



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΛΙΓΟΚΥΚΛΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ  
ΑΥΧΕΝΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ**

**Φοιτητής: Μπιμπίσης Αθανάσιος**

**Επιβλέπων καθηγητής: Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

Βόλος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΛΙΓΟΚΥΚΛΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ  
ΑΥΧΕΝΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ**

**Φοιτητής: Μπιμπίσης Αθανάσιος**

**Επιβλέπων καθηγητής: Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

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

Βόλος 2022

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής εργασίας Δρ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την υποστήριξη, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ευχαριστώ ιδιαίτερα την Επ. Καθηγήτρια Δρ. Άννα Ζερβάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου έδωσε σε όλη την διάρκεια της εργασίας καθώς και τον Καθηγητή Δρ. Σπύρο Καραμάνο και την Δρ. Γιαννούλα Χατζοπούλου που μας παρείχαν πρόσβαση στην έρευνά τους καθώς και τα δοκίμια στα οποία στηρίχτηκε η παρούσα εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Οι κυλινδρικές δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών καυσίμων όταν δέχονται ισχυρά σεισμικά φορτία ενδέχεται να παρουσιάσουν ανύψωση της κάτω πλάκας που μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη δομική τους ακεραιότητα. Λόγω της ανύψωσης μπορεί να προκληθεί πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή των συγκολλήσεων ανάμεσα στο κέλυφος της δεξαμενής και την κάτω πλάκα που μπορεί να προκαλέσει κόπωση και θραύση της κατασκευής. Οι δοκιμές ολιγοκυκλικής κόπωσης έγιναν προκειμένου να αξιολογηθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται γύρω απ' την περιοχή της συγκόλλησης. Στόχος της διπλωματικής είναι η ανάλυση των επιφανειών θραύσης που βρίσκονται στην περιοχή της συγκόλλησης ανάμεσα στο κέλυφος της δεξαμενής και τον πυθμένα εξαιτίας της ολιγοκυκλικής κόπωσης της κατασκευής. Στα δοκίμια που υποβλήθηκαν στο τεστ κοπώσεως έγινε οπτικός έλεγχος, έλεγχος με χρήση στερεοσκοπίου, μεταλλογραφική ανάλυση, μικροσκληρομετρήσεις και επιπλέον ορισμένα δοκίμια επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι αυχενικές συγκολλητές συνδέσεις είναι ικανές να αντέξουν αρκετά μεγάλα επίπεδα καταπόνησης για ένα σημαντικό αριθμό κύκλων έως ότου επέλθει η αστοχία.

**Λέξεις κλειδιά:** Συγκόλληση, ολιγοκυκλική κόπωση, ρωγμή, θραύση, αυχενικές συνδέσεις

## Abstract

The present study focuses on the metallurgical evaluation of fillet-welded steel plated L-joints that have been subjected to low cycle fatigue test. Motivation for this study is the need to ensure the structural integrity of unanchored steel tanks under seismic conditions. Unanchored steel tanks under these conditions exhibit repeated uplifting leading to low-cycle fatigue failure of the base plate connection with the tank shell. Eight specimens are manufactured, representing the fillet-welded connection between the base plate and tank shell and tested in low-cycle fatigue experiment. After the experiments metallurgical evaluation was performed at the specimens. Evaluation included study of the fractured surfaces, metallography of the weld and microhardness measurements. In conclusion the results show that the fillet welded connections are capable of sustaining substantial strain levels for a significant amount of cycles until low cycle fatigue failure occurs.

## Περιεχόμενα

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη.....                                        | 4  |
| Abstract.....                                        | 5  |
| Κατάλογος πινάκων.....                               | 8  |
| Κατάλογος εικόνων.....                               | 9  |
| Κατάλογος σχημάτων.....                              | 11 |
| Συντομεύσεις .....                                   | 12 |
| Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή.....                             | 13 |
| Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....           | 15 |
| 2.1 Κατασκευαστικοί χάλυβες .....                    | 15 |
| 2.2 Μεταλλουργία μη κραματωμένων χαλύβων .....       | 18 |
| 2.3 Μέθοδοι συγκολλήσεων.....                        | 19 |
| 2.3.1 Συγκολλήσεις τήξης .....                       | 19 |
| 2.3.2 Συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου .....   | 20 |
| 2.3.3 Συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης .....          | 20 |
| 2.3.4 Συγκολλήσεις FCAW .....                        | 21 |
| 2.4 Κατασκευαστικοί χάλυβες κατά τη συγκόλληση ..... | 22 |
| 2.5 Ασυνέχειες συγκολλήσεων .....                    | 28 |
| 2.6 Αξιολόγηση συγκολλήσεων .....                    | 33 |
| Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία .....             | 34 |
| 3.1 Δοκίμια και πειραματική διάταξη .....            | 34 |
| 3.2 Διαδικασία προετοιμασίας δοκιμών .....           | 37 |
| 3.3 Μεταλλογραφική ανάλυση της συγκόλλησης .....     | 38 |
| Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα .....                       | 40 |
| 4.1 Οπτικός έλεγχος και μεταλλογραφική ανάλυση ..... | 40 |

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Κεφάλαιο 5: Συζήτηση / Συμπεράσματα ..... | 59 |
| Βιβλιογραφία .....                        | 61 |

## Κατάλογος Πινάκων

1. Τυπικές τιμές διαλυτοποίησης για διάφορες μεθόδους συγκολλήσεων
2. Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων (S355-J2 , S275-J2)
3. Χημικές Συστάσεις (S355-J2, S275-J2)
4. Πίνακας συνθηκών των τεστ κοπώσεως
5. Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων
6. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων



## Κατάλογος εικόνων

1. Δενδριτική στερεοποίηση του μετάλλου της συγκόλλησης κατά μήκος των γραμμών ροής της θερμότητας
2. Θερμή ρηγμάτωση στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης
3. Θερμή ρηγμάτωση στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης
4. Παραμορφωμένο δοκίμιο κατά την διάρκεια δοκιμής κόπωσης μετά από ανύψωση ( $\Delta u$ ) ίση με 35mm
5. Μικροδομή του βασικού μετάλλου (BM)
6. Μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης
7. Μικροδομή ΘΕΖ , HAZ1: Ζώνη μεγέθυνσης κόκκων HAZ2: Ζώνη μερικής εκλέπτυνσης κόκκων HAZ3: Ζώνη πλήρης εκλέπτυνσης κόκκων
8. Μακροδομή της συγκόλλησης και οι περιοχές που έγιναν οι μικροσκληρομετρήσεις
9. Έναρξη της ρωγμής του δοκιμίου A2 κατά την διάρκεια του 3<sup>ου</sup> κύκλου
10. Ρωγμή του δοκιμίου A2 κατά την διάρκεια του 20<sup>ου</sup> κύκλου
11. Αστοχία του δοκιμίου A2
12. Μακροδομή του δοκιμίου A2
13. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου( Εγκάρσια διατομή στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής, φαίνεται κ η ύπαρξη δευτερεύουσας ρωγμής παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης)
14. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A2 (Δευτερεύουσα ρωγμή παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης)
15. Μικροδομή του δοκιμίου A2 στο σημείο έναρξης της ρωγμής και εμφάνιση μικρορωγμής στην άνω επιφάνεια
16. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου A3 κατά τον 24<sup>ο</sup> κύκλο
17. Αστοχία του δοκιμίου A3 τον 54<sup>ο</sup> κύκλο
18. Μακροδομή του δοκιμίου A3
19. Δευτερεύουσα ρωγμή του δοκιμίου A3 στην άνω επιφάνεια
20. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A3
21. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου A4 κατά την διάρκεια του 24<sup>ου</sup> κύκλου
22. Αστοχία του δοκιμίου A4 κατά τον 65<sup>ο</sup> κύκλο
23. Μακροδομή του δοκιμίου A4
24. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A4 ( Εμφάνιση δευτερευουσών ρωγμών)
25. Μακροδομή του δοκιμίου A5
26. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A5
27. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου B1 τον 33<sup>ο</sup> κύκλο

- 28. Αστοχία του δοκιμίου B1 τον 96<sup>ο</sup> κύκλο
- 29. Μικροδομή της άνω πλευράς του δοκιμίου B1 που δείχνει την ύπαρξη δευτερεύουσας μικρορωγμής
- 30. Μικροδομή της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου B1 που δείχνει δευτερεύουσες μικρορωγμές
- 31. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B2
- 32. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου B2
- 33. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου B3 τον 22<sup>ο</sup> κύκλο
- 34. Τελική αστοχία του δοκιμίου B3 κατά την διάρκεια του 92<sup>ου</sup> κύκλου
- 35. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B3
- 36. Μικροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B3
- 37. Ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου B3
- 38. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B5
- 39. Ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου B5

## Κατάλογος σχημάτων

1. Σχηματική διάταξη του μηχανισμού ανύψωσης της δεξαμενής
2. Παράδειγμα ονομασίας για χάλυβα S235J2+N σύμφωνα με το EN 10025-2
3. Λουτρό συγκόλλησης FCAW
4. Ζώνες συγκόλλησης
5. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)
6. Θερμικοί κύκλοι σε μία συγκόλληση πολλαπλών πάσων
7. Γραμμές ροής θερμότητας
8. Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού της διαλυτοποίησης
9. Μοντέλο σχηματισμού των ρηγματώσεων στερεοποίησης στο μέταλλο συγκόλλησης
10. Σχηματική διάταξη δοκιμίου κατά την τοποθέτησή του στη μηχανή κόπωσης

## Συντομεύσεις

1. ΘΕΖ = Θερμικά επηρεασμένη ζώνη
2. HAZ = Heat affected zone
3. ΒΜ = Βασικό μέταλλο
4. ΜΣ = Μέταλλο συγκόλλησης
5. SEM = Scanning electro microscope
6. WM = Weld metal
7. ΕΘ = Επιφάνεια θραύσης
8. ΚΕ = Κάτω επιφάνεια
9. ΑΕ = Άνω επιφάνεια

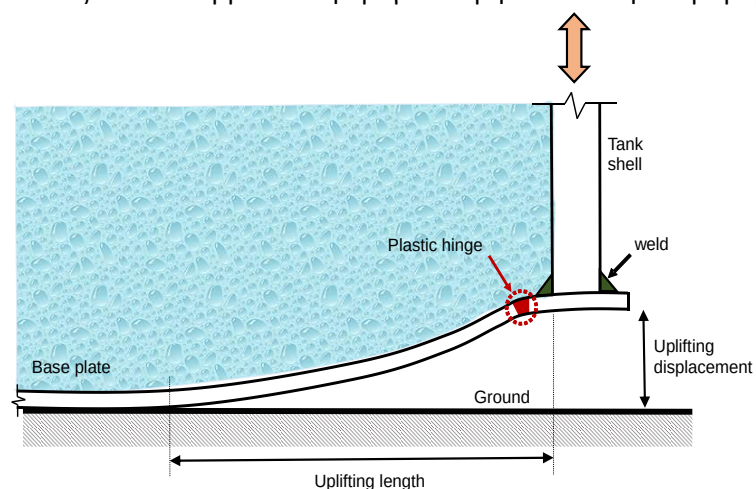
## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η αυχενική σύνδεση ή σύνδεση τύπου ταυ (fillet weld or tee joint) αποτελεί μία αποτελεσματική και γρήγορη μέθοδο συγκόλλησης χαλύβδινων πλακών που χρησιμοποιείται ευρέως σε κατασκευές όπως κτήρια και γέφυρες αλλά και στον τομέα της ναυπηγικής. Οι συγκολλήσεις αποτελούν ίσως το κρίσιμότερο στοιχείο μιας κατασκευής από πλευρά δομικής ακεραιότητας καθώς προσθέτει αρκετά επιβαρυντικά στοιχεία σε αυτήν. Αυτά είναι η μεταβολή της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων στο μέταλλο συγκόλλησης στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη, οι παραμένουσες τάσεις, οι παραμορφώσεις, η συγκέντρωση τάσεων λόγω μεταβολής της τοπικής γεωμετρίας και οι ασυνέχειες. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και τα επιβαλλόμενα φορτία τα παραπάνω στοιχεία είναι ικανά να προκαλέσουν αστοχία της κατασκευής.

Ο πιο συνήθης μηχανισμός αστοχίας στις συγκολλήσεις είναι η κόπωση. Η εισαγωγή μιας συγκόλλησης σε ένα φέρον στοιχείο μιας κατασκευής μειώνει την αντοχή σε κόπωση. Αυτό έχει ως συνέπεια, τα φορτία σχεδιασμού (design stresses) σε συγκολλητές κατασκευές που υφίστανται επαναλαμβανόμενη φόρτιση να περιορίζονται από την αντοχή των συγκολλήσεων στη κόπωση. Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά στον τύπο της φόρτισης, η οποία είναι κυκλική, με το υλικό να υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η “βλάβη” που προκαλείται στο υλικό. Η βλάβη μπορεί να αντιστοιχεί σε τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, καθώς και σχηματισμό και διάδοση μια κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική, προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως από την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Η κόπωση υποδιαιρείται σε δύο περιοχές, την πολυκυκλική (High Cycle Fatigue) και την ολιγοκυκλική κόπωση (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 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.[2] Οι περισσότερες αστοχίες κόπωσης έχουν καταγραφεί στο φάσμα της πολυκυκλικής κόπωσης και συσχετίζονται με έναν μεγάλο αριθμό κύκλων [3]. Παρόλα αυτά κάτω από συνθήκες ισχυρών φορτίσεων μπορεί να προκληθούν μεγάλες ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις προκαλώντας ολιγοκυκλική κόπωση έπειτα από έναν σχετικά μικρό αριθμό κύκλων.

Οι κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης υγρών χρησιμοποιούνται σε συστήματα διανομής νερού, διυλιστήρια καθώς και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για την αποθήκευση πετρελαίου ή και άλλων πετροχημικών υγρών. Όταν μια δεξαμενή υποβάλλεται σε ισχυρά σεισμικά φορτία ενδέχεται να παρουσιάσει επαναλαμβανόμενη ανύψωση της κάτω πλάκας εξαιτίας του ταλαντευόμενου υγρού περιεχομένου και της σχετικής υδροδυναμικής πίεσης στα τοιχώματα της δεξαμενής. Η πλάκα της βάσης είναι σημαντικά λεπτότερη από το κέλυφος της δεξαμενής και η επαναλαμβανόμενη ανύψωση μπορεί να οδηγήσει σε ολιγοκυκλική κόπωση. [4][5] Σύμφωνα με προϋπάρχουσες δημοσιεύσεις [6-10] η συγκολλητή σύνδεση μεταξύ του κελύφους και της πλάκας βάσης αποτελεί την πιο κρίσιμη περιοχή

καθώς εκεί συμβαίνει η μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση όπως φαίνεται στο σχήμα 1.



*Σχήμα 1. Σχηματική διάταξη του μηχανισμού ανύψωσης της δεξαμενής*

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς συγκολλητών αυχενικών συνδέσμων που αντιπροσωπεύουν την σύνδεση του κελύφους με την πλάκα βάσης δεξαμενής υγρών καυσίμων σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης. Τα υλικά και οι διαστάσεις των δοκιμών επιλέχθηκαν από μια τυπική δεξαμενή σχεδιασμένη για σεισμογενή περιοχή σύμφωνα με τα το πρότυπο EN14015 [21]. Το υλικό κατασκευής του κελύφους είναι χάλυβας S355J2 ενώ η πλάκα βάσης είναι χάλυβας S275J2. Η αυχενική συγκόλληση της πλάκας βάσης με το κέλυφος έγινε με την μέθοδο συγκόλλησης τόξου με παραγεμισμένα σωληνοειδή ηλεκτρόδια (Flux Cored Arc Welding – FCAW). Τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η μεταλλουργική αξιολόγηση των επιφανειών θραύσης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια. Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή και ο στόχος της εργασίας, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που αναφέρεται στους κατασκευαστικούς χάλυβες, τις μεθόδους των συγκολλήσεων, τα μεταλλουργικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την συγκόλληση καθώς και οι ασυνέχειες των συγκολλήσεων. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία του πειράματος κόπωσης και η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμών προκειμένου να γίνει η μεταλλογραφική ανάλυση. Έπειτα στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο οπτικός έλεγχος, η μεταλλογραφική ανάλυση των επιφανειών θραύσης, τα αποτελέσματα και ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Οι χάλυβες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με [11]:

1. Τη χημική τους σύσταση (ανθρακούχοι, χαμηλά κεκραμένοι, υψηλά κεκραμένοι, ανοξείδωτοι).
2. Τη μέθοδο παραγωγής τους (ανοικτής καρδιάς, εμφύσησης οξυγόνου, ηλεκτρικής καμίνου).
3. Τη μέθοδο διαμόρφωσης του τελικού προϊόντος (ψυχρής εξέλασης, θερμής εξέλασης).
4. Το σχήμα / μορφή του τελικού προϊόντος (δοκοί, σύρματα, λαμαρίνες, φύλλα, σωλήνες, μορφοσίδηροι κατασκευών).
5. Την πρακτική αποξείδωσης κατά τη χαλυβοποίηση (αφησυχασμένοι, ημι-αφησυχασμένοι, ημι-αναβράζοντες, αναβράζοντες).
6. Τη μικροδομή (φερριτικοί, περλιτικοί, μαρτενσιτικοί, γήρανσης κ.λπ).
7. Τα απαιτούμενα επίπεδα μηχανικής αντοχής, όπως προδιαγράφονται από τα ASTM και τις λοιπές διεθνείς προδιαγραφές.
8. Τη θερμική επεξεργασία την οποία υπέστησαν (ανοπτημένοι, βαφής και επαναφοράς, 2θερμομηχανικής επεξεργασίας κ.λπ).

