

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

υπό

**Δημητρίου Ιωάννης**

Επιβλέπων

**Ζερβάκη Άννα**

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

**ΒΟΛΟΣ 2020**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

υπό

**Δημητρίου Ιωάννης**

Επιβλέπων

**Ζερβάκη Άννα**

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

**ΒΟΛΟΣ 2020**

© 2020 Δημητρίου Ιωάννης

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 Δρ. Άννα Ζερβάκη

(Επιβλέπων): ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Σπύρος Καραμάνος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

---

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής Δρ. Άννα Ζερβάκη για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Ακόμη θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την υποστήριξης και τον χρόνο που αφιέρωσε ώστε η διαδικασία της έρευνας να κυλήσει όσο πιο ομαλά γινόταν παρά τις τυχόν απρόβλεπτες καθυστερήσεις. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την πρόσβαση που μου παρείχε στο εργαστήριο υλικών του ΠΘ, καθώς και τον καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο και τον Δρ. Κωνσταντίνο Χατζηιωάννου που μας παρείχαν πρόσβαση στην έρευνά τους. Τέλος, ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλο μου για την στήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

---

Οι σωληνωτές δομές έχουν ευρεία χρήση στην σύγχρονη εποχή και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε υπεράκτιες εφαρμογές. Η ραγδαία εξέλιξη της υπεράκτιας βιομηχανίας και των συστημάτων παραγωγής αιολικής ενέργειας, έχει επιφέρει μεγάλες προκλήσεις τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή των σωληνωτών αυτών δομών. Η ανάγκη διασφάλισης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών αυτών, κάτω από ακραίες συνθήκες φόρτωσης, αποτελεί το κίνητρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή, μελετάται η συμπεριφορά σε ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων (ULCF) συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων τύπου X. Τέσσερα δείγματα κατασκευάστηκαν από χαλύβδινους σωλήνες S420 και αντιπροσωπεύουν συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις τύπου X, οι οποίες θα αποτελέσουν την πλατφόρμα στήριξης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας που προορίζεται για εγκατάσταση σε βάθος 55 μέτρων, σε κλίμακα 1:3. Τα δείγματα αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμή κόπωσης, κάτω από έντονη κυκλική κάμψη, η οποία οδήγησε σε αστοχία σε λιγότερους από 100 κύκλους (ULCF). Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, πραγματοποιήθηκε μεταλλουργική αξιολόγηση των δειγμάτων μετά την δοκιμή κόπωσης. Η αξιολόγηση περιλάμβανε μελέτη των επιφανειών θραύσης, μεταλλογραφία στα σημεία ενδιαφέροντος και μικροσκληρομετρήσεις. Στα συμπεράσματα της εργασίας, προσδιορίζεται το σημείο εκκίνησης των ρωγμών κόπωσης σε κάθε δείγμα, καθώς και η συμπεριφορά της μικροδομής στις επιφάνειες θραύσης. Τα αποτελέσματα συνεισφέρουν στην πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς σε ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων τύπου X.

# Abstract

---

Nowadays, tubular structures are widely used in offshore application. The rapid development of offshore industry and especially, wind power generation systems, has imposed several challenges to both the design and construction of steel tubular structures. The need to ensure the structural integrity of these structures, under extreme loading conditions, is the motivation of this thesis. Specifically, this project studies the Ultra Low-Cycle Fatigue (ULCF) behavior of welded tubular X-joints. Four specimens are manufactured using hot-rolled tubes of steel grade S420 and represent X-joints of an offshore wind turbine jacket substructures considered for installation at a depth of 55 m, with a scaling factor of 1:3. These specimens are subjected to extreme cyclic in-plane bending, leading to ultra low-cycle fatigue failure, within less than 100 cycles. As part of this work, the metallurgical evaluation of the specimens was performed after the fatigue test. Evaluation included study of fracture surfaces, metallography at points of interest, and hardness measurements. In conclusion of the thesis, the starting point of the fatigue cracks in each specimen is determined, as well as the behavior of the microstructure on the fracture surfaces. The results contribute to a more complete understanding of the ultra low-cycle fatigue behavior of the welded tubular X-joints.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract .....	2
Κατάλογος πινάκων .....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	11
2.1 Συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις τύπου X (welded tubular X-joints) .....	11
2.2 Χάλυβας S420.....	13
2.3 Ultra low-cycle fatigue (ULCF).....	14
2.4 Συγκολλήσεις .....	15
2.4.1 Γενικά.....	15
2.4.2 Συγκολλήσεις GMAW .....	16
2.4.3 Συγκολλήσεις FCAW .....	18
2.4.4 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) .....	19
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία .....	22
3.1 Περιγραφή των δειγμάτων.....	23
3.2 Διαδικασία της συγκόλλησης.....	24
3.3 Δοκιμή κόπωσης.....	25
3.4 Οπτικός έλεγχος .....	28
3.5 Μεταλλογραφικός έλεγχος .....	29
3.6 Μικροσκληρομέτρηση.....	30
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα .....	32
4.1 Βασικό μέταλλο και συγκόλληση των δειγμάτων .....	32
4.2 Οπτικός έλεγχος .....	36
4.2.1 Δείγμα X1 ( $u \pm 29$ mm) .....	37
4.2.2 Δείγμα X2 ( $u = \pm 35$ mm).....	38
4.2.3 Δείγμα X3 ( $u = \pm 41$ ).....	39
4.2.4 Δείγμα X4 ( $u = \pm 47,5$ ).....	39

4.3 Επιφάνειες θραύσης.....	40
4.3.1 Δείγμα X1 ( $u=\pm 29$ ).....	40
4.3.2 Δείγμα X2 ( $u=\pm 35$ ).....	41
4.3.3 Δείγμα X3 ( $u=\pm 41$ ).....	43
4.3.4 Δείγμα X4 ( $u=\pm 47,5$ ).....	45
4.4 Μεταλλογραφικός έλεγχος .....	46
4.4.1 Δείγμα X1 ( $u=\pm 29$ ).....	46
4.4.2 Δείγμα X2 ( $u=\pm 35$ ).....	50
4.4.3 Δείγμα X3 ( $u=\pm 35$ ).....	56
4.4.4 Δείγμα X4 ( $u=\pm 47,5$ ).....	62
4.5 Μικροσκληρομετρήσεις .....	66
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	69
Βιβλιογραφία .....	71



## Κατάλογος πινάκων

---

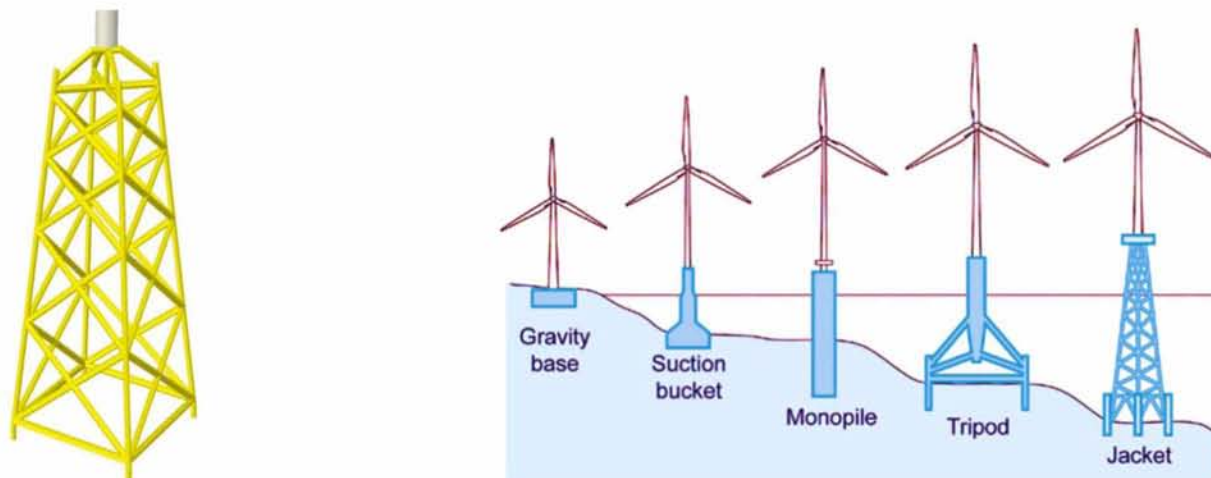
<b>Πίνακας 2.1</b> Χημική σύσταση S420 (% κβ).....	13
<b>Πίνακας 2.2</b> Μηχανικές ιδιότητες S420MH.....	14
<b>Πίνακας 3.1</b> Συνθήκες κόπωσης .....	23
<b>Πίνακας 3.2</b> Χημική σύσταση MXA 55T και DWA 55T .....	25
<b>Πίνακας 4.1</b> Μετρήσεις μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου συγκόλλησης σε HV <sub>0.3</sub> .....	35
<b>Πίνακας 4.2</b> Μέσες τιμές μικροσκληρομετρήσεων σε HV <sub>0.3</sub> .....	66

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

---

Οι συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις τύπου X αποτελούν βασικό κατασκευαστικό στοιχείο στην ανέγερση υπεράκτιων μεταλλικών κατασκευών (energy infrastructures). Η ραγδαία εξέλιξη της υπεράκτιας βιομηχανίας συστημάτων παραγωγής αιολικής ενέργειας, έχει επιφέρει μεγάλες προκλήσεις τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή των σωληνωτών αυτών δομών. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ένα μεγάλο ποσοστό ανεμογεννητριών έχουν ως στήριξη «σύστημα ενός πυλώνα» (monopile system), το οποίο χρησιμοποιείται σε ρηχά νερά βάθους μέχρι και 25 μέτρα και δυνατότητα παραγωγής ενέργειας μέχρι 4 MW. Εξαιτίας της ανταγωνιστικότητας στην υπεράκτια βιομηχανία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, απαιτείται η εκμετάλλευση βαθύτερων υδάτων για την αύξηση της παραγωγής αιολικής ενέργειας από μεγαλύτερης δυναμικότητας ανεμογεννήτριες. Άμεση συνέπεια αυτού, είναι η χρήση συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων, ως στήριξη (τύπου «jacket») στις ανεμογεννήτριες, με αποτέλεσμα την εγκατάστασή τους σε μεγαλύτερα βάθη μέχρι και 50 μέτρα (βλ. Εικ.1.1). Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, για την επίτευξη συγκεκριμένης απόδοσης και δομικής ακεραιότητας της ανεμογεννήτριας, το σύστημα ενός πυλώνα (monopile system) απαιτεί μεγάλη διάμετρο, με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση του βάρους αλλά και του κόστους. Αντίστοιχα, η χρήση τριπόδου, αυξάνει πολύ περισσότερο το βάρος της κατασκευής συγκριτικά με την στήριξη «τύπου jacket» και σε συνδυασμό με την δυσκολία της συγκόλλησης του κεντρικού κόμβου χαρακτηρίζεται ως μη συμφέρουσα επιλογή [1,2]. Η στήριξη «τύπου jacket» αποτελεί μια ελκυστική λύση, με χαρακτηριστικά παραδείγματα επιτυχούς εγκατάστασης σε βάθη 30-45 μέτρων, να είναι μεταξύ άλλων τα αιολικά πάρκα Beatrice [3] και Alpha Ventus [4] (βλ. Εικ. 1.2).

Οι κατασκευές αυτές που στηρίζουν την ανεμογεννήτρια εκτίθενται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση εξαιτίας των θαλάσσιων κυμάτων και του λειτουργικού φορτίου της τουρμπίνας, που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία κόπωσης όλης της κατασκευής σε κρίσιμα σημεία της. Οι συγκολλήσεις θεωρούνται από τα πιο ευαίσθητα μέρη των υπεράκτιων κατασκευών και για τον λόγο αυτό, η μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση



Εικ. 1.1 Συγκολλημένες σωληνοειδείς ενώσεις σε πλατφόρμα στήριξης ανεμογεννήτριας τύπου «jacket» [8]



Εικ. 1.2 Αιολικό πάρκο Alpha Venture εγκατεστημένο στις βόρειες ακτές της Γερμανίας

αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την βιωσιμότητα της κατασκευής. Ο σχεδιασμός έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατασκευαστικής λύσης, έτσι ώστε να επικρατεί ισορροπία μεταξύ αποφυγής της αστοχίας και του κόστους κατασκευής και συντήρησης.

Η κόπωση είναι ο πιο συνήθης μηχανισμός αστοχίας στις συγκολλήσεις. Η εισαγωγή μιας συγκόλλησης, σε ένα φέρον στοιχείο μίας κατασκευής, μειώνει την αντοχή σε κόπωση. Αυτό έχει ως συνέπεια, τα φορτία σχεδιασμού σε συγκολλητές κατασκευές που υφίστανται



επαναλαμβανόμενη φόρτιση να περιορίζονται από την αντοχή των συγκολλήσεων σε κόπωση. Η κόπωση υποδιαιρείται σε δύο περιοχές, την πολυκυκλική (High Cycle Fatigue) και την ολιγοκυκλική (Low Cycle Fatigue). Η πρώτη αφορά αρκετά χαμηλές καταπονήσεις έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να υπερβαίνει τους  $10^3$  με  $10^4$  κύκλους. Στην περίπτωση αυτή οι κυκλικές τάσεις προκαλούν κυρίως ελαστικές παραμορφώσεις. Αντίθετα, η ολιγοκυκλική κόπωση αφορά αρκετά υψηλές καταπονήσεις, έτσι ώστε η διάρκεια ζωής να είναι μικρότερη από  $10^3$  με  $10^4$  κύκλους. Οι κυκλικές τάσεις, στην περίπτωση αυτή, προκαλούν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Σε μικρές διάρκειες ζωής επικρατεί η πλαστική παραμόρφωση και η συμπεριφορά ελέγχεται από την ολκιμότητα. Όταν το μέγεθος των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων είναι ιδιαίτερο υψηλό, όπως για παράδειγμα σε ένα σεισμό ή σε μια έντονη καταιγίδα, οι μη ελαστικές παραμορφώσεις που δέχεται η κατασκευή είναι εξαιρετικά υψηλές και μπορούν να προκαλέσουν αστοχία μόλις σε μερικούς κύκλους. Στην ακραία αυτή κυκλική φόρτιση, η αστοχία μπορεί να συμβεί σε λιγότερους από 100 κύκλους και προσδιορίζεται ως «ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων» [ULCF (Ultra Low-Cycle Fatigue)].[5]

Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα, έχει αποδειχθεί ότι σε συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες ανελαστικές φορτίσεις, η έναρξη και η διάδοση της ρωγμής συμβαίνει πολύ γρήγορα, οδηγώντας σε υποβάθμιση δυσκαμψίας και αντοχής από τους πρώτους κίονας κύκλους [6]. Η έναρξη των ρωγμών συμβαίνει στις γεωμετρικά ασυνεχείς θέσεις των σωληνοειδών αρθρώσεων, όπως για παράδειγμα στον πόδα της συγκόλλησης. Το βασικό υλικό κοντά στον πόδα της συγκόλλησης εμφανίζει αισθητές πλαστικές παραμορφώσεις κάτω από τα υψηλά φορτία της ολιγοκυκλικής κόπωσης, οι οποίες παραμορφώσεις οδηγούν σε διαφορετική έναρξη και διάδοση των ρωγμών στις σωληνωτές συνδέσεις σε αντίθεση με αυτές της πολυκυκλικής κόπωσης [7].

Είναι σαφές ότι, η συμπεριφορά των συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων σε πολυκυκλική κόπωση, αποτελούν σημαντικό ερευνητικό πεδίο για το οποίο έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες μελέτες που έχουν παράξει μεγάλο όγκο ερευνητικών αποτελεσμάτων [8-10]. Αντίθετα, η συμπεριφορά των κατασκευών αυτών σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης και ειδικά για συμπεριφορά κόπωσης περιορισμένου αριθμού κύκλων (ULCF) έχει απασχολήσει λιγότερο την ερευνητική κοινότητα.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη συμπεριφορά σε συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων τύπου X σε ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων (ULCF). Το υλικό κατασκευής είναι ο χάλυβας υψηλής-αντοχής S420. Τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου και η μεταλλουργική αξιολόγηση των επιφανειών θραύσης που προέκυψε από τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ειδικότερα μελετήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης, το σημείο εκκίνησης των ρωγμών και η συμπεριφορά της μικροδομής των δειγμάτων. Τα δείγματα αντιπροσωπεύουν συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις τύπου X, οι οποίες θα αποτελέσουν την πλατφόρμα στήριξης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας που προορίζεται για εγκατάσταση σε βάθος 55 μέτρων, σε κλίμακα 1:3 [11]. Τα δείγματα έχουν κατασκευαστεί με συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding-GMAW) και συγκόλληση τόξου με παραγεμισμένα σωληνοειδή ηλεκτρόδια (Flux Cored Arc Welding- FCAW) και έχουν υποστεί ακραία κυκλική κάμψη, οδηγώντας σε αστοχία κόπωσης ULCF σε λιγότερους από 100 κύκλους φόρτισης.

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από πέντε κεφάλαια. Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή και οι στόχοι της εργασίας, στο 2<sup>ο</sup> παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά τις συγκολλήσεις, το υλικό κατασκευής των συνδέσμων, καθώς και βασικά στοιχεία της ολιγοκυκλικής κόπωσης σε περιορισμένο αριθμό κύκλων. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία του πειράματος κόπωσης, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Π.Θ. για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων (βλ. Εικ. 1.3). Στη συνέχεια στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναλύονται διεξοδικά τα αποτελέσματα από τα δείγματα τα οποία μελετήθηκαν. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη του θέματος.



Εικ. 1.3 Πλάνο πειραματικής έρευνας



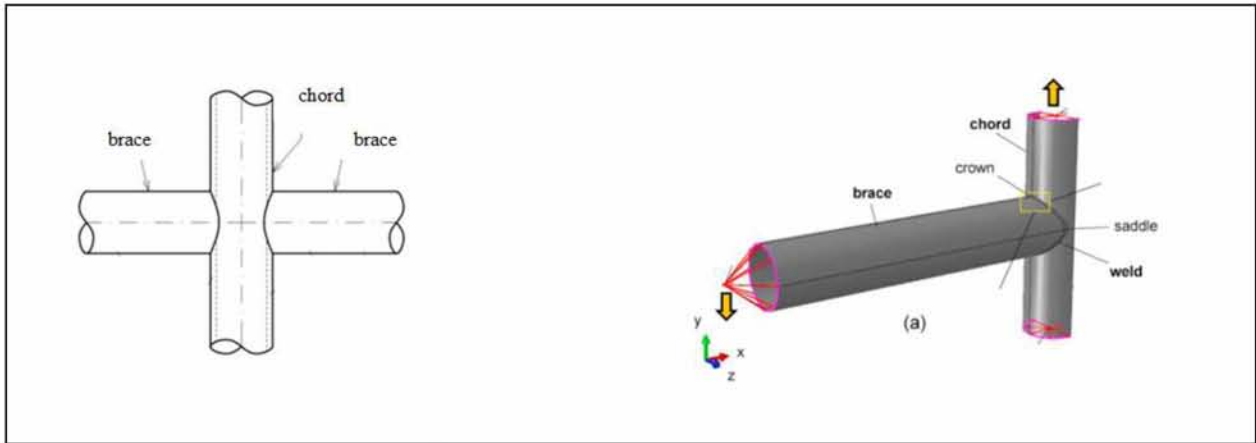
## Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

---

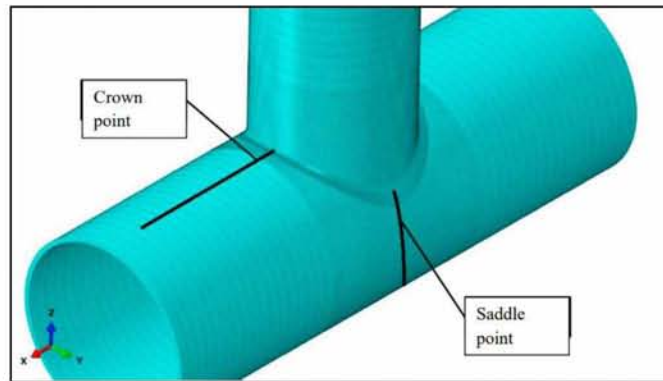
### 2.1 Συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις τύπου X (welded tubular X-joints)

Οι συγκολλητές σωληνωτές ενώσεις έχουν ευρεία χρήση στην σύγχρονη εποχή και συναντώνται σε αρκετές κατασκευές, όπως σε κτίρια με μεγάλο όγκο και ενιαίο χώρο (π.χ. αποθήκες), σε ελαφριές κατασκευές με μεγάλη έκταση (π.χ. γέφυρες και πληροφοριακές πινακίδες οδικής σήμανσης), σε πλατφόρμες προωθητικών πυραυλικών συστημάτων κ.α. Ωστόσο ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση τους σε υπεράκτιες εφαρμογές, όπως στην εξόρυξη ορυκτών πόρων, όπου αξιοποιούνται για την στήριξη και την ισορροπία της πλατφόρμας στο επίπεδο της θάλασσας. Μία ακόμη εξαιρετικά σημαντική υπεράκτια εφαρμογή συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων είναι στη στήριξη ανεμογεννητριών, οι οποίες εγκαθίστανται σε μεγάλο βάθος (μέχρι και 50 μέτρα). Συγκεκριμένα αξιοποιούνται στο κάτω μέρος της ανεμογεννήτριας σαν στήριξη (jacket substructure) [12].

