

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση συμπεριφοράς κόπωσης αεροπορικού κράματος Al 2195 με διαμήκη συγκόλληση δια τριβής και ανάμιξης (FSW)**



**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Δημήτρης Κουλίδης**

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

Βόλος, 2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8650/1  
Ημερ. Εισ.: 10-08-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2010  
ΚΟΥ

© 2010 ΚΟΥΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

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

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη  
(Επιβλέπων)

Δεύτερος Εξεταστής Καθηγητής. Γρηγόρης Ν. Χαιδεμενόπουλος

Τρίτος Εξεταστής Λέκτορας Αλέξιος Κερμανίδης

© 2010 ΚΟΥΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

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

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Δόκτωρ κ. Άννα Ζερβάκη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Γρηγόρη Χαιδεμενόπουλο και Λέκτορα Αλέξιο Κερμανίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Δέσποινα Γιαμαλάκη για την πολύτιμη βοήθειά της στην εργασία αλλά κυρίως για την ψυχολογική υποστήριξη της τον τελευταίο καιρό. Επίσης ευχαριστώ τη φίλη μου Δέσποινα Βριάμη, τους φίλους μου Τάσο Ποτέα και Κώστα Αθανασιάδη και τον ξαδερφό μου Κώστα Σπυριδόπουλο για την ηθική υποστήριξή τους.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Γιάννη Κουλίδη και Δέσποινα Σπυροπούλου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου Γιάννη και Δέσποινα.

Δημήτρης Κουλίδης

**Διερεύνηση συμπεριφοράς κόπωσης αεροπορικού κράματος Al 2195 με διαμήκη συγκόλληση διά τριβής και ανάμιξης (FSW)**

**ΚΟΥΛΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής: Καθηγητής Γρηγόρης Ν. Χαιδεμενόπουλος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά σε κόπωση του κράματος Al-Cu-Li-Ag 2195, στο οποίο εφαρμόστηκε διαμήκης συγκόλληση διά τριβής και ανάμιξης FSW, με μεταλλογραφική ανάλυση των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων κόπωσης, προκειμένου να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που προκαλούν την αστοχία του υλικού. Τα δοκίμια αξιολογήθηκαν με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης και να εντοπιστούν οι περιοχές έναρξης, και διάδοσης των ρωγμών κόπωσης. Διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια εμφανίζουν τις χαρακτηριστικές περιοχές κόπωσης μέσα στην περιοχή της συγκόλλησης. Η έναρξη των ρωγμών κόπωσης γίνεται σε περιοχές χαμηλής σκληρότητας, όπου και παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση πρωτογενών φάσεων (dispersoids) για τα δοκίμια P2P ενώ για τα δοκίμια P2E η έναρξη των ρωγμών κόπωσης εντοπίζεται σε διάκενα των δοκιμίων τα οποία δημιουργήθηκαν κατά τη συγκόλληση FSW.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ.....	11
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗ (FSW).....	13
2.1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	13
2.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....	16
2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FSW.....	17
2.2 ΚΟΠΩΣΗ.....	19
2.3 ΚΡΑΜΑΤΑ AL.....	21
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	22
3.1 ΥΛΙΚΑ.....	22
3.2 ΚΟΠΗ.....	26
3.3 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	26
3.4 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ.....	26
3.5 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	27
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	28
4.1 ΟΜΑΔΑ Α: ΔΟΚΙΜΙΑ P2P.....	28
4.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΚΡΟΔΟΜΗΣ - ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	28
4.1.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	40
4.1.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	47
4.2 ΟΜΑΔΑ Β: ΔΟΚΙΜΙΑ P2E.....	53
4.2.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.....	53
4.2.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
4.2.3 ΠΡΟΦΙΛ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ P2E.....	63
4.3 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	69

4.3.1 ΔΟΚΙΜΙΑ P2P .....	69
4.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ P2E .....	70
<b>5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>71</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ:

### Κεφάλαιο 2

- **Σχήμα.2.1** : Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της FSW..... 13
- **Σχήμα.2.2** : Απεικόνιση μηχανής FSW..... 14
- **Σχήμα 2.3** : Απεικόνιση μηχανής FSW..... 14
- **Σχήμα.2.4:** (a)Χαρακτηριστικές ζώνες συγκόλλησης FSW στο κράμα Al 2024 (b) Βασικό μέταλλο, (c) TMAZ [8]..... 15
- **Σχήμα 2.5:** Τυπική μικροδομή ενός 2195-T8 FSW [9]..... 15
- **Σχήμα 2.6:** Αριστερά το αεροσκάφος Eclipse 500 business-class jet και δεξιά φαίνονται οι διαμήκεις και περιφερειακές δοκοί και οι ενισχύσεις στις πόρτες και τα παράθυρα του τζέτ , οι οποίες έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο FSW [10]..... 18
- **Σχήμα 2.7:** Αριστερά φαίνεται η εξέλιξη της διαδικασίας FSW, σε τμήμα της εξωτερικής δεξαμενής υγρού υδρογόνου διαστημικού λεωφορείου. Δεξιά: Δεξαμενή υγρού υδρογόνου στις εγκαταστάσεις της NASA..... 18
- **Σχήμα 2.8:** Η κεντρική δοκίδα από το πλαίσιο του αυτοκινήτου Ford GT, η οποία είναι συγκολλημένη με FSW [10]..... 19
- **Σχήμα 2.9:** Χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης..... 20

### Κεφάλαιο 3

- **Σχήμα 3.1:** Διάταξη δοκιμών συγκόλλησης FSW..... 22
- **Σχήμα 3.2:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείου FSW..... 23
- **Σχήμα 3.3:** Σχεδιάγραμμα θερμικής κατεργασίας AA2195..... 23
- **Σχήμα 3.4:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών κόπωσης..... 24
- **Σχήμα 3.5:** Δοκίμιο κόπωσης P2E6..... 24

### Κεφάλαιο 4:

- **Σχήμα 4.1:** Μακροδομή FSW P2P..... 27
- **Σχήμα 4.2:** Μικροδομή ζώνης ανάδευσης..... 28
- **Σχήμα 4.3:** Μικροδομή θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης..... 28
- **Σχήμα 4.4:** Σύνορο TMAZ και NZ..... 29
- **Σχήμα 4.5:** Σύνορο TMAZ και NZ..... 29
- **Σχήμα 4.6:** Σύνορο TMAZ και NZ..... 29
- **Σχήμα 4.7:** Μικροδομή HAZ..... 30
- **Σχήμα 4.8:** Μικροδομή BM..... 30
- **Σχήμα 4.9:** Περιοχή Βασικού Μετάλλου, τοπική χημική ανάλυση..... 31

- **Σχήμα 4.10:** Χημική ανάλυση Δειγματος I στο βασικό μέταλλο..... 31
- **Σχήμα 4.11:** περιοχές χημικής ανάλυσης στην ζώνη ανάδευσης.....32
- **Σχήμα 4.12:** Χημική ανάλυση στο σωματίδιο διασποράς..... 33
- **Σχήμα 4.13:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της N.Z..... 33
- **Σχήμα 4.14:** Μικροδομή TMAZ..... 35
- **Σχήμα 4.15:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 1).....35
- **Σχήμα 4.16:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 2).....36
- **Σχήμα 4.17:** Χημική ανάλυση σε φάση διασποράς(Δείγμα 3).....36
- **Σχήμα 4.18:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 ( $\sigma_{max} = 266, N_f = 120.781$ ).....39
- **Σχήμα 4.19:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη ζώνη ανάδευσης.....39
- **Σχήμα 4.20:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη.....40
- **Σχήμα 4.21:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη ζώνη ανάδευσης..... 40
- **Σχήμα 4.22:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 ( $\sigma_{max} = 222, N_f = 655.260$ )..... 41
- **Σχήμα 4.23:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 στην NZ..... 41
- **Σχήμα 4.24:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 στο σύνορο TMAZ – NZ..... 42
- **Σχήμα 4.25:** Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη.....42
- **Σχήμα 4.26:** Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) στο P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη.....43
- **Σχήμα 4.27:**Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη.....43
- **Σχήμα 4.28:**Αυλακώσεις κόπωσης κοντά στην έναρξη θραύσης του P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη.....44
- **Σχήμα.4.29:** Επιφάνεια θραύσης P2P3 ( $\sigma_{max} = 222, N_f = 207.991$ )..... 44
- **Σχήμα 4.30:** Επιφάνεια θραύσης P2P6 ( $\sigma_{max} = 200, N_f = 255.470$ )..... 45
- **Σχήμα 4.31:** Επιφάνεια θραύσης P2P10 ( $\sigma_{max} = 200, N_f = 267.260$ )..... 45
- **Σχήμα 4.32:** Επιφάνεια θραύσης P2P11 ( $\sigma_{max} = 177, N_f = 944.265$ )..... 46
- **Σχήμα 4.33:**Περιοχές τομών Μεταλλογραφικών δοκιμίων..... 46
- **Σχήμα 4.34:** Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου μικροσκληρομέτρησης....47
- **Σχήμα 4.35:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P1 σε βάθος 0.5 και 6 mm..... 48
- **Σχήμα 4.36:** Σχηματική παράσταση μικροσκληρότητας κάθετης τομής P2P1..... 48

- **Σχήμα 4.37:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P2 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....49
- **Σχήμα 4.38:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P3 σε βάθος 0.5 και 6 mm..... 49
- **Σχήμα 4.39:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P4 σε βάθος 0.5 και 6 mm..... 50
- **Σχήμα 4.40.:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P6 σε βάθος 0.5 και 6 mm..... 50
- **Σχήμα 4.41.:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P9 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....51
- **Σχήμα 4.42:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P10 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....51
- **Σχήμα 4.43:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P11 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....52
- **Σχήμα 4.44:** Μακροδομή FSW.....52
- **Σχήμα. 4.45:** Μικροδομή N.Z, ισοαξονικοί κόκκοι.....53
- **Σχήμα 4.46:** Μικροδομή TMAZ, επιμηκυμένοι κόκκοι.....53
- **Σχήμα 4.47:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης.....54
- **Σχήμα 4.48:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης που έχει διαδοθεί η ρωγμή.....55
- **Σχήμα 4.49:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης.....55
- **Σχήμα.4.50:** Επιφάνεια θραύσης P2E2 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 1.394.606$ )..... 56
- **Σχήμα.4.51:** Επιφάνεια θραύσης P2E4 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 180.148$ ).....56
- **Σχήμα.4.52:** Επιφάνεια θραύσης P2E5 ( $\sigma_{max} = 266$ ,  $N_f = 109.126$ ).....57
- **Σχήμα. 4.53:** Επιφάνεια θραύσης P2E6 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 1.338.871$ ).....57
- **Σχήμα. 4.54:** Επιφάνεια θραύσης P2E7 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 73.316$ ).....58
- **Σχήμα 4.55:** Εναρξη ρωγμής κόπωσης σε ασυνέχεια.....58
- **Σχήμα.4.56:** Έναρξη ρωγμής κόπωσης.....59
- **Σχήμα 4.57:** Διάδοση ρωγμής στην ζώνη ανάδευσης. Περικρυσταλλική θραύση.....59
- **Σχήμα 4.58:** Επιφάνεια θραύσης P2E8 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 376.432$ )..... 60
- **Σχήμα 4.59:** Επιφάνεια θραύσης P2E10 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 296.652$ )..... 60
- **Σχήμα 4.60:** Επιφάνεια θραύσης P2E12 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 99.673$ ).....61
- **Σχήμα 4.61:** Επιφάνεια θραύσης P2E12 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 99.673$ ).....61
- **Σχήμα 4.62:** Σχηματική αναπαράσταση της ασυνέχειας όλων των P2E στην πλευρά του υλικού διέλασης.....62
- **Σχήμα. 4.63.:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E1 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....63
- **Σχήμα. 4.64:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E2 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....63
- **Σχήμα 4.65.:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E4σε βάθος 0.5 και 6 mm..... 64
- **Σχήμα 4.66:** Μικροσκληρότητα δοκιμίου P2E4 κάθετης τομής..... 64

- **Σχήμα 4.67:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E5 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....65
- **Σχήμα 4.68:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E6 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....65
- **Σχήμα 4.69:** προφίλ μικροσκληρότητας P2E7 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....66
- **Σχήμα 4.70:** Μικροσκληρότητας δοκιμίου P2E7 κάθετης τομής.....66
- **Σχήμα 4.71:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E8 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....67
- **Σχήμα 4.72:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E10 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....67
- **Σχήμα.4.73:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E12 σε βάθος 0.5 και 6 mm.....68

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ:**

### Κεφάλαιο 3

- **Πίνακας 3.1:** Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2195 (%κ.β.).....22
- **Πίνακας 3.2:** Δείγματα P2P.....25
- **Πίνακας 3.2:** Δείγματα P2E.....25

### Κεφάλαιο 4

- **Πίνακας 4.1:** Χημική σύσταση βασικού μετάλλου.....32
- **Πίνακας 4.2:** Χημική σύσταση σωματιδίου.....34
- **Πίνακας 4.3:** Χημική σύσταση μήτρας ζώνης ανάδευσης.....34
- **Πίνακας 4.4:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 1).....37
- **Πίνακας 4.5:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 2).....37
- **Πίνακας 4.6:** Χημική ανάλυση σε φάση διασποράς(Δείγμα 3).....38

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ

Τα τελευταία χρόνια οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για βελτίωση της ποιότητας καθώς και της αντοχής των κατασκευών οδηγούν στην ανάπτυξη νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες καθώς και σε εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων για την συγκόλλησή τους.

Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW), επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε το 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute – TWI) [1]. Πρόκειται για μια κατεργασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κατά την οποία ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο (Εργαλείο Συγκόλλησης – Welding Tool) με ειδικά σχεδιασμένο πείρο (Pin) και κατάλληλο περιανχένιο (Shoulder), βυθίζεται στις επαπτόμενες ακμές των καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής σύνδεσης. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργείται θερμότητα, λόγω τριβής μεταξύ του περιστρεφόμενου εργαλείου συγκόλλησης και των υπό συγκόλληση τεμαχίων η οποία ανεβάζει τη θερμοκρασία στο 80% - 90% του σημείου τήξης αυτών. Ταυτόχρονα, το τοπικά πλαστικοποιημένο υλικό αναδεύεται από τον περιστρεφόμενο και κινούμενο πείρο του εργαλείου συγκόλλησης δίνοντας ραφές συγκόλλησης υψηλής ποιότητας χωρίς ατέλειες ή ελαττώματα.

Η νέα αυτή μέθοδος συγκόλλησης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και χρησιμοποιείται ήδη σε αεροπορικές κατασκευές, η εφαρμογή της όμως περιορίζεται σε περιοχές οι οποίες καταπονούνται σε θλιπτικά φορτία, λόγω αδυναμίας πρόβλεψης της συμπεριφοράς κόπωσης των συγκολλημένων με τη μέθοδο αυτή υλικών. Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός εργασιών οι οποίες παρουσιάζουν πειραματικά αποτελέσματα από μηχανικές δοκιμές σε συγκολλημένα δια τριβής και ανάμιξης υλικά [2,3,4,5, 7,8,9,10,13,14]. Αντίστοιχες εργασίες που να αφορούν κράματα Al-Li, όπως το κράμα 2195 είναι σχετικά περιορισμένες. Τα κράματα Al-Li πλεονεκτούν σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου σε ορισμένες πολύ σημαντικές ιδιότητες, όπως η χαμηλότερη πυκνότητα, το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και οι υψηλότερες ειδικές ιδιότητες αντοχής [6]. Εργασίες που να αφορούν τη συμπεριφορά σε κόπωση συγκολλημένου δια τριβής και ανάμιξης κράματος 2195 δεν εντοπίστηκαν.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση του κράματος Al-Li 2195 με διαμήκη συγκόλληση και η μεταλλογραφική ανάλυση των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων κόπωσης προκειμένου να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που προκαλούν την αστοχία του υλικού.

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν -στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος COINS- στην Airbus (Γερμανία), και οι δοκιμές κόπωσης στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Παν. Πάτρας.

Στο Εργαστήριο Υλικών αξιολογήθηκαν μεταλλογραφικά τα δοκίμια έπειτα από τις δοκιμές κόπωσης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να προσδιοριστεί ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης, και κατά συνέπεια να εξηγηθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών, περιλάμβανε μελέτη των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων με στερεοσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία, ώστε να προσδιοριστεί το σημείο έναρξης της κόπωσης και να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά της διαδρομής των ρωγμών κόπωσης στα δείγματα. Σε επιλεγμένα δοκίμια πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφία και μικροσκληρομετρήσεις σε εγκάρσιες τομές

προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της μικροδομής στις περιοχές έναρξης των ρωγμών κόπωσης.

Η εργασία αναπτύσσεται στα εξής Κεφάλαια:

- Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και παρουσίαση των σύγχρονων απόψεων στο θέμα (State of the art) στο Κεφ. 2.
- Περιγραφή της Πειραματικής διαδικασίας στο Κεφ. 3.
- Αποτελέσματα & Συζήτηση Αποτελεσμάτων στο Κεφ. 4.
- Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα στο Κεφ. 5.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

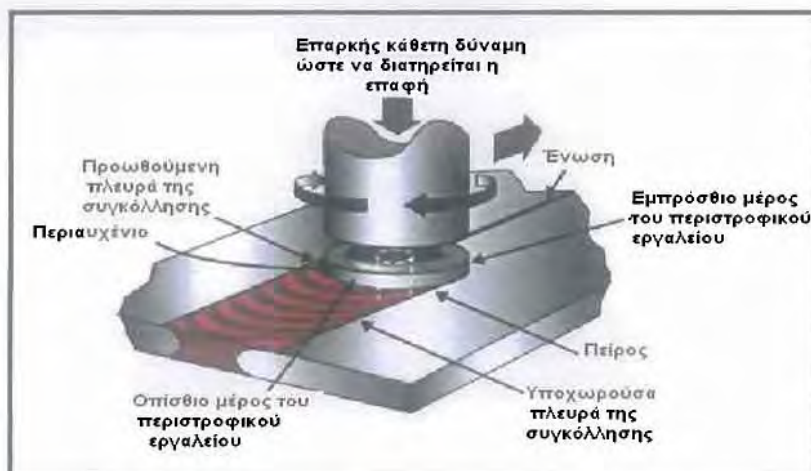
Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει την περιγραφή της μεθόδου FSW και τις εφαρμογές αυτής, την παρουσίαση του κράματος 2195 καθώς και της μηχανικής καταπόνησης της κόπωσης.

### 2.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΡΙΒΗ (FSW)

#### 2.1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η τεχνική της τριβής με ανάδευση είναι μία κατεργασία στερεάς κατάστασης, η οποία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης του κατεργαζόμενου υλικού [2].

Τα προς συγκόλληση τεμάχια πακτώνονται σε σταθερή θέση και ένα κατάλληλα διαμορφωμένο στην άκρη του περιστρεφόμενου εργαλείου προωθείται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης παράγοντας τοπική θερμότητα λόγω τριβής με την εφαρμογή ενός περιουχένιου στην επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων (Σχ.2.1). Το εργαλείο παραμορφώνει το μέταλλο γύρω από τη γραμμή συγκόλλησης με τη χρήση ενός πείρου, απομακρύνοντας έτσι τα επιφανειακά οξειδία μέσω της μηχανικής ανάδευσης και παραμορφώνοντας πλαστικά το θερμό υλικό. Το αποτέλεσμα της πλαστικής παραμόρφωσης είναι η ανάδευση του υλικού που βρίσκεται κοντά στη γραμμή συγκόλλησης, με συνέπεια τη συγκόλληση των δύο τεμαχίων. Μηχανές FSW παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.2, 2.3.



Σχήμα.2.1: Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της FSW.



**Σχήμα.2.2:** Απεικόνιση μηχανής FSW



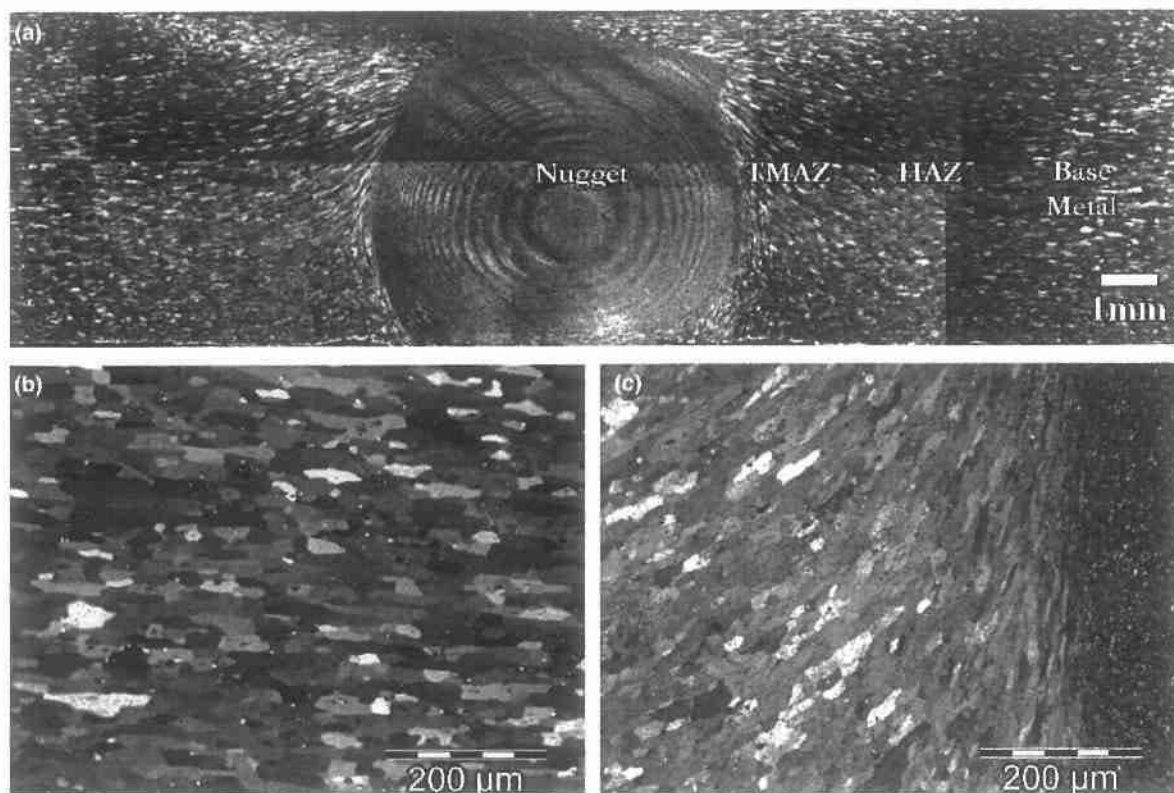
**Σχήμα 2.3:** Απεικόνιση μηχανής FSW

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι χαμηλότερες από το σημείο τήξης του υλικού, αρκετά υψηλές όμως ώστε να προκαλούν μετασχηματισμούς στερεάς κατάστασης στο συγκολλούμενο υλικό. Από τη μεταλλογραφική παρατήρηση συγκολλήσεων FSW προκύπτει ότι δημιουργούνται 3 χαρακτηριστικές διακριτές ζώνες (Σχήμα.2.4, 2.5). Στην περιοχή της επαφής του εργαλείου με το υπό συγκόλληση κράμα υπάρχει η ζώνη ανάδευσης, στη συνέχεια η θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και τέλος το ανεπηρέαστο από τη συγκόλληση υλικό του μετάλλου βάσης (Base Metal). Πιο συγκεκριμένα:

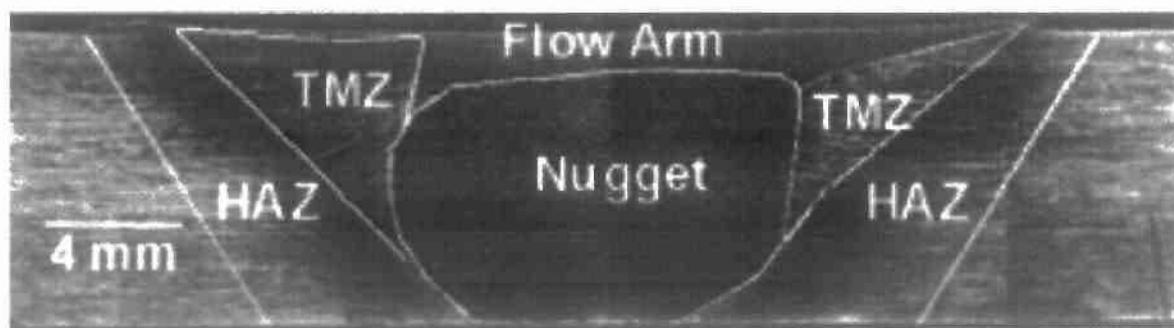
- Στην περιοχή της ζώνης ανάδευσης (nugget zone ή NZ), όπου η μέγιστη θερμοκρασία είναι  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ , η μικροδομή αποτελείται από λεπτόκοκκους ισοαξονικούς κόκκους με σύνορα υψηλής γωνίας. Η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή είναι αρκετά υψηλή και προκαλεί διαλυτοποίηση των φάσεων ισχυροποίησης. Το άνω μέρος της περιοχής αυτής ( flow arm zone) αποτελείται από το υλικό το οποίο είναι σε επαφή με το περιανυχένιο (shoulder).
- Στην θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (thermo mechanically affected zone ή TMAZ), όπου η μέγιστη θερμοκρασία είναι  $\sim 350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ , παρατηρείται έντονη παραμόρφωση της αρχικής μικροδομής (Σχ. 2c). Ο συνδυασμός της υψηλής θερμοκρασίας καθώς και της παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα χαμηλή σκληρότητα εξαιτίας της ανάπτυξης και διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης. Επιπροσθέτως, η πυκνότητα των αταξιών είναι υψηλή στην περιοχή αυτή.
- Στη Θερμικά Επηρεαζόμενη ζώνη (heat affected zone ή HAZ), όπου το υλικό επηρεάζεται μόνο από τη θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται:  $250^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ . Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η διαλυτοποίηση ή και η διεύρυνση των φάσεων ισχυροποίησης και κατά συνέπεια η σκληρότητα μειώνεται σε σχέση με τη σκληρότητα του βασικού μετάλλου.



