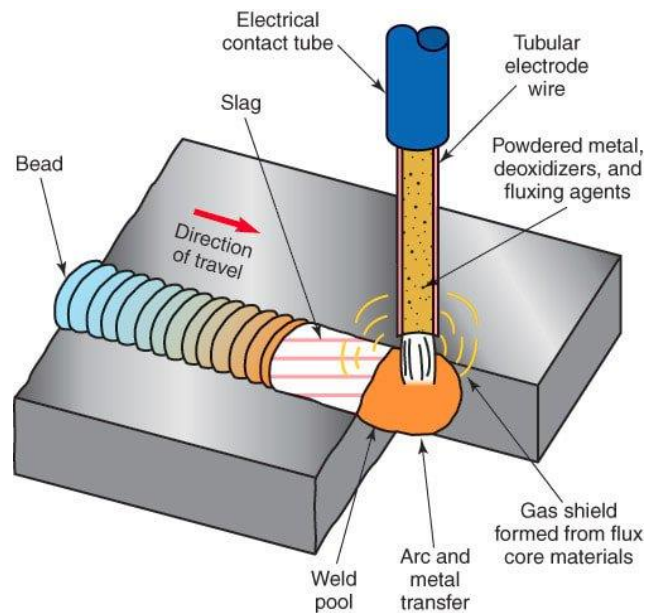


Εικ. 2.3 Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης GMAW [6]

2.4.3 FCAW

Η FCAW (εικ. 2.4) είναι συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου με σωληνωτά ηλεκτρόδια και πρόκειται για παραλλαγή της συγκόλλησης τόξου με τηκόμενα ηλεκτρόδια και προστασία αερίου (GMAW). Η διαφορά των 2 βρίσκεται στα ηλεκτρόδια. Το ηλεκτρόδιο εδώ είναι μεταλλικός σωλήνας, που στον πυρήνα του έχει σκόνη συλλιπάσματος (flux). Μπορεί να εφαρμοστεί με ή χωρίς τη χρήση αερίου

προστασίας, το οποίο, αν προτιμηθεί, συνήθως είναι CO_2 ή μίγμα CO_2/Ar . Αν δε χρησιμοποιηθεί αέριο προστασίας, τότε η σκόνη συλλιπάσματος λειτουργεί ως προστατευτικό στη θέση του αερίου, δημιουργώντας στρώμα σκωρίας το οποίο αποτρέπει την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα. [6]

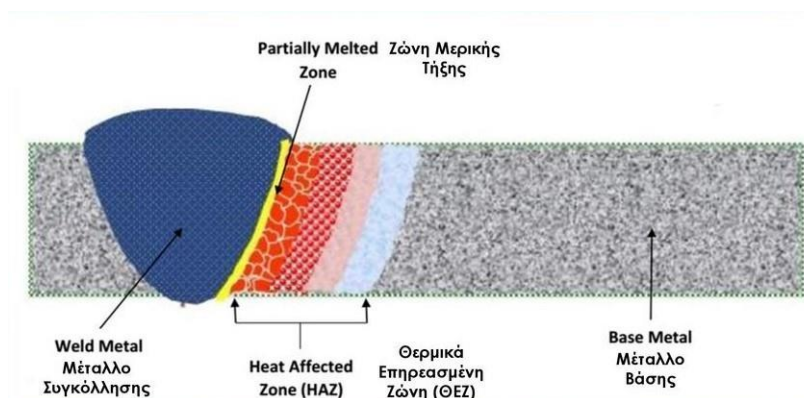


Εικ. 2.4 Αναπαράσταση της FCAW [6]

2.4.4 Ζώνες Συγκόλλησης

Μία συγκόλληση αποτελείται από τέσσερα μέρη (εικ. 2.5):

- Βασικό μέταλλο
- Θερμο-επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ ή Heat Affected Zone)
- Ζώνη μερικής τήξης (ZMT)
- Μέταλλο συγκόλλησης



Εικ. 2.5 Ζώνες Συγκόλλησης [6]

Βασικό Μέταλλο

Το βασικό μέταλλο είναι το τμήμα του μετάλλου που δεν έχει υποστεί καμία φυσικό-χημική αλλαγή και κανένα μεταλλουργικό μετασχηματισμό κατά την κατεργασία της συγκολλησεως. Παρ' όλ' αυτά μπορεί να γίνει φορέας παραμορφώσεων λόγω διαμηκών συστολών ή και εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων.[6]

Θερμο-επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ)

Είναι η ζώνη ανάμεσα στο μέταλλο βάσης και τη ζώνη μερικής τήξης. Παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία ως προς τη δομή της, αφού κάθε σημείο της βιώνει διαφορετικά τον θερμικό κύκλο, με φθίνουσα μέγιστη θερμοκρασία και ρυθμό ψύξης όσο αυξάνεται η απόσταση από το ΜΣ, οδηγώντας σε διαφορετικές δομές. Τρεις υποζώνες αναγνωρίζονται (εικ. 2.6). Η ζώνη μεγέθυνσης κόκκων, η ζώνη πλήρους εκλέπτυνσης και η ζώνη μερικούς εκλέπτυνσης. Έτσι, υπάρχει η χονδρόκοκκη και η λεπτόκοκκη περιοχή. Στην περίπτωση ενός καθαρού μετάλλου, στην χονδρόκοκκη περιοχή, η μεγέθυνση των κόκκων λόγω φαινομένων διάχυσης προκαλεί αύξηση της ευθραυστότητας του υλικού.

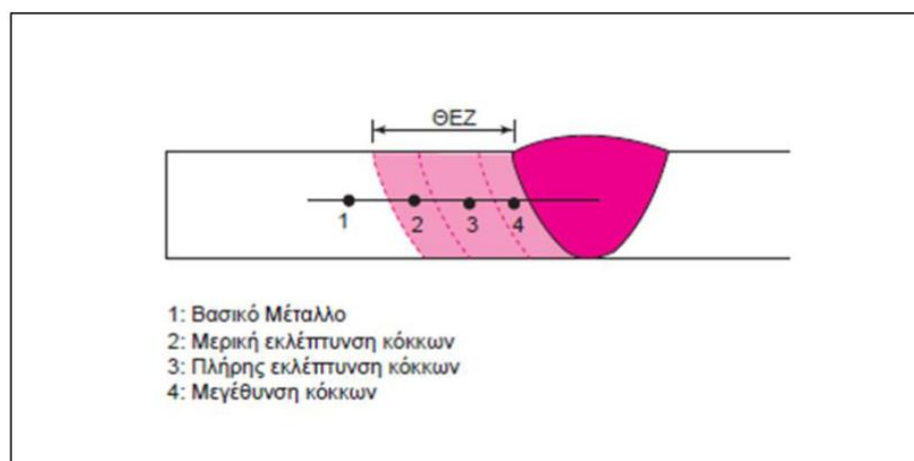
Σε περίπτωση κράματος που παρουσιάζει αλλοτροπικό μετασχηματισμό, όπως οι χάλυβες, οι μετασχηματισμοί κατά τη θέρμανση αλλά και ψύξη διαφέρουν κατά περίπτωση και πρέπει να μελετώνται ξεχωριστά. [6]

Ζώνη Μερικής Τήξης

Η ζώνη μερικής τήξης ή partially melted zone βρίσκεται ανάμεσα στο μέταλλο συγκόλλησης και στη ΘΕΖ. Είναι η επιφάνεια που περικλείει το μέταλλο συγκόλλησης και το συνδέει με την ΘΕΖ. Ανήκει στο Βασικό Μέταλλο αλλά τήκεται κατά την συγκόλληση. Σε καθαρά μέταλλα είναι δυσδιάκριτη και πρόκειται για την επιφάνεια πάνω στην οποία οι κρύσταλλοι στερεοποίησης περατώνονται. Στα κράματα βρίσκεται στην περιοχή Liquidus-Solidus και φέρει σημάδια μερικής τήξης καθώς η θερμοκρασία καθορίζει το ποσοστό υγρού στερεού. Μπορεί να παρατηρηθεί υγροποίηση των ορίων των κόκκων πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε ρωγματώσεις. [6]