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται σε:

1. Απλούς ανθρακούχους χάλυβες:
  - Χαμηλού άνθρακα  $< 0.2\%$ , με φερριτική μικροδομή
  - Μέσου άνθρακα  $0.2 - 0.5\%$ , με φερριτική - περλιτική μικροδομή
  - Υψηλού άνθρακα  $> 0.5\%$ , με φερριτική ή μαρτενσιτική μικροδομή
2. Ελαφρά κεκραμένους  $< 8\%$  στοιχεία κραμάτωσης, με μικροδομή:
  - Φερριτική – Περλιτική
  - Περλιτική
  - Επαναφοράς
  - Μπαινιτική
3. Υψηλά κεκράμενοι  $> 8\%$  στοιχεία κραμάτωσης:

- Ανθρακούχοι, με μικροδομή:
  - Φερριτική
  - Μαρτενσιτική
  - Ωστενιτική
  - Γήρανσης
  - Ωστενιτική – Φερριτική
  - Duplex
- Αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, με μικροδομή:
  - Φερριτική
  - Ωστενιτική
  - Ωστενιτική – Φερριτική
- Αντιτριβής, με ωστενιτική μικροδομή

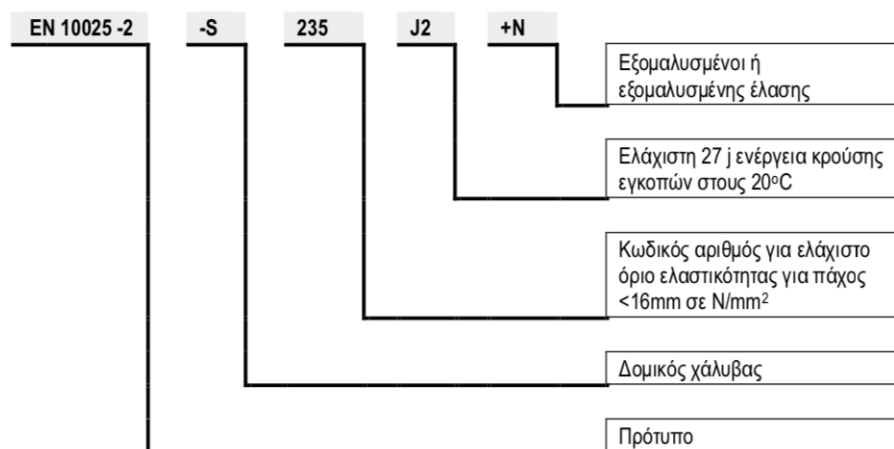
#### Κατηγοριοποίηση

Η ονομασία των χαλύβων στο EN 10025-2 αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Αριθμός Ευρωπαϊκού Προτύπου,
- χαρακτηριστικό γράμμα S ή E,
- ο χαρακτήρας για την καθορισμένη ελάχιστη τιμή του ορίου ελαστικότητας για τα πάχη < 16mm σε N/mm<sup>2</sup>,
- όταν υποδεικνύεται το χαρακτηριστικό για την ομάδα ποιότητας σύμφωνα με τις συγκεκριμένες τιμές ενέργειας κρούσης,
- πιθανώς το χαρακτηριστικό γράμμα C για την καταλληλότητα για ειδικές περιπτώσεις εφαρμογής,
- την πληροφορία “+N” ή “+AR” αν τα προϊόντα μπορούν να παραγγελθούν με κατεργασία “+N” ή “+AR”.

Στο σχήμα 2 που ακολουθεί παρουσιάζεται παράδειγμα ονομασίας για χάλυβα S235J2+N σύμφωνα με το πρότυπο EN 10025-2





Σχήμα 2. Παράδειγμα ονομασίας για χάλυβα S235J2+N σύμφωνα με το EN 10025-2

## 2.2 Μεταλλουργία μη κραματωμένων χαλύβων

Οι μη κραματωμένοι κατασκευαστικοί χάλυβες περιέχουν ως κύρια κραματικά στοιχεία τον άνθρακα σε ποσοστό μέχρι 0.25% περίπου και μαγγάνιο έως 1.65%.

Ο άνθρακας, είναι ένα κραματικό στοιχείο παρεμβολής που αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό ενώ ταυτόχρονα με την αύξηση της συγκέντρωσης του μειώνει σημαντικά την ολκιμότητα και την δυσθραυστότητα των χαλύβων. Το μαγγάνιο αντιθέτως είναι ένα κραματικό στοιχείο αντικατάστασης το οποίο είναι επίσης πολύ χρήσιμο για την κατασκευή των χαλύβων, εξαιτίας των αποξειδωτικών και αποθειωτικών ιδιοτήτων του. Αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό και μειώνει την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό από τον άνθρακα.

Ο άνθρακας συνήθως θεωρείται το πιο σημαντικό στοιχείο για την σκληρότητα και την αντοχή των χαλύβων. Ακόμα και με απουσία άλλων κραματικών στοιχείων η παρουσία άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή τοπική σκληρότητα. Εντούτοις και τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία συνεισφέρουν στην συνολική ικανότητα ενός χάλυβα για σκλήρυνση. Η επιρροή αυτή ποσοτικοποιείται από τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα ενός χάλυβα (CEV).

Είναι σημαντικό ο υπολογισμός του CEV να γίνεται με την πραγματική χημική σύσταση του χάλυβα και όχι με τις μέγιστες τιμές που δίνονται στα πρότυπα των υλικών, διαφορετικά μπορεί να καταλήξουμε σε μη ρεαλιστικά υψηλές τιμές.[12]

## 2.3 Μέθοδοι συγκολλήσεων

Οι μέθοδοι συγκολλήσεων χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες οι οποίες θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο.[2]

- Συγκολλήσεις τήξης
- Συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου
- Συγκολλήσεις στερεάς κατάταξης

### 2.3.1 Συγκολλήσεις τήξης

Για να πραγματοποιηθεί σωστά μια συγκόλληση τήξης είναι απαραίτητο να τηρηθούν δύο συνθήκες. Πρώτη και σημαντικότερη είναι να δοθεί ικανό ποσό θερμότητας προκειμένου να γίνει δυνατή η συγκόλληση των μετάλλων με σύντηξη. Η απαιτούμενη θερμότητα μπορεί να παραχθεί με διαφορετικούς τρόπους π.χ. με χημικό τρόπο (εξωθερμική χημική αντίδραση), με ηλεκτρικό τρόπο (ηλεκτρικό τόξο), με ακτινοβολία υψηλής πυκνότητας ενέργειας ( Laser). Η δεύτερη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να έχουμε μια ικανοποιητική σύνδεση είναι η απουσία ακαθαρσιών και οξειδώσεων από τις μεταλλικές επιφάνειες. Επειδή ο καθαρισμός της επιφάνειας δεν επαρκεί είναι απαραίτητο να απομακρύνονται οι ακαθαρσίες από την ίδια την μέθοδο συγκόλλησης. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση της χημικής δράσης της σκόνης (Flux) ή των εκτοξεύσεων (spattering) του ηλεκτρικού τόξου. Προκειμένου να αποφευχθεί η επαναδημιουργία των ακαθαρσιών χρησιμοποιούνται αδρανή αέρια ή εξαέρωση της επένδυσης των ηλεκτροδίων με τα οποία προστατεύεται το τηγμένο μέταλλο. Επίσης γίνεται να πραγματοποιηθεί συγκόλληση και σε κενό αέρα. Οι συγκολλήσεις τήξης κατηγοριοποιούνται σε[2]:

#### 1) ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΗΞΗΣ ( CHEMICAL FUSION WELDING PROCESSES)

- a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΟ ΟΞΥΓΟΝΟ Ή ΟΞΥΓΟΝΟΚΟΛΛΗΣΗ (OXY-FUEL GAS WELDING)
- b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΙΤΗ (THERMIT WELDING)

#### 2) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΟΞΟΥ (ELECTRIC ARC WELDING)

- a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΒΟΛΦΡΑΜΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΕΡΙΟΥ (GAS TUNGSTEN ARC WELDING , GTAW)
- b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΤΗΚΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΕΡΙΟΥ (GAS METAL ARC WELDING, GMAW)
- c) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΣΩΛΗΝΩΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ (FLUX CORED ARC WELDING, FCAW)
- d) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΕΠΝΔΥΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ (SHILDED METAL ARC WELDING, SMAW)
- e) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΒΥΘΙΣΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ (SUBMERGED ARC WELDING, SAW)
- f) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΣΚΩΡΙΩΣΗΣ (ELECTROSLAG WELDING, ESW)
- g) ΗΛΕΚΤΡΟΑΕΡΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ (ELECTROGAS WELDING, EGW)
- h) ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ (UNDERWATER WELDING, UWW)
- i) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΤΟΞΟ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (PLASMA ARC WELDING, PAW)

#### 3) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (RESISTANCE WELDING PROCESSES)

- a) ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (RESISTANCE SPOT WELDING , RSW)
- b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΑΦΗΣ (RESISTANCE SEAM WELDING, RSEW)
- c) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΕΞΟΧΗ (RESISTANCE PROJECTION WELDI

- d) NG, RPW)
- e) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΟΥΣ (FLASH WELDING, FW)
- f) ΚΡΟΥΣΤΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ (PERCUSSION WELDING, PW)
- g) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΠΟΥΖΟΝΙΩΝ (STUD WELDING , SW)

#### **4) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ (HIGH-INTENSITY RADIANT ENERGY)**

- a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ LASER (HIGH-ENERGY-DENSITY LASER BEAM WELDING PROCESSES, LBW)
- b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (HIGH-ENERGY-DENSITY ELECTRON BEAM WELDING PROCESSES, EBW)

### **2.3.2 Συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούν ένα συγκολλητικό υλικό πλήρωσης (brazing filler metal), το οποίο καλύπτει το διάκενο μεταξύ των προς συγκόλληση υλικών. Το συγκολλητικό μέταλλο πλήρωσης τήκεται και διανέμεται στο διάκενο μεταξύ των επιφανειών των μετάλλων με τα οποία δημιουργεί ένα μεταλλουργικό δεσμό εξαιτίας του φαινομένου της διάχυσης και της τριχοειδής έλξης. Οι συγκολλήσεις με χρήση συνδετικού μέσου διακρίνονται σε[2]:

- 1) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Ή ΣΚΛΗΡΕΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ (BRAZING)
- 2) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Ή ΜΑΛΑΚΕΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ (SOLDERING)

### **2.3.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

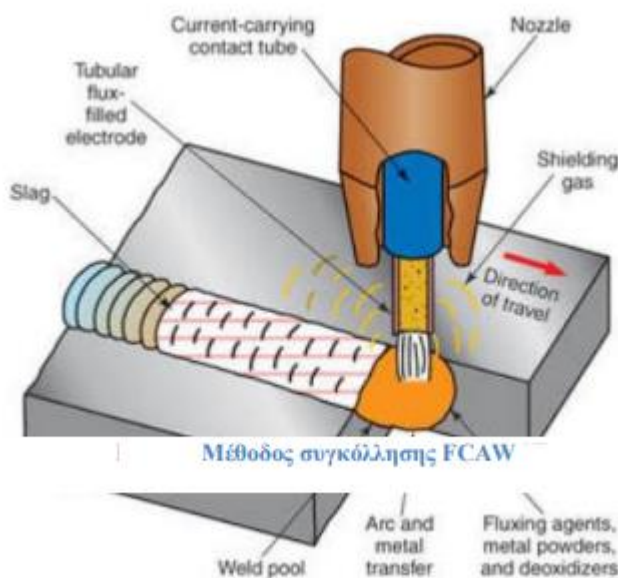
Η συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης εξασφαλίζουν την κρυσταλλική-μεταλλουργική σύνδεση των προς συγκόλληση μετάλλων χωρίς τήξη αλλά μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Η πλαστική παραμόρφωση επιτυγχάνεται με άσκηση πίεσης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου τήξης των προς συγκόλληση μετάλλων. Στις συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης δεν χρησιμοποιείται πληρωτικό υλικό που να τήκεται. Βασικό πλεονέκτημα των συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης είναι ότι μπορούν να ενώσουν ανόμοια υλικά καθώς με την απουσία της τήξης συνεισφέρετε χαμηλό ποσό θερμότητας που διαταράζει ελάχιστα την μικροδομή των προς συγκόλληση υλικών. Οι συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης διακρίνονται σε [2]:

- 1) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (COLD WELDING WITH PLASTIC DEFORMATION,CW)
  - a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ (COLD PRESSURE WELDING,PSW)
  - b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΕΛΑΣΗ (ROLL WELDING,RW)
  - c) ΕΚΡΗΚΤΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ (EXPLOSION WELDING,EXW)
- 2) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ ΜΕ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (HOT WELDING WITH PLASTIC DEFORMATION,HW)
  - a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ (HOT PRESSURE WELDING,HPW)
  - b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΗ ΣΦΥΡΗΛΑΣΙΑ (HOT FORGING , HF)
  - c) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (FRICTION WELDING,FRW)

- d) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (UPSET WELDING, UW)
- 3) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΕΝ ΘΕΡΜΩ ΧΩΡΙΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (HOT WELDING WITHOUT PLASTIC DEFORMATION)
  - a) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ (DIFFUSION WELDING, DFW)
  - b) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ (INDUCTION WELDING, IW)
  - c) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΥΧΟΥΣ (ULTRASONIC WELDING, USW)

### 2.3.4 Συγκολλήσεις FCAW

Η συγκόλληση τόξου με σωληνωτά ηλεκτρόδια ή συγκόλληση τόξου με παραγεμισμένα σωληνοειδή ηλεκτρόδια (FCAW) θεωρείται μια παραλλαγή της συγκόλλησης τόξου με τηκόμενα ηλεκτρόδια και προστασία αερίου (GMAW). Η διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στα ηλεκτρόδια. Στην εν λόγω μέθοδο το σωληνωτό ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας, ο οποίος περιέχει στον πυρήνα τη σκόνη συλλιπάσματος (flux). Η μέθοδος FCAW μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ή χωρίς προσθήκη αερίου προστασίας. Όταν γίνεται χωρίς προσθήκη αερίου προστασίας η σκόνη συλλιπάσματος παρέχει αυτοπροστασία είτε προκαλώντας έκλυση αερίου προστασίας από την αποσύνθεση των στοιχείων της είτε δημιουργώντας ένα στρώμα σκουριάς πάνω από το λουτρό και με αυτόν τον τρόπο το προστατεύει από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το λουτρό συγκόλλησης της FCAW.[2]

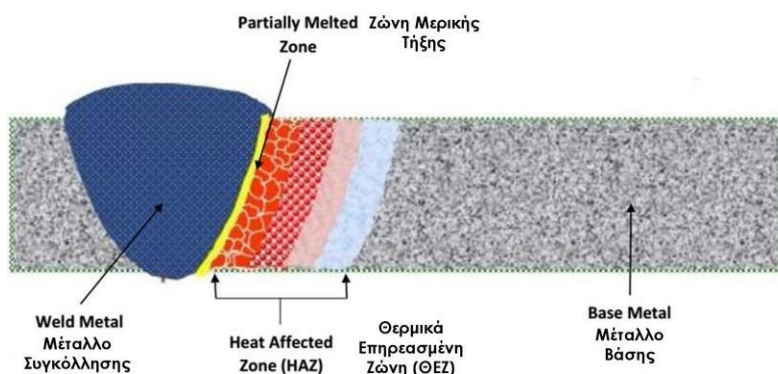


Σχήμα 3. Λουτρό συγκόλλησης FCAW

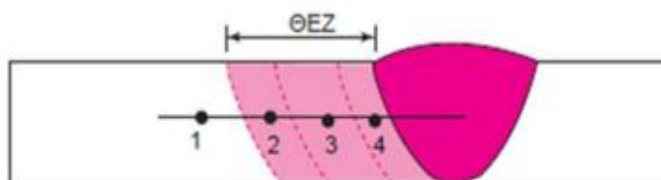
## 2.4 Κατασκευαστικοί χάλυβες κατά τη συγκόλληση

### Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)

Μέσω μακρογραφικής παρατήρησης, μία ραφή συγκόλλησης τήξης χαρακτηρίζεται από τέσσερις ζώνες (σχήμα 4): το μέταλλο συγκόλλησης (ΜΣ) (weld metal-WM), τη ζώνη μερικής τήξης (ZMT)(partially melted zone-PMZ), την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)(heat affected zone-HAZ) και το βασικό μέταλλο (BM)(base metal). Στη ΘΕΖ αναπτύσσονται θερμοκρασίες αρκετά υψηλές, ώστε να προκαλέσουν αλλαγές μικροδομής στερεάς κατάστασης, αλλά ταυτόχρονα αρκετά χαμηλές, ώστε να μην προκαλέσουν τήξη. Κάθε σημείο της ΘΕΖ, κατά τη συγκόλληση βιώνει διαφορετικά το θερμικό κύκλο, ο οποίος χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη θερμοκρασία και το ρυθμό ψύξης. Πιο συγκεκριμένα η ΘΕΖ διαιρείται σε 3 υποκατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, 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 μία λεπτόκοκκη περιοχή. Οι μεταβολές αυτές στην μικροδομή επιφέρουν εξασθένηση και ψαθυροποίηση του υλικού και συνεπώς μείωση της αντοχής τοπικά.[2]



Σχήμα 4. Ζώνες συγκόλλησης



- 1: Βασικό Μέταλλο
- 2: Μερική εκλέπτυνση κόκκων
- 3: Πλήρης εκλέπτυνση κόκκων
- 4: Μεγέθυνση κόκκων

Σχήμα 5. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ)

### Θερμικός κύκλος και δομή μιας συγκόλλησης

Η συγκόλληση με τήξη αποτελεί ουσιαστικά μία τοπική διαδικασία χύτευσης. Σε αντιστοιχία τα μέρη που θα συγκολληθούν υφίστανται μία τοπική θερμική κατεργασία ανάλογα με την απόσταση τους από το σημείο της τήξης. Έτσι, οι ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού καθώς και κατάσταση του υλικού στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη θα είναι περισσότερο ή λιγότερο τροποποιημένες. [12]

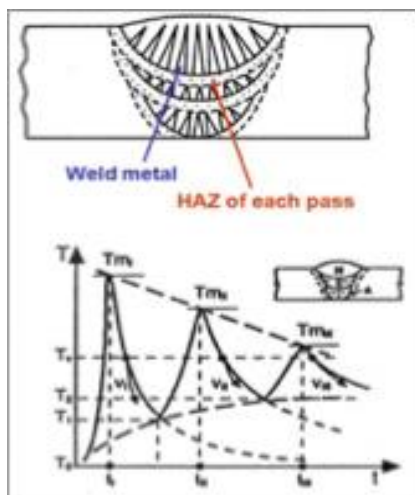
Το μέγεθος των αλλαγών στην Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) εξαρτάται από την ποσότητα της θερμότητας που δίνεται από την μέθοδο συγκόλλησης στην περιοχή αυτή. Μέτρο της παροχής θερμότητας στην περιοχή της συγκόλλησης είναι ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας (Heat Input rate) το οποίο ορίζεται ως:

$$h = \frac{\eta VI}{u}$$

Όπου  $\eta$  είναι ο βαθμός απόδοσης του τόξου, ο οποίος εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης,  $u$  είναι η ταχύτητα του τόξου και  $VI$  η ηλεκτρική ισχύς του τόξου. Ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας εκφράζεται σε J/m.[2]

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ψύξης στην ΘΕΖ και επομένως και την σκληρότητα των φάσεων που δημιουργούνται σε αυτή κατά την συγκόλληση, είναι το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων και η θερμοκρασία προθέρμανσης. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη περιλαμβάνει εκείνες τις περιοχές που επηρεάζονται από την θερμότητα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της ΘΕΖ μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικό ανάλογα την εφαρμογή και τον τύπο των χαλύβων προς συγκόλληση.