Η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στην περιοχή της συγκόλλησης είναι  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ . Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας όπως υπολογίστηκε για το κράμα 2195 (με τη βοήθεια του λογισμικού ThermoCalc) η θερμοκρασία τήξης του είναι  $638^{\circ}\text{C}$ .



**Σχήμα.2.4:** (a)Χαρακτηριστικές ζώνες συγκόλλησης FSW στο κράμα Al 2024 (b) Βασικό μέταλλο, (c) TMAZ [8]



**Σχήμα 2.5:** Τυπική μικροδομή ενός 2195-T8 FSW [9]

## 2.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η τεχνική συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχει συγκεκριμένα και αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις γνωστές συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης [10]. Συγκεκριμένα:

- Η FSW καθιστά δυνατή τη συγκόλληση όλων των κραμάτων αλουμινίου αυτογενώς, καθώς και τη συγκόλληση πολλών ανόμοιων κραμάτων μεταξύ τους.
- Πρόκειται για διαδικασία στερεάς κατάστασης με αποτέλεσμα την απουσία τήξης υλικού κατά την πραγματοποίησή της. Ως επακόλουθο της μη τήξης υλικού κατά τη συγκόλληση είναι η απουσία ατελειών όπως το πορώδες, η ατελής τήξη, η θερμή ρωγμάτωση κ.α.
- Παράγει συγκολλήσεις με άριστες μηχανικές ιδιότητες και με πολύ χαμηλότερες στρεβλώσεις από ότι στις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης
- Τα συγκολλημένα τεμάχια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.
- Οι φυσικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων είναι περίπου ίδιες με αυτές του αρχικού υλικού.
- Διαθέτει το μεγαλύτερο εύρος πάχους συγκολλούμενων τεμαχίων (περίπου από 0,5 mm έως 75mm για κράματα αλουμινίου σειράς 6XXX) με εξαίρεση τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.
- Δεν απαιτείται η χρήση προστατευτικών αερίων ή μετάλλου προσθήκης με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν προβλήματα σχετιζόμενα με τη σύσταση μετάλλου προσθήκης, αφού πρόκειται για μία αυτογενή διαδικασία.
- Για την πραγματοποίησή της δεν χρειάζεται ειδική μηχανουργική κατεργασία προετοιμασίας των προς συγκόλληση τεμαχίων (όπως π.χ. δημιουργία λοξοτομής).
- Είναι πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος.
- Καταναλώνει χαμηλότερη ενέργεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.
- Μπορεί να αυτοματοποιηθεί εύκολα σε απλές φρέζες με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και μικρή απαίτηση εκπαίδευσης προσωπικού
- Το κόστος αναλωσίμων είναι χαμηλό αφού με το ίδιο εργαλείο μπορούν να συγκολληθούν 1000m αλουμινίου πριν χρειαστεί αλλαγή το εργαλείο συγκόλλησης.
- Είναι μέθοδος φιλική προς το περιβάλλον, αφού δεν παράγονται ρυπογόνα αέρια και δεν εκπέμπεται υπέρυθρη και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Πρόκειται μία από τις πιο ευέλικτες διαδικασίες συγκόλλησης, αφού μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε θέση (1-D, 2-D ή 3-D).

Ωστόσο υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα ου αξίζει να σημειωθούν:

- Ανεπαρκείς θερμοκρασίες συγκόλλησης, λόγω των χαμηλών στροφών ή υψηλές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα ασυνέχειας στα προς συγκόλληση τεμάχια, δυσκολία στην ανάμειξη κτλ.
- Κατά την έξοδο του εργαλείου μένει οπή στο υλικό
- Απαιτούνται μεγάλες δυνάμεις για να συγκρατήσουν τις πλάκες κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης

- Όχι τόσο ευέλικτη μέθοδος για μικρά πάχη υλικού .

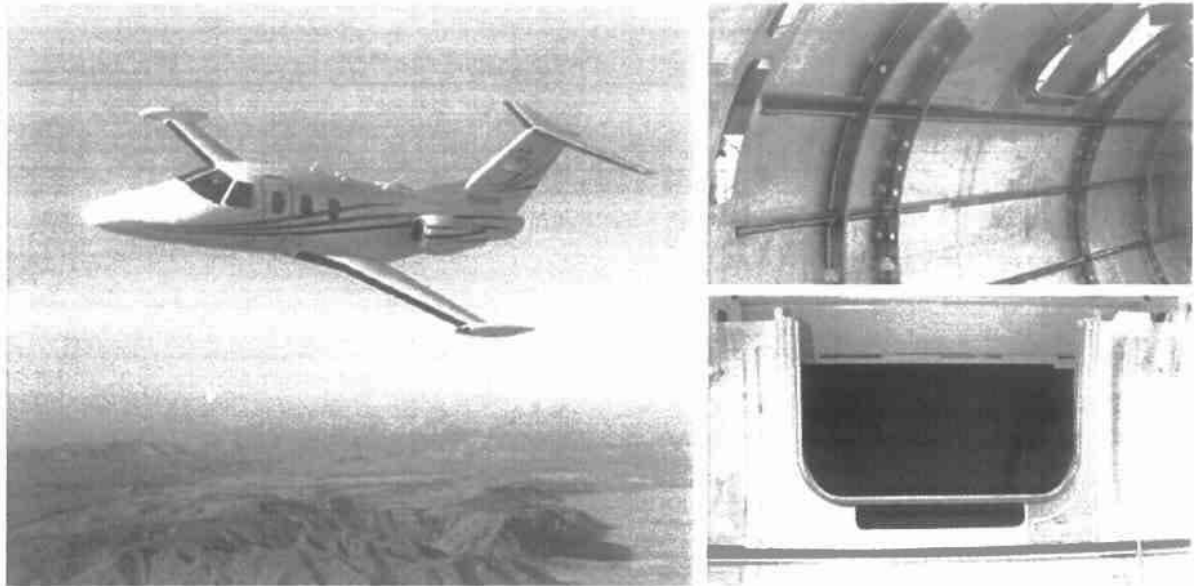
### 2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FSW

Η τεχνολογία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχει αναπτυχθεί σημαντικά από τότε που πρωτοεμφανίστηκε και πλέον εκτός από τις απλές μετωπικές συγκολλήσεις υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθούν και άλλου τύπου συνδέσεις, είτε αυχενικές είτε σημειακές είτε άλλης γεωμετρίας, σε μεγάλο εύρος πάχους υλικού, ανάλογα με τη γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιείται. Η ταχύτητα συγκόλλησης ποικίλλει για διαφορετικούς τύπους κραμάτων και για διαφορετικά πάχη αυτών και αρχίζει από τιμές 200 mm/min για σχετικά μεγάλου πάχους τεμάχια, ενώ φτάνει σε τιμές 1000 mm/min για λεπτά τεμάχια. Γενικά οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από συγκολλημένα δοκίμια με την FSW είναι πολύ καλύτερες από αυτές που προκύπτουν από τις συμβατικές τεχνικές συγκόλλησης, αφού κατά την πραγματοποίηση της FSW δεν παρατηρείται τήξη του υλικού και κατά συνέπεια δεν εμφανίζονται πολλά από τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την τήξη, όπως οι πόροι, η θερμή ρωγμάτωση και άλλα.

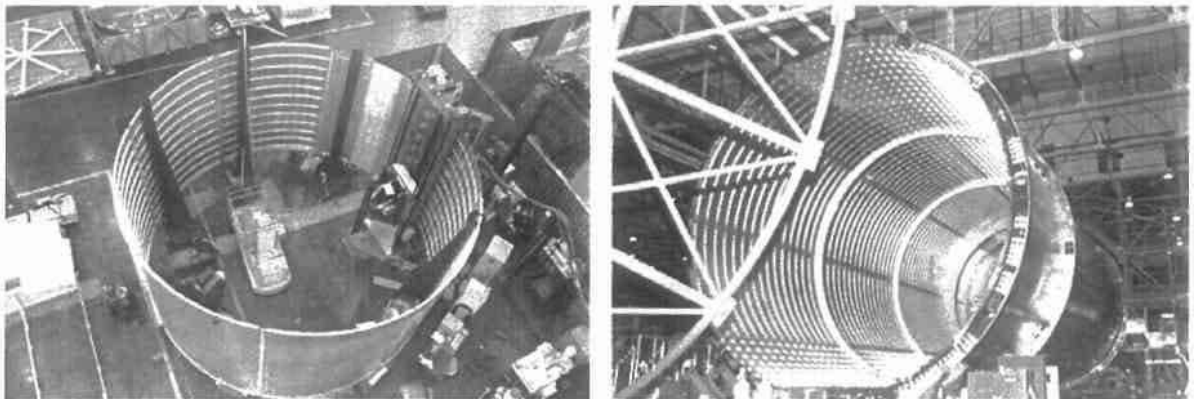
Η FSW αρχικά εφαρμόσθηκε στις βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως στη διαστημική ή αεροναυπηγική. Τα τελευταία χρόνια αρχίζει να περνά σε πιο θεμελιώδεις τομείς της βιομηχανίας όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία ή η ναυπηγική [2]. Η τεχνική αυτή πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων συγκόλλησης σε κατασκευές όπου είναι απαραίτητη η συγκόλληση ελασμάτων από διαφορετικό υλικό, όπως στην κατασκευή των πτερυγίων των αεροσκαφών (συγκόλληση πλαισίου 7449-T7951 ή 2027-T3511 με φλοιό πτερυγίου 7040-T7651) [7] και στην κατασκευή πλοίων (σκελετός πλοίου-AI σειρά 6000 με ελάσματα κελύφους AI-σειρά 5000) [8].

Αναλυτικότερα ανά βιομηχανική εφαρμογή:

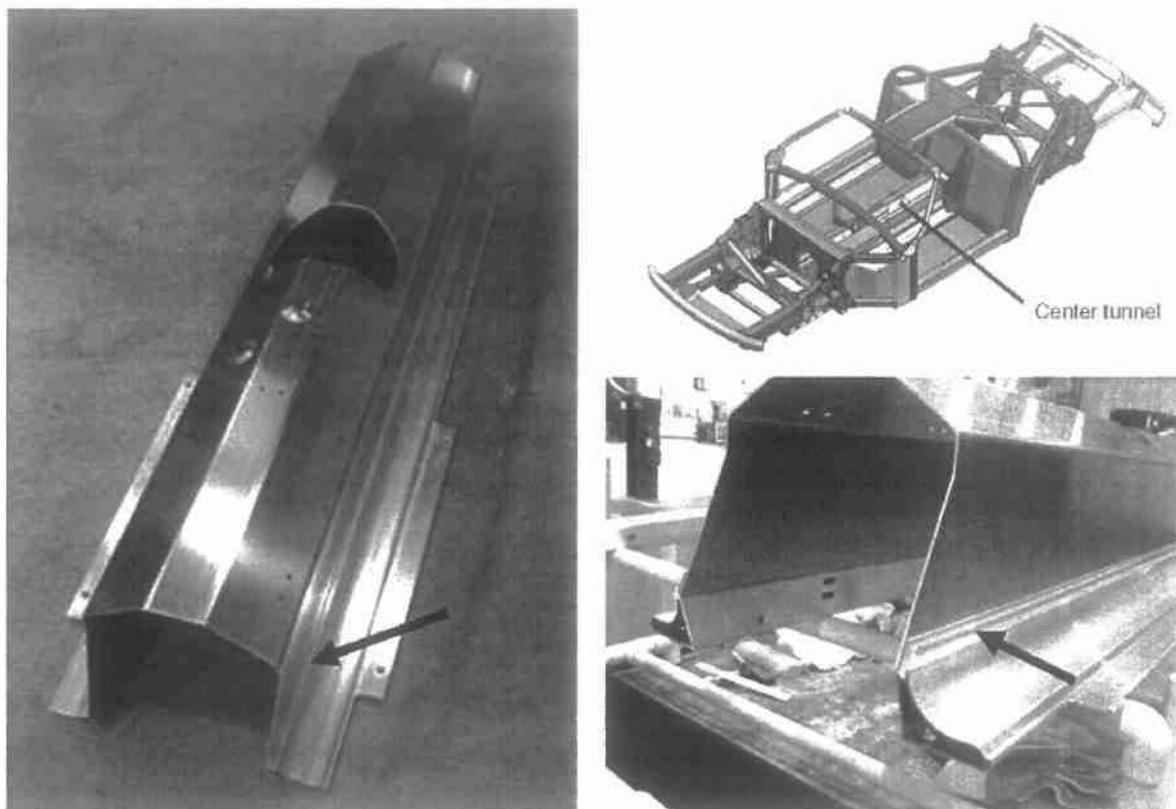
- Στη ναυπηγική βιομηχανία συγκεκριμένα σε πάνελ για τα καταστρώματα, πλευρές κτλ, σε ψυκτικές εγκαταστάσεις σε θαλάσσιες μεταφορές κ.α
- Αεροπορική βιομηχανία : Η μέθοδος έχει βρει εφαρμογή στην κατασκευή του Eclipse 500 που είναι ένα πολύ ελαφρύ αεροσκάφος όπου το ~ 60% των ηλώσεων αντικαθίστανται από συγκολλήσεις FSW ( βλ. Σχ.2.6). Αυτό προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις ηλώσεις όπως το μειωμένο κόστος παραγωγής και την εξοικονόμηση βάρους. Η FSW μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μηχανολογικών στοιχείων όπως: φτερά, άτρακτοι, κρουγονικές δεξαμενές καυσίμων για διαστημικά οχήματα (βλ Σχ.2.7), δεξαμενές καυσίμων αεροπορίας, στρατιωτικούς πυραύλους , καθώς και για την επισκευή ελαττωματικών συγκολλήσεων MIG.[10]
- Σιδηροδρομική βιομηχανία: σε τρένα μεγάλης ταχύτητας , σε κοντέινερ, σε δεξαμενές καυσίμου κ.α
- Αυτοκινητοβιομηχανία : ζάντες, αμαξώματα , βυτιοφόρα καυσίμων, συγκολλήσεις διαφορετικών πάχους μετάλλων κ.α ( βλ Σχ.2.8) [10]



**Σχήμα 2.6:** Αριστερά το αεροσκάφος Eclipse 500 business-class jet και δεξιά φαίνονται οι διαμήκεις και περιφερειακές δοκοί (πάνω δεξιά) και οι ενισχύσεις στις πόρτες και τα παράθυρα του τζέτ (πάνω αριστερά) , οι οποίες έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο FSW [10]



**Σχήμα 2.7:** Αριστερά φαίνεται η εξέλιξη της διαδικασίας FSW, στο διαστημικό κέντρο (Marshall Space Flight Center), σε τμήμα της εξωτερικής δεξαμενής υγρού υδρογόνου διαστημικού λεωφορείου (υλικό: Al 2195, διάμετρος 8.2 m), . Δεξιά: δεξαμενή υγρού υδρογόνου στις εγκαταστάσεις της NASA (National Aeronautics and Space Administration, εγκαταστάσεις συναρμολόγησης του Michoud στη Νέα Ορλεάνη)[10]



**Σχήμα 2.8:** Η κεντρική δοκίδα από το πλαίσιο του αυτοκινήτου Ford GT, η οποία είναι συγκολλημένη με FSW [10]

## 2.2 ΚΟΠΩΣΗ

Όπως είναι γνωστό σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές και μάλιστα σε τόσο σημαντικές όπως τις αεροπορικές κατασκευές τα πάντα θα πρέπει να λειτουργούν ‘σαν καινούρια (like new)’. Σε ένα αεροπλάνο οι δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται σε αυτό είναι μεγάλες και ποικίλες. Ένα φαινόμενο που λαμβάνει στα υλικά αυτών των κατασκευών και που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία είναι η **κόπωση**. Λόγω των συνεχών πτήσεων του αεροπλάνου ή της συνεχούς λειτουργίας ενός αυτοκινήτου η κατασκευή τίθεται σε κυκλική φόρτιση μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης φόρτισης. Κόπωση είναι η προοδευτική τοπική πλαστική παραμόρφωση και συσσώρευση βλάβης στο υλικό που περιλαμβάνει την δημιουργία και ανάπτυξη ρωγμών μέχρι την τελική θραύση.

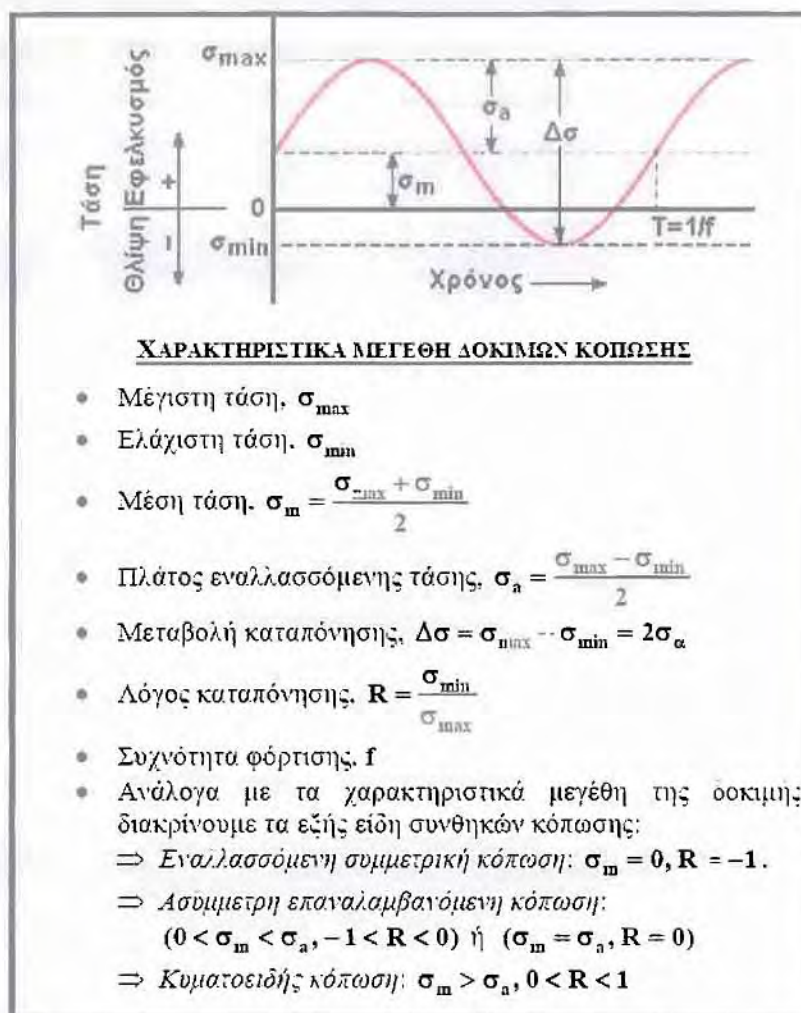
Η κόπωση (fatigue) είναι φαινόμενο αστοχίας ενός υλικού που οφείλεται σε επαναλαμβανόμενη επιβολή τάσεων ή παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά στην φόρτιση, η οποία είναι κυκλική, δηλαδή το υλικό υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η «βλάβη», που προκαλείται στο υλικό. Η βλάβη είναι ένας γενικός όρος που μπορεί να αντιστοιχεί σε τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, καθώς και σχηματισμό και διάδοση μιας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική, προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως από την

αύξηση του μήκους της ρωγμής. Η τελική, γρήγορη θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, έτσι ώστε να ικανοποιείται η κρίσιμη συνθήκη θραύσεως.

Έτσι ενώ στη στατική φόρτιση η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται με αύξηση της τάσεως, στην κόπωση η συνθήκη ικανοποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Ενώ στην στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση είναι ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο, έως ότου η ρωγμή αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος. Έτσι στην κόπωση μιλάμε για διάρκεια ζωής του υλικού. Την διάρκεια ζωής την μετράμε σε κύκλους φορτίσεως και την συμβολίζουμε με  $N_f$  [11]

Η αντοχή του υλικού εκφράζεται από το όριο διαρκούς αντοχής και την ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής. Ως **όριο διαρκούς αντοχής** στην πολυκυκλική κόπωση εννοούμε το πλάτος τάσεως κάτω από το οποίο το υλικό εμφανίζει άπειρη διάρκεια ζωής. Συνεπώς μας ενδιαφέρει να ξέρουμε κάτω από ποια τάση το εξεταζόμενο κράμα δεν θα έχει κανένα απολύτως πρόβλημα. Οι συγκολλητές κατασκευές επομένως θα πρέπει, να ικανοποιούν τις απαιτήσεις αντοχής σε κόπωση.

Στην πειραματική δοκιμή η μεταβολή επιβαλλόμενων τάσεων ή παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι συνήθως ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου, βάσει της οποίας προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστικά μεγέθη της δοκιμής κόπωσης

Για την εκτέλεση της δοκιμής κόπωσης αρχικά επιλέγεται η τιμή της μέσης τάσης  $\sigma_m$  (συνήθως είναι  $\sigma_m = 0$ ), η οποία διατηρείται σταθερή. Στη συνέχεια επιβάλλεται στο δοκίμιο ένα πλάτος  $\sigma_a$  της εναλλασσόμενης τάσης και καταγράφεται το πλήθος  $N$  των απαιτούμενων κύκλων φόρτισης για να αστοχήσει το δοκίμιο. Επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία για νέες τιμές  $\sigma_a$  και για ικανό αριθμό δοκιμών, οπότε λαμβάνεται μεγάλος αριθμός ζευγών  $(\sigma_a, N)$  και χαράσσεται η αντίστοιχη που διέρχεται από αυτά. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη Wohler ή καμπύλη S-N.

## 2.3 ΚΡΑΜΑΤΑ AL

Τα κράματα αλουμινίου είναι ιδιαίτερα σημαντικά τεχνολογικά και επιλέγονται για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική βιομηχανία) λόγω του εξαιρετικού συνδυασμού ιδιοτήτων μηχανικής αντοχής, αντοχής σε οξείδωση-διάβρωση και χαμηλής πυκνότητας που διαθέτουν. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για μεγάλο εύρος σύγχρονων εφαρμογών που περιλαμβάνουν από ταχύπλοα οχηματαγωγά τύπου catamaran και ως υλικά σε αεροπορικές κατασκευές έως υλικά συσκευασίας για τη βιομηχανία τροφίμων. Στην παρούσα εργασία μελετάται το κράμα AA2195 το οποίο ανήκει στη σειρά 2xxx.