Μέταλλο συγκόλλησης

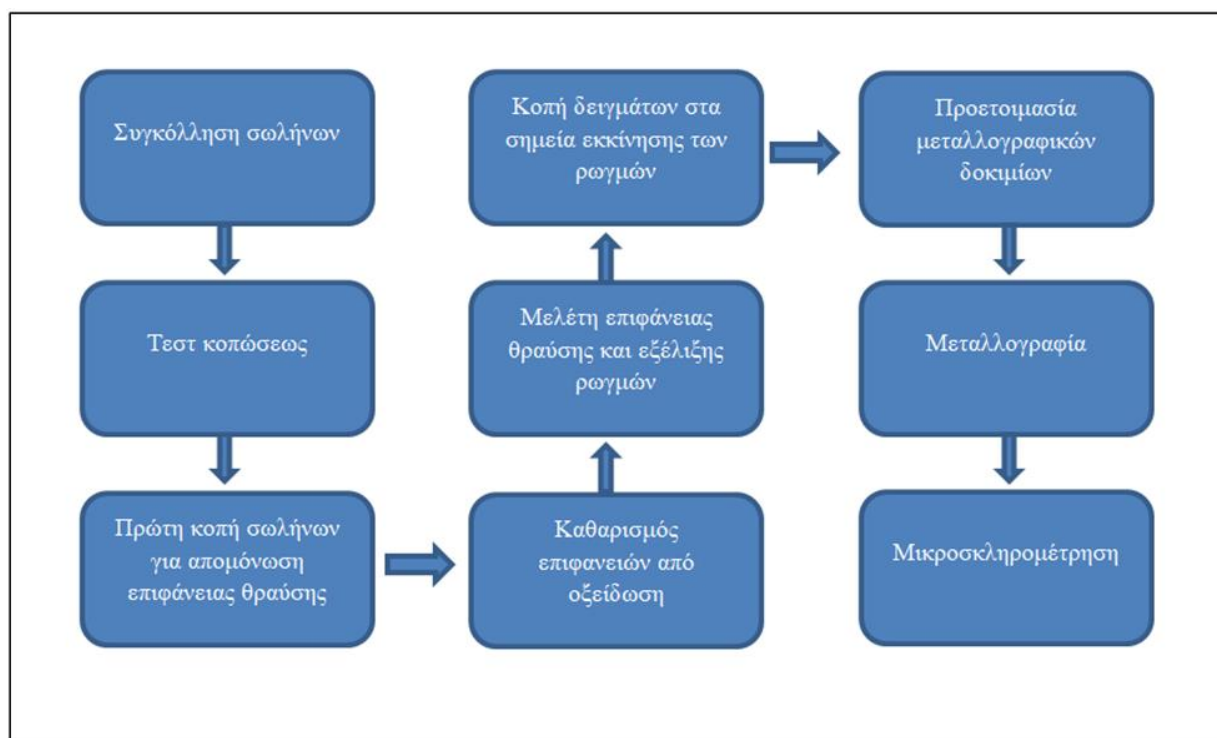
Το μέταλλο συγκόλλησης είναι το τμήμα της συγκόλλησης που έχει υποστεί τήξη κατά τη διάρκεια αυτής και συνήθως έχει διαφορετική δομή και ιδιότητες από το μέταλλο βάσης. Αποτελείται από μικρού μεγέθους, έντονα προσανατολισμένους στην διεύθυνση των ισόθερμων καμπυλών δένδριτες που αναπτύσσονται λόγω του μεγάλου ρυθμού ψύξης. [6]



Εικ. 2.6 Υποζώνες θερμοπηρεαζόμενης περιοχής [6]

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

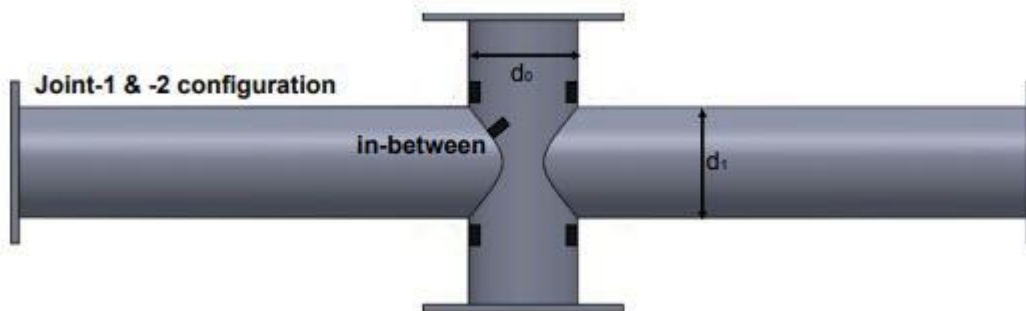
Εδώ περιγράφονται οι διαδικασίες με τις οποίες τα δοκίμια κατασκευάστηκαν και συγκολλήθηκαν, γίνεται η βαθμονόμηση/κατηγοριοποίησή τους, όπως επίσης αναφέρεται και η δοκιμή κοπώσεως στην οποία υποβλήθηκαν. Επιπλέον παρατίθενται οι έλεγχοι που διεξήχθησαν στα δείγματα, οι μακροσκοπικοί/οπτικοί και στη συνέχεια οι μικροσκοπικοί/μεταλλογραφικοί και μικροσκληρομετρήσεις.



Εικ.3.1 Διαδικασία Πειράματος

3.1 Περιγραφή δειγμάτων

Στο πείραμα που διεξήχθη δοκιμάστηκαν 3 δοκίμια χάλυβα S700 συγκολλημένα σε σχήμα σταυρού, όπως φαίνεται στο σχήμα (εικ. 3.2). Οι σωλήνες είναι όμοιοι μεταξύ τους σε διαστάσεις καθώς και στη μέθοδο συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, τα δείγματα έχουν εξωτερική διάμετρο 273mm και πάχος 10mm με λόγω διαμέτρου προς πάχος $D/t=27$. Στα crown των chord τοποθετήθηκαν strain gauges για συλλογή δεδομένων, όπως και στα σημεία όπου παρατηρήθηκαν οι μέγιστες τάσεις κατά τη γραμμική ελαστική ανάλυση σε μονοτονική/κυκλική κάμψη. Τα δοκίμια αυτά χαρακτηρίστηκαν και σημειώθηκαν ως X5, X6, X7, ως μέρος μελέτης ελέγχου και άλλων δοκιμών με διαφορετικό χάλυβα (X1-X4). Οι φορτίσεις που δέχθηκαν ήταν αυξανόμενης εντάσεως, με το X5 να έχει τη μικρότερη και το X7 τη μεγαλύτερη (πίνακας 3.1). Στα 3 αυτά δοκίμια, χαρακτηρίστηκε το crown location της κάθε πλευράς ως 1, 2, 3, 4 ξεκινώντας από τα πάνω αριστερά όπως στις φωτογραφίες 3.3, 3.4, 3.5. Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν διαμπερείς ρηγματώσεις στα ίδια σημεία, ακριβώς δίπλα στην συγκόλληση, από τη μεριά του κάθετου σωλήνα(chord).



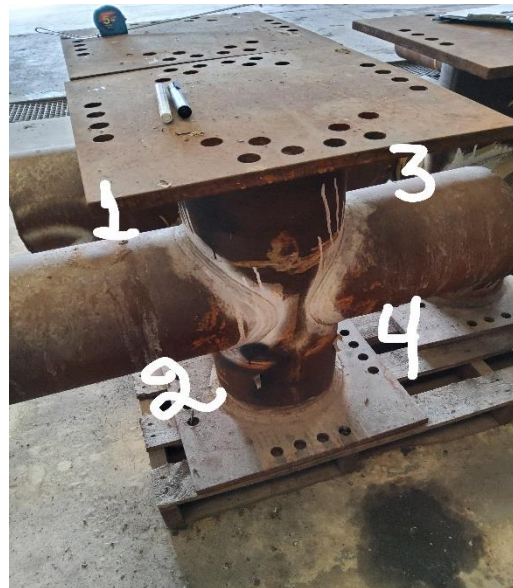
Εικ. 3.2 Απεικόνιση Δείγματος



Εικ. 3.3 Δείγμα X5



Εικ. 3.4 Δείγμα X6



Εικ. 3.5 Δείγμα X7

Πίνακας 3.1 Συνθήκες Πειραμάτων Κόπωσης

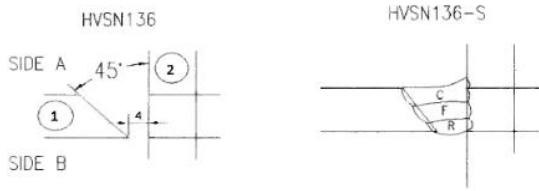
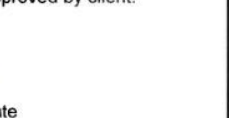
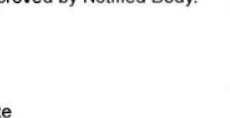
Specimen	Nf	Edge Brace Disp.(mm)	Mmax/My(My=239kNm)
X5	58	31.6	1.16
X6	30	38	1.32
X7	10	48	1.51

3.2 Συγκόλληση Δοκιμίων

Τα δείγματα συγκολλήθηκαν με τον ίδιο τρόπο συγκόλλησης από την Hollandia Offshore, σύμφωνα με το AWS D1.1 [16]. Το WPS έγινε από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σε συνεργασία με την εταιρεία. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με ημιαυτόματη μέθοδο με αυτόματο έλεγχο τροφοδοσίας του filler. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές συγκόλλησης, οι οποίες περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη ρίζα χρησιμοποιήθηκε GMAW ενώ για τα υπόλοιπα πάσα η FCAW. Ως προστατευτικό αέριο χρησιμοποιήθηκε μείγμα αργού/διοξειδίου του άνθρακα (Ar/CO₂) σε ποσοστό του πρώτου 80%. Ως filler χρησιμοποιήθηκαν για την GMAW το Fluxofil M42 EN 12535 T69 4 Mn2NiCrH5 και για την FCAW το Megafil 690R EN 18276 T69 4 Z P M 1 H5. Οι χημικές τους συστάσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Στο WPS στην εικόνα 3.6 παρουσιάζονται τα πάσα της συγκόλλησης. [17]

