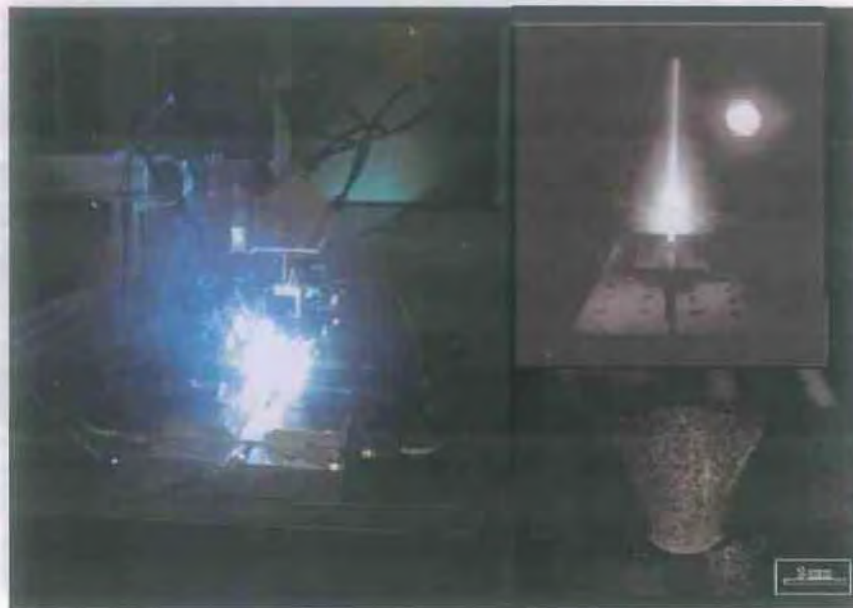




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΝΕΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΔΕΣΜΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (LBW, EBW)**



υπό

ΔΕΣΠΟΙΝΑΣ ΒΡΙΑΜΗ

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

2010



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

Αριθ. Εισ.: 8651/1
Ημερ. Εισ.: 10-08-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
BPI

© 2010 Δέσποινα Βριάμη

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

Διδάσκ. ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Δρ. κ. Άννα Ζερβάκη, για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω πολλές ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές του. Επίσης, είμαι ευγνώμων στους προαναφερθέντες και στον καθηγητή κ. Νικόλαο Αράβα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ την εταιρεία EBETAM A.E. για τον εξοπλισμό των μη καταστρεπτικών ελέγχων που μου παραχώρησε και τον καθηγητή κ. Αλέξανδρο Κερμανίδη και τον Ανδρέα Τζαμτζή για τη βοήθειά τους στη διεκπεραίωση των μηχανικών δοκιμών . Ευχαριστώ τον συνάδελφο και φίλο Δημήτρη Κουλίδη για τη συνεργασία κατά την παράλληλη εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών. Ευχαριστώ τις φίλες μου Έλενα, Μαριέτα, Μαριλένα και Ντόρα για την ηθική υποστήριξή τους. . Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου, τον πατέρα μου Παρίση Βριάμη, τη μητέρα μου Αναστασία Μπογιατζή και την αδερφή μου Νικολέτα Βριάμη, η συμπαράσταση των οποίων ήταν πολύτιμη για εμένα.

Αφιερώνω αυτή την διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου.

Δέσποινα Βριάμη

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΝΕΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΔΕΣΜΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (LBW, EBW)

ΒΡΙΑΜΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών 2010

Επιβλέπουσα: Δρ. Άννα Ζερβάκη, Διδάσκουσα ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συγκριτικά πειραματικά αποτελέσματα συγκολλήσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση CO₂ laser υψηλής ισχύος (LBW), καθώς και με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW). Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι τα νέα αεροπορικά κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής 2139 (Al-Mg-Cu-Ag) και 2198 (Al-Cu-Li). Πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση σε δείγματα bead-on-plate για τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης και με τις δύο μεθόδους στη βάση της μεταβολής του ρυθμού εισαγωγής θερμότητας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αυτογενείς συγκολλήσεις συμβολής (butt joints).

Τα δοκίμια αξιολογήθηκαν με στερεοσκοπία, οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία, μικροσκληρομετρήσεις καθώς και δοκιμές εφελκυσμού. Στην εργασία παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα καθώς και συσχέτιση με τις πειραματικές συνθήκες ως προς την ποιότητα των συγκολλήσεων LBW και EBW.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ποιότητα των συγκολλήσεων συνδέεται με τις χρησιμοποιούμενες πειραματικές συνθήκες, και η εφαρμογή θερμικής κατεργασίας μετά τη συγκόλληση μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων συγκολλήσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 Κράματα Αλουμινίου.....	5
2.1.1 Συμβολισμός Κραμάτων Αλουμινίου.....	5
2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου.....	7
2.2.1 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο LASER BEAM WELDING(LBW).....	8
2.2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο ELECTRON BEAM WELDING(EBW).....	10
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	13
3.1 Σκοπός.....	13
3.2 Υλικά.....	13
3.3 Πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης.....	14
3.4 Μη καταστρεπτικός έλεγχος – Ραδιογραφία.....	19
3.5 Μελέτη μικροδομής συγκόλλησης	20
3.6 Μικροσκληρομέτρηση	20
3.7 Δοκιμές εφελκυσμού	21
3.8 Θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση (PWHT)	21
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	22
4.1 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις bead-on-plate.....	22
4.2 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις bead-on-plate (EBW).....	51
4.3 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης ως προς τον ΡΠΘ	63
4.4 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις συμβολής (LBW)	71
4.5 Δοκιμές εφελκυσμού σε συγκολλήσεις συμβολής (LBW)	74
4.6 Μικροδομή - χημική ανάλυση σε συγκολλήσεις bead-on-plate (LBW)	81
5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	90
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 3.1:</u> Χημική σύσταση των κραμάτων (% κ.β.).....	13
<u>Πίνακας 3.2:</u> Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων.....	13
<u>Πίνακας 3.3:</u> AL2198 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής).....	14
<u>Πίνακας 3.4</u> AL2139 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής).....	15
<u>Πίνακας 3.5:</u> AL2198 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής).....	16
<u>Πίνακας 3.6:</u> AL2139 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής).....	17
<u>Πίνακας 3.7:</u> AL2139 και AL2198 (bead-on-plate).....	19
<u>Πίνακας 4.1:</u> Συσχέτιση του Ρ.Π.Θ. με το πλάτος και βάθος της λίμνης συγκόλλησης.....	63
<u>Πίνακας 4.2:</u> Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<u>Σχήμα 1.1:</u> Βελτίωση των κραμάτων αλουμινίου σε συνάρτηση με το χρόνο[9].....	1
<u>Σχήμα 1.2:</u> Σχηματική παράσταση σύγκρισης μεθόδων Ηλώσεων και Συγκολλήσεων[10].....	2
<u>Σχήμα 1.3:</u> Εφαρμογή συγκολλήσεων laser σε τμήματα της ατράκτου σύγχρονων επιβατικών αεροσκαφών (πηγή Airbus Deutschland GMBH).....	3
<u>Σχήμα 1.4:</u> Διάγραμμα ροής φάσεων εργασίας.....	4
<u>Σχήμα 2.1:</u> Συμβολισμός κραμάτων Al.....	5
<u>Σχήμα 2.2:</u> Σύγκριση των κραμάτων 2198,2196 και 2139 σε σχέση με το 6156 ως προς το όριο θραύσης.....	7
<u>Σχήμα 2.3:</u> Μέθοδος Laser beam Welding.....	9
<u>Σχήμα 2.4:</u> Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης σε σχέση με την προσδιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια.....	9
<u>Σχήμα 2.5:</u> Συγκόλληση που πραγματοποιείται από δέσμη ηλεκτρονίων σε κλειστό θάλαμο σε πίεση 3 Pa (2×10^{-2} torr).....	11
<u>Σχήμα 3.1:</u> Πειραματική διάταξη Laser.....	18
<u>Σχήμα 3.2:</u> Συγκόλληση Laser	18
<u>Σχήμα 3.3:</u> Χαρακτηριστικά διάταξης EBW που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (EAB)....	19
<u>Σχήμα 3.4:</u> Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μικροσκληρομέτρησης σε εγκάρσιες τομές.....	20
<u>Σχήμα 3.5:</u> Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μικροσκληρομέτρησης σε διαμήκεις τομές.....	20
<u>Σχήμα 3.6:</u> Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου θερμικής κατεργασίας	21
<u>Σχήμα 4.1:</u> Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)	23
<u>Σχήμα 4.2:</u> Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	23
<u>Σχήμα 4.3:</u> Δοκίμιο 1 - Top View.....	24

Σχήμα 4.4: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας	24
Σχήμα 4.5: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 2970 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 89 J/mm)	25
Σχήμα 4.6: Δοκίμιο 2 – Profil Μικροσκληρότητας	25
Σχήμα 4.7: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3913 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 117 J/mm).....	26
Σχήμα 4.8: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας	26
Σχήμα 4.9: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 98 J/mm).....	27
Σχήμα 4.10: Δοκίμιο 5 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)	27
Σχήμα 4.11: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας.....	28
Σχήμα 4.12: Δοκίμιο 6 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3630, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 109 J/mm).....	28
Σχήμα 4.13: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)	29
Σχήμα 4.14: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	29
Σχήμα 4.15: Δοκίμιο 7 - Top View	30
Σχήμα 4.16: Δοκίμιο 7 – Profil Μικροσκληρότητας	30
Σχήμα 4.17: Δοκίμιο 7 – Profil Μικροσκληρότητας σε διαμήκη τομή	31
Σχήμα 4.18: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm).....	31
Σχήμα 4.19: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)	32
Σχήμα 4.20: Δοκίμιο 8 - Top View	32
Σχήμα 4.21: Δοκίμιο 9 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/m)	33
Σχήμα 4.22: Δοκίμιο 10 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)	33
Σχήμα 4.23: Δοκίμιο 11 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 1,8 m/min, ΡΠΘ: 108 J/m).....	34
Σχήμα 4.24: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 122 J/mm).....	34
Σχήμα 4.25: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 109 J/mm)	36
Σχήμα 4.26: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	36
Σχήμα 4.27: Δοκίμιο 1 - Top View.....	37
Σχήμα 4.28: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας σε διαμήκη τομή	37
Σχήμα 4.29: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 115 J/mm).....	38
Σχήμα 4.30: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	38
Σχήμα 4.31: Δοκίμιο 2 - Top View.....	39
Σχήμα 4.32: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 136 J/mm).....	39
Σχήμα 4.33: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	40

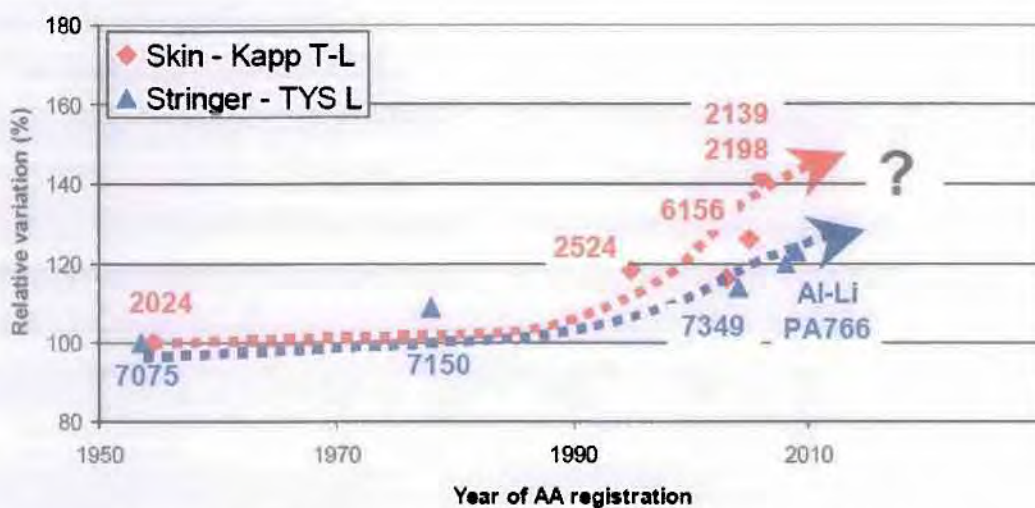
Σχήμα 4.34: Δοκίμιο 3 - Top View	40
Σχήμα 4.35: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/m)	41
Σχήμα 4.36: Δοκίμιο 5 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,8 m/min, ΡΠΘ: 127 J/mm)	41
Σχήμα 4.37: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας	42
Σχήμα 4.38: Δοκίμιο 6 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,83 m/min, ΡΠΘ: 122 J/mm)	42
Σχήμα 4.39: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 1,83 m/min, ΡΠΘ: 119 J/mm)	43
Σχήμα 4.40: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 129 J/mm)	43
Σχήμα 4.41: Δοκίμιο 8 – Profil Μικροσκληρότητας	44
Σχήμα 4.42: Δοκίμιο 9 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)	44
Σχήμα 4.43: Δοκίμιο 9 – Profil Μικροσκληρότητας	45
Σχήμα 4.44: Δοκίμιο 10 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)	45
Σχήμα 4.45: Δοκίμιο 10 – Profil Μικροσκληρότητας	46
Σχήμα 4.46: Δοκίμιο 11 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)	46
Σχήμα 4.47: Δοκίμιο 11 – Profil Μικροσκληρότητας	47
Σχήμα 4.48: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 140 J/mm)	47
Σχήμα 4.49: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)	48
Σχήμα 4.50: Δοκίμιο 12 - Top View	48
Σχήμα 4.51: Δοκίμιο 13 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 140 J/mm)	49
Σχήμα 4.52: Δοκίμιο 14 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/mm)	49
Σχήμα 4.53: Δοκίμιο 15 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3771 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 141 J/mm)	50
Σχήμα 4.54: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 4200 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 141 J/mm)	52
Σχήμα 4.55: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας	52
Σχήμα 4.56: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 4000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 135 J/mm)	53
Σχήμα 4.57: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)	53
Σχήμα 4.58: Δοκίμιο 2 - Top View	54
Σχήμα 4.59: Δοκίμιο 2 – Profil Μικροσκληρότητας	54
Σχήμα 4.60: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 4000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 135 J/mm)	55
Σχήμα 4.61: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)	55
Σχήμα 4.62: Δοκίμιο 3 - Top View	56

Σχήμα 4.63: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας	56
Σχήμα 4.64: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3400 W, Ταχύτητα: 1,75 m/min, ΡΠΘ: 117 J/mm)	57
Σχήμα 4.65: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας	57
Σχήμα 4.66: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 101 J/mm)	58
Σχήμα 4.67: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 2600 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 88 J/mm).....	58
Σχήμα 4.68: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή).....	59
Σχήμα 4.69: Δοκίμιο 3 - Top View	59
Σχήμα 4.70: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας	60
Σχήμα 4.71: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 2200 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 74 J/mm)	60
Σχήμα 4.72: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)	61
Σχήμα 4.73: Δοκίμιο 4 - Top View.....	61
Σχήμα 4.74: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας.....	62
Σχήμα 4.75: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης.....	64
Σχήμα 4.76: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	64
Σχήμα 4.77: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης	65
Σχήμα 4.78: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης.....	65
Σχήμα 4.79: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	66
Σχήμα 4.80: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	66
Σχήμα 4.81: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	67
Σχήμα 4.82: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	67
Σχήμα 4.83: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	68
Σχήμα 4.84: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	68
Σχήμα 4.85: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	69
Σχήμα 4.86: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.....	69
Σχήμα 4.87: Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης LBW – EBW.....	70
Σχήμα 4.88: Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης LBW – EBW.....	70
Σχήμα 4.89: Δοκίμιο 5 (2198) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3064 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 92 J/mm).....	71

Σχήμα 4.90: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας.....	71
Σχήμα 4.91: Δοκίμιο 4 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1.6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/mm).....	72
Σχήμα 4.92: Δοκίμιο 4 – Profil Μικροσκληρότητας.....	72
Σχήμα 4.93: Δοκίμιο 13 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 4670 W, Ταχύτητα: 2.9 m/min, ΡΠΘ: 70 J/mm)	73
Σχήμα 4.94: Δοκίμιο 15 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή) (Ισχύς: 4670 W, Ταχύτητα: 3.2 m/min, ΡΠΘ: 93 J/mm)	73
Σχήμα 4.95: Δοκίμιο 4 (2139) – Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.....	74
Σχήμα 4.96: Δοκίμιο 4 (2139) – Επιφάνεια θραύσης.....	75
Σχήμα 4.97: Δοκίμιο 4 (2139) – Επιφάνεια θραύσης (Εγκάρσια τομή).....	75
Σχήμα 4.98: Δοκίμιο 5 (2139) – Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.....	76
Σχήμα 4.99: Δοκίμιο 5 (2139) – Επιφάνεια θραύσης	76
Σχήμα 4.100: Δοκίμιο 13 (2139) – Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.....	77
Σχήμα 4.101: Δοκίμιο 13 (2139) – Επιφάνεια θραύσης.....	77
Σχήμα 4.102: Δοκίμιο 13 (2198)_rwht – Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.....	78
Σχήμα 4.103: Δοκίμιο 13 (2198)_rwht – Επιφάνεια θραύσης.....	78
Σχήμα 4.104: Προφίλ μικροσκληρότητας Δοκιμίου 13 (2139) πριν και μετά την ΡWHT ...	80
Σχήμα 4.105: Κράμα 2198 – Μικροδομή ΛΣ	81
Σχήμα 4.106: Κράμα 2198 – Μικροδομή ΘΕΖ	82
Σχήμα 4.107: Κράμα 2198 – Μικροδομή ΜΒ	82
Σχήμα 4.108: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΛΣ	83
Σχήμα 4.109: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΘΕΖ	84
Σχήμα 4.110: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΜΒ.....	84
Σχήμα 4.111: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-5) στη ΛΣ	85
Σχήμα 4.112: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1,3,5) στη ΖΜΤ	86
Σχήμα 4.113: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-3) στη ΛΣ	87
Σχήμα 4.114: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-5) στη ΖΜΤ	88
Σχήμα 4.115: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-4) στη ΘΕΖ	89

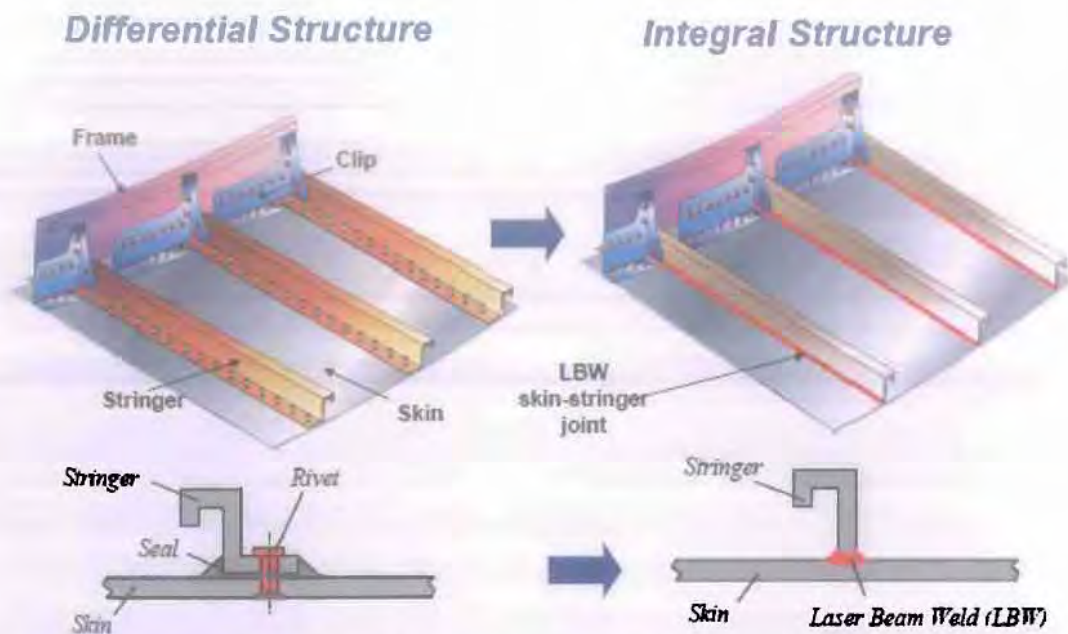
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ

Τα κράματα αλουμινίου είναι σημαντικά τεχνολογικά υλικά, κατάλληλα 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 διαρκής ανάγκη για βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων κραμάτων Al με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, όπως τα νέα κράματα 2139 και 2198 (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Βελτίωση των κραμάτων αλουμινίου σε συνάρτηση με το χρόνο[1].

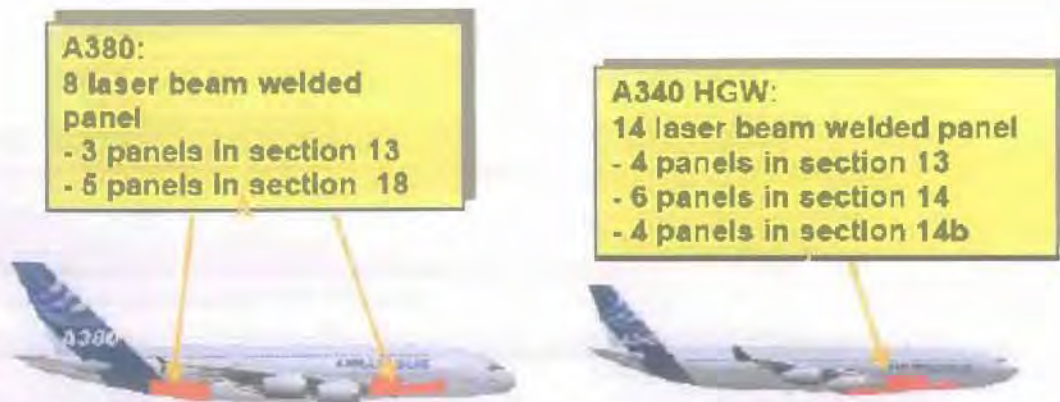
Η εισαγωγή συγκολλητών κατασκευών των κραμάτων αυτών στους διάφορους κλάδους της κατασκευαστικής βιομηχανίας (αεροπορική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία, βιομηχανία ηλεκτρονικών συσκευών) συνεπάγεται τη δυνατότητα αύξησης των εφαρμογών τους.



Σχήμα 1.2: Σχηματική παράσταση σύγκρισης μεθόδων Ηλώσεων και Συγκολλήσεων[2].

Η συγκόλληση των κραμάτων αυτών ευρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος ως εναλλακτική λύση στις συνδέσεις με ηλώσεις και σε κολλήσεις (adhesive bonding) που εφαρμόζονται στην κατασκευή της ατράκτου των αεροσκαφών (Σχήμα 1.2). Η βελτίωση της ποιότητας της συγκόλλησης και των ιδιοτήτων της και η εξοικονόμηση πόρων και βάρους είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της απλοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας και της μείωσης των επιπρόσθετων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τις ενώσεις, όπως οι ήλοι και οι κόλλες. Ως μέθοδοι συγκόλλησης επιλέγονται οι συγκολλήσεις με δέσμες υψηλής ισχύος καθώς και οι συγκολλήσεις Friction Stir Welding (FSW).

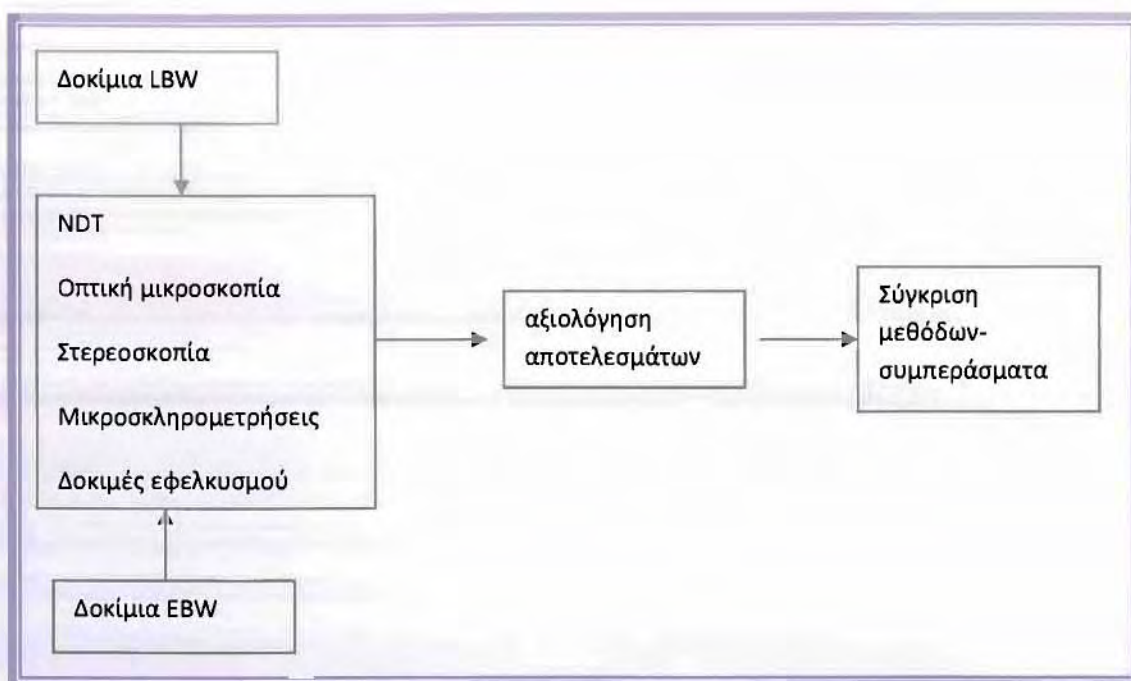
Οι συγκολλήσεις με laser (LBW) εφαρμόζονται ήδη από την Ευρωπαϊκή αεροπορική βιομηχανία για την κατασκευή συγκεκριμένων τμημάτων της ατράκτου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το νέο αεροσκάφος A380 καθώς και το A340 (Σχήμα 1.3) , όπου με LBW κατασκευάζονται συγκεκριμένα τμήματα της ατράκτου[3].



Σχήμα 1.3: Εφαρμογή συγκολλήσεων laser σε τμήματα της ατράκτου σύγχρονων επιβατικών αεροσκαφών (πηγή Airbus Deutschland GMBH)

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη πειραματική μελέτη των συγκολλήσεων με δέσμες υψηλής ισχύος. Χρησιμοποιούνται τα νέα αεροπορικά κράματα 2139 και 2198 και μελετάται πειραματικά η συγκολλησιμότητά τους με τις μεθόδους Laser Beam Welding (LBW) και Electron Beam Welding (EBW). Τα πειράματα LBW πραγματοποιήθηκαν στο ινστιτούτο ILT (Fraunhofer Institute fur Lasertechnik) στο Aachen, και τα πειράματα EBW στην EAB στο Σχηματάρι. Τα πειράματα αφορούσαν τόσο απλά περάσματα της δέσμης πάνω στα ελάσματα (bead-on-plate) όσο και πραγματοποίηση συγκολλήσεων συμβολής (butt joints).

Τα δείγματα αξιολογήθηκαν στο Εργαστήριο με κλασσικές μεθόδους ποιοτικού ελέγχου των συγκολλήσεων (Σχήμα 1.4) που περιελάμβαναν μη καταστρεπτικό και καταστρεπτικό έλεγχο. Έγινε ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, μελετήθηκε η μακροδομή και η μικροδομή των χαρακτηριστικών ζωνών της συγκόλλησης και μετρήθηκε η μεταβολή της μικροσκληρότητας σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές. Για επιλεγμένες πειραματικές συνθήκες έγιναν δοκιμές εφελκυσμού προκειμένου να ελεγχθούν οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα ροής φάσεων εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια και συνοπτικά ανά κεφάλαιο περιλαμβάνει:

- Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (Κεφ. 2)
- Πειραματικές διαδικασίες (Κεφ. 3)
- Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων (Κεφ. 4)
- Προτάσεις για μελλοντική έρευνα (Κεφ. 5)

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

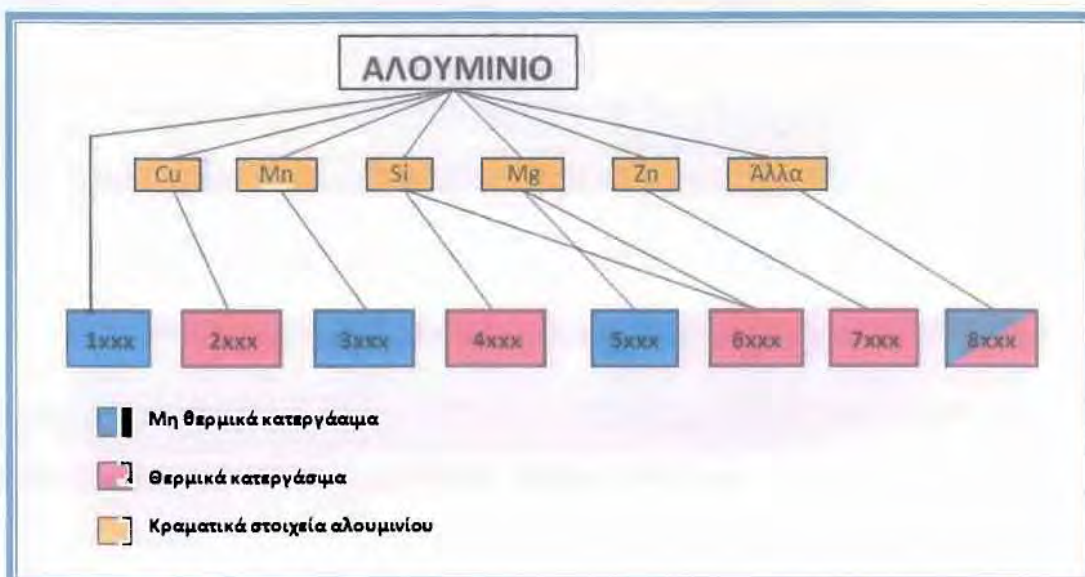
Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση με τις εφαρμογές των κραμάτων ΑΙ καθώς και των δύο μεθόδων συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

2.1 Κράματα Αλουμινίου

Το ΑΙ είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά τα χάλυβα. Βρίσκει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς όπως σε δομικές και γενικά μεταλλικές κατασκευές (γέφυρες, θαλάσσιες πλατφόρμες, κεραιές τηλεπικοινωνιών), στη βιομηχανία μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητα, τρένα, αεροπλάνα) και στη ναυπηγική (πολεμικά πλοία, catamaran). Ιδιαίτερα η αεροπορική βιομηχανία απαιτεί πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιεί, όπως σκληρότητα, χαμηλό βάρος και αντοχή σε κόπωση και διάβρωση. Επιπλέον το κίνητρο για την ανάπτυξη της νέας γενιάς αεροπλάνων είναι η ανάγκη βελτίωσης της οικονομίας καυσίμων για να διατηρηθεί η κερδοφορία της βιομηχανίας αερομεταφορών. Το ΑΙ πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό αεροπορικών εφαρμογών, σε αεροσκάφη όπως το Airbus A340 και το Boeing 777[4]. Το ίδιο συμβαίνει και στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου για παράδειγμα το Audi A8 και το Audi A2 διαθέτουν σκελετό από ΑΙ προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου, λόγω της μείωσης του βάρους του οχήματος.

2.1.1 Συμβολισμός Κραμάτων Αλουμινίου

Τα κράματα ΑΙ συμβολίζονται με ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων που έχει αναπτυχθεί από την Aluminum Association. Ο συμβολισμός αυτός (Σχήμα 2.1) είναι ο πιο διαδεδομένος στις Η.Π.Α. και έχει επικρατήσει και στην Ευρώπη.



Σχήμα 2.1: Συμβολισμός κραμάτων ΑΙ

Το αλουμίνιο ενισχύεται με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό).

Η σειρά 2xxx επιδέχεται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Τα πιο ανθεκτικά κράματα αυτής της σειράς χρησιμοποιούνται κυρίως για αεροσκάφη και για σασί φορτηγών. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές και συνδέονται με σπειρώματα ή ηλώσεις. Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου) [5]. Η αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, βελτιώνεται με ανοδίωση/βαφή κατάλληλες επενδύσεις για τέτοιες εφαρμογές.