Τα κράματα σειράς 2xxx είναι κράματα που το κύριο κραματικό στοιχείο τους είναι ο χαλκός. Ο χαλκός (Cu) είναι ένα από τα πιο σπουδαία κραματικά στοιχεία για το αλουμίνιο λόγω της δημιουργίας της φάσης  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ), οι μετασταθείς φάσεις της οποίας ισχυροποιούν τα κράματα της σειράς 2xxx μέσω της θερμικής κατεργασίας της γήρανσης. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας αυτής αναπτύσσεται στη μήτρα του κράματος, μέσω της σειράς καθίζησης (precipitation sequence) λεπτομερής διασπορά σωματιδίων ισχυροποίησης. Με την ολοκλήρωση της κατεργασίας γήρανσης η μικροδομή χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο κλάσμα όγκου  $f$  και μέσο μέγεθος (ακτίνα)  $r$  της φάσης ισχυροποίησης. Τα μεγέθη  $f$  και  $r$  αποτελούν τις κύριες παραμέτρους της μικροδομής οι οποίες ελέγχουν το όριο διαρροής ή τη σκληρότητα του κράματος μέσω συγκεκριμένων μηχανισμών ισχυροποίησης. Οι φάσεις ισχυροποίησης για το κράμα 2195 είναι η T1 ( $Al_2CuLi$ ) και η  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ ). Οι φάσεις ισχυροποίησης σχηματίζονται μετά από διαλυτοποίηση στους  $482^\circ C$ , και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση στους  $150^\circ C$  για 24 ώρες. Το σχήμα τους είναι κυλινδρικό και ενδεικτικά αναφέρεται ότι το μήκος της T1 μετρήθηκε 60 - 115 nm και το πλάτος της ( $r$ ) 2-3 nm. Η  $\theta'$  υπάρχει σε όλα τα κράματα 2195 [13].

Στη συγκόλληση FSW οι θερμικοί κύκλοι που αναπτύσσονται, επιφέρουν μεταβολή των  $f$  και  $r$  στην TMAZ και στη HAZ, και κατά συνέπεια της σκληρότητας και της αντοχής της συγκόλλησης. Οι διεργασίες οι οποίες επιφέρουν μεταβολή στο κλάσμα όγκου ( $f$ ) και το μέγεθος των φάσεων ισχυροποίησης είναι οι εξής:

(α) Διαλυτοποίηση (Dissolution). Αφορά την διάλυση μιας φάσης (μείωση του  $f$ ) και την εισαγωγή των στοιχείων που την αποτελούν στο στερεό διάλυμα της μήτρας και έχει ως συνέπεια τη μείωση της σκληρότητας.

(β) Διεύρυνση (Coarsening). Αφορά την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων μετά την ανάπτυξη του ποσοστού ισορροπίας της φάσης (αύξηση του  $r$  υπό σταθερό  $f$ ), και επιφέρει μείωση της σκληρότητας.

Το κράμα 2195 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση στη διάδοση ρωγμής απ' όλα τα κράματα της σειράς 2xxx [13].

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.1 ΥΛΙΚΑ

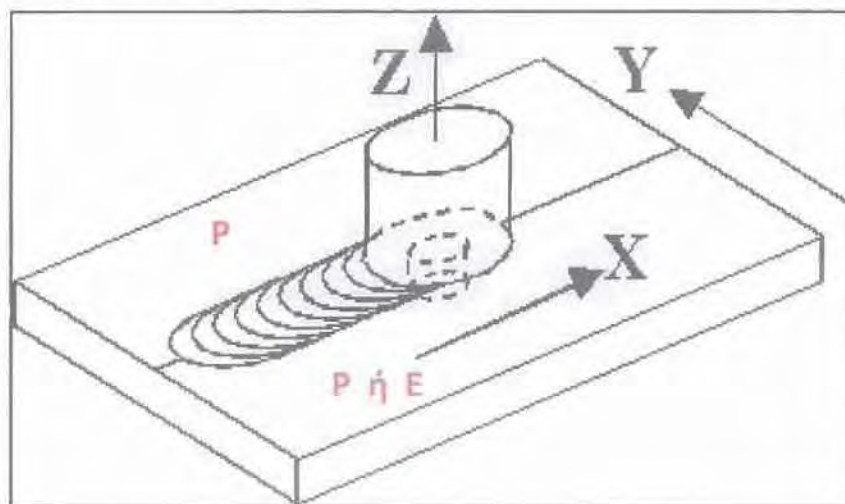
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά σε κόπωση συγκολλήσεων συμβολής δια τριβής και ανάμειξης (FSW) του αεροπορικού κράματος αλουμινίου 2195. Το κράμα συγκολλήθηκε σε κατάσταση T3 και στη συνέχεια μετά τη συγκόλληση υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία (Post Weld Heat Treatment PWHT) T8 (Βλ. Σχ 3.3) . Η χημική σύσταση του υλικού δίδεται στον Πίνακα 3.1. Τα κύρια κραματικά του στοιχεία είναι Cu -Li- Mg - Ag.

**Πίνακας 3.1:** Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 2195 (%κ.β.)

Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Si	Ag	Ti
3,7-4,3	<=0,15	0,8-1,2	0,25-0,8	<=0,25	<=0,12	0,25-0,6	<=0,1

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στην Airbus (Γερμανία), και οι δοκιμές κόπωσης στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Παν. Πάτρας. Πρόκειται για συγκολλήσεις συμβολής (Σχήμα 3.1)., δύο διαφορετικών διατάξεων:

- Έλασμα συγκολλημένο με έλασμα
- Έλασμα συγκολλημένο με υλικό που είχε υποστεί διέλαση.



**Σχήμα 3.1:** Διάταξη δοκιμίων συγκόλλησης FSW

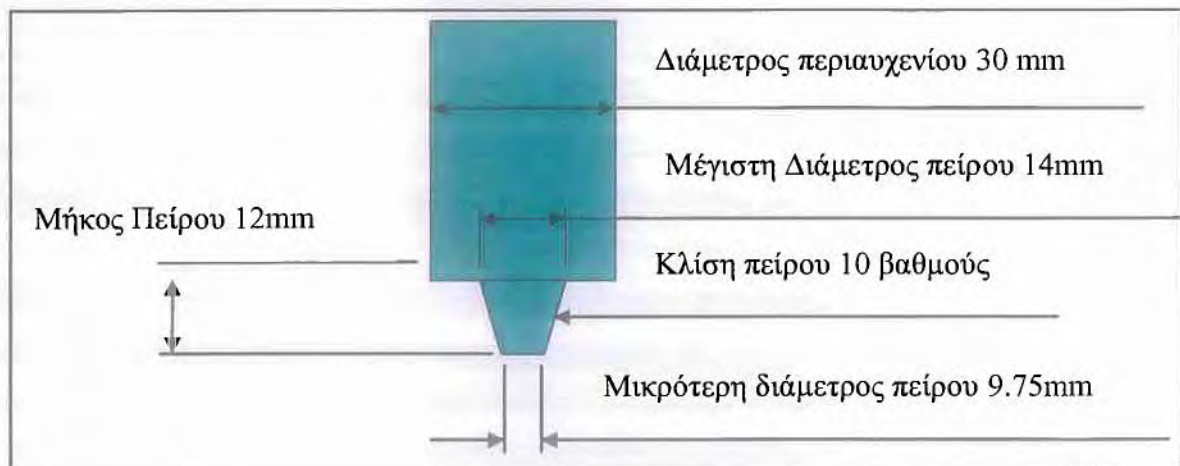
Η μηχανή της συγκόλλησης ήταν τύπου Powerstir 360 του κατασκευαστή Crawford Swift και η ισχύς του περιστρεφόμενου άξονα ήταν 60KW. Τα αρχικά κομμάτια προς συγκόλληση συγκρατούνταν σφιχτά από την αρχή τη μέση και το τέλος του μήκους των δοκιμίων.



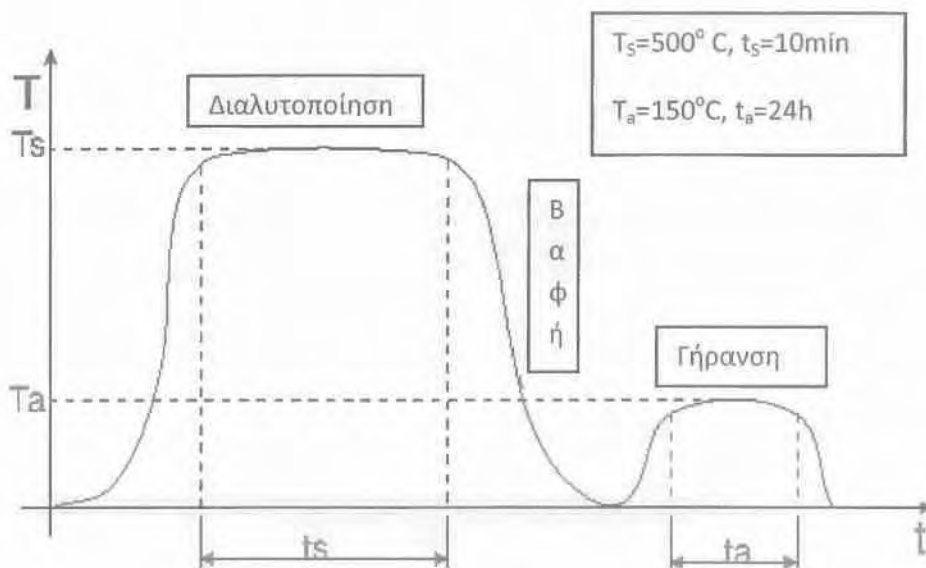
Οι παράμετροι της κατεργασίας ήταν:

- ταχύτητα συγκόλλησης: 200 (mm/min) ,
- περιστροφή του εργαλείου συγκόλλησης 225(rpm)
- η κλίση του εργαλείου ήταν  $1^\circ$
- το κάθετο φορτίο που ασκεί το περιουχένιο: 45KN
- η ταχύτητα του φρεζαρίσματος ήταν 30(mm/min)

Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείου FSW



Σχήμα 3.3: Σχεδιάγραμμα θερμικής κατεργασίας AA2195

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων κόπωσης, και ο διαμήκης προσανατολισμός τους ως προς τη συγκόλληση φαίνονται στο Σχήμα. 3.4, και στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικό δοκίμιο κόπωσης όπως παρελήφθη από το Εργαστήριο Υλικών προκειμένου να μελετηθεί ο μηχανισμός αστοχίας κατά τη δοκιμή κόπωσης.



**Σχήμα 3.4:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων κόπωσης



**Σχήμα 3.5:** Δοκίμιο κόπωσης P2E6

Συνολικά τα δοκίμια που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2 και 3.3, και αφορούσαν 2 ομάδες δειγμάτων:

- Ομάδα Α: Συγκόλληση 2 ελασμάτων (P2P)
- Ομάδα Β: Συγκόλληση ελάσματος με υλικό που είχε παραχθεί με διέλαση (P2E)

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών προκειμένου να προσδιοριστεί ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης, περιλάμβανε

1. μελέτη των επιφανειών θραύσης με στερεοσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία
2. μεταλλογραφία σε επιλεγμένες εγκάρσιες τομές ώστε να χαρακτηριστεί το σημείο έναρξης της κόπωσης και να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά της διαδρομής των ρωγμών κόπωσης στα δείγματα.
3. Μικροσκληρομετρήσεις στα μεταλλογραφικά δοκίμια

Για κάθε κατηγορία δειγμάτων προσδιορίστηκε το σημείο έναρξης καθώς και η όδευση της ρωγμής κόπωσης, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας θραύσης και συσχετίστηκαν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μικροδομής και μικροσκληρότητας των κραμάτων.

**Πίνακας 3.2:** Δείγματα P2P

A/A	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	Εύρος τάσης (MPa)	Αριθμός κύκλων ( $N_f$ )
P2P1	266.6	26.6	120	120.781
P2P2	222,2	22,2	90	655.260
P2P3	222.2	22.2	100	207.991
P2P4	177.7	17.7	80	5 $10^6$ (R.O)
P2P6	200	20	90	255.470
P2P9	200	20	90	5 $10^6$ (R.O)
P2P10	200	20	90	267.260
P2P11	177.7	17.7	80	944.265

**Πίνακας 3.3: Δειγματα P2E**

A/A	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	Εύρος τάσης (MPa)	Αριθμός κύκλων (N <sub>f</sub> )
P2E1	177.7	17.7	80	5 10 <sup>6</sup> (R.O)
P2E2	200	20	90	1.394.606
P2E4	200	20	90	180.148
P2E5	266.6	26.6	120	109.126
P2E6	222.2	22.2	100	1.338.871
P2E7	200	20	90	73.316
P2E8	177.7	17.7	80	376.432
P2E10	222.2	22.2	100	296.652
P2E12	177.7	17.7	80	99.673

### 3.2 ΚΟΠΗ

Η κοπή των δοκιμίων έγινε με το κοπτικό Unitom-2 της Struers και στη συνέχεια ακολούθησε εγκιβωτισμός σε ρητίνη Acryfix. Τα δοκίμια λειάνθηκαν διαδοχικά στους δίσκους των 120, 180, 220, 300, 500, 800 και 1000 Grid και στη συνέχεια στιλβώθηκαν με διαμαντόπαστα 3 μm και 1 μm. Τέλος υπεβλήθησαν σε χημική προσβολή σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E407 με ειδικό αντιδραστήριο που αποτελείται από:

Συστατικό 1: 18 μέρη H<sub>2</sub>O αναμεμιγμένα με 2 μέρη θειικού οξέως (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Συστατικό 2: 19 μέρη H<sub>2</sub>O αναμεμιγμένα με 1 μέρος υδροφθορικού οξέως (HF)

### 3.3 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Οι επιφάνειες θραύσης μελετήθηκαν αρχικά στο στερεοσκόπιο και σε επιλεγμένα δοκίμια στο Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Είναι γνωστό ότι οι επιφάνειες θραύσης μεταλλικών υλικών από κόπωση εμφανίζουν χαρακτηριστικό ημικύκλιο το κέντρο του οποίου συμπίπτει με το σημείο έναρξης της ρωγμής κόπωσης. Με βάση το στοιχείο αυτό προσδιορίστηκε το σημείο έναρξης της κόπωσης από την στερεοσκοπική εξέταση των επιφανειών θραύσης των διαθέσιμων δοκιμίων. Χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο Leica Wilz M3Z σε μεγεθύνσεις 6X-45X και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο JEOL JSM 5310.

### 3.4 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έγινε με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητας των δοκιμίων σε εγκάρσια τομή, από το κέντρο της συγκόλλησης έως το μέταλλο βάσης. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με φορτίο 100 gr (HV<sub>0.1</sub>) και χρόνο μέτρησης 10 δευτερόλεπτα. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν από το κέντρο του δοκιμίου και

συνέχιζαν ανά 0.5mm έως το τέλος του μετάλλου βάσης. Χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο WOLPERT 402 MVD .

### **3.5 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**

Ο μικροσκοπικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Το οπτικό μικροσκόπιο είναι τύπου Leitz Wild GMBH και για την ηλεκτρονική μικροσκοπία χρησιμοποιήθηκε το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας καθώς και του Ε.Κ.Ε.Π.Υ της Χαλκίδας, με το οποία έγιναν και οι τοπικές χημικές αναλύσεις.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

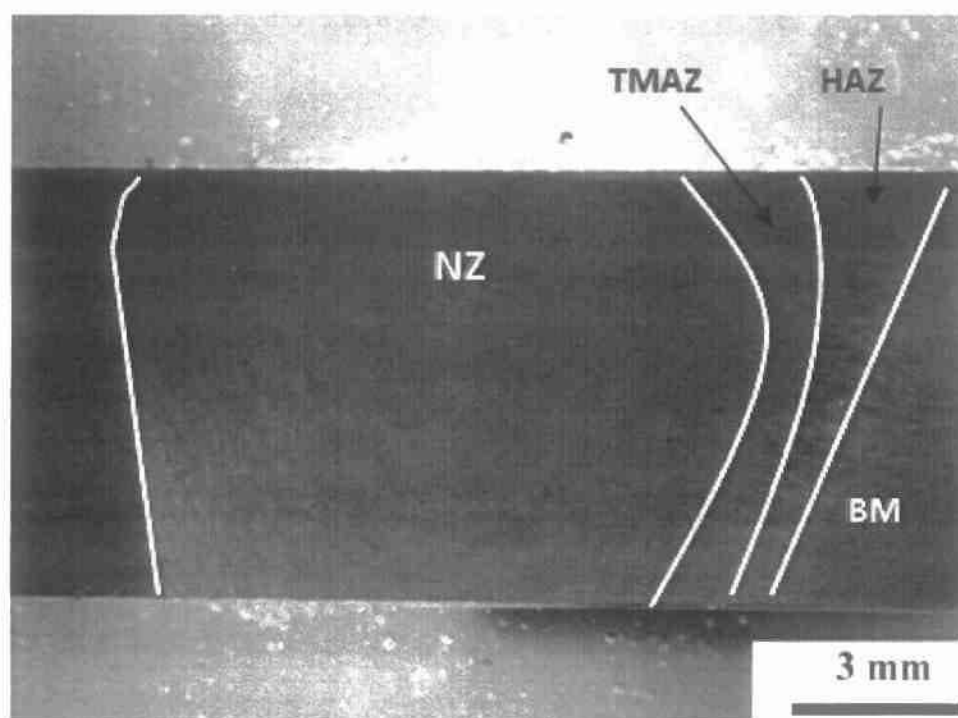
### 4.1 ΟΜΑΔΑ Α: ΔΟΚΙΜΙΑ P2P

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η ομάδα δοκιμίων P2P. Αρχικά η παρουσιάζεται η μακροδομή της συγκόλλησης σε περιοχή μακριά από την αστοχία καθώς και τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των περιοχών της συγκόλλησης FSW. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μελέτη των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων μακροσκοπικά και σε επιλεγμένα δοκίμια μικροσκοπικά και τέλος οι μικροσκληρομετρήσεις όλων των μεταλλογραφικών δοκιμίων.

#### 4.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΚΡΟΔΟΜΗΣ - ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

##### 4.1.1.1 Μακροδομή

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται αντιπροσωπευτική εικόνα της μακροδομής διακρίνονται οι εξής ζώνες: ζώνη ανάδευσης (NZ), η θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (TMAZ), η θερμοεπηρεασμένη ζώνη (HAZ) και το βασικό μέταλλο (BM).



Εικόνα 4.1: Μακροδομή FSW P2P

#### 4.1.1.2 Μεταλλογραφία

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται μια τυπική μικροδομή της πλήρως ανακρυσταλλωμένης ζώνης ανάδευσης και όπως φαίνεται την απαρτίζουν ισοαξονικοί κόκκοι με μέσο μέγεθος 6μm. Η θερμοκρασία στην περιοχή αυτή είναι περίπου 500° C.



**Σχήμα 4.2:** Μικροδομή ζώνης ανάδευσης

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μικροδομή της θερμομηχανικά επηρεαζόμενης ζώνης, όπου η θερμοκρασία σε αυτή την περιοχή κυμαίνεται από 350-450° C, και φαίνονται οι επιμηκυμένοι/παραμορφωμένοι κόκκοι που έχουν επηρεαστεί από το εργαλείο ανάδευσης.

Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 φαίνεται το σύνορο της ζώνης ανάδευσης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης ενώ στο Σχήμα 4.6 μπορεί κανείς να συγκρίνει τις δύο μικροδομές καθώς φαίνεται η διαφορά στο μέγεθος και στο σχήμα των κόκκων των δύο ζωνών. Στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη οι κόκκοι είναι επιμηκυμένοι και παραμορφωμένοι και στη ζώνη ανάδευσης ισοαξονικοί με σύνορα υψηλής γωνίας.



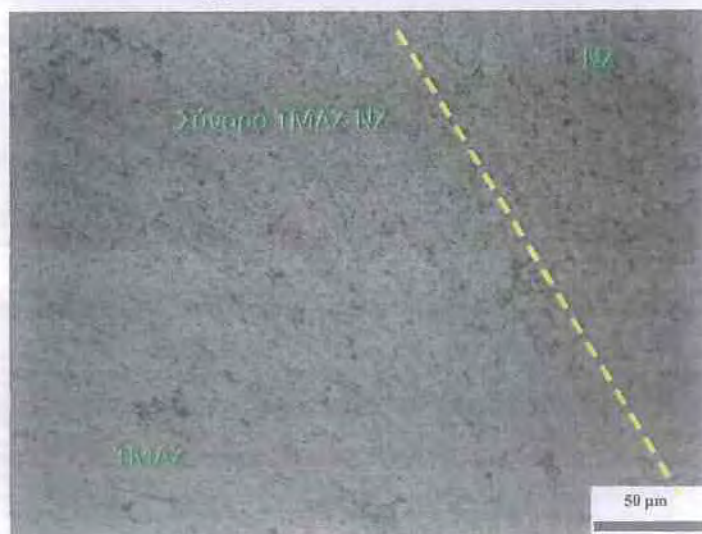
**Σχήμα 4.3:** Μικροδομή θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης



**Σχήμα 4.4:** Σύνορο TMAZ και NZ



**Σχήμα 4.5:** Σύνορο TMAZ και NZ

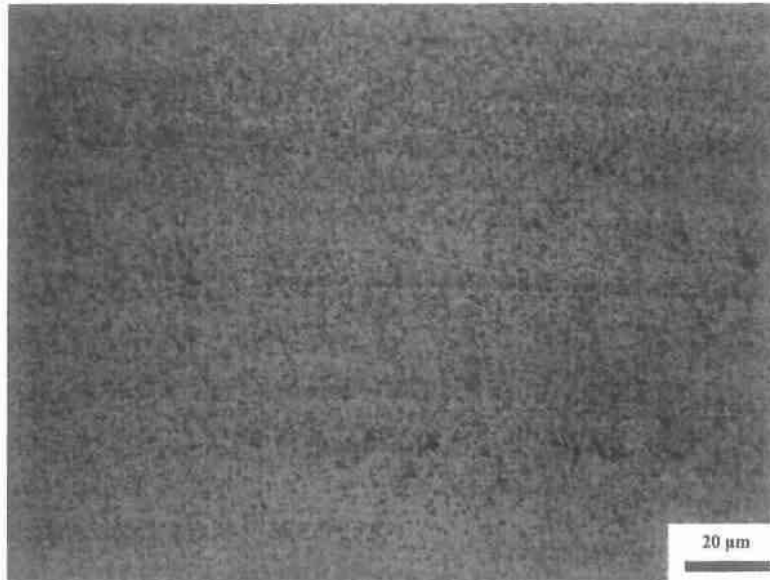


**Σχήμα 4.6:** Σύνορο TMAZ και NZ

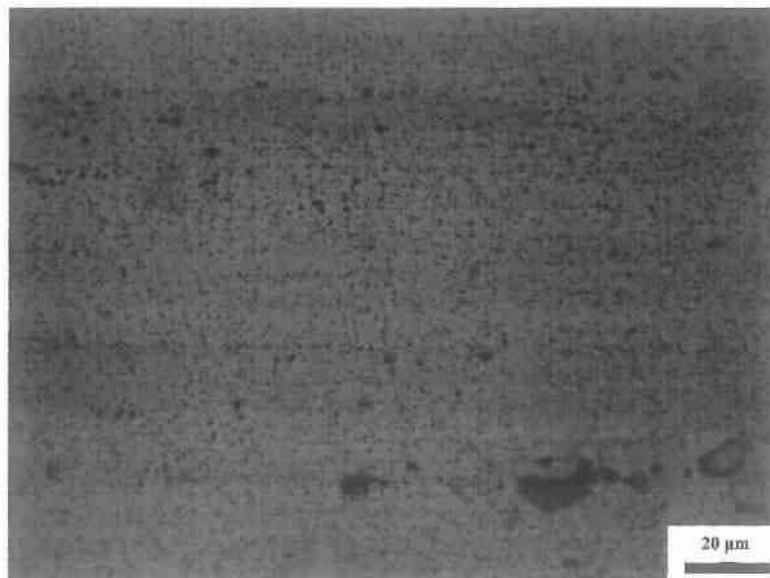


Η μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (Σχήμα 4.7), όπου σε αυτή την περιοχή το εύρος θερμοκρασιών κυμαίνεται από 250° C μέχρι 350° C, επηρεάζεται σημαντικά από το θερμικό κύκλο της συγκόλλησης.

Το βασικό μέταλλο το οποίο υπόκειται σε θερμικό κύκλο ( οι θερμοκρασίες σε αυτή την περιοχή είναι από 150° – 250° C) παρουσιάζεται στο Σχήμα.4.8. Η μικροδομή του βασικού μετάλλου και οι ιδιότητες του δεν επηρεάζονται από το θερμικό κύκλο. Οι κόκκοι μεγέθους 6-7 μm ακολουθούν την κατεύθυνση της έλασης.