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση Filler Metals

Filler Metals	C max (%)	Si max (%)	Ni max (%)	Mn max (%)	S max (%)	Mo Max (%)	P Max(%)
Fluxofil M42	0.05	0.5	1.9	1.6	-	0.4	-
Megafil 690R	0.08	0.5	2	1.7	0.015	0.15	0.015

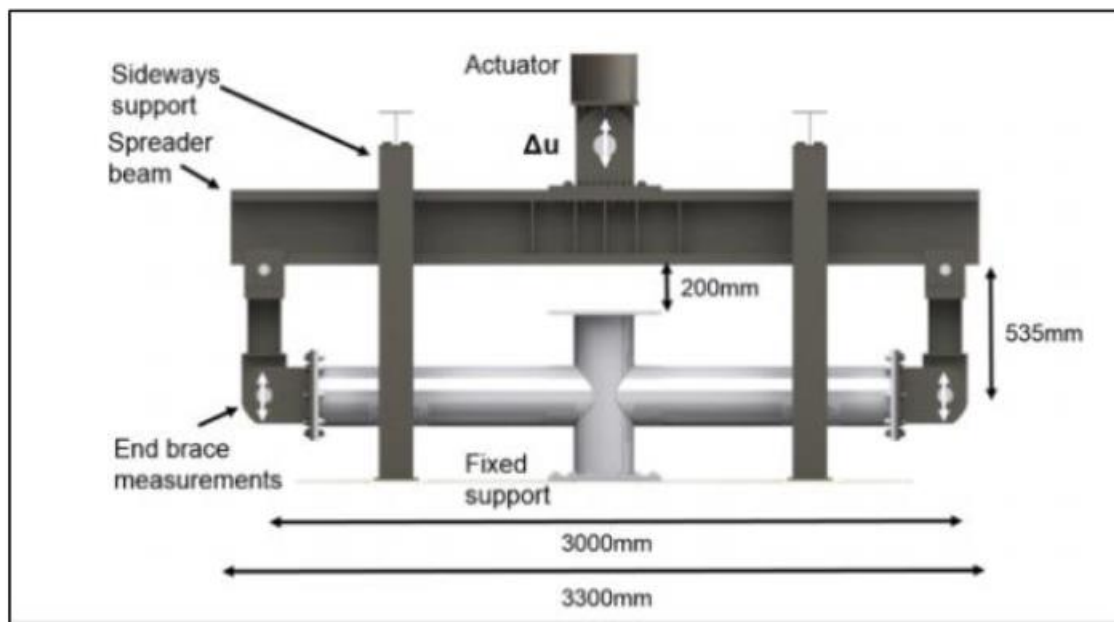
Welding Procedure Specification 1464-2											
Project: University Tubular Joints Welding					Location: Hollandia shop		Date: 12-7-2018				
Client: University of Edinburgh					WPQR: 717+718+719		Rev.: 0				
Order no.: 34050					Supervisor: Hollandia offshore QC		Code: AWS D1.1 2015				
Material					Preheat						
No.	Material	EN 15608 Gr.	Thickness [mm]	Diameter [mm]	Preheat temp. [°C]		25				
1	S700MLH	-	10 - 10	273 - 273	Interpass temp [°C]		173				
2	S700MLH	-	10 - 10	273 - 273	Method		Gas burner				
Process					Post Weld Heat Treatment						
No.	Process	Process no.	Position	Method	PWHT		-				
1	GMAW-C	138	PA/CP/EP/FP - 1G/2G/3G/4G	Semi automatic	Procedure no.		-				
2	FCAW (R)	136	PA/CP/EP/FP - 1G/2G/3G/4G	Semi automatic							
Filler metal					Shielding						
No.	Trade name	EN-Class	AWS-Class.	Size	Shielding / Backing gas		80%Ar/ 20%CO ₂		-		
1	Fluxofil M42	EN 12535 T69 4 Mn2NiCrHS	A 5.28 E110C-G H4	1,2	Gas class.		ISO 14175-M21		-		
2	Megafil 690R	EN 18276 T69 4 Z P M 1 HS	A 5.28 E110 T1-K4	1,2	Gas flow [l/min]		15-20		-		
3	-	-	-	-	Nozzle diameter [mm]		-		-		
4	-	-	-	-	Flux type and class		-				
Remark(s)					General						
1	-				Tungsten electr. + size		-		-		
2	-				Back gouging		-		-		
3	-				Back grinding		-		-		
4	-				Weaving		Stringer		-		
5	-				Torch angle [°]		0-20		-		
6	-				Stand off distance [mm]		10-20		-		
					Joint						
					Groove design		HV				
					Groove preparation		Cutting and grinding				
					Backing		-				
					Throat thickness [mm]		-				
					Tolerances on groove preparation						
							lower		upper		
					Groove Angle [°]		-5		+5		
					Root Opening [mm]		-2		+2		
					Root Face [mm]		-0		+1		
Welding Parameters											
Pass	Side	Process	Position	Filler metal	Size	Polarity	Current [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]	Run Out Length [cm]	Heat Input [kJ/cm]
R	A	GMAW-C	1G/2G/3G/4G	M42	1,2	DC+	102 - 113	14,0 - 15,4	8 - 9	- - -	7,6 - 10,4
F	A	FCAW	1G/2G/3G/4G	690R	1,2	DC+	200 - 250	22,0 - 25,0	25 - 35	- - -	6,0 - 12,0
C	A	FCAW	1G/2G/3G/4G	690R	1,2	DC+	210 - 240	22,0 - 23,5	20 - 35	- - -	6,3 - 13,5
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Prepared by:			Checked by:			Approved by client:			Approved by Notified Body:		
 Date: 12/10/2018			 Date: 12/10/2018			 Date: 12/10/2018			 Date: 12/10/2018		

Εικ. 3.6 WPS των δειγμάτων

3.3 Δοκιμή Κόπωσης

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πλήρως αντιστρεπτή κυκλική κάμψη στο επίπεδο ($R=-1$) μέχρι τη δημιουργία διαμπερούς ρωγμής κόπωσης. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε το σερβοϋδραυλικό σύστημα INSTRON 8800 δυνατότητας 1MN.

Στο πείραμα μετρήθηκε η μετατόπιση του άκρου του brace με τη χρήση ποτενσιόμετρων (εικ. 3.8), ενώ με την εφαρμογή strain gauges (εικ. 3.9) στα 2 από τα 4 crown locations των chords αλλά και στο “in between”, μετρήθηκαν οι τοπικές παραμορφώσεις. Τα gauges τοποθετήθηκαν 5-9mm από τον πόδα της συγκόλλησης στα crown ενώ στα in-between απείχαν 5-25mm. Τέλος τα δοκίμια ήταν σφραγισμένα αεροστεγώς και γεμισμένα με καπνό, ώστε να ανιχνευθεί το ακριβές χρονικό σημείο αλλά και η περιοχή της αστοχίας, όταν δηλαδή η κάποια ρωγμή γίνει διαμπερής. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 3.7



Εικ. 3.7 Σχηματική απεικόνιση του πειράματος κόπωσης [1]



Εικ. 3.8 Χρήση ποτενσιόμετρων στα edges[1]



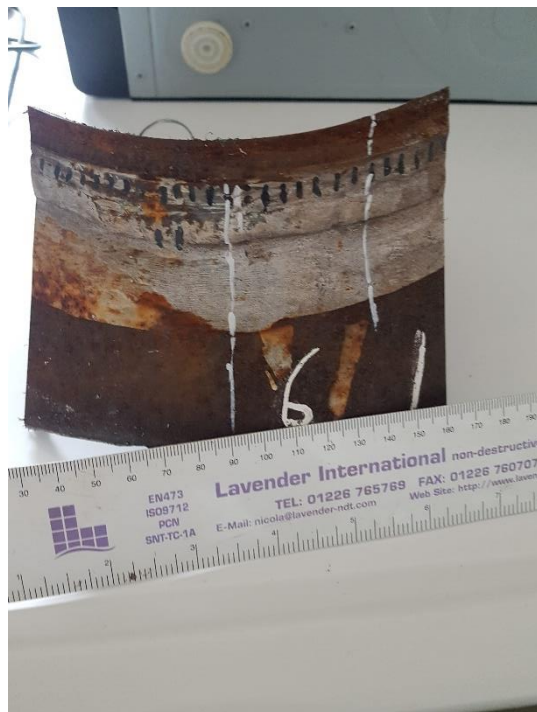
Εικ. 3.9 Χρήση strain gauges στα Crown Points[1]

3.4 Οπτικός Έλεγχος

Μετά την δοκιμή κόπωσης και αστοχίας των δειγμάτων έγινε ο οπτικός(μακροσκοπικός) έλεγχος. Στα πλαίσιά του επιλέχθηκαν πλευρές που είχαν αστοχήσει με through thickness crack και απελευθερώθηκαν με τη χρήση οξυγονοκοπής. Οι πλευρές αυτές καθαρίστηκαν με βασιλικό νερό (αναλογία κατ' όγκο: $3\text{HCl}/1\text{HNO}_3$) το οποίο έχει την ιδιότητα να απομακρύνει τη σκουριά αφήνοντας ανέπαφη την επιφάνεια[18]. Στη συνέχεια ελέγχθηκαν για σημεία από όπου μπορεί να ξεκίνησε η ρωγμή που οδήγησε στη θραύση.