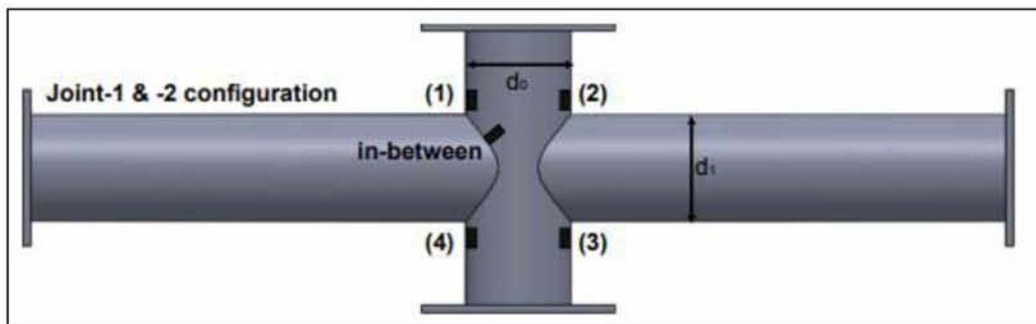
Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την τελευταία αυτή εφαρμογή, όπου οι σωληνωτές δομές ενώνονται κάθετα με συγκόλληση (welded tubular X-joints). Η κάθετη αυτή ένωση αποτελείται από δύο σωλήνες, ένας εκ των οποίων θα υφίσταται κατάλληλη διαμόρφωση και συγκολλάται πάνω στον άλλον. Ο σωλήνας ο οποίος έχει υποστεί διαμόρφωση ονομάζεται brace, ενώ εκείνος στον οποίο συγκολλάται αναφέρεται ως chord (βλ. Εικ. 2.1). Αξιοσημείωτο είναι πως κρίσιμα σημεία της ένωσης μεταξύ του brace και του chord, αποτελούν τα σημεία crown και saddle, τα οποία απεικονίζονται στην Εικ. 2.1 (δεξιά) και στην Εικ. 2.2 [13]. Στην περίπτωση της κόπωσης του πειράματος που μελετάται, σημεία ενδιαφέροντος αποτελούν το crown, καθώς και το σημείο πάνω στο πόδα της συγκόλλησης και ανάμεσα από το crown και το saddle, το οποίο αποκαλείται «in-between». Στην Εικ. 2.3 απεικονίζονται τα 4 σημεία crown {(1), (2), (3), (4)}, με τα δύο από αυτά να βρίσκονται στην επάνω πλευρά {(1), (2)} και τα υπόλοιπα στην κάτω {(3), (4)}, ενώ ακόμη είναι ορατό και το σημείο «in-between» [8].



Εικ. 2.1 Απεικόνιση του chord και brace



Εικ. 2.2 Σημεία crown και saddle [10]



Εικ. 2.3 Απεικόνιση σημείων crown και «in-between» [1]

## 2.2 Χάλυβας S420

Ο χάλυβας είναι κράμα Fe-C, με περιεκτικότητα μικρότερη από 2,06% σε C, καθώς και πολύ μικρά ποσοστά σε μαγγάνιο (Mn), πυρίτιο (Si), φώσφορο (P), θείο (S) και οξυγόνο (O). Είναι ένα από τα πιο σημαντικά βιομηχανικά υλικά και αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή σε μεταλλικές κατασκευές. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αλλοτροπία του σιδήρου καθώς και στον μετασχηματισμό των φάσεων, που επιτρέπουν τον σχηματισμό μεγάλης ποικιλίας μικροδομών πράγμα που συνάδει με μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων [14].

Ο S420 είναι ένας χάλυβας υψηλής αντοχής με ευρεία χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία (Structural Steel). Είναι χαμηλά κραματομένος, καθώς η περιεκτικότητα σε άνθρακα δε ξεπερνά το 0.16% και μπορεί να περιέχει μικρές ποσότητες από Al, Ti, Nb και V (βλ. Πίνακα 2.1). Η μικροδομή του αποτελείται από φερρίτη και περλίτη και χαρακτηρίζεται λεπτόκοκκη, με μέγεθος κόκκου 5-25  $\mu\text{m}$ . Παράγεται με θερμή έλαση και εξομάλυνση (normalised) είτε με έλαση με θερμομηχανική διαδικασία (TMCP), δηλαδή με μηχανική έλαση εν θερμώ και έπειτα με ελεγχόμενη επιταχυνόμενη ψύξη [15].

Πίνακας 2.1 Χημική σύσταση S420 (% κβ)

Grade	C max	Si max	Mn max	P max	S max	Nb max	V max	Al max	Ti max	Ni max	Mo max	N max
S420	0.16	0.50	1.7	0.035	0.03	0.05	0.12	0.02	0.05	0.30	0.20	0.02

Ο S420 είναι χάλυβας υψηλής αντοχής και ολκιμότητας και έχει εξαιρετική ικανότητα συγκόλλησης και μορφοποίησης. Ακόμη έχει υψηλή ικανότητα να προβάλλει αντίσταση στη δημιουργία και διάδοση της ρωγμής (notch toughness), ενώ έχει και πολύ καλή αντίσταση σε ψαθυρή θραύση. Διαθέτει υψηλή αντοχή σε διάβρωση και σε συνδυασμό με την συγκολλησιμότητα, την αντοχή και το χαμηλό του κόστος, τον καθιστούν καλή κατασκευαστική επιλογή στην υπεράκτια βιομηχανία. Στο συγκεκριμένο πείραμα, το υλικό κατασκευής είναι ο χάλυβας υψηλής αντοχής S420MH, ο οποίος έχει μορφοποιηθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (cold forming), σε κοίλα τμήματα (H-hollow section) και έχει υποστεί θερμομηχανική έλαση



(M- thermomechanically rolled feedstock material). Στον πίνακα 2.2 αναφέρονται οι μηχανικές ιδιότητες του S420MH.[15]

Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες S420MH

Grade	Ελάχιστο όριο διαρροής (N/mm <sup>2</sup> ) δοκιμασμένο σε πάχος έως 16mm	Μέγιστο όριο αντοχής σε εφελκυσμό (N/mm <sup>2</sup> ) δοκιμασμένο σε πάχος έως 40mm	Ελάχιστη Επιμήκυνση (%) Δοκιμασμένο σε πάχος έως 40mm
S420MH	420	500-660	19

### 2.3 Ultra low-cycle fatigue (ULCF)

Τα μεταλλικά υλικά, όταν καταπονούνται από επαναλαμβανόμενες ή χρονικά μεταβαλλόμενες (δυναμικές) τάσεις, μπορούν να αστοχήσουν ακόμη και όταν η τιμή των τάσεων αυτών βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από την αντοχή του υλικού σε θραύση. Η αστοχία που εμφανίζεται στα μεταλλικά υλικά λόγω της επίδρασης κυκλικών καταπονήσεων ονομάζεται κόπωση (fatigue). Η κόπωση διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Πολυκυκλική κόπωση (high-cycle fatigue):** Το επίπεδο των εναλλασσόμενων τάσεων που αναπτύσσονται στο υλικό βρίσκεται κάτω από το όριο διαρροής του. Συνεπώς, το υλικό υφίσταται ελαστικές παραμορφώσεις και η διάρκεια ζωής του ( $N_f$ ) χαρακτηρίζεται μεγαλύτερη από  $10^4$  κύκλους φόρτισης ( $N_f > 10^4$ ).
- **Ολιγοκυκλική κόπωση (low-cycle fatigue):** Οι εναλλασσόμενες τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό υπερβαίνουν το όριο διαρροής, με αποτέλεσμα σε κάθε κύκλο φόρτισης το υλικό να υφίσταται και ένα ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Άμεση συνέπεια αυτού, αποτελεί η μείωση του αριθμού των κύκλων φόρτισης του υλικού μέχρι την αστοχία ( $N_f < 10^4$ ).

Στην κόπωση διακρίνουμε δύο φάσεις της διάρκειας ζωής του υλικού. Η πρώτη φάση αποτελείται από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που απαιτείται για την πυρήνωση και τη δημιουργία των ρηγματών ( $N_i$ ), ενώ η δεύτερη από τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για την ανάπτυξη και την διάδοση των ρωγμών μέχρι την αστοχία ( $N_p$ ). Επομένως, η διάρκεια ζωής ορίζεται ως το άθροισμα αυτών των δύο φάσεων  $N_f=N_i+N_p$ .

Η ύπαρξη συγκολλήσεων σε μια κατασκευή μειώνει την αντοχή σε κόπωση και αποτελεί τον σύνηθες μηχανισμό αστοχίας της. Στις συγκολλήσεις είναι αποδεκτή η θεώρηση πως οι ρωγμές ήδη προϋπάρχουν, εξαιτίας των ατελειών και της ακαθόριστης γεωμετρίας τους, άρα η διάρκεια ζωής εξαρτάται μόνο από τους κύκλους φόρτισης που απαιτούνται για την διάδοση αυτών των προϋπαρχόντων ρωγμών μέχρι μια κρίσιμη τιμή και εν τέλει την αστοχία ( $N_f=N_p$ ) [5].

Όπως προαναφέρθηκε, στην ολιγοκυκλική κόπωση, το υλικό υποβάλλεται σε κυκλικές τάσεις που υπερβαίνουν το όριο διαρροής, με συνέπεια να υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και να αστοχεί σε λιγότερους από  $10^4$  κύκλους φόρτισης. Όταν οι κυκλικές αυτές τάσεις λάβουν ακραίες τιμές, όπως είναι η περίπτωση ενός σεισμού, προκαλούν μεγάλο εύρος πλαστικής παραμόρφωσης και οδηγούν σε αστοχία μετά από μόλις λίγους κύκλους. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου η αστοχία συμβαίνει σε λιγότερους από 100 κύκλους φόρτισης, αναφερόμαστε σε «**Ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων**» ή **ultra low-cycle fatigue (ULCF)**. Όπως έχει αποδειχθεί πειραματικά, η αστοχία στους σωληνωτούς συγκολλητούς συνδέσμους λόγω ULCF συμβαίνει, διότι η έναρξη και η διάδοση της ρωγμής εξελίσσεται με πολύ γρήγορο ρυθμό, οδηγώντας σε μείωση της δυσκαμψίας και υποβάθμιση της αντοχής από τους πρώτους κιόλας κύκλους [1,6].

## 2.4 Συγκολλήσεις

### 2.4.1 Γενικά

Με τον όρο συγκόλληση αναφερόμαστε στην σύνδεση δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί συνέχεια μεταξύ αυτών. Η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί ραγδαία τον τελευταίο αιώνα και έχει αντικαταστήσει σε πολλές εφαρμογές τις



μηχανικές συνδέσεις (κοχλίωση, ήλωση κ.τ.λ.). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκόλληση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανικών συνδέσεων όπως είναι τα εξής:

- Βελτίωση της αντοχής της σύνδεσης, όπου η συγκόλληση μπορεί να φτάσει μέχρι και το 100% της αντοχής του βασικού μετάλλου
- Προσδίδει στεγανότητα στην κατασκευή
- Μεγάλη ποικιλία σχημάτων και γεωμετριών
- Μείωση του βάρους της κατασκευής
- Μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής

Αντίστοιχα όμως παρουσιάζουν και τα ακόλουθα μειονεκτήματα :

- Δυσκολία εντοπισμού σφαλμάτων (πόροι, εγκλείσματα, ρωγμές κ.τ.λ.)
- Μη αντιστρεπτές συνδέσεις
- Δυσκολία συγκόλλησης ορισμένων κραμάτων μεταξύ τους
- Δημιουργία παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων

Οι συγκολλήσεις μπορούν να επιτευχθούν με μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να έχει αναπτυχθεί και να χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων συγκόλλησης. Σε αυτήν την εργασία θα γίνει αναφορά στις συγκολλήσεις τήξης και συγκεκριμένα στις μεθόδους GMAW (Gas Metal Arc Welding) και FCAW (Flux cored arc welding) [5].

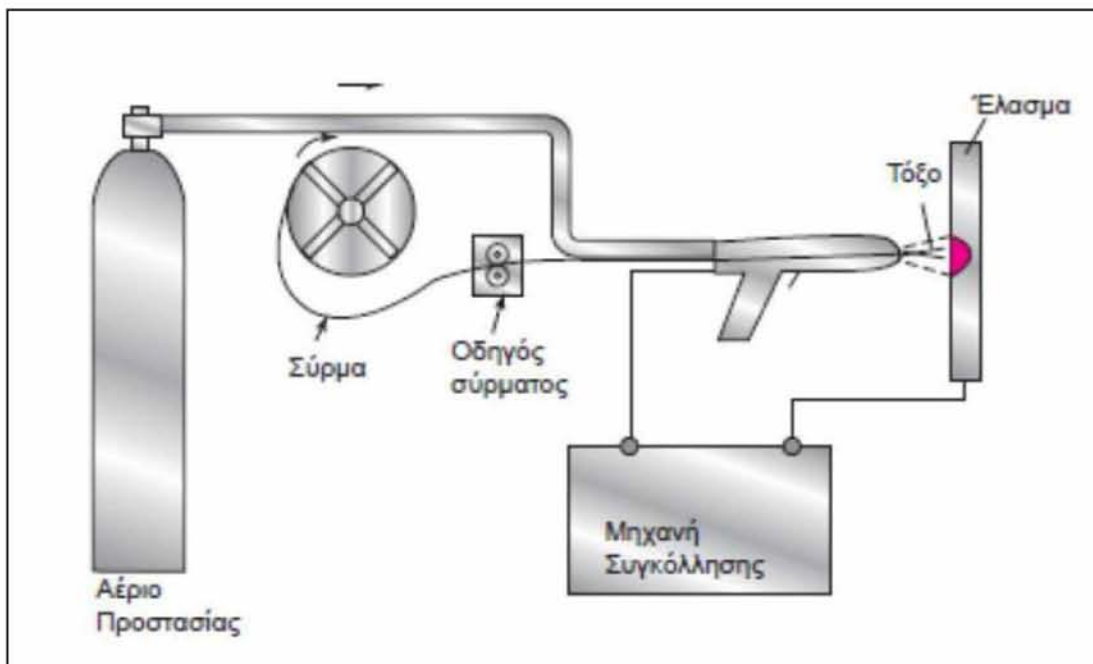
#### 2.4.2 Συγκολλήσεις GMAW

Η GMAW είναι μια μέθοδος συγκόλλησης κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου, ενώ ταυτόχρονα η λίμνη συγκόλλησης προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Κατά την συγκόλληση, η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο, που σχηματίζεται μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων και του τηκόμενου ηλεκτροδίου. Ακόμη απαιτείται η χρήση ενός αερίου προστασίας (π.χ. Ar/CO<sub>2</sub>), ώστε να δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες

για την προστασία του τηγμένου μετάλλου. Στη μέθοδο αυτή είναι συνηθέστερη η χρήση συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας, καθώς έτσι διασφαλίζεται σταθερό τόξο, ομαλή ροή μετάλλου και καλή διείσδυση.

Είναι μια ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος συγκόλλησης με υψηλό ρυθμό εναπόθεσης και με δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις και για ευρύ φάσμα υλικών. Επιπρόσθετα, δίνει καθαρές ραφές χωρίς σκουριά και χαρακτηρίζεται ως μια εύκολη και απλή συγκόλληση. Στην Εικ. 2.4 απεικονίζεται μια τυπική συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για την μέθοδο GMAW.

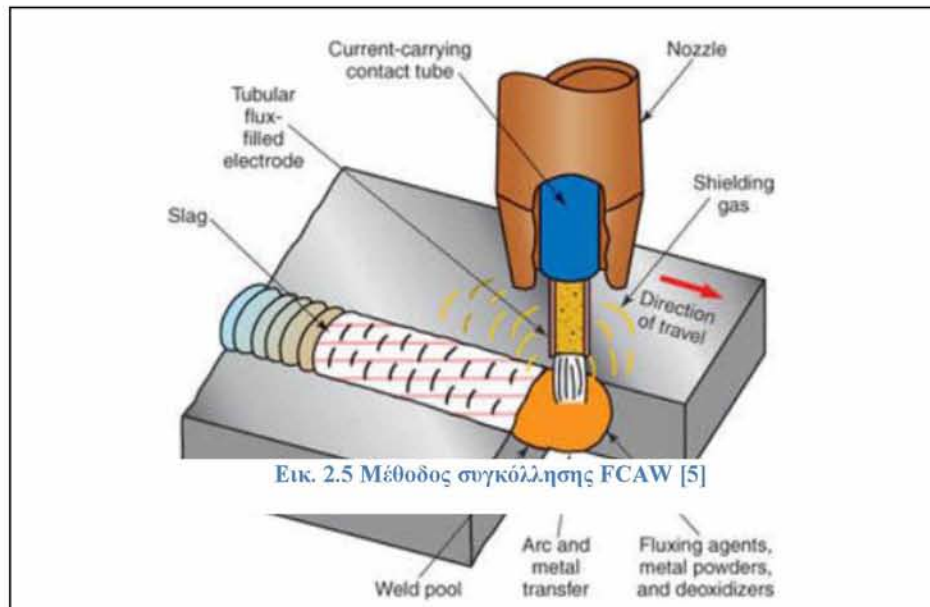
[5]



Εικ. 2.4 Σχηματικό διάγραμμα μεθόδου GMAW [5]



ηλεκτρόδια και θεωρείται μία παραλλαγή της μεθόδου GMAW (συγκόλληση τόξου με τηκόμενα ηλεκτρόδια και προστασία αερίου). Η διαφορά τους έγκειται στα ηλεκτρόδια, καθώς στην εν λόγω μέθοδο, το ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας, ο οποίος στον πυρήνα του περιέχει σκόνη συλλιπάσματος (flux). Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να πραγματοποιηθεί με ή χωρίς προσθήκη αερίου προστασίας. Όταν γίνεται χωρίς την χρήση αερίου προστασίας, η σκόνη συλλιπάσματος παρέχει αυτοπροστασία καθώς δημιουργεί ένα στρώμα σκουριάς και με αυτόν τον τρόπο προστατεύει την λίμνη συγκόλλησης από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα. Στην Εικ. 2.5 απεικονίζεται η μέθοδος FCAW [5].