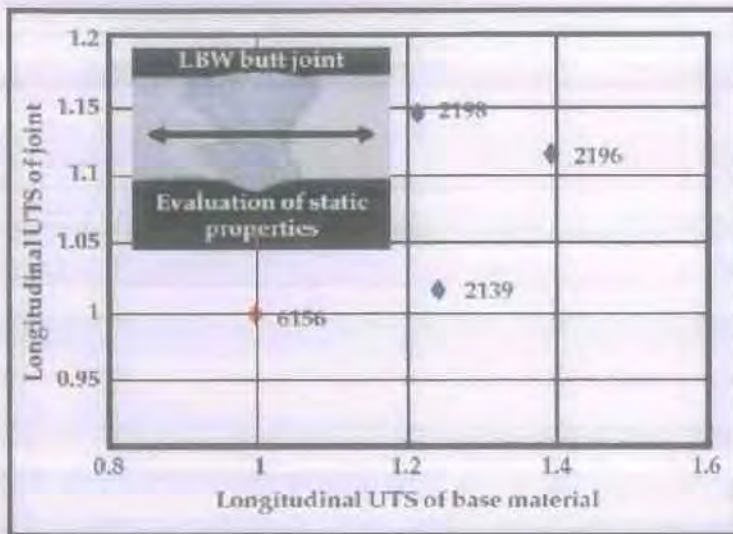
Ο Cu είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο λόγω της δημιουργίας της φάσης θ (Al_2Cu) με τη θερμική κατεργασία της γήρανσης.

Το κράμα 2139 με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία περιέχει εκτός του Cu και Ag. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης αναπτύσσεται στη μήτρα του κράματος, μέσω συγκεκριμένης σειράς καθίζησης (precipitation sequence) λεπτομερής διασπορά σωματιδίων ισχυροποίησης [1]. Η προσθήκη του Ag προκαλεί την καθίζηση της φάσης Ω, η οποία κατά τη γήρανση πυρηνώνεται στο επίπεδο {111} στη μήτρα του Al και δίνει εξαιρετικό συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε κατάσταση T6 το κράμα αυτό παρουσιάζει όριο διαρροής 520 MPa τιμή σχεδόν διπλάσια σε σχέση με τα 290 MPa του κράματος 2219-T6. Η παρουσία Ag και Mg σε συνδυασμό με το Mn παρέχει σημαντική βελτίωση στη δυσθραυστότητα του κράματος 2139. Το κράμα αυτό αναπτύχθηκε για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή και ανοχή σε βλάβη όπως επίσης και σε κόπωση. Σήμερα αποτελεί το κράμα επιλογής για τα σύγχρονα τεθωρακισμένα οχήματα [6].

Αντίστοιχα η προσθήκη Li στο αλουμίνιο (κράμα 2198) προκαλεί την καθίζηση της φάσης δ' (Al_3Li) [7]. Τα κράματα Al-Li χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ειδική αντοχή και εξαιρετική ανοχή σε βλάβη. Το κράμα 2198 είναι σήμερα το πιο ανεπτυγμένο κράμα Al-Li και θεωρείται ως το ιδανικό υλικό για την άτρακτο πολλών αεροσκαφών, όπως για παράδειγμα για το A350. Σε κατάσταση T8 παρουσιάζει εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής στατικής αντοχής και ανοχής σε βλάβη ενώ παράλληλα έχει το πλεονέκτημα της θερμικής σταθερότητας. Για να χρησιμοποιηθεί σήμερα ένα κράμα στην άτρακτο αεροσκαφών θα πρέπει να παρουσιάζει καλά χαρακτηριστικά

συγκόλλησης στις μεθόδους LBW και Friction Stir Welding (FSW), όπως και το συγκεκριμένο κράμα [8].

Στο Σχήμα 2.2 τα κράματα 2198,2196 και 2139 συγκρίνονται με το κράμα 6156. Και τα τρία κράματα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από το 6156 και ιδιαίτερα το 2198 έως και 15% μεγαλύτερη σκληρότητα [9].



Σχήμα 2.2: Σύγκριση των κραμάτων 2198,2196 και 2139 σε σχέση με το 6156 ως προς το όριο θραύσης

2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου είναι:

- Αυθόρμητος σχηματισμός Al_2O_3
- Θερμική Αγωγιμότητα
- Συντελεστής Θερμικής Διαστολής
- Χαρακτηριστικά Τήξης (Melting Characteristics)
- Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Οξειδία του αλουμινίου δημιουργούνται στην επιφάνεια του αλουμινίου αμέσως με την επαφή του με τον αέρα. Για την συγκόλληση με μεθόδους που απαιτούν τήξη, το στρώμα οξειδίου πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανικούς ή χημικούς τρόπους. Σε αντίθετη περίπτωση, ψήγματα οξειδίου θα εγκλειστούν στην συγκόλληση με αποτέλεσμα την μείωση της ολκιμότητας (ductility) και πιθανή εμφάνιση ρωγμών στη συγκόλληση.

Η θερμική αγωγιμότητα είναι η φυσική ιδιότητα η οποία επηρεάζει περισσότερο απ' όλες τις ιδιότητες του αλουμινίου την συγκολλησιμότητά του. Η θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου είναι περίπου η μισή απ' αυτή του χαλκού και τέσσερις φορές πιο μεγάλη απ' αυτή των συγκολλησιμων χαλύβων (low carbon steels). Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα πρέπει να δοθεί τέσσερις φορές πιο γρήγορα στο αλουμίνιο απ' ότι στο χάλυβα, ώστε να αυξηθεί τοπικά η θερμοκρασία κατά το ίδιο ποσό. Ωστόσο,

η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου, βοηθάει στη στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης και βοηθάει στην εξέλιξη της συγκόλλησης.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής των κραμάτων αλουμινίου είναι ο διπλάσιος από τον αντίστοιχο του χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στο διάκενο των συγκολλημένων τεμαχίων. Ο συνδυασμός του υψηλού συντελεστή θερμικής διαστολής και υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, συχνά οδηγεί σε παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ιδιαίτερα όταν υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης δεν είναι εφικτές.

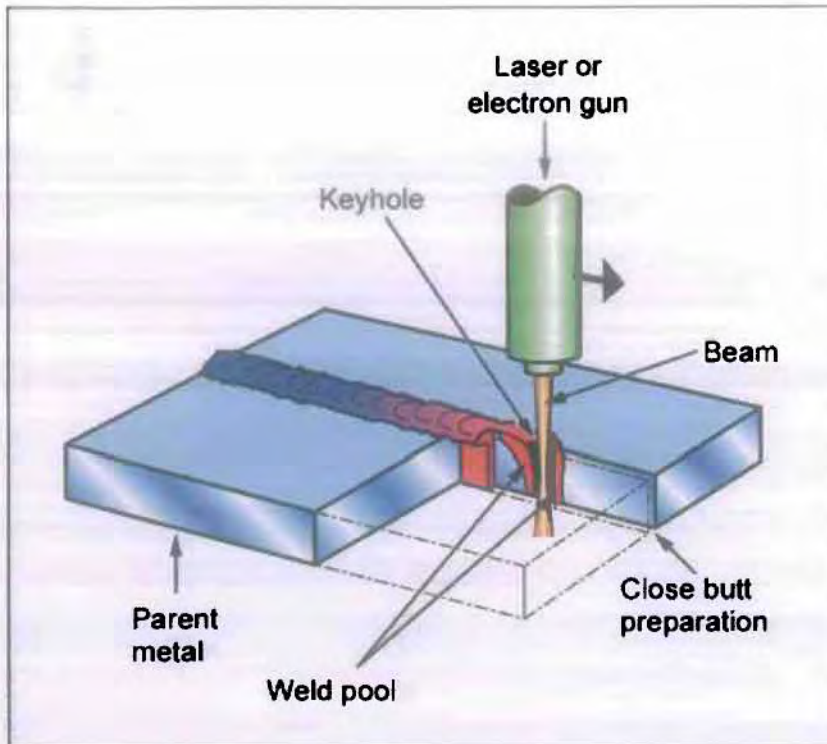
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου με μεθόδους τήξης, σε αντίθεση με την resistance welding μέθοδο. Η θερμοκρασία που απαιτείται για να γίνει η συγκόλληση, παράγεται από την ροή ρεύματος μέσα από το υλικό. Το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη ηλεκτρικά αγωγιμότητα από το χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται πιο μεγάλη ποσότητα (amount) ρεύματος για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας θερμότητας.

2.2.1 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο LASER BEAM WELDING(LBW)

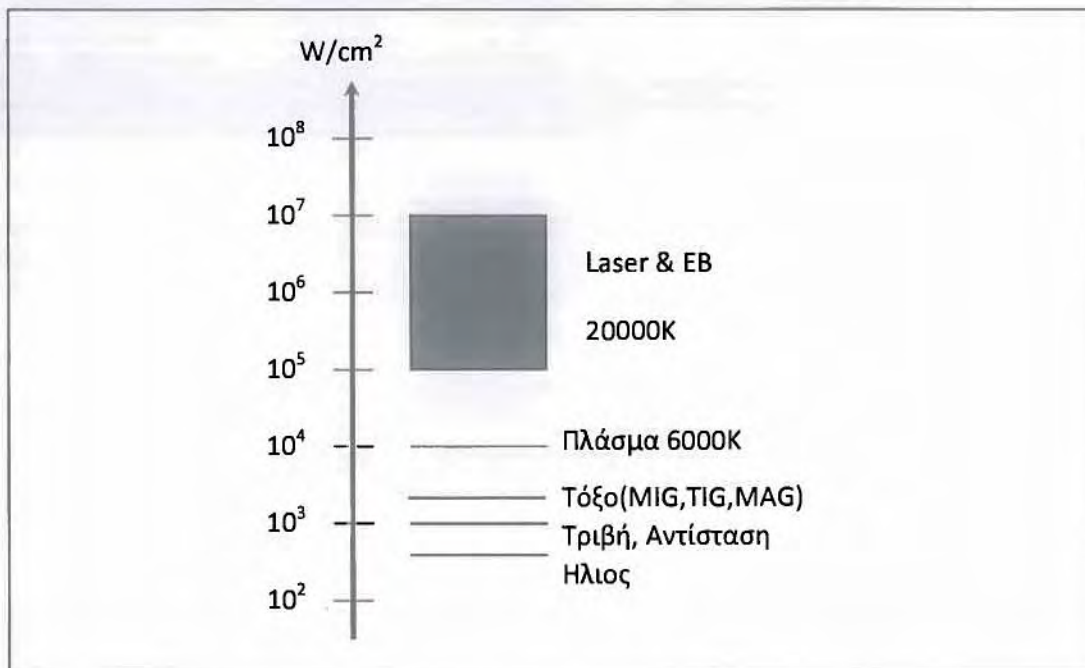
Η μέθοδος της συγκόλλησης μεταλλικών υλικών με laser εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα τα τελευταία χρόνια, κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο ακριβής έλεγχος της προσδιδόμενης ενέργειας είναι σημαντικός.

Χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροπορική βιομηχανία, στη βιομηχανία κατασκευής αμυντικού υλικού, παραγωγής ηλεκτρικών συσκευών και ηλεκτρονικών πλακετών, στην ένωση μικροηλεκτρικών εξαρτημάτων, ακόμη και σε οικιακές εφαρμογές.

Το κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί τη μέθοδο από τις συμβατικές είναι η δυνατότητα της δέσμης του laser να επάγει στην επιφάνεια του υλικού συγκεντρωμένη «καθαρή ενέργεια» της τάξεως των 10^7W/cm^2 μέσα σε χρόνο μικροδευτερολέπτων. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η σύγκριση από πλευράς διαθέσιμων εντάσεων των μεθόδων συγκόλλησης. Από το σχήμα αυτό είναι προφανές ότι από άποψη πυκνότητας ισχύος η μέθοδος LBW είναι συγκρίσιμη με την EBW και ακόμη ότι και οι δύο μέθοδοι ευρίσκονται δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές. Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι επειδή η δέσμη είναι ισχυρά συγκεντρωμένη και προσπίπτει σε μια πολύ μικρή επιφάνεια, η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι πολύ μεγάλη[10].



Σχήμα 2.3: Μέθοδος Laser beam Welding



Σχήμα 2.4: Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης σε σχέση με την προσδιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια.

Στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αναφέρονται, η χαμηλή θερμική καταπόνηση του υλικού, οι μικρές διαστάσεις της ΘΕΖ, η δυνατότητα πλήρους ελέγχου του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας (heat input) στο υλικό και κατά συνέπεια ο έλεγχος της ταχύτητας ψύξης της συγκόλλησης, καθώς και η ευκολία αυτοματοποίησης που προσδίδει υψηλούς ρυθμούς παραγωγικότητας.

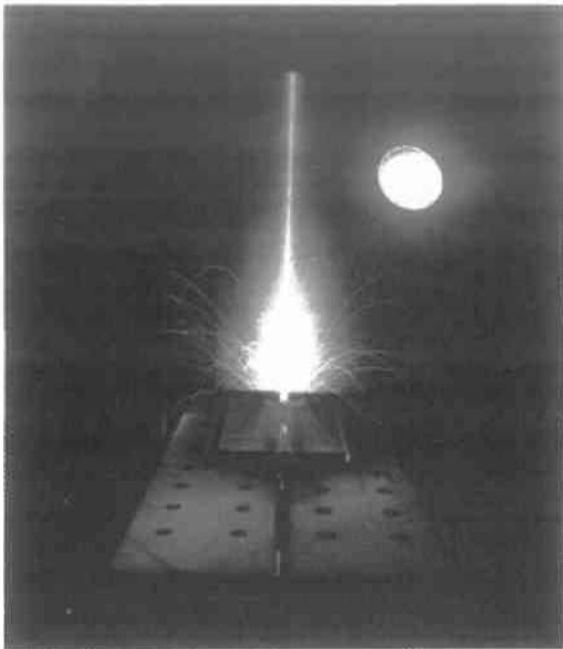
2.2.2 Συγκόλληση Αλουμινίου με την Μέθοδο ELECTRON BEAM WELDING (EBW)

Η μέθοδος συγκόλλησης δέσμης ηλεκτρονίων στηρίζεται στη ισχυρότατη μεταφορά θερμικής ενέργειας με στενή δέσμη ηλεκτρονίων. Η τήξη του μετάλλου προκύπτει από τη θερμότητα μιας συγκεντρωμένης δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας. Εφαρμόζεται σε μεγάλα πάχη αλουμινίου, φθάνοντας σε σχέση βάθους διείσδυσης προς πλάτος ζώνης τήξης μέχρι 20:1. Χρειάζεται κενό αέρος για την καλύτερη απόδοση της, λόγω της διάχυσης της δέσμης όταν διαδίδεται στον αέρα και για την απαλλαγή του μετάλλου από οξειδία και νιτρίδια. Αυτός είναι και ο λόγος που αν και είναι εξίσου αποτελεσματική με τη μέθοδο LBW και έχουν παρόμοιες βιομηχανικές εφαρμογές, είναι αρκετά δαπανηρότερη αλλά και αντιοικονομική στην εφαρμογή της. Κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη και οι όχι υψηλές παραμένουσες τάσεις. Τα υλικά που συγκολλούνται είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα νικελίου, κοβαλτίου, τιτανίου και αλουμινίου.

Η μέθοδος είναι μια υψηλής πυκνότητας ισχύος διεργασία που πραγματοποιείται βομβαρδίζοντας την προς συγκόλληση ένωση με μια έντονη (ισχυρά συγκεντρωμένη) δέσμη ηλεκτρονίων, τα οποία επιταχύνονται σε ταχύτητες 0.3 έως 0.7 φορές την ταχύτητα του φωτός σε ισχύ 25 έως 200 kV αντίστοιχα. Η ακαριαία μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε θερμική, καθώς αυτά συγκρούονται και διεισδύουν στο προς συγκόλληση μέταλλο, προκαλεί την τήξη της επιφάνειας έχοντας ως αποτέλεσμα την παραγωγή της επιθυμητής ένωσης μεταξύ των μετάλλων.

Καθώς η συνολική κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μπορεί να συγκεντρωθεί σε μια πολύ μικρή περιοχή στο μέταλλο, επιτυγχάνονται με αυτό τον τρόπο πυκνότητες ενέργειας της τάξης 10^8 W/cm^2 ³. Οι τιμές αυτές είναι υψηλότερες από οποιαδήποτε άλλη συνεχή δέσμη, και είναι συγκρίσιμες με τη δέσμη *laser*. Η υψηλής πυκνότητας ενέργεια και η ισχυρά συγκεντρωμένη διείσδυση ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα την σχεδόν ακαριαία τοπική τήξη και εξάτμιση του υπό επεξεργασία μετάλλου. Αυτό το χαρακτηριστικό διακρίνει την EBW από άλλες μεθόδους συγκόλλησης στις οποίες ο ρυθμός τήξης περιορίζεται από τις εκάστοτε θερμικές συνθήκες.

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η εκτέλεση μιας συγκόλλησης δέσμης ηλεκτρονίων σε ένα κλειστό θάλαμο πίεσης περίπου 3 Pa (2×10^{-2} torr). Η «δέσμη» είναι η ορατή λάμψη που φαίνεται στο σχήμα, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα κατάλοιπων περιβαλλοντικών αέριων μορίων τα οποία διεγείρονται από τη δέσμη ηλεκτρονίων.



Σχήμα 2.5: Συγκόλληση που πραγματοποιείται από δέσμη ηλεκτρονίων σε κλειστό θάλαμο σε πίεση 3 Pa (2×10^{-2} torr).

Τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την άνοδο και αποκτούν την μέγιστη δυνατή ενέργεια που επιτρέπεται από την διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται από το όπλο. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια περνούν μέσα από τη δέσμη ηλεκτρονίων που σχηματίζεται και μέσα από ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (μαγνητικοί φακοί). Αυτοί οι φακοί μειώνουν την διάμετρο της δέσμης καθώς αυτή προχωρά προς το μέταλλο. Αυτή η μείωση της διαμέτρου της δέσμης ουσιαστικά οδηγεί στην αύξηση την πυκνότητας της ενέργειας, παράγοντας μια πολύ μικρή και ιδιαίτερα συγκεντρωμένη δέσμη που κατευθύνεται προς το υπό συγκόλληση μέταλλο. Επίσης, με την προσθήκη ενός ηλεκτρομαγνητικού πηνίου εξασφαλίζεται η ευελιξία της μετακίνησης της εστιασμένης δέσμης. Η εν λόγω υψηλής έντασης δέσμη παράγει θερμοκρασίες περίπου $14.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ η οποία είναι ικανή να εξατμίσει σχεδόν οποιοδήποτε γνωστό υλικό. Έτσι κατά την πρόσκρουση της δέσμης το μέταλλο εξατμίζεται αφήνοντας μια οπή στην οποία διεισδύουν τα ηλεκτρόνια ακόμη βαθύτερα στο μέταλλο.

Η συγκόλληση σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη εξέλιξη τριών φαινομένων : (1) το υλικό, που βρίσκεται στην οπή που δημιουργήθηκε από την εξατμισμό, λιώνει, (2) αυτό το τηγμένο υλικό ρέει στις πλευρές της οπής πίσω από την προωθούμενη δέσμη και (3) η συνεχής ροή τηγμένου μετάλλου γεμίζει τα κενά από την εξατμισμό του μετάλλου κατά την προώθηση της δέσμης και στην συνέχεια στερεοποιείται δημιουργώντας μια συνεχή συγκόλληση.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της EBW είναι η δυνατότητα να παράγει συγκολλήσεις βαθύτερες, στενότερες και με πολύ μικρότερη πρόσδοση θερμότητας από τις συγκολλήσεις τόξου. Η ικανότητα της μεθόδου να πραγματοποιεί συγκολλήσεις με μεγάλο λόγο βάθους / πλάτος λίμνης συγκόλλησης (*aspect ratio*) εξαλείφει την ανάγκη

για πολλαπλά πάσα. Η μικρότερη πρόσδοση θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και αισθητά λιγότερες θερμικές επιδράσεις στο μέταλλο.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά (1) οδηγούν στην μείωση των παραμορφώσεων και της συστολής κατά την συγκόλληση, (2) διευκολύνουν την συγκόλληση ακόμη και των πιο σκληρών μετάλλων χωρίς αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων στην περιοχή της συγκόλλησης, (3) διευκολύνουν τις συγκολλήσεις κοντά σε θερμοεπηρεαζόμενα εξαρτήματα, (4) επιτρέπουν ερμητικά αποκλεισμένες από το περιβάλλον συγκολλήσεις και (5) επιτρέπουν συγκολλήσεις δύστηκτων μετάλλων, reactive metals και συνδυασμούς πολλών ανόμοιων μετάλλων που δεν μπορούν να συγκολληθούν με τις μεθόδους τόξου[11].

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Σκοπός

- Ο προσδιορισμός της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων της κάθε διεργασίας (ισχύς, ταχύτητα δέσμης, σημείο εστίασης[focal point]) στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διείσδυση, πλάτος συγκόλλησης) και στην σκληρότητα των συγκολλημένων δοκιμίων.
- Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκολλημένων δοκιμίων και τρόποι για την πιθανή βελτίωσή της.
- Η συσχέτιση των χαρακτηριστικών των δοκιμίων με της εκάστοτε πειραματικές συνθήκες.
- Η αξιολόγηση της ποιότητας των συγκολλήσεων.

3.2 Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα κράματα 2198-T8 και 2139-T3. Οι διαστάσεις των πλακιδίων ήταν 100X100X3.8 (mm) και 100X100X4.5 (mm) αντίστοιχα. Οι συγκολλήσεις laser που πραγματοποιήθηκαν ήταν συγκολλήσεις απλών περασμάτων της δέσμης (bead-on plate) και συγκολλήσεις συμβολής (butt-joint) ενώ οι συγκολλήσεις EBW ήταν μόνο bead-on-plate.

Η χημική σύσταση των κραμάτων δίνεται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση των κραμάτων (% κ.β.)

Κράμα	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Li	Ag	Ti
2198	0.08	0.10	3.50	0.5	0.80	0.05	0.35	0.18	1.10	0.50	-
2139	0.04	0.06	4.79	0.3	0.45	-	<0.01	0.01	-	0.34	0.05

Το 2198 έχει υποστεί θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφής, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση (T8), ενώ το 2139 έχει υποστεί θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφής και φυσική γήρανση (T3).

Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων δίνονται στον Πίνακα 3.2:

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων

Κράμα	Rp _{0.2} (MPa)	UTS(MPa)	A%
2198	430	490	14
2139	459	505	15

3.3 Πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να οριστεί ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (Ρ.Π.Θ). Στις συγκολλήσεις το συνολικό ποσό της θερμότητας που εισάγεται στο μέταλλο εξαρτάται και από την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η συγκόλληση (ταχύτητα τόξου u). Ορίζουμε τον Ρ.Π.Θ (heat input) ως εξής:

$$h = \frac{P}{u}, \text{ J/mm}$$

Με τον υπολογισμό του Ρ.Π.Θ μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για την ποιότητα των συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν[12].

Οι πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου της πρώτης πειραματικής σειράς με αέριο προστασίας 50% Ar (17.5 l/min) και 50% He (17.5 l/min) είναι οι εξής:

- Κράμα 2198 για LBW

Πίνακας 3.3: AL2198 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής)

Δοκίμιο	Ισχύς (P) [W]	Ταχύτητα (Vs) [m/min]	Θέση σημείου εστίασης (d_z) [mm]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (ΡΠΘ) [J/mm]
Bead-on- plate				
1	3441	2	0	103
2	2970	2	0	89
3	3913	2	0	117
4	3252	2	0	98
5	3441	2	0	103
6	3630	2	0	109
7	3441	2	1	103
8	3441	2	-1	103
9	3441	2	0,5	103
10	3441	2	0	103
11	3252	1,8	0	108
12	3252	1,6	0	122
Συγκολλήσεις συμβολής				
1	3252	2	0	98
2	3252	2	0	98
3	3064	2	0	92
4	3064	2	0	92
5	3064	2	0	92

- Κράμα 2139 για LBW

Πίνακας 3.4 AL2139 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής)

Δοκίμιο	Ισχύς (P) [W]	Ταχύτητα (Vs) [m/min]	Θέση σημείου εστίασης (dz) [mm]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (ΡΠΘ) [J/mm]
<u>Bead-on- plate</u>				
1	3630	2	0	109
2	3818	2	0	115
3	3630	1,6	0	136
4	3818	1,6	0	143
5	3818	1,8	0	127
6	3724	1,83	0	122
7	3630	1,83	0	119
8	3441	1,6	0	129
9	3535	1,6	0	133
10	3535	1,6	0,5	133
11	3535	1,6	0,5	133
12	3724	1,6	0,5	140
13	3724	1,6	0	140
14	3818	1,6	0	143
15	3771	1,6	0	141
<u>Συγκολλήσεις συμβολής</u>				
1	3441	1,6	0	129
2	3630	1,6	0	136
3	3818	1,6	0	143
4	3818	1,6	0	143
5	3818	1,6	0	143
6	3818	1,6	0	143

Οι πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου της δεύτερης πειραματικής σειράς, με αέριο προστασίας πάνω από τη συγκόλληση Ar και He (35 l/min) σε αναλογίες που παρουσιάζονται στους πίνακες και αέριο προστασίας στη ρίζα Ar (25 l/min), είναι οι εξής:

- Κράμα 2198 για LBW

Πίνακας 3.5: AL2198 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής)

Δοκίμιο	Ισχύς(P) [W]	Ταχύτητα (Vs) [m/min]	Θέση σημείου εστίασης(d ₂) [mm]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (ΡΠΘ) [J/mm]	Αέριο Προστασίας	
					Ar	He
<u>Bead-on- plate</u>						
1	3400	2	0	102	50%	50%
2	3400	2	0	102	25%	75%
3	3400	2	0	102	25%	75%
4	3400	2	0	102	25%	75%
5	3400	2	0	102	50%	50%
6	3400	2	0	102	0%	100%
7	3400	2	0	102	75%	25%
8	3400	2	0	102	35%	65%
9	3400	2	0	102	75%	25%
10	3400	4	0	51	75%	25%
11	3400	3	0	68	75%	25%
<u>Συγκολλήσεις συμβολής</u>						
12	3400	3	0	68	75%	25%
13	3400	3	0	68	75%	25%
14	3400	3	0	68	75%	25%
15	3400	2	0	102	75%	25%
16	3400	2	0	102	75%	25%
17	3400	2,5	0	82	75%	25%
18	3400	2,5	0	82	50%	50%
19	3400	1,5	0	136	50%	50%
20	3400	2	0	82	50%	50%
21	3400	3	0	68	50%	50%
22	4000	3	0	80	50%	50%
23	4000	3,5	0	69	50%	50%
24	4000	4,5	0	53	50%	50%

- Κράμα 2139 για LBW

Πίνακας 3.6: AL2139 (bead-on-plate και συγκολλήσεις συμβολής)

Δοκίμιο	Ισχύς (P) [W]	Ταχύτητα (Vs) [m/min]	Θέση σημείου εστίασης (d ₂) [mm]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (ΡΠΘ) [J/mm]	Αέριο Προστασίας	
					Ar	He
Bead-on- plate						
1	3818	1,8	0	127	50%	50%
2	3818	1,6	0	143	50%	50%
3	3818	1,7	0	135	50%	50%
4	4670	1,75	0	160	50%	50%
5	4670	1,75	0	160	50%	50%
6	4670	2	0	140	50%	50%
7	4670	4	0	70	50%	50%
8	4670	3	0	93	50%	50%
9	4670	2,5	0	112	50%	50%
10	4670	2,8	0	100	50%	50%
11	4670	2,95	0	69	50%	50%
12	4670	2,9	0	70	50%	50%
Συγκολλήσεις συμβολής						
13	4670	2,9	0	70	50%	50%
14	4670	3	0	93	50%	50%
15	4670	3,2	0	88	50%	50%
16	4670	2,8	0	100	50%	50%



Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη Laser



Σχήμα 3.2: Συγκόλληση Laser

- Κράμα 2139 και 2198 για EBW

Πίνακας 3.7: AL2139 και AL2198 (bead-on-plate)

Δοκίμιο	Ισχύς (P) [W]	Ταχύτητα (Vs) [m/min]	Θέση σημείου εστίασης (d _z) [mm]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (ΡΠΘ) [J/mm]
<u>2139</u>				
1	4200	1,78	0	141
2	4000	1,78	0	135
3	4000	1,78	0	135
<u>2198</u>				
1	3400	1,75	0	117
2	3000	1,78	0	101
3	2600	1,78	0	88
4	2200	1,78	0	74



Υψηλό Κενό: 1×10^{-4} Torr
Μοντέλο: Sciaky VX 3-68x68x84
Ισχύς: 30 kW max
Διαστάσεις θαλάμου: 68"x68"x84"
Ωφέλιμη διαδρομή αξόνων: Διαμήκης (X) 42", Εγκάρσιος (Y) 28", Κάθετος (Z) 30"
Αυτόματο σύστημα ελέγχου από υπολογιστή με ακρίβεια $\pm 1\%$

Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικά διάταξης EBW που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα (EAB).

3.4 Μη καταστρεπτικός έλεγχος – Ραδιογραφία

Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε στην εταιρία EBETAM A.E. Η διαδικασία περιλάμβανε έλεγχο με ραδιογραφία για τον εντοπισμό εσωτερικών σφαλμάτων και πόρων στο εσωτερικό της συγκόλλησης. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ένα-ένα στο θάλαμο ακτίνων X και στη συνέχεια εμφανίστηκαν τα φιλμ ραδιογράφησης[13].

3.5 Μελέτη μικροδομής συγκόλλησης

Για τη μελέτη της μικροδομής των συγκολλήσεων ακολουθήθηκε η κλασική μεταλλογραφική διαδικασία που περιελάμβανε:

Κοπή των δοκιμίων (τομές εγκάρσιες και διαμήκεις) με τη χρήση αυτόματης μηχανής κοπής Struers Accutom-5 του εργαστηρίου, εγκιβωτισμό σε ρητίνη, λείανση με χαρτιά SiC 120, 220, 320, 500, 800 και 1000 grit και στίλβωση με αιώρημα διαμαντόπαστας κοκκομετρίας 3μm και 1μm.

Η χημική προσβολή για την αποκάλυψη της μακροδομής έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E407 με ειδικό αντιδραστήριο που αποτελείται από :

Συστατικό 1: 18 μέρη (H₂O*) αναμεμιγμένα με 2 μέρη θειικού οξέως (H₂SO₄)

Συστατικό 2: 19 μέρη (H₂O*) αναμεμιγμένα με 1 μέρος υδροφθορικού οξέως (HF)

Ο οπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε με χρήση στερεοσκοπίου Leica Wilz M3Z σε μεγεθύνσεις (6X-45X).

Η μικροδομή των δοκιμίων μελετήθηκε σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), όπου πραγματοποιήθηκαν και χημικές αναλύσεις με EDS, στην εταιρεία ΕΚΕΠΥ στην Χαλκίδα.

3.6 Μικροσκληρομέτρηση

Η μέτρηση του προφίλ σκληρότητας έγινε στα δοκίμια που είχαν προετοιμαστεί για μεταλλογραφικό έλεγχο σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές με τη χρήση του μικροσκληρομέτρου WOLPERT Micro-Vickers tester 401-MVD του εργαστηρίου. Ως βάρος δοκιμής επιλέχτηκαν τα 200gr και ο χρόνος δοκιμής ήταν 10 δευτερόλεπτα. Σχηματική παράσταση του τρόπου μέτρησης για τις εγκάρσιες τομές φαίνεται στο Σχήμα 3.4 και για τις διαμήκεις στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μικροσκληρομέτρησης σε εγκάρσιες τομές



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μικροσκληρομέτρησης σε διαμήκεις τομές

3.7 Δοκιμές εφελκυσμού

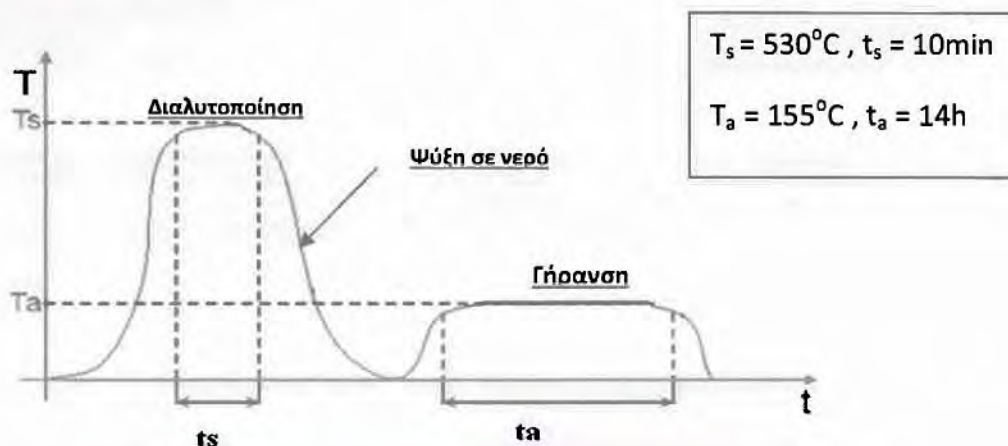
Δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή εφελκυσμού INSTRON σύμφωνα με την προδιαγραφή E 8M – 04 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων (όριο διαρροής, όριο θραύσης, επιμήκυνση).