Εικ. 3.10 Αστοχία στο Δείγμα X6



Εικ. 3.10-3.11 Επιφάνεια Θραύσης του δείγματος Χ6 πλευρά 1

3.5 Μεταλλογραφία

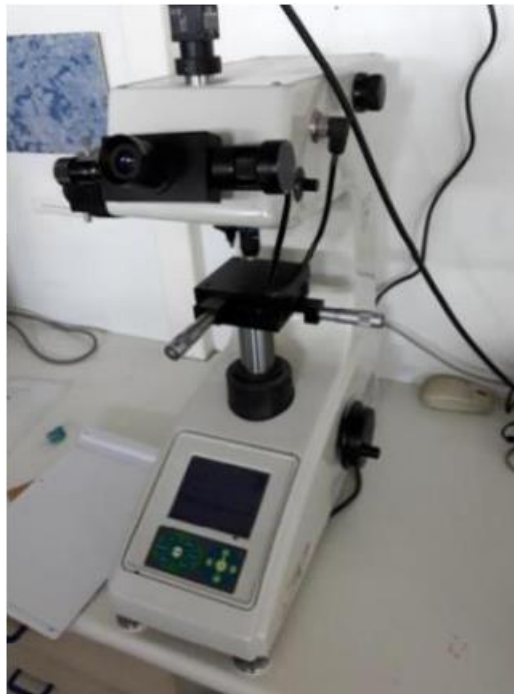
Μετά τον μακροσκοπικό έλεγχο ακολούθησε ο μικροσκοπικός, με τη χρήση του Leitz Aristomet (εικ. 3.12) που διαθέτει το ΕΥΠΘ. Για να γίνει αυτό πρώτα επιλέχθηκαν τα σημεία πάνω στις επιφάνειες θραύσης όπου έρχονταν προσοχής. Στη συνέχεια, έγιναν κάθετες τομές με τον κάθετο τροχό Struers Unitom-2 ώστε να απομονωθούν οι περιοχές αυτές και πάρθηκαν δείγματα τα οποία εγκιβωτίστηκαν σε καλούπια με την αξιοποίηση της ρητίνης VersoCit-2. Έπειτα, λειάνθηκαν με τη χρήση χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου (SiC) με αυξανόμενη λεπτότητα κόκκων, ξεκινώντας από 80grit και σταδιακά ανεβαίνοντας μέχρι τα 1000grit. Κατόπιν, στίλβώθηκαν με κόκκους διαμαντιού 3mm και τέλος υπέστησαν χημική προσβολή με Nital(5%), που είναι μείγμα νιτρικού οξέος και αλκοόλης, προκειμένου να αποκαλυφθεί η μικροδομή τους. Για τη λείανση και στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα Knuth-roter 3 και Dap-V της Struers.



Εικ. 3.12 Leitz Aristomet Μικροσκόπιο

3.6 Μικροσκληρομέτρηση

Τελευταίο βήμα για την αξιολόγηση των δειγμάτων είναι η μικροσκληρομέτρηση. Το κάθε δείγμα μετρήθηκε στην κλίμακα Vickers με βάρος 300g στο όργανο WOLPERT 402MVD (εικ. 3.13). Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στην ακμή της επιφάνειας θραύσης και συνέχισαν τόσο κατά μήκος αυτής όσο και προς το εσωτερικό με βήμα 2.5 χιλιοστών. Στις περιοχές της συγκόλλησης ελήφθησαν τιμές και στην θερμοεπηρεαζόμενη και στο μέταλλο συγκόλλησης για τη δημιουργία προφίλ σκληρότητας



Εικ. 3.13 Μικροσκληρόμετρο WOLPERT 402 MVD

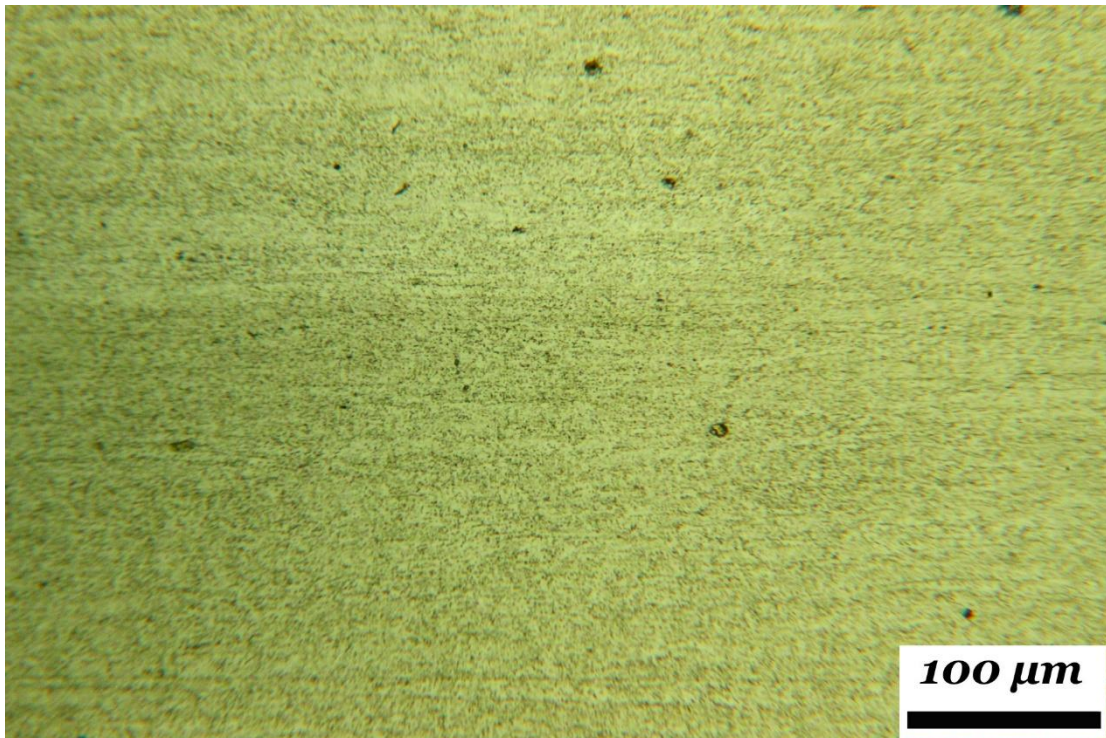
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής μελέτης που διεξήχθη στα δείγματα, με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Μελετάται το βασικό μέταλλο, η συγκόλληση και η συμπεριφορά των δειγμάτων μέσω οπτικού ελέγχου, μεταλλογραφίας και μικροσκληρομέτρησης, όπως αναλύθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο.

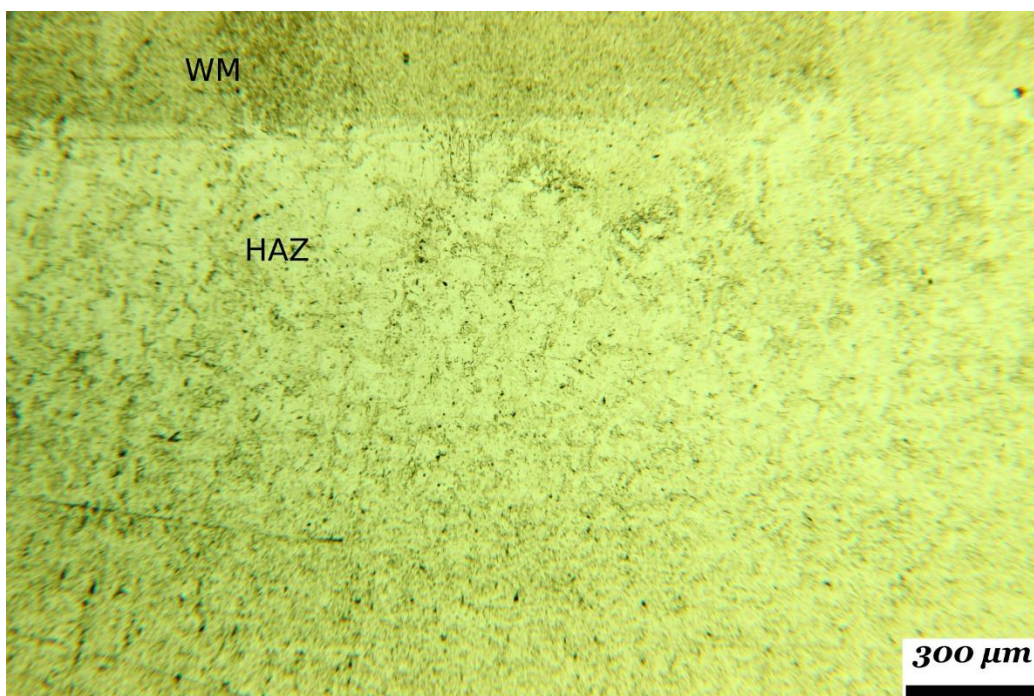
4.1 Βασικό Μέταλλο

Στο πλαίσιο της έρευνας, έγινε αξιολόγηση του βασικού μετάλλου αλλά και της συγκόλλησης σε σημείο μακριά από την αστοχία, προκειμένου να αποκτήσουμε μία βάση για σύγκριση με τα αντίστοιχα δείγματα από τα σημεία της αστοχίας τόσο μεταλλογραφικά αλλά και σε τιμές σκληρότητας. Έτσι έχουμε δύο δείγματα, ένα του βασικού μετάλλου και ένα στο οποίο φαίνεται η συγκόλληση και η θερμοεπηρεαζόμενη περιοχή.