**Σχήμα 4.7:** Μικροδομή HAZ



**Σχήμα 4.8:** Μικροδομή BM

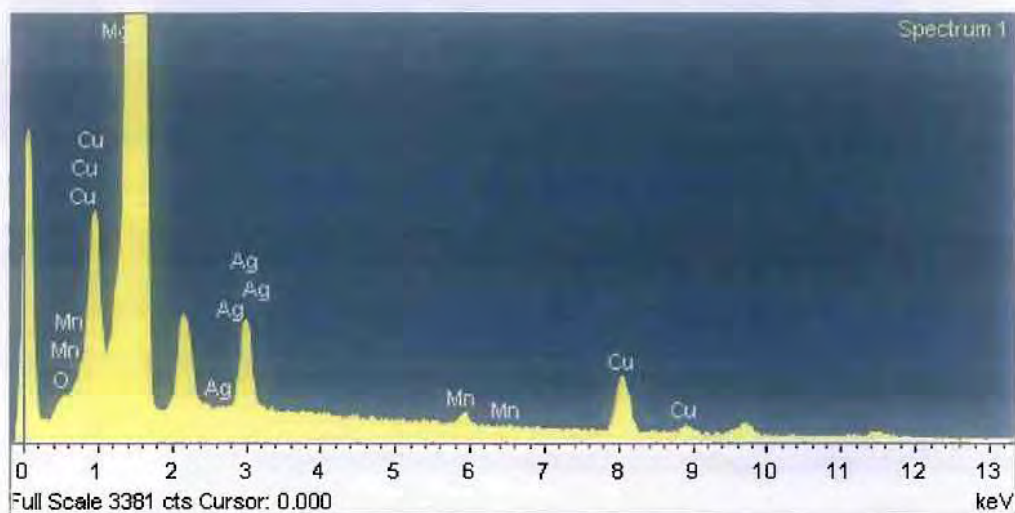
### 4.1.1.3 S.E.M (Scanning electron microscope)

#### α) Βασικό Μέταλλο

Στο πλαίσιο της έρευνας του αλουμινίου 2195 θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνουν τοπικές χημικές αναλύσεις στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο S.E.M για να προσδιοριστούν οι διάφορες φάσεις διασποράς. Στο Σχήμα 4.9 παρατίθεται μια μεγέθυνση στην περιοχή του βασικού μετάλλου και γίνεται τοπική χημική ανάλυση στη μήτρα του, η οποία δίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.9: Περιοχή Βασικού Μετάλλου, τοπική χημική ανάλυση



Σχήμα 4.10: Χημική ανάλυση Δείγματος 1 στο βασικό μέταλλο

Συνοψίζοντας την πληροφορία από την χημική ανάλυση του βασικού μετάλλου στον πίνακα 4.1 έχουμε:

**Πίνακας 4.1:** Χημική σύσταση βασικού μετάλλου

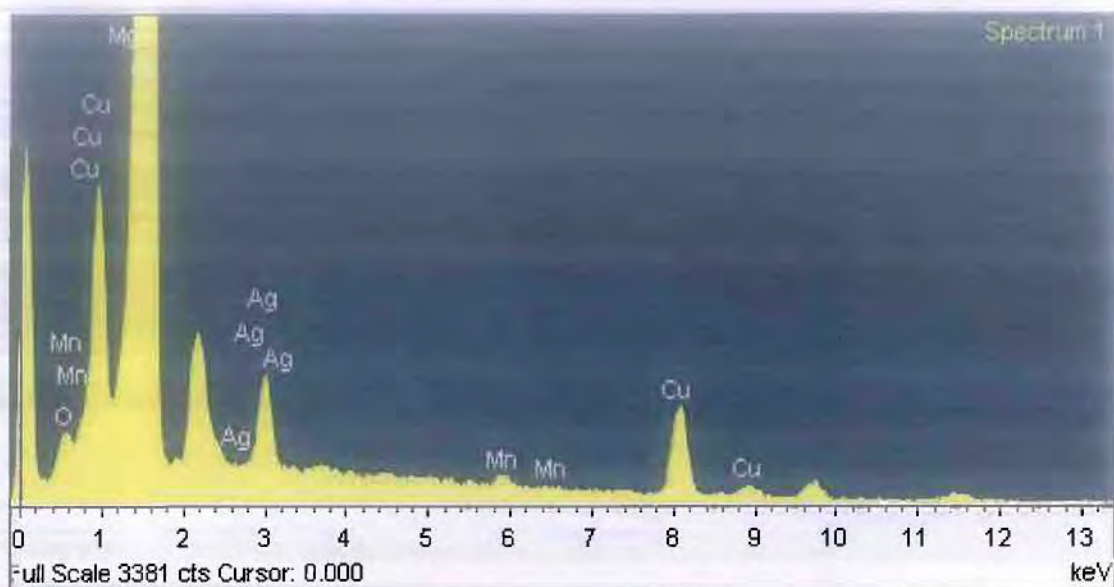
Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.84	1.00
Al K	87.23	93.15
Mn K	0.52	0.27
Cu K	5.13	2.32
Ag L	5.27	1.41

**β) Ζώνη ανάδευσης**

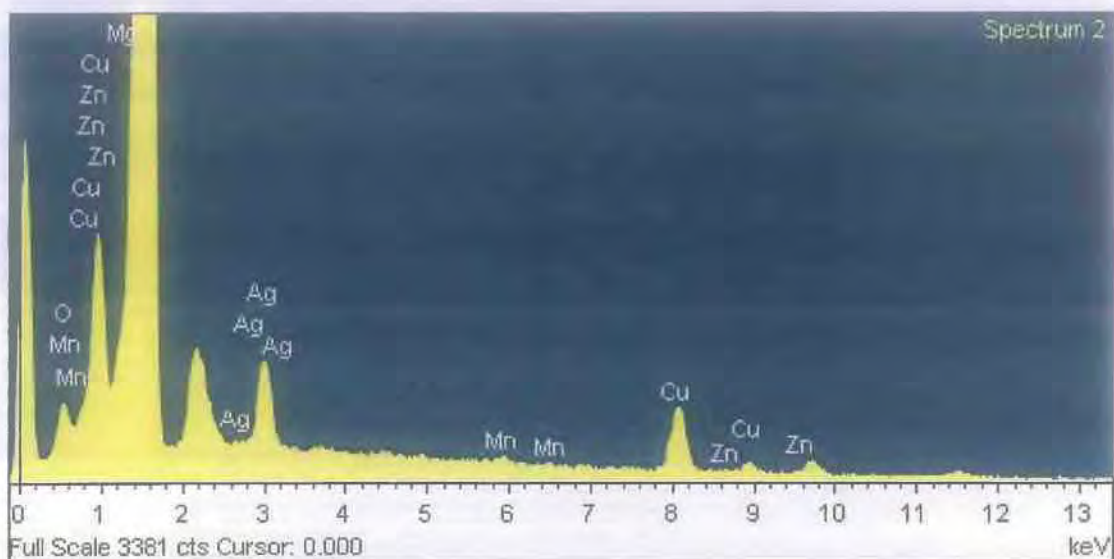
Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται μεγέθυνση στη ζώνη ανάδευσης και σε αυτήν φαίνονται οι περιοχές όπου έγιναν οι τοπικές χημικές αναλύσεις. Η πρώτη χημική ανάλυση έγινε μέσα σε ένα σωματίδιο διασποράς (Σχήμα 4.12) και η δεύτερη στη μήτρα της N.Z (Σχήμα 4.13).



**Σχήμα 4.11:** περιοχές χημικής ανάλυσης στην ζώνη ανάδευσης



**Σχήμα 4.12:** Χημική ανάλυση στο σωματίδιο διασποράς



**Σχήμα 4.13:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της N.Z

Συγκρίνοντας τις τοπικές χημικές αναλύσεις των δύο δειγμάτων στους πίνακες 2 και 3 παρατηρείται ότι υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση χαλκού (Cu) στο σωματίδιο διασποράς (6.75% κ.β) από ότι στη μήτρα της N.Z (5.26%κ.β). Επίσης τοπικά η συγκέντρωση του χαλκού (Cu) είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη σύσταση του 2195 ( το μέγιστο επιτρεπτό είναι 4.3 κ.β %).

**Πίνακας 4.2:** Χημική σύσταση σωματιδίου

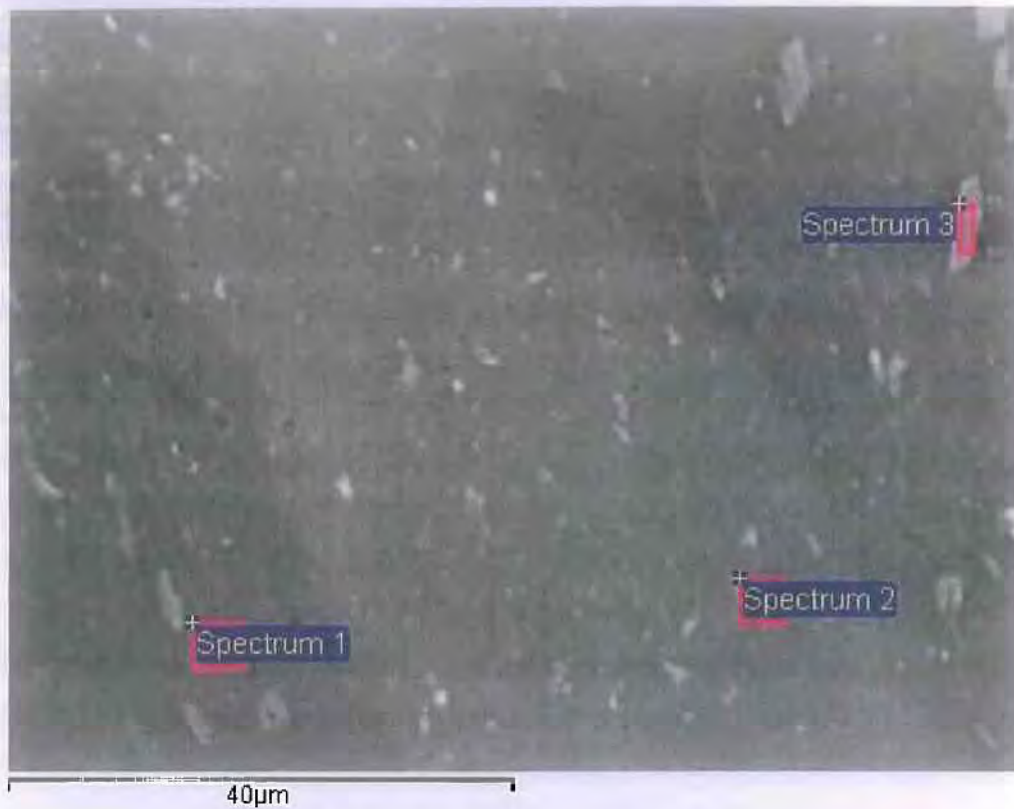
Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.68	0.80
Al K	84.95	89.94
Mn K	0.41	0.22
Cu K	6.75	3.03
Ag L	4.52	1.20

**Πίνακας 4.3:** Χημική σύσταση μήτρας ζώνης ανάδευσης

Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.60	0.70
Al K	85.55	89.39
Mn K	0.23	0.12
Cu K	5.26	2.33
Zn K	0.15	0.07
Ag L	4.72	1.23

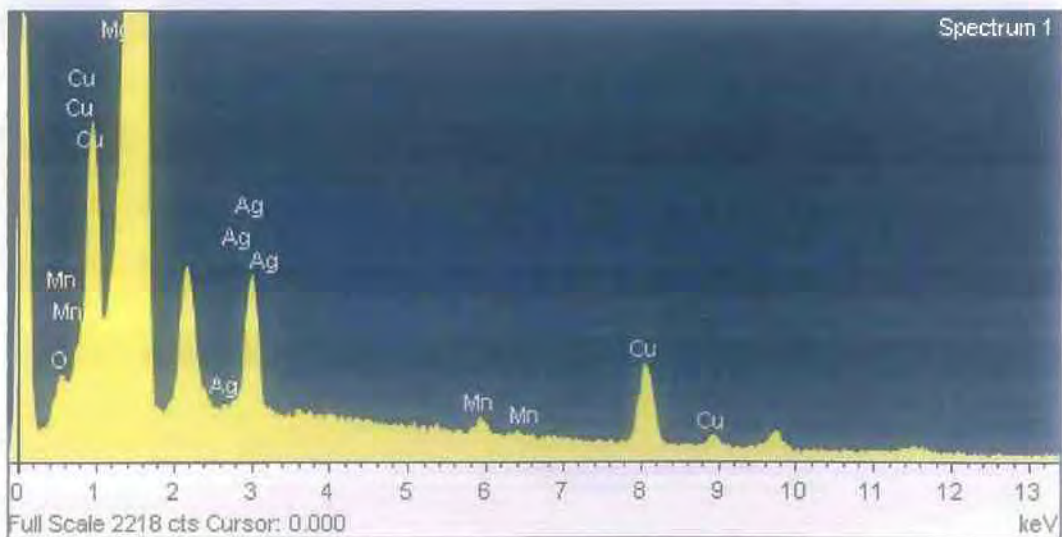
### **γ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη ( TMAZ)**

Τέλος εκτελέστηκε τοπική χημική ανάλυση και στην TMAZ προκειμένου να αναγνωριστούν τα σωματίδια και σε αυτή τη ζώνη. Στο σχήμα 4.14 δίνονται οι 3 περιοχές όπου έγινε η χημική ανάλυση.



**Σχήμα 4.14:** Μικροδομή TMAZ

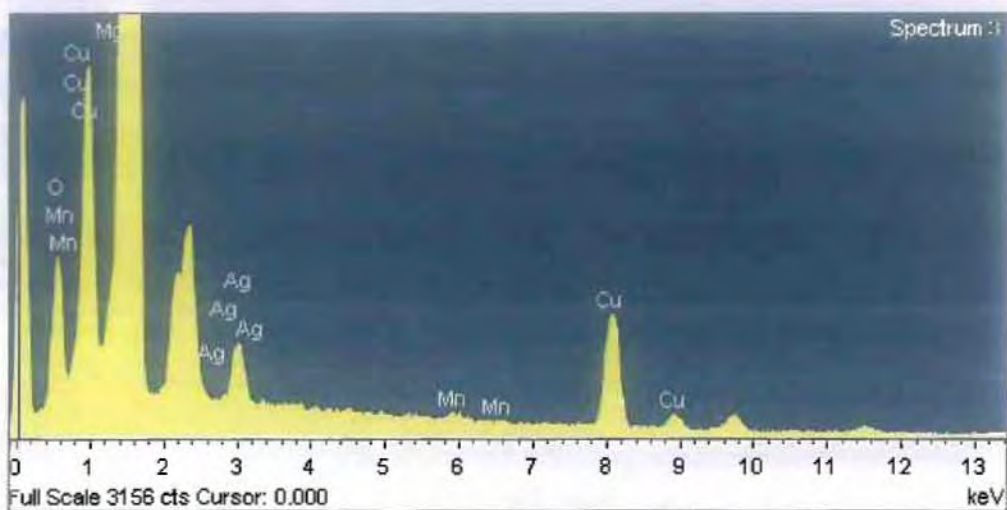
Έτσι παρακάτω στα Σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17 δίνονται οι αντίστοιχες χημικές αναλύσεις που αντιστοιχούν στα δείγματα 1,2,3. Παρατηρείται ότι η συγκέντρωση χαλκού στη φάση διασποράς (9.66 %κ.β) είναι πολύ υψηλότερη απ' ότι στη μήτρα της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης (5%κ.β).



**Σχήμα 4.15:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 1)



**Σχήμα 4.16:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 2)



**Σχήμα 4.17:** Χημική ανάλυση σε φάση διασποράς(Δείγμα 3)

Τέλος συνοψίζονται στους πίνακες 4,5,6 οι χημικές αναλύσεις που παρατέθηκαν παραπάνω.

**Πίνακας 4.4:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 1)

Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.64	0.75
Al K	87.58	92.57
Mn K	0.43	0.22
Cu K	4.60	2.06
Ag L	5.03	1.33

**Πίνακας 4.5:** Χημική ανάλυση στη μήτρα της TMAZ (Δείγμα 2)

Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.76	0.89
Al K	87.39	92.65
Mn K	0.38	0.20
Cu K	5.00	2.25
Ag L	4.96	1.32



**Πίνακας 4.6:** Χημική ανάλυση σε φάση διασποράς(spectrum 3)

Στοιχείο	Περιεκτικότητα κ.β %	Atomic%
Mg K	0.80	0.90
Al K	75.60	75.95
Mn K	0.26	0.13
Cu K	9.66	4.12
Ag L	2.96	0.74

## 4.1.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Στο σχήμα 4.18 ξεχωρίζει το κέντρο του τόξου απ' όπου ξεκίνησε η διάδοση της ρωγμής, η οποία και οδήγησε στη θραύση.



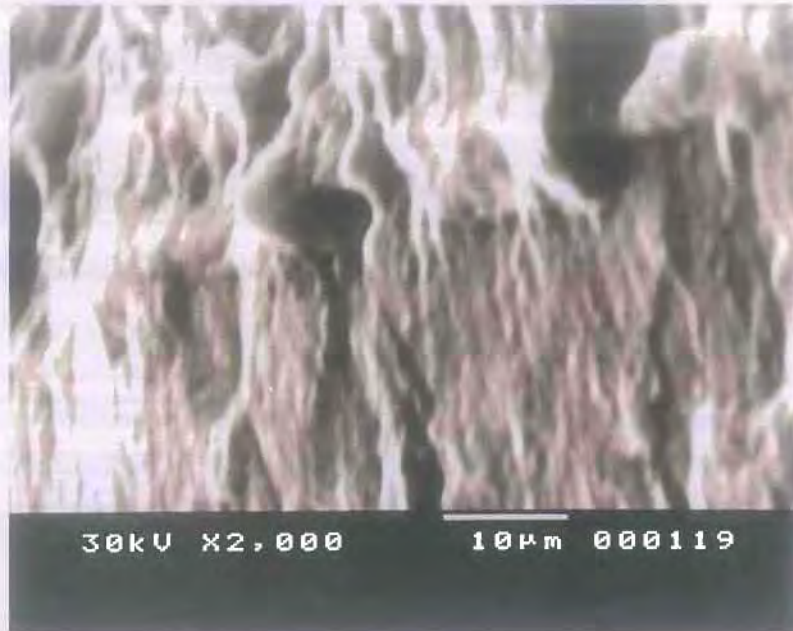
**Σχήμα 4.18:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 ( $\sigma_{max} = 266$ ,  $N_f = 120.781$ )

Η επιφάνεια θραύσης του P2P1 μελετήθηκε και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) και το οποίο παρουσιάζει στο Σχήμα 4.19 τη ζώνη ανάδευσης, όπου εκεί παρατηρεί κανείς τις πρωτογενείς φάσεις (dispersoids). Τα dispersoids είναι στερεές φάσεις που αναπτύσσονται πρώτες κατά τη στερεοποίηση ανάμεσα στις θερμοκρασίες *solidus* – *liquidus* και το μέγεθός τους συνήθως είναι μεγαλύτερο από ένα κόκκο (το μέγεθος του κόκκου είναι περίπου 6  $\mu\text{m}$ ).



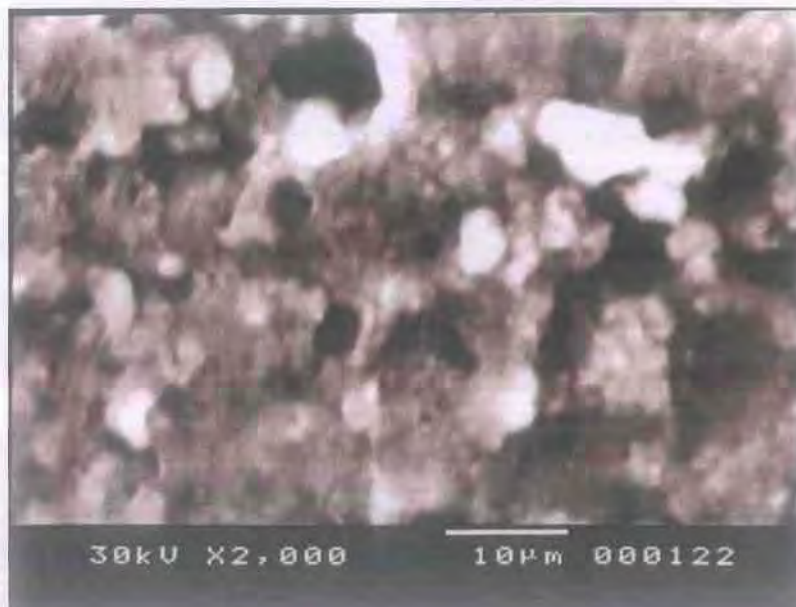
**Σχήμα 4.19:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη ζώνη ανάδευσης

Με μια προσεκτικότερη ανάλυση στο SEM και εστιάζοντας στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη στο σύνορο με τη ζώνη ανάδευσης φαίνονται χαρακτηριστικές αυλακώσεις κόπωσης (fatigue striations) στο σχήμα 4.20.



**Σχήμα 4.20:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη

Τελειώνοντας με το δοκίμιο P2P1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21 μία ανάλυση στη ζώνη ανάδευσης όπου φαίνονται τα περικρυσταλλικά χαρακτηριστικά θραύσης.



**Σχήμα 4.21:** Επιφάνεια θραύσης P2P1 στη ζώνη ανάδευσης

Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η μακροσκοπικά η επιφάνεια θραύσης του P2P2 και στο Σχήμα 4.23 μία μεγέθυνση στη ζώνη ανάδευσης όπου φαίνεται η περικλυσταλλική όδευση της ρωγμής που οδήγησε στη θραύση.

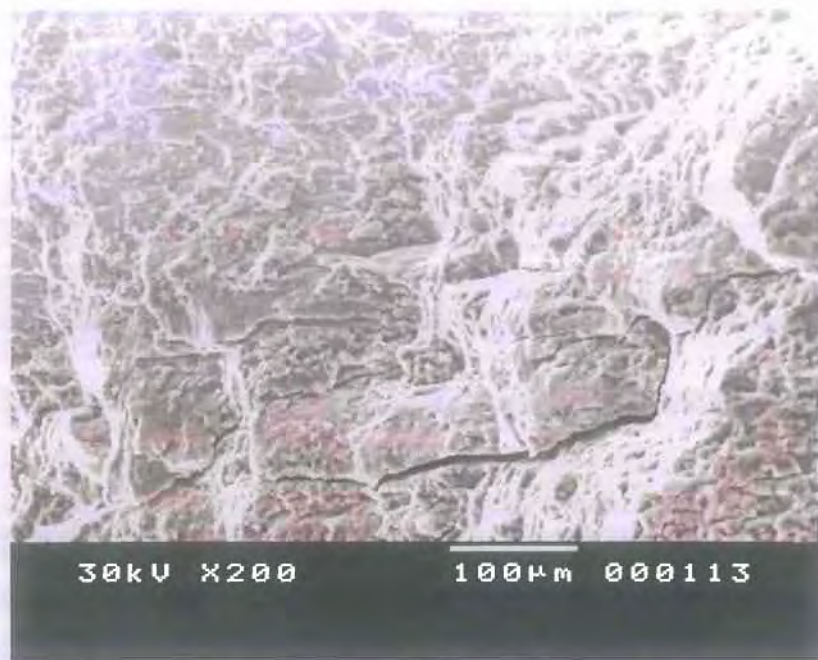


**Σχήμα 4.22:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 655.260$ )



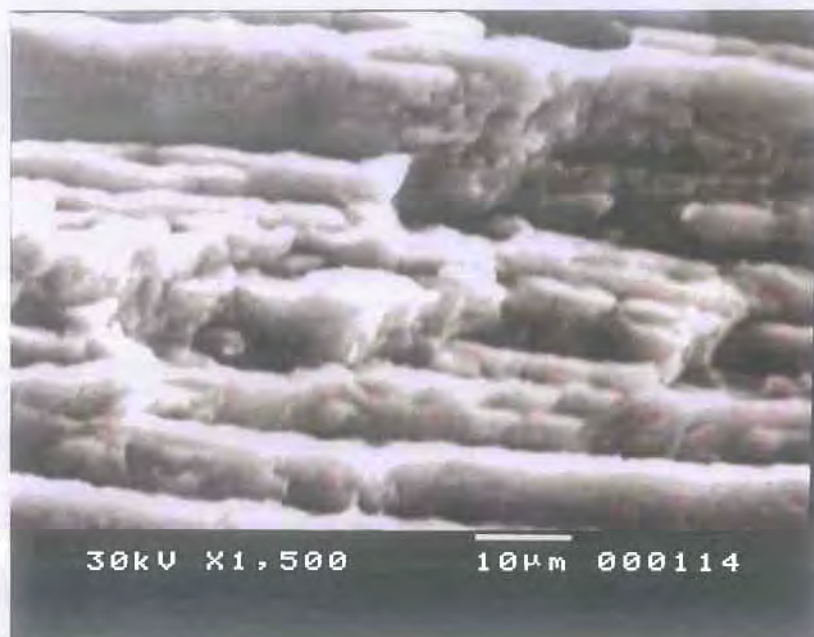
**Σχήμα 4.23:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 στην NZ

Στο Σχήμα 4.24 και στην περιοχή της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης παρατηρούνται οι ρωγμές οι οποίες προήλθαν και κατά τη θραύση.