Παραδείγματος χάρη, κατά την συγκόλληση ενός μη κραματωμένου ανθρακούχου χάλυβα, οποιαδήποτε περιοχή με θερμοκρασία κάτω των 700°C μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από την συγκόλληση. Αντίθετα κατά την συγκόλληση ενός χάλυβα υψηλής αντοχής που έχει υποστεί σκλήρυνση και επαναφορά στους 315 °C κάθε περιοχή που υπερβαίνει αυτή την θερμοκρασία θεωρείται μέρος της ΘΕΖ. Κατά την διάρκεια μίας συγκόλλησης πολλαπλών πάσων, κάθε καινούριο πάσο δημιουργεί ένα μηχανισμό ανόπτησης στα προηγούμενα πάσα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

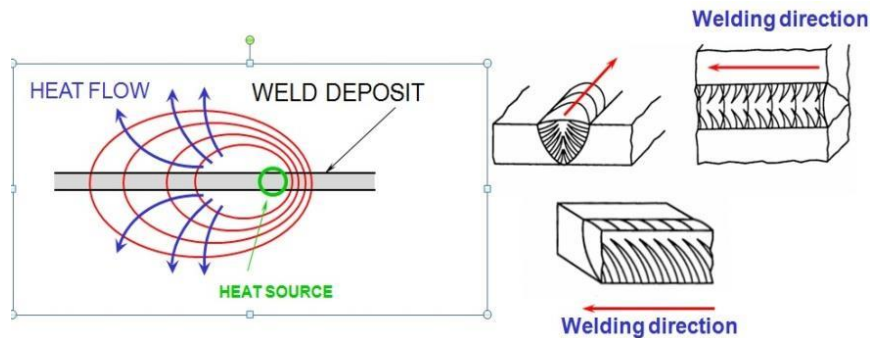


Σχήμα 6. Θερμική κύκλοι σε μία συγκόλληση πολλαπλών πάσων

#### Μέταλλο Συγκόλλησης

Το μέταλλο συγκόλλησης τήκεται και μετά από μία πιθανή αλλαγή της σύστασης του από την προσθήκη κραματικών στοιχείων από το υλικό του ηλεκτροδίου και το μέταλλο βάσης, στην συνέχεια στερεοποιείται. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μία μικρογραφία της χύτευσης των μετάλλων με την διαφορά ότι ο όγκος του στερεοποιούμενου μετάλλου είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο όγκο στα χυτά και ο χρόνος στερεοποίησης πολύ πιο σύντομος. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας χύτευσης είναι η στερεοποίηση του μετάλλου της συγκόλλησης με μία δονδριτική δομή της οποίας οι δονδρίτες ακολουθούν τις γραμμές ροής της θερμότητας (heat flow lines) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. και εικόνα 1. [12]





Σχήμα 7. Γραμμές ροής θερμότητας



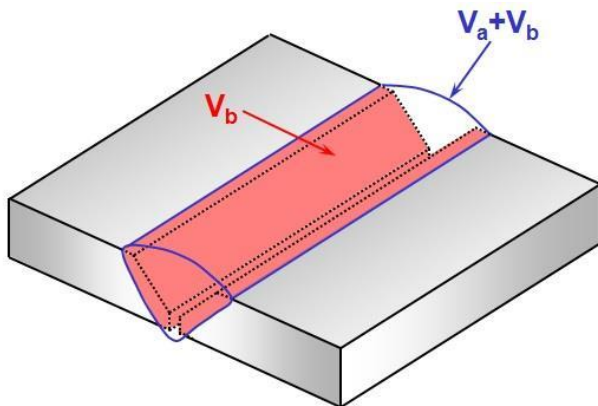
Εικόνα 1. Δενδριτική στερεοποίηση του μετάλλου συγκόλλησης κατά μήκος των γραμμών ροής της θερμότητας

Ένα φαινόμενο που επηρεάζει την χημική σύσταση και την τελική μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης, είναι το φαινόμενο της διαλυτοποίησης (dilution). Με τον όρο διαλυτοποίηση εννοούμε την αλλαγή της σύστασης του μετάλλου προσθήκης της συγκόλλησης, λόγω της ανάμιξης του με το βασικό μέταλλο των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Το φαινόμενο της διαλυτοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις περιπτώσεις όπου το μέταλλο προσθήκης που χρησιμοποιείται στην συγκόλληση είναι διαφορετικό από αυτό του μετάλλου βάσης.

Η διαλυτοποίηση  $D$  ορίζεται ως το βάρος ή ο όγκος του βασικού μετάλλου που έχει λιώσει προς το συνολικό βάρος ή τον όγκο του μετάλλου της συγκόλλησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.[12]

$$V = \frac{V_a}{V_a + V_b}$$



Σχήμα 8. Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού της διαλυτοποίησης

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές διαλυτοποίησης για διάφορες μεθόδους συγκολλήσεων

| ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ | ΔΙΑΛΥΤΟΠΟΙΗΣΗ                                         |
|---------------------|-------------------------------------------------------|
| SMAW                | πάσο στην ρίζα D = 30%, πάσα γεμίσματος D = 10%       |
| TIG                 | D=20-40%                                              |
| MIG/MAG             | πρώτα πάσα D = 10 - 40%, πάσα γεμίσματος D = 5 - 20%. |

### Σκλήρυνση και προθέρμανση

Πολλοί μη κραματωμένοι και κραματωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν προβλήματα στην συγκολλησιμότητα τους από μία ορισμένη περιεκτικότητα άνθρακα και κραματικών στοιχείων και πάνω. Η πιο αποτελεσματική λύση σε τέτοια προβλήματα συγκολλησιμότητας είναι η μείωση της ταχύτητας ψύξης με την χρήση προθέρμανσης.

Η ταχύτητα ψύξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την μάζα διάχυσης θερμότητας στην περιοχή της συγκόλλησης. Ένα παχύ έλασμα για παράδειγμα απομακρύνει την εισαγόμενη θερμότητα στην μεταβατική περιοχή τόσο γρήγορα, ώστε να μπορεί να αποκτηθεί η κρίσιμη ταχύτητα ψύξης και να σχηματιστεί ο μαρτενσίτης και άλλες σκληρές δομές ακόμα και σε χάλυβες με σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα και άλλα κραματικά στοιχεία. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ψύξης είναι επίσης η επιλογή του τύπου του ηλεκτροδίου, η διάμετρος του ηλεκτροδίου και η ταχύτητα της συγκόλλησης.

Σε αυτή τη σκληρή ζώνη εμφανίζονται υψηλές μηχανικές παραμένουσες τάσεις, καθώς το υλικό παρεμποδίζεται να τις μειώσει μέσω πλαστικής παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, και ιδιαίτερα σε διατομές μεγαλύτερου πάχους, δημιουργείται ένα πολυαξονικό σύστημα τάσεων εφελκυσμού που είναι ακόμα πιο αυξημένο από το γεγονός ότι ο όγκος αυξάνεται κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του μαρτενσίτη. Αν οι τάσεις φτάσουν τη συνεκτική αντοχή, σχηματίζονται ρωγμές σε αυτή την μεταβατική περιοχή υψηλής σκληρότητας. Το υδρογόνο είναι ένας επιπλέον παράγοντας που μπορεί να έχει επίδραση στην εμφάνιση αυτών των ρωγμών στην ΘΕΖ. [12]

## 2.5 Ασυνέχειες συγκολλήσεων

*Εισαγωγικοί ορισμοί*

### **Ρωγμή (Crack)**

Μία ρωγμή είναι ένας δισδιάστατος διαχωρισμός υλικού που δεν έχει ακόμα διαδοθεί κατά μήκος όλης της διατομής του μέρους.

### **Θραύση (Fracture)**

Θραύση είναι ο ολικός διαχωρισμός του υλικού σε μακροσκοπικό εύρος που οδηγεί σε απώλεια του φερόμενου φορτίου ενός στερεού σώματος. Το φυσικό αίτιο μιας θραύσης είναι η καταστροφή των ατομικών και μοριακών δεσμών εξαιτίας εξωτερικών και/ή εσωτερικών μηχανικών φορτίων, με δράση και άλλων παραγόντων. Το αποτέλεσμα είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Οι διαφορετικοί τύποι μιας θραύσης περιγράφονται στο παρών κεφαλαίο.

### **Μικρορηγμάτωση (Micro Crack)**

Ρηγμάτωση που αναγνωρίζεται σε μία μεγέθυνση μεγαλύτερη από 6x.

### **Μακρορηγμάτωση (Macro Crack)**

Ρηγμάτωση που αναγνωρίζεται με κανονική όραση (οπτική απόσταση αναφοράς 250 mm) ή σε μία μεγέθυνση μέχρι 6x .

### **Περικρυσταλλική ρηγμάτωση (Intergranular Crack)**

Διαδίδεται μέσω των ορίων των κόκκων του μετάλλου.

### **Διακρυσταλλική Ρηγμάτωση (Transgranular Crack)**

Διαδίδεται μέσω του κυρίου όγκου των κρυστάλλων.

### **Θερμή Ρηγμάτωση (Hot Crack)**

Σχηματίζεται από μία φάση χαμηλού σημείου τήξης ενώ αυτή είναι ρευστή.

### **Ρηγμάτωση στερεοποίησης (Solidification Crack)**

Δημιουργείται κατά τη διάρκεια στερεοποίησης του λουτρού συγκόλλησης.

### **Ρηγμάτωση υγροποίησης (Liquation Crack)**

Δημιουργείται από το λιώσιμο μίας φάσης χαμηλού σημείου τήξης, η οποία π.χ. βρίσκεται στα όρια των κόκκων.

### **Ψυχρή Ρηγμάτωση (Cold Crack)**

Σχηματίζεται σε στερεή κατάσταση του υλικού με υπέρβαση της ικανότητας παραμόρφωσης.

### **Ψαθυρή Ρηγμάτωση (Brittle Crack)**

Σχηματίζεται ενώ το υλικό βρίσκεται σε μία κατάσταση χαμηλής δυσθραυστότητας (toughness). Η κατάσταση αυτή του υλικού μπορεί να οφείλεται στην θερμοκρασία, στο σύστημα επιβαλλόμενων τάσεων, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ή στην φύση του υλικού.

### **Ρηγμάτωση συρρίκνωσης (Shrinkage Crack)**

Σχηματίζεται εξαιτίας παρεμποδισμένης συρρίκνωσης. Μικροδομές χαμηλής παραμορφωσιμότητας ή χαμηλής αντοχής βοηθούν τον σχηματισμό της.

### **Ρηγμάτωση υδρογόνου (Hydrogen Induced Cracking)**

Σχηματίζεται από αύξηση των παραμενουσών τάσεων εξαιτίας του υδρογόνου που κατακρημνίζεται από το κρυσταλλικό πλέγμα και λόγω των αλλαγών της δομής δεν μπορεί να διαχυθεί έξω από το υλικό.

### **Ρηγμάτωση σκλήρυνσης (Hardening Crack)**

Σχηματίζεται από αλλαγές στην δομή. Αλλαγές στον όγκο, προκαλούμενες από αυτές, οδηγούν στην δημιουργία τάσεων και την επακόλουθη ρηγμάτωση.

### **Ρηγμάτωση γεωμετρικών εγκοπών (Toe Crack)**

Σχηματίζεται σε τοποθεσίες υψηλής συγκέντρωσης τάσεων (γεωμετρικές εγκοπές) με την παρουσία μεταλλουργικών εγκοπών την ίδια στιγμή.

### **Ρηγμάτωση Γήρανσης (Ageing Crack)**

Σχηματίζεται εξαιτίας των διαδικασιών γήρανσης.

### **Ρηγμάτωσης κατακρήμνισης (Precipitation Crack)**

Σχηματίζεται εξαιτίας της κατακρήμνισης εύθραυστων φάσεων κατά τη διάρκεια συγκόλλησης ή κατά τη διάρκεια επακόλουθης θέρμανσης.

### **Διαστρωματική Ρηγμάτωση (Lamellar Tearing)**

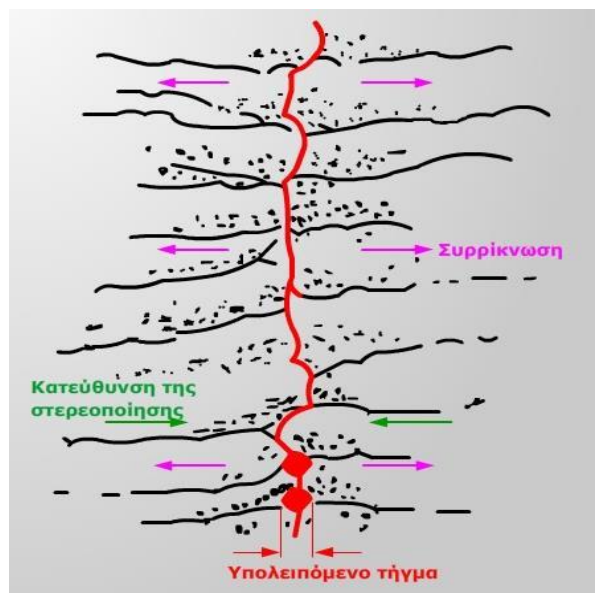
Σχηματίζεται εξαιτίας της σχάσης των ζωνών διαφορισμού που περιέχουν μεγάλα επιμήκη μη μεταλλικά εγκλείσματα και οι οποίες είναι παράλληλες μεταξύ τους, όταν ένα προς συγκόλληση εξάρτημα φορτιστεί στην κατεύθυνση του πάχους.

### **Θερμή ρηγμάτωση (Hot Cracking)**

Αίτιες της θερμής Ρηγμάτωσης

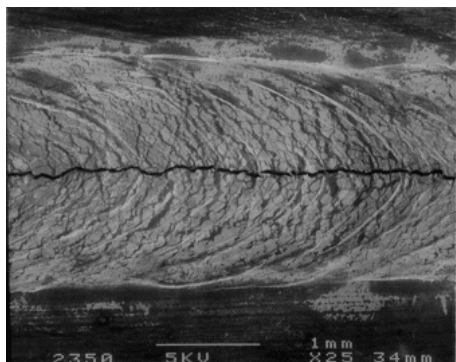
Το αίτιο για την θερμή ρηγματώση είναι ένα είδος ευθραυστοποίησης του υλικού που προκαλείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από φάσεις στα σύνορα των κόκκων που είναι ακόμα ρευστές.