3.8 Θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση (PWHT)

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα κράματα αλουμινίου που επιδέχονται θερμική κατεργασία (στα οποία ανήκει και η σειρά 2xxx) μπορούν να ανακτήσουν σκληρότητα μετά τη συγκόλληση μέσω της διαδικασίας post weld heat treatment (PWHT) (διαλυτοποίηση, βαφή, τεχνητή γήρανση).

Η επίδραση της PWHT στις μηχανικές ιδιότητες δεν εξαρτάται μόνο από το μέταλλο βάσης αλλά και από την ίδια τη διαδικασία και τις συνθήκες στις οποίες θα εφαρμοστεί. Για να βρεθεί η κατάλληλη θερμοκρασία, ο χρόνος παραμονής σε αυτή αλλά και η μέθοδος ψύξης, αναζητήθηκαν παρόμοια πειράματα μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης[14] που οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η πιο κατάλληλη PWHT είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6. Για της θερμικές κατεργασίες χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός του εργαστηρίου:

- Θάλαμος Θερμικών Κατεργασιών: Thermawatt TGT-50
- Ελεγκτής Θερμοκρασίας: JUMO iTRON 16



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου θερμικής κατεργασίας

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις bead-on-plate

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Στα Σχήματα 4.1 – 4.24 φαίνεται η μακροδομή των συγκολλήσεων (bead-on-plate) σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές, οι φωτογραφίες των συγκολλήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν διαμήκεις τομές (top view) και η μικροσκληρότητα κάποιων δοκιμών για το κράμα 2198. Αυτά τα δοκίμια έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο LBW (πρώτη πειραματική σειρά).

Στις εγκάρσιες τομές ξεχωρίζουμε τα όρια της λίμνης συγκόλλησης, την θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και το μέταλλο βάσης. Μεταξύ της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ παρατηρείται η ζώνη μερικής τήξης (ZMT). Πλήρης διείσδυση παρατηρείται για τιμές του ΡΠΘ υψηλότερες από 98J/mm (Σχήμα 4.75). Για υψηλές τιμές του ΡΠΘ παρατηρείται εξάχνωση στη λίμνη συγκόλλησης (Σχήμα 24: Δοκίμιο 12), με συνέπεια τη δημιουργία γεωμετρικής ανομοιομορφίας.

Το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης εξαρτάται επίσης ισχυρά από τις συνθήκες του laser και παίρνει τιμές από 3.04 έως 4.83mm.

Παρατηρείται πορώδες κυρίως στα όρια του μετάλλου συγκόλλησης.

Στο σχήμα 4.22 παρατηρείται μια διαμήκης ρωγμή στο μέταλλο συγκόλλησης.

Έχει αποδειχθεί ότι οι σειρές 2xxx και 6xxx που είναι θερμικά κατεργάσιμες είναι πιο επιρρεπείς στην ρηγμάτωση στο μέταλλο συγκόλλησης από εκείνες που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ελαττωθεί αν στις συγκολλήσεις laser χρησιμοποιηθεί κατάλληλο υλικό πλήρωσης αντί για αυτογενή συγκόλληση. Πολλά κράματα Al μπορούν να συνδεθούν με διάφορα υλικά πλήρωσης αλλά συνήθως μόνο ένα από αυτά είναι το ιδανικό. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη κατά την επιλογή του υλικού πλήρωσης είναι οι εξής[15]:

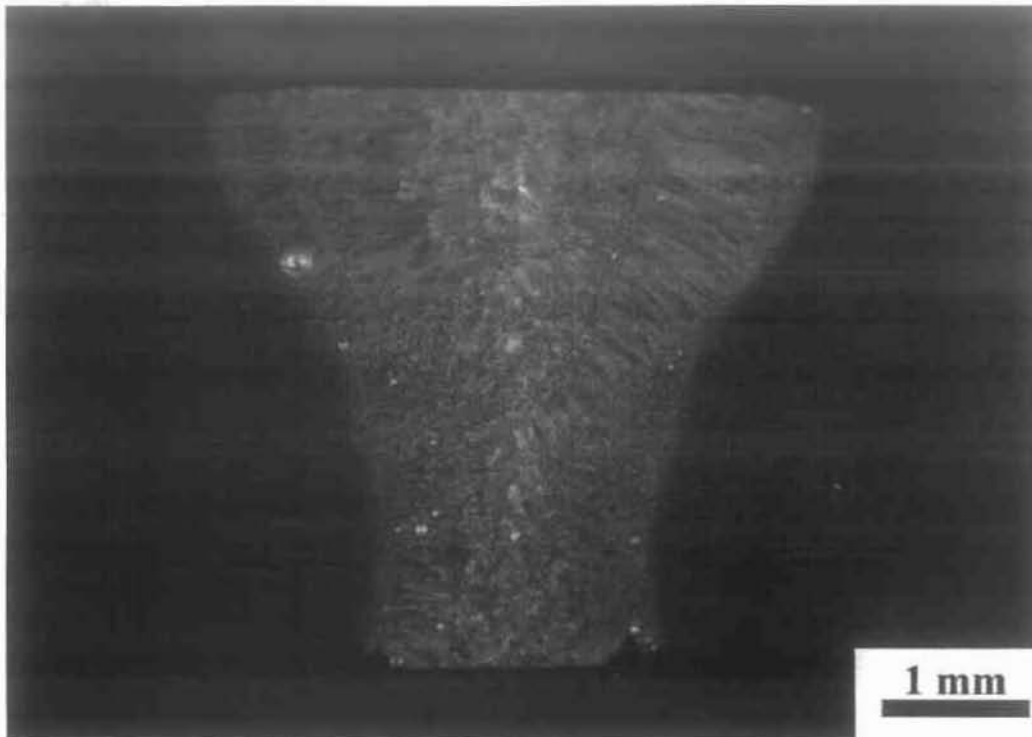
- Ευκολία στη συγκόλληση
- Εφελκυστικές και διατμητικές τάσεις στην συγκόλληση
- Ολκιμότητα συγκόλλησης
- Θερμοκρασία λειτουργίας
- Αντοχή στη διάβρωση
- Αντιστοιχία στο χρώμα συγκόλλησης και μετάλλου βάσης μετά την ανοδίωση
- Ευαισθησία στη ρηγμάτωση

Για τα κράματα της παρούσας εργασίας το κατάλληλο υλικό πλήρωσης (filler metal) είναι το κράμα 4047.

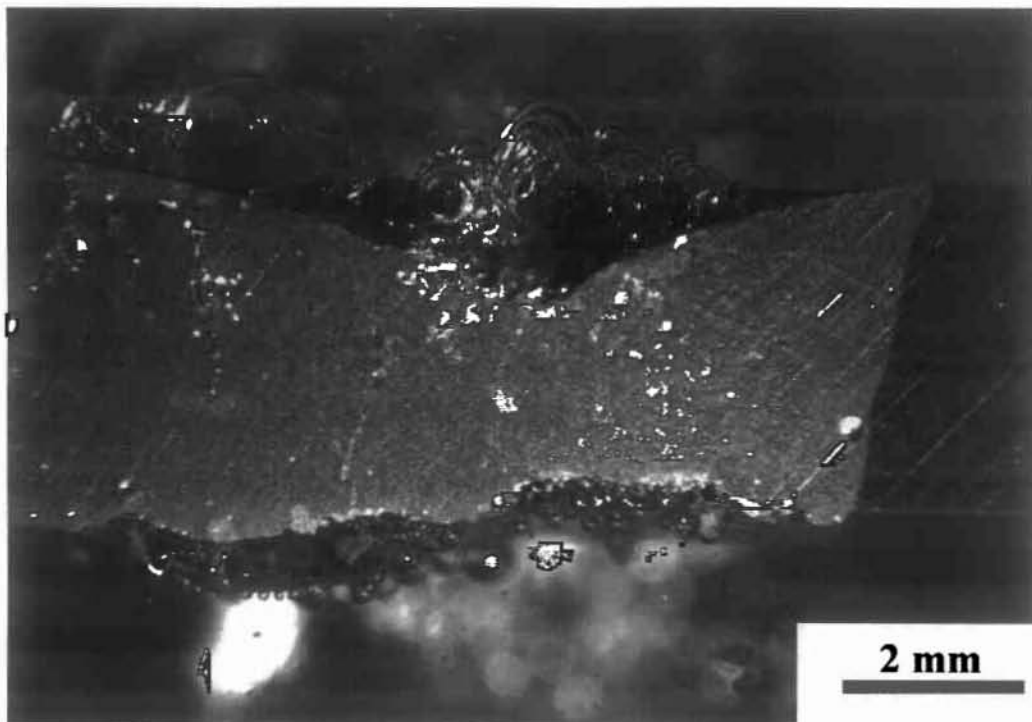
Η μέση τιμή της μικροσκληρότητας του μετάλλου βάσης του κράματος 2198 έπειτα από μικροσκληρομέτρηση είναι 146 HV_{0.2}. Στη ΘΕΖ, η οποία είναι 2.7mm κατά μέσο όρο, η μικροσκληρότητα μειώνεται σε σχέση με το μέταλλο βάσης και ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες του laser λαμβάνει τιμές από 89-128 HV_{0.2}. Στη λίμνη συγκόλλησης η μικροσκληρότητα είναι χαμηλή με τιμές από 66-73 HV_{0.2}.

Οι διαμήκεις τομές και οι φωτογραφίες (top view) πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου σε εργασία προσομοίωσης.

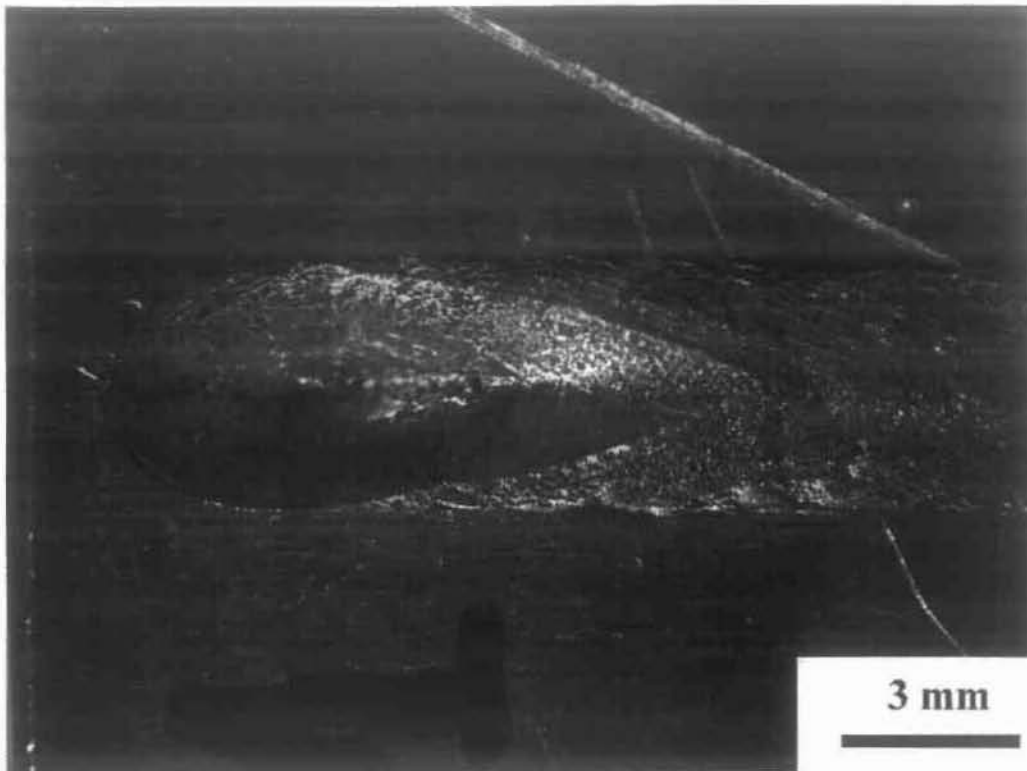
➤ Κράμα Al 2198 (LBW)



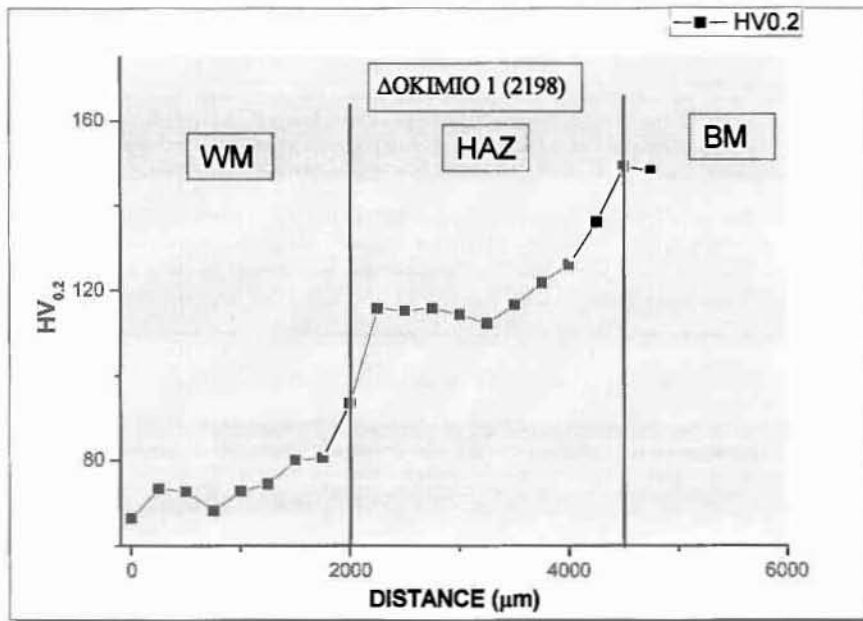
Σχήμα 4.1: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)



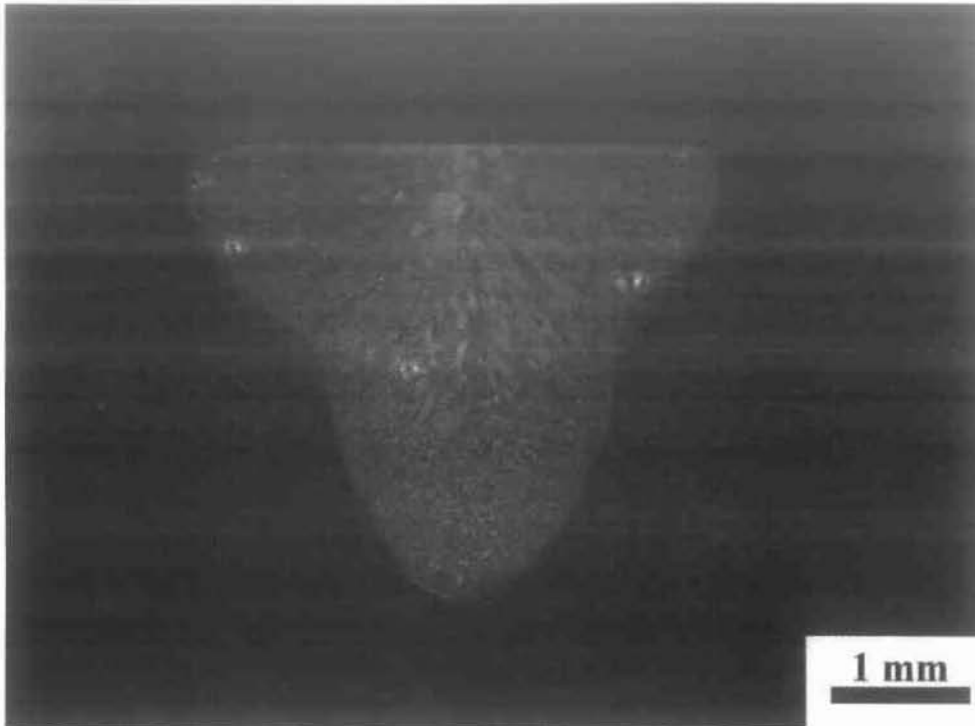
Σχήμα 4.2: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



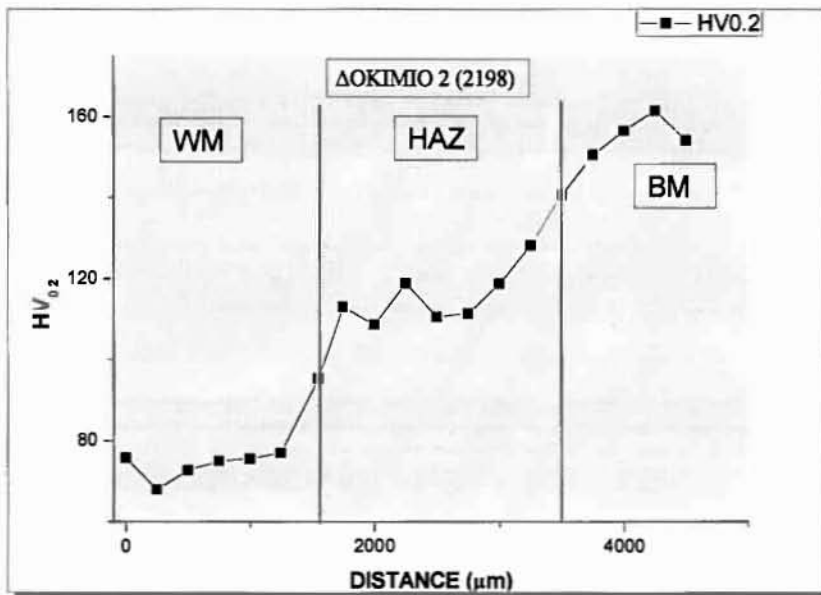
Σχήμα 4.3: Δοκίμιο 1 - Top View



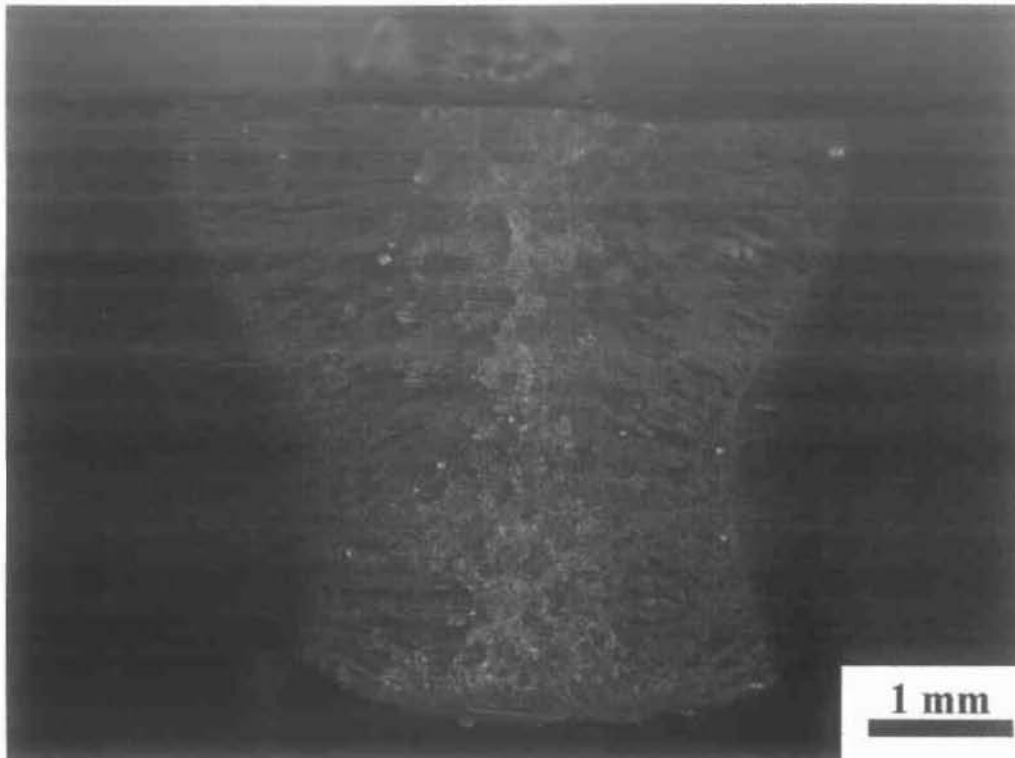
Σχήμα 4.4: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας



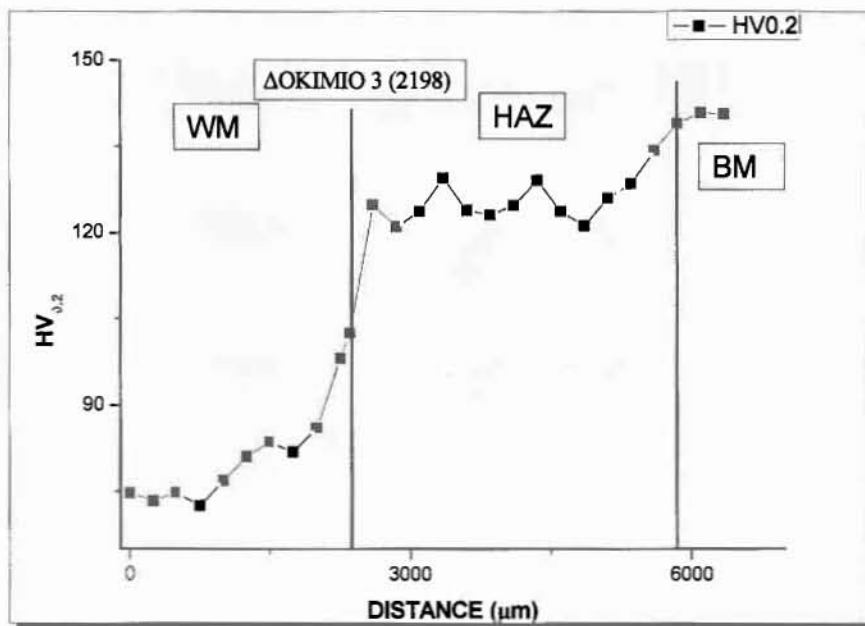
Σχήμα 4.5: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 2970 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 85 J/mm)



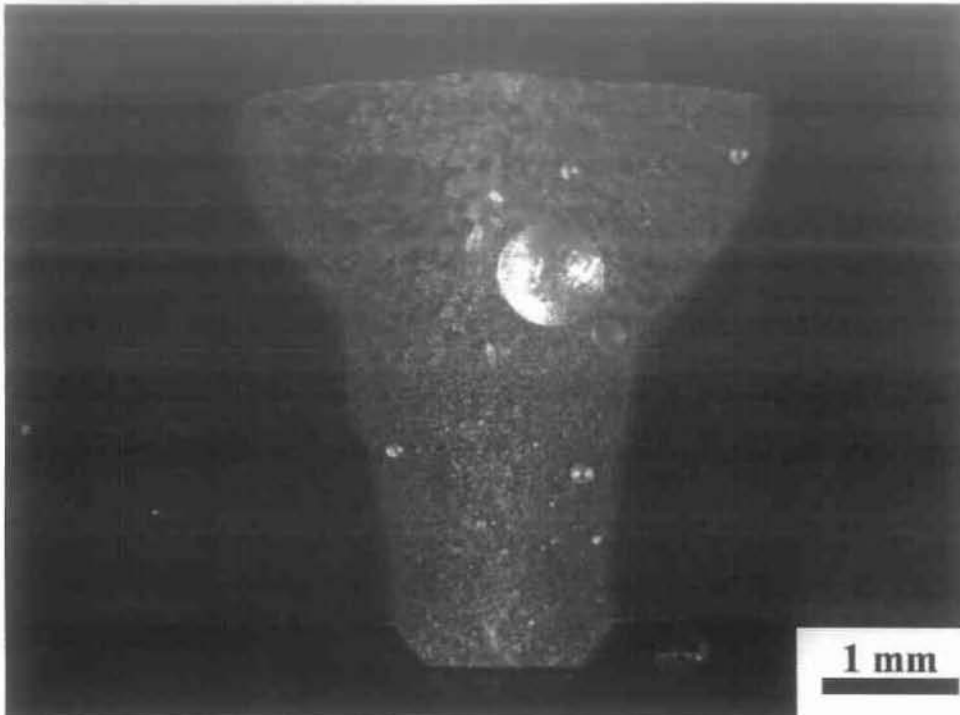
Σχήμα 4.6: Δοκίμιο 2 - Profil Μικροσκληρότητας



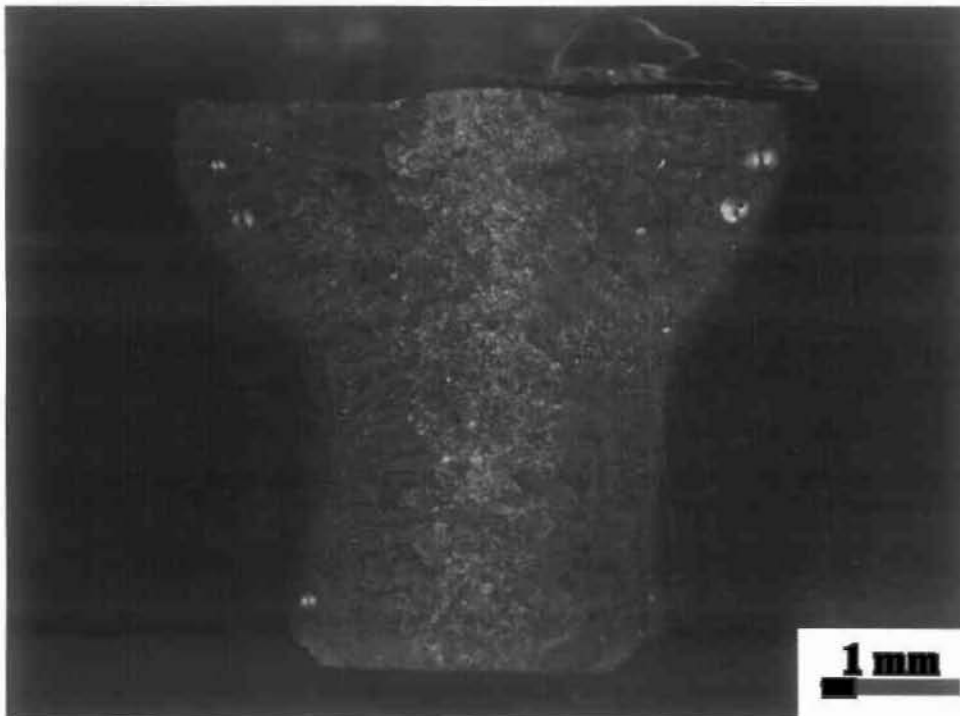
Σχήμα 4.7: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
 (Ισχύς: 3913 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 117 J/mm)



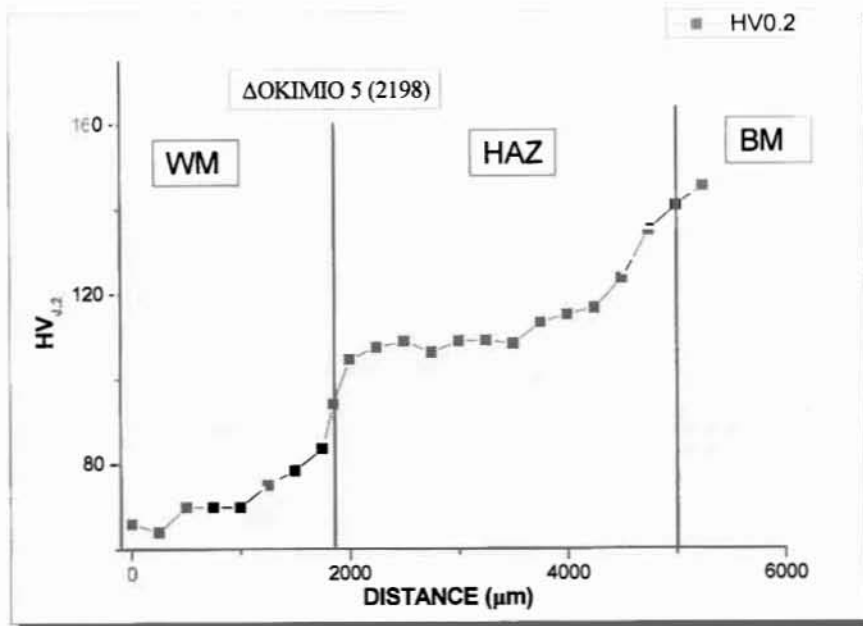
Σχήμα 4.8: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας



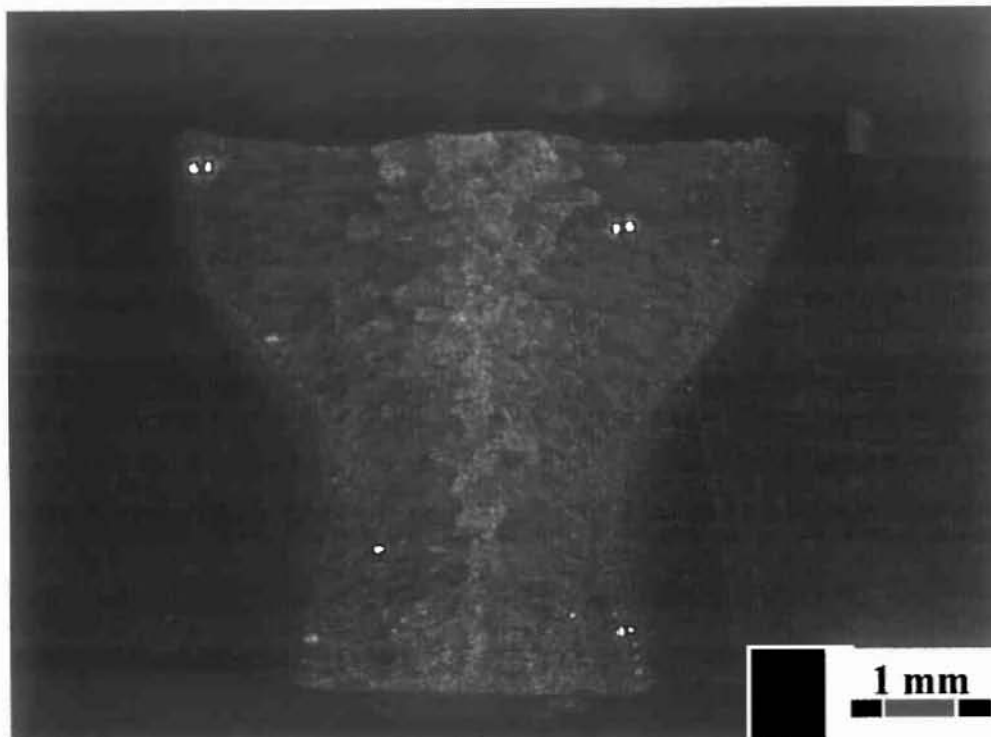
Σχήμα 4.9 Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 98 J/mm)



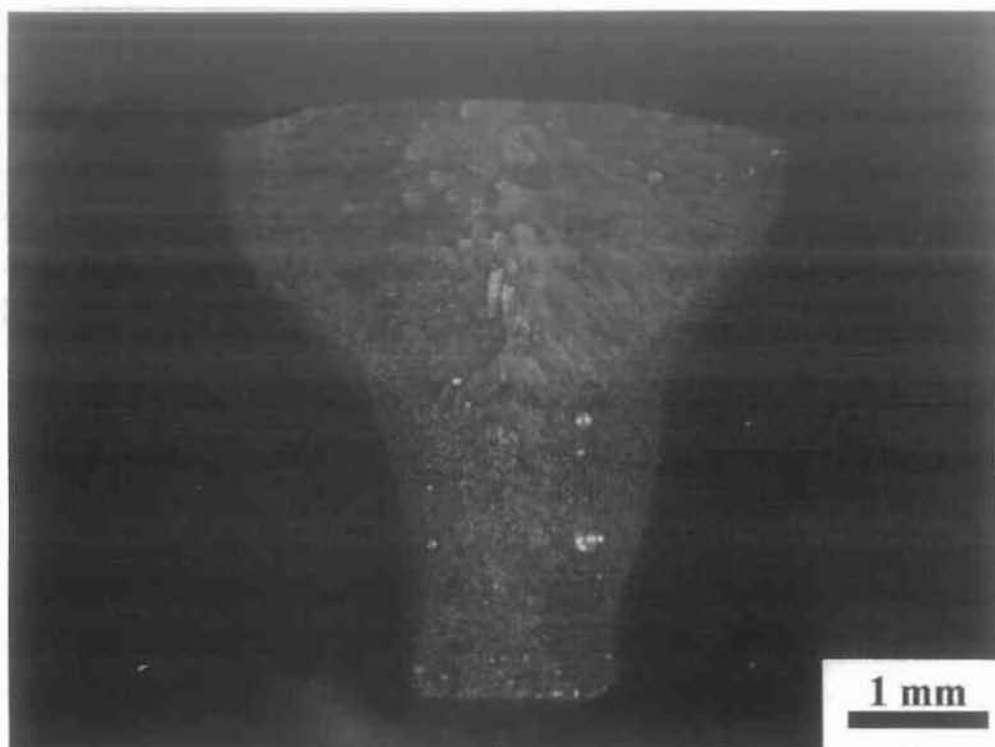
Σχήμα 4.10: Δοκίμιο 5 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)