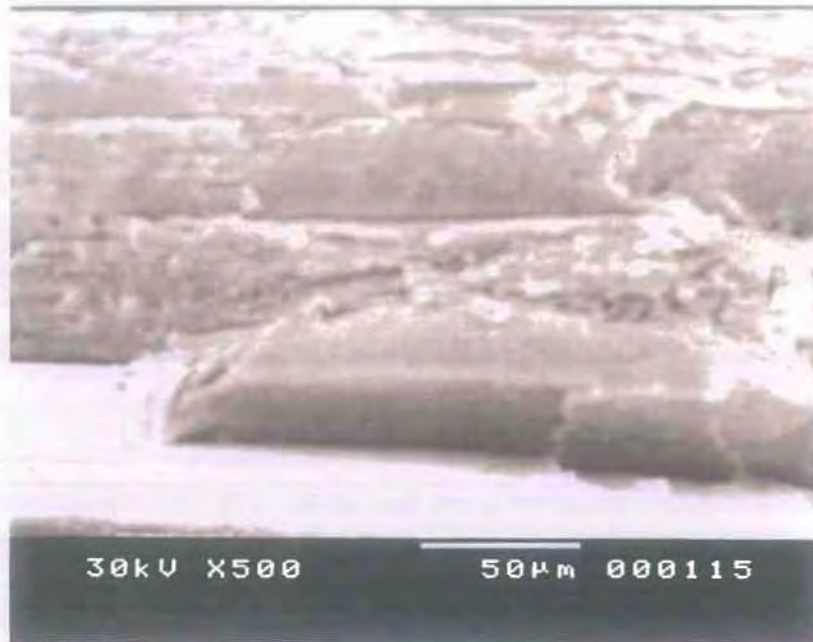


**Σχήμα 4.24:** Επιφάνεια θραύσης P2P2 στο σύνορο TMAZ - NZ

Στα σχήματα 4.25, 4.26 και 4.27 παρουσιάζονται οι αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) του δοκιμίου P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη καθώς και στο Σχήμα 4.28: Αυλακώσεις κόπωσης κοντά στην έναρξη θραύσης του P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη.



**Σχήμα 4.25:** Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη



**Σχήμα 4.26:** Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) στο P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη



**Σχήμα 4.27:** Αυλακώσεις κόπωσης ( fatigue striations) P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη



**Σχήμα 4.28:** Αυλακώσεις κόπωσης κοντά στην έναρξη θραύσης του P2P2 στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη

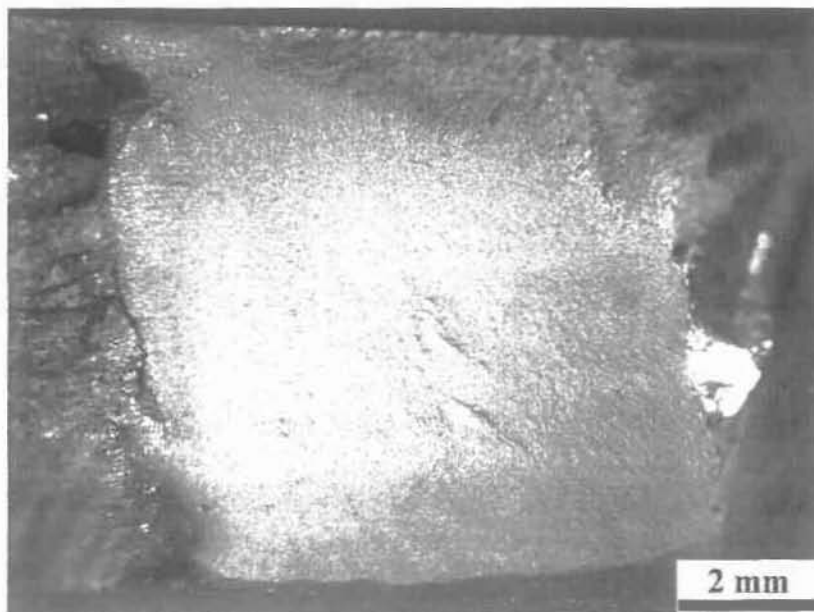
Παρακάτω παρουσιάζονται οι επιφάνειες των δοκιμίων P2P3 (Σχήμα 4.29), P2P4 (Σχήμα 4.30), P2P6(Σχήμα 4.31), P2P10 (Σχήμα 4.32).



**Σχήμα 4.29:** Επιφάνεια θραύσης P2P3 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 207.991$ )



**Σχήμα 4.30:** Επιφάνεια θραύσης P2P6 ( $\sigma_{\max} = 200$ ,  $N_f = 255.470$ )



**Σχήμα 4.31:** Επιφάνεια θραύσης P2P10 ( $\sigma_{\max} = 200$ ,  $N_f = 267.260$ )

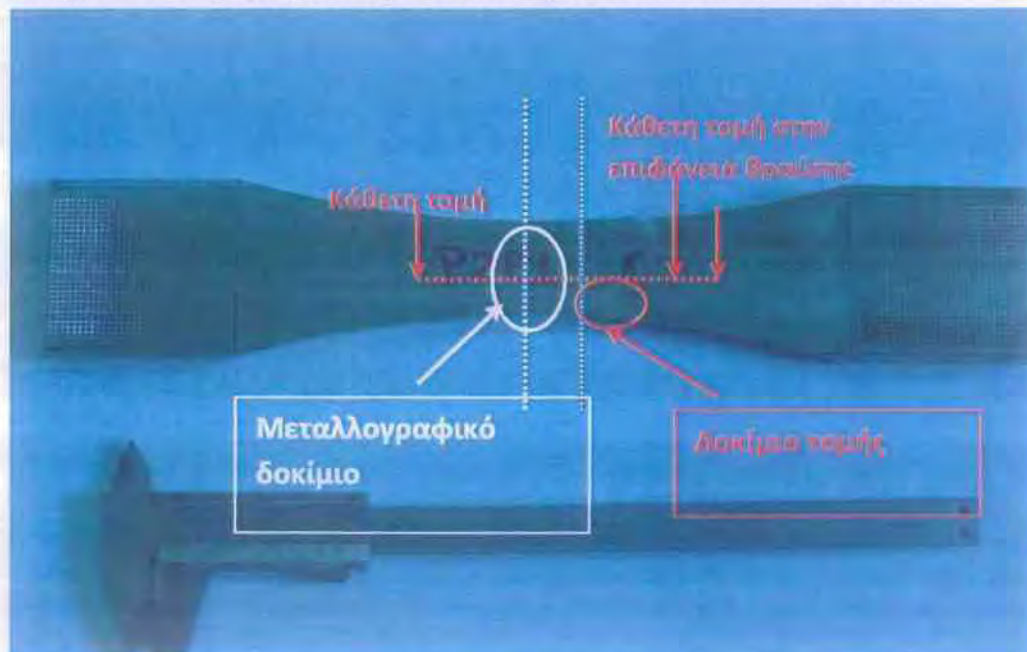




**Σχήμα 4.32:** Επιφάνεια θραύσης P2P11 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 944.265$ )

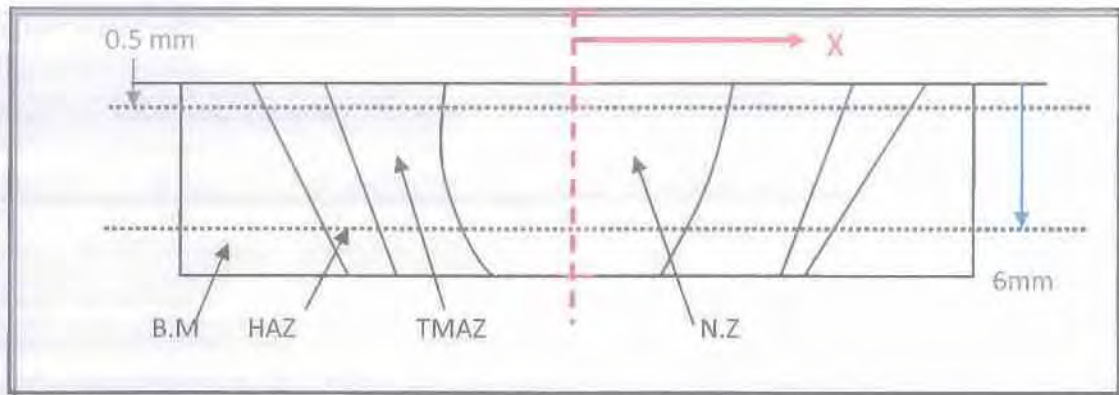
#### 4.1.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στη συνέχεια έγιναν μικροσκληρομετρήσεις των εξεταζόμενων δοκιμίων P2P. Οι μικροσκληρομετρήσεις είναι δύο ειδών: αρχικά παρατίθενται τα προφίλ μικροσκληρότητας των μεταλλογραφικών δοκιμίων P2P και στη συνέχεια το προφίλ της κάθετης τομής στο δοκίμιο P2P1 ακριβώς στην περιοχή που παρουσιάζεται το πρόβλημα. Στην εικόνα 4.33 παρουσιάζονται οι περιοχές των τομών που παίρνονται τα δύο ειδών δοκίμια.



**Σχήμα 4.33:** Περιοχές τομών Μεταλλογραφικών δοκιμίων

Τα προφίλ μικροσκληρότητας που παρουσιάζονται παρακάτω έγιναν σε βάθος 0.5 mm και σε βάθος 6mm όπως φαίνεται στο σχήμα 4.34. Ως αρχή μετρήσεων λαμβάνεται το κέντρο της ζώνης ανάδευσης.

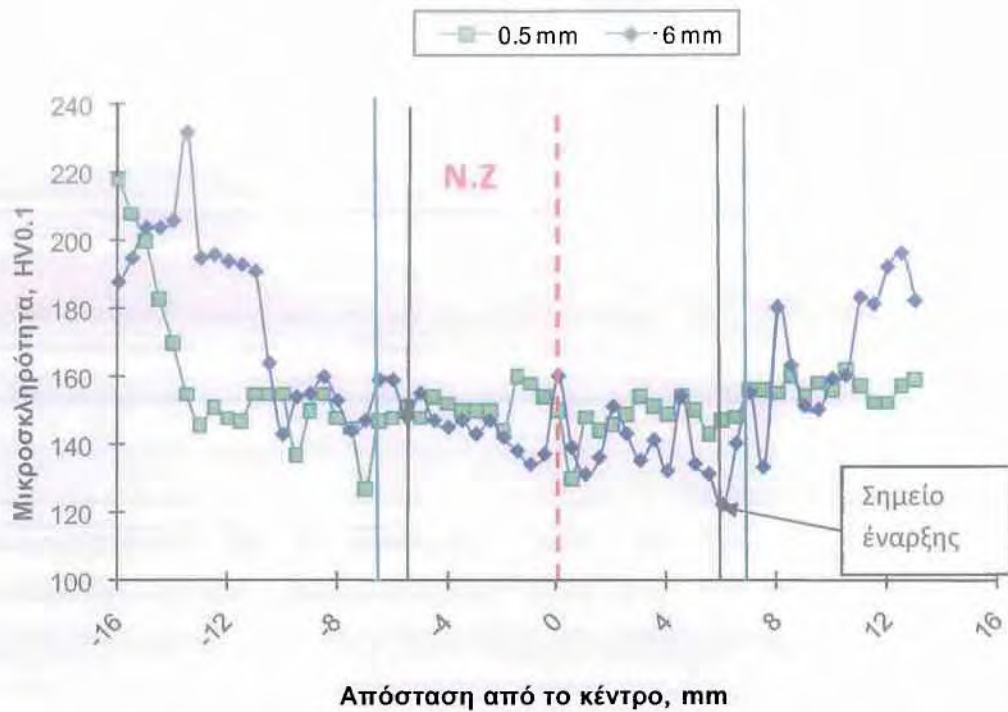


Σχήμα 4.34: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου μικροσκληρομέτρησης

Παρακάτω παρατίθενται τα προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων P2P σε βάθος 0.5 mm και 6 mm.

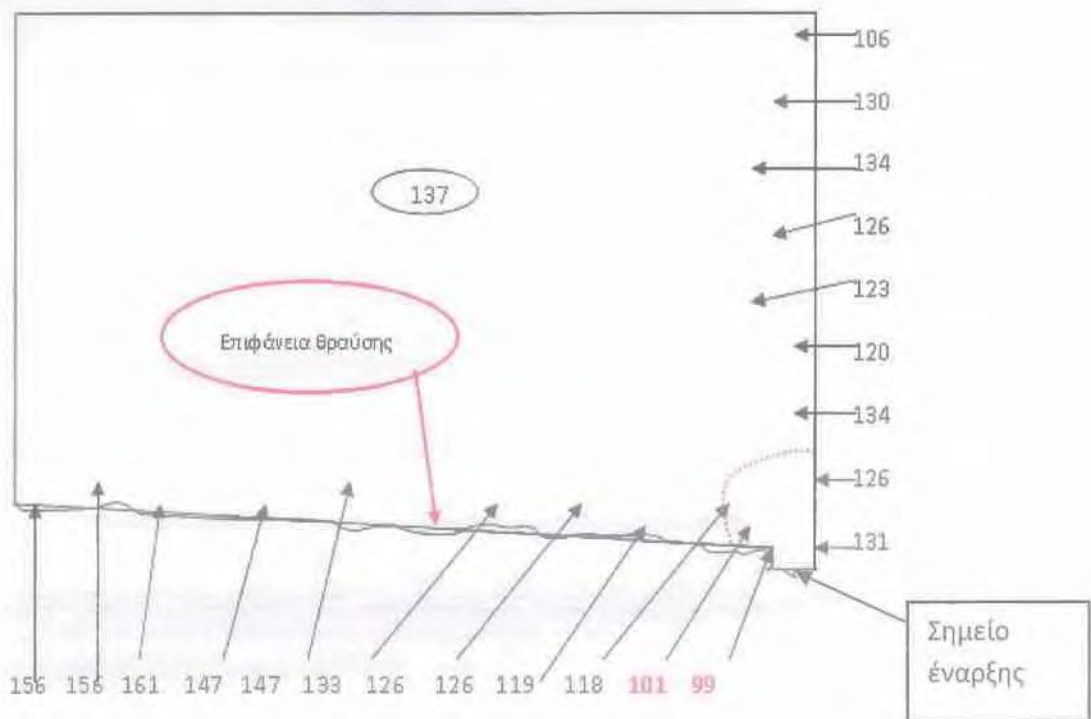
Αρχικά παρατίθενται τα προφίλ μικροσκληρότητας σε βάθος 0.5 και 6 mm του δοκιμίου P2P1. Όπως προκύπτει από το σχήμα 4.35 οι τιμές των σκληροτήτων στο βάθος των 6 mm είναι υψηλότερες απ' ότι στο βάθος του 0.5mm. Επίσης παρατηρείται ότι η μικροσκληρότητα στη ζώνη ανάδευσης είναι χαμηλότερη απ' ότι στις υπόλοιπες περιοχές (TMAZ, HAZ και BM). Οι υψηλότερες τιμές σκληρότητας βρίσκονται στο βασικό μέταλλο, την περιοχή δηλαδή όπου δεν έχει επηρεαστεί από τον θερμικό κύκλο της συγκόλλησης. Συνεπώς η συγκόλληση παρουσιάζει γενικότερα κατώτερες ιδιότητες από το Βασικό Μέταλλο .

Το σημείο έναρξης της ρωγμής κόπωσης συμπίπτει απόλυτα με τη ζώνη χαμηλής σκληρότητας που παρατηρήθηκε κατά τις μικροσκληρομετρήσεις των δοκιμίων. Η απώλεια συνοχής των φάσεων με τη μήτρα, πιθανόν να συνεισέφερε στην τοπική αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης πριν την έναρξη της ρωγμής κόπωσης. Σε αυτό συνεισέφερε και η χαμηλή σκληρότητα στην περιοχή προκαλώντας συγκέντρωση της πλαστικής παραμόρφωσης (plastic confinement region).



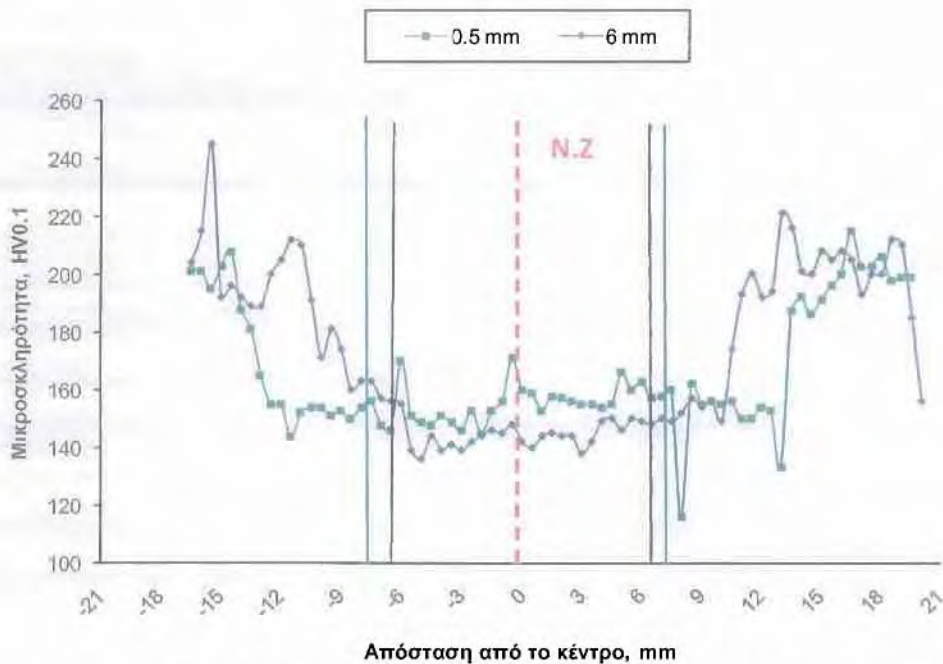
**Σχήμα 4.35:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P1 σε βάθος 0.5 και 6 mm

Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζονται οι μικροσκληρομετρήσεις της κάθετης τομής του P2P1 και όπως φαίνεται οι χαμηλότερες τιμές σκληρομέτρησης βρίσκονται στο σημείο έναρξης της ρωγμής κόπωσης.

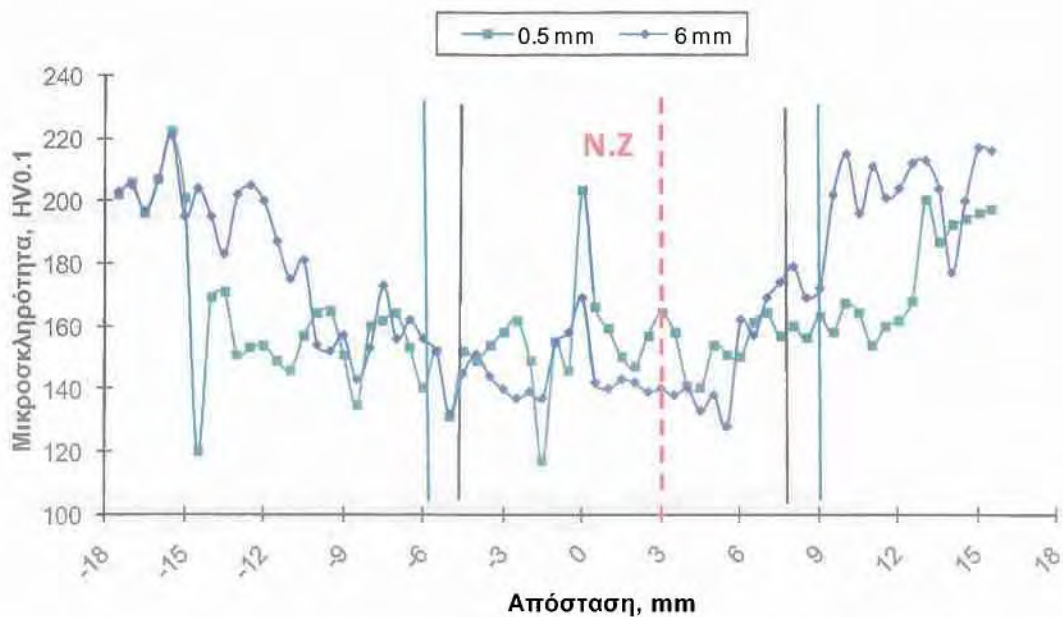


**Σχήμα 4.36:** Σχηματική παράσταση μικροσκληρότητας κάθετης τομής P2P1

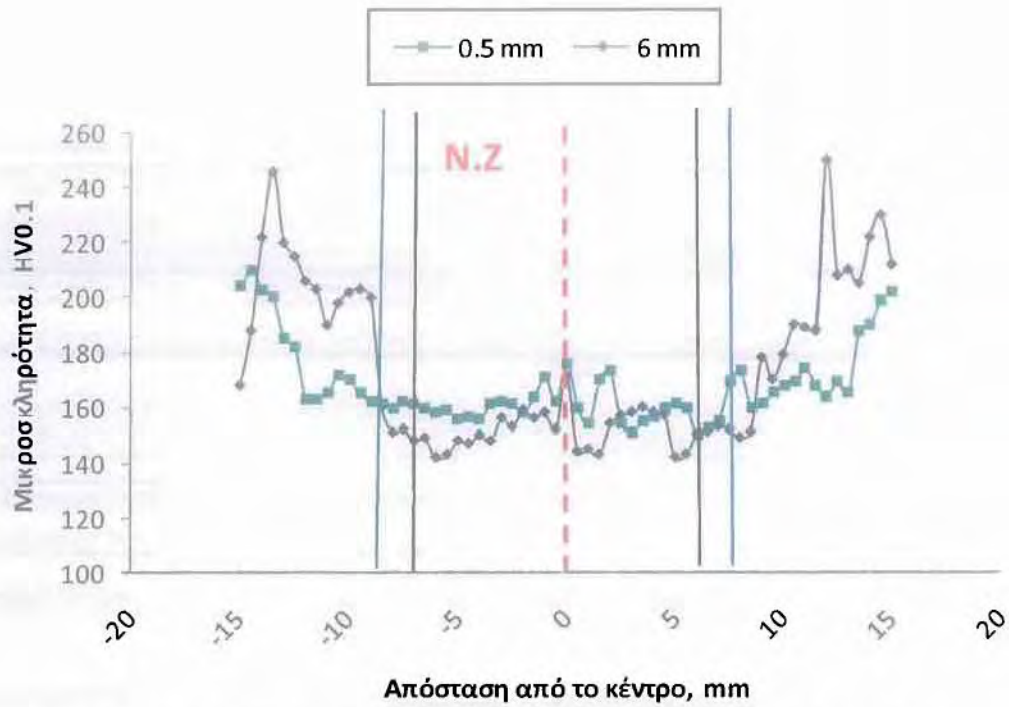
Παρακάτω παρατίθενται τα προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων P2P2, P2P3, P2P4, P2P6, P2P9, P2P10, P2P11 στις εικόνες 4.37- 4.43 και η ομοιότητα σε όλα τα προφίλ είναι ότι στα 6 mm βάθος η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη απ' ότι στο 0.5mm. Επίσης η περιοχή ανάδευσης έχει τις χαμηλότερες ιδιότητες καθώς φαίνεται.