Εξαιτίας του σημείου προέλευσης καθώς και εξαιτίας του αιτίου τους, οι θερμές ρηγματώσεις στο μέταλλο της συγκόλλησης ονομάζονται ρηγματώσεις στερεοποίησης (solidification cracks) και αυτές στην ΘΕΖ (θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη) ή στο μέταλλο συγκόλλησης που αναθερμαίνεται σε συγκολλήσεις πολλαπλών πάσων, ονομάζονται ρηγματώσεις αναθέρμανσης (reheat cracks) ή ρευστοποίησης (liquation). [12]

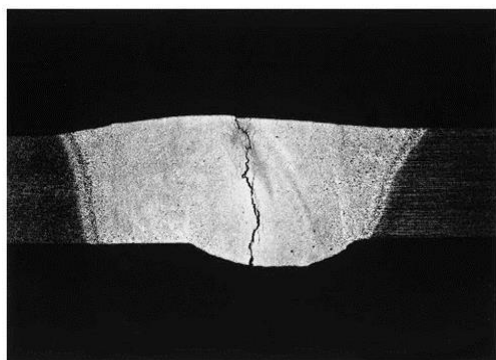


Σχήμα 9. Μοντέλο σχηματισμού ρηγματώσεων στερεοποίησης στο μέταλλο συγκόλλησης

Στην κατηγορία των θερμών ρηγματώσεων κατατάσσονται και οι ρωγμές που οφείλονται όχι στην ύπαρξη κάποιων ενώσεων με χαμηλό σημείο τήξης, αλλά στην μείωση της ολκιμότητας του υλικού λόγω της κατακρήμνισης ψαθυρών καρβιδίων στα όρια των κόκκων. Οι ρηγματώσεις αυτού του τύπου ονομάζονται Ductility Dip Cracks και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις τυπικές θερμές ρηγματώσεις της ΘΕΖ που συζητήθηκαν παραπάνω. Τα Ductility Dip Cracks παρατηρούνται σε μία μεγαλύτερη απόσταση από την γραμμή τήξης της συγκόλλησης και είναι ρηγματώσεις που γίνονται στη στερεά φάση σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω της μείωσης της ικανότητας του υλικού να παραμορφωθεί.



*Εικόνα 2 Θερμή ρηγμάτωση στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης*



*Εικόνα 3. Θερμή ρηγμάτωση στο κέντρο του μετάλλου συγκόλλησης*

Οι ασυνέχειες (ή ελαττώματα ή σφάλματα) των συγκολλητών συνδέσεων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Υπομικροσκοπικά ελαττώματα, δηλαδή ατέλειες κρυσταλλογραφικού πλέγματος, όπως οι αταξίες και τα κενά.
- Μικροσκοπικά ελαττώματα, όπως τα μικροεγκλείσματα, οι διαφορισμοί στοιχείων και οι μικρορηγματώσεις.
- Μακροσκοπικά ελαττώματα, όπως οι υποκοπές, η ατελής διείδυση, οι πόροι, οι σκουριές, η ατελής τήξη και οι ρηγματώσεις.

Ως ασυνέχεια ορίζεται η διακοπή της τυπικής δομής της συγκόλλησης. Μπορεί να είναι η απώλεια της ομοιομορφίας στα μηχανικά, μεταλλουργικά ή φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού συγκόλλησης. Η ασυνέχεια δεν αποτελεί απαραίτητα και ελάττωμα της συγκόλλησης. Σύμφωνα με την American Welding Society (AWS) ως ελάττωμα της συγκόλλησης ορίζεται μία ασυνέχεια ή πολλές ασυνέχειες που εκ φύσεως ή λόγω της συνολικής επίδρασης, όπως για παράδειγμα το συνολικό πορώδες ή το συνολικό μήκος των εγκλεισμάτων, καθιστούν το προϊόν ανίκανο να ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές και απαιτήσεις.[12]

Οι δώδεκα πιο γνωστές ασυνέχειες είναι οι παρακάτω :

1. Πορώδες (porosity)
2. Εγκλείσματα σκωριάς (slag inclusions)
3. Ατελής διείσδυση (lack of penetration)
4. Ατελής τήξη (lack of fusion)
5. Έναυση τόξου (arc strike)
6. Επικάλυψη (overlap)
7. Υποκοπή (undercut)
8. Υποπλήρωση (underfill)
9. Κρατήρας (crater)
10. Πιτσιλίσματα (spatter)
11. Ρηγμάτωση (crack)
12. Ελαττώματα ελασμάτων



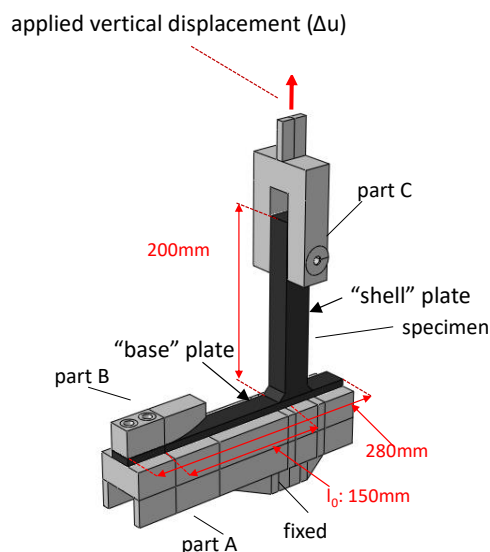
## 2.6 Αξιολόγηση συγκολλήσεων

Προκειμένου να αποφευχθούν ασυνέχειες στις συγκολλήσεις που είναι ικανές να προκαλέσουν ζημιά στη κατασκευή, οι συγκολλήσεις υπόκεινται σε έλεγχο σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ISO. Τα πρότυπα ISO ποικίλουν ανάλογα με το συγκολλούμενο υλικό, ανάλογα με την μέθοδο συγκόλλησης, τις μεθόδους σύνδεσης αλλά και με το αν ο έλεγχος που θα υποβληθούν θα είναι καταστροφικός ή μη καταστροφικός. Τα πρότυπα ISO προσφέρουν καθοδήγηση προκειμένου να αξιολογηθεί το μέγεθος των ατελειών προκειμένου να επιτραπεί η εφαρμογή στην εκάστοτε κατασκευή. Για παράδειγμα το πρότυπο EN25817[17] χρησιμοποιείται για αξιολόγηση συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου και χαρακτηρίζει την συγκόλληση σε τρία επίπεδα ανάλογα με την ποιότητά της. Το πρότυπο ISO/TS 20273[18] αξιολογεί την συγκόλληση σε σχέση με την αντοχή της σε κόπωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την αξιολόγηση της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο EN ISO 5817[13]

## Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

### 3.1 Δοκίμια και πειραματική διάταξη

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια για να υποβληθούν σε δοκιμές ολιγοκυκλικής κόπωσης. Οι διαστάσεις και οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν βασισμένες σε δεξαμενή αποθήκευσης υγρών καυσίμων, διαμέτρου 54.864m και ύψος κελύφους 15.6m, που βρίσκεται σε σεισμογενή περιοχή και είναι σχεδιασμένη σύμφωνα με το πρότυπο EN 14015[16]. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται στη βάση της δεξαμενής είναι ο S275-J2 πλάτους 8 mm ενώ στο κέλυφος χρησιμοποιείται χάλυβας S355-J2 πάχους 30 mm. Οι μηχανικές ιδιότητες και οι χημικές συστάσεις των χαλύβων S275-J2 και S355-J2 παρουσιάζονται στους πίνακες 2 και 3 αντίστοιχα. Κάθε δοκίμιο έχει πλάτος 25mm και αποτελείται από μια λωρίδα χάλυβα πάχους 8mm, που αντιπροσωπεύει τον πυθμένα της δεξαμενής, ενωμένη με μία λωρίδα χάλυβα πάχους 30mm, που αντιπροσωπεύει το κέλυφος της δεξαμενής. Η ένωση κατασκευάστηκε με συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδια με μέγεθος ηλεκτρικού τόξου 5.6mm. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενη μετατόπιση ανύψωσης σταθερού πλάτους όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες κάτω από τις οποίες υποβλήθηκε το κάθε δοκίμιο και τα αποτελέσματα των τεστ κόπωσης. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.



Σχήμα 10. Σχηματική διάταξη δοκιμίου κατά την τοποθέτησή του στη μηχανή κόπωσης



Εικόνα 4. Παραμορφωμένο δοκίμιο κατά την διάρκεια δοκιμής κόπωσης μετά από ανύψωση (Δυ) ίση με 35mm

Πίνακας 2. Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων (S355-J2, S275-J2)

| Χάλυβας | Όριο διαρροής (Mpa) | Όριο θραύσης (Mpa) | Επιμήκυνση A <sub>5</sub> (%) | Σκληρότητα (HB) |
|---------|---------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| S355-J2 | 335                 | 470-630            | 22                            | 150-190         |
| S275-J2 | 275                 | 410-560            | 23                            |                 |

Πίνακας 3. Χημικές Συστάσεις (S355-J2, S275-J2)

|         | C %  | Si %  | Mn % | P %   | S %   | Ni % | Mo % | V % | Cu % | Al % |
|---------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-----|------|------|
| S355-J2 | 0.20 | 0.55  | 1.60 | 0.030 | 0.030 | -    | -    | -   | 0.55 | -    |
| S275-J2 | 0.21 | 0.035 | 1.60 | 0.035 | 0.035 | -    | -    | -   | 0.6  | -    |

Πίνακας 4. Πίνακας συνθηκών των τεστ κοπώσεως

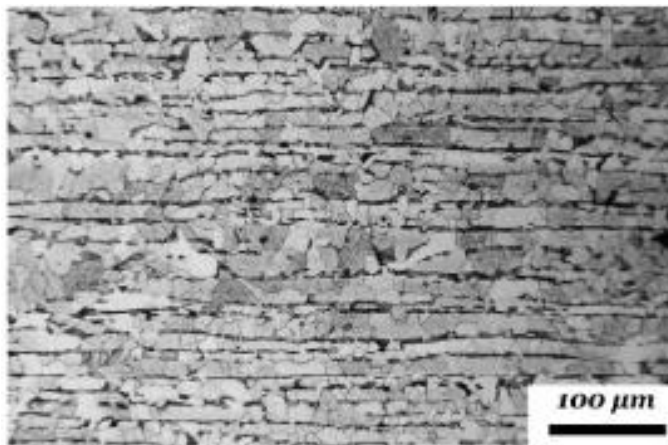
| Δοκίμιο | Μετατόπιση<br>$\Delta u$ (mm) | Περιστροφή<br>$\theta$ (rad) | Μέγιστο<br>φορτίο (kN) | $N_1$ | $N_{20}$ | $N_f$ |
|---------|-------------------------------|------------------------------|------------------------|-------|----------|-------|
| B2      | 25.0                          | 0.17                         | 3.19                   | 65    | 121      | 139   |
| B5      | 27.5                          | 0.19                         | 3.34                   | 7     | 57       | 70    |
| B1      | 30.0                          | 0.20                         | 3.45                   | 33    | 89       | 96    |
| B3      | 32.5                          | 0.22                         | 3.77                   | 22    | 76       | 92    |
| A3      | 35.0                          | 0.24                         | 3.41                   | 24    | 51       | 54    |
| A4      | 35.0                          | 0.24                         | 3.65                   | 24    | 57       | 65    |
| A5      | 37.5                          | 0.26                         | 3.96                   | 1     | 24       | 31    |
| A2      | 40.0                          | 0.27                         | 3.82                   | 3     | 34       | 36    |

### 3.2 Διαδικασία προετοιμασίας δοκιμών

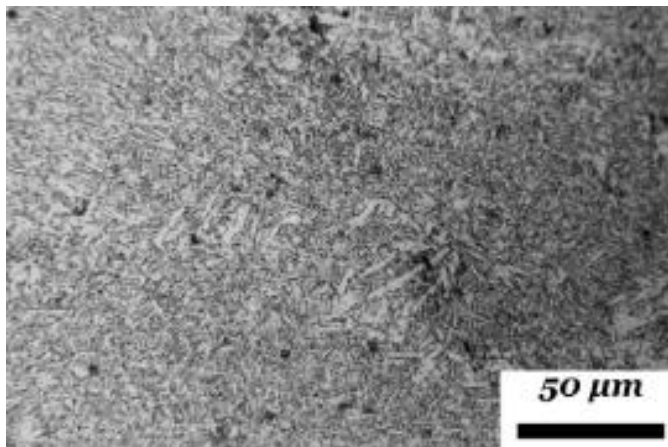
Προτού γίνουν οι δοκιμές ολιγοκυκλικής κόπωσης έγινε μεταλλογραφική ανάλυση ενός δοκιμίου. Το δοκίμιο αρχικά κόπηκε με τροχό "Accutom 2" της Struers ώστε να μελετηθούν τα σημεία ενδιαφέροντος. Έπειτα έγινε λείανση των δοκιμών με χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου ξεκινώντας από χονδρό κόκκο 120grid και αυξάνοντας σταδιακά σε 320,500,800 και 1000 grid. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στίλβωση των δοκιμών σε πάνινο τροχό με διαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου διαμαντιού διαμέτρου 3 και 1μm. Για την λείανση και την στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα Knuth-roter 3 και Dap-V της Struers αντίστοιχα. Τέλος έγινε χημική προσβολή με διάλυμα νιτρικού οξέους (30% HNO<sub>3</sub>) για την μακροδομή και με αλκοόλη Nital 3% για την μακροδομή.

### 3.3 Μεταλλογραφική ανάλυση της συγκόλλησης

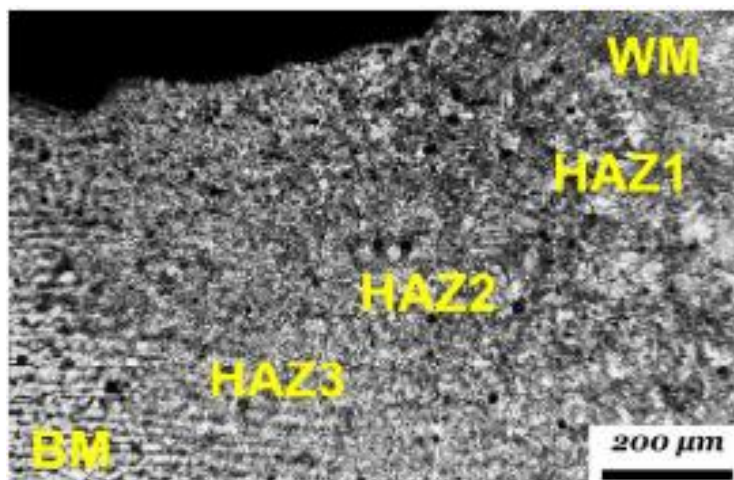
Η συγκόλληση στην μακροδομή της φάνηκε να μην έχει ελαττώματα και να μεταβαίνει ομαλά απ' την λίμνη στην ΘΕΖ και στο ΒΜ. Με βάση τους πίνακες ΕΛΟΤ EN ISO 5817[13] η συγκόλληση χαρακτηρίστηκε Β. Η μικροδομή της κάθε περιοχής της συγκόλλησης φαίνεται στις εικόνες 5-7. Στην μικροδομή η λίμνη συγκόλλησης αποτελείται από φερρίτη Wildmanstatten και βελονοειδή φερρίτη μαζί με καρβίδια. Το βασικό μέταλλο αποτελείται από φερρίτη με μπάντες περλίτη. Στην ΘΕΖ κοντά στο ΒΜ παρατηρείται ζώνη πλήρης εκλέπτυνσης κόκκων ενώ πλησιάζοντας υπάρχει μεγέθυνση κόκκων. Επιπλέον στο δοκίμιο έγιναν μικροσκληρομετρήσεις σύμφωνα με το EN 1043-1[14] με φορτίο 2kgf της κλίμακας Vickers, τα αποτελέσματα ακολουθούν στον πίνακα. Όλες οι μικροσκληρομετρήσεις ήταν μέσα στα επιτρεπτά όρια του EN ISO 15614[15] με τις μεγαλύτερες τιμές να εντοπίζονται κοντά στην λίμνη συγκόλλησης στην περιοχή μεγέθυνσης κόκκων. Στην εικόνα 8 φαίνεται η μακροδομή της συγκόλλησης και οι περιοχές στις οποίες έγιναν οι μικροσκληρομετρήσεις ενώ στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων.