Το μέταλλο είναι χάλυβας υψηλής αντοχής S700. Εξήχθη δείγμα βασικού μετάλλου μακριά από τη συγκόλληση με σκοπό τη μεταλλογραφική του ανάλυση (εικ. 4.1, 4.2). Η δομή του είναι φερρίτης-μπαινίτης και φερρίτης-περλίτης, λεπτόκοκκη, ενώ η σκληρότητά του μετρήθηκε στα 270-280HV_{0.3}. Παρουσιάζεται φωτογραφία της συγκόλλησης, περιλαμβάνοντας το μέταλλο συγκόλλησης και τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη μέχρι τα όρια του βασικού μετάλλου. Στην εικόνα παρατηρούνται τα όρια του ΜΣ καθώς και αυτά μεταξύ χονδρόκοκκης και λεπτόκοκκης θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης.



Εικ. 4.1 Δομή Βασικού Μετάλλου



Εικ. 4.2 Συγκόλληση του S700

4.2 Οπτικός Έλεγχος

Στη διάρκεια του πειράματος διαπιστώθηκε πως και στα 3 δοκίμια η ρωγμή ξεκινά από κάποιο από τα 4 crown, από την πλευρά του chord και κατά τη διεύθυνση του πάχους. Στη συνέχεια, οι κυκλικές φορτίσεις διεύρυναν τις αρχικές ρωγμές συμμετρικά και κατά μήκος του πόδα της συγκόλλησης έως ότου μία από τις ρωγμές να γίνει διαμπερής, όπου σταματά και το πείραμα. Στο σημείο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των σημείων αστοχίας των δειγμάτων.

Δείγμα X5



Εικ. 4.3 αρίθμηση πλευρών Δείγματος



Εικ. 4.4 πλευρά 2

Το δοκίμιο 5 αστόχησε μετά από 60 κύκλους. Η φόρτιση που δέχθηκε ήταν $|M_{max}| = 277 kNm$. Παρατηρήθηκε διαμπερής ρωγμή στην πλευρά 2 όπως αυτή ορίζεται στην εικόνα. Η ρωγμή σχηματίστηκε μεταξύ chord και συγκόλλησης, στα όρια του πόδα της συγκόλλησης. Αφού έγιναν οι κατάλληλες κοπές, βρέθηκε πως αν και υπήρχαν ρωγμές και στην 3, δεν ήταν διαμπερείς.

Δείγμα Χ6



Εικ. 4.5 Πλευρά 1 δείγμα Χ6

Το δοκίμιο Χ6, δέχθηκε κυκλική φόρτιση $|M_{max}| = 315 kNm$ και αστόχησε μετά από 30 κύκλους φόρτισης. Κατόπιν οπτικού ελέγχου, βρέθηκε πως η πλευρά 1 είχε διαμπερή ρωγμή ακριβώς δίπλα στον πόδα της συγκόλλησης, στο chord, η οποία έφτανε μέχρι τα saddle points. Κατόπιν της κοπής του φανερώθηκε και μια στην πλευρά 3.

Δείγμα X7



Εικ. 4.6 Δείγμα X6 πλευρά 1



Εικ. 4.7 Δείγμα X6 πλευρά 3

Το Δοκίμιο X7 δέχθηκε κυκλική φόρτιση $|M_{max}| = 361 kNm$ και αστόχησε μετά από 10 κύκλους φόρτισης. Ο οπτικός έλεγχος έδειξε 2 θραύσεις, μία στην πλευρά 1 και μία στην 3. Μετά την απελευθέρωση των πλευρών από την κατασκευή, βρέθηκε πλήρης θραύση στην πλευρά 1 η οποία και επιλέχθηκε για έλεγχο, καθώς η 3 δεν είχε διαπεράσει το πάχος. Και οι 2 ρωγμές εμφανίστηκαν, όπως και στα προηγούμενα δοκίμια, στη μεριά του chord ακριβώς στον πόδα της συγκόλλησης, ενώ αυτή της πλευράς 1 εκτείνεται μέχρι τα saddle points.

4.3 Επιφάνειες Θραύσης

Δείγμα X5

Στο δείγμα αυτό, όπως προαναφέρθηκε, η πλευρά 2 παρουσίασε διαμπερή ρωγμή. Μετά την απελευθέρωση της επιφάνειας και την εκκαθάρισή της, μελετήθηκε για την ανίχνευση σημείων που μπορεί να ξεκίνησε η ρωγμή. Τελικά βρέθηκε το σημείο 35-40mm από το crown point το οποίο φαίνεται στη φωτογραφία. Η ρωγμή φαίνεται πως εσωτερικά εισχωρεί στο μέταλλο του chord έως ότου διαπεράσει το πάχος.



Εικ. 4.8 Τόξο κόπωσης δείγμα X5



Εικ. 4.9 Απέναντι πλευρά σημείου τομής δείγματος 5

Δείγμα X6

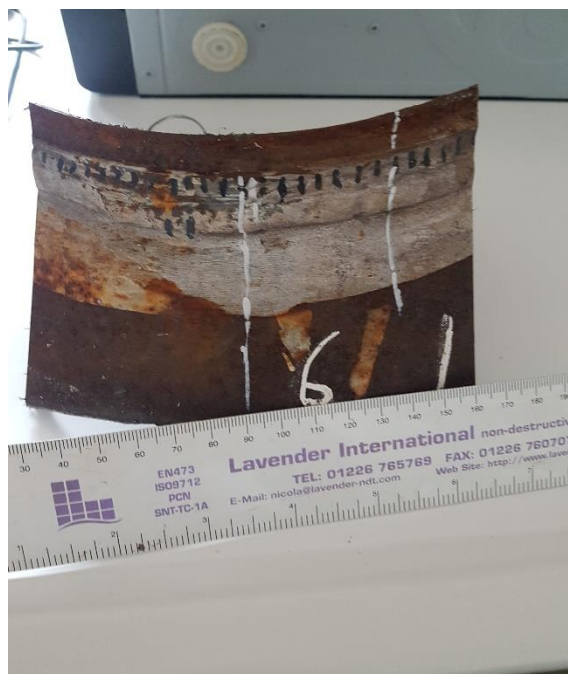
Στο Δοκίμιο 6, αφού κόπηκε για να απελευθερωθούν οι πλευρές, επιλέχθηκε η πλευρά 1 για εξέταση, καθώς ήταν αυτή που είχε through thickness crack. Ερευνώντας την επιφάνεια θραύσης βρέθηκε ένα σημείο κοντά στο crown στο οποίο παρατηρήθηκαν τόξα κόπωσης. Έτσι επιλέχθηκε το σημείο στο κέντρο του, 12mm από το crown.



Εικ. 4.10 X6 πλευρά 1 πριν την αποκολληση.



Εικ. 4.11 Επιφάνεια θραύσης Χ6 πλευρά 1 Απέναντι μεριά



Εικ. 4.12 Επιφάνεια θραύσης Χ6 πλευρά 1 μεριά συγκόλλησης

Δείγμα Χ7

Μετά την απελευθέρωση των πλευρών από την κατασκευή, βρέθηκε πλήρης θραύση στην πλευρά 1 και συνεπώς επιλέχθηκε για έλεγχο. Εκεί ανιχνεύθηκε τόξο κοπώσεως με κέντρο 7mm μακριά από το crown. Εκεί έγινε τομή κάθετα στην επιφάνεια θραύσης για την εξαγωγή δειγμάτων, από την πλευρά της συγκόλλησης αλλά και του chord.



Εικ. 4.13 X7 πλευρά 1 mirror side



Εικ. 4.14 X7 πλευρά 1 weld side



Εικ. 4.15 X6 πλευρά 1 σημείο κοπής για μεταλλογραφία

Στον πίνακα που ακολουθεί [4.1] παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των τόξων κοπώσεως στα δείγματα.

Πίνακας 4.1 Τόξα Κόπωσης

Μήκη Τόξων Κόπωσης	
Δείγμα X5	35mm
Δείγμα X6	45mm
Δείγμα X7	45mm

4.4 Μεταλλογραφία

Κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο επιλέχθηκαν σε κάθε δείγμα τα σημεία ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, τα σημεία αυτά απομονώθηκαν με τη χρήση του τροχού που διαθέτει το μηχανουργείο του τμήματος και στη συνέχεια με τον τροχό κοπής του εργαστηρίου διαμορφώθηκαν ώστε να γίνει ο εγκιβωτισμός τους σε ρητίνη, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο μεταλλογραφικός έλεγχος. Έτσι, θα παρουσιαστούν οι επιφάνειες θραύσης τόσο από τη μεριά της συγκόλλησης όσο και από την απέναντι μεριά.