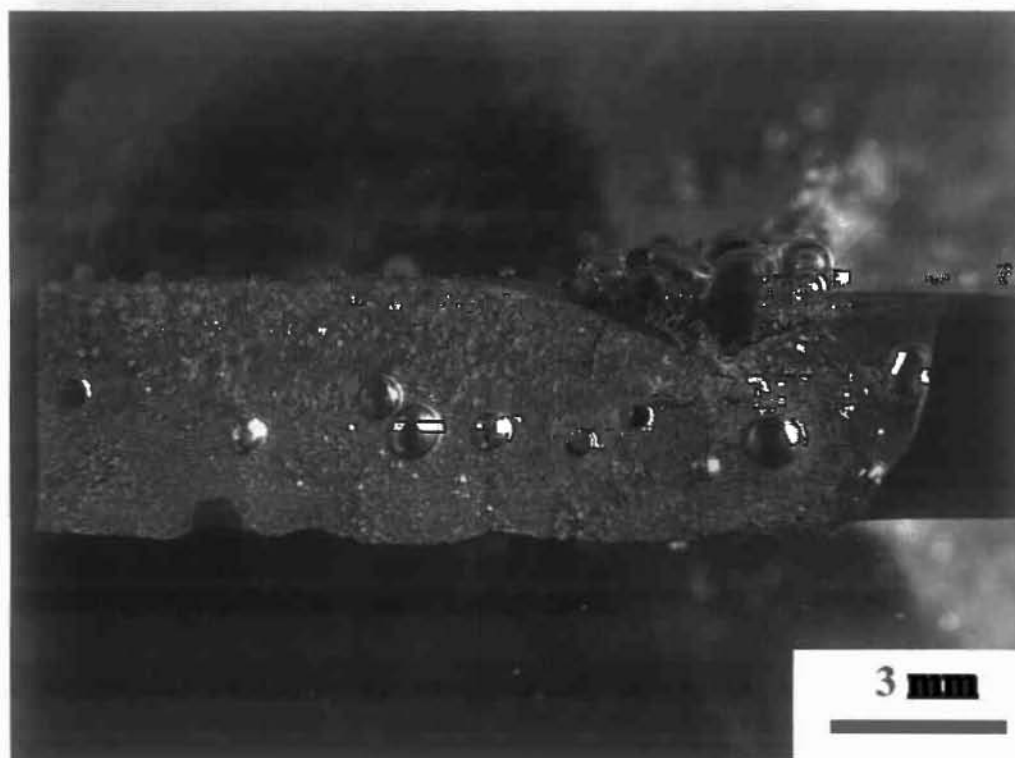
Σχήμα 4.11: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας



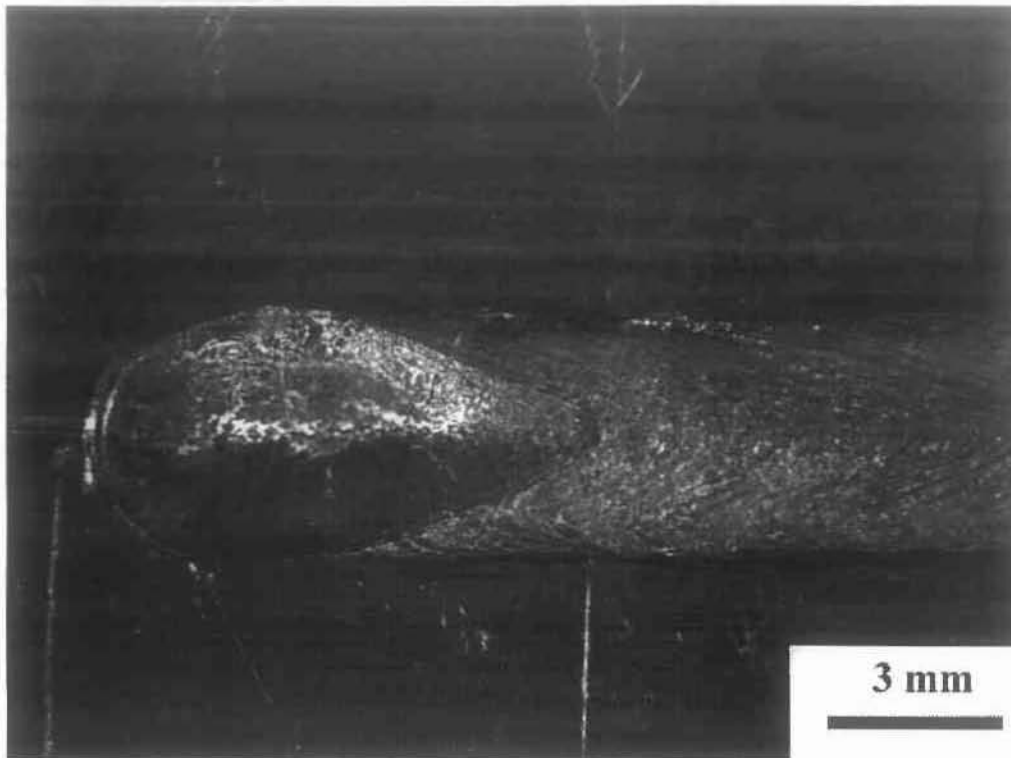
Σχήμα 4.12: Δοκίμιο 6 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3630, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 109 J/mm)



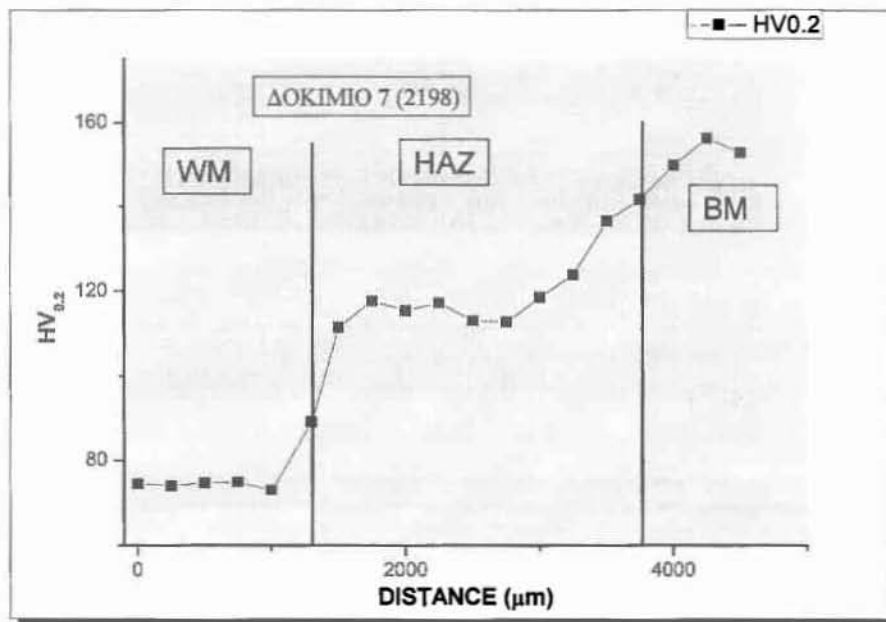
Σχήμα 4.13: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)



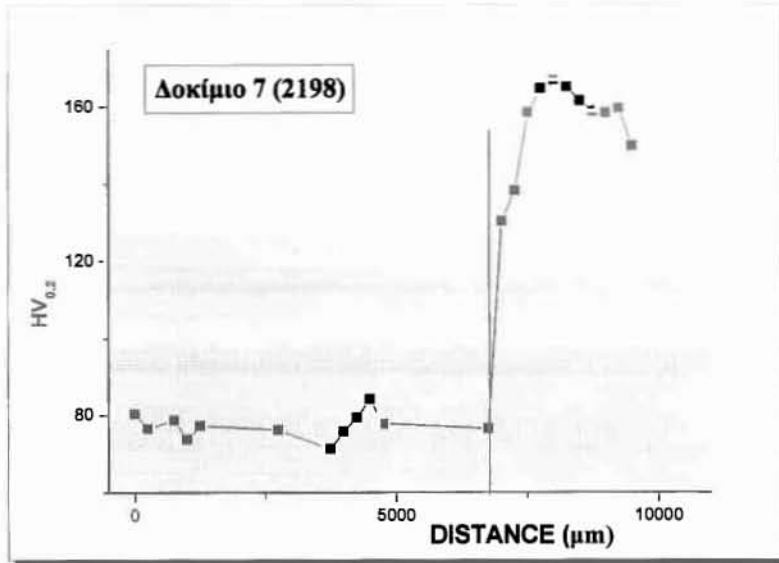
Σχήμα 4.14: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



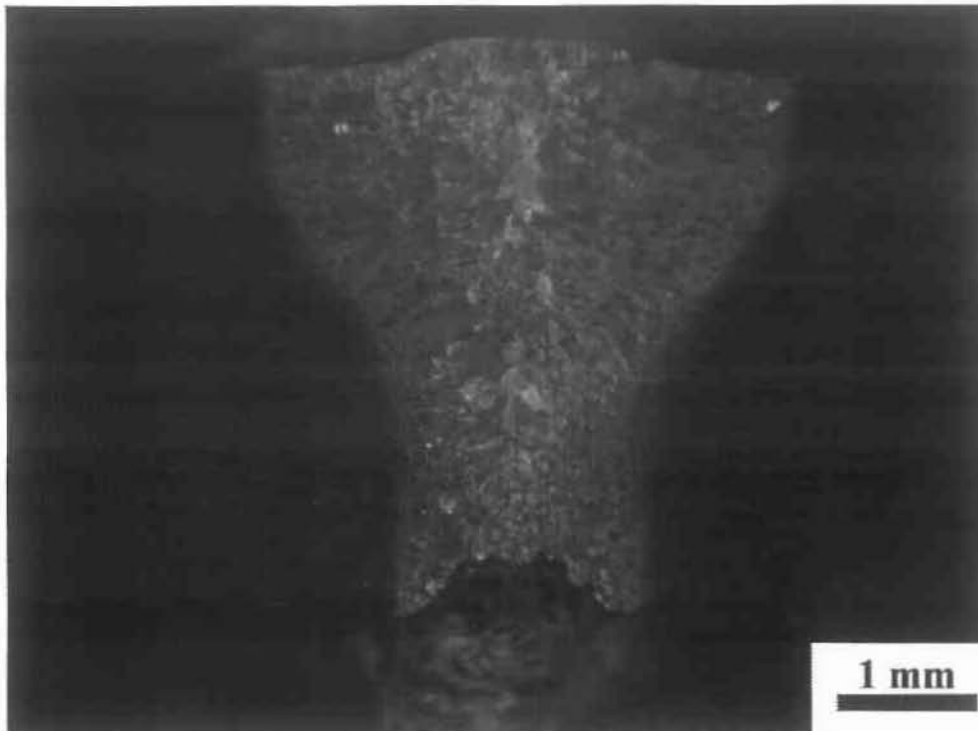
Σχήμα 4.15: Δοκίμο 7 - Top View



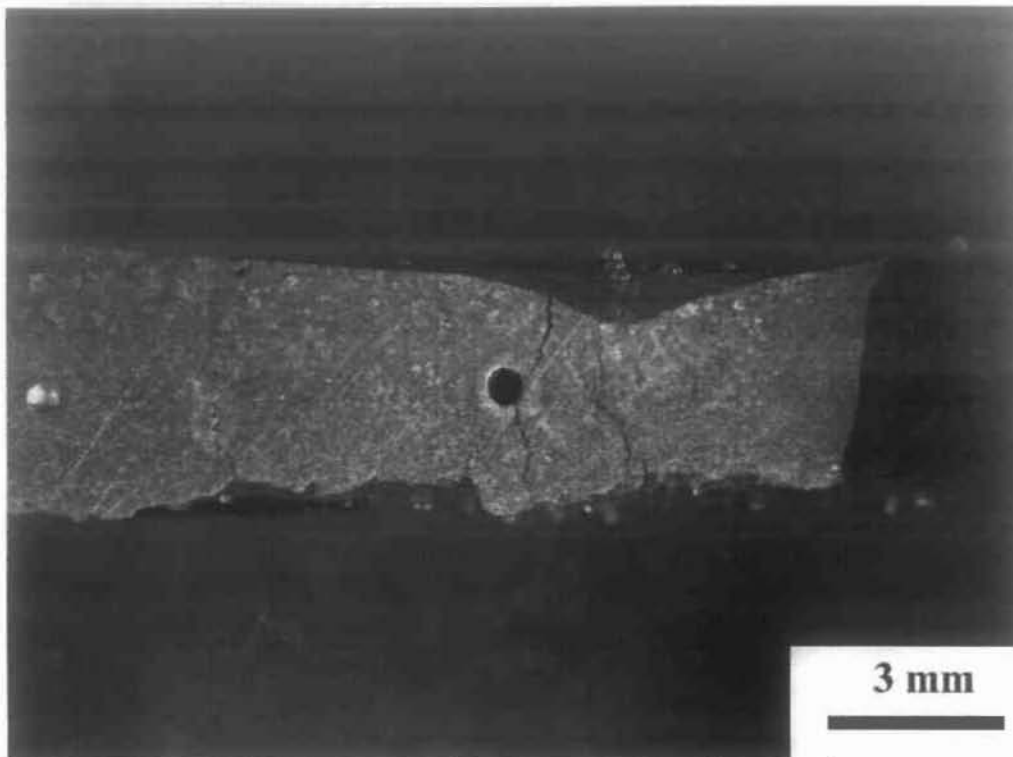
Σχήμα 4.16: Δοκίμο 7 – Profil Μικροσκληρότητας



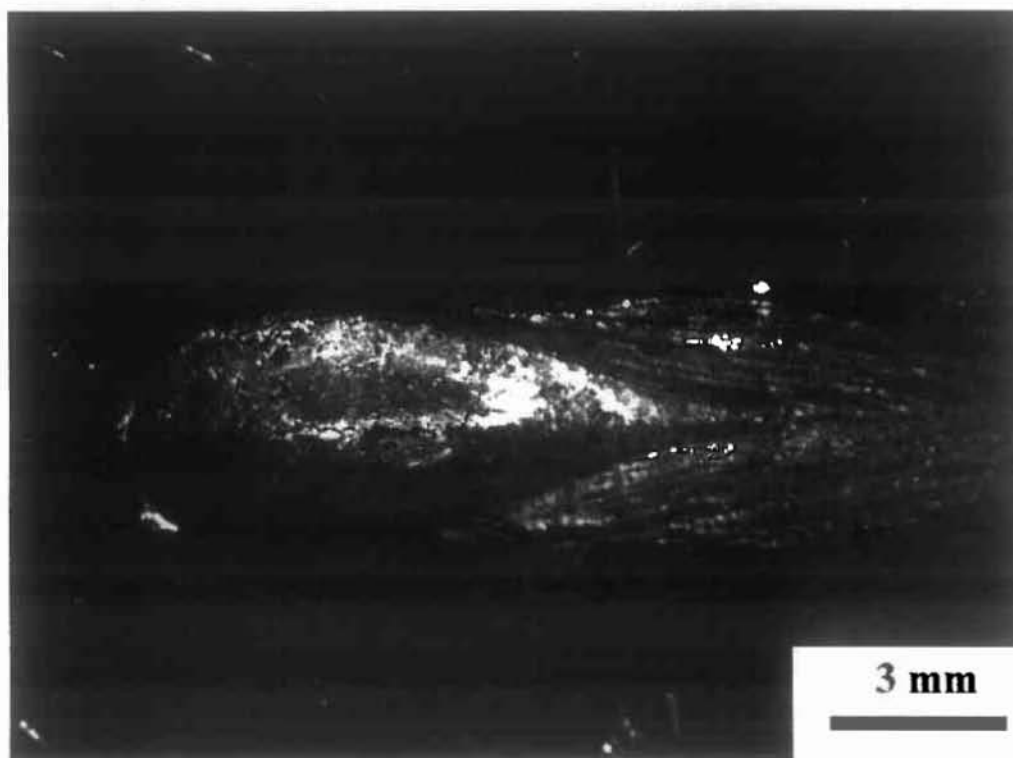
Σχήμα 4.17: Δοκίμιο 7 – Profil Μικροκληρότητας σε διαμήκη τομή



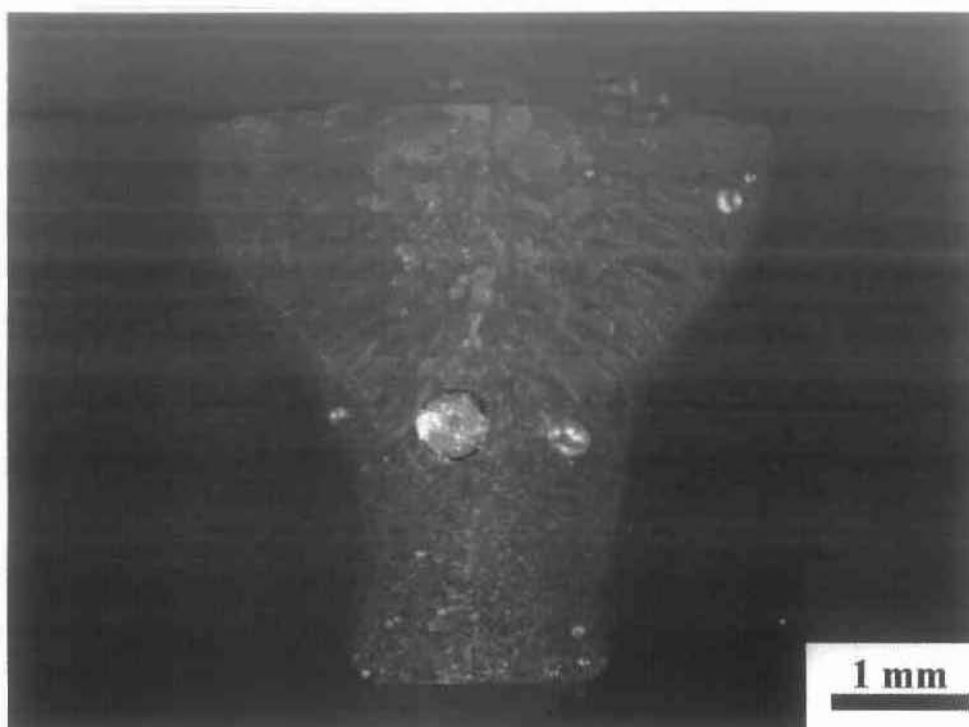
Σχήμα 4.18: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)



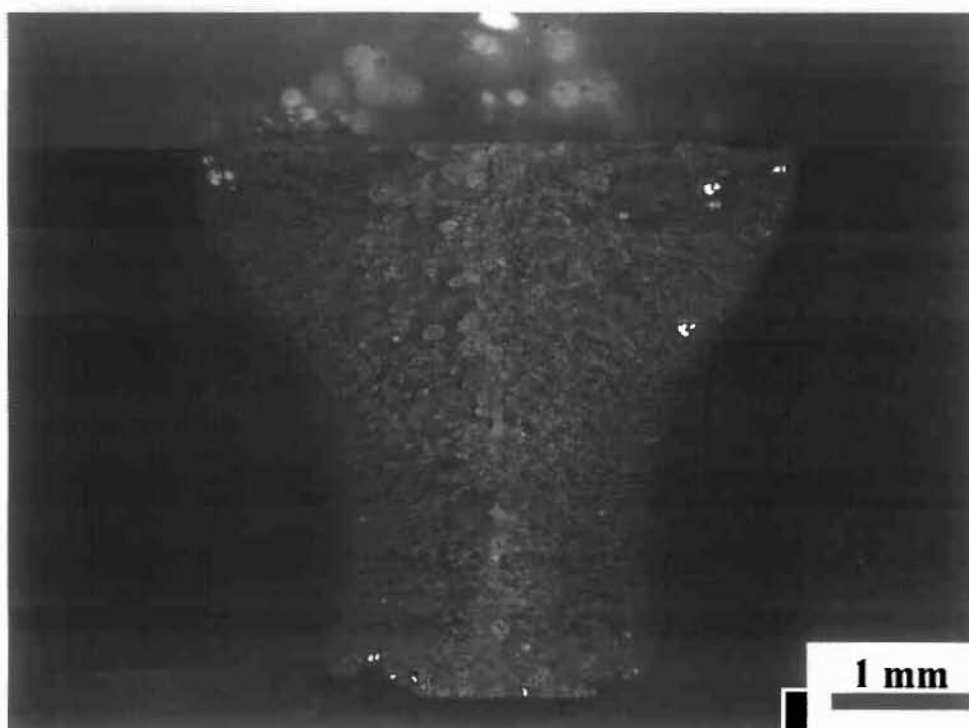
Σχήμα 4.19: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



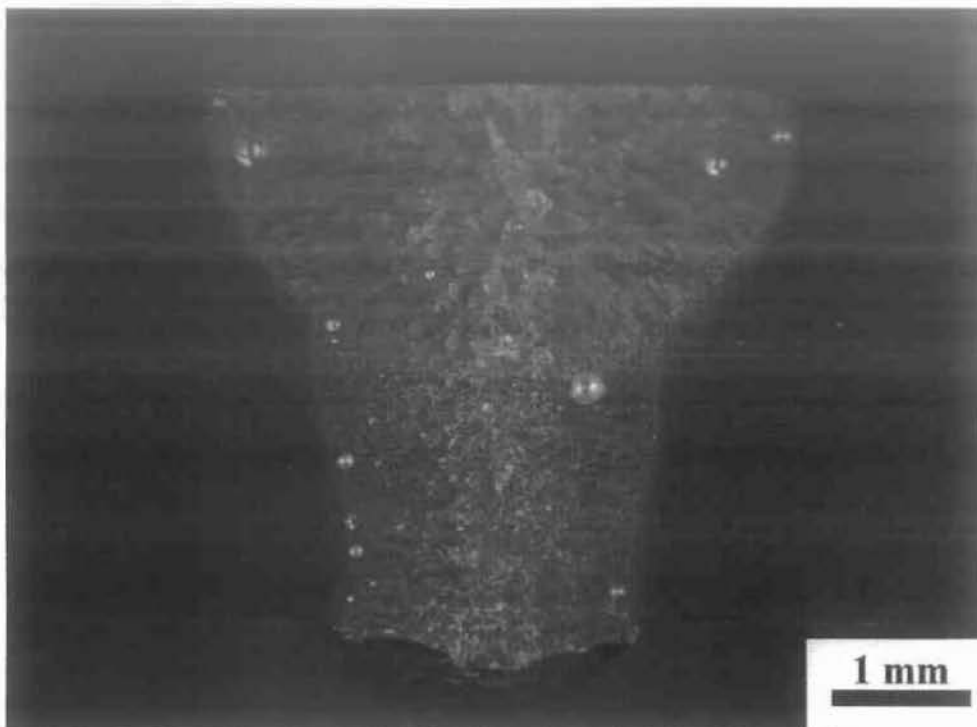
Σχήμα 4.20: Δοκίμιο 8 - Top View



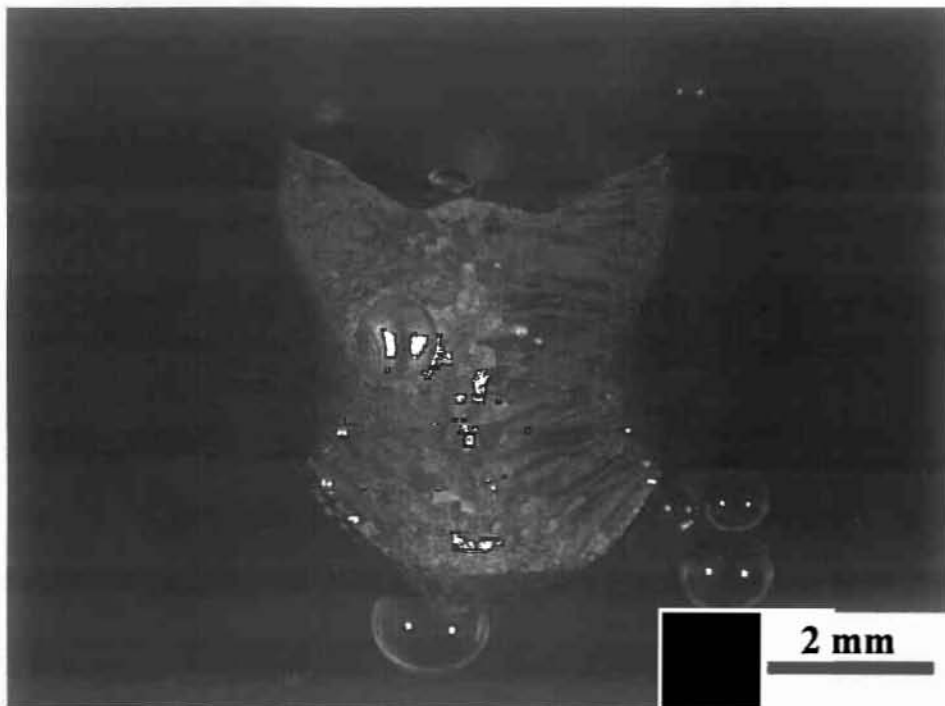
Σχήμα 4.21: Δοκίμιο 9 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/m)



Σχήμα 4.22: Δοκίμιο 10 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 103 J/mm)



Σχήμα 4.23: Δοκίμιο 11 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 1,8 m/min, ΡΠΘ: 108 J/mm)



Σχήμα 4.24: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3252 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 122 J/mm)

➤ Κράμα Al 2139 (LBW)

Στα Σχήματα 4.25 – 4.53 φαίνεται η μακροδομή των συγκολλήσεων (bead-on-plate) σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές, οι φωτογραφίες των συγκολλήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν διαμήκεις τομές (top view) και η μικροσκληρότητα κάποιων δοκιμών για το κράμα 2139. Αυτά τα δοκίμια έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο LBW (πρώτη πειραματική σειρά).

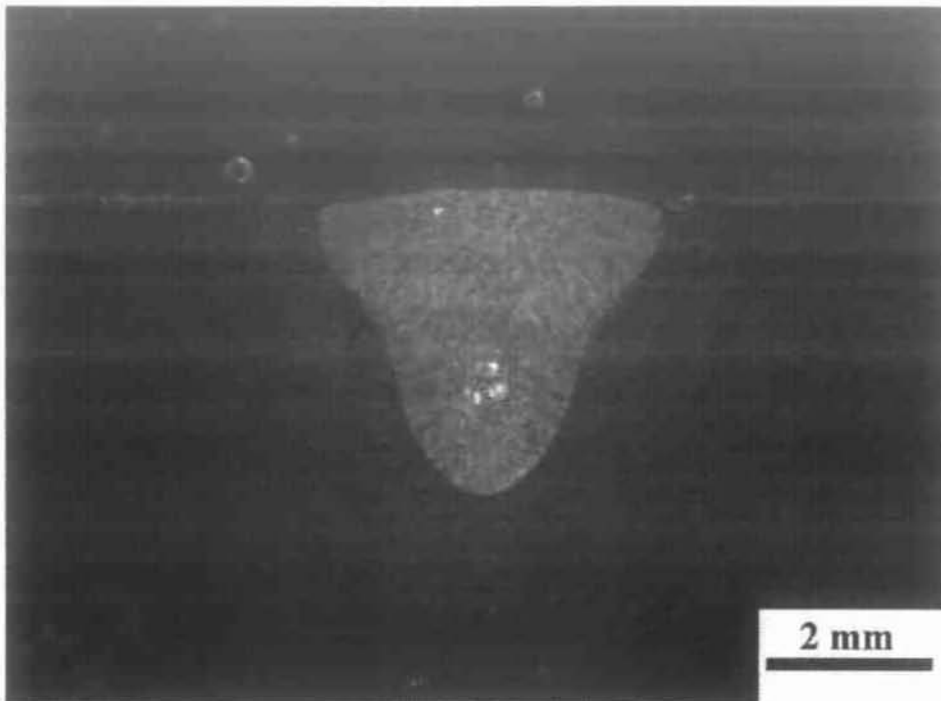
Στις εγκάρσιες τομές ξεχωρίζουμε τα όρια της λίμνης συγκόλλησης, την θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και το μέταλλο βάσης. Μεταξύ της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ παρατηρείται η ζώνη μερικής τήξης (ZMT). Πλήρης διείσδυση παρατηρείται για τιμές του ΡΠΘ υψηλότερες από 125J/mm (Σχήμα 4.78). Η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη του 2198 εξαιτίας του ότι το πάχος του υλικού είναι μεγαλύτερο.

Το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης εξαρτάται επίσης ισχυρά από τις συνθήκες του laser και παίρνει τιμές από 4.14 έως 5.22mm (Σχήμα 4.77).

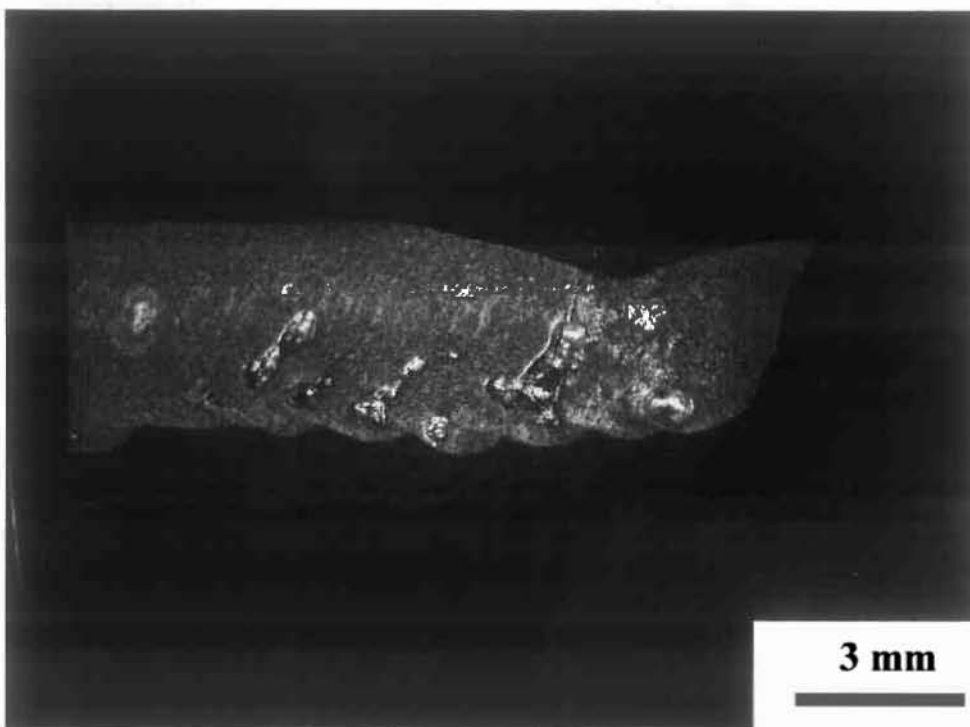
Παρατηρείται πορώδες κυρίως στα όρια του μετάλλου συγκόλλησης.

Η μέση τιμή της μικροσκληρότητας του μετάλλου βάσης του κράματος 2139 έπειτα από μικροσκληρομέτρηση είναι 165HV_{0.2}. Στη ΘΕΖ, η οποία είναι 3.2mm κατά μέσο όρο, η μικροσκληρότητα μειώνεται σε σχέση με το μέταλλο βάσης και ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες του laser λαμβάνει τιμές από 93-148 HV_{0.2}. Στη λίμνη συγκόλλησης η μικροσκληρότητα είναι χαμηλή με τιμές από 88-101 HV_{0.2}.