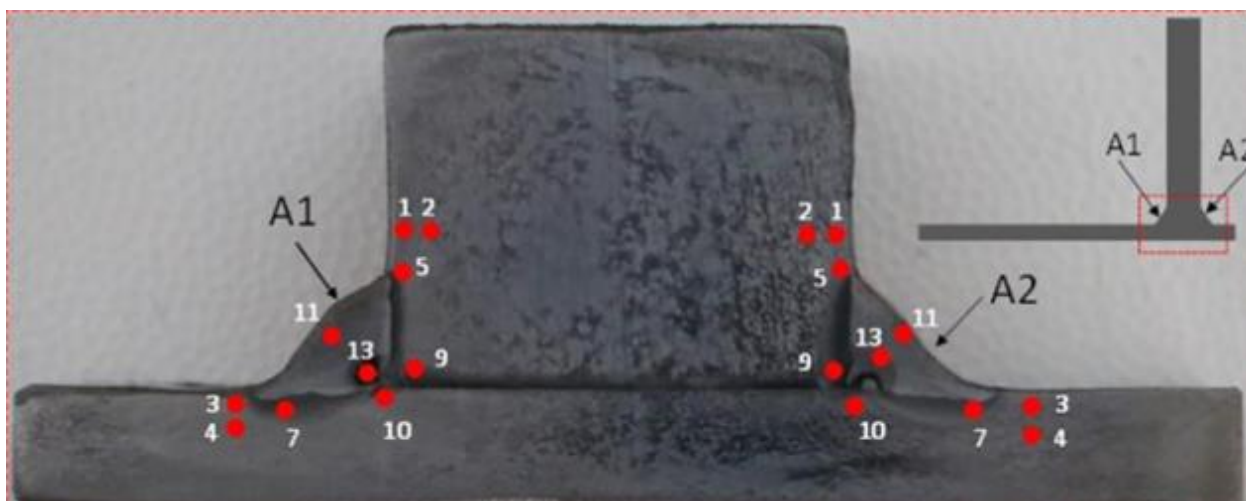
Εικόνα 5. Μικροδομή του βασικού μετάλλου (BM)



Εικόνα 6. Μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης



Εικόνα 7. Μικροδομή ΘΕΖ, HAZ1: Ζώνη μεγέθυνσης κόκκων HAZ2: Ζώνη μερικής εκλέπτυνσης κόκκων HAZ3: Ζώνη πλήρης εκλέπτυνσης κόκκων



Εικόνα 8. Μακροδομή της συγκόλλησης και οι περιοχές που έγιναν οι μικροσκληρομετρήσεις

Πίνακας 5. Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων

|     | Περιοχή | A1  | A2  |
|-----|---------|-----|-----|
| BM  | 1       | 200 | 200 |
| BM  | 2       | 205 | 206 |
| BM  | 3       | 282 | 225 |
| BM  | 4       | 208 | 213 |
| ΘΕΖ | 5       | 352 | 320 |
| ΘΕΖ | 7       | 290 | 302 |
| ΘΕΖ | 9       | 336 | 345 |
| ΘΕΖ | 10      | 269 | 272 |
| ΜΣ  | 11      | 303 | 274 |
| ΜΣ  | 13      | 292 | 302 |

## Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Τα δοκίμια καθόλη την διάρκεια των τεστ κοπώσεως καταγράφηκαν από κάμερα που τα φωτογράφιζε μετά από κάθε κύκλο κόπωσης έτσι ώστε να καταγραφεί σε ποιον κύκλο δημιουργείται η πρώτη ρωγμή αλλά και πως εξελίζεται με τον χρόνο μέχρι τον κύκλο που συμβαίνει η πλήρης αποκοπή. Όλα τα δοκίμια μετά το τεστ κοπώσεως υποβλήθηκαν σε οπτικό έλεγχο με χρήση στερεοσκοπίου καθώς και μεταλλογραφική ανάλυση με επίκεντρο την περιοχή που ξεκίνησε η αρχική ρωγμή. Μερικά από τα δοκίμια επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

### 4.1 Οπτικός έλεγχος και μεταλλογραφική ανάλυση δοκιμών

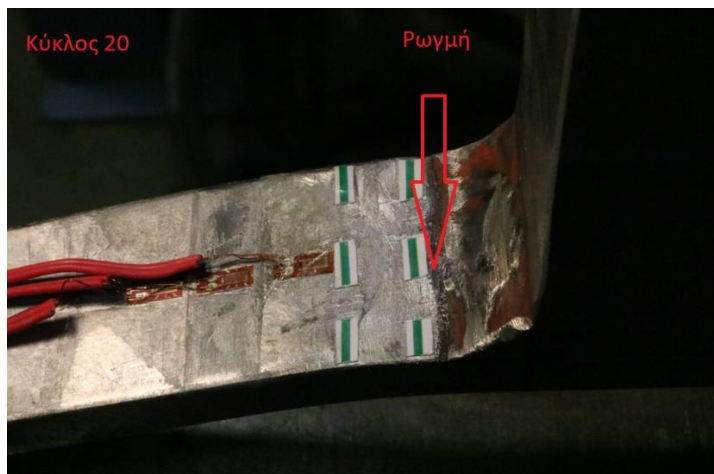
#### Δοκίμιο A2

Στο δοκίμιο A2 η βασική ρωγμή ξεκίνησε κατά την διάρκεια του τρίτου κύκλου φόρτισης και η ολική αποκόλληση συνέβη μετά από 36 κύκλους. Η ρωγμή που οδήγησε στην αποκόλληση ξεκίνησε και διαδόθηκε στην εξ' ολοκλήρου στην ΘΕΖ. Δευτερεύουσα ρωγμή εντοπίστηκε στην κάτω επιφάνεια σε απόσταση 4mm από την ΕΘ προς το ΒΜ(βλ. εικόνα 13). Στην άνω επιφάνεια εντοπίστηκε μικρορωγμή σε απόσταση περίπου ίση με 300μm εντός της ΘΕΖ(βλ. εικόνα15). Στις εικόνες 9-11 παρουσιάζονται η έναρξη της ρωγμής και η διάδοσή της έως την τελική αστοχία ενώ στις εικόνες 12-14παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου και οι δευτερεύουσες ρωγμές.

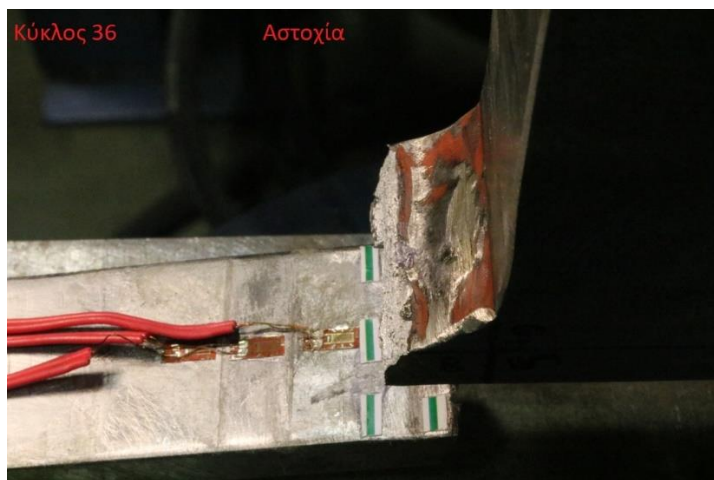


Εικόνα 9. Έναρξη της ρωγμής του δοκιμίου A2 κατά την διάρκεια του 3<sup>ου</sup> κύκλου

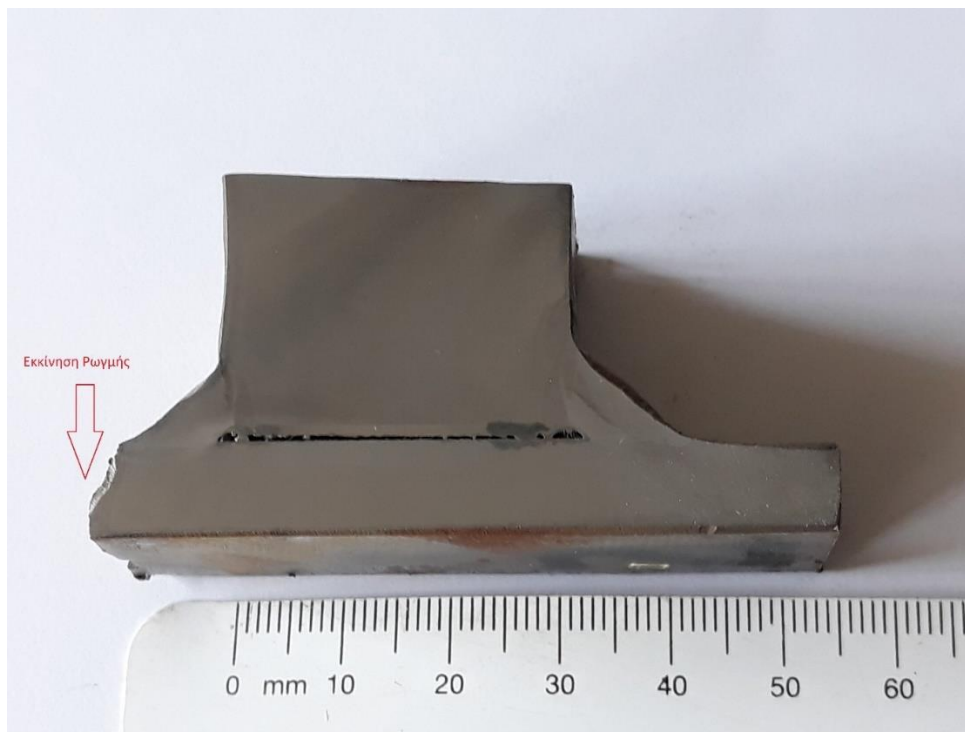




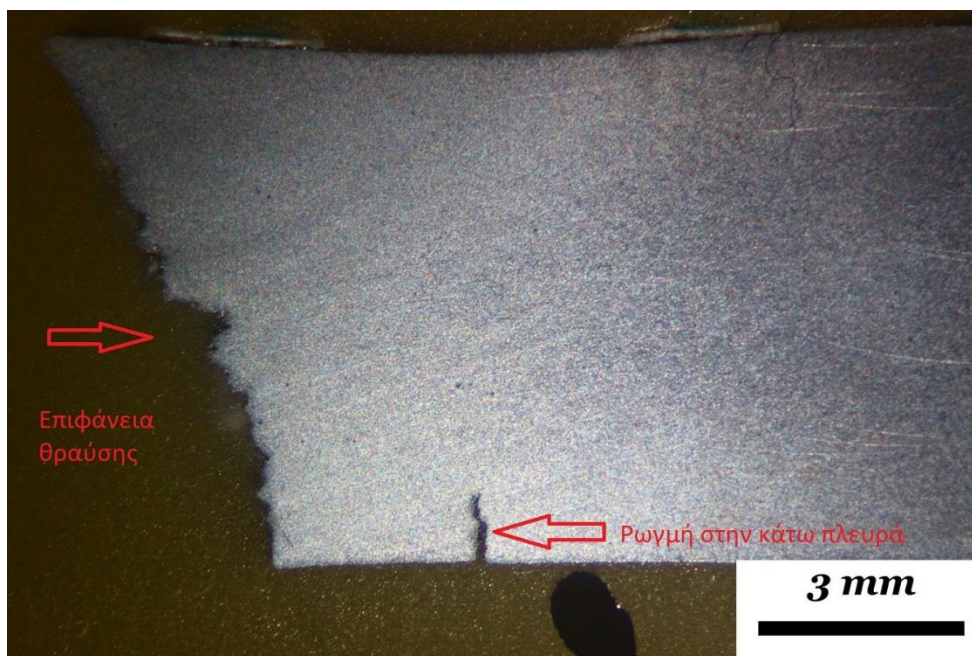
Εικόνα 10. Ρωγμή του δοκιμίου A2 κατά την διάρκεια του 20ου κύκλου



Εικόνα 11. Αστοχία του δοκιμίου A2



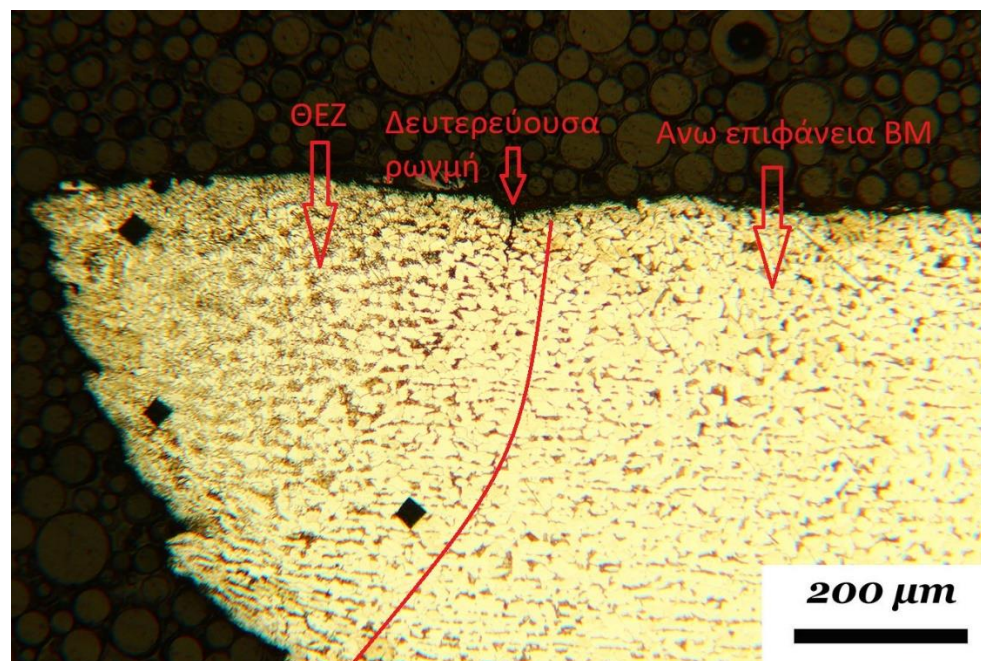
Εικόνα 12. Μακροδομή του δοκιμίου A2



Εικόνα 13. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου (Εγκάρσια διατομή στο σημείο εκκίνησης της ρωγμής, φαίνεται η ύπαρξη δευτερεύουσας ρωγμής παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης)



Εικόνα 14. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A2 (Δευτερεύουσα ρωγμή παράλληλα στην επιφάνεια θραύσης)

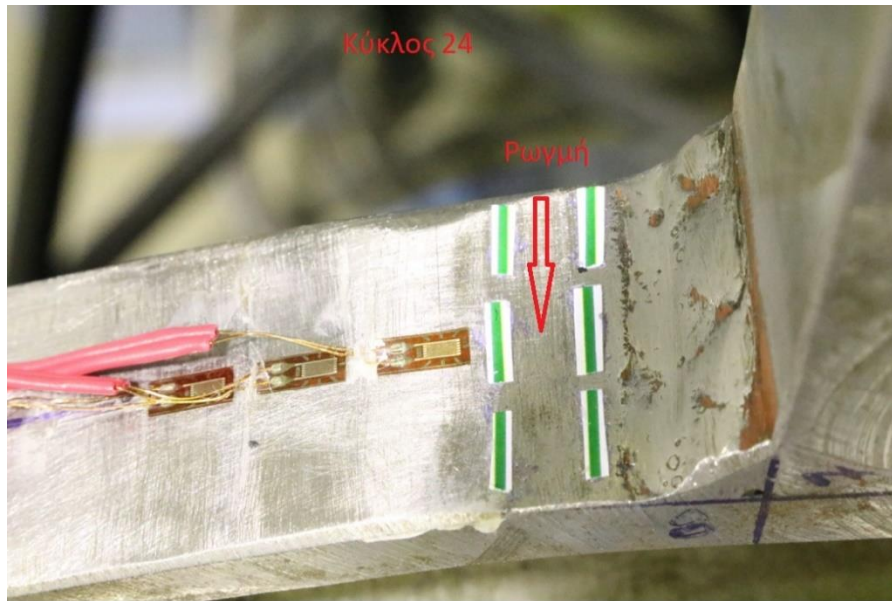


Εικόνα 15. Μικροδομή του δοκιμίου A2 στο σημείο έναρξης της ρωγμής και εμφάνιση μικρορωγμής στην άνω επιφάνεια

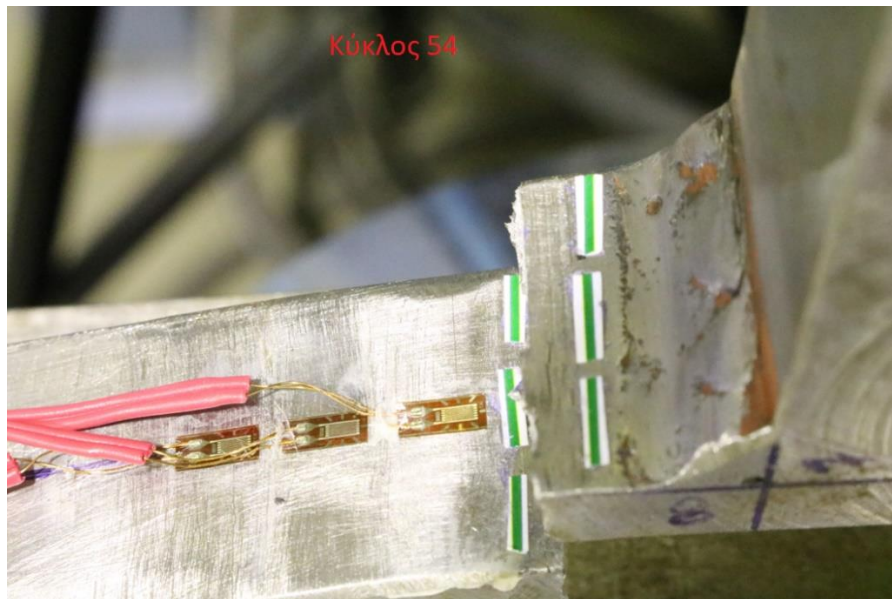


### Δοκίμιο A3

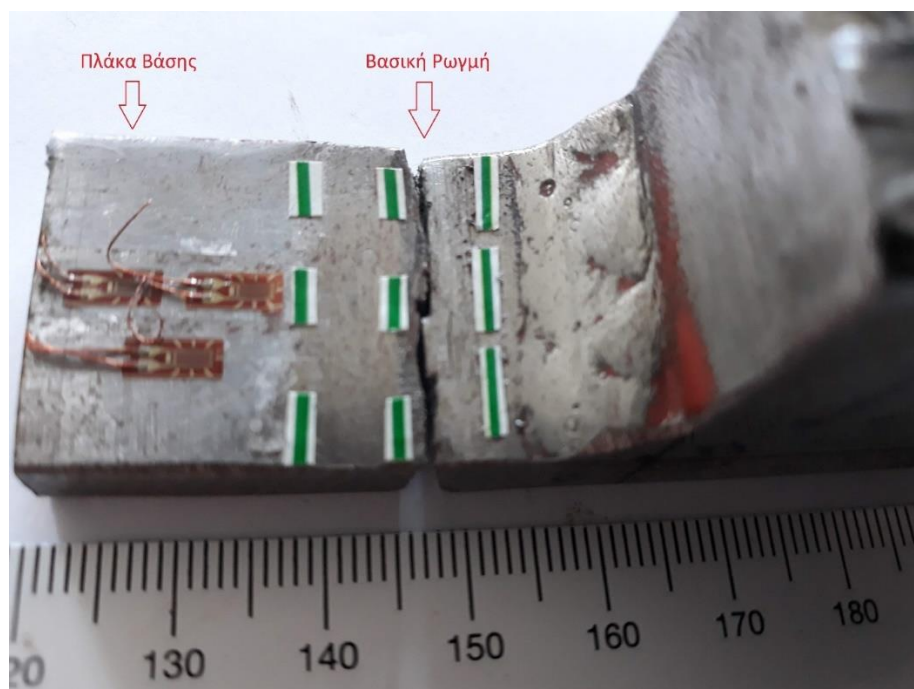
Στο δοκίμιο A3 η βασική ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 24<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης(βλ. εικόνα 16) στο BM και αναπτύχθηκε εξ' ολοκλήρου στο BM. Το δοκίμιο αστόχησε στον 54<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης(βλ. εικόνα 17-18). Δευτερεύουσες ρωγμές παρατηρήθηκαν στην άνω επιφάνεια σε απόσταση 2.6 mm από την ΕΘ προς το BM (βλ. εικόνα 19)και στην κάτω επιφάνεια σε απόσταση 3.8 mm από την ΕΘ προς το ΜΣ(βλ. εικόνα 20).