Δείγμα X5

Στο δείγμα αυτό, η πλευρά 2 επιλέχθηκε για μεταλλογραφία και έγινε έλεγχος στη συγκόλληση αλλά και στο chord. Συγκεκριμένα ελέγχθηκε το σημείο 35-40mm από το crown point το οποίο στο πλαίσιο της επιφάνειας θραύσης. Στις εικόνες 4.16-4.17 βλέπουμε το σημείο που επιλέχθηκε και τα δοκίμια που προέκυψαν.

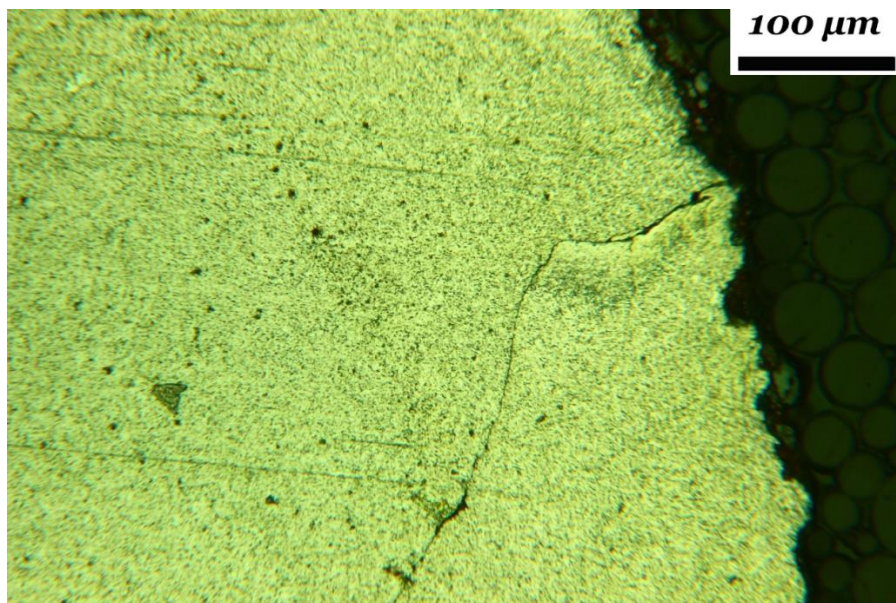


Εικ. 4.16 Εγκιβωτισμένα δοκίμια του X5

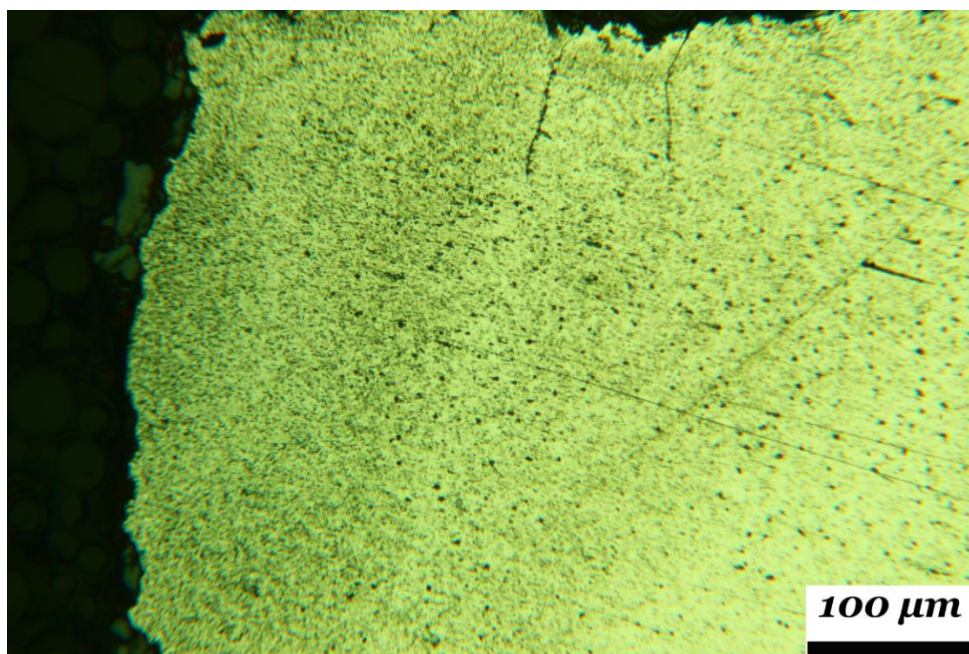


Εικ. 4.17 Σημείο όπου έγινε η τομή

Στην εικόνα 4.18-19 φαίνεται αριστερά η συγκόλληση καθώς και η επιφάνεια θραύσης. Το μικροσκόπιο έδειξε πως η θραύση ξεκίνησε από την λεπτόκοκκη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και εξελίχθηκε κατά μήκος της συγκόλλησης.



Εικ. 4.18 Μεταλλογραφία στη μεριά της συγκόλλησης στο X5 πλευρά 2



Εικ. 4.19 Μεταλλογραφία της απέναντι πλευράς του X5 πλευρά 2

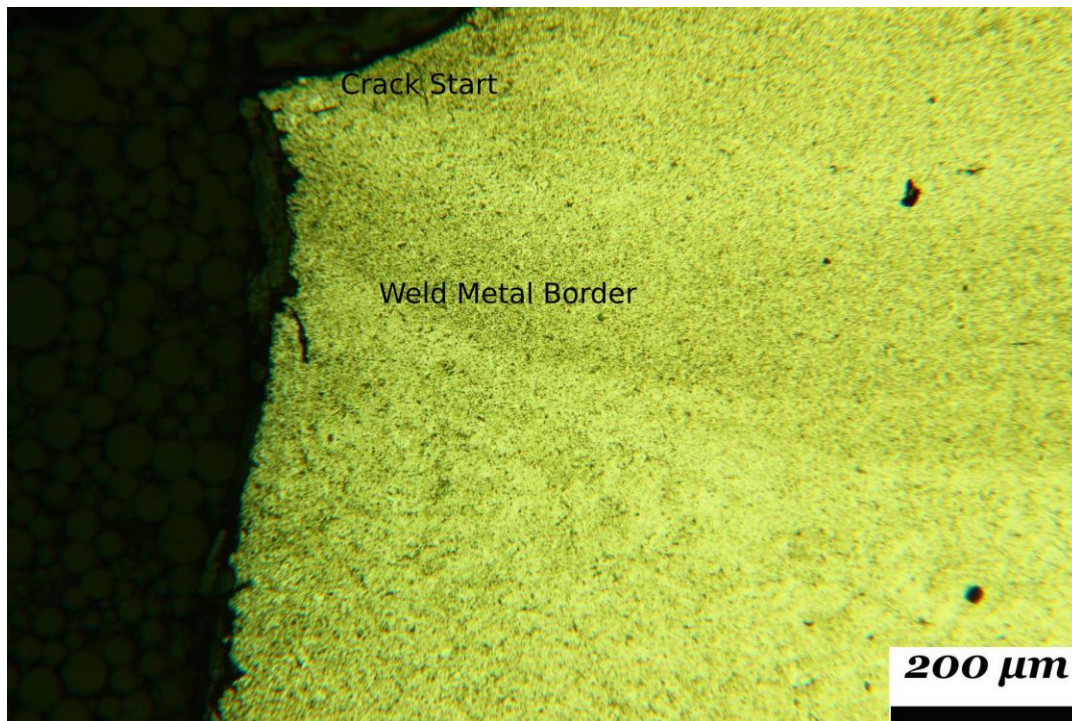
Δείγμα X6

Από το σημείο που επιλέχθηκε, εξήχθη το δείγμα που φαίνεται στην εικόνα, μαζί με την απέναντι περιοχή του chord στα 12mm από το crown, κάθετα στην επιφάνεια θραύσης. Αφού λειάνθηκε και