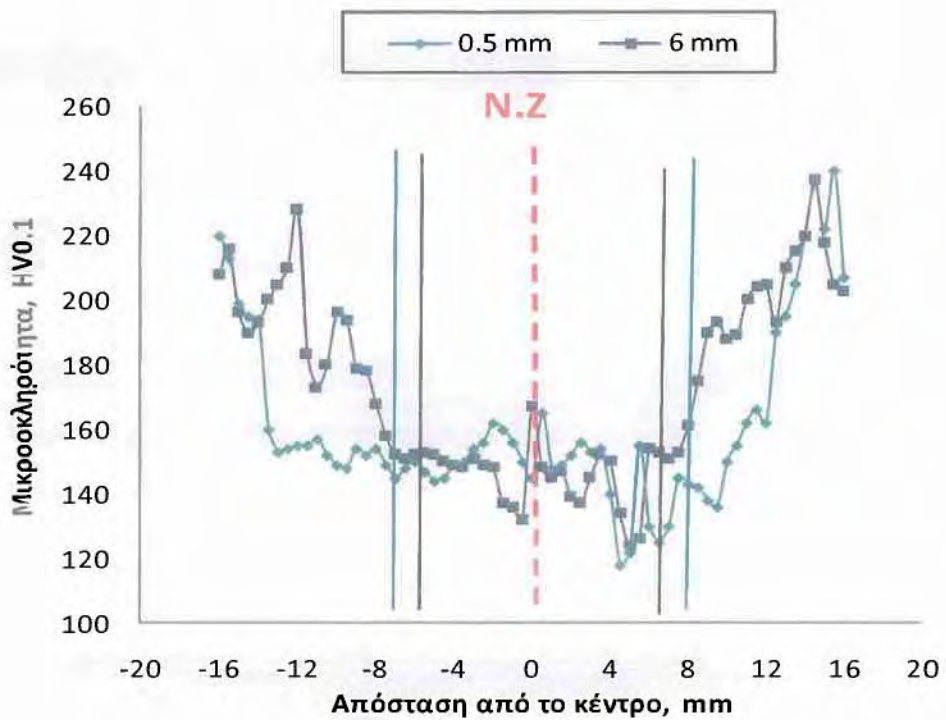
**Σχήμα 4.37:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P2 σε βάθος 0.5 και 6 mm



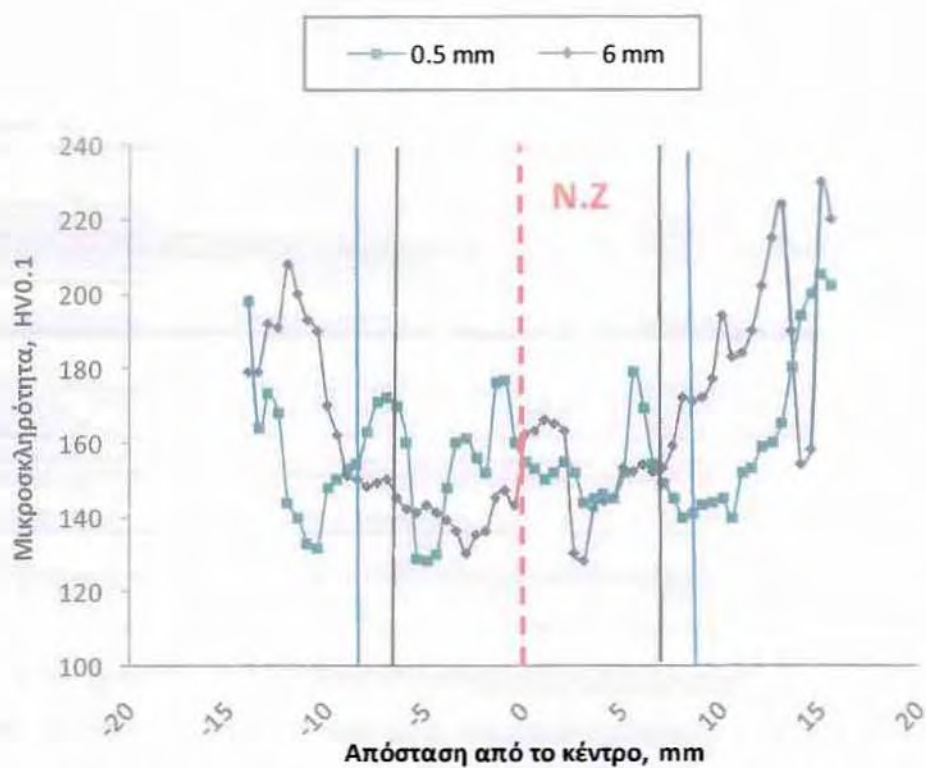
**Σχήμα 4.40:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P3 σε βάθος 0.5 και 6 mm



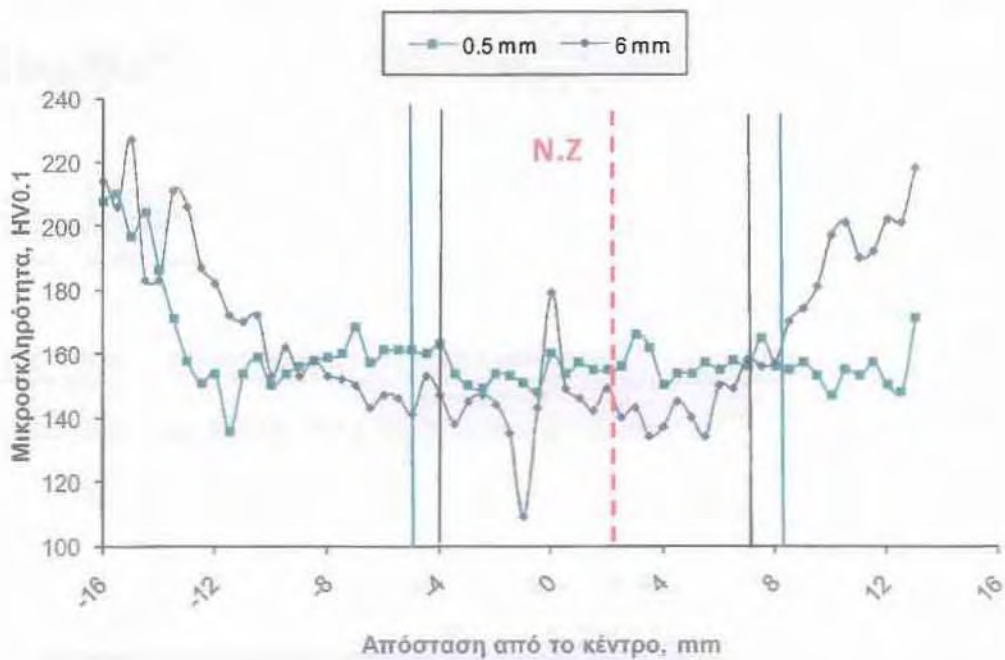
Σχήμα 4.41: Προφίλ μικροσκληρότητας P2P4 σε βάθος 0.5 και 6 mm



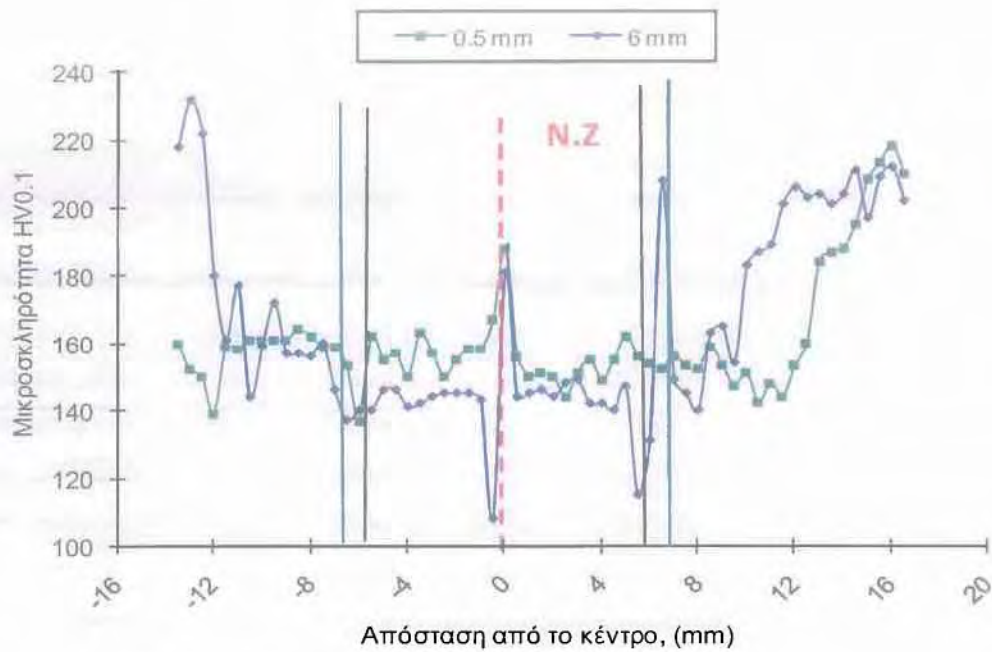
Σχήμα 4.42: Προφίλ μικροσκληρότητας P2P6 σε βάθος 0.5 και 6 mm



**Σχήμα 4.41:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P9 σε βάθος 0.5 και 6 mm



**Σχήμα 4.42:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P10 σε βάθος 0.5 και 6 mm

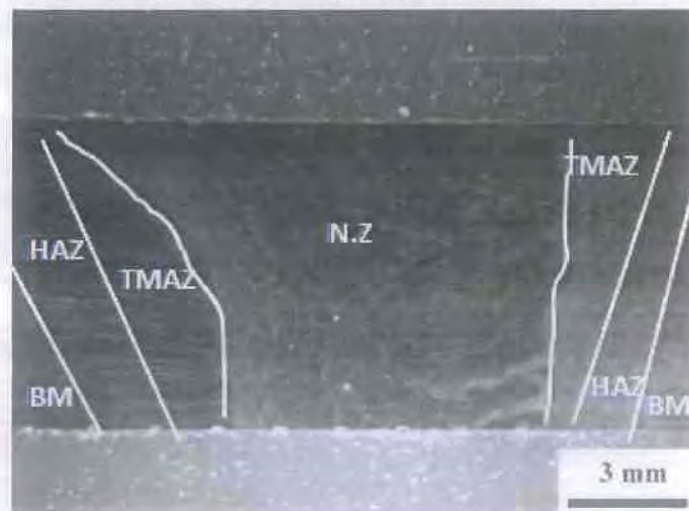


**Σχήμα 4.43:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2P11 σε βάθος 0.5 και 6 mm

## 4.2 ΟΜΑΔΑ Β: ΔΟΚΙΜΙΑ Ρ2Ε

### 4.2.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

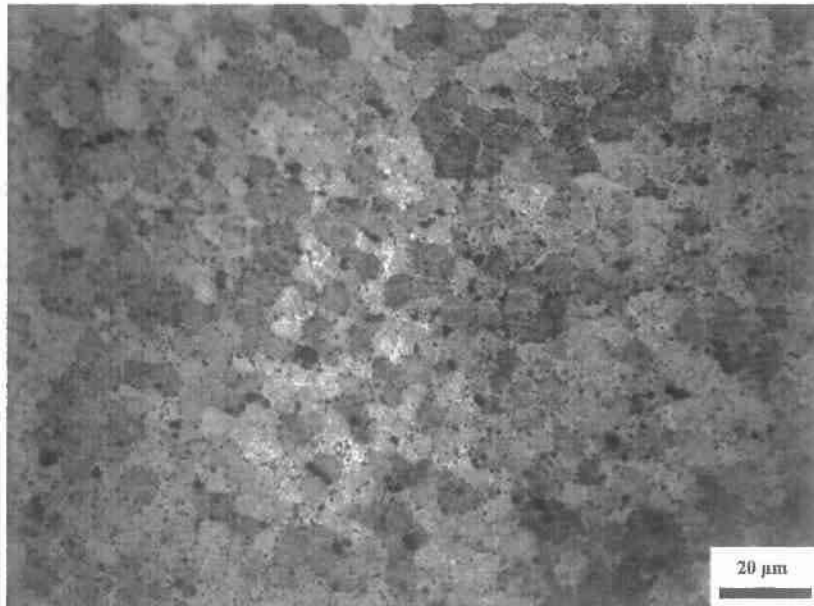
Στην εικόνα 4.44 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της μικροδομής του FSW όπου ξεχωρίζουν όπως έχει ειπωθεί οι εξής ζώνες : ζώνη ανάδευσης (N.Z), η θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη (TMAZ), η θερμοεπηρεασμένη ζώνη (HAZ) και το βασικό μέταλλο (BM).



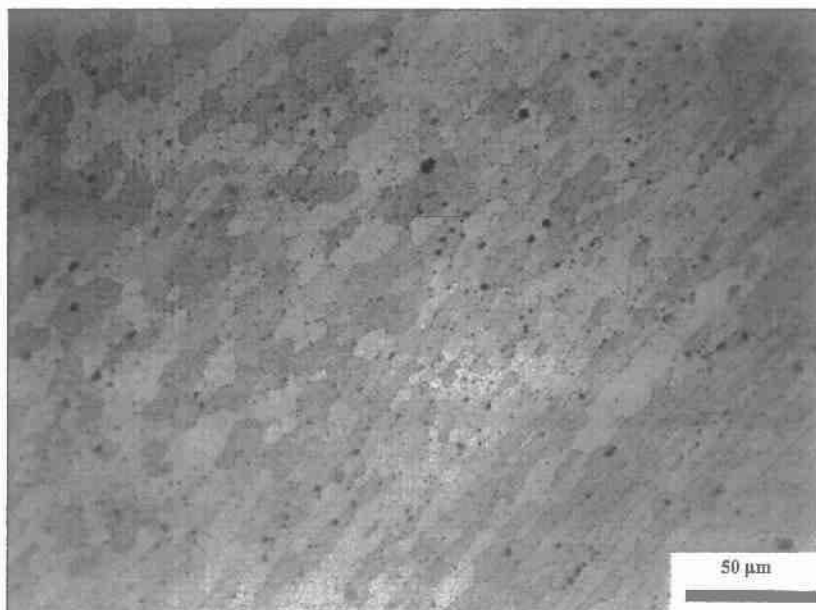
**Σχήμα 4.44:** Μακροδομή FSW

## 4.2.2 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

Στην εικόνα 4.45 παρατίθεται μία τυπική μικροδομή της ζώνης ανάδευσης της ομάδας P2E και στην 4.46 διακρίνονται οι επιμηκυνμένοι/παραμορφωμένοι κόκκοι της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Οι δύο μικροδομές δεν έχουν σχεδόν καμία διαφορά από τις αντίστοιχες των P2P, γιατί οι οποιες διαφορές εξαλίφθησαν κατά την θερμική κατεργασία που ακολούθησε μετά τη συγκόλληση.



*Σχήμα 4.45:* Μικροδομή N.Z, ισοαξονικοί κόκκοι

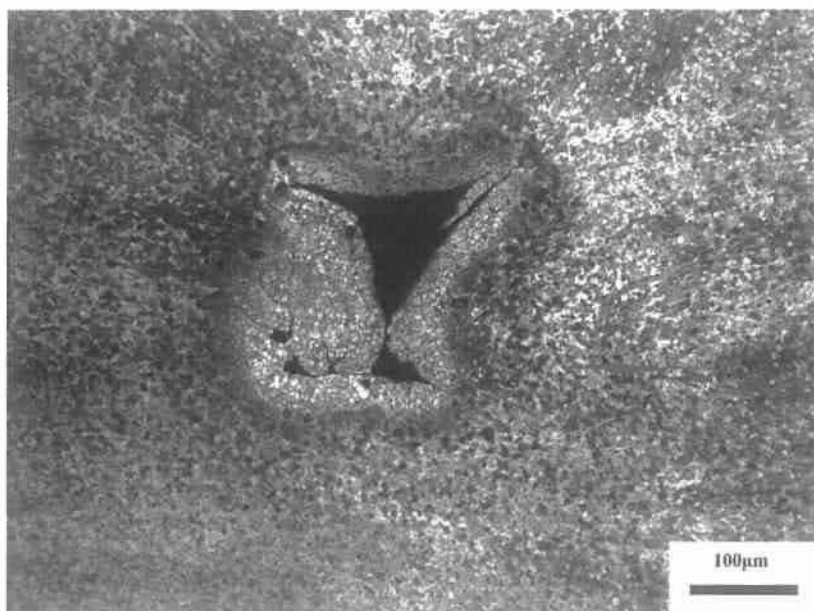


*Σχήμα 4.46:* Μικροδομή TMAZ, επιμηκυνμένοι κόκκοι

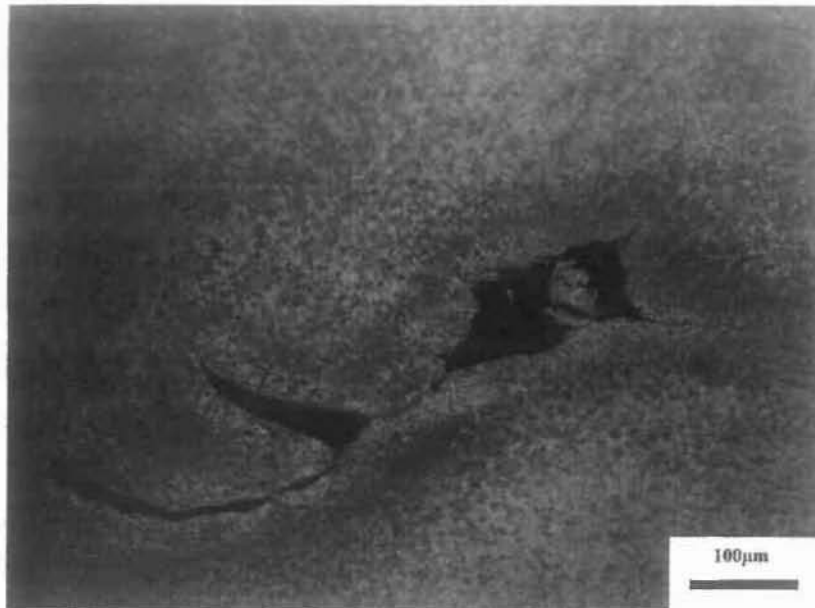


Παρατηρώντας όμως καλύτερα στο οπτικό μικροσκόπιο παρατηρούνται στην μεριά του ελάσματος που έχει υποστεί διέλαση ασυνέχειες (Βλ. Σχ. 4.47, 4.48, 4.49) Αυτού του είδους η ασυνέχεια στο υλικό παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια της κατηγορίας P2E και μάλιστα από την μεριά του συγκολλημένου υλικού διέλασης. Δηλαδή τα κενά βρίσκονται στην προωθημένη πλευρά της συγκόλλησης (advancing site). Οι ασυνέχειες αυτές όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία οφείλονται στην κατεργασία της συγκόλλησης. Για δεδομένο εργαλείο ο σχηματισμός κενών (ασυνεχειών) οφείλεται στη μη-επαρκή πίεση του εργαλείου είτε στην πολύ υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης ή και ακόμη στην κακή συγκράτηση των δοκιμίων. Το πρόβλημα προκαλείται από την κακή ροή θερμότητας του σχηματιζόμενου υλικού, στην περιοχή ανάδευσης. Το «μαλακό» υλικό που σχηματίζεται από το εργαλείο της FSW θα πρέπει να μπορεί να καλύπτει τα κενά αυτά καθώς μετακινείται. Εάν όμως το εργαλείο ή οι συνθήκες συγκόλλησης είναι ακατάλληλα το σχηματιζόμενο υλικό θα ψυχθεί προτού το υλικό μπορέσει να γεμίσει την περιοχή ακριβώς πίσω από το εργαλείο. Σε αντίθεση με το περιουχένιο που θα πρέπει να παράγει επαρκή θερμότητα έτσι ώστε να επιτρέπει το υλικό να ρέει γύρω από το εργαλείο. Έτσι εάν παράγεται λιγότερη θερμότητα απ ότι απαιτείται ( μέσω της μη-επαρκούς προώθησης του εργαλείου ή λανθασμένης διαμέτρου του περιουχενίου) τότε το υλικό δεν θα "ρέει" όπως πρέπει και έτσι θα δημιουργηθούν τα κενά αυτά. [9].

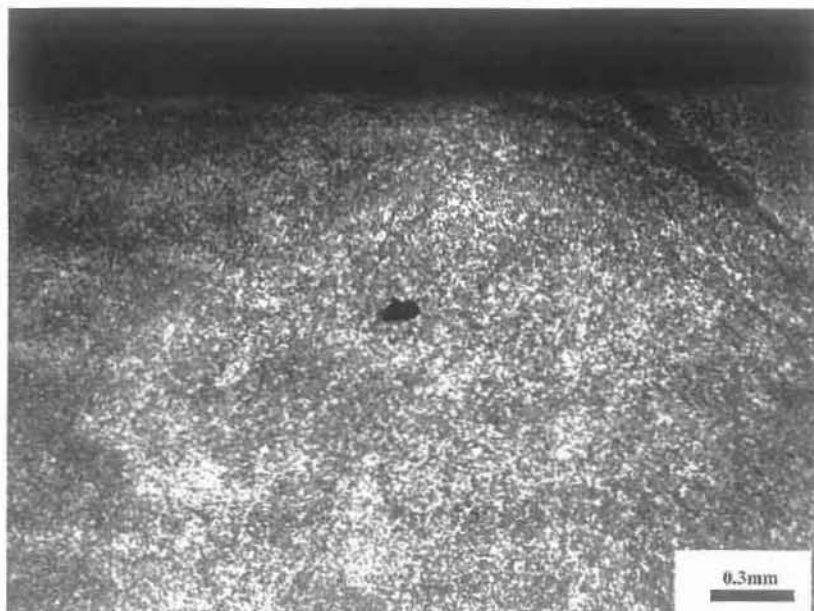
Από την μακροσκοπική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα εντοπίζονται οι παραπάνω ασυνέχειες. Σε συμφωνία με το παραπάνω συμπέρασμα οι ασυνέχειες στα δοκίμια P2E βρίσκονται στο κάτω μέρος της ζώνης ανάδευσης και όχι στο πάνω από όπου περνάει το περιουχένιο (το οποίο παράγει επαρκή θερμότητα για την ροή του υλικού).



**Σχήμα 4.47:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης



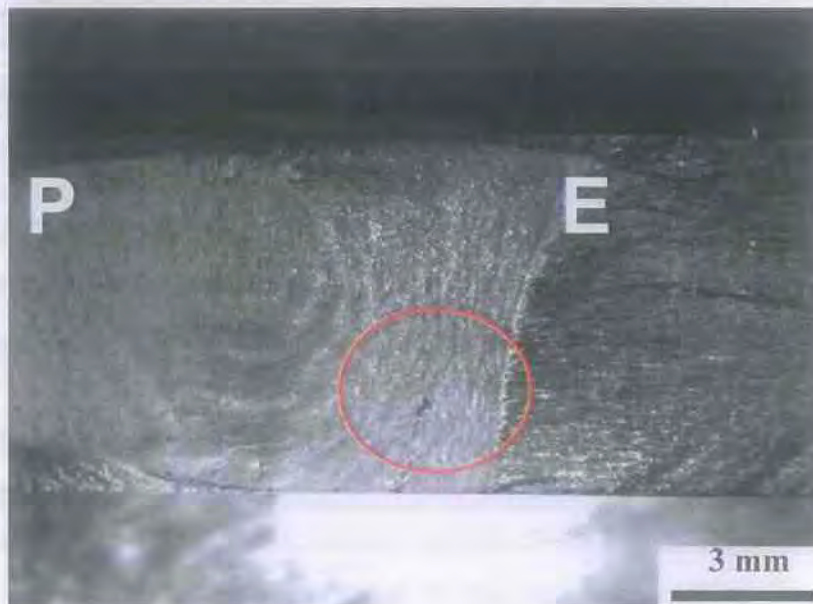
**Σχήμα 4.48:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης που έχει διαδοθεί η ρωγμή



**Σχήμα 4.49:** Ασυνέχεια στο εσωτερικό της NZ στην πλευρά του υλικού διέλασης

### 4.2.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

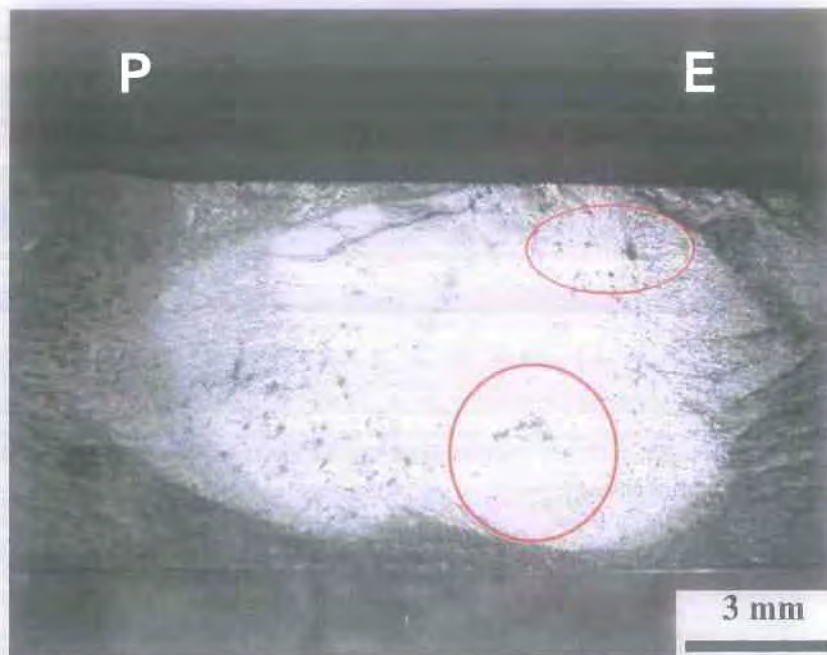
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμών P2E (βλ. Σχήματα 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54). Σε όλες σημειώνεται η πλευρά του ελάσματος (P) και η πλευρά του υλικού διέλευσης (E). Παρατηρείται ως κοινό χαρακτηριστικό όλων των επιφανειών οι ασυνέχειες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η έναρξη της κόπωσης εντοπίζεται μέσα στο NZ από την πλευρά της διέλευσης.