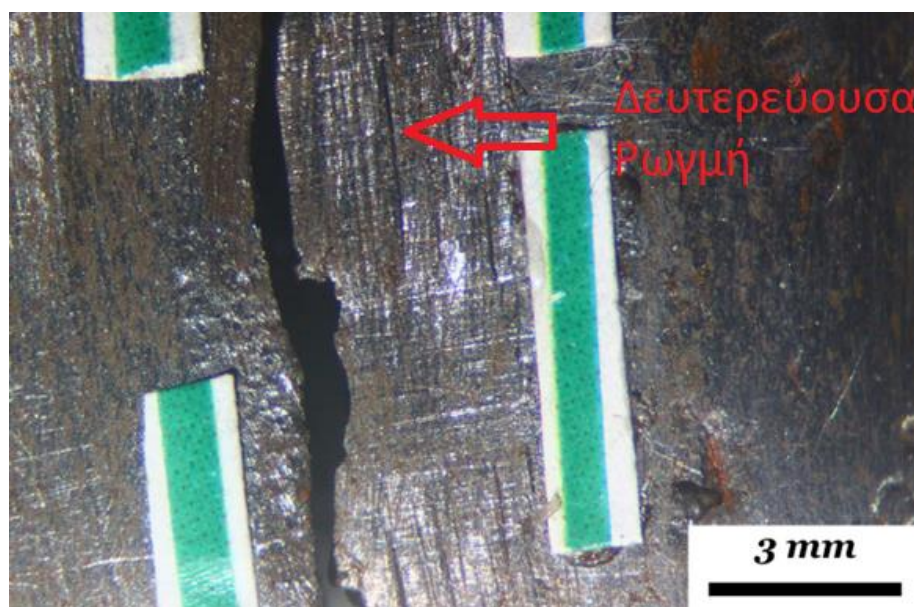
Εικόνα 16. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου A3 κατά τον 24<sup>ο</sup> κύκλο



Εικόνα 17. Αστοχία του δοκιμίου A3 τον 54<sup>ο</sup> κύκλο



Εικόνα 18. Μακροδομή του δοκιμίου A3



Εικόνα 19. Δευτερεύουσα ρωγμή του δοκιμίου A3 στην άνω επιφάνεια

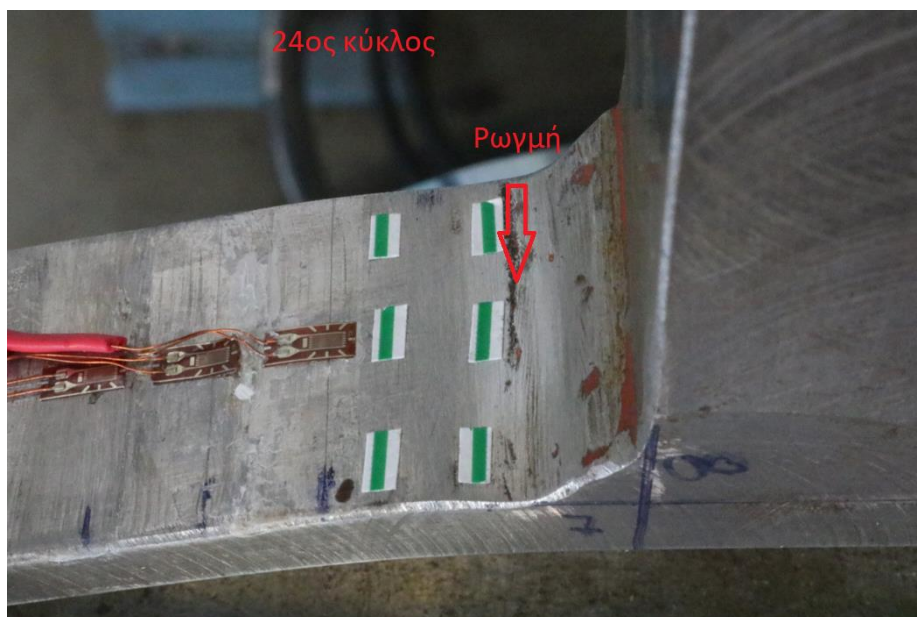


Εικόνα 20. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A3

#### Δοκίμιο A4

Στο δοκίμιο A4 η βασική ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 24<sup>ου</sup> κύκλου (βλ. εικόνα 21) στην ΘΕΖ και αναπτύχθηκε εξ 'ολοκλήρου στην ΘΕΖ. Η τελική αστοχία επήλθε κατά τον 65<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης (βλ. εικόνα 22). Δευτερεύουσες ρωγμές βρέθηκαν στην άνω επιφάνεια σε απόσταση 2 mm από την ΕΘ προς το ΜΣ. Στην κάτω επιφάνεια βρέθηκαν ρωγμές σε απόσταση 2.6 mm από την ΕΘ προς το ΒΜ και σε απόσταση 0.8 mm από την ΕΘ προς το ΜΣ (βλ. εικόνα 24). Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου A4.

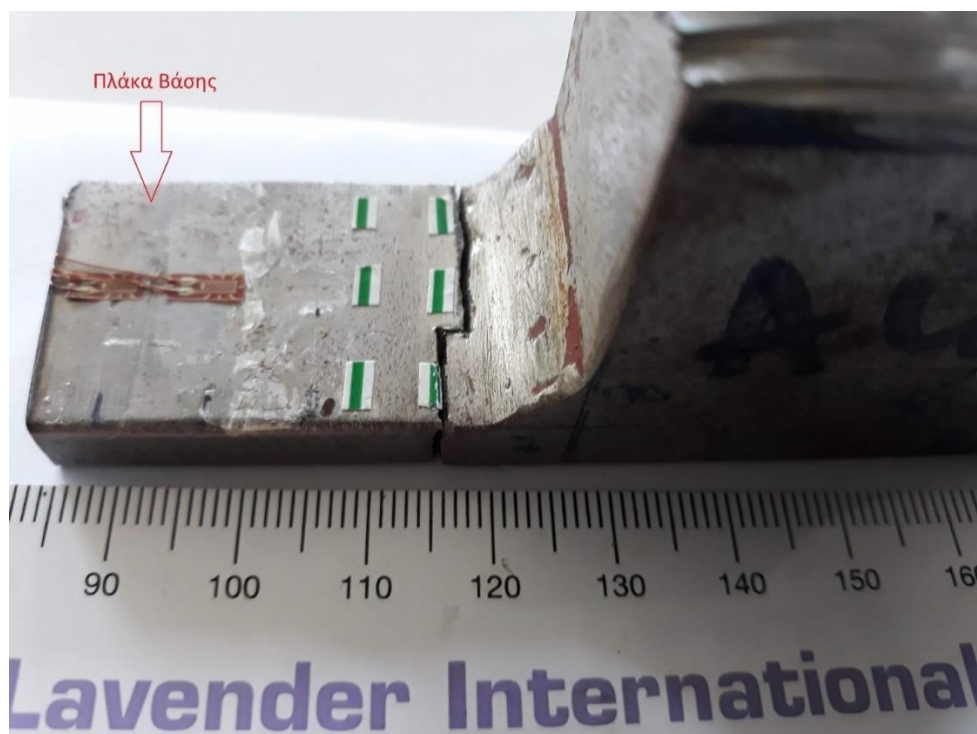




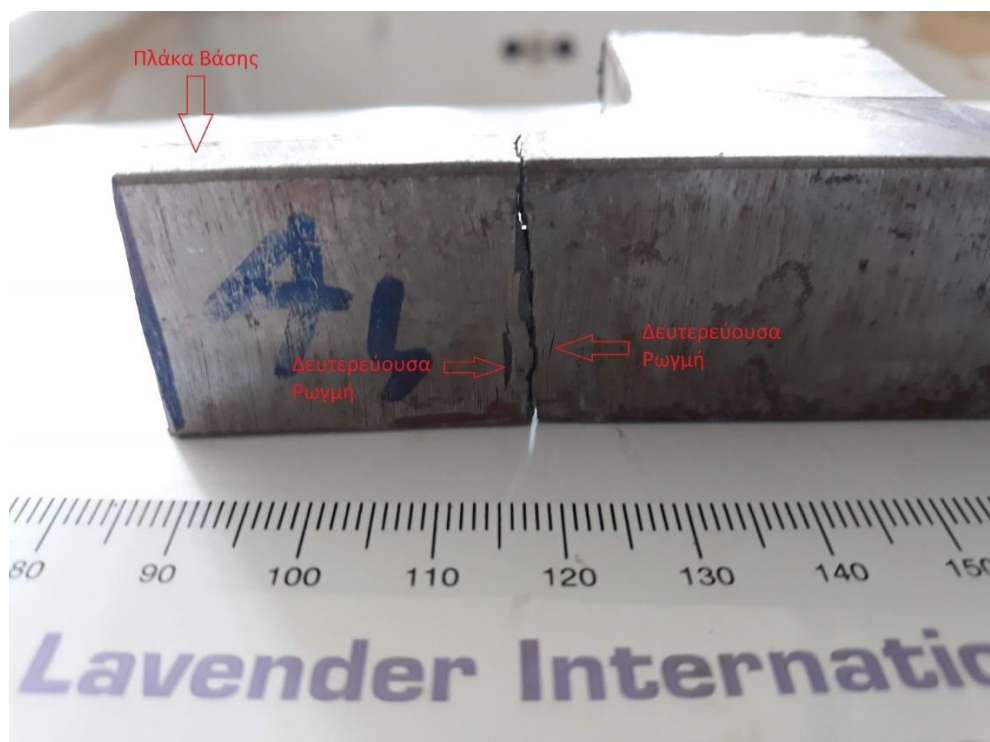
Εικόνα 21. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου A4 κατά την διάρκεια του 24<sup>ου</sup> κύκλου



Εικόνα 22. Αστοχία του δοκιμίου A4 κατά τον 65<sup>ο</sup> κύκλο



Εικόνα 23. Μακροδομή του δοκιμίου A4



Εικόνα 24. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A4 ( Εμφάνιση δευτερευουσών ρωγμών)

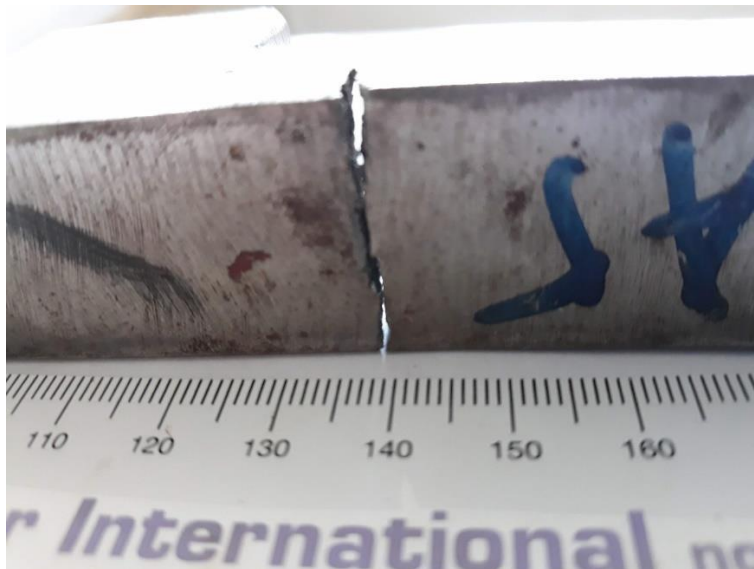


## Δοκίμιο A5

Στο δοκίμιο A5 η βασική ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης εξαιτίας μίας αρχικής ατέλειας που υπήρχε στον πόδα της συγκόλλησης. Το μέγεθος της ατέλειας ήταν εντός αλλά πολύ κοντά στα όρια των αντίστοιχων διεθνών στάνταρ [9,10]. Το δοκίμιο αστόχησε τελικά κατά την διάρκεια του 31<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης. Η ρωγμή εμφανίστηκε και διαδόθηκε στην ΘΕΖ. Δευτερεύουσες ρωγμές εμφανίστηκαν κάτω επιφάνεια σε απόσταση 1.7 mm από την ΕΘ προς το ΒΜ και 1.4 mm από την ΕΘ προς το ΜΣ. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου A5 ενώ στην εικόνα 26 η κάτω επιφάνεια.



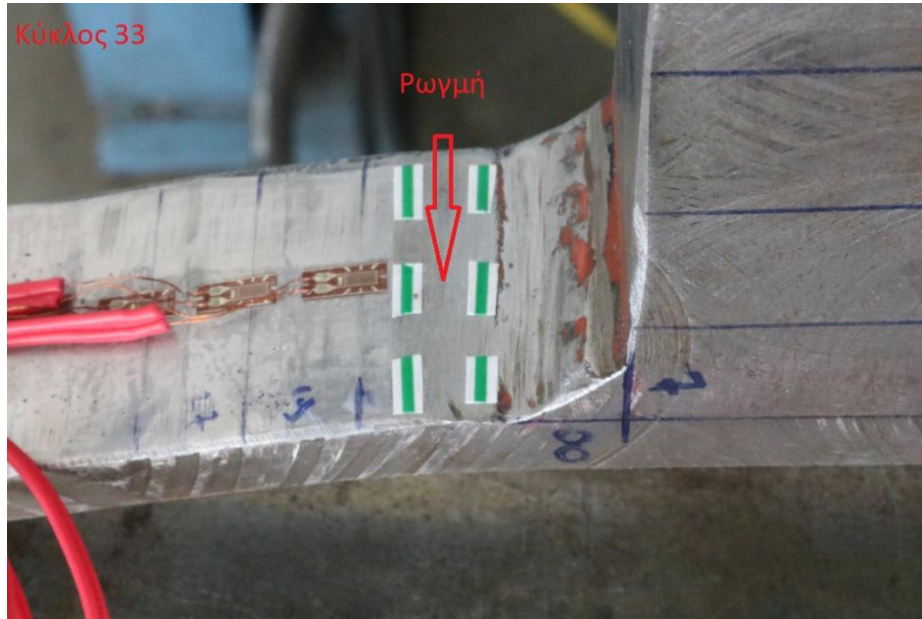
Εικόνα 25. Μακροδομή του δοκιμίου A5



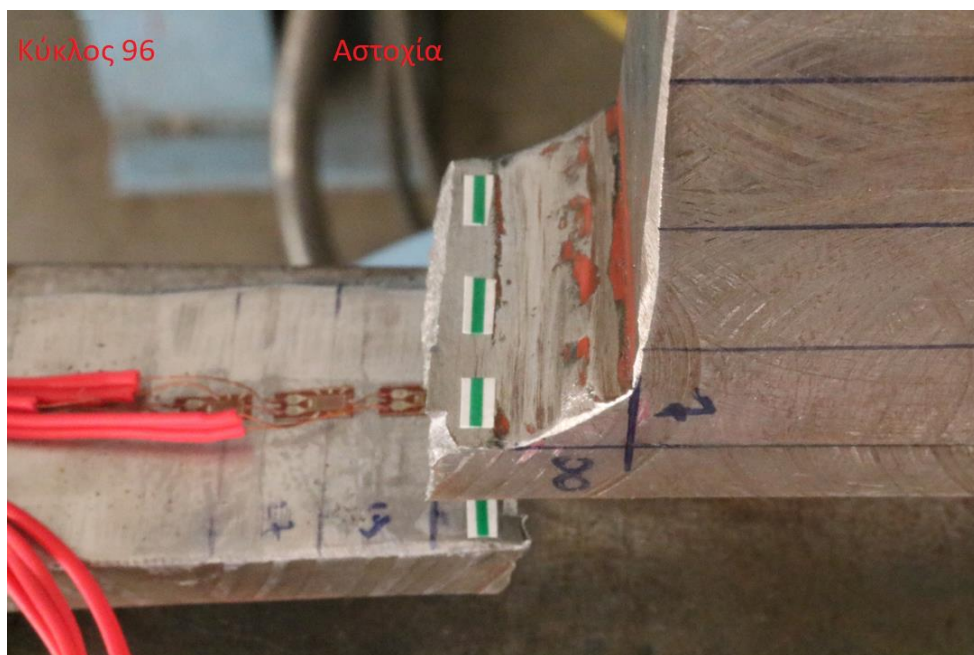
Εικόνα 26. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου A5

## Δοκίμιο B1

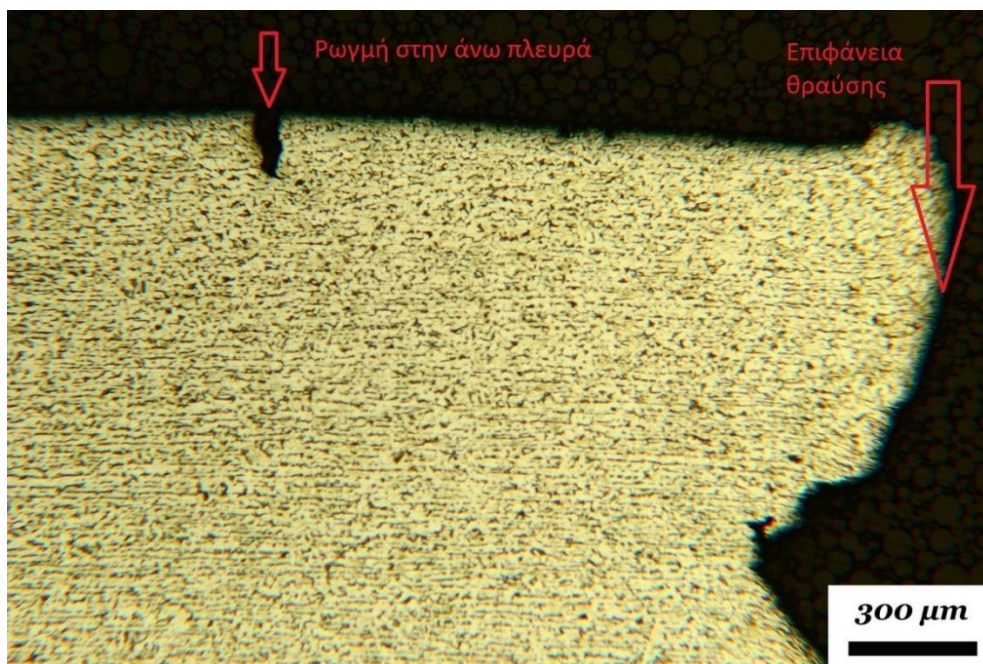
Στο δοκίμιο B1 η βασική ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 33<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης (βλ. εικόνα 27) και φαίνεται να έχει αναπτυχθεί εξ' ολοκλήρου στο BM. Η τελική αστοχία επήλθε κατά τον 96<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης (βλ. εικόνα 28). Η ρωγμή ακολούθησε τις μπάντες φερρίτη-περλίτη του BM. Δευτερεύουσες ρωγμές παρατηρήθηκαν στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου σε απόσταση 2.6mm από την ΕΘ προς το BM και 0,8mm από την ΕΘ προς το ΜΣ (βλ. εικόνα 29). Στην κάτω επιφάνεια παρατηρήθηκαν ρωγμές σε εύρος 2.8mm – 4.3mm από την ΕΘ προς το BM (βλ. εικόνα 30).