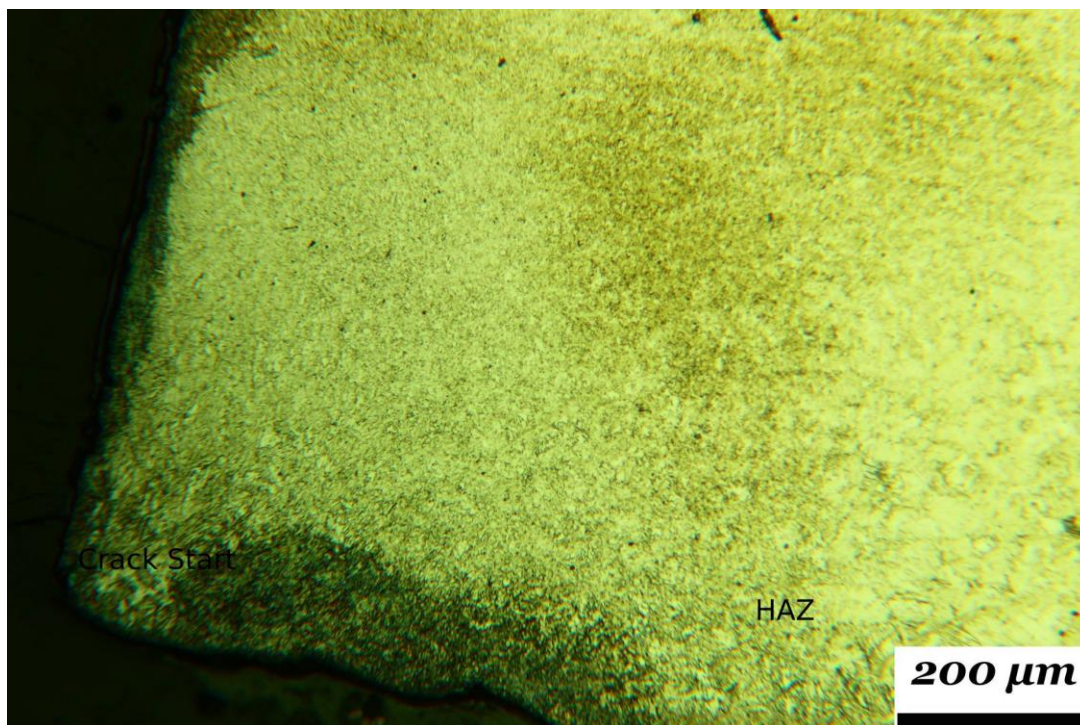
στιλβώθηκε, παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο. Εκεί (εικ. 4.21) φαίνεται και από την παρατήρηση τόσο της πλευράς της συγκόλλησης, όσο και της απέναντι, ότι η ρωγμή ξεκίνησε από το μέταλλο συγκόλλησης και προχώρησε στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη προς το εσωτερικό του σωλήνα, μέχρι την πλήρη θραύση.



Εικ. 4.20 Εγκιβωτισμένα δοκίμια Χ6 πλευρά 1



Εικ. 4.21 Μεταλλογραφία Δείγμα Χ6 μεριά 1, πλευρά συγκόλλησης



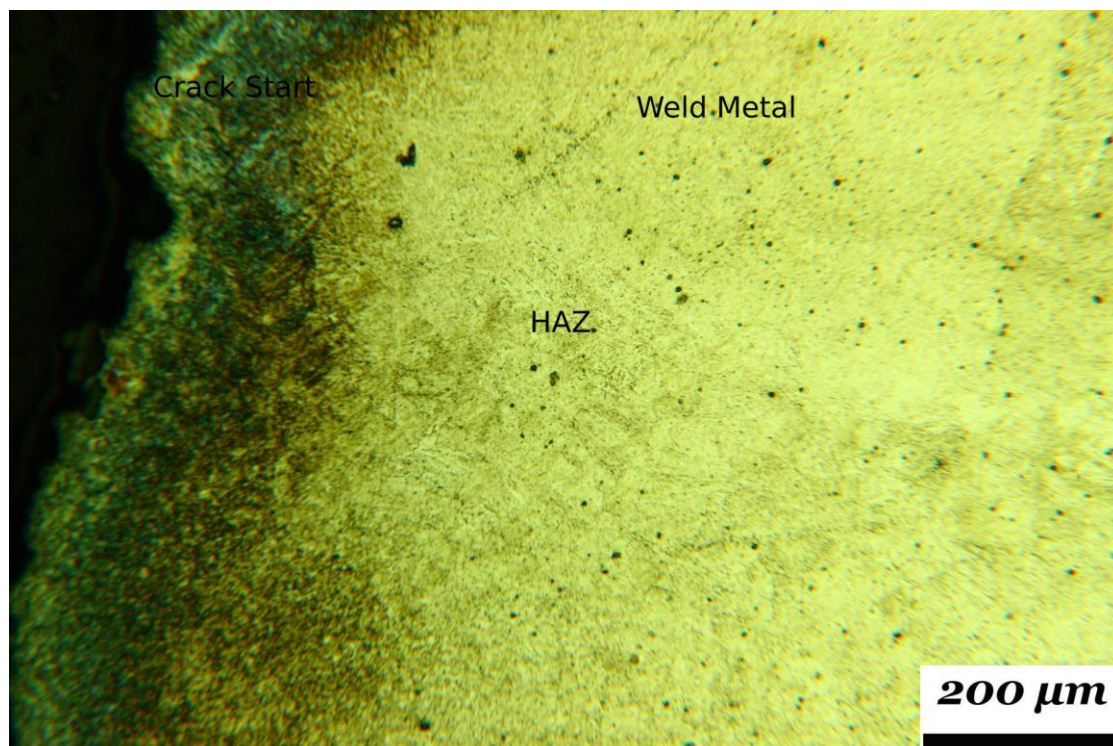
Εικ. 4.22 Μεταλλογραφία Δείγμα Χ6 μεριά 1, απέναντι πλευρά

Δείγμα X7

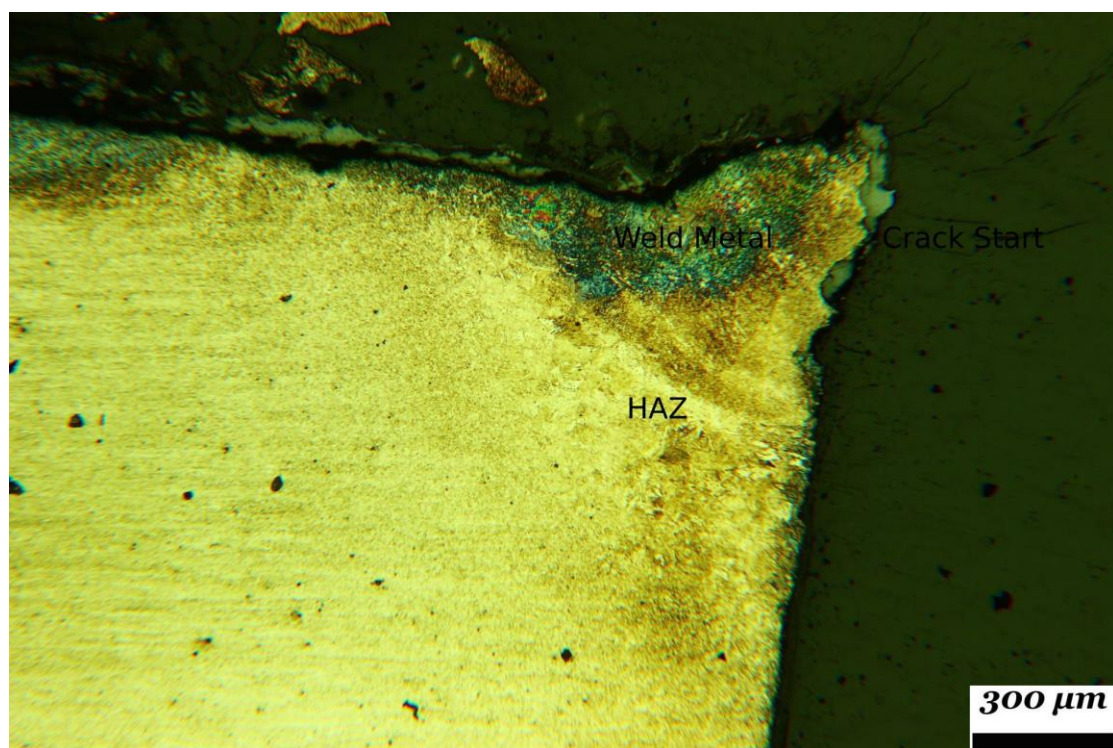
Τα δείγματα, αφού εγκιβωτίστηκαν, παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο. Εκεί φάνηκε πως η θραύση ξεκίνησε από την περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης, πράγμα που φαίνεται ξεκάθαρα καθώς διακρίνεται (εικ. 4.24) η χονδροκόκκη θερμοεπηρεαζόμενη περιοχή καθώς ακολουθούμε την επιφάνεια θραύσης από την αρχή προς την κατεύθυνση διάδοσής της. Η παρατήρηση αυτή επικυρώνεται μελετώντας την απέναντι πλευρά (εικ. 4.25), δηλαδή του chord, όπου φαίνεται πιο καθαρά η ΘΕΖ. Καταλήγουμε λοιπόν πως η ρωγμή ξεκίνησε στο μέταλλο συγκόλλησης και πέρασε στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη κοντά στην κεφαλή της συγκόλλησης, πριν διαδοθεί στο βασικό μέταλλο και προκαλέσει θραύση.



Εικ. 4.23 Εγκιβωτισμένα δοκίμια του X7 πλευρά 1



Εικ. 4.24 Δείγμα X7 Μεταλλογραφία περιοχής θραύσης/πλευρά συγκόλλησης



Εικ. 4.25 Δείγμα X7 Μεταλλογραφία περιοχής θραύσης/απέναντι πλευρά, αρχή ρωγμής στο chord



Εικ. 4.26 Δείγμα Χ7 Εστίαση στην ΘΕΖ στο chord

4.5 Μικροσκληρομετρήσεις

Τα δοκίμια που μελετήθηκαν προηγουμένως υποβλήθηκαν σε μικροσκληρομέτρηση σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Έτσι προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες παρακάτω. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές που πάρθηκαν από το μέταλλο σε σημείο μακριά από την αστοχία. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές που λήφθηκαν από τα δείγματα που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μετρήσεις ξεκινούν από το άνω σημείο της επιφάνειας θραύσης όπως φαίνεται στα δοκίμια και έχουν παρθεί τιμές ανά 2.5 χιλιοστά προς τον Χ και Υ άξονα όπου ο Υ βρίσκεται κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης ενώ ο Χ προς την κατεύθυνση του μετάλλου.