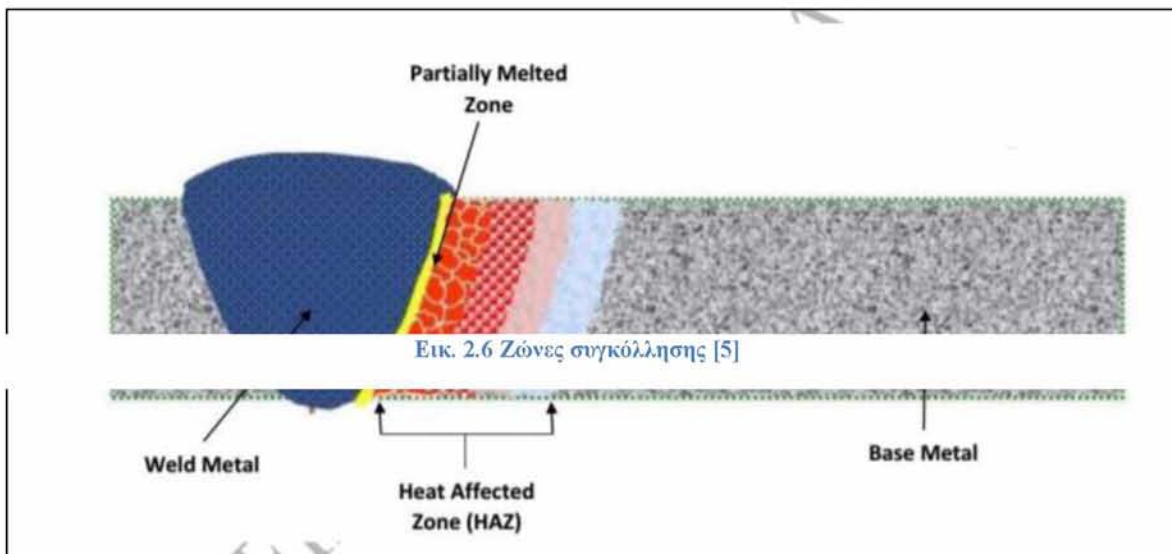
#### 2.4.4 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)

Η συγκόλληση αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη, όπως διακρίνονται και στην Εικ. 2.6:



- Μέταλλο συγκόλλησης (weld metal)
- Ζώνη μερικής τήξης (partially melted zone)
- Θερμικά επηρεασμένη ζώνη ΘΕΖ (heat affected zone HAZ)
- Βασικό μέταλλο (basic metal)

Το μέταλλο συγκόλλησης αποτελεί την περιοχή συγκόλλησης όπου έχει γίνει τήξη και στερεοποίηση και εμφανίζει διαφορετική δομή και ιδιότητες από το βασικό μέταλλο. Η ζώνη μερικής τήξης αποτελεί το όριο μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και ΘΕΖ. Στη ΘΕΖ



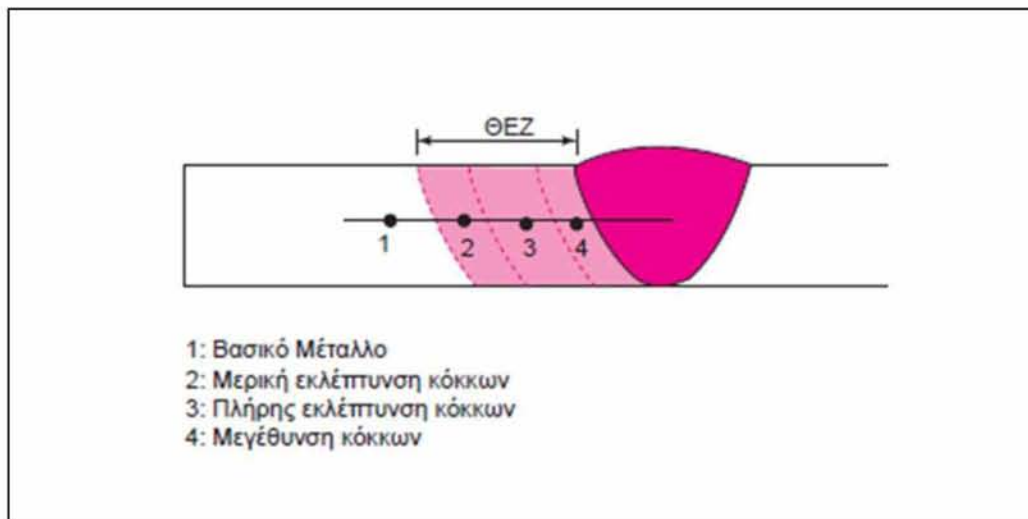
Εικ. 2.6 Ζώνες συγκόλλησης [5]

αναπτύσσονται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να προκαλέσουν αλλαγές στην μικροδομή και στο μέγεθος του κόκκου, αλλά δεν είναι τόσο υψηλές ώστε να προκαλέσουν τήξη. Τέλος, το βασικό μέταλλο δεν έχει υποστεί καμία αλλαγή [5].

Κάθε σημείο της ΘΕΖ κατά την συγκόλληση, «βλέπει» έναν διαφορετικό θερμικό κύκλο και επομένως εμφανίζονται διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροδομής μέσα σε αυτή. Συγκεκριμένα, η ΘΕΖ διαιρείται σε τρεις υποκατηγορίες, την ζώνη μεγέθυνσης κόκκων, την ζώνη πλήρης εκλέπτυνσης κόκκων και την ζώνη μερικής εκλέπτυνσης κόκκων, με αποτέλεσμα η ΘΕΖ να αποτελείται από μια χονδρόκοκκη και μια λεπτόκοκκη περιοχή (βλ. Εικ. 2.7). Οι

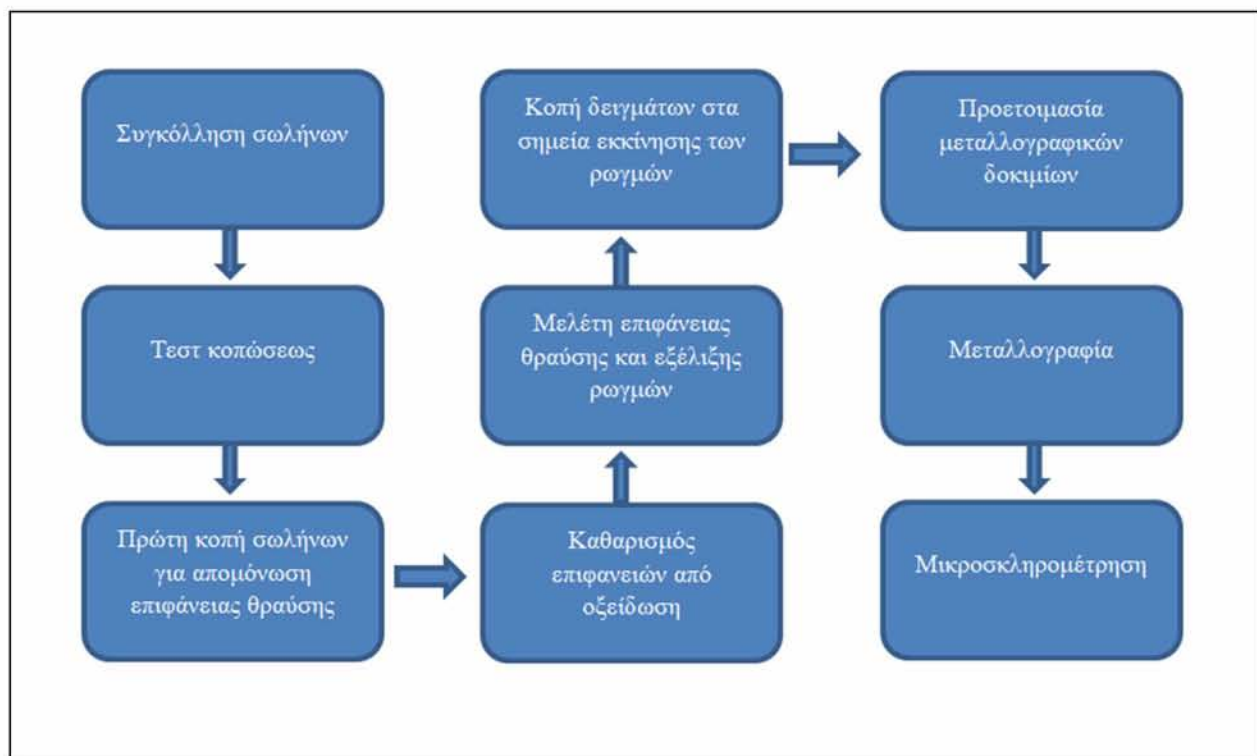
μεταβολές αυτές στην μικροδομή επιφέρουν εξασθένηση και ψαθυροποίηση του υλικού και συνεπώς μείωση της αντοχής τοπικά [5].

Εικ. 2.7 Απεικόνιση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης ΘΕΖ



## Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία. Αρχικά γίνεται αναφορά στα δείγματα, δηλαδή στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκαν και συγκολλήθηκαν, καθώς και στο τεστ κοπώσεως στο οποίο υποβλήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι έλεγχοι των δειγμάτων, ξεκινώντας με τον μακροσκοπικό (οπτικό) και έπειτα με τον μικροσκοπικό έλεγχο (μεταλλογραφία), ενώ στο τέλος γίνεται αναφορά στις μικροσκληρομετρήσεις των δειγμάτων.



Εικ. 3.1 Πειραματική διαδικασία

### 3.1 Περιγραφή των δειγμάτων

Το πειραματικό πρόγραμμα κόπωσης περιλάμβανε τέσσερα δείγματα συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων (βλ. Εικ. 3.2). Τα δείγματα κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας χαλύβδινους σωλήνες ποιότητας S420, οι οποίοι συγκολλήθηκαν κάθετα μεταξύ τους. Επιπλέον είναι όμοιοι μεταξύ τους τόσο ως προς τις διαστάσεις των σωλήνων, όσο και ως προς τον τρόπο συγκόλλησης τους. Ακόμη, αποτελούνται από ίδιες διαστάσεων chord και brace και συγκεκριμένα έχουν διάμετρο 219.1 mm και πάχος 10 mm. Η διαφοροποίηση των δειγμάτων έγκειται στην κυκλική φόρτιση που τους ασκήθηκε στο τεστ κοπώσεως.

Σύμφωνα με αυτό, τα δείγματα υποδηλώνονται ως **X1**, **X2**, **X3**, **X4**, με το **X1** να έχει υποστεί την μικρότερη κυκλική φόρτιση και το **X4** την μεγαλύτερη και στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι συνθήκες και τα αποτελέσματα κόπωσης των δειγμάτων.



Εικ. 3.2 Απεικόνιση του δείγματος X2



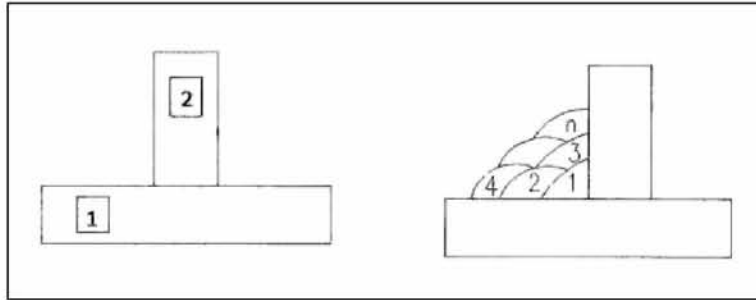
Πίνακας 3.1 Συνθήκες κόπωσης

Specimen	Edge brace displ. (mm)	$ M_{max}/M_y $ ( $M_y=109 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )	$N_f$ (cycles)
X1	±29	1.19	100
X2	±35	1.34	49
X3	±41	1.40	23
X4	±47.5	1.49	21

### 3.2 Διαδικασία της συγκόλλησης

Όπως προαναφέρθηκε και στα τέσσερα δείγματα ακολουθήθηκε ο ίδιος ακριβώς τρόπος συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις έγιναν από την Hollandia Offshore σύμφωνα με την προδιαγραφή AWS D1.1 [16]. Η διαδικασία της συγκόλλησης (WPS – Welding Procedure Specifications), στην Εικ. 3.3α), αναπτύχθηκε σε συνεργασία του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και της Hollandia Offshore ώστε οι συγκολλήσεις των δειγμάτων να ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες.

Οι συγκολλήσεις έγιναν με ημιαυτόματη μέθοδο (semi-automatic) με εξοπλισμό που ελέγχει αυτόματα τις συνθήκες τροφοδοσίας του σύρματος συγκόλλησης. Σύμφωνα με το WPS, η συγκόλληση αποτελείται από δύο επιμέρους τεχνικές συγκόλλησης, οι οποίες αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, GMAW (στη ρίζα) και FCAW (στο κέντρο και στο πρόσωπο της συγκόλλησης). Κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων, έγινε χρήση προστατευτικού αερίου, το οποίο ήταν μείγμα Ar/CO<sub>2</sub> σε ποσοστά 80% και 20% αντίστοιχα. Στην μέθοδο GMAW χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο πλήρωσης το MXA 55T (EN 17632 T 46 6 1,5Ni M M 1 H5) ενώ στην FCAW, το DWA 55T (EN 17632 T 46 6 1,5Ni P M 1 H5) οι χημικές συστάσεις των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Στην Εικ. 3.3β) διακρίνονται τα πολλαπλά πάσα της συγκόλλησης.[17]



Εικ. 3.3 β) Πάσα συγκόλλησης (WPS)

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση MXA 55T και DWA 55T

FILLER METAL	C max (%)	Si max (%)	Mn max (%)	Ni max (%)
MXA 55T	0.06	0.4	1.4	1.7
DWA 55T	0.04	0.3	1.4	1.5

### 3.3 Δοκιμή κόπωσης

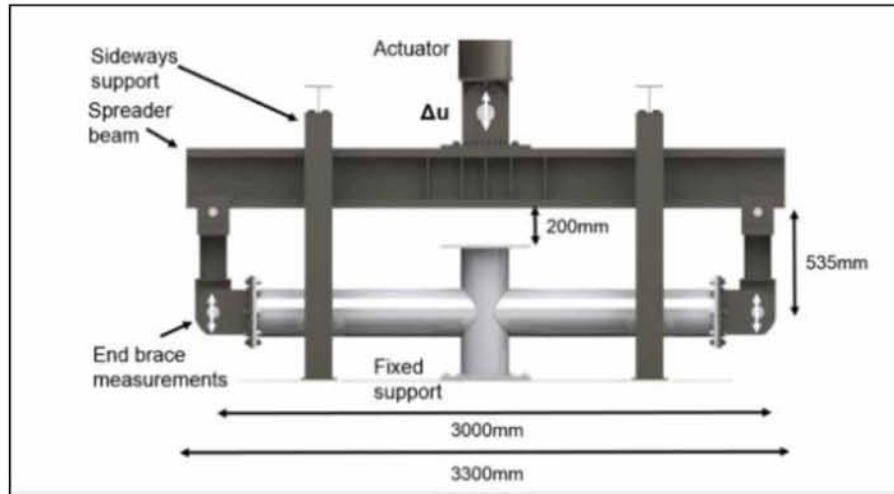
Τα τέσσερα δείγματα υποβλήθηκαν σε πλήρως αντιστρεπτή κυκλική κάμψη στο επίπεδο ( $R=-1$ ), η οποία οδήγησε σε ρωγή κόπωσης κατά το πάχος (through-thickness fatigue crack). Οι κυκλικές φορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του σερβο-υδραυλικού συστήματος Instron 8800 χωρητικότητας 1MN (βλ. Εικ.3.4)

Κατά την διάρκεια της δοκιμής κόπωσης, μετρήθηκε η μετατόπιση του άκρου του brace (edge brace displacement) με την χρήση ποτενσιόμετρων (βλ. Εικ. 3.5), ενώ ακόμη μετρήθηκαν οι τοπικές παραμορφώσεις των crown location της χορδής (chord) με την χρήση strain

Εικ. 3.3 α) WPS – Welding Procedure Specifications

gauges. Για ακρίβεια,

την



τοποθετήθηκαν strain gauges σε δύο από τα τέσσερα σημεία crown καθώς και στο σημείο «in-between». Τα strain gauges τοποθετήθηκαν στο τμήμα της χορδής, σε απόσταση 5-9mm από τον πόδα της συγκόλλησης για τα σημεία crown και 5-25mm για τα σημεία «in-between» (βλ. Εικ.3.6). Επιπρόσθετα, για την ανίχνευση της ακριβής στιγμής της αστοχίας, έχει παγιδευτεί καπνός στο εσωτερικό των δειγμάτων, με αποτέλεσμα όταν η ρωγμή γίνει διαμετρής ο καπνός να διαφύγει μέσω αυτής και να καταγραφεί ο αριθμός των κύκλων της αστοχίας.

Εικ. 3.4 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος κυκλικής κάμψης

Εικ. 3.5 Μέτρηση του edge  
χρήση ποτα



Εικ. 3.6 Μέτρηση τοπικών παραμορφώσεων με την  
χρήση strain gauges





### 3.4 Οπτικός έλεγχος

Μετά το πέρας της δοκιμής κόπωσης και της αστοχίας των δειγμάτων (βλ. Εικ. 3.7) ακολουθήθηκε ο μακροσκοπικός έλεγχος. Αρχικά, επιλέχθηκαν τα σημεία αστοχίας των δειγμάτων και με κοπή απομονώθηκαν οι επιφάνειες θραύσης. Οι επιφάνειες θραύσης παρουσίασαν έντονη οξείδωση, για την αντιμετώπιση της οποίας χρησιμοποιήθηκε «βασιλικό ύδωρ». Το «βασιλικό ύδωρ» είναι ένα μείγμα υδροχλωρικού (HCl) και νιτρικού οξέως (HNO<sub>3</sub>), σε γραμμομοριακή αναλογία 3:1, το οποίο αντιμετωπίζει τις οξειδωμένες επιφάνειες χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τα χαρακτηριστικά τους (βλ. 3.8) [18]. Για το μακροσκοπικό έλεγχο έγινε χρήση του στερεοσκοπίου Leica M3Z όποτε κρίθηκε απαραίτητο.



Εικ. 3.7 Διαμπερής αστοχία του δείγματος X1



Εικ. 3.8 Επιφάνεια θραύσης πριν και μετά την χρήση βασιλικού ύδωρ

### 3.5 Μεταλλογραφικός έλεγχος

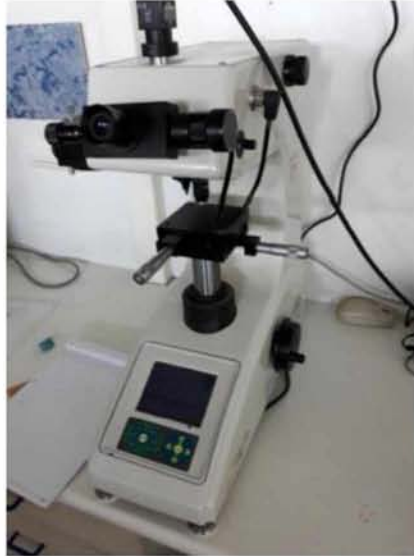
Έπειτα από τον μακροσκοπικό έλεγχο και την επιλογή των σημείων ενδιαφέροντος, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες κοπές, με την χρήση του κοπτικού Struers Unitom-2, ώστε να απομονωθούν και ξεκινήσει η προετοιμασία των δειγμάτων για την μεταλλογραφία. Αρχικά τα δείγματα αυτά εγκιβωτίστηκαν σε καλούπια, με την χρήση της ρητίνης VersoCit-2. Μετά την στερεοποίηση των καλουπιών, πραγματοποιήθηκε λείανση των δειγμάτων με χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC), ξεκινώντας από χονδρό κόκκο, 80 grit και αυξάνοντας σταδιακά μέχρι μέγεθος κόκκου 1000 grit. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στίλβωση των δειγμάτων σε πάνινο τροχό με κόκκους διαμαντιού μεγέθους 3μm, με την χρήση της αντίστοιχης οδοντόπαστας. Για την λείανση και την στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα Knuth-roter 3 και Dap-V της Struers αντίστοιχα. Τέλος, έγινε χημική προσβολή με ένα μείγμα νιτρικού οξέως (HNO<sub>3</sub>) και αλκοόλης (Nital 5%) και έπειτα με την χρήση του μικροσκοπίου Leitz Aristomet μελετήθηκε η μικροδομή τους (βλ. Εικ. 3.9).