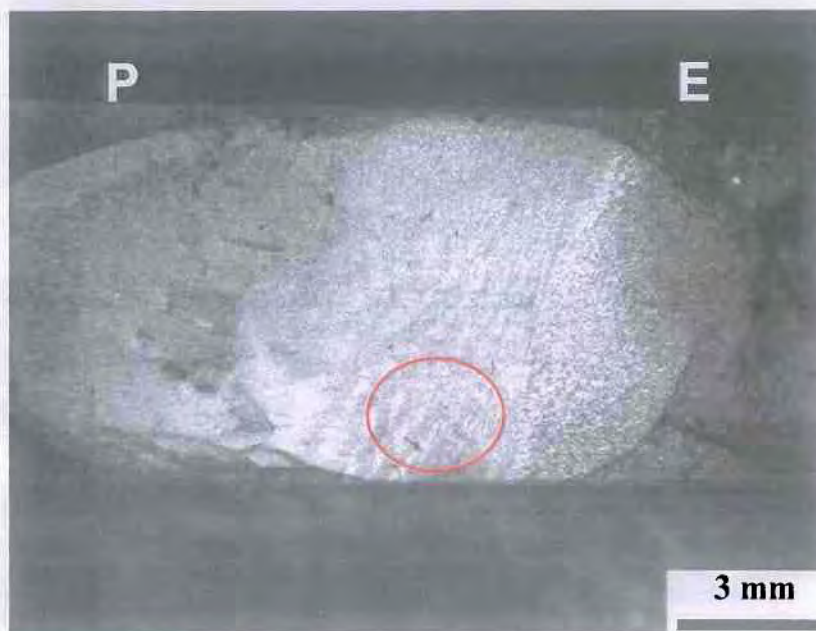
**Σχήμα 4.50:** Επιφάνεια θραύσης P2E2 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 1.394.606$ )



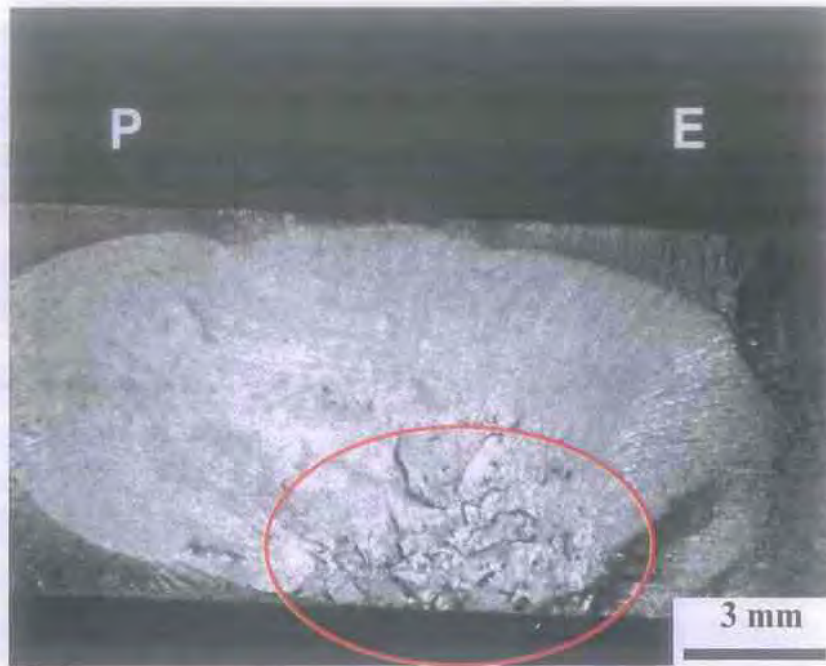
**Σχήμα 4.51:** Επιφάνεια θραύσης P2E4 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 180.148$ )



*Σχήμα 4.52:* Επιφάνεια θραύσης P2E5 ( $\sigma_{max} = 266$ ,  $N_f = 109.126$ )



*Σχήμα 4.53:* Επιφάνεια θραύσης P2E6 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 1.338.871$ )

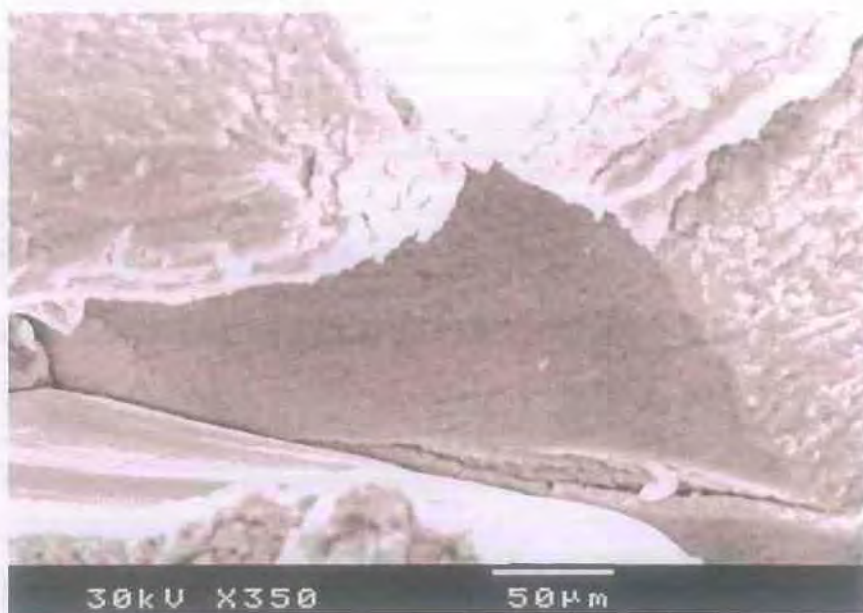


**Σχήμα 4.54:** Επιφάνεια θραύσης P2E7 ( $\sigma_{max} = 200$ ,  $N_f = 73.316$ )

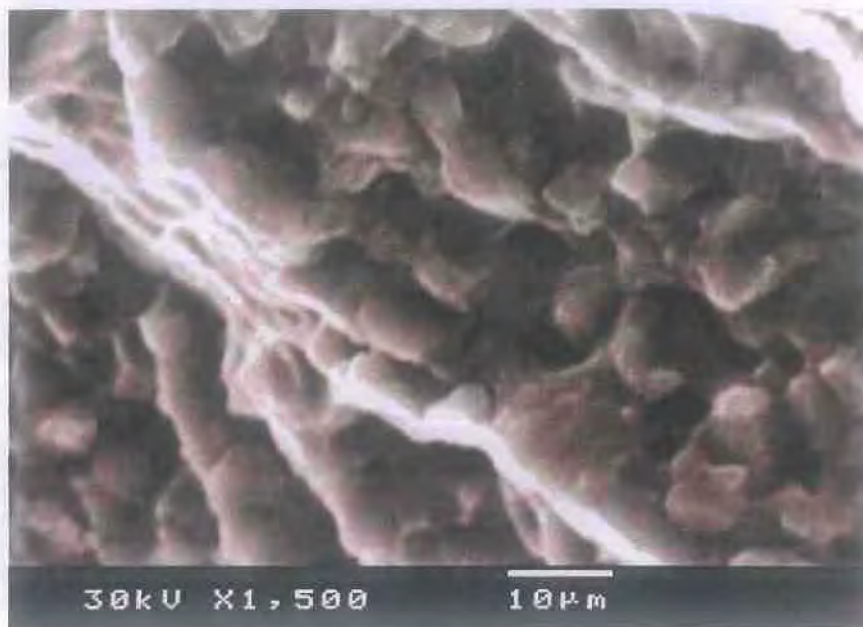
Παρακάτω στα Σχήματα 4.55, 4.56 παρουσιάζεται η έναρξη της ρωγμής κόπωσης η οποία ξεκινά από ασυνέχεια μεταξύ της μήτρας του υλικού και της πρωτογενούς φάσης. Στο Σχήμα 4.57 η διάδοση της ρωγμής βρίσκεται στη ζώνη ανάδευσης και όπως προκύπτει η θραύση είναι περικρυσταλλική.



**Σχήμα 4.55:** Έναρξη ρωγμής κόπωσης σε ασυνέχεια.

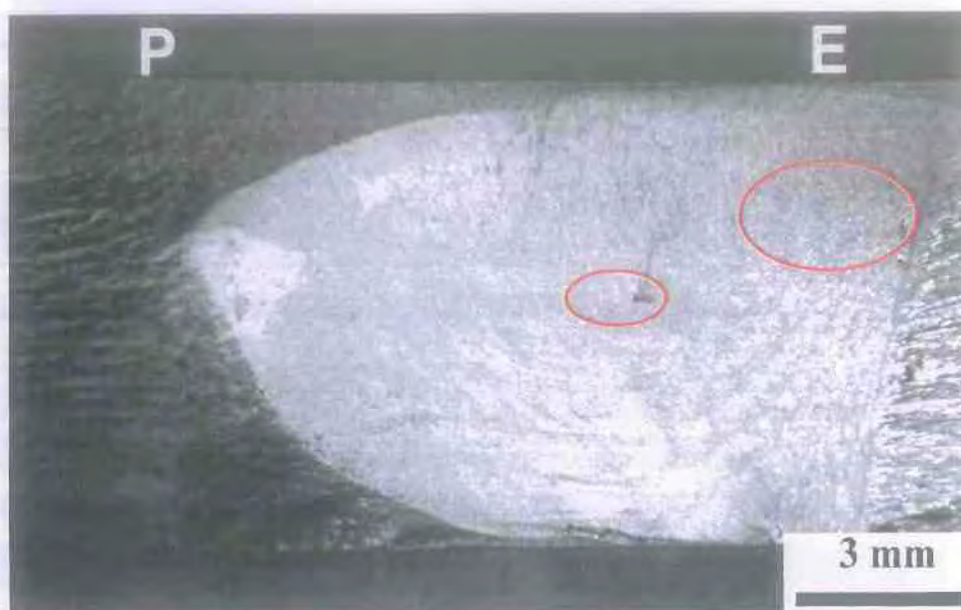


**Σχήμα 4.56:** Έναρξη ρωγμής κόπωσης



**Σχήμα 4.57:** Διάδοση ρωγμής στην ζώνη ανάδευσης. Περικρυσταλλική θραύση

Στα Σχήματα 4.58, 4.59, 4.60 οι επιφάνειες θραύσης παρουσιάζουν το ίδιο πρόβλημα των ασυνεχειών στην πλευρά του υλικού που έχει υποστεί διέλαση.



**Σχήμα 4.58:** Επιφάνεια θραύσης P2E8 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 376.432$ )



**Σχήμα 4.59:** Επιφάνεια θραύσης P2E10 ( $\sigma_{max} = 222$ ,  $N_f = 296.652$ )



**Σχήμα 4.60:** Επιφάνεια θραύσης P2E12 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 99.673$ )

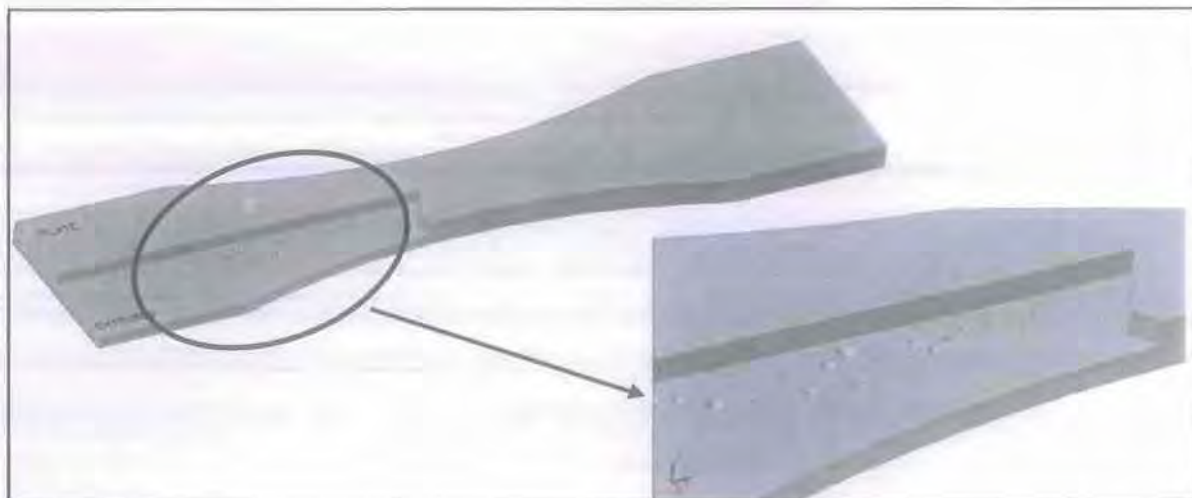
Μια μεγέθυνση της επιφάνειας θραύσης του P2E12 εκεί ακριβώς όπου παρουσιάζονται οι ασυνέχειες φαίνεται στο Σχήμα 4.61.



**Σχήμα 4.61:** Επιφάνεια θραύσης P2E12 ( $\sigma_{max} = 177$ ,  $N_f = 99.673$ )



Όπως παρατηρεί κανείς σε όλες τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων P2E κοινό χαρακτηριστικό είναι τα διάκενα που βρίσκονται από την πλευρά του υλικού που έχει υποστεί διέλαση (Extruded). Στο Σχ. 4.62 απεικονίζεται σχηματικά η περιοχή που βρίσκονται τα κενά στα εξεταζόμενα δοκίμια P2E της παρούσας εργασίας.

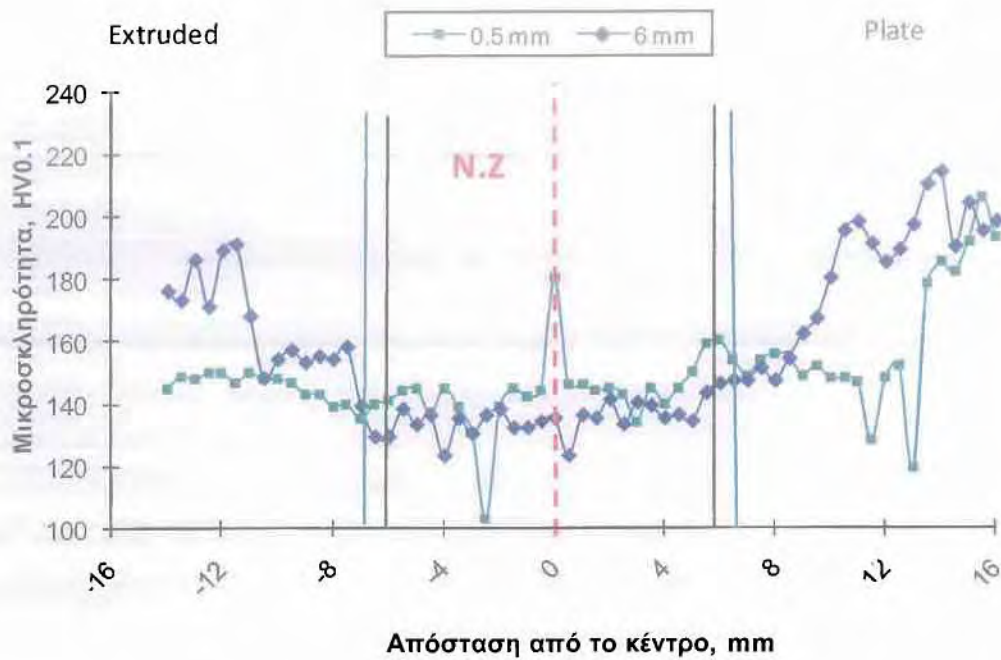


**Σχήμα 4.62:** Σχηματική αναπαράσταση της ασυνέχειας όλων των P2E στην πλευρά του υλικού διέλασης ( advancing site)

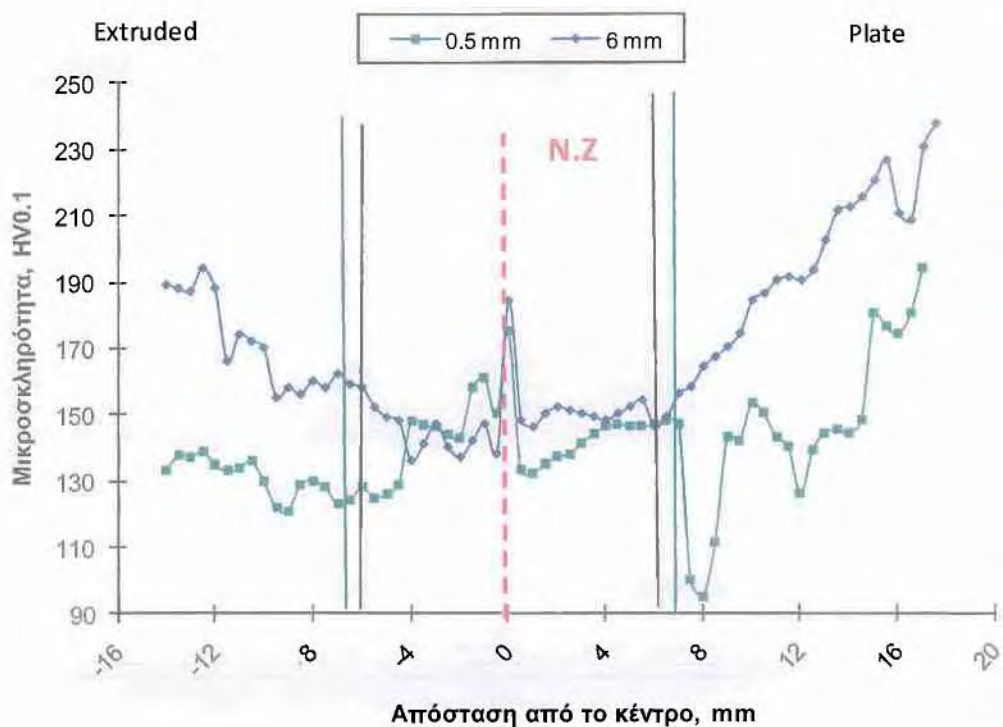
#### 4.2.3 ΠΡΟΦΙΛ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ P2E

Παράκατω παρουσιάζονται τα προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων P2E σε βάθος 0.5 mm και 6 mm.

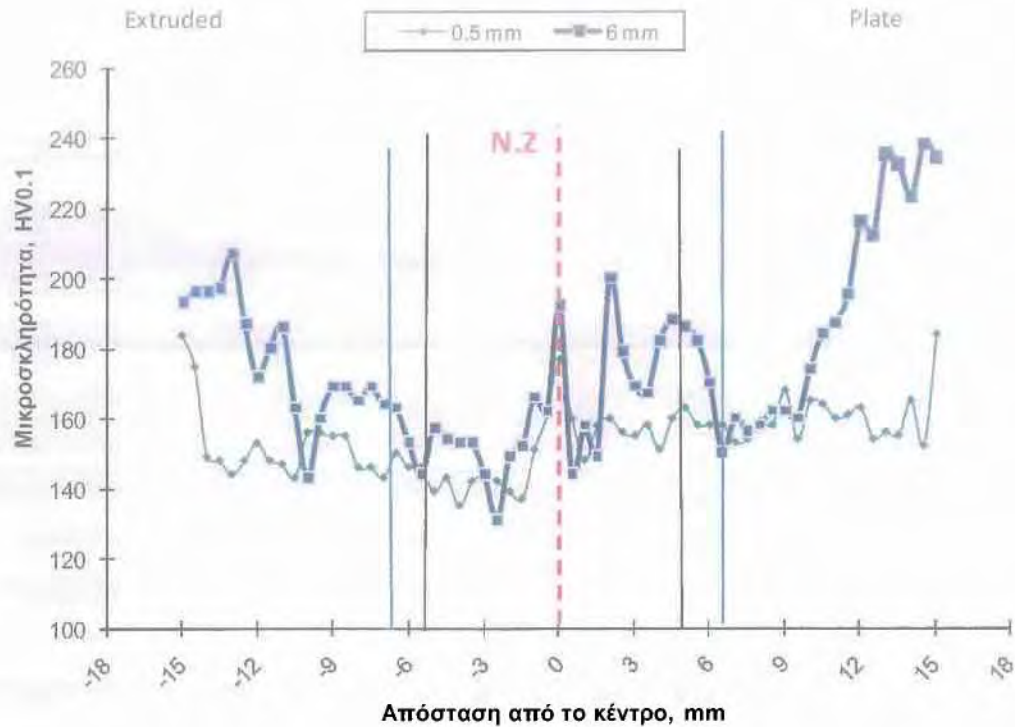
Αρχικά όπως προκύπτει από τα Σχήματα 4.63, 4.64 και 4.65 η σκληρότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται το βάθος όπου γίνονται οι μετρήσεις. Επίσης και σε αυτή την ομάδα δοκιμίων η σκληρότητα στη ζώνη ανάδευσης είναι χαμηλότερη σε όλο το πλάτος του δοκιμίου. Αλλά γενικά είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η σκληρότητα στην ομάδα αυτών των δοκιμίων είναι χαμηλότερη από αυτή της πρώτης ομάδας δοκιμίων P2P. Τέλος χαμηλότερες τιμές σκληρότητας παρατηρούνται στο υλικό συγκόλλησης όπου έχει υποστεί διέλαση (extruded). Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη από τα δοκίμια P2P.