Εικόνα 27. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου B1 τον 33<sup>ο</sup> κύκλο

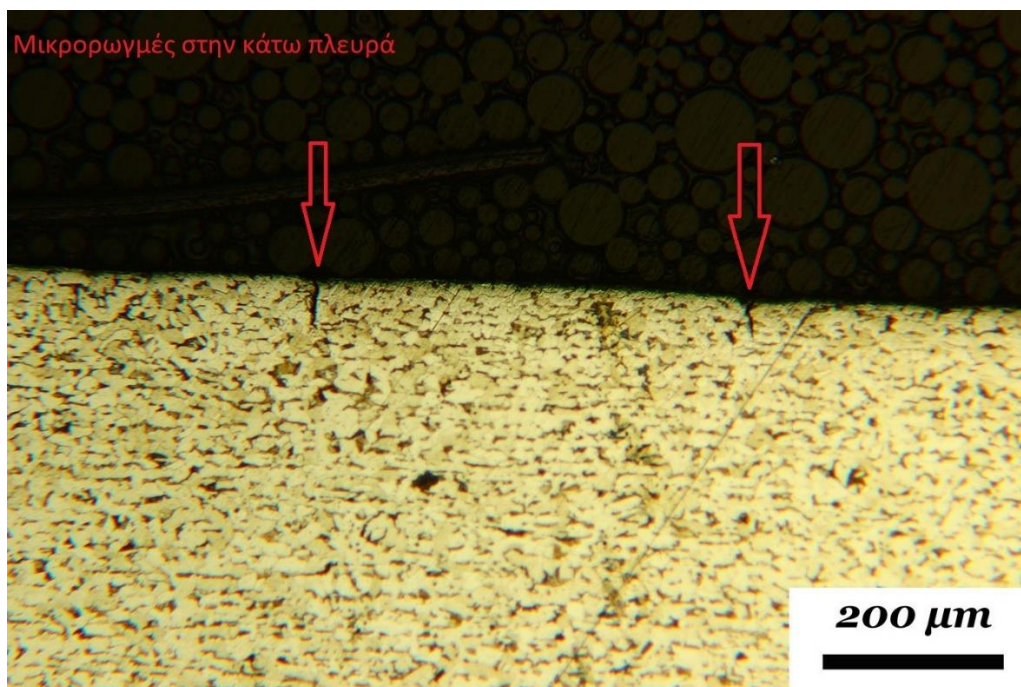


Εικόνα 28. Αστοχία του δοκιμίου B1 τον 96<sup>ο</sup> κύκλο



Εικόνα 29. Μικροδομή της άνω πλευράς του δοκιμίου B1 που δείχνει την ύπαρξη δευτερεύουσας μικρορωγμής

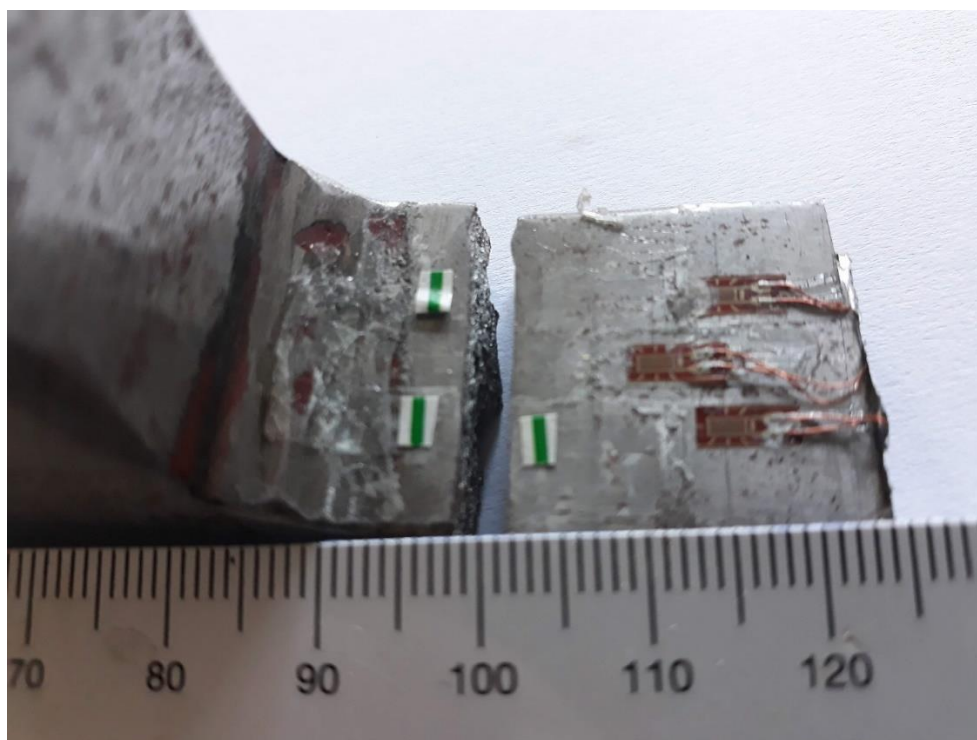




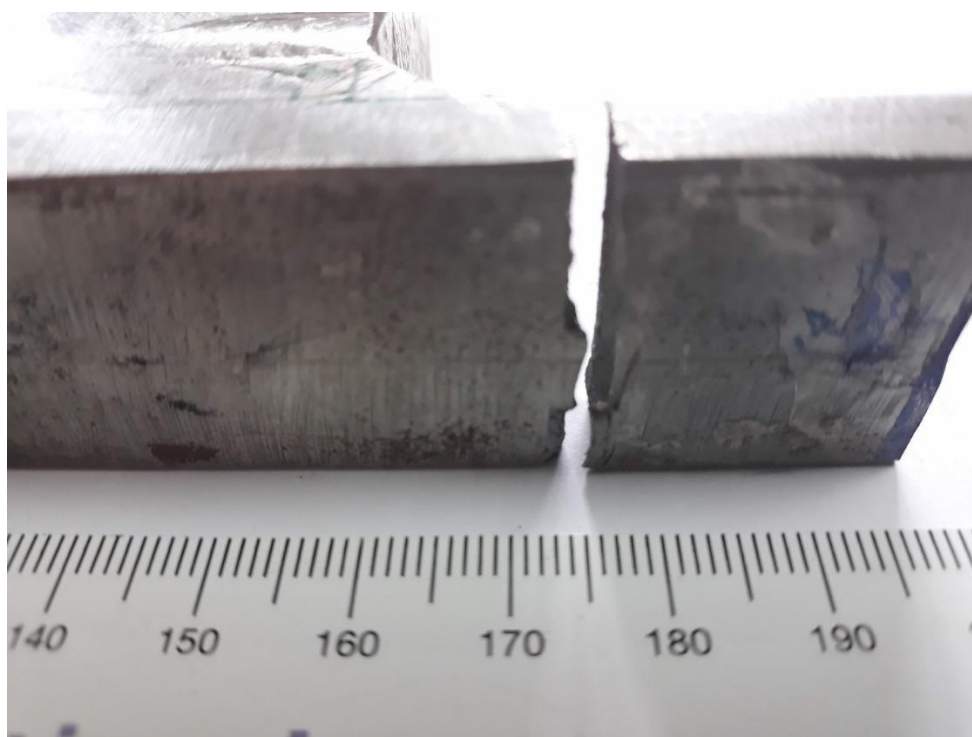
*Εικόνα 30. Μικροδομή της κάτω επιφάνειας του δοκιμίου B1 που δείχνει δευτερεύουσες μικρορωγμές*

#### **Δοκίμιο B2**

Στο δοκίμιο B2 η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία εμφανίστηκε κατά τον 65<sup>ο</sup> κύκλο και η τελική αποκόλληση συνέβει στον 139<sup>ο</sup> κύκλο. Η ρωγμή εμφανίστηκε και διαδόθηκε στο BM. Δευτερεύουσες ρωγμές εντοπίστηκαν στην κάτω επιφάνεια σε απόσταση 4 mm από την ΕΘ προς το BM. Στις εικόνες 31 και 32 παρουσιάζεται η μακροδομή της άνω και της κάτω επιφάνειας αντίστοιχα.



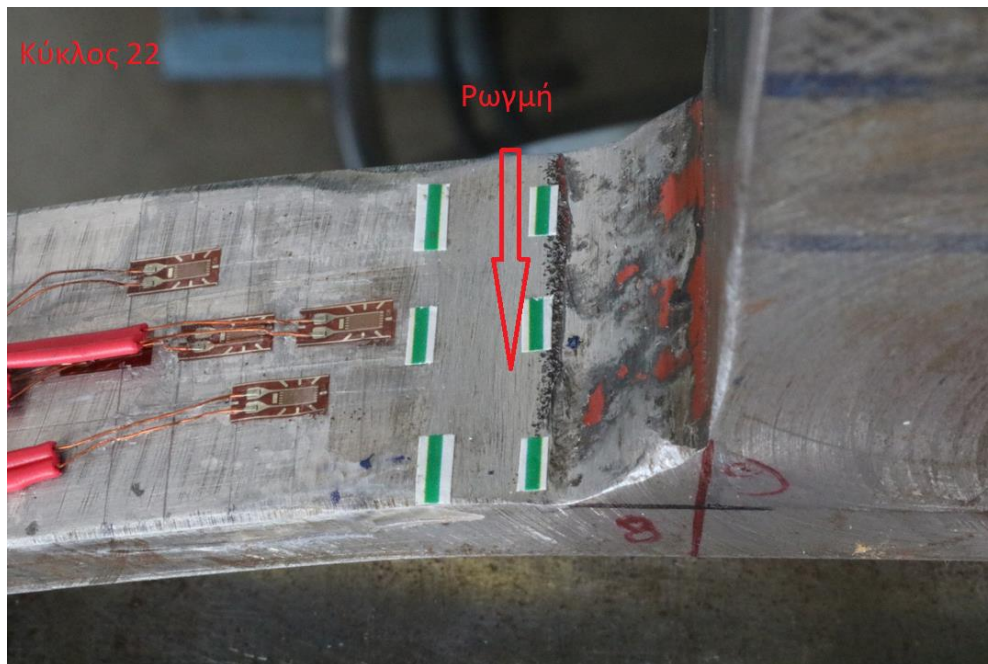
Εικόνα 31. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B2



Εικόνα 32. Κάτω επιφάνεια του δοκιμίου B2

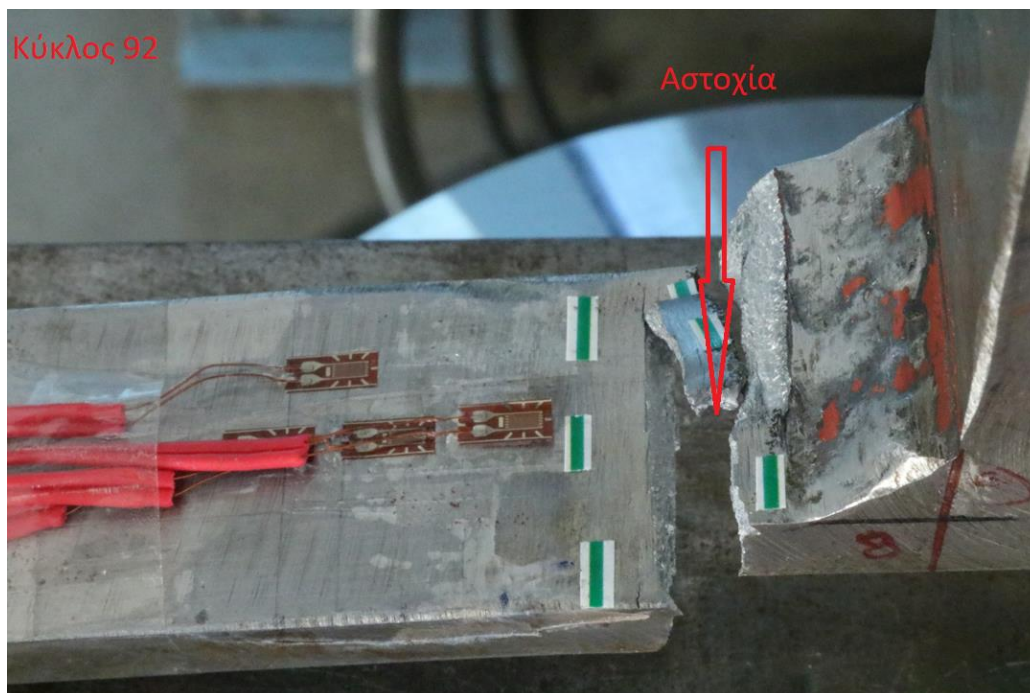
### Δοκίμιο B3

Στο δοκίμιο B3 η ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία πρωτοεμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 22<sup>ου</sup> κύκλου (βλ. εικόνα 33) και η τελική αστοχία επήλθε στον 92<sup>ο</sup> κύκλο (βλ. εικόνα 34). Η ρωγμή ξεκίνησε στον πόδα της συγκόλλησης στην ΘΕΖ και διαδόθηκε μέσω του ΒΜ μέχρι την τελική αποκόλληση. Δευτερεύουσες ρωγμές παρατηρήθηκαν στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου σε απόσταση 2 mm από την ΕΘ της το ΒΜ και σε απόσταση 0.8 mm από την ΕΘ της το ΜΣ. Στην κάτω επιφάνεια εντοπίστηκε ρωγμή σε απόσταση 4.5 mm από την ΕΘ της το ΒΜ (βλ. εικόνα 37). Στις εικόνες 35 και 36 παρουσιάζονται η μακροδομή και η μικροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B3 αντίστοιχα.