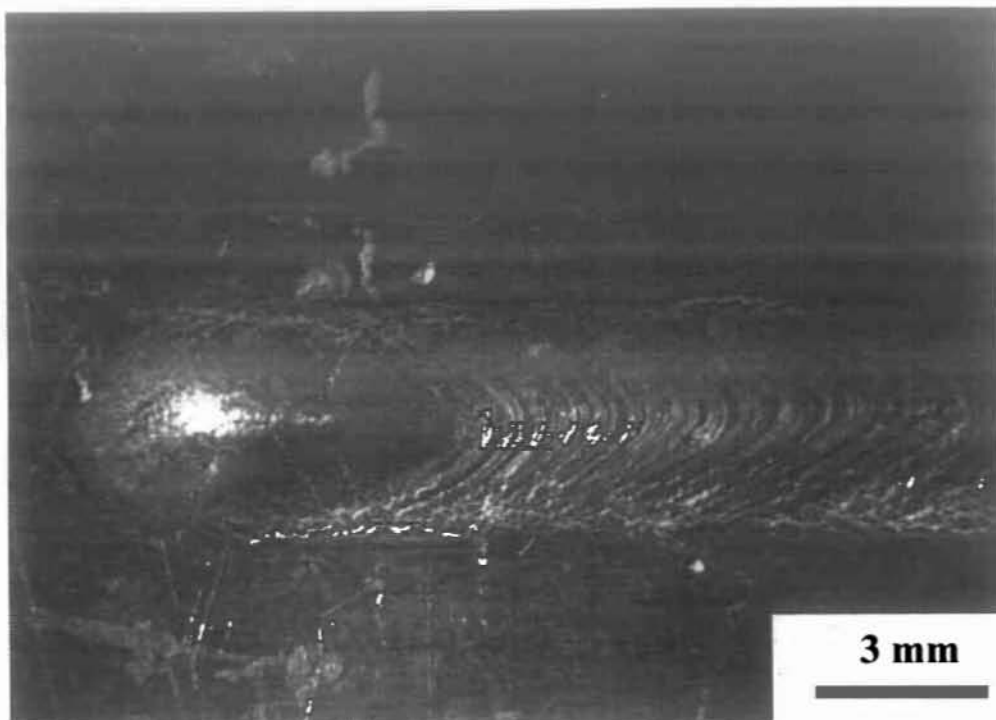
Οι διαμήκεις τομές και οι φωτογραφίες (top view) πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου σε εργασία προσομοίωσης.



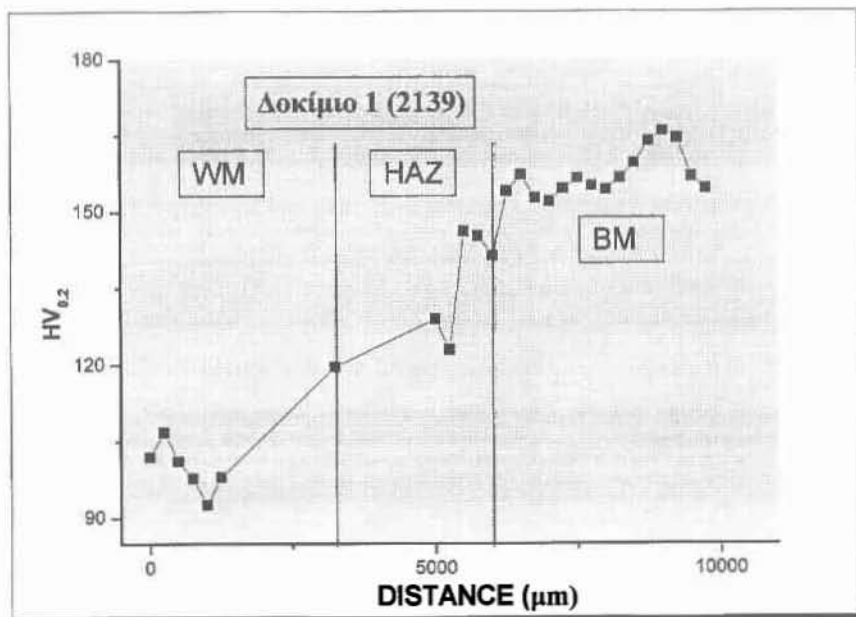
Σχήμα 4.25: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 105 J/mm)



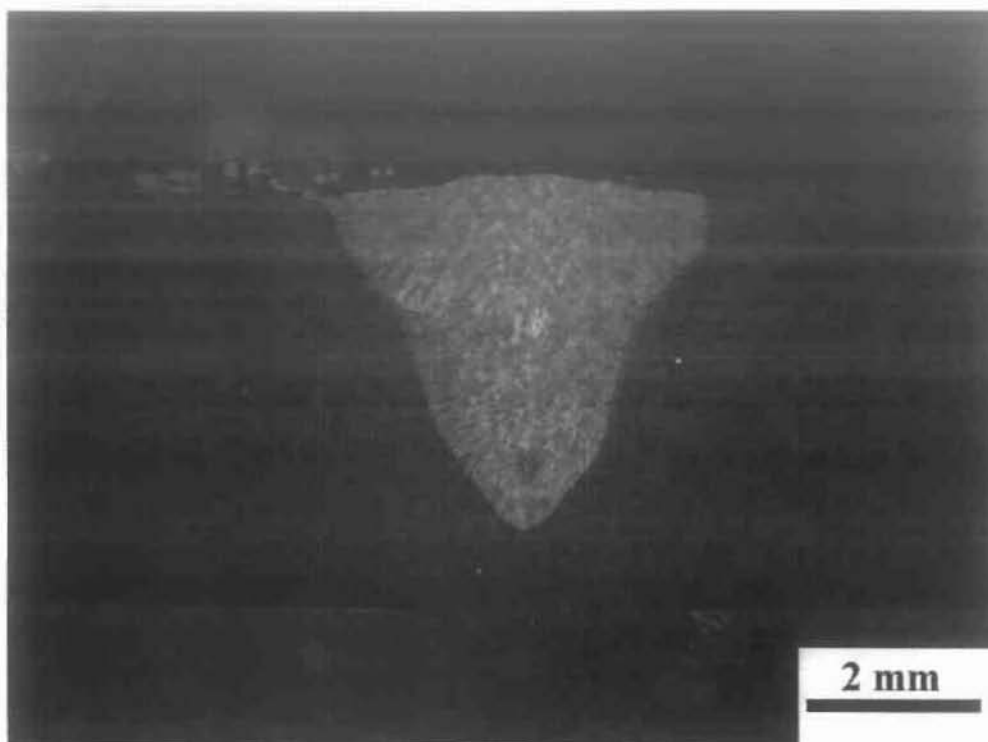
Σχήμα 4.26: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



Σχήμα 4.27: Δοκίμιο 1 - Top View



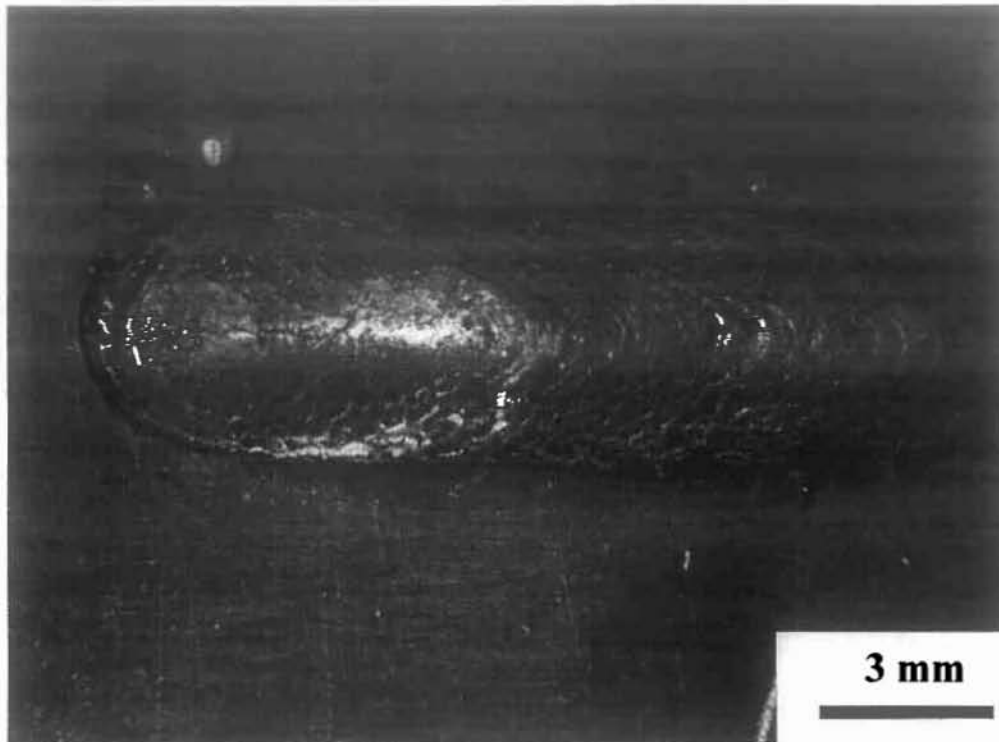
Σχήμα 4.28: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας σε διαμήκη τομή



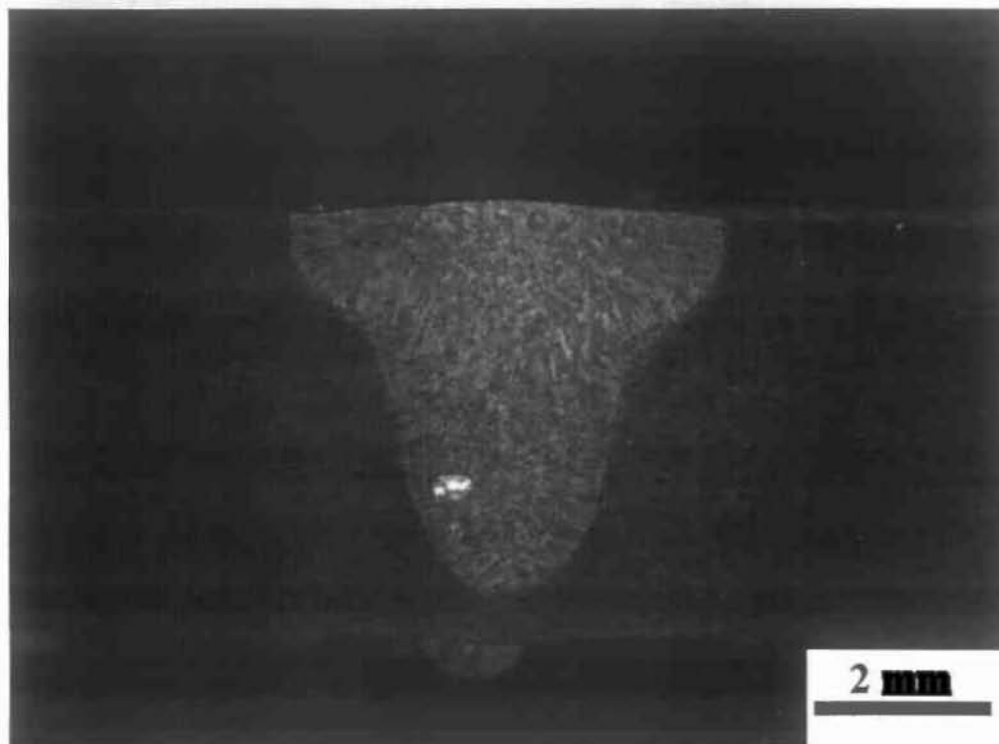
Σχήμα 4.29: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 7 m/min, ΡΠΘ: 115 J/mm)



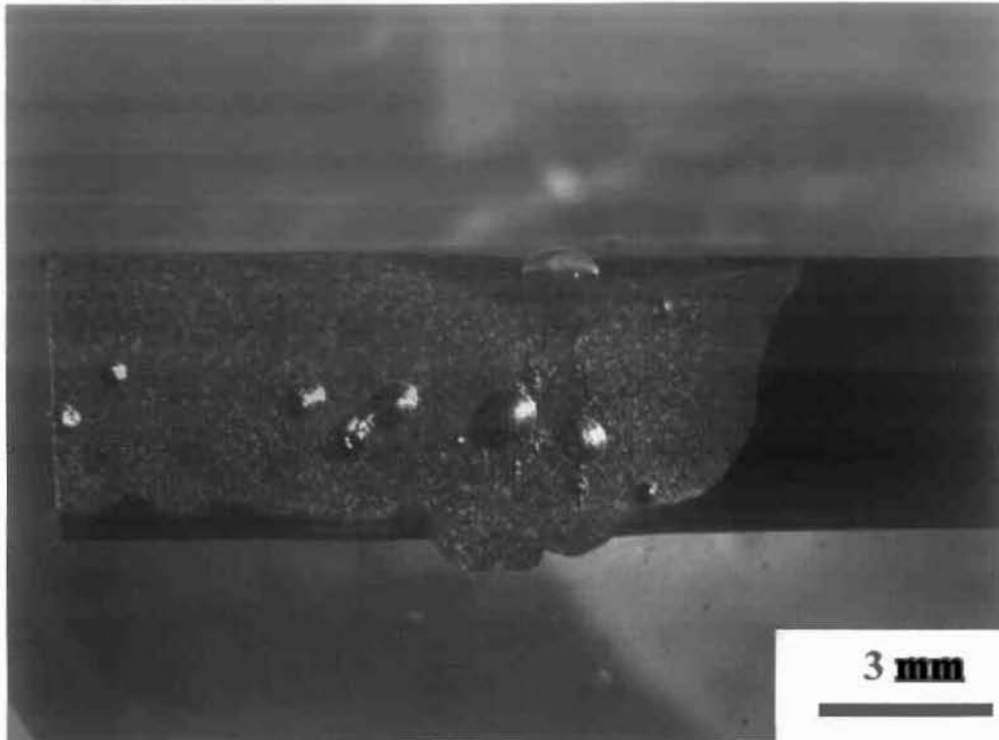
Σχήμα 4.30: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



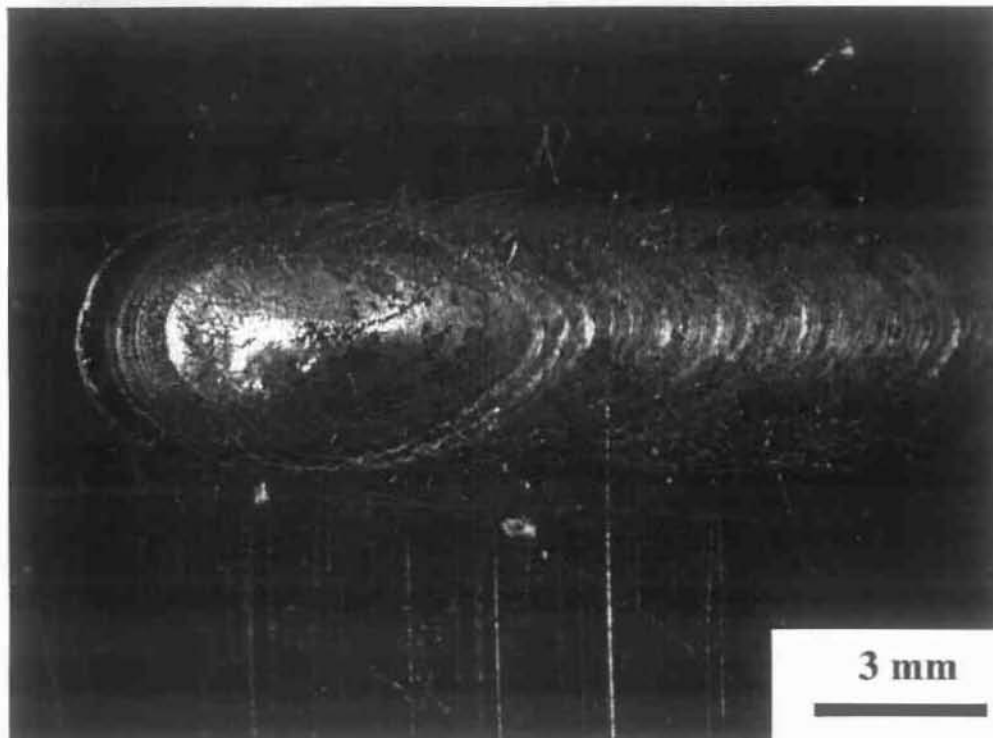
Σχήμα 4.31: Δοκίμιο 2 - Top View



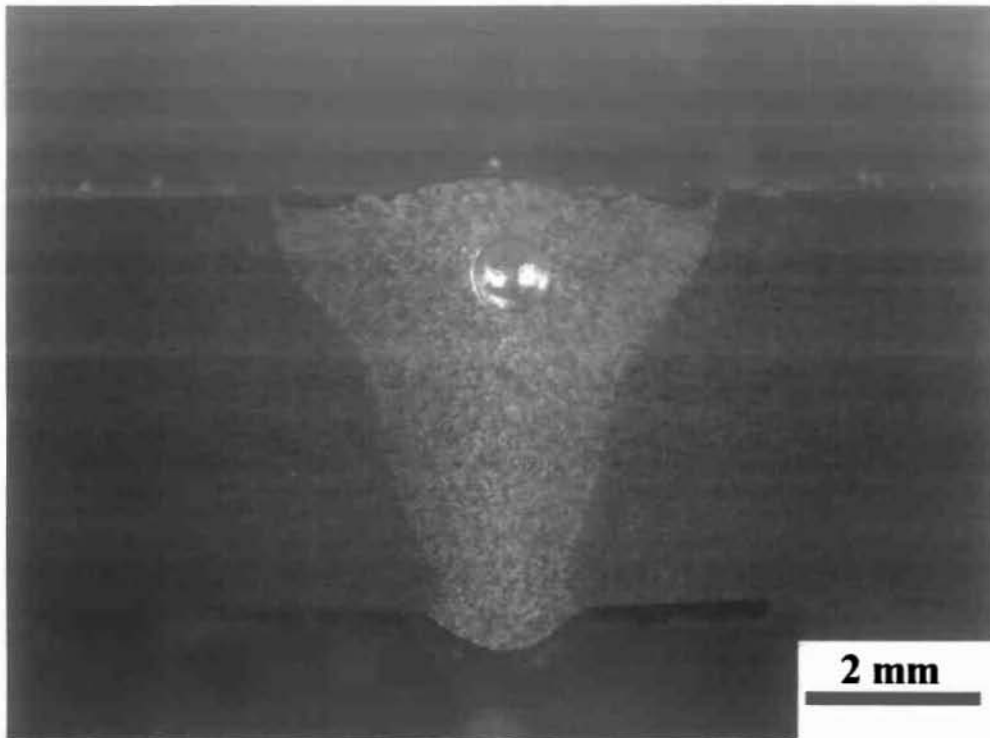
Σχήμα 4.32: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 13€ J/mm)



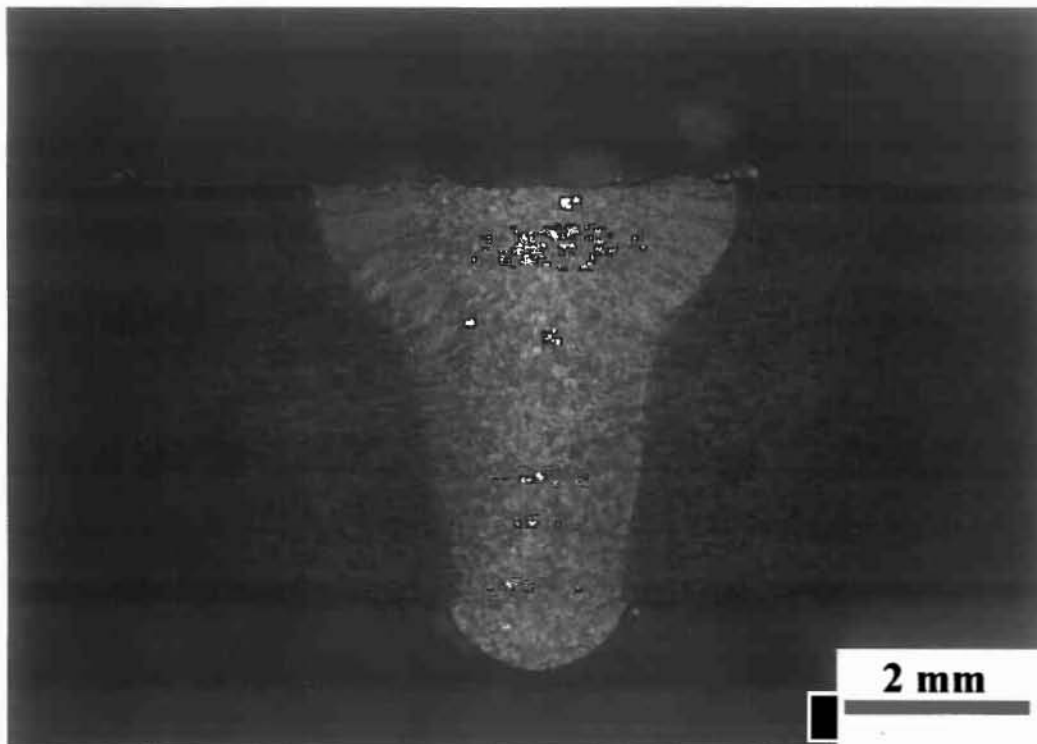
Σχήμα 4.33: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



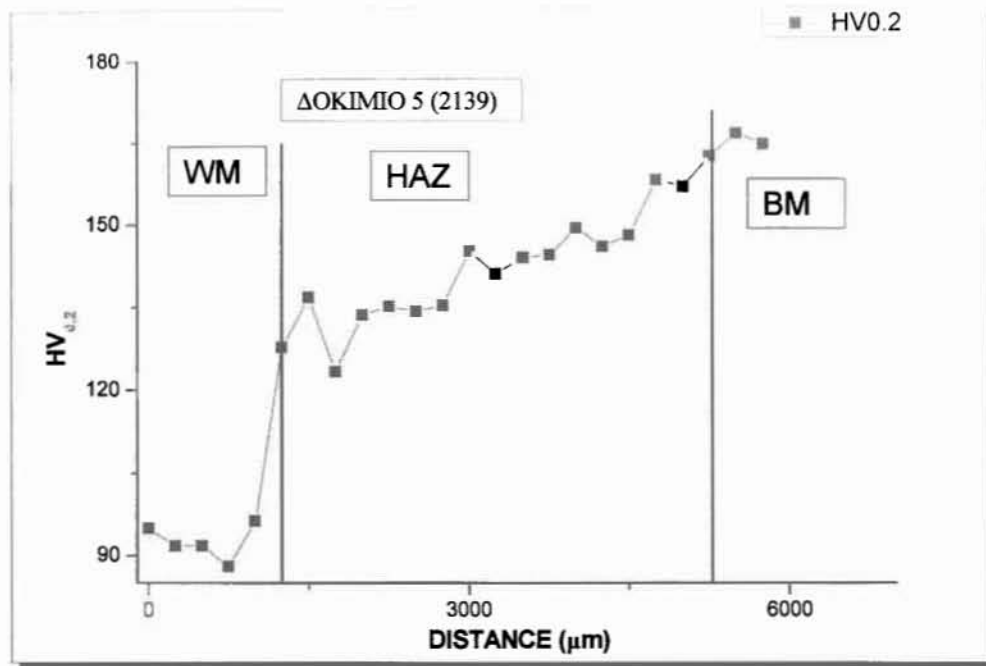
Σχήμα 4.34: Δοκίμιο 3 - Top View



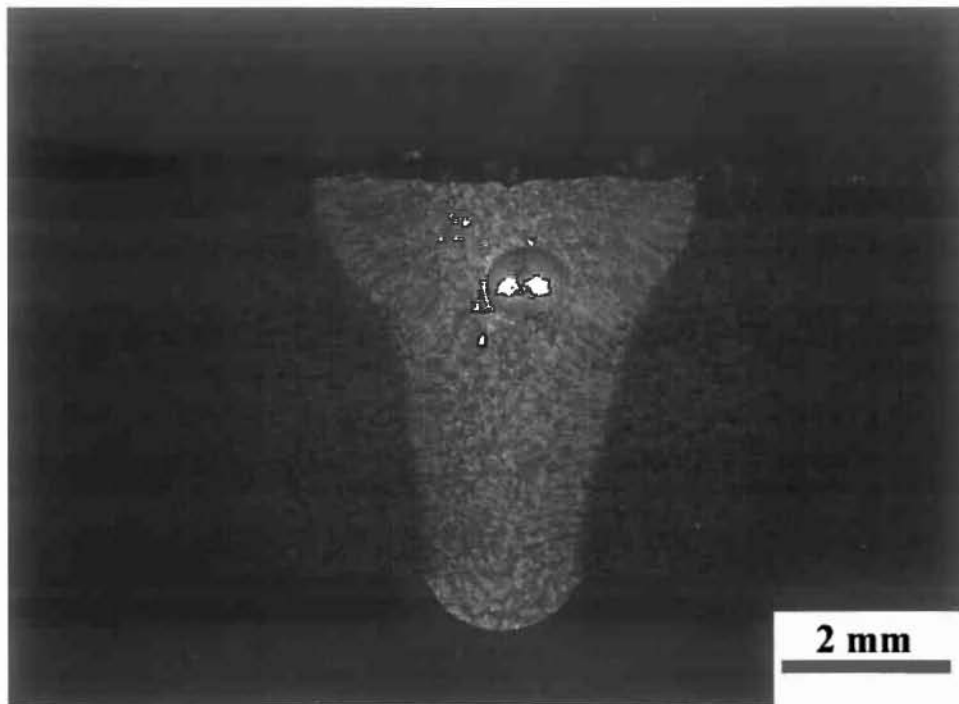
Σχήμα 4.35: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/m)



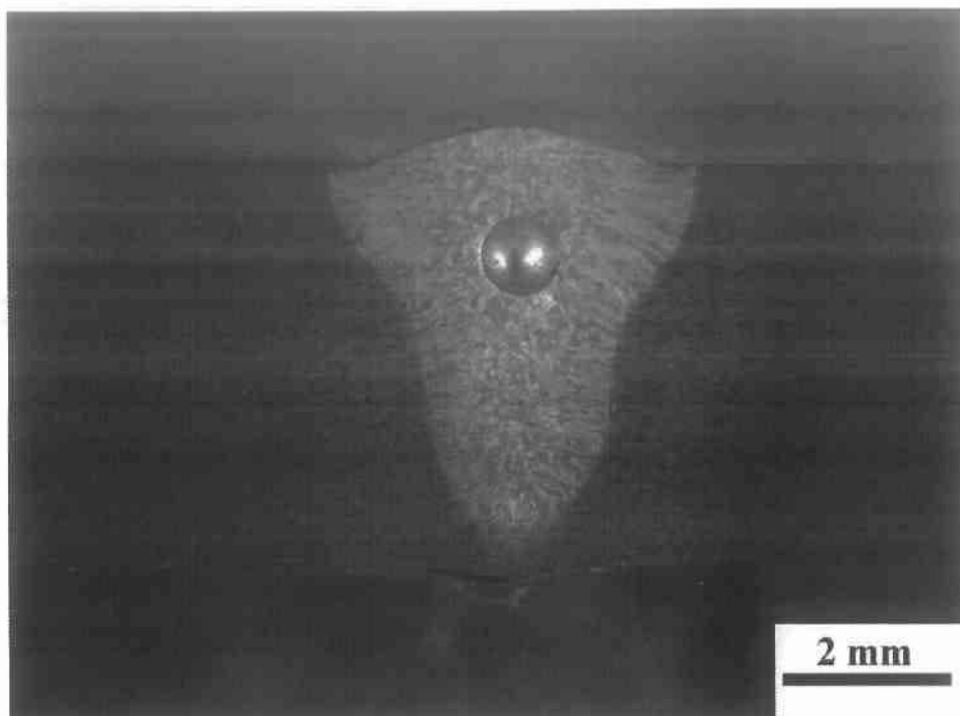
Σχήμα 4.36: Δοκίμιο 5 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,8 m/min, ΡΠΘ: 127 J/m)



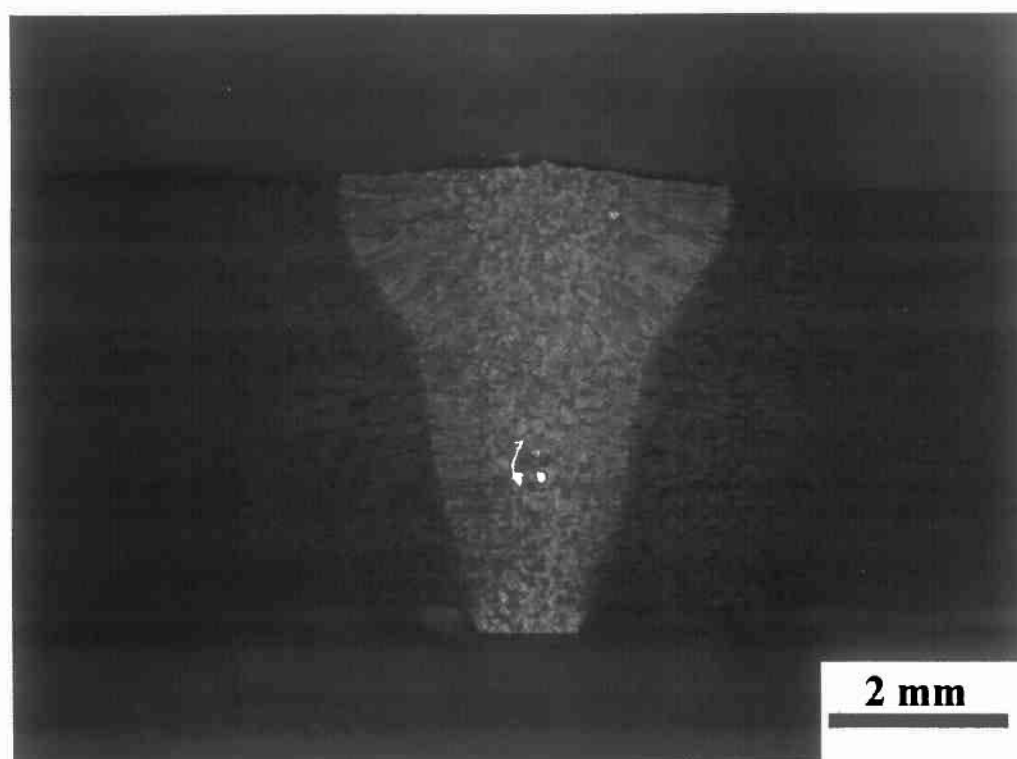
Σχήμα 4.37: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας



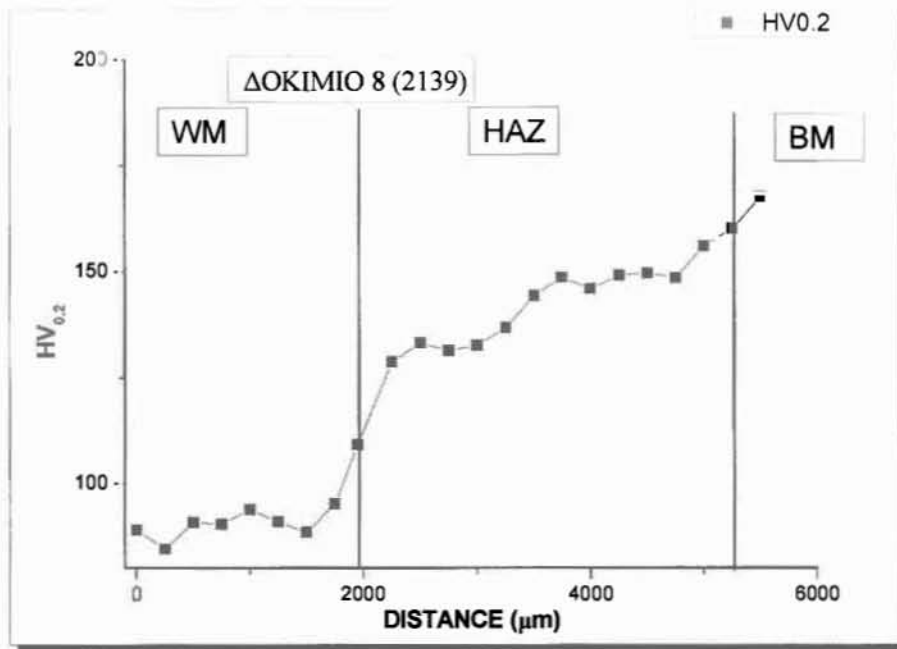
Σχήμα 4.38: Δοκίμιο 6 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,83 m/min, ΡΠΘ: 122 J/mm)