Πίνακας 4.2 Μικροσκληρομετρήσεις στο μέταλλο μακριά από την αστοχία (Σε φορτίο $HV_{0.3}$)

	X5	X6	X7
BASE METAL	267	265	262
WELD METAL	257	275	271

Πίνακας 4.3 Δείγμα X5

Chord Side		
Y Coordinate(mm)	X coordinate(mm)	$HV_{0.3}$
0	0	257
0	2.5	262
0	50	261
2.5	0	265
5.0	0	241

Πίνακας 4.5 Δείγμα X6

Chord Side		
Y Coordinate(mm)	X coordinate(mm)	$HV_{0.3}$
0	0	271
0	2.5	271
0	5.0	271
2.5	0	261
5.0	0	269

Πίνακας 4.4 Δείγμα X5

Mirror Side		
Y Coordinate(mm)	X coordinate(mm)	$HV_{0.3}$
0	0	299
2.5	0	295
5.0	0	327
0	2.5	288
0	5.0	302

Πίνακας 4.6 Δείγμα X6

Mirror Side		
Y Coordinate(mm)	X coordinate(mm)	$HV_{0.3}$
0	0	290
2.5	0	300
5.0	0	296
0	2.5	291
0	5.0	295

Πίνακας 4.7 Δείγμα Χ7

Chord Side		
Y Coordinate	X coordinate	HV _{0.3}
0	0	348
0	25	317
0	50	317
25	0	307
50	0	296

Πίνακας 4.8 Δείγμα Χ7

Mirror Side		
Y Coordinate	X coordinate	HV _{0.3}
0	0	297
25	0	295
50	0	280
0	25	281
0	50	256

Πίνακας 4.9 HAZ Δειγμάτων

Δείγμα	HAZ	
	Coarse	fine
X5	328	255
X6	330	245
X7	333	268

Στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης οι τιμές που παρατηρήθηκαν ήταν παρόμοιες με του βασικού μετάλλου. Στην ΘΕΖ παρουσιάστηκαν αυξημένες τιμές δηλαδή από 270HV_{0.3} στο βασικό μέταλλο υπήρχαν τιμές μέχρι και 330HV_{0.3}. Τέλος, κοντά στις επιφάνειες θραύσης οι τιμές σκληρότητας ήταν επίσης ανεβασμένες, πράγμα που μπορεί να εξηγείται και από τις πλαστικές παραμορφώσεις που είχαν υποστεί.

5. Συμπεράσματα

Η διπλωματική αυτή ασχολήθηκε με τη μεταλλουργική συμπεριφορά συγκολλητών σωληνωτών συνδέσεων (X) από χάλυβα υψηλής αντοχής S700 οι οποίες προορίζονται για υπεράκτια αιολικά πάρκα σε βάθος 55 μέτρων, ως δομικό στοιχείο των ανεμογεννητριών. Οι συνθήκες εκεί μπορούν να προσομοιωθούν μέσω της κυκλικής κοπώσεως. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι ακραίες συνθήκες όπως σεισμός ή έντονος κυματισμός, μέσω ακραίας ολιγοκυκλικής κόπωσης (Ultra Low Cycle Fatigue). Τρία δοκίμια κατασκευάστηκαν, ίδιων διαστάσεων και γεωμετρίας, συγκολλημένα με τις ίδιες συνθήκες, τα οποία υποβλήθηκαν σε πλήρως αντιστρεπτή κάμψη εντός του επιπέδου με διαφορετικές τάσεις το κάθε ένα και αστόχησαν σε λιγότερο από 100 κύκλους. Σε αυτά έγινε έπειτα αξιολόγηση των σημείων αστοχίας, των επιφανειών θραύσης, μεταλλογραφία και μικροσκληρομετρήσεις.

Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν στο ίδιο σημείο έναρξη της ρωγμής, δηλαδή σε ένα από τα crowns από την πλευρά του chord. Η ρωγμή αυτή επεκτάθηκε συμμετρικά ως προς το crown και οδήγησε στην αστοχία. Τα δοκίμια παρουσίασαν διαφοροποίηση ως προς το σημείο που αστόχησαν καθώς το X5 αστόχησε στην πλευρά 2 ενώ το X6 και X7 στην 1. Παρατηρήθηκε πως και στα 3 δοκίμια υπήρξαν και στις άλλες πλευρές ρωγμές στα ίδια σημεία αλλά όχι διαμπερείς. Η μεταλλογραφία έδειξε πως η αστοχία ξεκίνησε στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη στο X5 ενώ στα X6 και X7 στο μέταλλο συγκόλλησης και στη συνέχεια εισχώρησε στο βασικό μέταλλο έως ότου διαπεράσει το πάχος. Όλα τα δοκίμια έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά καθώς πάντα η ρωγμή συνεχιζόταν στο βασικό μέταλλο.

Συνοψίζοντας, οι έλεγχοι έδειξαν πως η χρήση του S700 στην παρούσα εφαρμογή είχε καλά αποτελέσματα με πολύ καλές αντοχές δεδομένων των ακραίων φορτίσεων που επιβλήθηκαν στα δείγματα και μπορούν στο μέλλον να εφαρμοστούν ευρέως σε τέτοιες κατασκευές, με σκοπό τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ασφάλειας.

Βιβλιογραφία

[1] K. Chatziioannou, S. A. Karamanos and Y. Huang, «Ultra low-cycle fatigue performance of S420 and S700 steel welded tubular X-joints», International Journal of Fatigue, volume 129, December 2019, 105221

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319303251>

[2] Marc Seidel, «Substructures for offshore wind turbines - Current trends and developments», January 2014,

https://www.researchgate.net/publication/308208095_Substructures_for_offshore_wind_turbines_-_Current_trends_and_developments

[3] Beatrice windfarm Ltd., 2018, <https://www.beatricewind.com/>

[4] Alpha ventus windfarm park, 2013, <https://www.alpha-ventus.de/english>

[5] T. Papatheocharis, G. C. Sarvanis, P. C. Perdikaris, S. A. Karamanos and A. Zervaki, « Fatigue resistance of welded steel tubular X-joints», Marine Structures, volume 74, November 2019, 102809
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833920301039>

[6] Δ. Ι. Παντελής, Β. Ι. Παπάζογλου, Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Επιστήμη και Τεχνολογία των συγκολλήσεων, ΤΖΙΟΛΑ, 2017

[7] Skallerud B., «On the relationship between low cycle fatigue and crack growth rate properties in welded steel components», Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. volume 15, pp. 43–56, 1992

[8] L. Feng and X. Qian, «Enhanced crack sizing and life estimation for welded tubular joints under low cycle actions», International Journal of Fatigue, volume 137, August 2020, 105670
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112320302012>

[9] B. H. Hammerstad, S. Schafhirt and M. Muskulus, « On Fatigue Damage Assessment for Offshore Support Structures with Tubular Joints», Energy Procedia, volume 94, September 2016, pp. 339-346
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216308463>

[10] Μ. Μπαρμπάρης «Μεταλλουργική Αξιολόγηση συμπεριφοράς σε κόπωση συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων τύπου Χ», 2019

[11] Rina, «Development of modular steel jacket for offshore windfarms (JABACO)», Tech. rep. 2019.

[12] P. W. Marshall, Design of welded tubular connections, Basis and Use of AWS Code Provisions, Elsevier, 1992

[13] A. S. Hosseini, M. R. Bahaari and M. Lesani, « Stress concentration factors in FRPstrengthened offshore steel tubular T-joints under various brace loadings», Structures, volume 20, August 2019, pp. 779-793 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012419301237>

[14] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Θεσσαλονίκη, ΤΖΙΟΛΑ, 2007

[15] DIN EN 10219-1, «Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steel», Part 1: Technical delivery conditions, November 1997

[16] American Welding Society, Structural welding code-Steel AWS D.1.1/D1.1M, 2014

[17] Elga svetskatalog, Welding Consumables, 2013

https://issuu.com/elgaweldingconsumables2013/docs/elga_svetskatalog_2013_lr

[18] J. Macmillan and P. Elewitt, « Assessment of methods for cleaning oxide from fracture surfaces for examination in a scanning electron microscope», Micron (1969), volume 6, pp.141-146, 1975

[19] ALIREZA FAYAZI KHANIGI, AMIRREZA FARNIA, , MOHAMMAD ARDESTANI and MOHAMMAD JAVAD TORKAMANY2 «Microstructure and mechanical properties of low power pulsed Nd:YAG laser welded S700MC steel»

https://www.researchgate.net/publication/339371651_Microstructure_and_mechanical_properties_of_low_power_pulsed_NdYAG_laser_welded_S700MC_steel