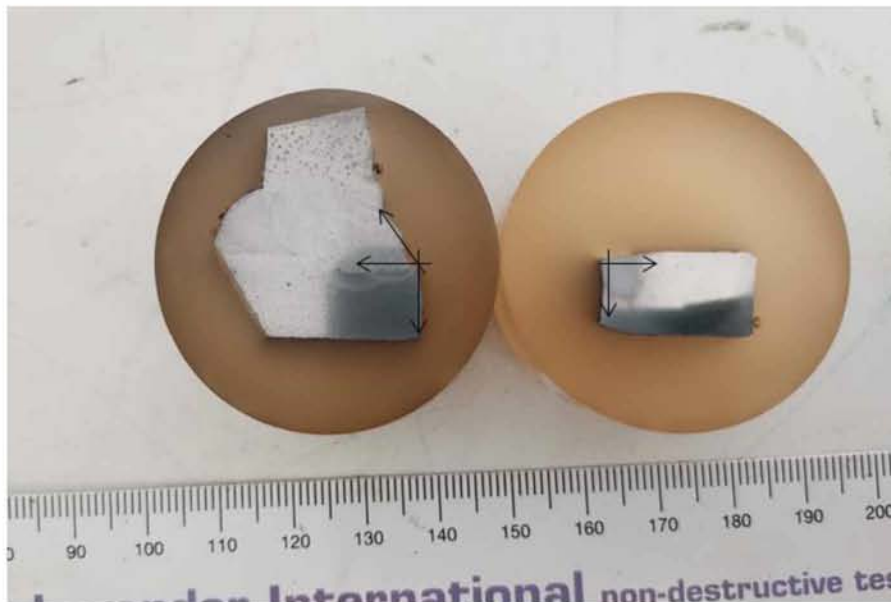
Εικ. 3.9 Μικροσκόπιο Leitz Aristomet

### 3.6 Μικροσκληρομέτρηση

Με την ολοκλήρωση του μικροσκοπικού ελέγχου, μελετήθηκε η μικροσκληρότητα των δειγμάτων στο μικροσκληρόμετρο WOLPERT 402MVD (βλ. Εικ. 3.10). Για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν προφίλ σκληρότητας. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν από την εξωτερική επιφάνεια θραύσης και συγκεκριμένα στην ακμή αυτής, σε απόσταση 0.1-0.2mm και συνεχίζοντουσαν με βήμα 0.25mm προς τις διευθύνσεις που παρουσιάζονται στην Εικ. 3.11. Αναλυτικότερα, οι μετρήσεις ξεκινούσαν από την ακμή της επιφάνειας θραύσης και συνεχίστηκαν προς τις δύο ελεύθερες επιφάνειες, με την διαφορά ότι τα δείγματα που ήταν στην πλευρά της συγκόλλησης έγιναν και μετρήσεις από την ακμή προς το κέντρο της συγκόλλησης (βλ. Εικ.3.11).



Εικ. 3.10 Μικροσκληρόμετρο  
WOLPERT 402MVD



Εικ. 3.11 Διευθύνσεις μικροσκληρομετρήσεων από την πλευρά της συγκόλλησης  
(αριστερά) και της χορδής (δεξιά)



## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

---

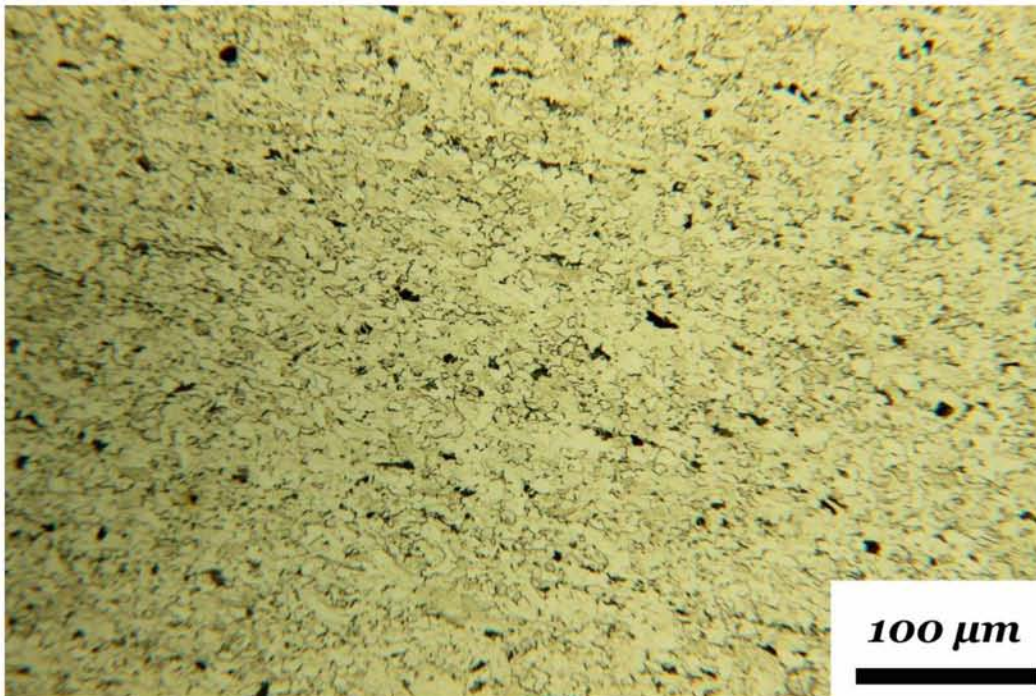
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν στο εργαστηριακό μέρος του πειράματος. Αρχικά γίνεται αναφορά στο βασικό μέταλλο και την συγκόλληση των δειγμάτων και στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της συμπεριφοράς αυτών, ξεκινώντας από τον οπτικό έλεγχο και καταλήγοντας στα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων, όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

### 4.1 Βασικό μέταλλο και συγκόλληση των δειγμάτων

Στο αρχικό στάδιο της εργαστηριακής έρευνας, μελετήθηκε το βασικό μέταλλο και η συγκόλληση των δειγμάτων, σε σημεία διαφορετικά από αυτά της αστοχίας. Συγκεκριμένα, έπειτα από κατάλληλες κοπές που έλαβαν χώρα, απομονώθηκαν δύο δοκίμια με το ένα να αποτελείται εξ' ολοκλήρου από το βασικό μέταλλο και στο άλλο να διακρίνεται η περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης καθώς και η ΘΕΖ. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος και μικροσκληρομετρήσεις, ως βάση για την μετέπειτα εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας.

Τα δείγματα κατασκευάστηκαν από τον χάλυβα υψηλής αντοχής S420. Η μικροδομή του οποίου αποτελείται από φερρίτη και περλίτη και χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκος, καθώς το μέγεθος του κόκκου κυμαίνεται μεταξύ 5 και 25  $\mu\text{m}$ . Ακόμη η σκληρότητα του, σύμφωνα με την βιβλιογραφία κυμαίνεται μεταξύ 150-195  $\text{HV}_{0.3}$ .

Στην Εικ. 4.1 παρουσιάζεται η μικροδομή από το δοκίμιο του βασικού μετάλλου, στην οποία διακρίνεται η φερριτο-περλιτική μικροδομή του καθώς και το μικρό μέγεθος κόκκου. Επιπλέον η σκληρότητα του ανέρχεται κατά μέση τιμή στα 194  $\text{HV}_{0.3}$ , με μέγιστη τιμή 205  $\text{HV}_{0.3}$  και ελάχιστη 184  $\text{HV}_{0.3}$ , σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με βάρος 300gr.



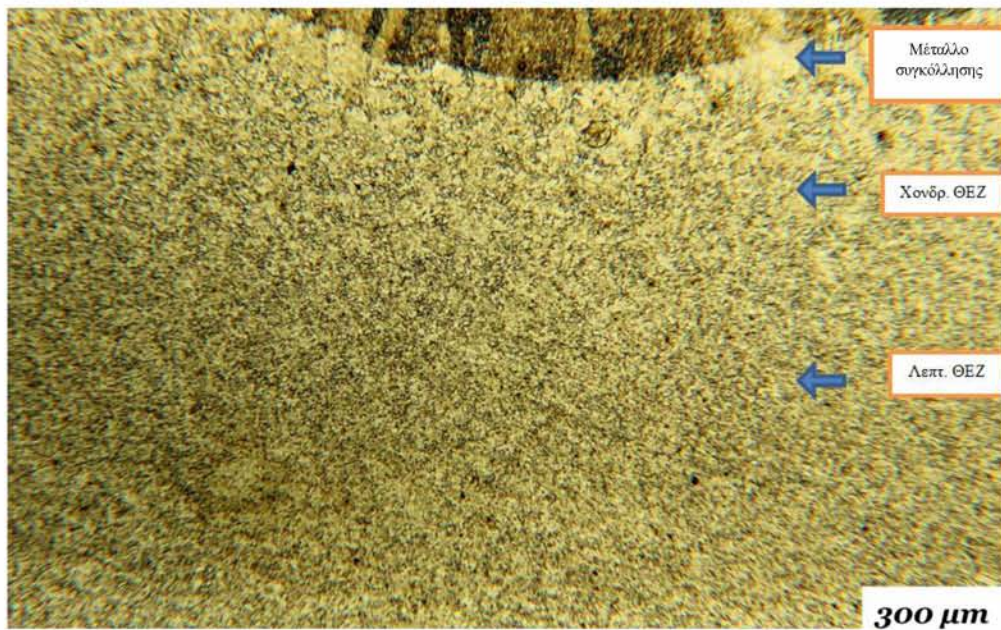
Εικ.4.1 Μεταλλογραφία βασικού μετάλλου



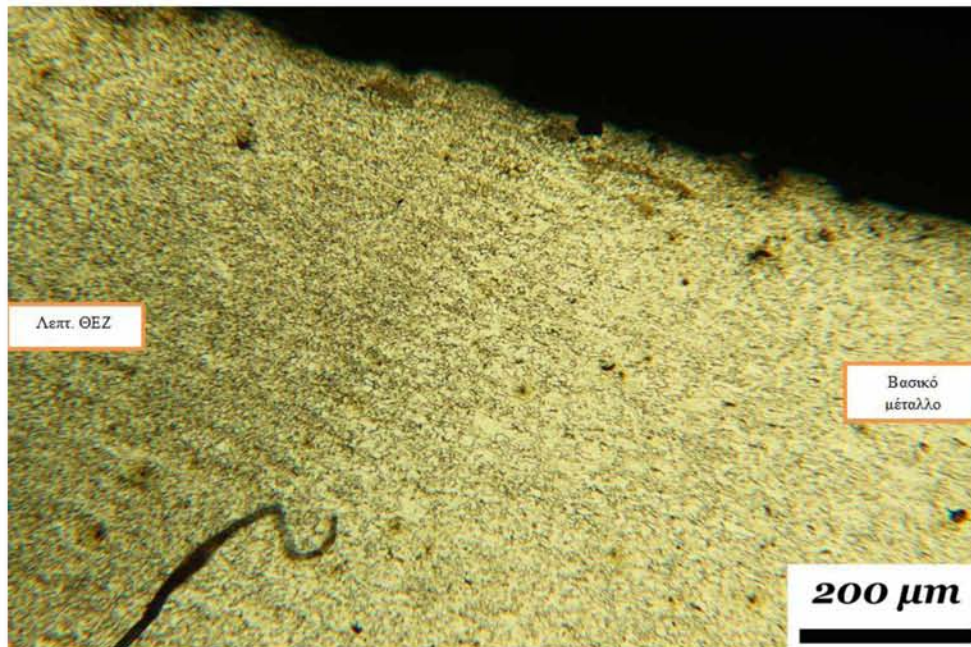
Εικ. 4.2 Συγκόλληση δείγματος



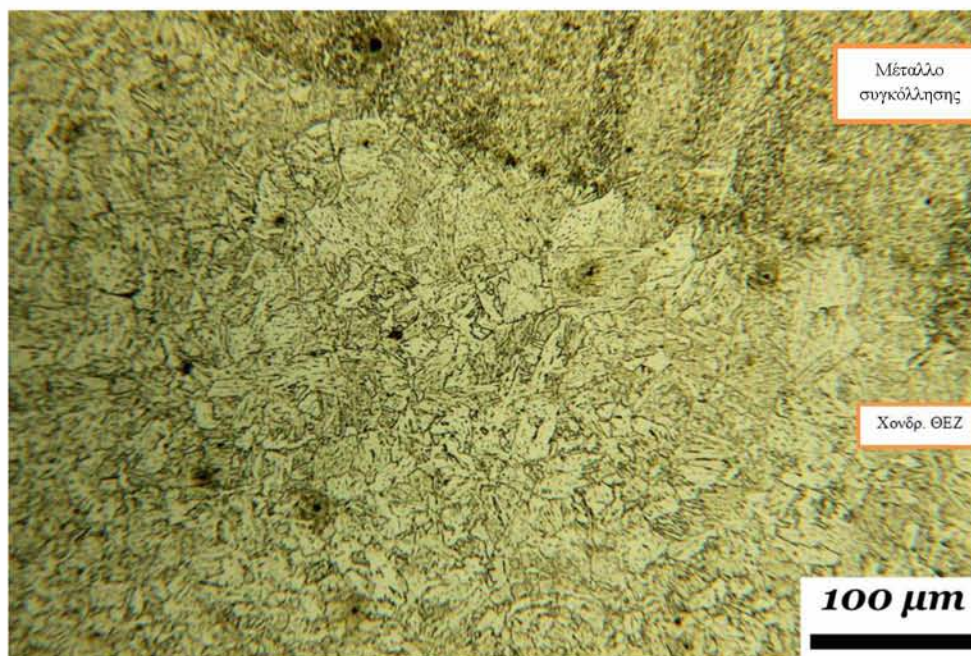
Στην Εικ. 4.2 φαίνεται η τελική μορφή του δοκιμίου της συγκόλλησης, στην οποία διακρίνονται τα πολλαπλά πάσα που έγιναν. Στην Εικ. 4.3 παρατηρείται η λεπτόκοκκη και η χονδρόκοκκη περιοχή της ΘΕΖ, καθώς και στο επάνω μέρος το μέταλλο συγκόλλησης. Έπειτα στην Εικ. 4.4 παρατηρείται η διαφοροποίηση στο μέγεθος του κόκκου μεταξύ του βασικού μετάλλου και της λεπτόκοκκης ΘΕΖ, ενώ στην Εικ. 4.5 διακρίνεται η μετάβαση από το μέταλλο συγκόλλησης, στην χονδρόκοκκη ΘΕΖ, στην οποία γίνεται εμφανής η διαφορά μεγέθους των κόκκων. Τέλος, στο δοκίμιο της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρομετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1, εκφρασμένες ως σε μέση τιμή ανά περιοχή.



Εικ. 4.3 Μεταλλογραφία της συγκόλλησης και απεικόνιση των περιοχών της



Εικ. 4.4 Απεικόνιση βασικού μετάλλου και λεπτόκοκκης ΘΕΖ



Εικ. 4.5 Χονδρόκοκκη ΘΕΖ και μέταλλο συγκόλλησης

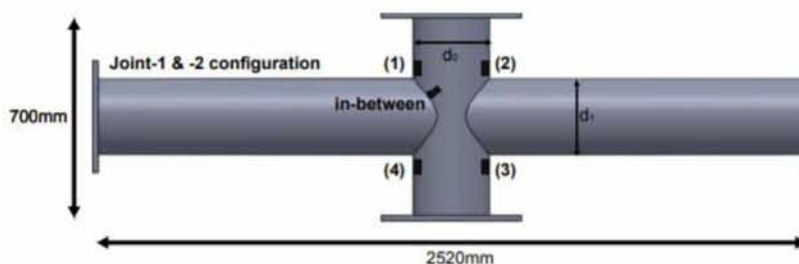


Πίνακας 4.1 Μετρήσεις μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου συγκόλλησης σε HV<sub>0.3</sub>

Περιοχή	Μέση τιμή (HV <sub>0.3</sub> )
Μέταλλο συγκόλλησης	244±33
Χονδρόκοκκη ΘΕΖ	209±17
Λεπτόκοκκη ΘΕΖ	206±14
Βασικό μέταλλο	183±20

## 4.2 Οπτικός έλεγχος

Κατά την διαδικασία του πειράματος κόπωσης παρατηρήθηκε και στα τέσσερα δείγματα, ότι η ρωγμή ξεκινά σε ένα από τα τέσσερα chord crown locations (βλ. Εικ. 4.6)[(1),(2),(3),(4)] στην διεύθυνση του πάχους από την πλευρά της χορδής. Η συνέχιση της κυκλικής φόρτισης είχε ως αποτέλεσμα, την διάδοση των αρχικών ρωγμών, κατά μήκος του πόδα της συγκόλλησης και από τις δύο κατευθύνσεις, συμμετρικά ως προς το chord crown point, μέχρι κάποια από τις ρωγμές να γίνει διαμπερής και η πειραματική διαδικασία να ολοκληρωθεί. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το σημείο αστοχίας των δειγμάτων για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.



Εικ. 4.6 Απεικόνιση της διάταξης των δοκιμίων

#### 4.2.1 Δείγμα X1 ( $u \pm 29$ mm)



Εικ. 4.7 Δείγμα X1

Το δείγμα X1 (βλ. Εικ. 4.7), αστόχησε μετά από 100 κύκλους ( $N_f$ ) κάτω από επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση με  $|M_{max}| = 129,7$  kN·m, παρουσιάζοντας διαμπερή ρωγμή κατά το πάχος στο σημείο (1), σύμφωνα με την αριθμηση της Εικ. 4.6. Η αποκόλληση αυτή, μεταξύ χορδής και συγκόλλησης, έφτανε μέχρι τα saddle points, όπως διακρίνεται στην Εικ. 4.7.

Έπειτα από κοπές που έγιναν στο X1, παρατηρήθηκε ύπαρξη και δεύτερου ανοίγματος στο σημείο (3), δηλαδή αντιδιαμετρικά του σημείου (1), το οποίο άνοιγμα ήταν διαμπερές μέχρι λίγο πριν τα saddle points, ενώ αντίθετα στα (2) και (4) δεν διακρίνεται διαμπερής ρωγμή.

#### 4.2.2 Δείγμα X2 ( $u=\pm 35$ mm)



Εικ. 4.8 Δείγμα X2

Το δείγμα X2(βλ. Εικ. 4.8), αστόχησε μετά από 49 κύκλους με  $|M_{\max}|=146,1$  kN·m . Στο δοκίμιο αυτό, παρουσιάστηκε διαμπερής ρωγμή σε ένα από τα κάτω chord crown location και συγκεκριμένα στο σημείο (3), το οποίο διακρίνεται και στην Εικ. 4.8 . Στο σημείο αυτό, η ρωγμή είναι διαμπερής μέχρι και λίγο πριν τα saddle points. Στις υπόλοιπες τρεις θέσεις crown, καμία ρωγμή δεν διαδόθηκε σε όλο το πάχος.