**Σχήμα 4.63:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E1 σε βάθος 0.5 και 6 mm

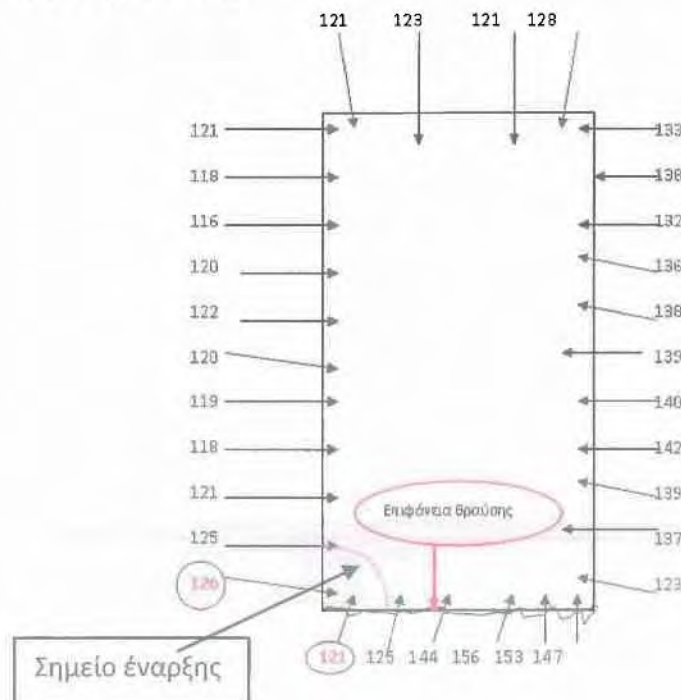


**Σχήμα 4.64:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E2 σε βάθος 0.5 και 6 mm

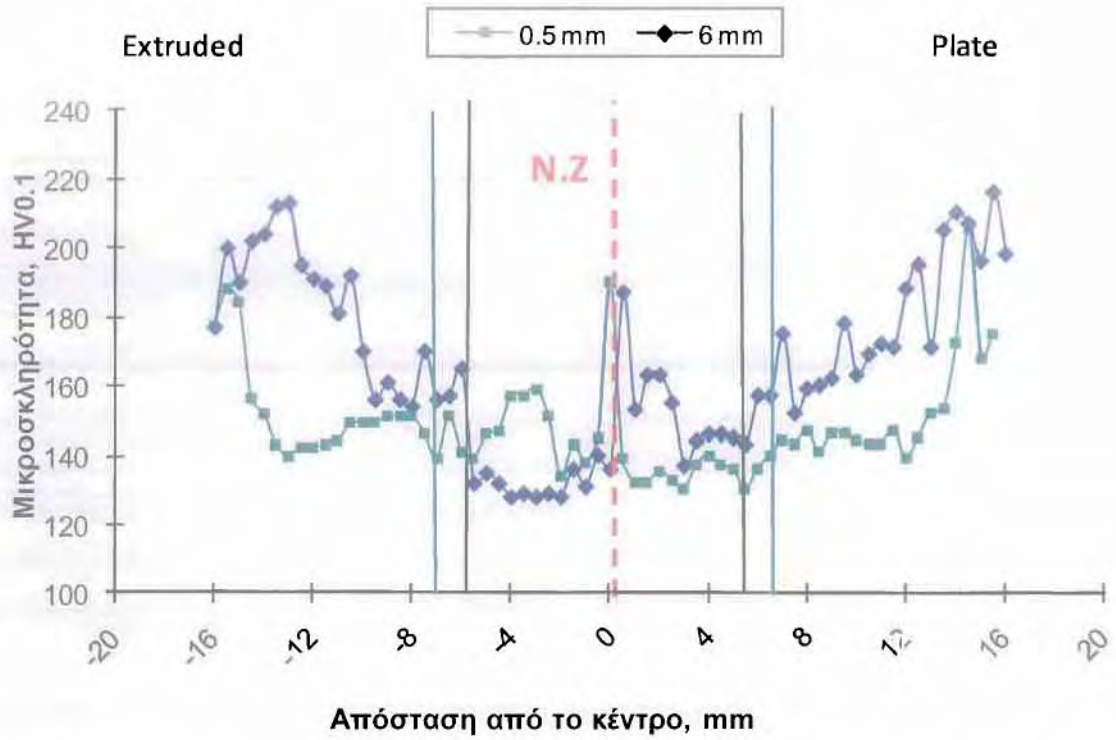


**Σχήμα 4.65:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E4σε βάθος 0.5 και 6 mm

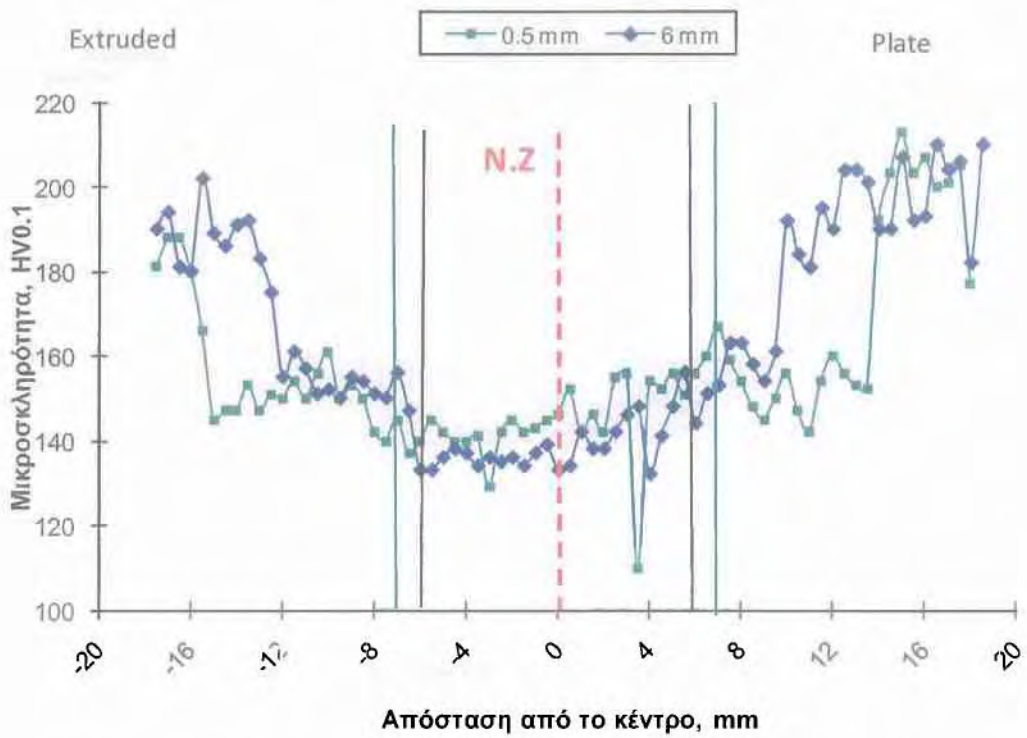
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία στην περιοχή της έναρξης θραύσης κόπηκε δοκίμιο από κάθετη τομή και στο Σχήμα 4.66 παρουσιάζονται οι τιμές μικροσκληρομέτρησής του. Και στο P2E4 δοκίμιο παρουσιάζονται χαμηλές τιμές σκληρότητας στην περιοχή όπου βρίσκεται η έναρξη της θραύσης.



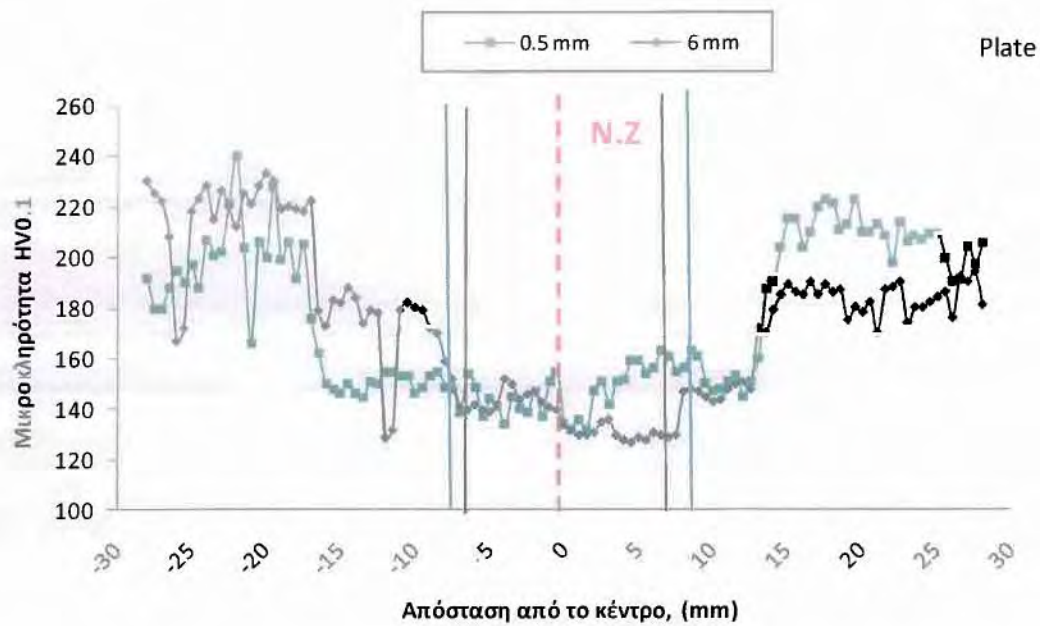
**Σχήμα 4.66:** Μικροσκληρότητα δοκιμίου P2E4 κάθετης τομής



**Σχήμα 4.67:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E5 σε βάθος 0.5 και 6 mm

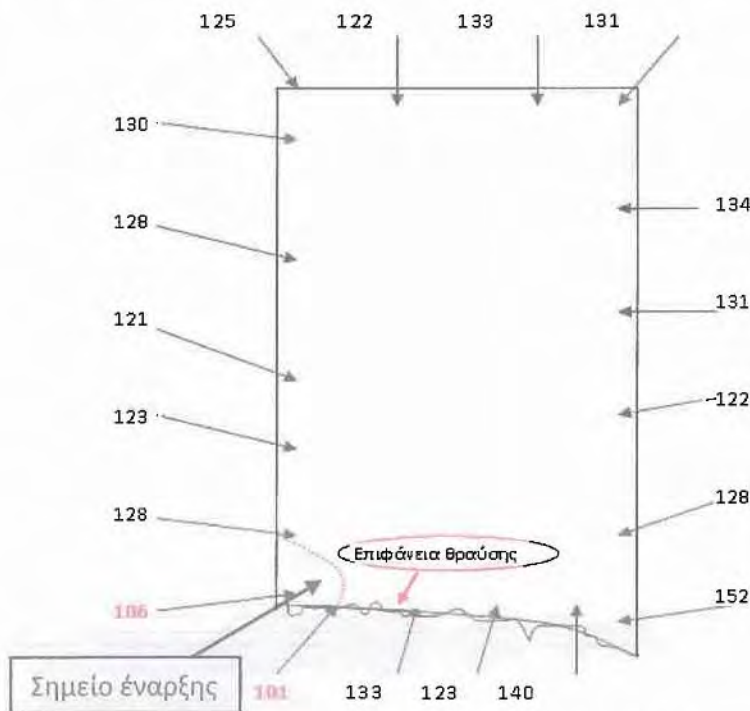


**Σχήμα 4.68:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E6 σε βάθος 0.5 και 6 mm

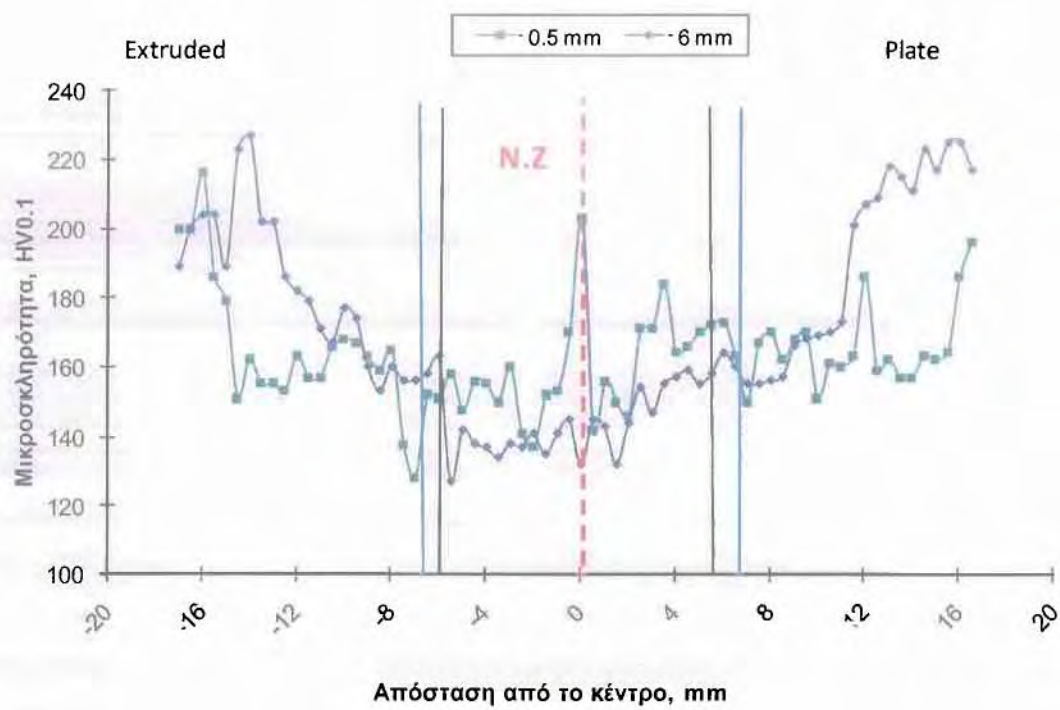


**Σχήμα 4.69:** προφίλ μικροσκληρότητας P2E7 σε βάθος 0.5 και 6 mm

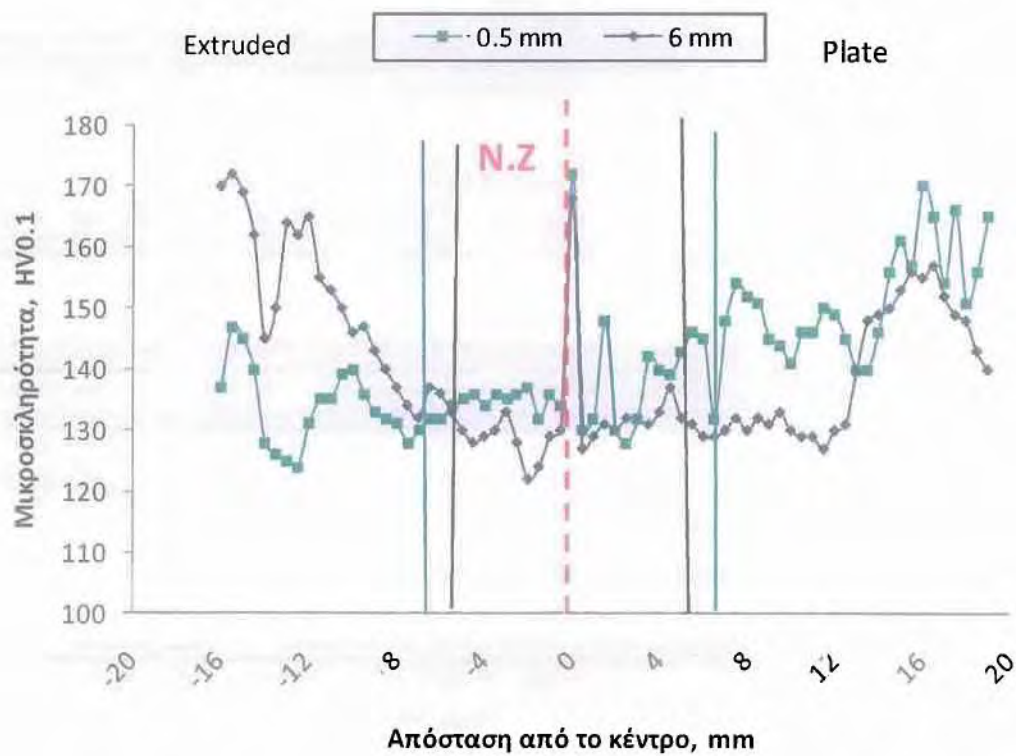
Επίσης στο Σχήμα 4.70 επιβεβαιώνεται η παρατήρηση που έγινε και στο προηγούμενο δοκίμιο (P2E4 τομής), δηλαδή στην περιοχή έναρξης της θραύσης ταυτίζεται με την περιοχή χαμηλής σκληρότητας. Οι ιδιότητες του υλικού σε αυτή την περιοχή είναι χαμηλότερες. Παρακάτω στα Σχήματα 4.71, 4.72, 4.73 παρουσιάζονται τα προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων P2E8, P2E10, P2E12 αντίστοιχα.



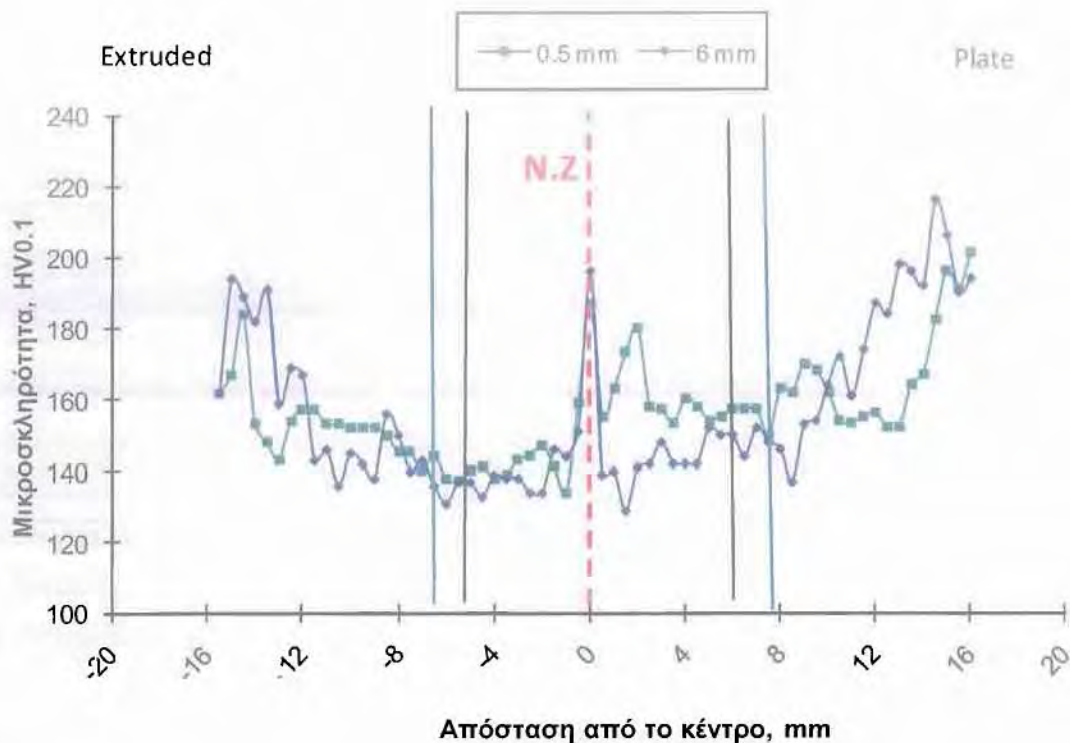
**Σχήμα 4.70:** Μικροσκληρότητας δοκιμίου P2E7 κάθετης τομής



**Σχήμα 4.71:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E8 σε βάθος 0.5 και 6 m



**Σχήμα 4.72:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E10 σε βάθος 0.5 και 6 mm



**Σχήμα 4.73:** Προφίλ μικροσκληρότητας P2E12 σε βάθος 0.5 και 6 mm

## 4.3 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.3.1 ΔΟΚΙΜΙΑ P2P

#### Μικροδομή

Η ζώνη ανάδευσης αποτελείται από ισοαξονική δομή με σύνορα υψηλής γωνίας και η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη από επιμηκυσμένους/παραμορφωμένους κόκκους. Σε αυτές τις περιοχές όπως και στην περιοχή της θερμοεπηρεασμένης ζώνης παρατηρούνται οι πρωτογενείς φάσεις διασποράς (dispersoids).

#### Επιφάνειες Θραύσης

Στις επιφάνειες θραύσης παρατηρήθηκαν αυλακώσεις κόπωσης οι οποίες οδηγούν σε περικρυσταλλική θραύση και υπάρχουν στο σύνορο NZ- TMAZ

#### Μικροσκληρότητα

Από τα προφίλ μικροσκληρότητας εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η μικροσκληρότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται το βάθος, ξεκινώντας από την επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με το περιαιχένιο.
- Οι μικρότερες τιμές σκληρότητας παρατηρούνται στην ζώνη ανάδευσης
- Η έναρξη της θραύσης βρίσκεται στην περιοχή όπου συναντώνται οι χαμηλότερες τιμές σκληρότητας

## **Κόπωση**

Το σημείο έναρξης της ρωγμής κόπωσης συμπίπτει απόλυτα με τη ζώνη χαμηλής σκληρότητας που παρατηρήθηκε κατά τις μικροσκληρομετρήσεις των δοκιμίων και σημειώνεται στο Σχ.4.35. Η απώλεια συνοχής των φάσεων με τη μήτρα, πιθανόν να συνεισέφερε στην τοπική αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης πριν την έναρξη της ρωγμής κόπωσης. Σε αυτό συνεισέφερε και η χαμηλή σκληρότητα στην περιοχή προκαλώντας συγκέντρωση της πλαστικής παραμόρφωσης (plastic confinement region) [15,16] Η διάδοση της ρωγμής της κόπωσης χαρακτηρίζεται ως περικρυσταλλική.

### **4.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ P2E**

#### **Μικροδομή**

Η μικροδομή είναι η ίδια με αυτή των δοκιμίων P2P. Η ζώνη ανάδευσης έχει ισοαξονική δομή με σύνορα υψηλής γωνίας και η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, η οποία αποτελείται από επιμηκυσμένους/παραμορφωμένους κόκκους.

#### **Επιφάνειες Θραύσης**

Στις επιφάνειες θραύσης παρατηρήθηκαν ασυνέχειες σε όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια. Οι ασυνέχειες βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου στην ζώνη ανάδευσης.

#### **Μικροσκληρότητα**

Από τα προφίλ μικροσκληρότητας εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η μικροσκληρότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται το βάθος ξεκινώντας από την επιφάνεια όπου βρίσκεται σε επαφή με το περιαυχένιο.
- Οι μικρότερες τιμές σκληρότητας παρατηρούνται στην ζώνη ανάδευσης
- Σε επιλεγμένα δοκίμια παρατηρείται ότι η σκληρότητα είναι μικρότερη στην μεριά του υλικού όπου έχει υποστεί διέλαση
- Η έναρξη της θραύσης βρίσκεται στην περιοχή όπου συναντώνται οι χαμηλότερες τιμές σκληρότητας

## **Κόπωση**

Η έναρξη της κόπωσης ταυτίζεται απόλυτα με την περιοχή στη ζώνη ανάδευσης στην οποία βρίσκονται οι ασυνέχειες και η περιοχή χαμηλής σκληρότητας. Η διάδοση της ρωγμής της κόπωσης χαρακτηρίζεται ως περικρυσταλλική.



## 5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν πειραματικά αποτελέσματα του νέου αεροπορικού κράματος αλουμινίου 2195 στο οποίο εφαρμόστηκε συγκόλληση με ανάδευση και τριβή (FSW). Αντικείμενο προς περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσουν τα παρακάτω:

- Βελτιστοποίηση της θερμικής κατεργασίας μετά τη συγκόλληση (PWHT) σε όλα τα δοκίμια με σκοπό την ομογενοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών (σκληρότητα).
- Βελτιστοποίηση της κατεργασίας συγκόλλησης FSW (στις συνθήκες συγκόλλησης καθώς και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πείρου) προκειμένου να αποφευχθούν οι ασυνέχειες σε δοκίμια P2E.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Thomas W M et al 1991 Friction stir butt welding International Patent Application No PCT/GB92/02203

Thomas W M et al 1995 Friction stir butt welding GB Patent Application No 9125978.8

Thomas W M et al 1995 Friction stir butt welding UP Patent No 5 460 317

[2] The Welding Institute, [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)

[3] H. Fujii, Y. Sun, H. Kato, K. Nakata, Mater. Sc. Eng.: A, vol. 527, pp. 3386-3391

[4] D.M. Rodrigues, A. Loureiro, C. Leitao, R.M. Leal, B.M. Chaparro, and P. Vilaca, Mater. Des., vol. 30, pp. 1913-1921

[5] P. Cavaliere, A. Squillace and F. Panella, Mater. Proc. Tech., vol. 200, pp. 364-372

[6] P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella and A. Squillace, Int. J. Mach. T. Man., vol. 46, pp. 588-594.

[7] Ph. Lequeu, Ph. Lassince, T. Warner, "Aluminium alloy development for the airbus A380", Advanced Materials & Processes, vol. 165, no. 7, pp. 40-44, Jul. 2007

[8] C. Genevois, A. Deschamps, A. Denquin, B. Doisneau-cottignies, Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds, Acta Materialia, 53 (2005) 2447-2458.

[9] T.U SEIDEL and REYNOLDS, Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction Stir Welds Using a Marker Insert Technique

[10] Rajiv S. Mishra, Center for Friction Stir Processing, University of Missouri-Rolla  
Murray W. Mahoney, Rockwell Scientific Company

[11] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμονόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, εκδόσεις Τζιόλα 2007

[12] R. Crooks, Z. Wang, V.I. Levit, R.N. Shenoy, Microtexture, microstructure and plastic anisotropy of AA2195, Materials Science and Engineering A257 (1998) 145-152

[13] J. A. SCHNEIDER, A. C. NUNES JR, P. S. CHEN, G. STEELE, TEM study of the FSW nugget in AA2195-T81 JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 40 (2005)

[14] J. Li, W. Chen, X. Zhao, W. Ren and Z. Zheng, 2006, Trans Nonferrous Met. Soc. China, vol. 16, pp. 1171-1177.

[15] K.V. Jata, K.K. Sankaran, and J.J. Ruschau, 2000, Metallurgical & Materials Transactions A, Vol. 31A, pp. 2181-2192

[16] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, 2007. Composites Science and Technology. vol. 67. pp. 605-615.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104651