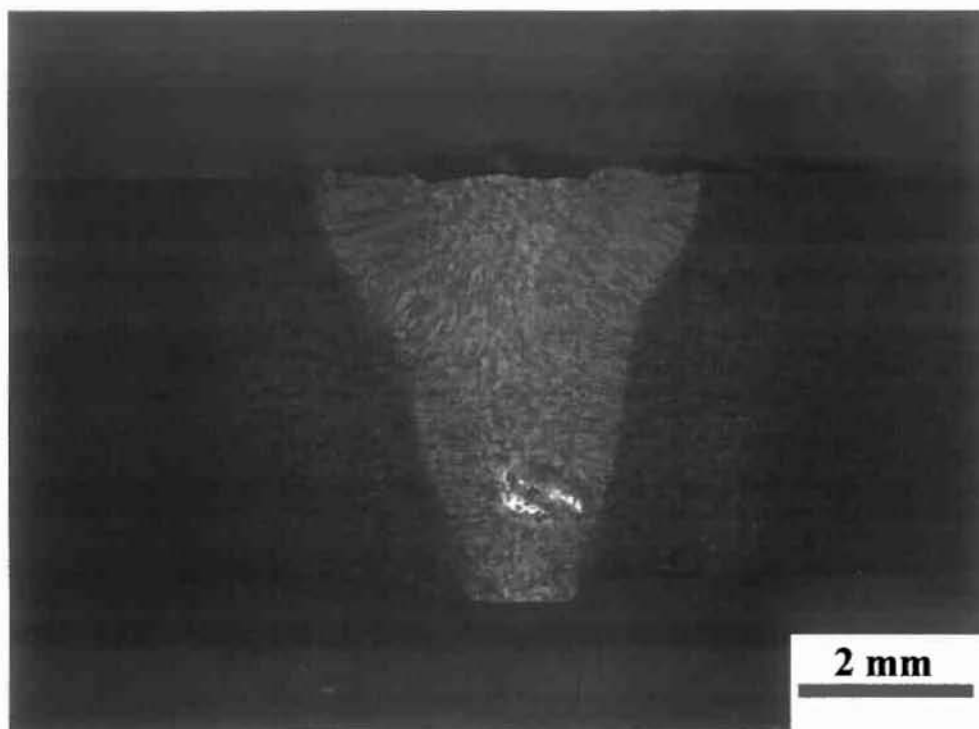
Σχήμα 4.39: Δοκίμιο 7 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3630 W, Ταχύτητα: 1,83 m/min, ΡΠΘ: 115 J/mm)



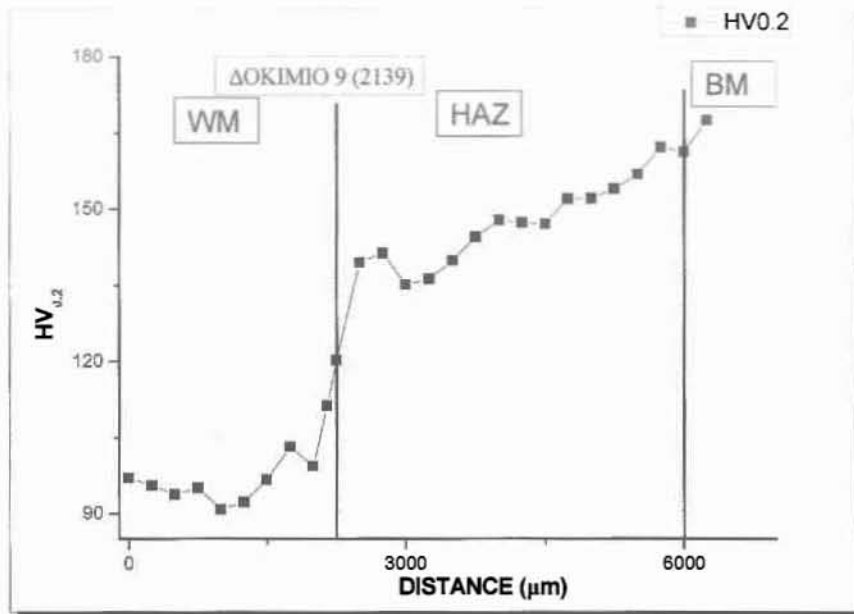
Σχήμα 4.40: Δοκίμιο 8 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3441 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 129 J/mm)



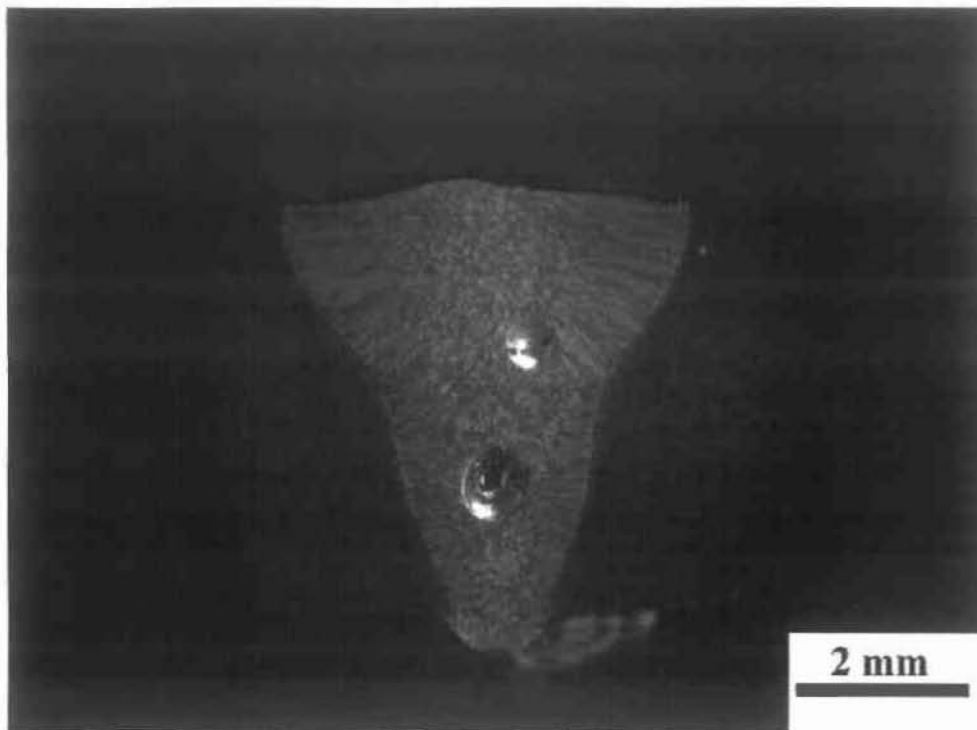
Σχήμα 4.41: Δοκίμιο 8 – Profil Μικροσκληρότητας



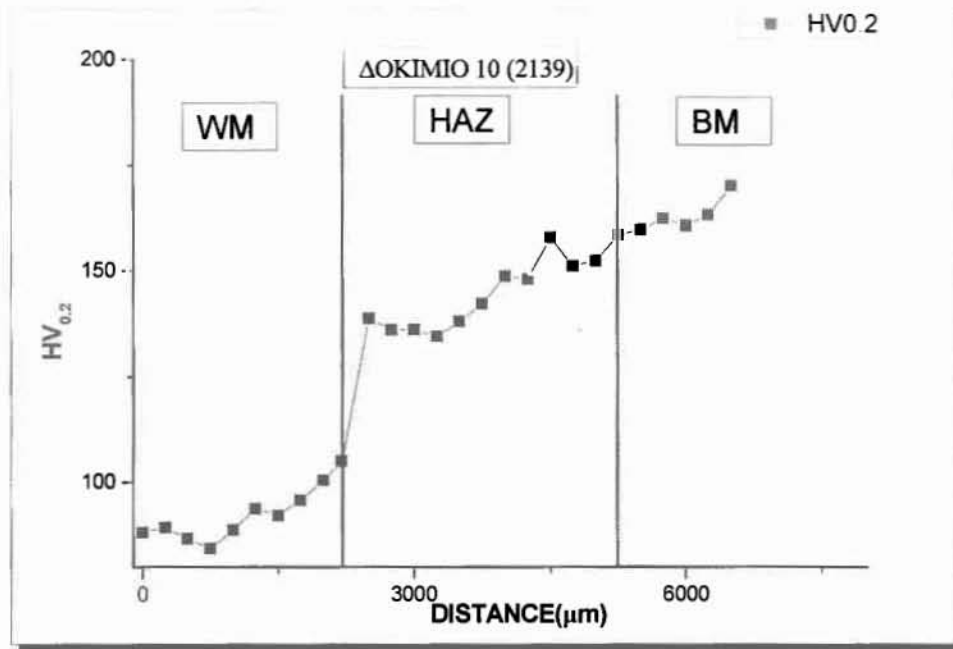
Σχήμα 4.42: Δοκίμιο 9 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)



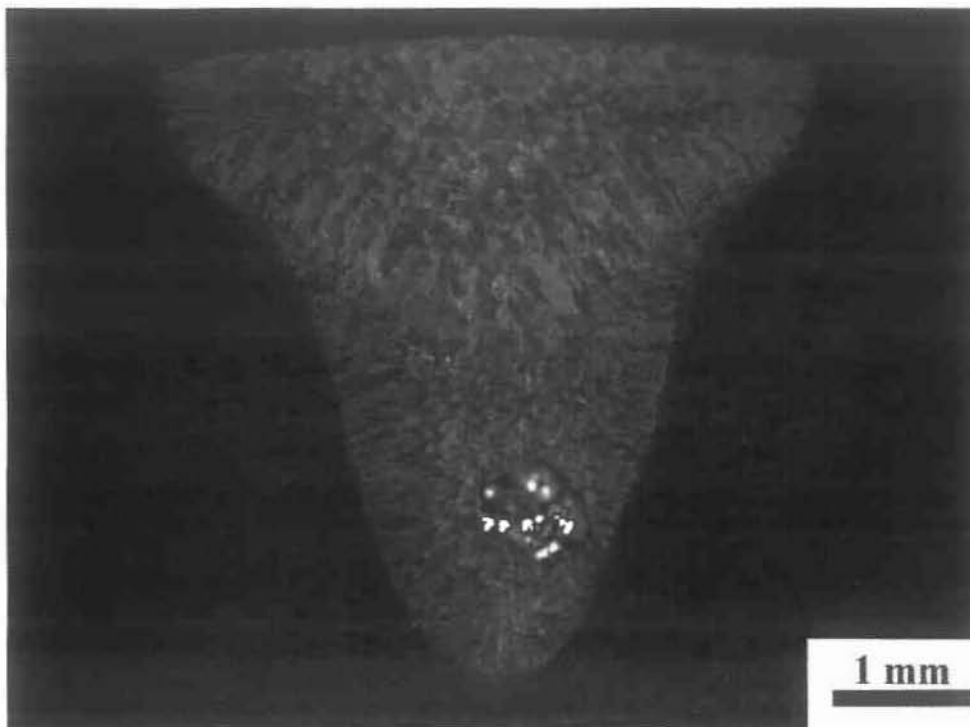
Σχήμα 4.43: Δοκίμιο 9 – Profil Μικροσκληρότητας



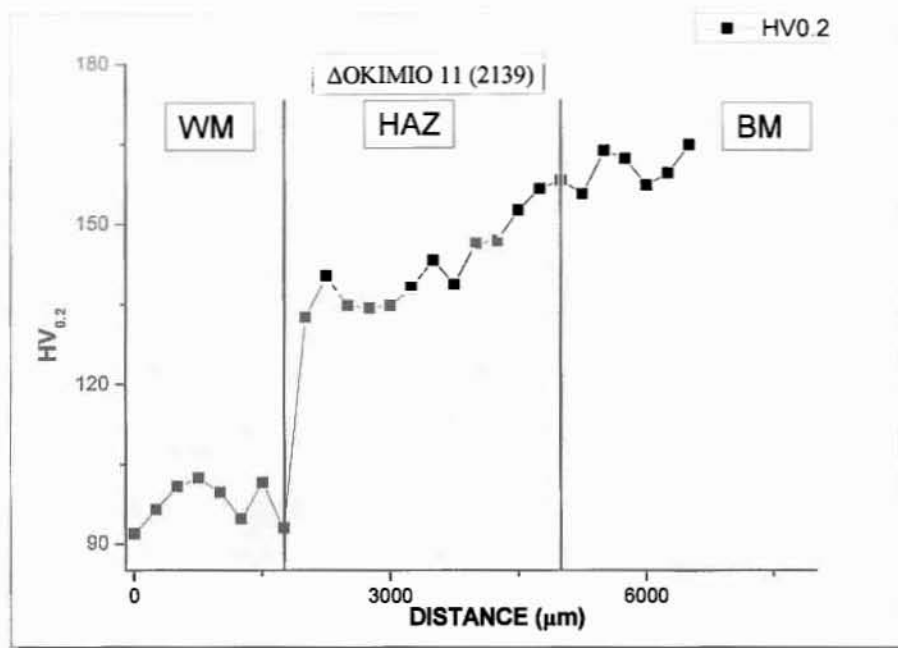
Σχήμα 4.44: Δοκίμιο 10 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)



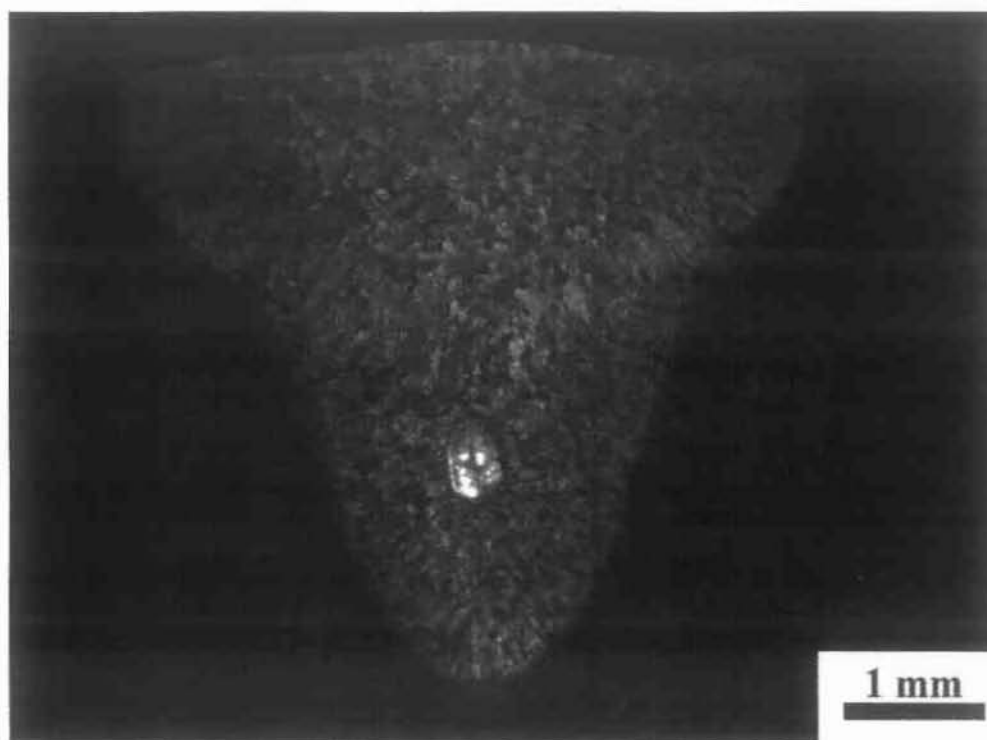
Σχήμα 4.45: Δοκίμιο 10 – Profil Μικροσκληρότητας



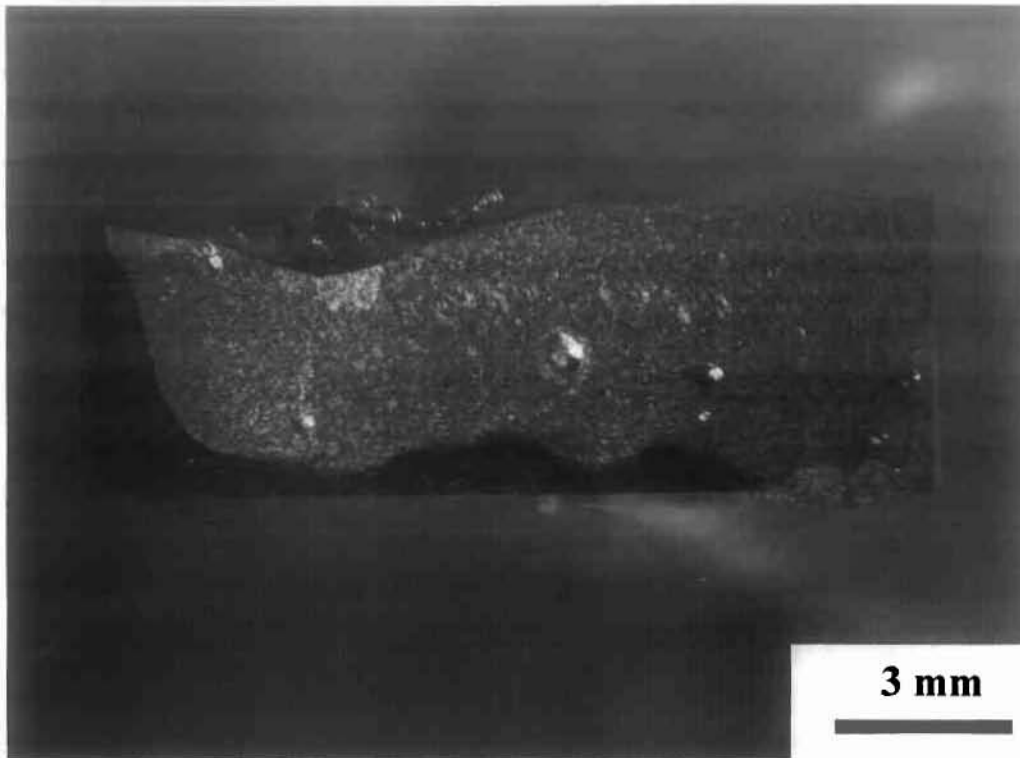
Σχήμα 4.46: Δοκίμιο 11 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3535 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 133 J/mm)



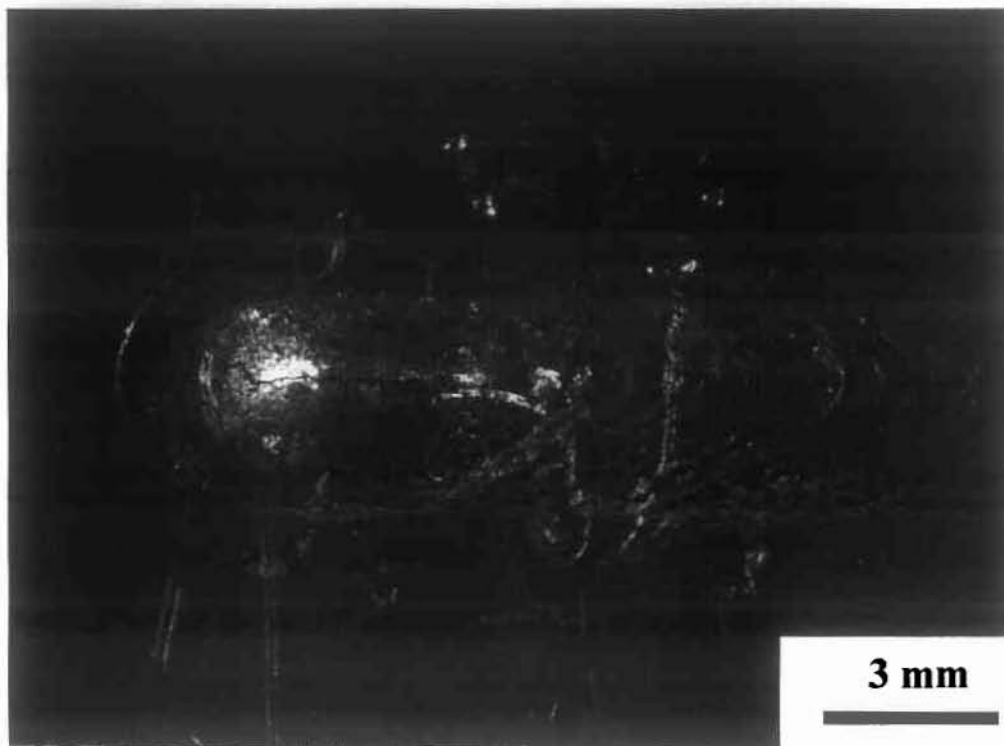
Σχήμα 4.47: Δοκίμιο 11 – Profil Μικροσκληρότητας



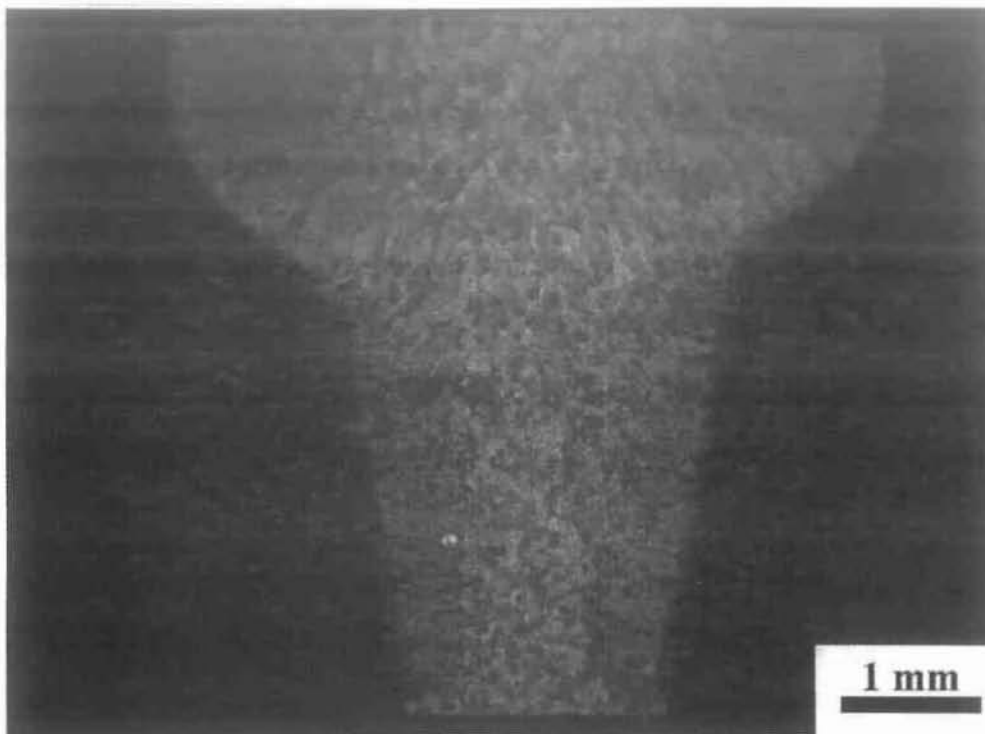
Σχήμα 4.48: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 140 J/mm)



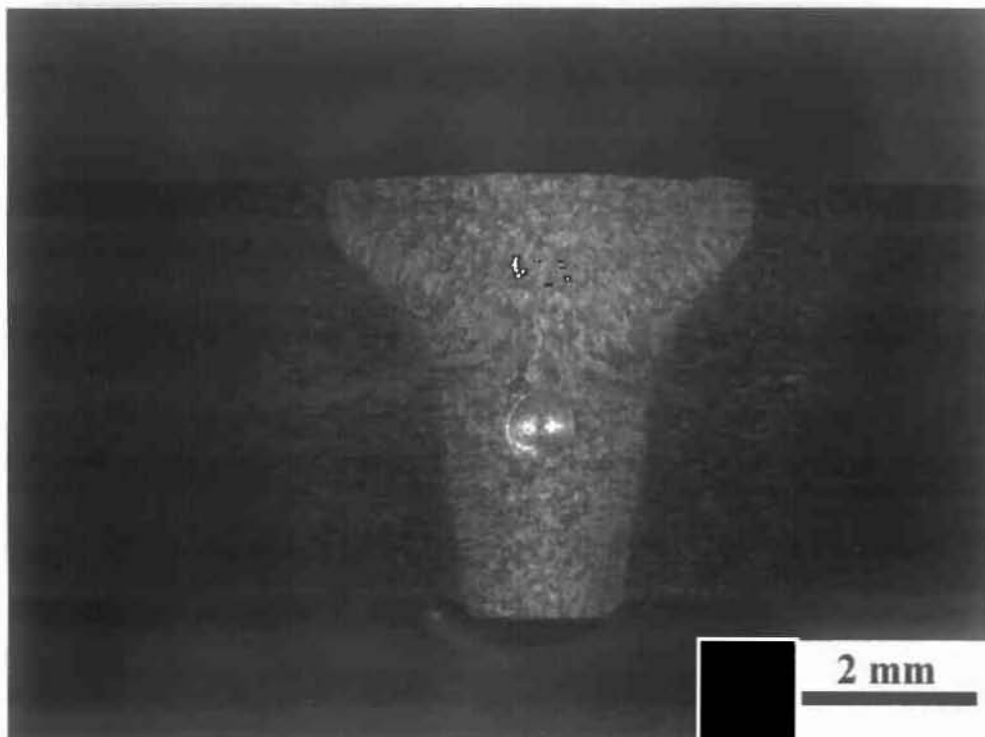
Σχήμα 4.49: Δοκίμιο 12 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



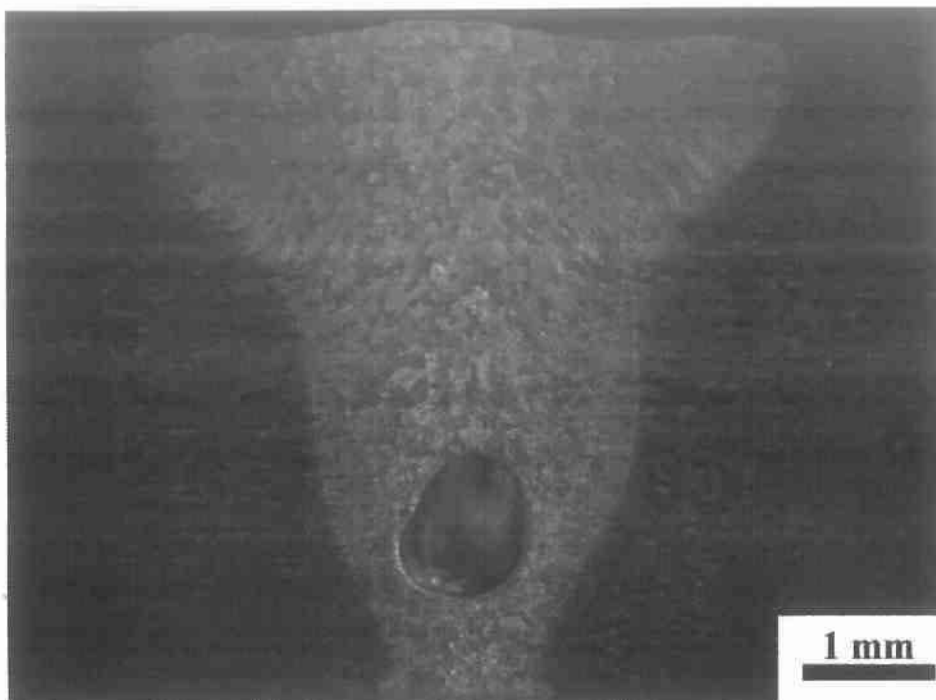
Σχήμα 4.50: Δοκίμιο 12 - Top View



Σχήμα 4.51: Δοκίμιο 13 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3724 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/mm)



Σχήμα 4.52: Δοκίμιο 14 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/mm)



Σχήμα 4.53: Δοκίμιο 15 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3771 W, Ταχύτητα: 1,6 m/min, ΡΠΘ: 141 J/mm)

4.2 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις bead-on-plate (EBW)

Στα Σχήματα 4.54 – 4.74 φαίνεται η μακροδομή των συγκολλήσεων (bead-on-plate) σε εγκάρσιες και διαμήκεις τομές, οι φωτογραφίες των συγκολλήσεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν διαμήκεις τομές (top view) και η μικροσκληρότητα κάποιων δοκιμίων για τα κράματα 2198 και 2139. Αυτά τα δοκίμια έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο EBW (πρώτη πειραματική σειρά).

Στις εγκάρσιες τομές ξεχωρίζουμε τα όρια της λίμνης συγκόλλησης, την θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και το μέταλλο βάσης. Μεταξύ της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ παρατηρείται η ζώνη μερικής τήξης (ZMT). Πλήρης διείσδυση παρατηρείται για όλα τα δοκίμια και των δύο κραμάτων (Σχήματα 4.80 και 4.82).

Το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης εξαρτάται επίσης ισχυρά από τις συνθήκες της συγκόλλησης και παίρνει τιμές από 3.32 έως 4.41mm για το κράμα 2198 και από 4.82 έως 6.18mm για το κράμα 2139 (Σχήματα 4.79 και 4.81).

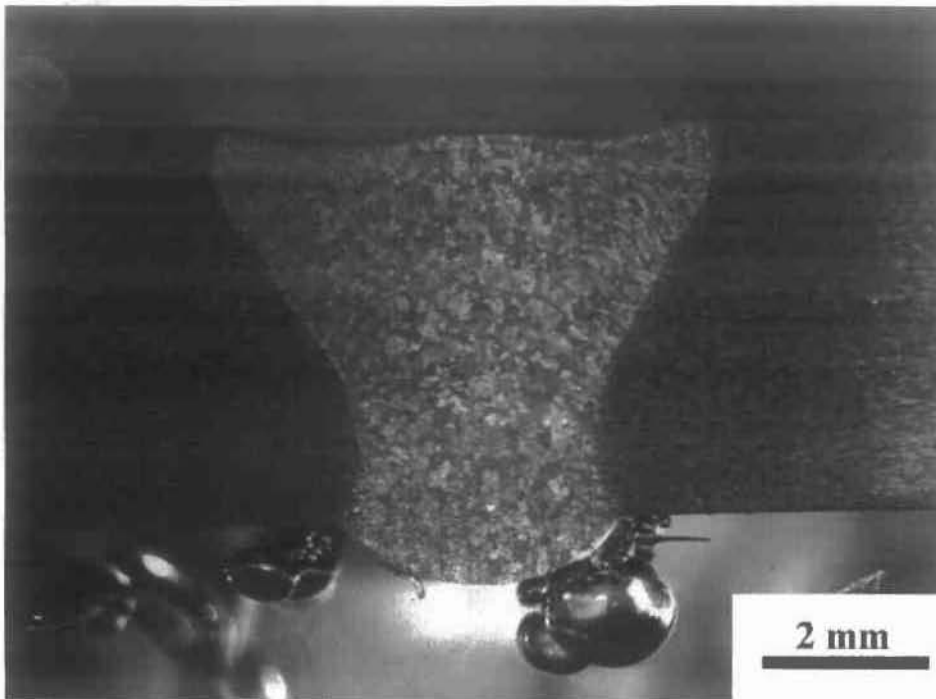
Παρατηρείται επίσης ότι το κράμα 2139 δεν εμφανίζει καθόλου πορώδες ή ρηγματώσεις σε αντίθεση με το κράμα 2198, κυρίως στο Σχήμα 4.66 όπου παρατηρείται μια διαμήκης ρωγμή στο μέταλλο συγκόλλησης.

Η ΘΕΖ είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των δοκιμίων με LBW και δεν ήταν εφικτό προσδιοριστεί ακριβώς το μήκος της εξαιτίας του μικρού μεγέθους των δοκιμίων.

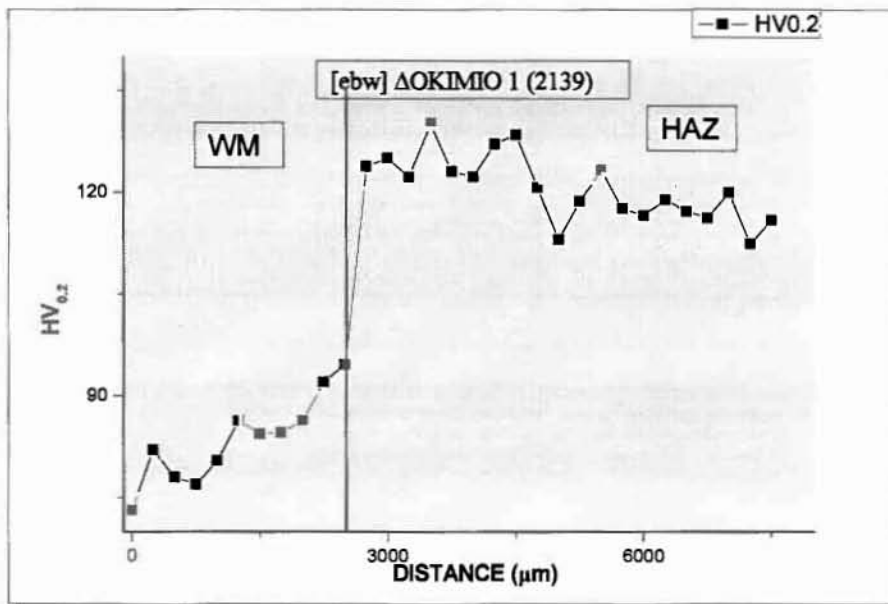
Στη λίμνη συγκόλλησης η μικροσκληρότητα είναι χαμηλή με τιμές από 73-101 HV_{0.2} για το κράμα 2139 και από 59-89 HV_{0.2} για το κράμα 2198.