Εικ. 4.9 Δείγμα X3

#### 4.2.3 Δείγμα X3 ( $u=\pm 41$ )

Το X3 (βλ. Εικ. 4.9), αστόχησε μετά από μόλις 23 κύκλους με φορτίο  $|M_{\max}|=152,6$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ . Στο δείγμα αυτό, όπως συνέβη και στο X2, η αστοχία συνέβη σε ένα από τα κάτω chord crown locations και συγκεκριμένα στο σημείο (4), ενώ στα υπόλοιπα 3 καμία ρωγμή δεν κατάφερε να διασχίσει όλο το πάχος. Η διαμπερής αυτή ρωγμή διαδόθηκε κατά μήκος του πόδα της συγκόλλησης μέχρι και τα σημεία « in-between».

#### 4.2.4 Δείγμα X4 ( $u=\pm 47,5$ )

Τέλος, το X4(βλ. Εικ. 4.10), που του ασκήθηκε η πιο ακραία φόρτιση ( $|M_{\max}|=162,4$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ ) αστόχησε στους λιγότερους κύκλους ( $N_f= 21$ ). Στο σημείο (1) παρατηρήθηκε διαμπερής ρωγμή, η οποία συνεχίζει κατά μήκος του πόδα της συγκόλλησης μέχρι και τα σημεία « in-between». Τα υπόλοιπα chord crown σημεία δεν παρουσιάζουν διαμπερή ρωγμή.



Εικ. 4.10 Δείγμα X4



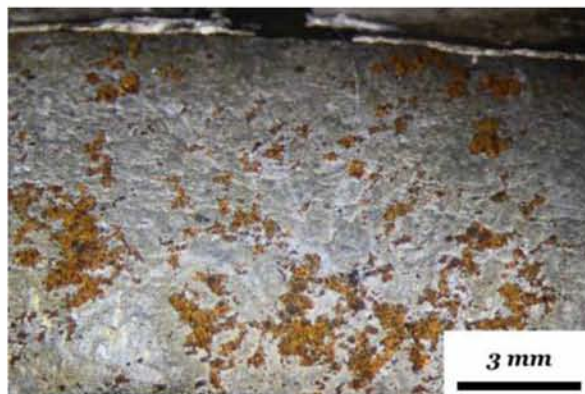
## 4.3 Επιφάνειες θραύσης

### 4.3.1 Δείγμα X1 ( $u=\pm 29$ )

Το δείγμα X1, όπως προαναφέρθηκε, είχε δυο διαμπερείς αστοχίες, η μία στο σημείο (1) και η δεύτερη στο σημείο (3). Και στις δύο περιπτώσεις, σημείο ενδιαφέροντος πέρα από το crown point όπου και ξεκινά η αρχική ρωγμή, είναι και από το σημείο «in-between» μέχρι το saddle, στο οποίο φαίνεται ότι η διαδρομή της ρωγμής (crack path), παρόλο που ξεκινά από τον πόδα της συγκόλλησης στο crown, δεν κινείται κατά μήκος αυτού, αλλά κινούμενη προς το saddle point εισχωρεί στο βασικό μέταλλο φτάνοντας να αποκλίνει από το πάσο της συγκόλλησης μέχρι και 11,8 mm στο σημείο (1) και 9,5 mm στο σημείο (3). Στις Εικ. 4.11 και 4.12 απεικονίζονται επιφάνειες θραύσης του σημείου (1) και (3) αντίστοιχα, από την πλευρά της συγκόλλησης.



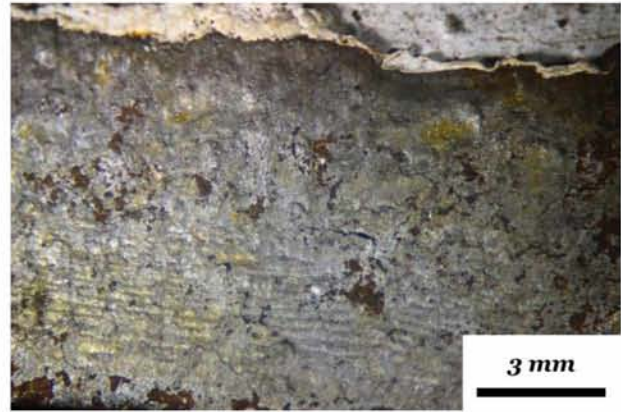
Εικ. 4.11 α) Επιφάνεια θραύσης X1 στην πλευρά της συγκόλλησης στο σημείο (1)



Εικ. 4.11 β) Crown point με χρήση στερεοσκοπίου



Εικ. 4.12 α) Επιφάνεια θραύσης X1 από την πλευρά της συγκόλλησης στο σημείο (3)



Εικ. 4.12 β) Crown point με χρήση στερεοσκοπίου

#### 4.3.2 Δείγμα X2 ( $u=\pm 35$ )

Στο δείγμα X2, το οποίο αστόχησε στο σημείο (3), κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο παρατηρήθηκε η ύπαρξη τόξου 110 mm, τόσο στην επιφάνεια θραύσης της πλευρά της συγκόλλησης όσο και σε αυτή της χορδής, με το κέντρο του να βρίσκεται σε απόσταση 93 mm από το crown. Στο σημείο αυτό έγινε η μία τομή για την μεταλλογραφία, ενώ μια επιπλέον έγινε στο crown όπου και ξεκίνησε η αρχική ρωγμή (βλ. Εικ. 4.14). Μετά την έναρξη της ρωγμής και κατά την διάδοση της, το μονοπάτι που ακολουθεί, είναι κατά μήκος του πόδα της συγκόλλησης. Οι Εικ. 4.13 απαρτίζονται από την επιφάνεια θραύσης του X2, τόσο από την πλευρά της συγκόλλησης όσο και από την αντίστοιχη της χορδής.



Εικ. 4.13 α) Επιφάνεια θραύσης X2 από την πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.13 β) Επιφάνεια θραύσης X2 απέναντι από την συγκόλληση



Εικ. 4.14 Τομές στο X2



### 4.3.3 Δείγμα X3 ( $\mu=\pm 41$ )

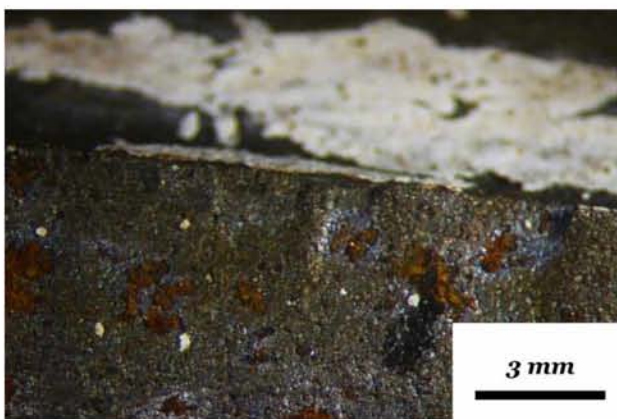
Το X3, το οποίο αστόχησε στο σημείο (4), παρουσίασε τόξο στην επιφάνεια θραύσης του με κέντρο 54 mm από το crown. Ως απόρροια αυτού ήταν η μία τομή να γίνει σε αυτό το σημείο, ενώ η δεύτερη να γίνει στο crown. Στην Εικ. 4.15 παρουσιάζεται η επιφάνεια θραύσης του X3 από την πλευρά της συγκόλλησης και της χορδής, ενώ στην 4.16 και 4.17 πραγματοποιείτε περαιτέρω παρατήρηση στα σημεία των τομών, με την χρήση στερεοσκοπίου.



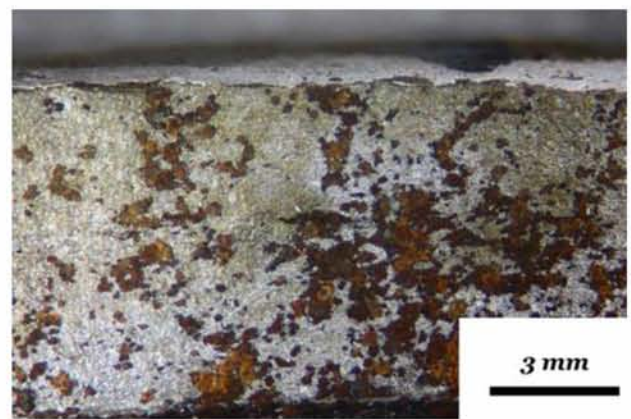
Εικ. 4.15 α) Επιφάνεια θραύσης X3 από την πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.15 β) Επιφάνεια θραύσης X3 από την πλευρά της χορδής

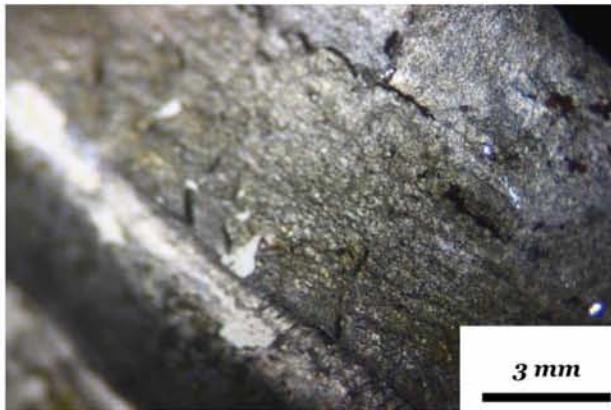


Εικ. 4.16 α) Crown point από την πλευρά της συγκόλλησης

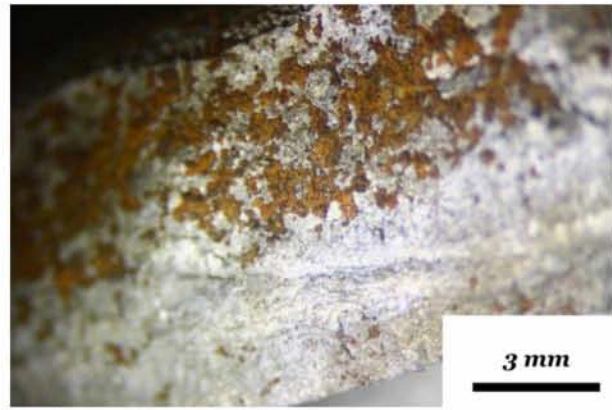


Εικ. 4.16 β) Crown point από την πλευρά της χορδής





Εικ. 4.17 α) Επιφάνεια θραύσης στο σημείο της δεύτερης τομής από την πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.17 β) Επιφάνεια θραύσης στο σημείο της δεύτερης τομής στη χορδή

Επιπλέον, στο δοκίμιο X3 έγινε έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια στο σημείο (1) ώστε να διαπιστωθεί αρχικά η ύπαρξη και στην συνέχεια το βάθος του ρήγματος. Μετά τον έλεγχο, επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι υπάρχει ρωγμή, χωρίς όμως αυτή να γίνεται σε κανένα σημείο διαμπερής (βλ. Εικ.4.18). Για τον λόγο αυτό, έγιναν δύο τομές σε αυτό το δείγμα, μία στο crown ώστε να υπολογιστεί το μέγιστο βάθος του ρήγματος και μία 160 mm από το crown όπου και σταματούσε η επιφανειακή ρωγμή (λίγο πριν το saddle).



Εικ. 4.18 Δοκίμιο X3 στο σημείο (1) μετά τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια

#### 4.3.4 Δείγμα X4 ( $u=\pm 47,5$ )

Στο X4, το οποίο αστόχησε στο crown από την επάνω πλευρά στο σημείο (1), παρατηρήθηκε η ύπαρξη τόξου με το κέντρο του να βρίσκεται σε απόσταση 34mm από το crown. Σε αυτή την απόσταση πραγματοποιήθηκε η μία τομή με την δεύτερη να γίνεται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις στο crown. Στην Εικ. 4.18 παρουσιάζεται η επιφάνεια θραύσης της πλευράς της συγκόλλησης και της χορδής, ενώ στην Εικ. 4.19 παρατηρείται μέσω στερεοσκοπίου το crown point αυτών.



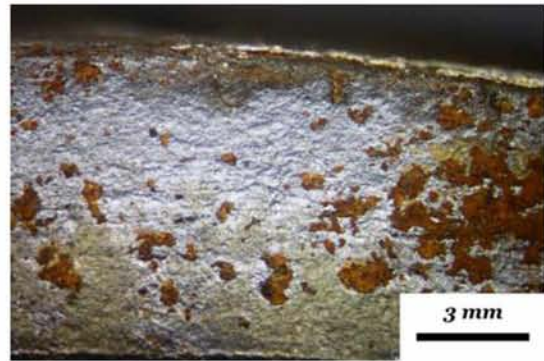
Εικ. 4.18 α) Επιφάνεια θραύσης X4 από την πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.18 β) Επιφάνεια θραύσης X4 από την πλευρά της χορδής



Εικ. 4.19 α) Crown point από την πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.19 β) Crown point από την πλευρά της χορδής



## 4.4 Μεταλλογραφικός έλεγχος

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο επιλέχθηκαν τα σημεία ενδιαφέροντος του κάθε δείγματος. Με την χρήση της πριονοκορδέλας του μηχανουργείου και του κοπτικού τροχού πραγματοποιήθηκαν τομές στα σημεία αυτά ώστε να απομονωθεί η επιφάνεια θραύσης και να πραγματοποιηθεί ο μεταλλογραφικός έλεγχος. Για να υπάρχει σαφής εικόνα της συμπεριφοράς των επιφανειών θραύσης, κάθε τομή πραγματοποιήθηκε τόσο στην πλευρά της συγκόλλησης όσο και στο ακριβώς απέναντι σημείο της χορδής.

### 4.4.1 Δείγμα X1 ( $u=\pm 29$ )

Στο δείγμα X1, επιλέχθηκε το crown point των σημείων (1) και (3), σύμφωνα με την αρίθμηση της Εικ. 4.6 και πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος στην πλευρά της συγκόλλησης και στην αντίστοιχη της χορδής. Στην Εικ. 4.20 παρατηρείται το σημείο που έγινε η τομή στο σημείο (1) καθώς και τα εγκιβωτισμένα δοκίμια της συγκόλλησης και της χορδής, ενώ στην Εικ. 4.21 παρατηρείται το αντίστοιχο στο σημείο (3).



Εικ. 4.20 α) Τομή επιφάνειας θραύσης του X1 στο σημείο (1), από την πλευρά της συγκόλλησης στο crown



Εικ. 4.20 β) Δοκίμια μεταλλογραφίας από την πλευρά της συγκόλλησης και την αντίστοιχη της χορδής στο X1(1) στο crown



Εικ. Εικ. 4.21 α) Τομή επιφάνειας θραύσης του X1 στο σημείο (3), από την πλευρά της συγκόλλησης στο crown



Εικ. 4.21 β) Δοκίμια μεταλλογραφίας από την πλευρά της συγκόλλησης και την αντίστοιχη της χορδής στο X1(3) στο crown

- X1 στο σημείο (1), στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης

Όπως διακρίνεται στην Εικ. 4.22, η εκκίνηση της ρωγμής συνέβη στο μέταλλο συγκόλλησης σε πολύ κοντινή απόσταση από την χονδρόκοκη ΘΕΖ.

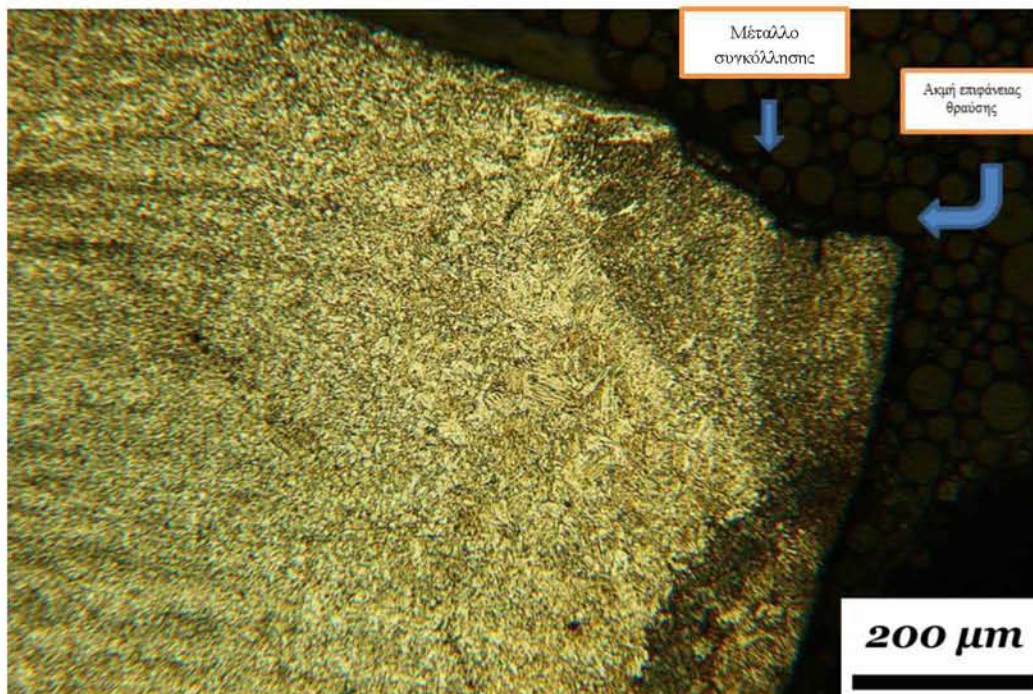
- X1 στο σημείο (1), στο crown από την πλευρά της χορδής

Στην Εικ. 4.23, παρατηρείται ότι η ακμή της επιφάνειας θραύσης βρίσκεται μέσα στο μέταλλο συγκόλλησης, κοντά στα όρια με την χονδρόκοκη ΘΕΖ. Η διαπίστωση αυτή ήταν αναμενόμενη, σύμφωνα με την πλευρά της συγκόλλησης, καθώς στην Εικ. 4.23 ουσιαστικά διακρίνεται το εναπομείναν τμήμα του μετάλλου συγκόλλησης.





Εικ. 4.22 Μεταλλογραφία στην πλευρά της συγκόλλησης στο crown του X1(1)



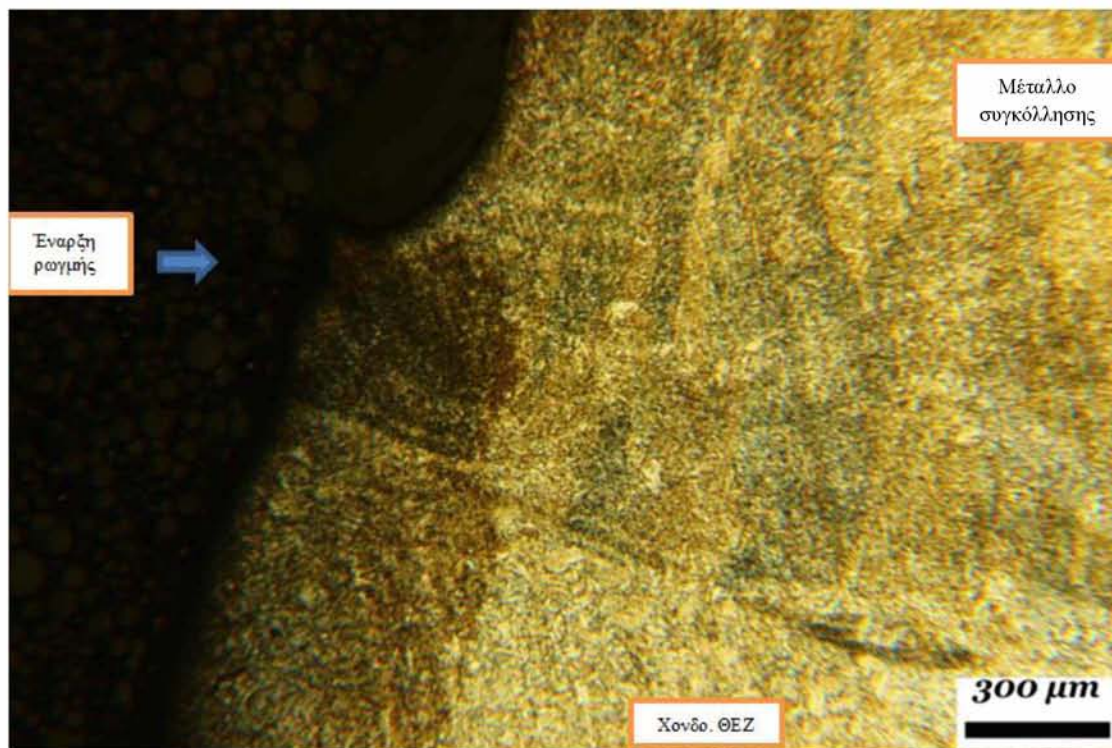
Εικ. 4.23 Μεταλλογραφία από την πλευρά της χορδής στο crown του X1(1)

- X1 στο σημείο (3), στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης

Στο δείγμα X1 (3) (αστοχία στο κάτω crown location), παρατηρείται ότι η έναρξη της αρχικής ρωγμής βρίσκεται στο μέταλλο συγκόλλησης σε κοντινή απόσταση από την ΘΕΖ (βλ. Εικ. 4.24). Αξιοσημείωτο είναι ότι η μεταλλογραφία αυτή είναι όμοια με την αντίστοιχη του δείγματος X1 στο σημείο (1) (αστοχία στο επάνω crown location).