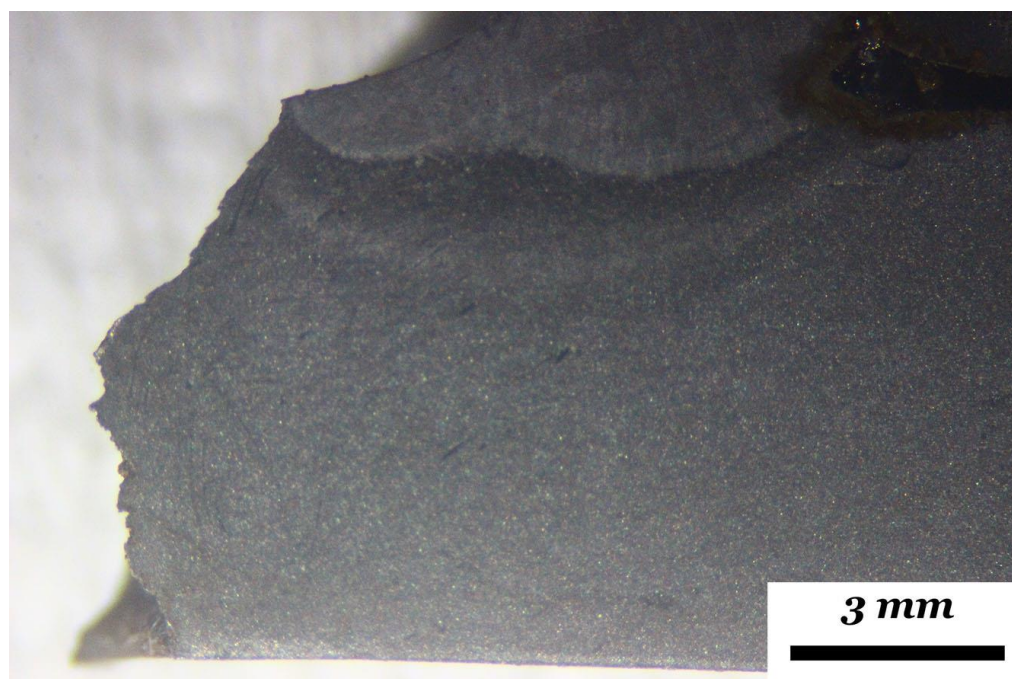


Εικόνα 33. Εμφάνιση ρωγμής του δοκιμίου B3 τον 22<sup>ο</sup> κύκλο

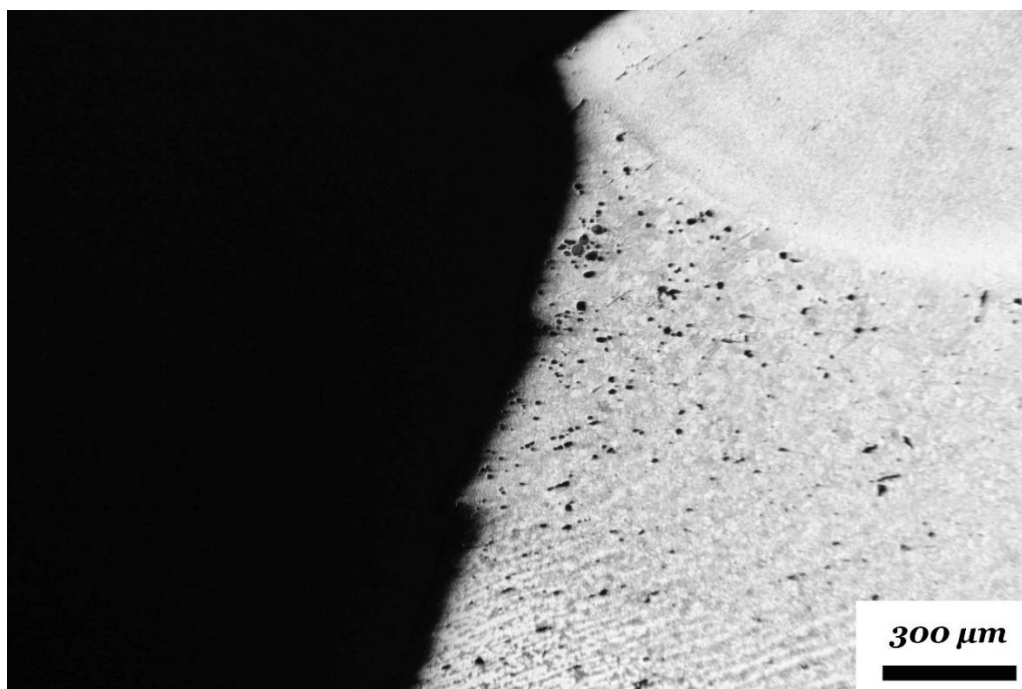




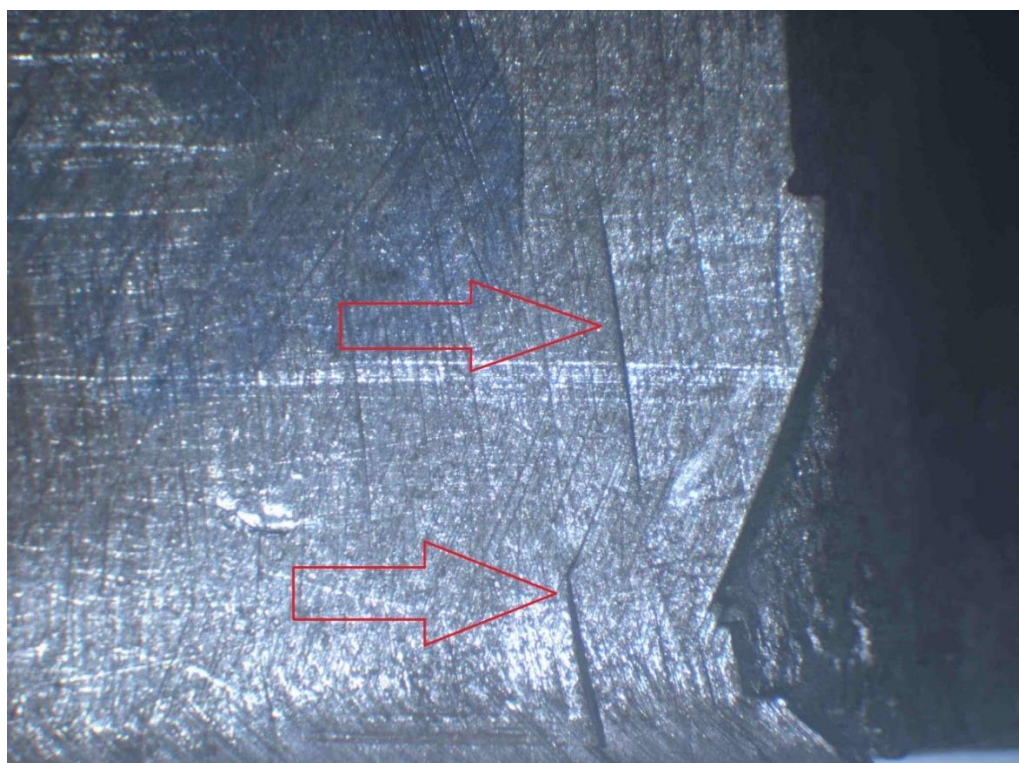
Εικόνα 34. Τελική αστοχία του δοκιμίου B3 κατά την διάρκεια του 92<sup>ου</sup> κύκλου



Εικόνα 35. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B3



Εικόνα 36. Μικροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου Β3

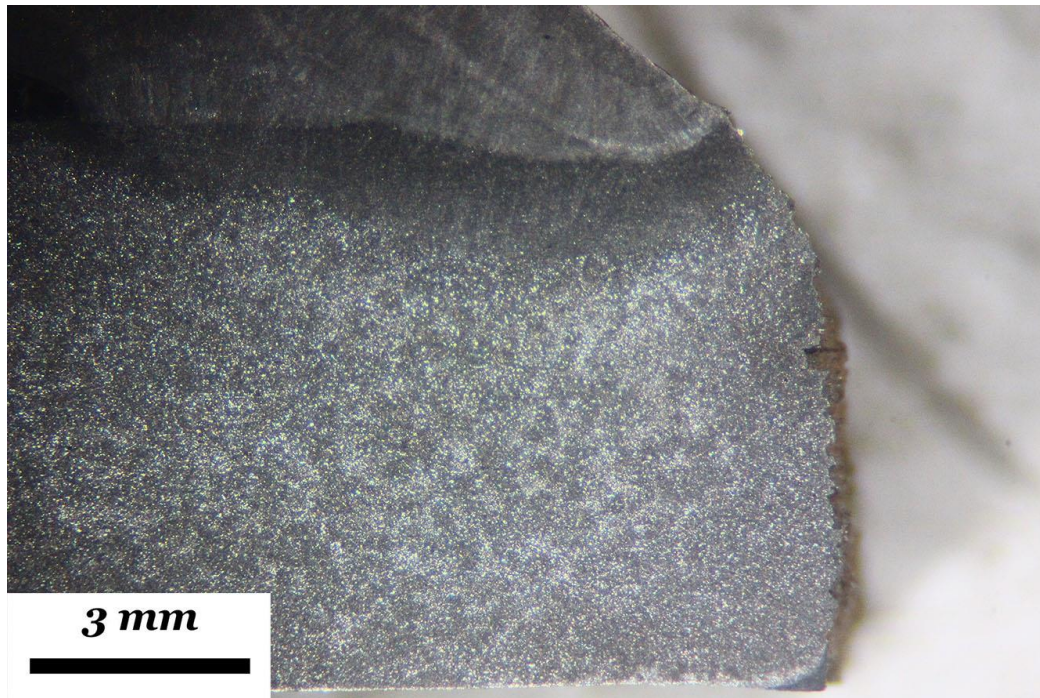


Εικόνα 37. Ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου Β3

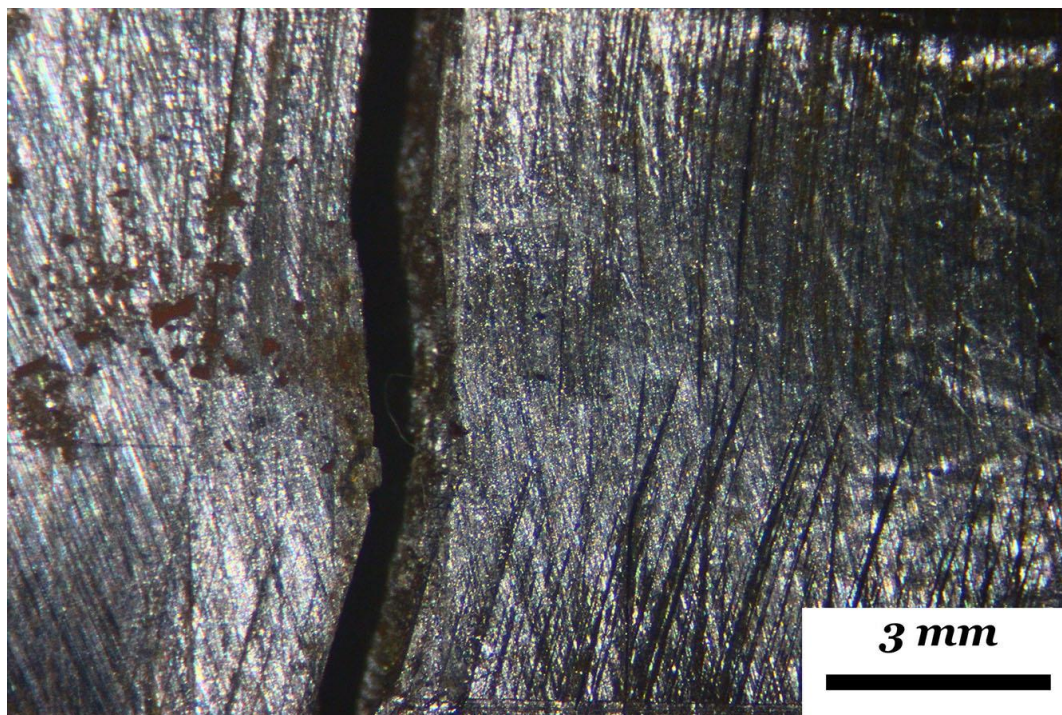


### Δοκίμιο B5

Στο δοκίμιο B5 η βασική ρωγμή εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 7<sup>ου</sup> κύκλου και η τελική αστοχία συνέβει κατά τον 58<sup>ο</sup> κύκλο. Δευτερεύουσες ρωγμές εντοπίστηκαν μόνο στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου σε απόσταση 3.6 mm από την ΕΘ προς τον ΒΜ και σε απόσταση 2.7 mm από την ΕΘ προς το ΜΣ (βλ. εικόνα 39). Στην εικόνα 38 παρουσιάζεται η μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B5.



*Εικόνα 38. Μακροδομή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου B5*



*Εικόνα 39. Ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου B5*

## Κεφάλαιο 5. Συζήτηση / Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι οι αυχενικές συνδέσεις είναι ικανές να αντέξουν έναν σημαντικό αριθμό κύκλων φόρτισης μέχρι να μειωθεί η αντοχή τους, ακόμα και μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής τα δοκίμια ήταν ικανά να αντέξουν αρκετούς κύκλους φόρτισης ωσότου αστοχήσουν. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν εξαιτίας ρωγμών που οφείλονται στην κόπωση της σύνδεσης. Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν και εξελίχθηκαν γειτνιακά του πόδα της συγκόλλησης στην βάση της σύνδεσης που οδήγησαν σε αστοχία και πλήρη αποκόλληση του 'κελύφους' από την βάση της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα οι ρωγμές αναπτύχθηκαν είτε εξ' ολοκλήρου στο BM, στα δοκίμια B1, B2 και A3, είτε στην ΘΕΖ, όπως παρατηρήθηκε στα δοκίμια B3, B5, A2, A4 και A5. Παρόλα αυτά σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκαν και δευτερεύουσες ρωγμές, που αναπτύχθηκαν παράλληλα της βασικής, περιορισμένες σε ένα εύρος 2.68 mm από την άνω επιφάνεια και μία ζώνη πλάτους 4.11mm από την κάτω επιφάνεια. Επιπλέον τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι τα ελαττώματα στην συγκόλληση είναι ικανά να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή και την απόδοση της κατασκευής. Στο δοκίμιο B5 η αρχική γεωμετρία της συγκόλλησης δεν ήταν σωστή και υπήρχε μια ατέλεια στο πόδα της συγκόλλησης που είχε ως αποτέλεσμα το δοκίμιο να έχει σημαντικά μικρότερο χρόνο ζωής σε σχέση με τα υπόλοιπα. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο δοκίμιο A5 στο οποίο αναπτύχθηκε ρωγμή απ' την αρχή του πειράματος εξαιτίας ατέλειας της που προϋπήρχε στον πόδα της συγκόλλησης. Το μέγεθος των ατελειών είναι εντός αλλά πολύ κοντά στα όρια των σχετικών προτύπων [19,20]. Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια.

Πίνακας 6. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων

| Δοκίμιο | Περιοχή έναρξης ρωγμής | Διάδοση ρωγμής | Δευτερεύουσες ρωγμές κόπωσης                                                      |
|---------|------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| A2      | ΘΕΖ                    | ΘΕΖ            | ΚΕ:4mm από ΕΘ προς ΒΜ                                                             |
| A3      | ΒΜ                     | ΒΜ             | ΑΕ: 2.6mm από ΕΘ προς ΒΜ<br>ΚΕ: 3.8mm από ΕΘ προς ΜΣ                              |
| A4      | ΘΕΖ                    | ΘΕΖ            | ΑΕ: 2mm από ΕΘ προς ΜΣ<br>ΚΕ: 2.6mm από ΕΘ προς ΒΜ / 0.8mm από ΕΘ προς ΜΣ         |
| A5      | ΘΕΖ                    | ΘΕΖ            | ΚΕ: 1.7mm από ΕΘ προς ΒΜ / 1.4mm από ΕΘ προς ΜΣ                                   |
| B1      | ΒΜ                     | ΒΜ             | ΑΕ: 2.6mm από ΕΘ προς ΒΜ / 0.8mm από ΕΘ προς ΜΣ<br>ΚΕ: 2.8mm-4.3mm από ΕΘ προς ΒΜ |
| B2      | ΒΜ                     | ΒΜ             | ΚΕ:4mm από ΕΘ προς ΒΜ<br>Πλάτος: 4.6mm                                            |
| B3      | ΘΕΖ                    | ΒΜ             | ΑΕ: 2mm από ΕΘ προς ΒΜ / 0.8mm από ΕΘ προς ΜΣ<br>ΚΕ: 4.5mm από ΕΘ προς ΒΜ         |
| B5      | ΘΕΖ                    | ΘΕΖ            | ΚΕ: 3.6mm από ΕΘ προς ΒΜ / 2.7mm από ΕΘ προς ΜΣ                                   |

## Βιβλιογραφία

1. G. Chatzopoulou, S.A. Karamanos, A.D. Zervaki, Low-cycle fatigue of fillet-welded steel plate connections, *Journal of Constructional Steel Research* , 176, 2021.
2. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Βασίλης Παπάζογλου, *‘Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων’*, Τζιόλα (2017)
3. S.J. Maddox, Status review on fatigue performance of fillet welds, *J. Offshore Mech. Arctic Eng.* 130 (2018)pp. 031006-1-10.
4. R. Peek, Analysis of unanchored liquid storage tanks under lateral loads, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 16 (7) (1988) 1087–1100
5. S. Natsiavas, C.D. Babcock, Behavior of unanchored fluid-filled tanks subjected to ground excitation, *J. Appl. Mech.* 55 (3) (1988) 654–659
6. G.S. Leon, E.A.M. Kausel, Seismic analysis of fluid storage tanks, *J. Struct. Eng. ASCE* 112 (1) (1986) 1–18.
7. F.D. Fischer, F.G. Rammerstorfer, W. Schreiner, The extensible uplifted strip, *Acta Mech.* 80 (1989) 227–257.

8. P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, Beam model for base-uplifting analysis of cylindrical tanks, J. Struct. Eng. ASCE 120 (12) (1994) 3471–3488.
9. P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, Uplifting analysis of base plates in cylindrical tanks, J. Struct. Eng. ASCE 120 (12) (1994) 3489–3505.
10. P.K. Malhotra, A.S. Veletsos, Uplifting response of unanchored liquid-storage tanks, J. Struct. Eng. ASCE 120 (12) (1994) 3525–3547
11. Τριανταφυλλίδης, Γ.Κ., *‘Μεταλλογνωσία’*, Εκδόσεις Τζιόλα, 3<sup>η</sup> έκδοση (2016).
12. Διαμαντόπουλος, Κ., *‘Υλικά και η συμπεριφορά τους κατά τη συγκόλληση’*, Ελληνικό ινστιτούτο συγκολλήσεων, Έκδοση 02.01.00, 2018.
13. ΕΛΟΤ EN ISO 5817, Welding - Fusion – Welded joints in steel, nickel , titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfection
14. BS EN 1043-1, Destructive test on welds in metallic materials hardness testing part 1: Hardness test on arc welded joints
15. EN ISO 15614, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – welding procedure test – Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys
16. CSN EN 14015, Specification for the design and manufacture of site built , vertical , cylindrical, flat-bottomed , above ground , welded , steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above
17. EN 25817 Arc-welded joints in steel – Guidance on quality levels of imperfection
18. ISO/TS 20273 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength
19. ISO 6520-1, Welding and Allied Processes — Classification of Geometric Imperfections in Metallic Materials — Part 1: Fusion Welding, 2007.
20. EN ISO 5814, Welding - Fusion-Welded Joints in Steel, Nickel, Titanium and their Aloys (Beam Welding Excluded) - Quality Levels for Imperfections (ISO 5817:2014), 2014



21. CSN EN 14015, Specification for the design and manufacture of site built , vertical , cylindrical, flat-bottomed , above ground , welded , steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above