Οι διαμήκεις τομές και οι φωτογραφίες (top view) πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου σε εργασία προσομοίωσης.

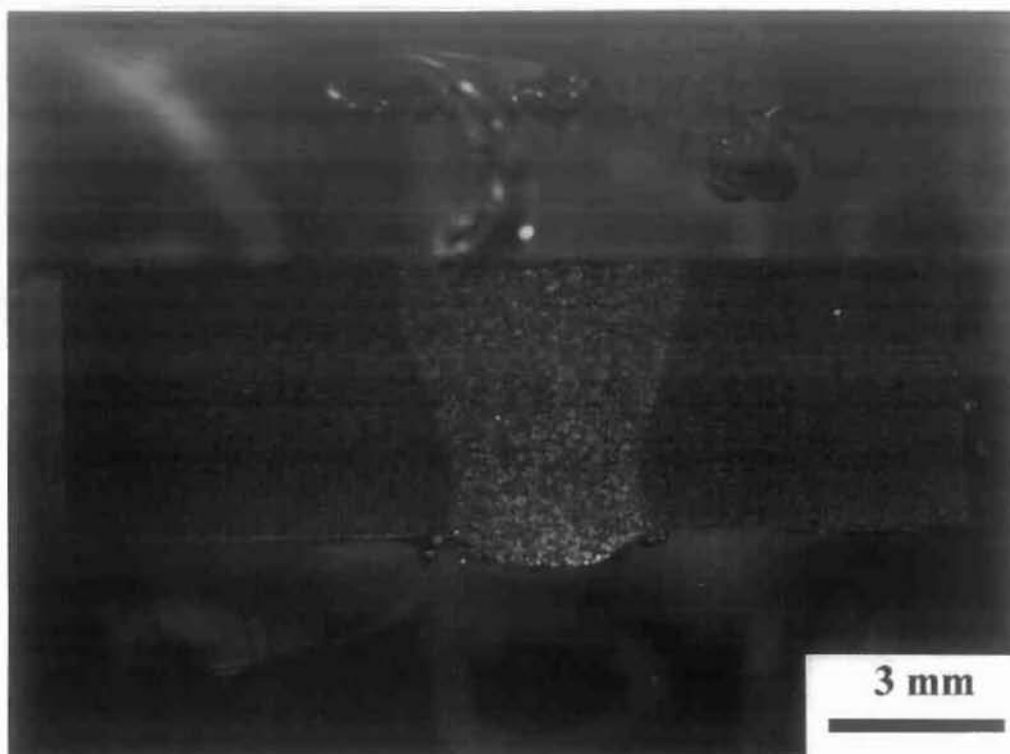
➤ Κράμα Al 2139 (EBW)



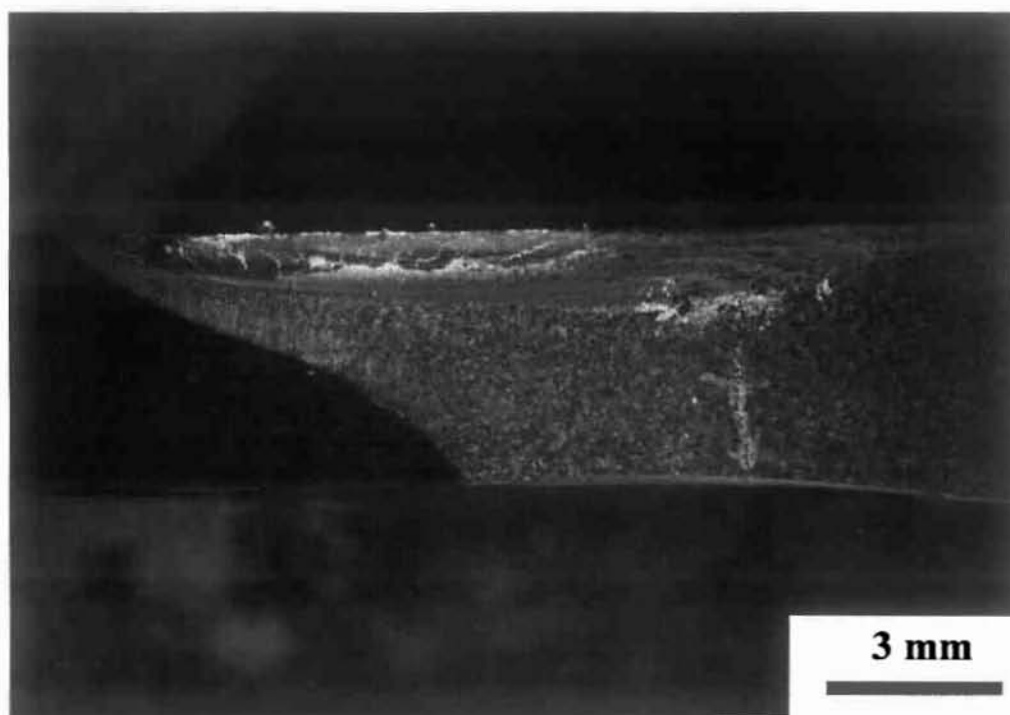
Σχήμα 4.54: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 4200 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 141 J/mm)



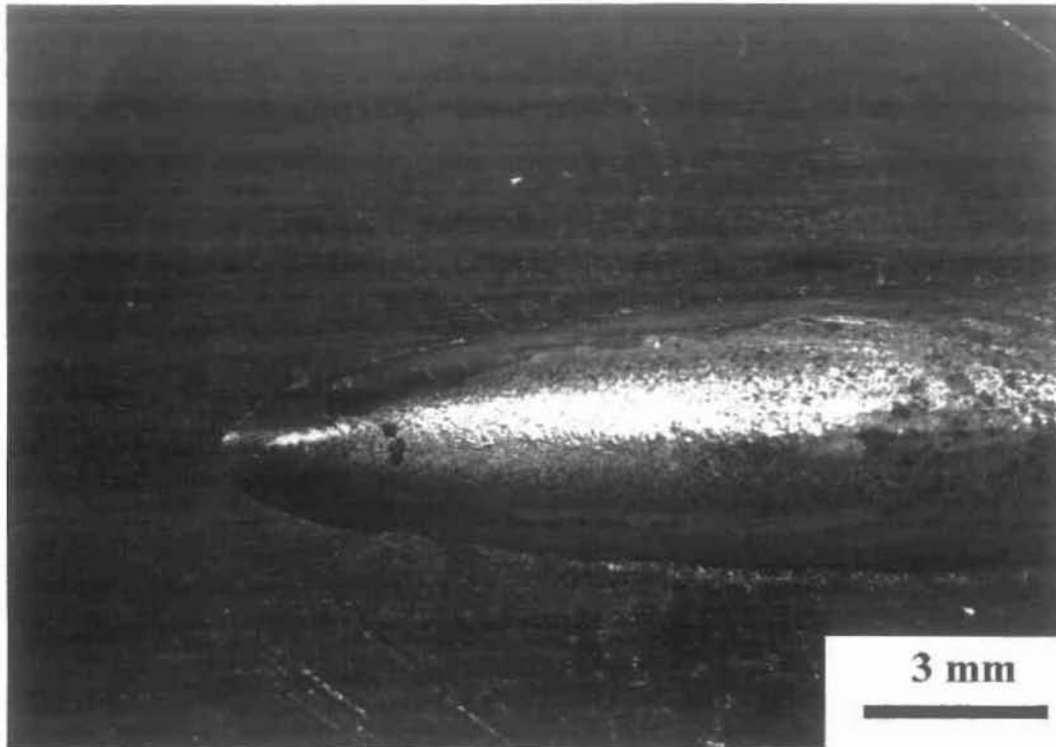
Σχήμα 4.55: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας



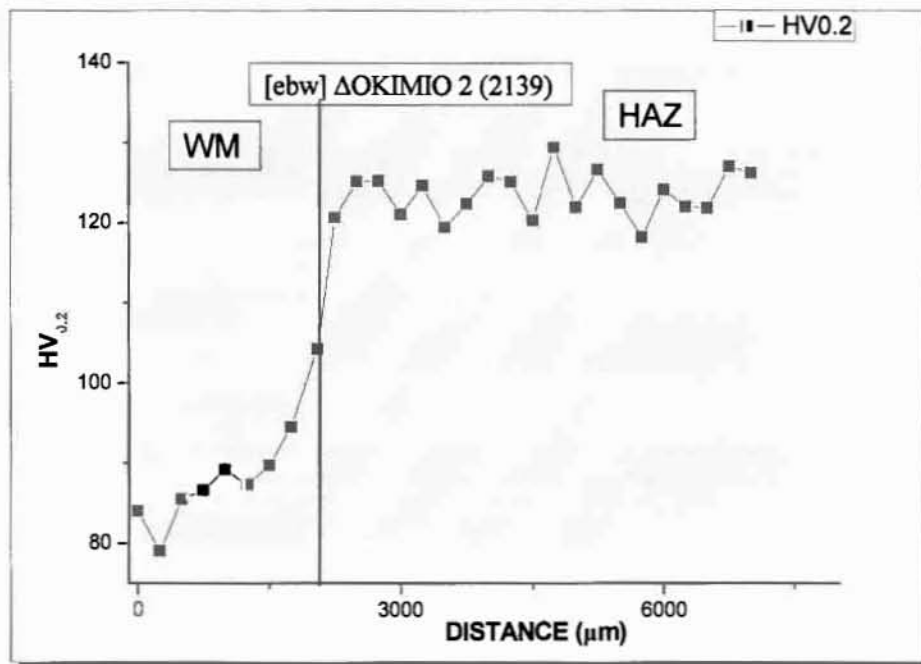
Σχήμα 4.56: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 4000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 135 J/mm)



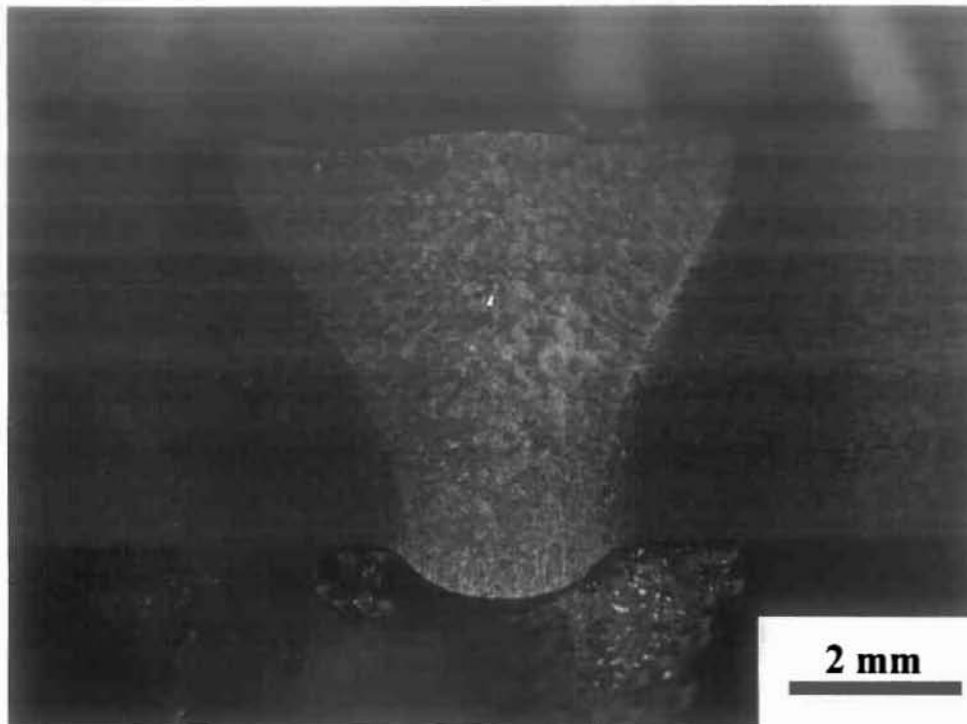
Σχήμα 4.57: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



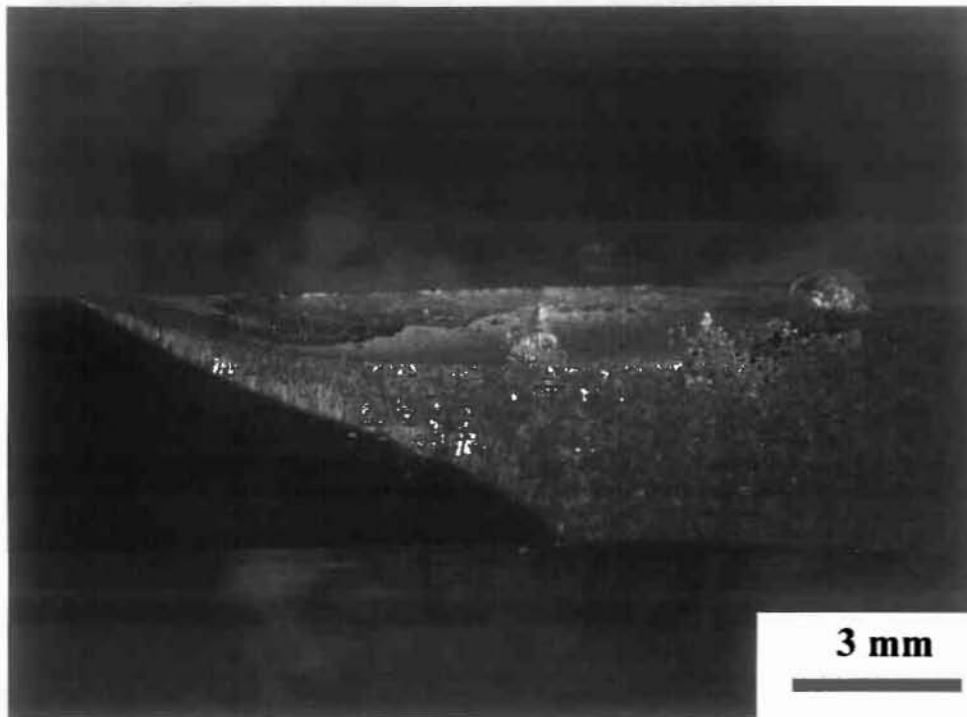
Σχήμα 4.58: Δοκίμιο 2 - Top View



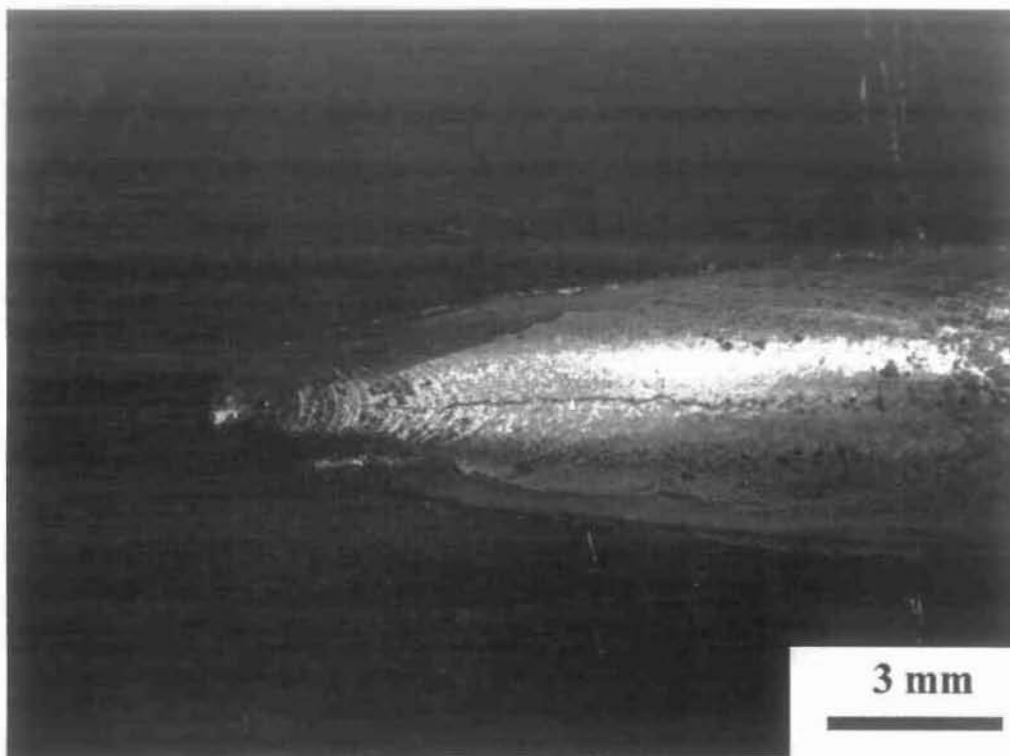
Σχήμα 4.59: Δοκίμιο 2 – Profil Μικροσκληρότητας



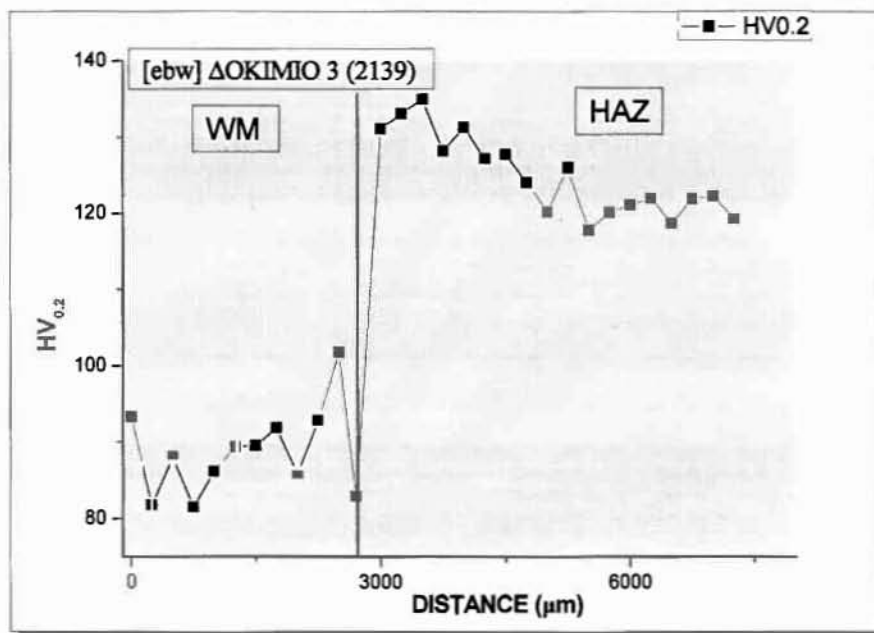
Σχήμα 4.60: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 4000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 135 J/mm)



Σχήμα 4.61: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)

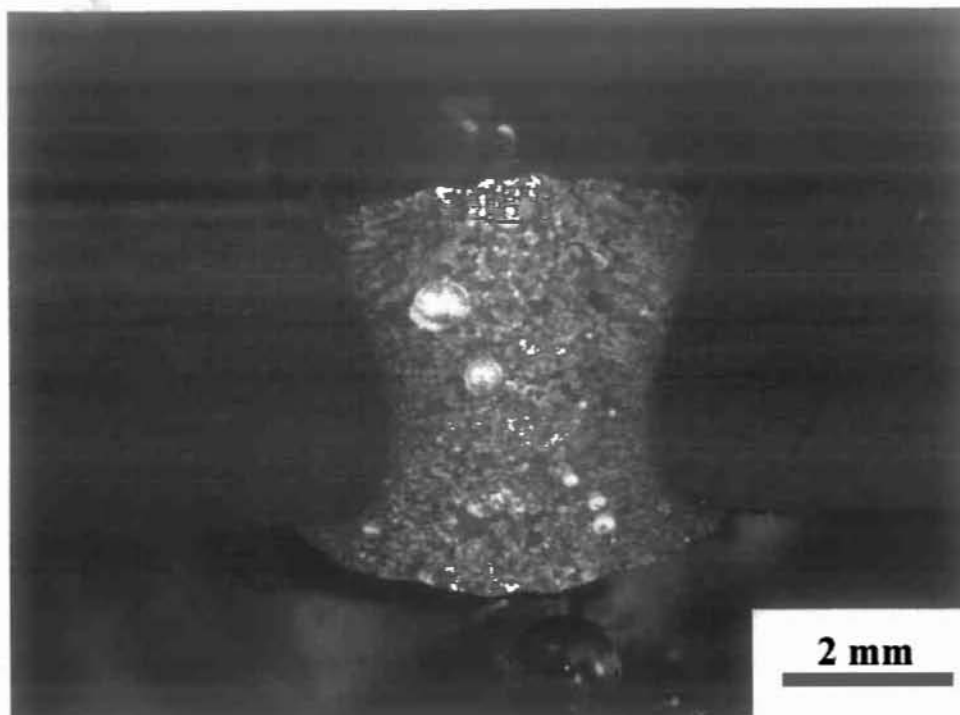


Σχήμα 4.62: Δοκίμιο 3 - Top View

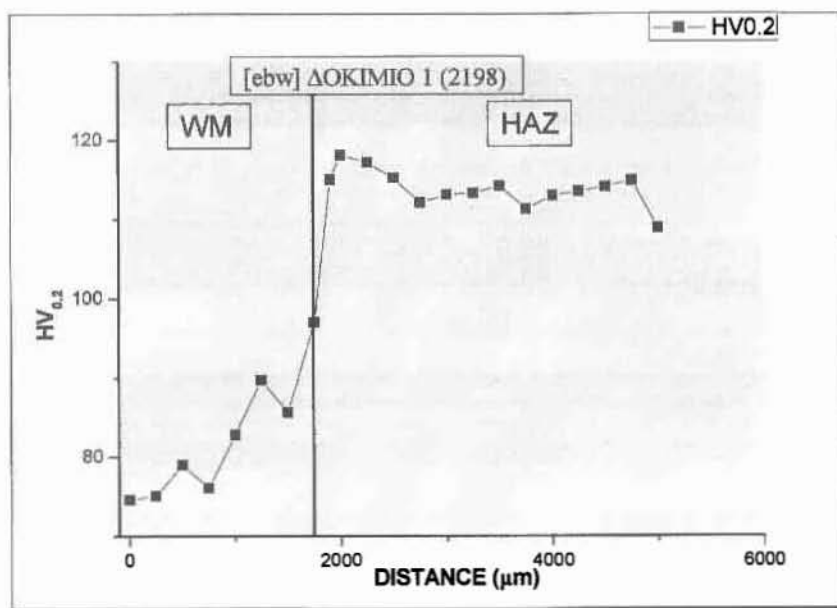


Σχήμα 4.63: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας

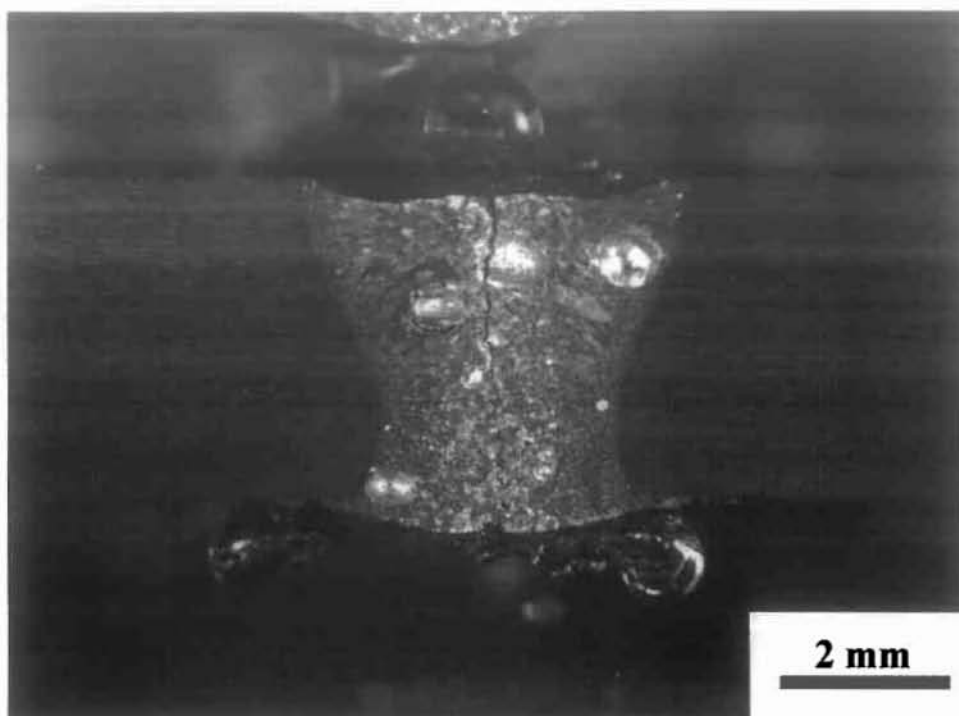
➤ Κράμα Al 2198 (EBW)



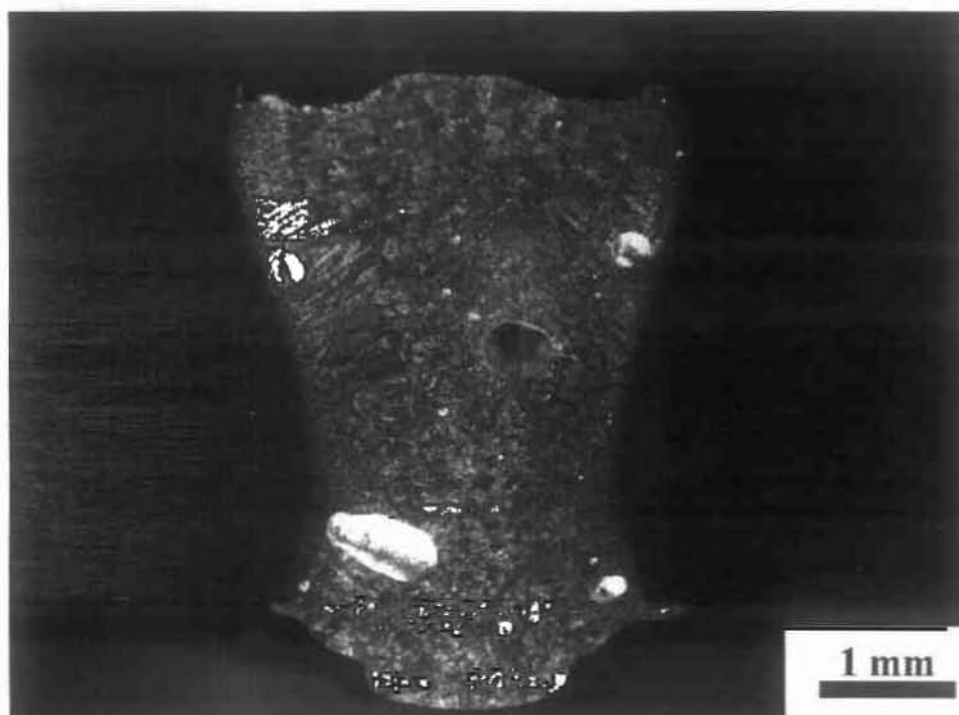
Σχήμα 4.64: Δοκίμιο 1 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3400 W, Ταχύτητα: 1,75 m/min, ΡΠΘ: 117 J/mm)



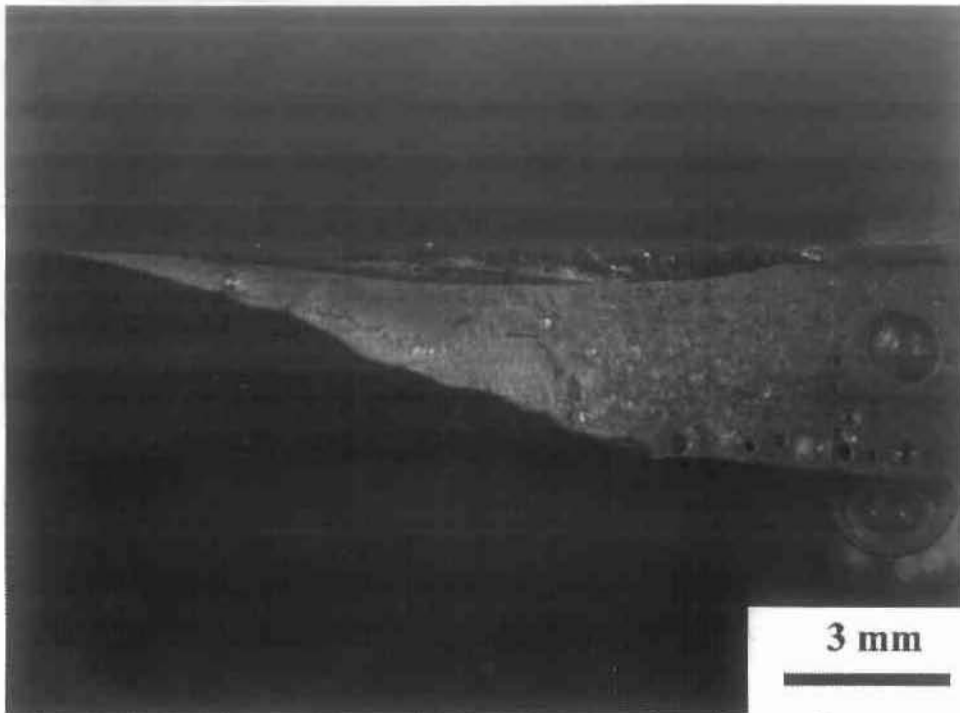
Σχήμα 4.65: Δοκίμιο 1 – Profil Μικροσκληρότητας



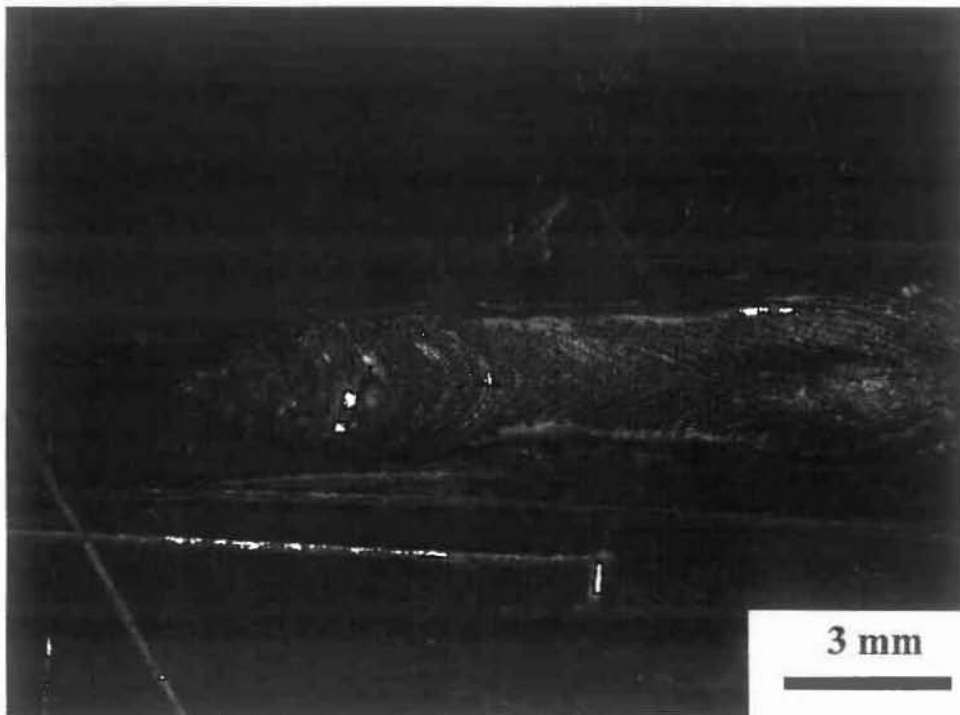
Σχήμα 4.66: Δοκίμιο 2 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3000 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 101 J/mm)