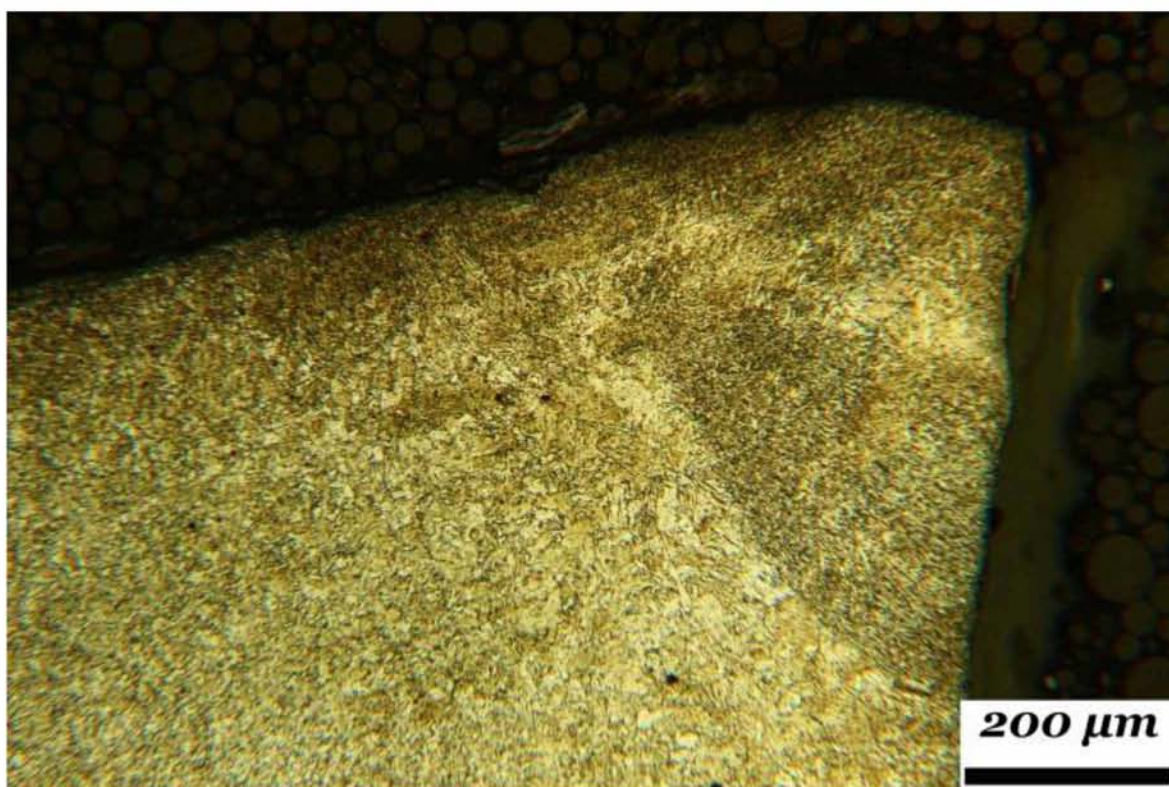
- X1 στο σημείο (3), στο crown από την πλευρά της χορδής

Στην Εικ. 4.25, διακρίνεται το εναπομείναν τμήμα του μετάλλου συγκόλλησης από την πλευρά της συγκόλλησης με την αντίστοιχη ΘΕΖ.



Εικ. 4.24 Μεταλλογραφία στην πλευρά της συγκόλλησης στο crown του X1(3)

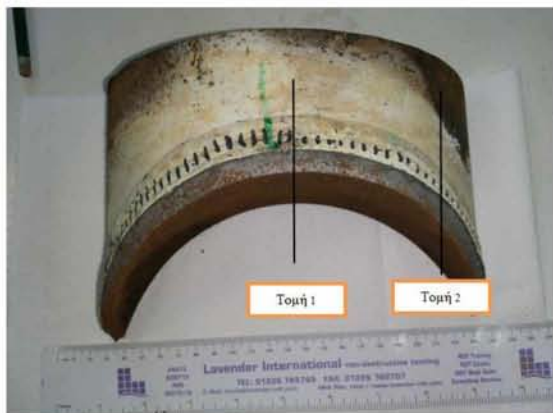




Εικ. 4.25 Μεταλλογραφία από την πλευρά της χορδής στο crown στο X1(3)

#### 4.4.2 Δείγμα X2 ( $u=\pm 35$ )

Το δείγμα X2 αστόχησε στο σημείο (3) και όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν δύο τομές, η μία στο crown και η δεύτερη σε απόσταση 93 mm από το crown τόσο στην πλευρά της συγκόλλησης όσο και στο τμήμα της χορδής ( βλ. Εικ. 4.26). Μετά τις περαιτέρω κοπές που έγιναν εγκιβωτίστηκαν τέσσερα δοκίμια, δύο στην πλευρά της συγκόλλησης και δύο στην απέναντι, στα οποία πραγματοποιήθηκε ο μεταλλογραφικός έλεγχος.



Εικ. 4.26 Τομές στο X2

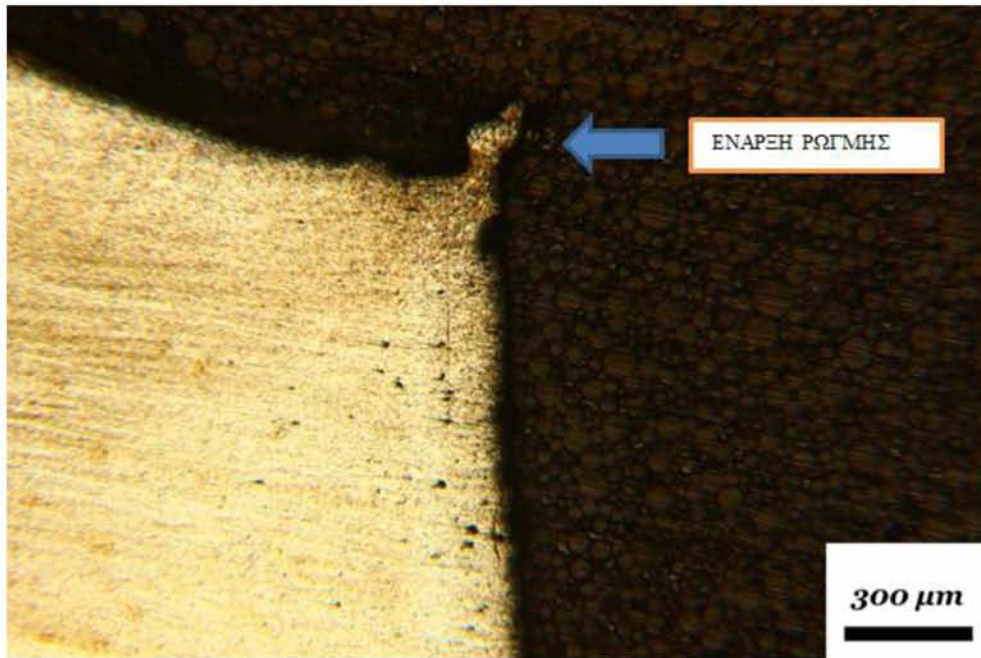


Εικ. 4.27 Εγκιβωτισμένα δοκίμια από την πλευρά της συγκόλλησης και την αντίστοιχη της χορδής στο X2 στο crown

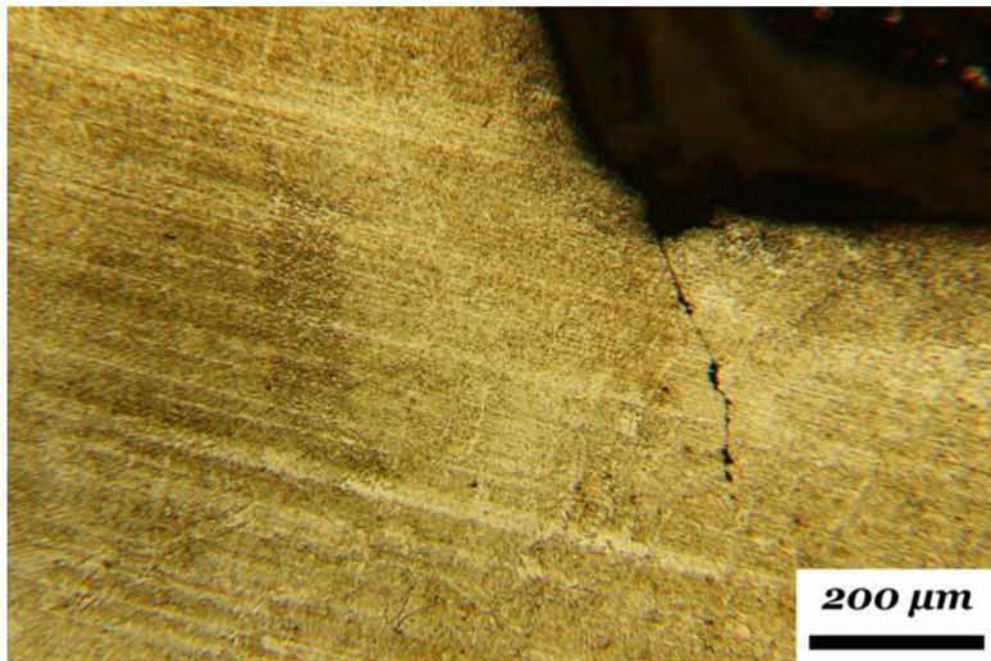
- X2 (3) στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης

Στο δοκίμιο αυτό, η επιφάνεια θραύσης βρίσκεται μέσα στο βασικό μέταλλο εξ' ολοκλήρου. Η εκκίνηση της ρωγμής, όπως φαίνεται στην Εικ.4.28, συνέβη στο βασικό μέταλλο αλλά σε κοντινή απόσταση από την ΘΕΖ. Άξιο αναφοράς είναι ότι πέρα από την αρχική ρωγμή που διέσχισε όλο το πάχος του σωλήνα, υπήρξε και μία ρωγμή παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης (βλ. Εικ 4.29), η οποία ξεκίνησε μέσα από το μέταλλο συγκόλλησης σε πολύ κοντινή απόσταση από την ΘΕΖ (και συγκεκριμένα την χονδρόκοκκη ζώνη) αλλά διαδόθηκε μόνο μέχρι την λεπτόκοκκη περιοχή της ΘΕΖ.





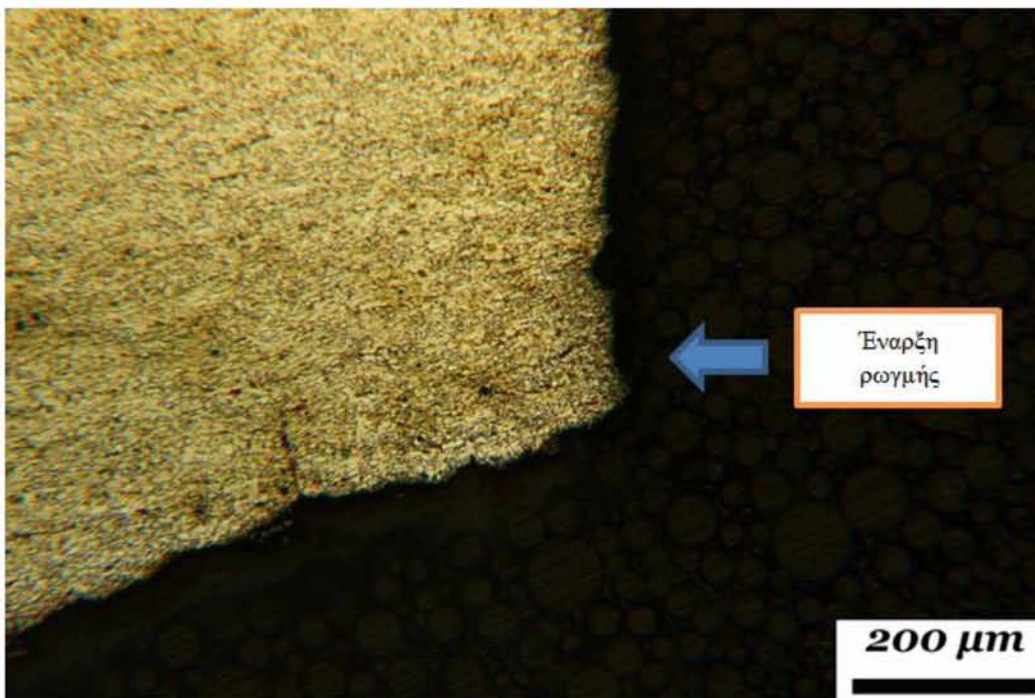
Εικ. 4.28 Μεταλλογραφία Επιφάνειας θραύσης-Έναρξη ρωγμής



Εικ. 4.29 Παράλληλη ρωγή στην επιφάνεια θραύσης

- X2 (3) στο crown από την πλευρά της χορδής

Αντίστοιχα, στην πλευρά της χορδής όπως ήταν αναμενόμενο, διακρίνεται η επιφάνεια θραύσης να βρίσκεται στο βασικό μέταλλο, δίχως να υπάρχει τμήμα την ΘΕΖ (βλ. Εικ. 4.30). Επιπλέον, παρατηρείται μία παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης δευτερεύουσα ρωγμή, η οποία όμως εξελίχθηκε για μικρό βάθος.



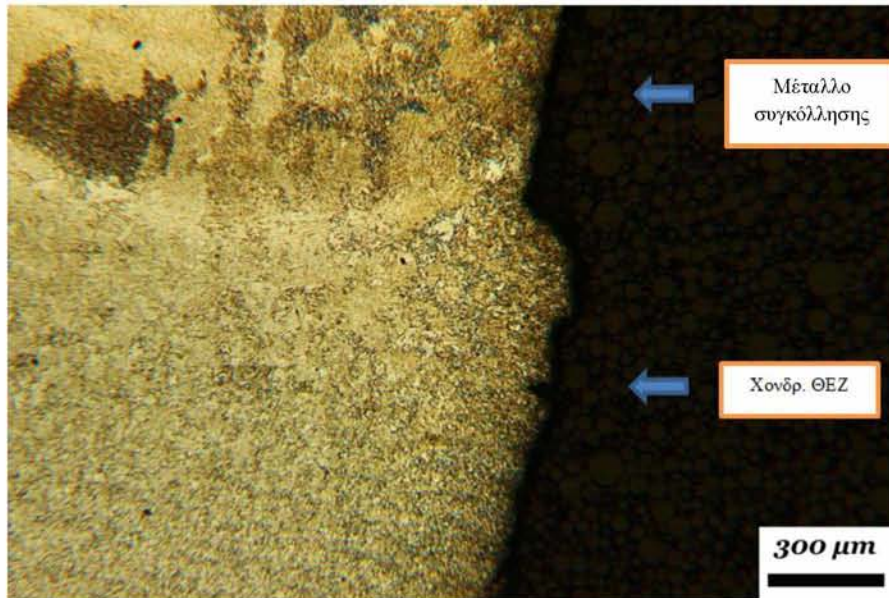
Εικ. 4.30 Επιφάνεια θραύσης στην χορδή του X2 στο crown

- X2 (3) στην πλευρά της συγκόλλησης σε απόσταση 93 mm από το crown

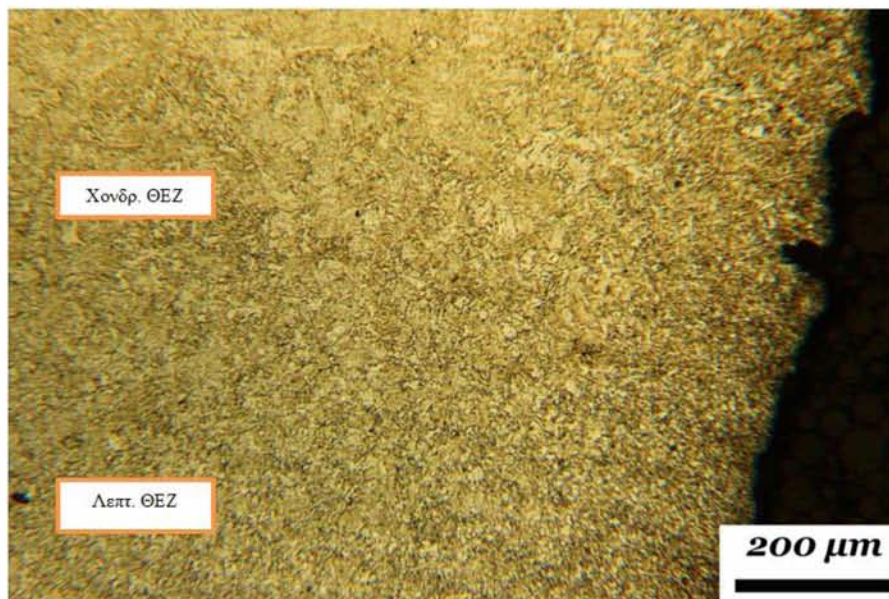
Αντίθετα με το crown, σε αυτό το δοκίμιο, η έναρξη της επιφάνειας θραύσης, από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του σωλήνα δείχνει να βρίσκεται στην χονδρόκοκκη περιοχή της ΘΕΖ στα όρια όμως με το μέταλλο συγκόλλησης [βλ. Εικ. 4.31 (επιφάνεια θραύσης



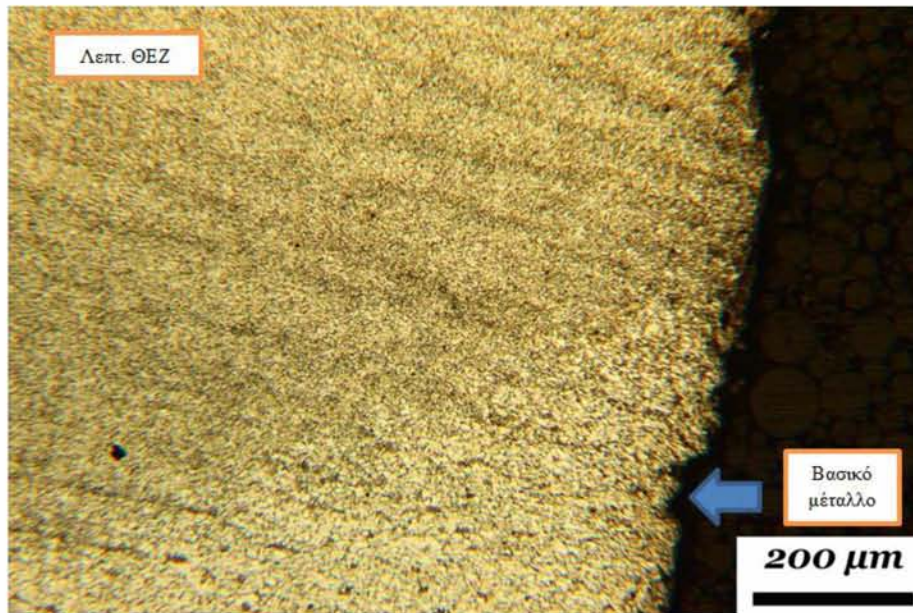
δεξιά)]. Επιπρόσθετα στις Εικ. 4.32 και 4.33 φαίνεται η μετάβαση στην επιφάνεια θραύσης από την χονδρόκοκκη περιοχή στην λεπτόκοκκη και από την λεπτόκοκκη στο βασικό μέταλλο αντίστοιχα.



Εικ. 4.31 Επιφάνεια θραύσης και όρια μετάλλου συγκόλλησης με την χονδρόκοκκη ΘΕΖ



Εικ. 4.32 Αλλαγή από χονδρόκοκκη σε λεπτόκοκκη ΘΕΖ στην επιφάνεια θραύσης

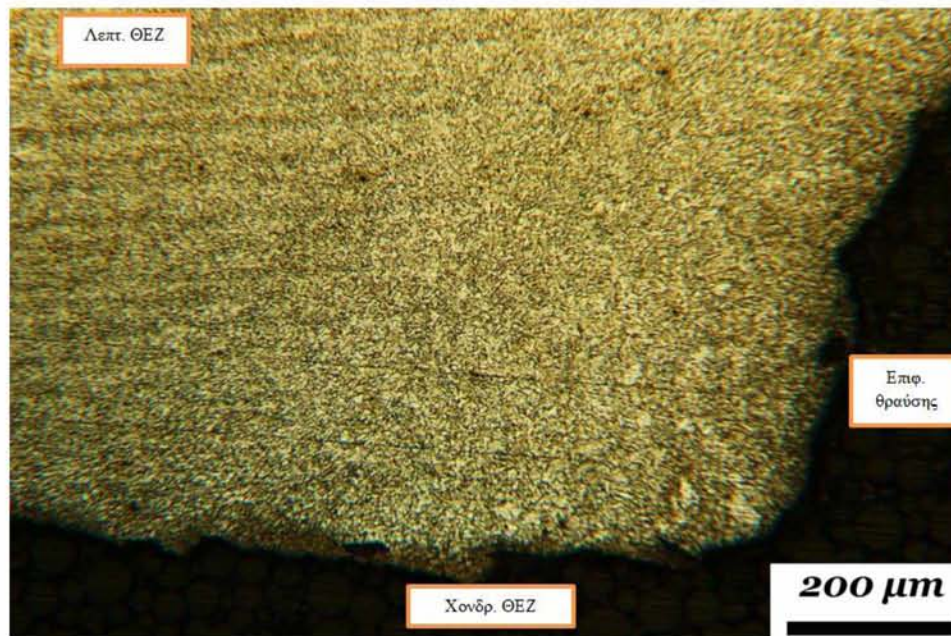


Εικ. 4.33 Σύνορα λεπτόκοκκης ΘΕΖ με το βασικό μέταλλο στην επιφάνεια θραύσης

- X2 (3) στην πλευρά της χορδής σε απόσταση 93 mm από το crown

Στην Εικ. 4.34 παρατηρείται ότι υπάρχει ΘΕΖ και στην χορδή, που συμφωνεί με την πλευρά της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα φαίνεται η ύπαρξη της λεπτόκοκκης και έπειτα της χονδρόκοκκης ΘΕΖ στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής.





Εικ. 4.34 Επιφάνεια θραύσης και όρια μεταξύ λεπτόκοκκης με χονδρόκοκκης ΘΕΖ

#### 4.4.3 Δείγμα X3 ( $u=\pm 35$ )

Στο X3 [σημείο (4)] έγιναν δύο τομές, όπως προαναφέρθηκε στον οπτικό έλεγχο, η μία στο crown και η δεύτερη στα 53mm από το crown. Ακόμη, έγιναν και οι κατάλληλες κοπές ώστε να γίνει μεταλλογραφικός έλεγχος και στο σημείο (1), όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.2.3, με σκοπό να μελετηθεί το σημείο εκκίνησης αλλά και το βάθος της ρωγμής στις δύο τομές. Στην Εικ. 4.35 απεικονίζονται οι τομές που πραγματοποιήθηκαν στην πλευρά της συγκόλλησης και της χορδής και στην Εικ. 4.36 τα δοκίμια που προέκυψαν, ενώ στην Εικ. 4.37 φαίνονται τα δοκίμια που προέκυψαν από το σημείο (1).



Εικ. 4.35 α) Τομές στο X3 στην πλευρά της συγκόλλησης



Εικ. 4.35 β) Τομές στο X3 στην πλευρά της χορδής



Εικ. 4.36 α) Εγκιβωτισμένα δοκίμια στο crown στο X3(4)



Εικ. 4.36 β) Εγκιβωτισμένα δοκίμια στην τομή 2 στο X3(4)



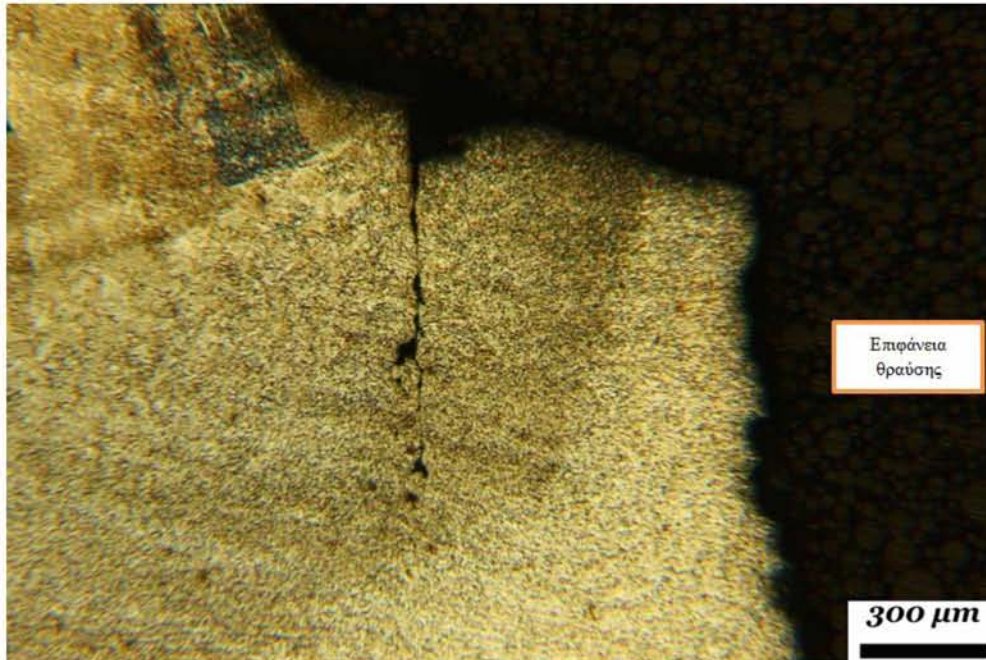
Εικ. 4.37 α) Εγκιβωτισμένο δοκίμιο στο crown στο X3(1)



Εικ. 4.37 β) Εγκιβωτισμένο δοκίμιο σε απόσταση 160 mm από το crown στο X3(1)

- X3 στο σημείο (4) , στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης

Όπως διαπιστώνεται από την Εικ. 4.38, η εκκίνηση της ρωγμής βρίσκεται στο βασικό μέταλλο, ενώ διακρίνεται και δεύτερη ρωγμή παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης, με σημείο εκκίνησης τον πόδα της συγκόλλησης (στα σύνορα του μετάλλου συγκόλλησης με την χονδρόκοκκη ΘΕΖ), η οποία διασχίζει την ΘΕΖ μέχρι και την λεπτόκοκκη περιοχή. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάστηκε και στο δείγμα X2, στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης, με κοινό χαρακτηριστικό ότι η αστοχία συνέβη σε ένα από τα κάτω chord crown location [σημείο (3) για το X2 και σημείο (4) για το X3.

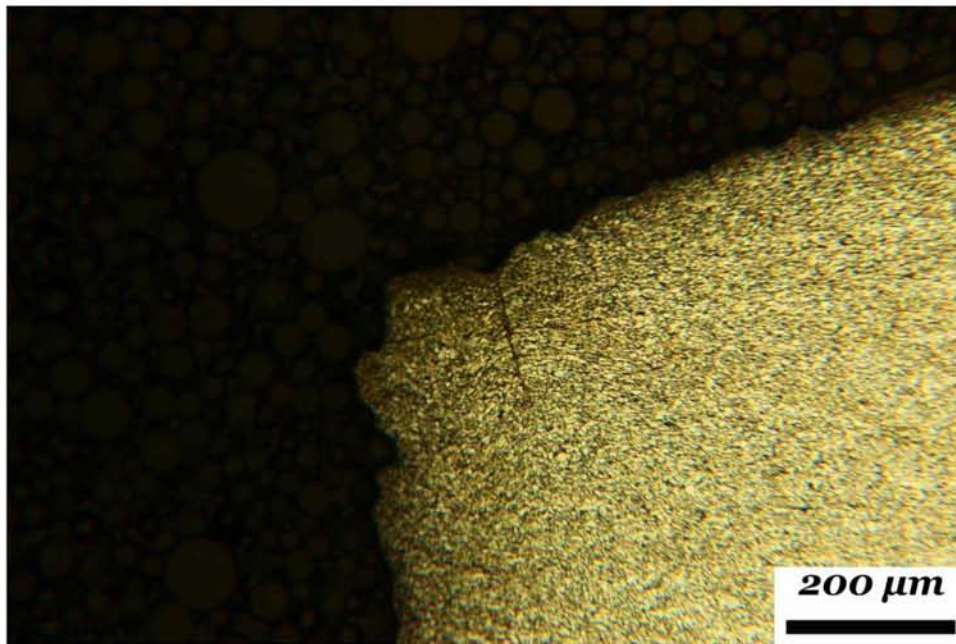


Εικ. 4.38 Εκκίνηση ρωγμής- παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης ρωγμή- όρια μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης, ΘΕΖ και βασικού μετάλλου



- X3 στο σημείο (4), στο crown από την πλευρά της χορδής

Όπως ήταν αναμενόμενο και σύμφωνα με την μεταλλογραφία της Εικ. 4.39, η ακμή της επιφάνειας θραύσης της χορδής βρισκόταν στο βασικό μέταλλο. Επιπλέον, διακρίνεται και η ανάπτυξη μια δευτερεύουσας ρωγμής παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης.

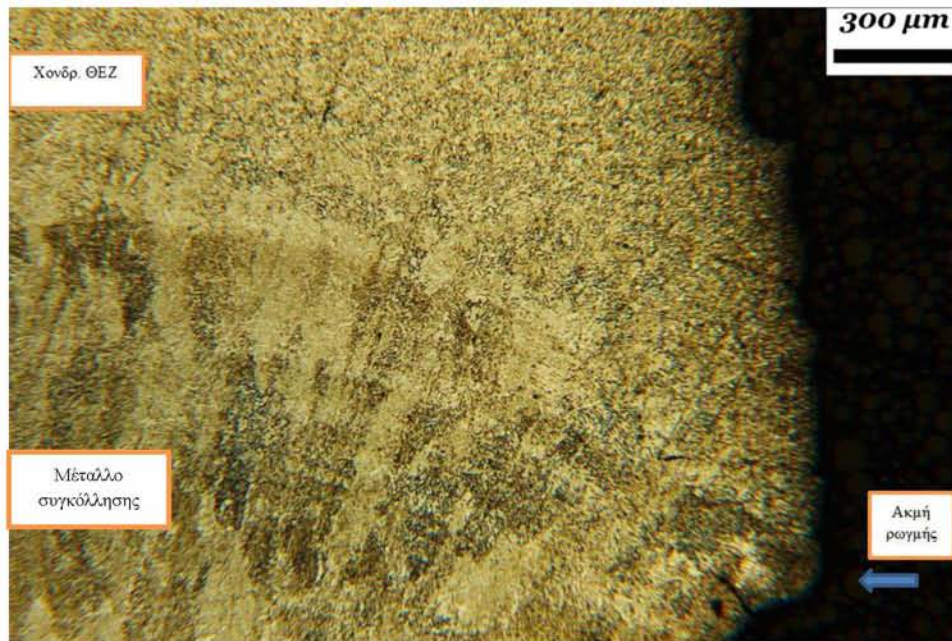


Εικ. 4.39 Μεταλλογραφία στην πλευρά της χορδής στο crown στο X3 (4)

- X3 σημείο (4), στην πλευρά της συγκόλλησης 54 mm από το crown

Αντίθετα με το crown, η έναρξη της επιφάνειας θραύσης βρίσκεται στον πόδα της συγκόλλησης (στα όρια του μετάλλου συγκόλλησης με την χονδρόκοκκη ΘΕΖ), όπως φαίνεται και στην Εικ. 4.40. Ακόμη στην μεταλλογραφία, διακρίνεται και η ύπαρξη μιας επιπλέον ρωγμής, η οποία δημιουργήθηκε στο μέταλλο συγκόλλησης και διαδόθηκε για μικρό μήκος μέσα σε αυτήν.

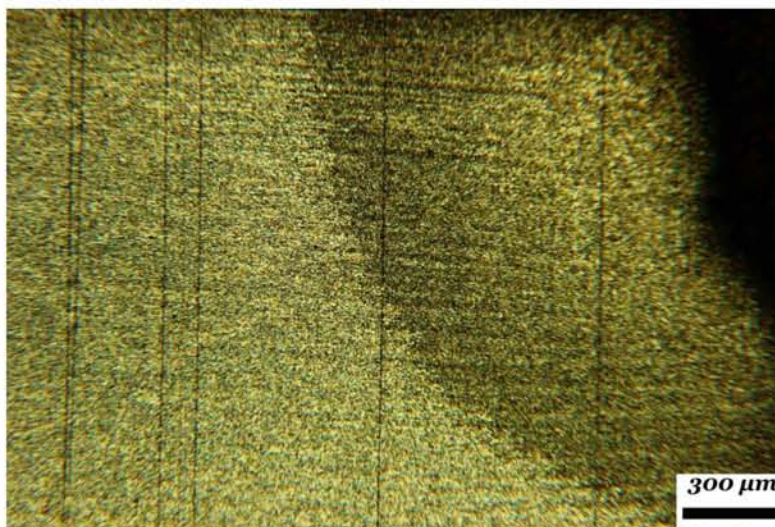




Εικ. 4.40 Μεταλλογραφία στην επιφάνεια θραύσης στην τομή 2 στην πλευρά της συγκόλλησης

- X3 σημείο (4), στην πλευρά της χορδής 54 mm από το crown

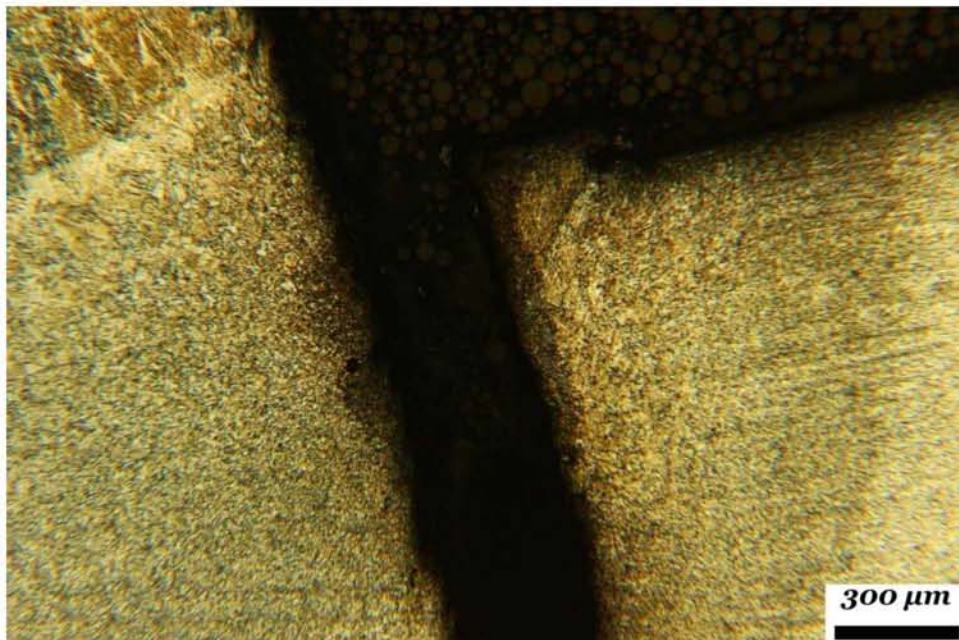
Στην Εικ. 4.41 παρατηρείται η εναπομείναν ΘΕΖ, τόσο η λεπτόκοκκη περιοχή όσο και η χονδρόκοκκη.



Εικ. 4.41 Μεταλλογραφία στην επιφάνεια θραύσης στην τομή 2 στην χορδή

- X3 στο σημείο (1), στο crown

Μετά τον έλεγχο με μαγνητικά σωματίδια και αφού έγιναν οι απαραίτητες κοπές, το δοκίμιο προετοιμάστηκε για μεταλλογραφία. Σύμφωνα με την Εικ. 4.42, φαίνεται ότι η εκκίνηση της ρωγμής συνέβη στο πόδα της συγκόλλησης και κατά την διάρκεια του πειράματος διαδόθηκε μέσα στην ΘΕΖ και μετέπειτα στο βασικό μέταλλο φτάνοντας σε βάθος μέχρι και 60% του πάχους, μετά το πέρας της διαδικασίας [αστοχία σημείου (4)].

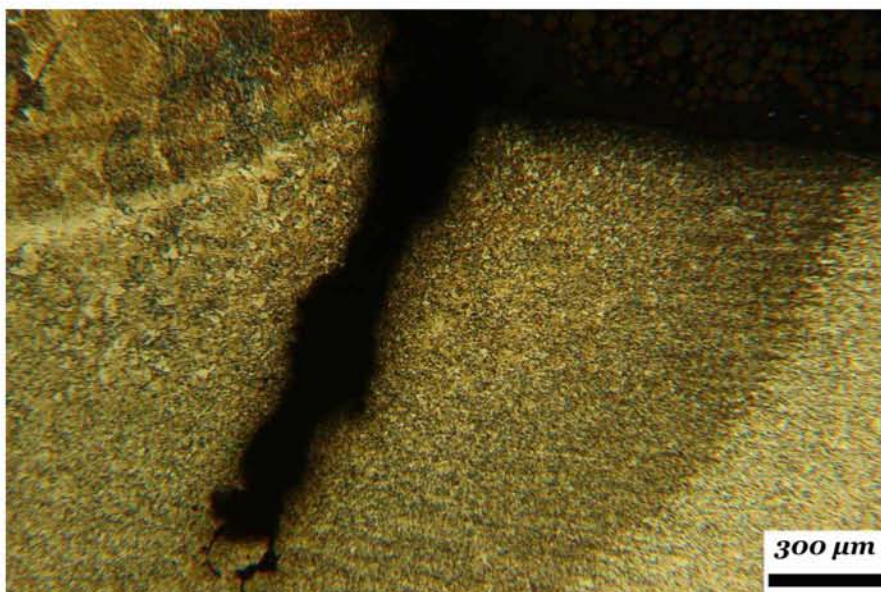


Εικ. 4.42 Μεταλλογραφία στο σημείο έναρξης της ρωγμής και η μετάβαση από το μέταλλο συγκόλλησης μέχρι και το βασικό μέταλλο

- X3 σημείο (1) , 160 mm από το crown

Όπως φαίνεται και από την Εικ. 4.43, η έναρξη της ρωγμής έγινε στο ίδιο σημείο με το crown, αλλά στην περίπτωση αυτή η ρωγμή διαδόθηκε μόνο μέχρι και την λεπτόκοκκη ΘΕΖ.





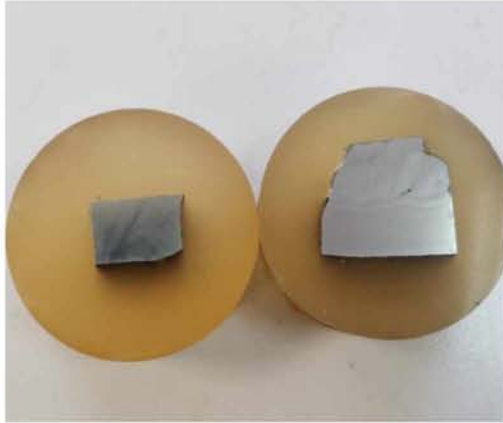
Εικ. 4.43 Μεταλλογραφία της ρωγμής σε απόσταση 160 mm από το crown

#### 4.4.4 Δείγμα X4 ( $u=\pm 47,5$ )

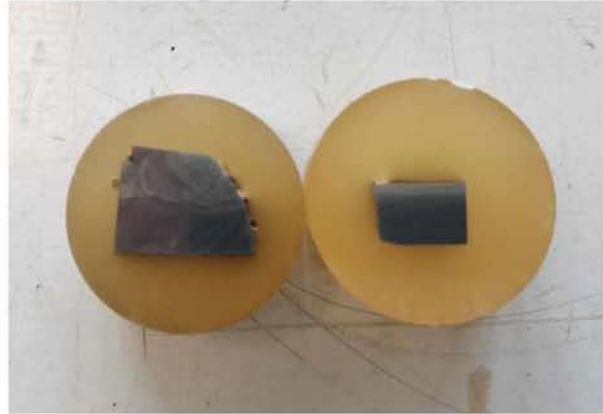
Το X4 αστόχησε στο σημείο (1) και πραγματοποιήθηκαν σε αυτό δύο τομές (στο crown και σε απόσταση 34 mm από αυτό), όπως διακρίνονται στην Εικ. 4.44. Στην Εικ. 4.45 και 4.46 φαίνονται τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μεταλλογραφικό έλεγχο.



Εικ. 4.44 Τομές του X4 στην πλευρά της συγκόλλησης και της χορδής



Εικ. 4.45 Εγκιβωτισμένα δοκίμια στο crown του X4



Εικ. 4.46 Εγκιβωτισμένα δοκίμια σε απόσταση 34 mm από το crown του X4

- X4(1), στο crown από την πλευρά της συγκόλλησης

Στην μεταλλογραφία της Εικ. 4.47 παρατηρείται ότι η εκκίνηση της ρωγμής συνέβη στο μέταλλο συγκόλλησης πολύ κοντά στην χονδρόκοκκη ΘΕΖ.

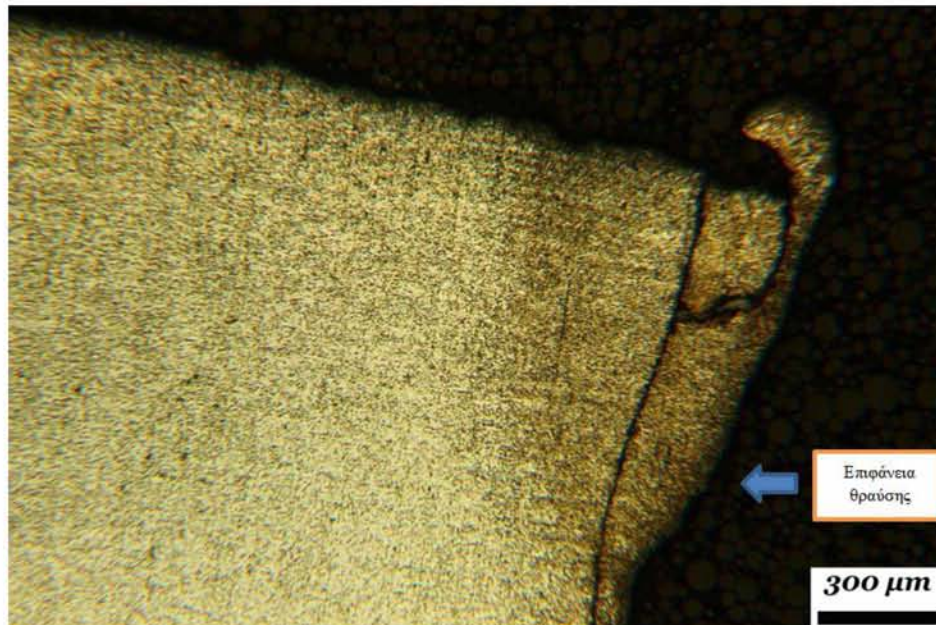
- X4(1), στο crown από την πλευρά της χορδής

Όπως γίνεται φανερό από την Εικ. 4.48, η εκκίνηση της ρωγμής συνέβη στο μέταλλο συγκόλλησης πολύ κοντά όμως με την ΘΕΖ, διαπίστωση που συμφωνεί και με την πλευρά της συγκόλλησης. Ακόμη παρατηρούμε και δεύτερη ρωγμή, η οποία ξεκινάει από την χονδρόκοκκη ΘΕΖ και καθώς διαδίδεται κατά το πάχος ενώνεται με την κύρια ρωγμή.





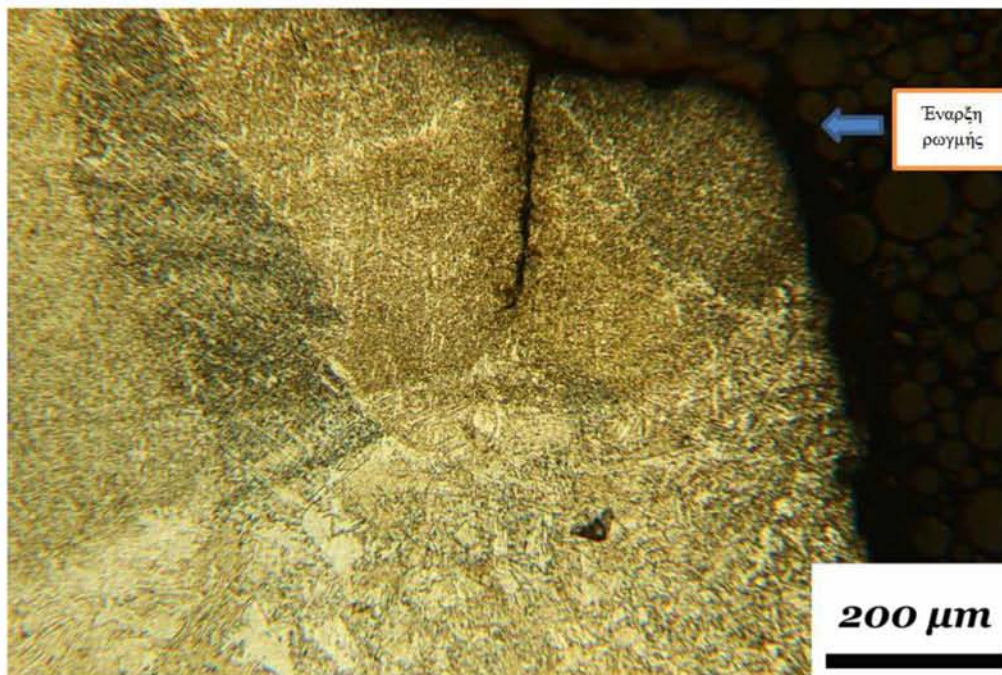
Εικ. 4.47 Μεταλλογραφία επιφάνειας θραύσης στο crown



Εικ. 4.48 Μεταλλογραφία επιφάνειας θραύσης στο crown από την πλευρά της χορδής

- X4(1), στην πλευρά της συγκόλλησης σε απόσταση 34 mm από το crown

Στην Εικ. 4.49, παρατηρήθηκε ότι η κύρια ρωγμή ξεκίνησε από το μέταλλο συγκόλλησης, όπως συνέβη και στο crown, ενώ ακόμη διαπιστώνεται και η ύπαρξη δεύτερης ρωγμής παράλληλη στην επιφάνεια θραύσης, η οποία ξεκινά από το μέταλλο συγκόλλησης με την διάδοση της να ολοκληρώνεται λίγο πριν την ΘΕΖ.

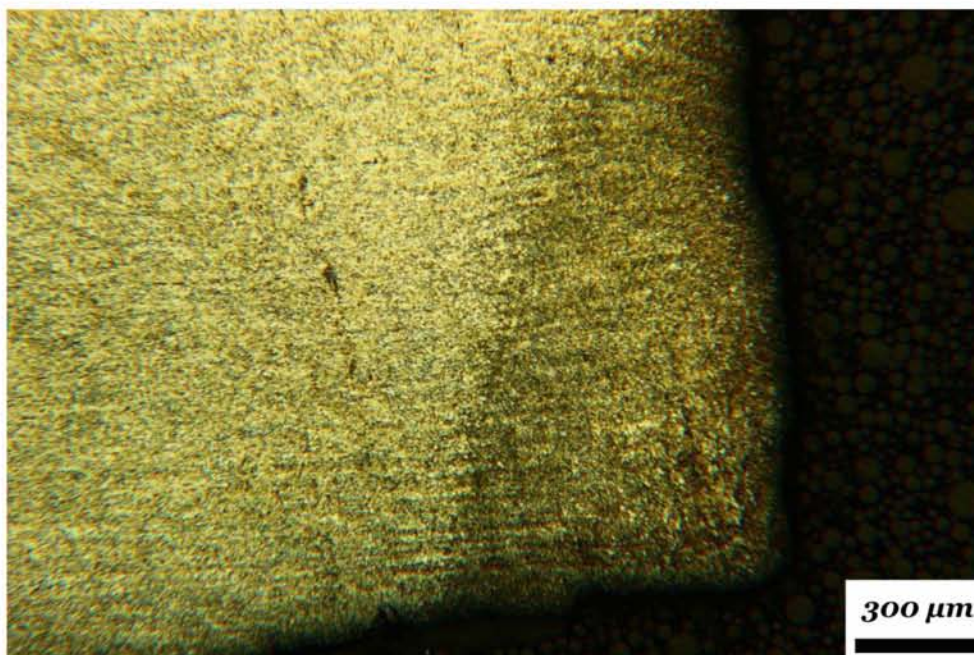


Εικ. 4.49 Μεταλλογραφία στην πλευρά της συγκόλλησης σε απόσταση 34 mm από το crown

- X4(1), στη πλευρά της χορδής σε απόσταση 34mm από το crown

Στην πλευρά της χορδής, σύμφωνα με την Εικ. 4.50, διακρίνεται ένα μικρό τμήμα του μετάλλου συγκόλλησης στην ακμή της επιφάνειας θραύσης και έπειτα τα όρια της ΘΕΖ.



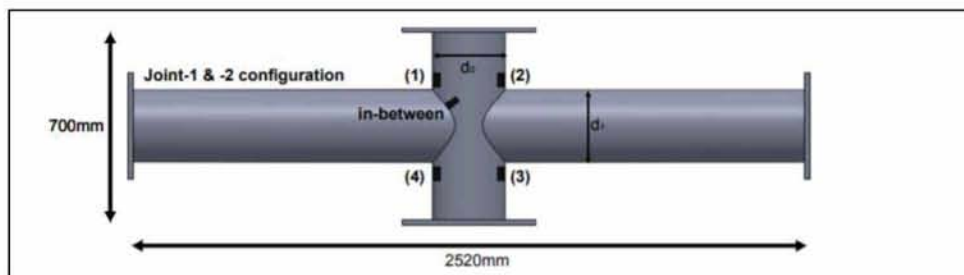


Εικ. 4.50 Μεταλλογραφία στην πλευρά της χορδής σε απόσταση 34 mm από το crown

#### 4.5 Μικροσκληρομετρήσεις

Στα δοκίμια που έγινε ο μεταλλογραφικός έλεγχος, πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρομετρήσεις με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων σε κάθε περιοχή αναφοράς. Κάθε πίνακας αναφέρεται στην επιφάνεια θραύσης στο αντίστοιχο σημείο που πραγματοποιήθηκε η τομή.





Εικ. 4.51 Απεικόνιση των θέσεων crown στα δείγματα (1-4)

Πίνακας 4.1 Μετρήσεις μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου συγκόλλησης σε HV<sub>0.3</sub>

Περιοχή	Μέση τιμή (HV <sub>0.3</sub> )
Μέταλλο συγκόλλησης	244±33
Χονδρόκοκκη ΘΕΖ	209±17
Λεπτόκοκκη ΘΕΖ	206±14
Βασικό μέταλλο	183±20

Πίνακας 4.2 Μέσες τιμές μικροσκληρομετρήσεων σε HV<sub>0.3</sub> (1/2)

Περιοχή	X1(σημ.1) crown (HV <sub>0.3</sub> )	X1(σημ.3) crown(HV <sub>0.3</sub> )	X2(σημ.3) crown (HV <sub>0.3</sub> )	X2(σημ.3) 93mm από crown (HV <sub>0.3</sub> )
Μέταλλο συγκόλλησης	259±58	269±23	261±31	240±19
Χονδρόκοκκη ΘΕΖ	222±21	231±20	228±39	226±19
Λεπτόκοκκη ΘΕΖ	217±36	230±44	228±6	228±24
Βασικό μέταλλο	217±27	223±36	231±21	228±51

Πίνακας 4.2 Μέσες τιμές μικροσκληρομετρήσεων σε HV<sub>0.3</sub> (2/2)

Περιοχή	X3(σημ.4) crown (HV <sub>0.3</sub> )	X3(σημ.4) 54mm από crown (HV <sub>0.3</sub> )	X4(σημ.1) crown (HV <sub>0.3</sub> )	X4(σημ.1) 34mm από crown (HV <sub>0.3</sub> )
Μέταλλο συγκόλλησης	289±49	225±9	238±14	252±31
Χονδρόκοκκη ΘΕΖ	257±27	221±18	233±30	248±29
Λεπτόκοκκη ΘΕΖ	247±9	224±26	260±52	250±36
Βασικό μέταλλο	241±22	225±32	232±31	237±25

Στους πίνακες αποτελεσμάτων διακρίνεται ομοιότητα των μετρήσεων σε κάθε δείγμα. Το βασικό μέταλλο παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα στις μετρήσεις των δειγμάτων, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια θραύσης και το δείγμα είχε υποστεί τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας των έντονων φορτίσεων του πειράματος. Ακόμη, το δείγμα X3 (σημ.4) παρουσίασε υψηλές τιμές κάτι το οποίο απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η μεταλλουργική συμπεριφορά συγκολλητών σωληνωτών ενώσεων (τύπου X), από τον χάλυβα υψηλής αντοχής S420, κάτω από έντονες κυκλικές φορτίσεις. Η εργασία αναφέρεται σε ακραία φόρτιση, που ασκείται σε αντιπροσωπευτικές σωληνωτές συγκολλητές αρθρώσεις υπεράκτιου αιολικού συστήματος που σχεδιάστηκε για εγκατάσταση σε βάθος 55 μέτρων, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ολιγοκυκλική κόπωση. Τέσσερα όμοια μεταξύ τους δείγματα, τόσο ως προς την γεωμετρία όσο και στον τρόπο με τον οποίο συγκολλήθηκαν, υποβλήθηκαν σε έντονη πλήρως αντιστρεπτή κάμψη εντός του επιπέδου (πίνακας 3.3 συνθήκες κόπωσης), που οδήγησε σε αστοχία σε λιγότερους από 100 κύκλους, το οποίο αναφέρεται ως ULCF (Ultra Low-Cycle Fatigue). Μετά το πέρας της δοκιμής κόπωσης, αξιολογήθηκε το σημείο αστοχίας και η επιφάνεια θραύσης με μακροσκοπικό έλεγχο και έπειτα στα σημεία ενδιαφέροντος των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος και μικροσκληρομετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η ρωγμή κατά το πάχος (through-thickness crack) ξεκίνησε σε ένα από τα τέσσερα crown locations, από την πλευρά της χορδής και η συνέχιση της κυκλικής φόρτισης είχε ως αποτέλεσμα, η αρχική αυτή ρωγμή, να διαδοθεί κατά το μήκος του πόδα της συγκόλλησης, συμμετρικά ως προς το crown. Οι επιφάνειες θραύσης των δειγμάτων παρουσίασαν όλκιμη συμπεριφορά.

Τα τέσσερα δείγματα (X1-X4), διέφεραν μεταξύ τους ως προς το σημείο που συνέβη η διαμπερής αστοχία ανεξάρτητα από το μέγεθος της φόρτισης που δέχτηκαν. Το X1 αστόχησε στο σημείο (1) (επάνω chord crown location) αλλά και αντιδιαμετρικά σε αυτό, στο σημείο (3) (κάτω chord crown location). Τα X2 και X3 αστόχησαν σε ένα από τα κάτω chord crown location [σημείο (3) και (4) αντίστοιχα], ενώ το X4 που δέχτηκε την πιο ακραία φόρτιση αστόχησε στο σημείο (1).

Από τον μεταλλογραφικό έλεγχο, στο crown των δειγμάτων, παρατηρήθηκε ότι η εκκίνηση της ρωγμής συνέβη άλλοτε στο βασικό μέταλλο και άλλοτε στο μέταλλο συγκόλλησης



στα όρια όμως με την χονδρόκοκκη ΘΕΖ. Αναλυτικότερα, τα δείγματα X2 και X3 παρουσίασαν όμοια συμπεριφορά, δηλαδή και στα δύο παρατηρήθηκε η έναρξη της ρωγμής να συμβαίνει στο βασικό μέταλλο, σε κοντινή απόσταση από την λεπτόκοκκη ΘΕΖ. Άξιο αναφοράς είναι ακόμη ότι παρατηρήθηκε και μια δευτερεύουσα ρωγμή, παράλληλη στην αρχική, με σημείο εκκίνησης το μέταλλο συγκόλλησης, κοντά στα όρια της χονδρόκοκκης ΘΕΖ, η οποία διαδόθηκε κάθετα στην ΘΕΖ μέχρι λίγο πριν το βασικό μέταλλο. Κοινό χαρακτηριστικό της όμοιας συμπεριφοράς των δειγμάτων X2 και X3 είναι ότι αστόχησαν σε ένα από τα κάτω chord crown locations. Αντίθετα, στα δείγματα X1 και X4 η έναρξη της ρωγμής συνέβη στο μέταλλο συγκόλλησης, πολύ κοντά στα όρια με την χονδρόκοκκη ΘΕΖ, δηλαδή παρουσίασαν όμοιο σημείο εκκίνησης με τις δευτερεύουσες ρωγμές των δειγμάτων X2 και X3.

Συνοψίζοντας , η χρήση του χάλυβα υψηλής-αντοχής S420 σε συγκολλημένες σωληνοειδείς ενώσεις παρουσίασε καλή αντοχή σε έντονη κυκλική φόρτιση και τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα σχετικά με την χρήση του σε υπεράκτιες εφαρμογές, για την μείωση του κόστους της κατασκευής και την αύξηση της αντοχής σε ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων. [1]

## 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](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] ] Δ. Ι. Παντελής, Β. Ι. Παπάζογλου και Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων, ΤΖΙΟΛΑ, 2017
- [6] 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
- [7] 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>
- [8] 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>

- [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. Μπαρμπαρής, « Μεταλλουργική αξιολόγηση συμπεριφοράς σε κόπωση συγκολλητών σωληνωτών συνδέσμων τύπου X», 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 FRP-strengthened 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: Τζιόλα, 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](https://issuu.com/elgaweldingconsumables2013/docs/elga_svetskatalog_2013_lr)
- [18] J. Macmillan και 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