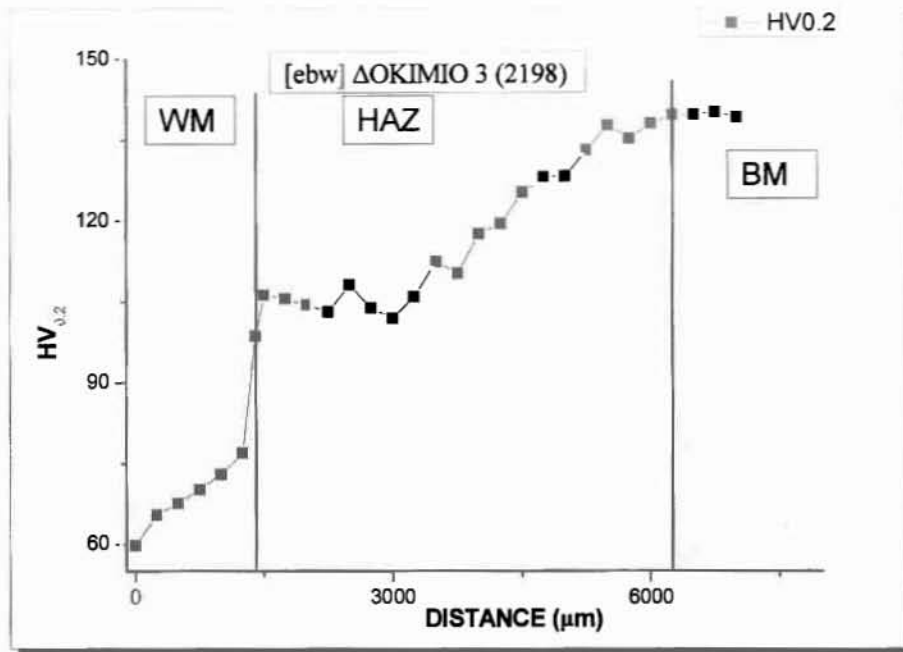
Σχήμα 4.67: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 2600 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 88 J/mm)



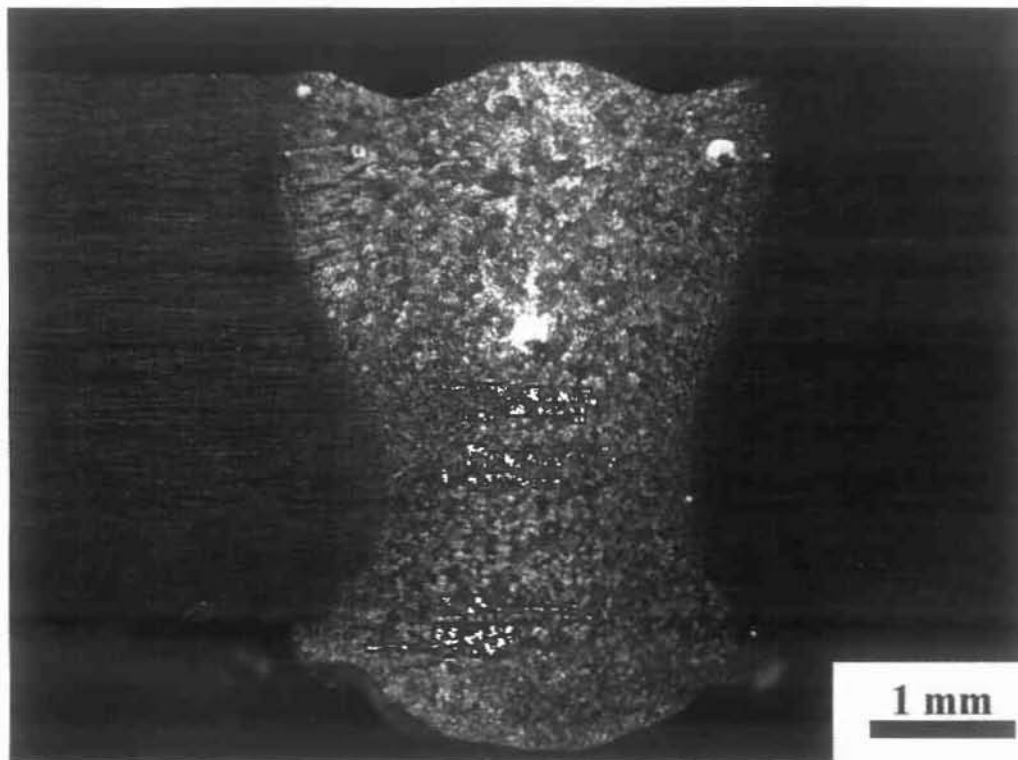
Σχήμα 4.68: Δοκίμιο 3 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



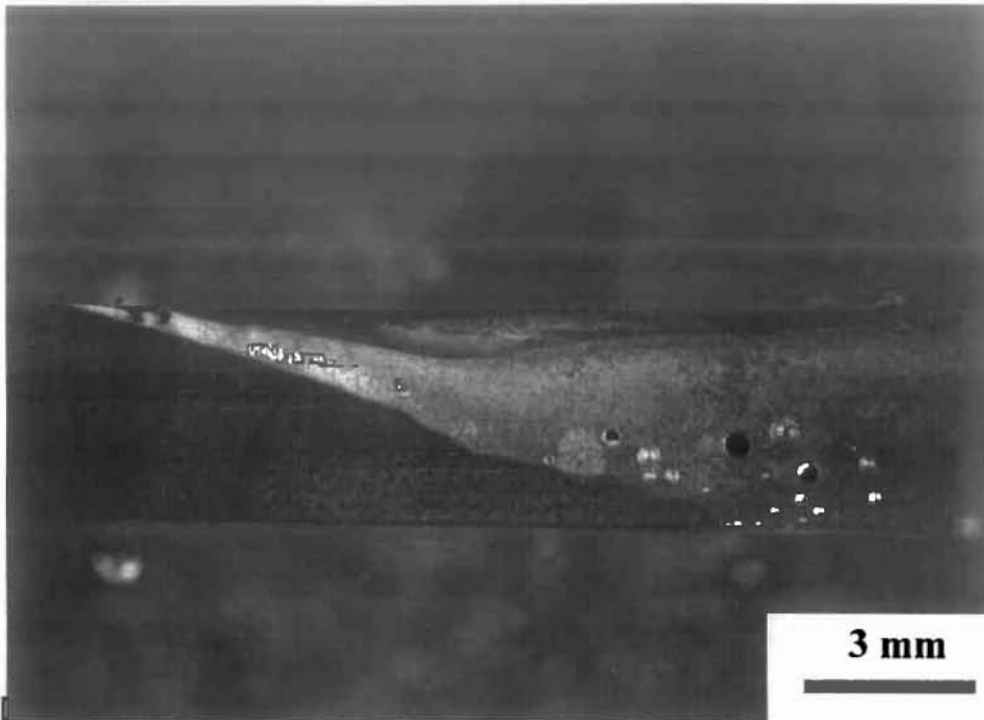
Σχήμα 4.69: Δοκίμιο 3 - Top View



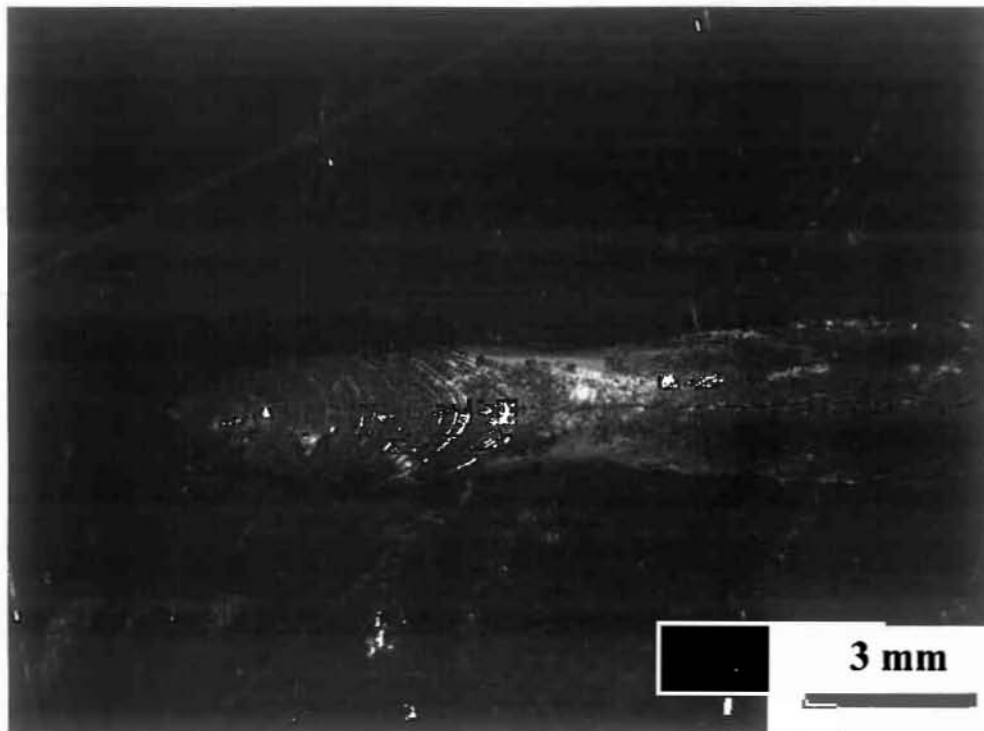
Σχήμα 4.70: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας



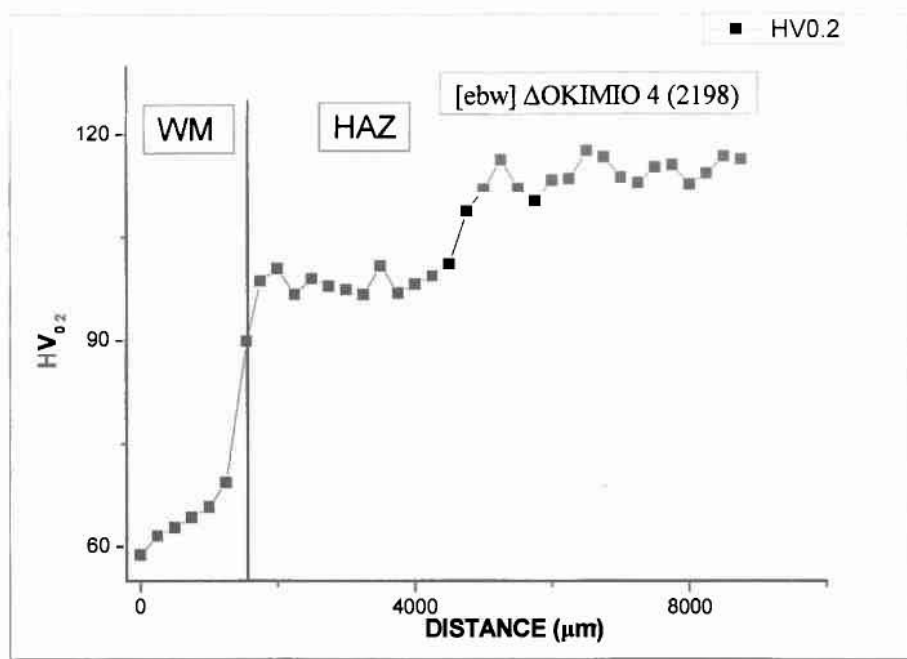
Σχήμα 4.71: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 2200 W, Ταχύτητα: 1,78 m/min, ΡΠΘ: 74 J/mm)



Σχήμα 4.72: Δοκίμιο 4 - Μακροδομή συγκόλλησης (Διαμήκης τομή)



Σχήμα 4.73: Δοκίμιο 4 - Top View



Σχήμα 4.74: Δοκίμιο 3 – Profil Μικροσκληρότητας

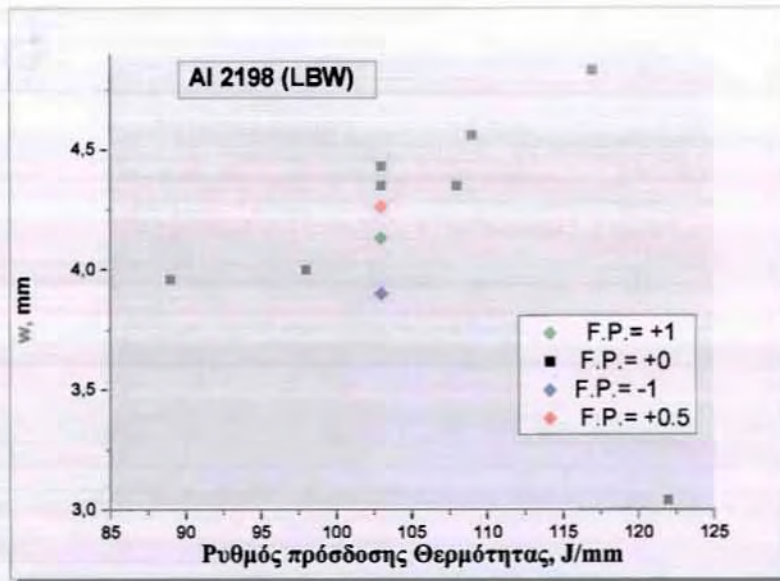
Στα κράματα αυτά, όπως και σε άλλα υλικά, η απόδοση, οι ιδιότητες, η κατεργασία και η δομή αλληλεξαρτώνται. Έτσι μια οποιαδήποτε επέμβαση στην κατεργασία τους - όπως στην περίπτωση της συγκόλλησης- μπορεί να επιφέρει μεταβολές στη δομή και κατά συνέπεια στις ιδιότητες. Κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας της γήρανσης σχηματίζονται κατακρημνίσεις σωματιδίων οι οποίες ευρίσκονται σε πολύ λεπτή διασπορά μέσα στη μήτρα του κράματος, έχουν μέγεθος μερικά νανόμετρα, και προσδίδουν στο κράμα ιδιαίτερα υψηλή αντοχή. Κατά τη συγκόλληση και λόγω του θερμικού πεδίου που επιβάλλεται στο υλικό η ισορροπία της λεπτομερούς διασποράς των κατακρημνίσεων στη μήτρα του κράματος του αλουμινίου διαταράσσεται, λόγω των φαινομένων της διαλυτοποίησης (dissolution), της διεύρυνσης (coarsening), ή και της επανακατακρημνίσης (re-precipitation) των σωματιδίων ισχυροποίησης (precipitates). Στην ουσία δημιουργείται τόσο στη λίμνη συγκόλλησης όσο και στη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη μια νέα κατάσταση μικροδομής η οποία προσδίδει στο κράμα διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες απ' αυτές που είχε αποκτήσει μετά την αρχική θερμική κατεργασία. Η μείωση της μικροσκληρότητας που παρατηρείται οφείλεται στα φαινόμενα της διαλυτοποίησης και της διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης λόγω της επαγωγής θερμικού φορτίου κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης[16].

4.3 Χαρακτηριστικά συγκόλλησης ως προς το ΡΠΘ

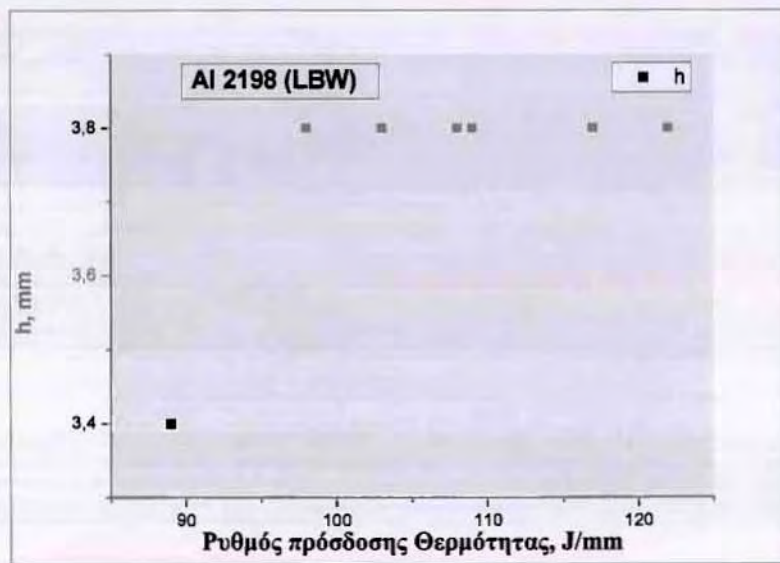
Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται για κάθε ένα από τα δοκίμια που παρουσιάστηκαν το πλάτος (w) και το βάθος (h) της λίμνης συγκόλλησης σε αντιστοιχία με το ρυθμό πρόσδεσης θερμότητας (Ρ.Π.Θ.).

Πίνακας 4.1: Συσχέτιση του Ρ.Π.Θ. με το πλάτος και βάθος της λίμνης συγκόλλησης

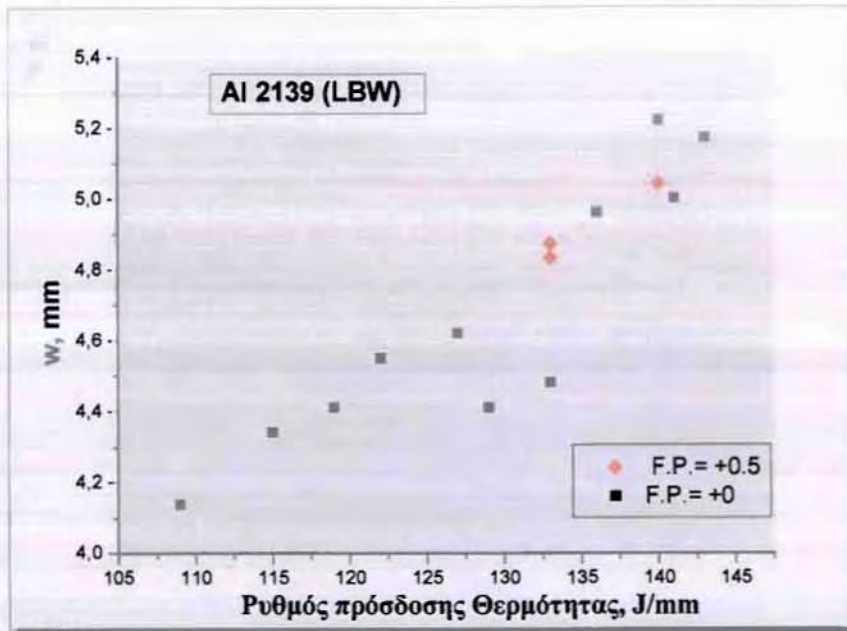
2198 (LBW)			
ΔΟΚΙΜΙΟ	W(mm)	h(mm)	Ρ.Π.Θ (J/mm)
1	4,35	3,8 (πλήρης)	103
2	3,96	3,4	89
3	4,83	3,8 (πλήρης)	117
4	4	3,8 (πλήρης)	98
5	4,43	3,8 (πλήρης)	103
6	4,56	3,8 (πλήρης)	109
7	4,13	3,8 (πλήρης)	103
8	3,9	3,8 (πλήρης)	103
9	4,26	3,8 (πλήρης)	103
10	4,43	3,8 (πλήρης)	103
11	4,35	3,8 (πλήρης)	108
12	3,04	3,8 (πλήρης)	122
2139 (LBW)			
1	4,14	3,72	109
2	4,34	4,07	115
3	4,96	4,48	136
4	5,17	4,5 (πλήρης)	143
5	4,62	4,5 (πλήρης)	127
6	4,55	4,5 (πλήρης)	122
7	4,41	4,41	119
8	4,41	4,5 (πλήρης)	129
9	4,48	4,5 (πλήρης)	133
10	4,83	4,5 (πλήρης)	133
11	4,87	4,4	133
12	5,04	4,35	140
13	5,22	4,5 (πλήρης)	40
14	5,17	4,5 (πλήρης)	143
15	5	4,5 (πλήρης)	141
2198 (EBW)			
ΔΟΚΙΜΙΟ	W(mm)	h(mm)	
1	4,41	3,8 (πλήρης)	117
2	4,29	3,8 (πλήρης)	101
3	3,4	3,8 (πλήρης)	88
4	3,32	3,8 (πλήρης)	74
2139 (EBW)			
ΔΟΚΙΜΙΟ	W(mm)	h(mm)	
1	6,18	4,5 (πλήρης)	141
2	4,82	4,5 (πλήρης)	135
3	5,79	4,5 (πλήρης)	135



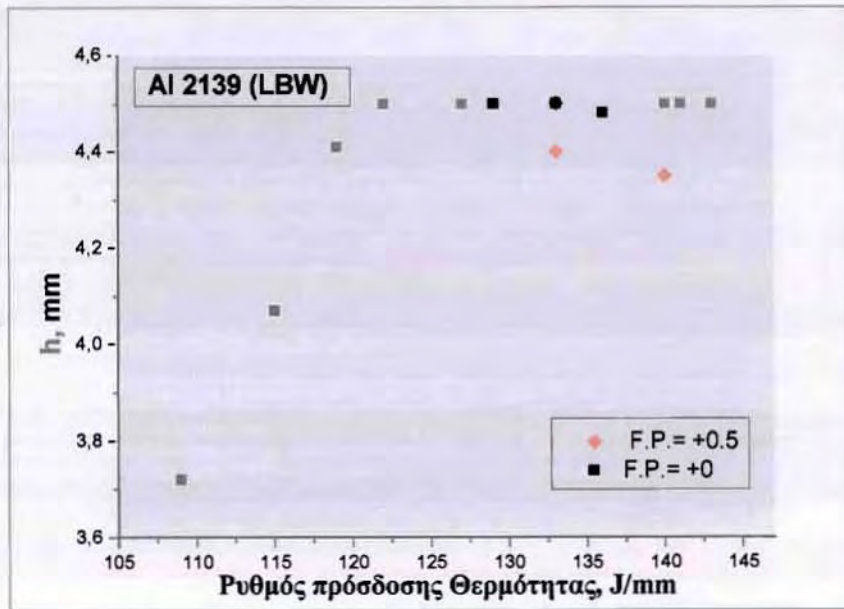
Σχήμα 4.75: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης



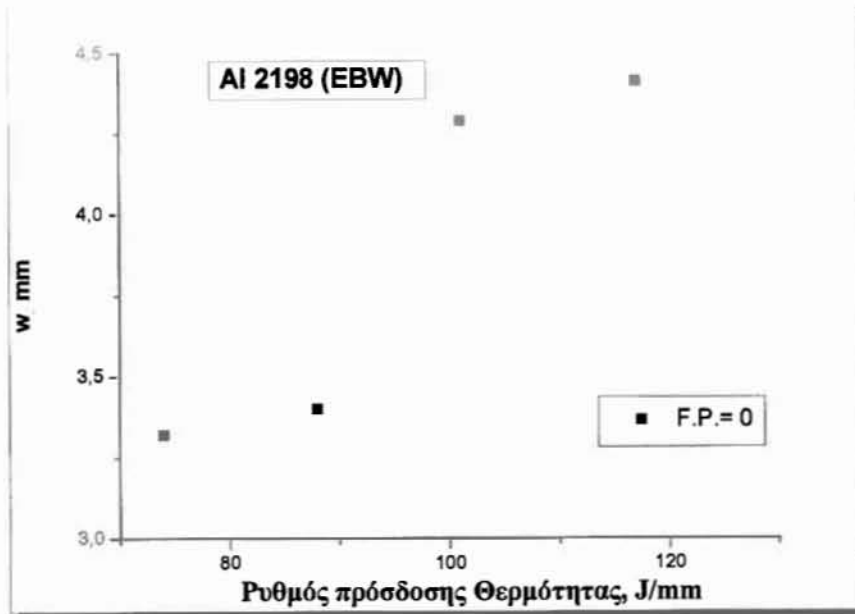
Σχήμα 4.76: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



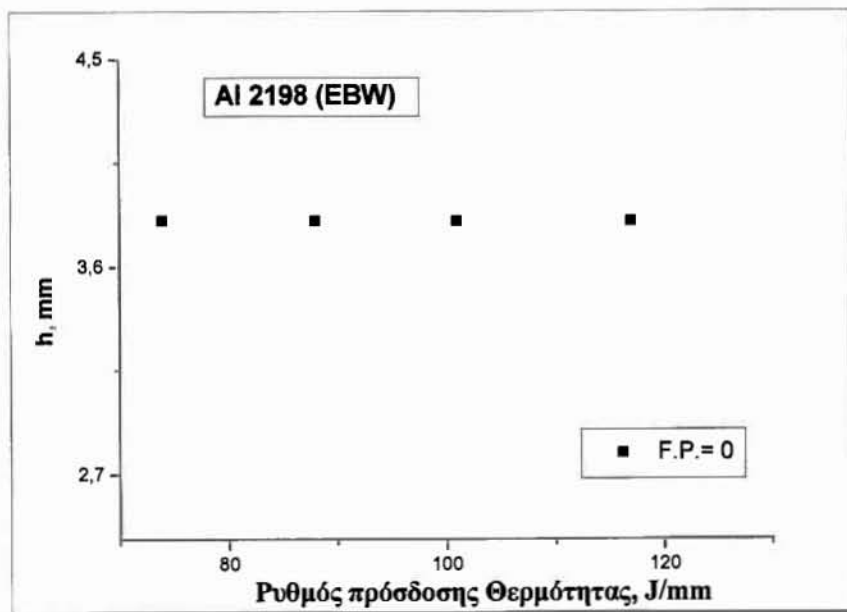
Σχήμα 4.77: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης



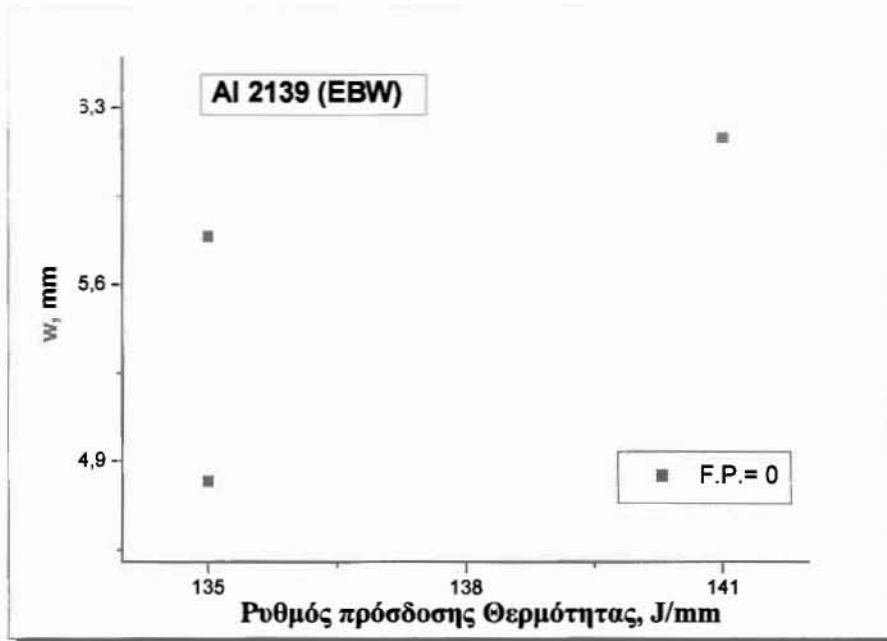
Σχήμα 4.78: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ. και το σημείο εστίασης



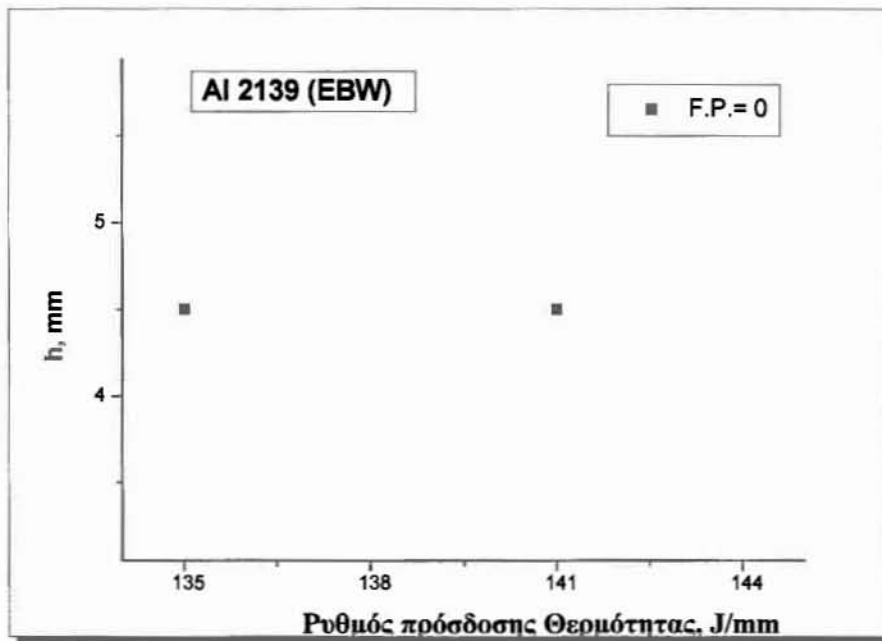
Σχήμα 4.79: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



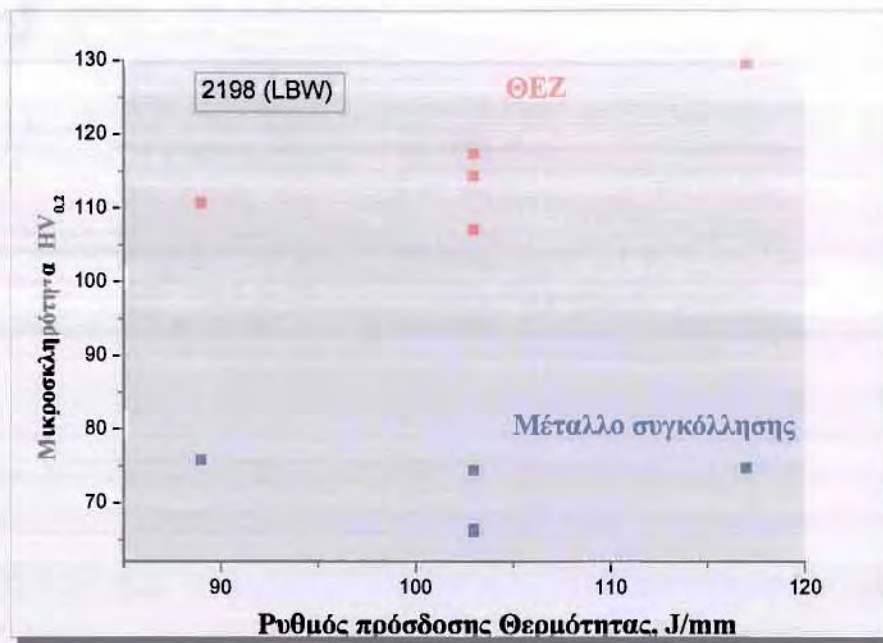
Σχήμα 4.80: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



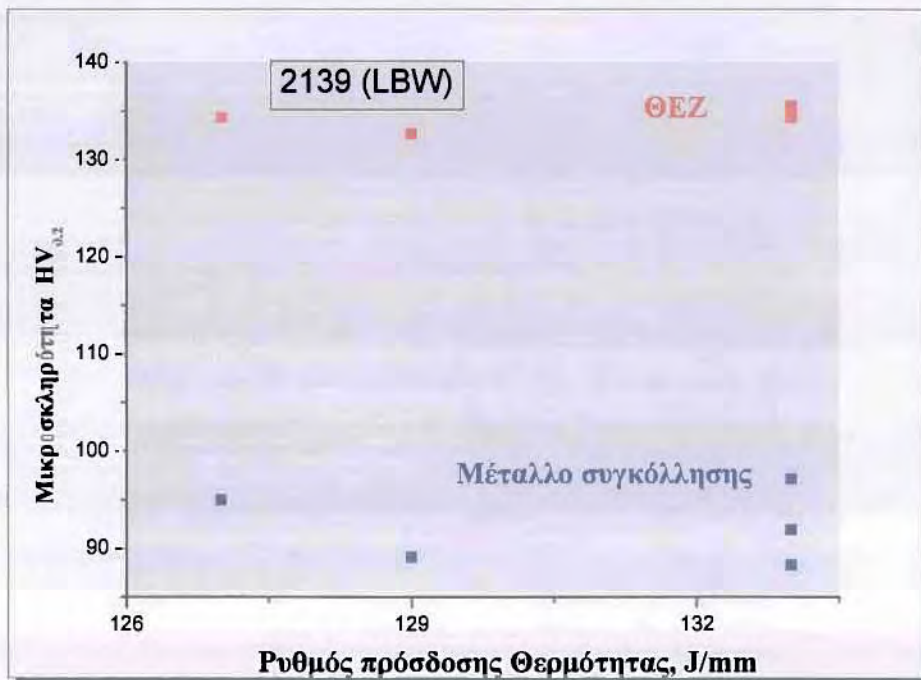
Σχήμα 4.81: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



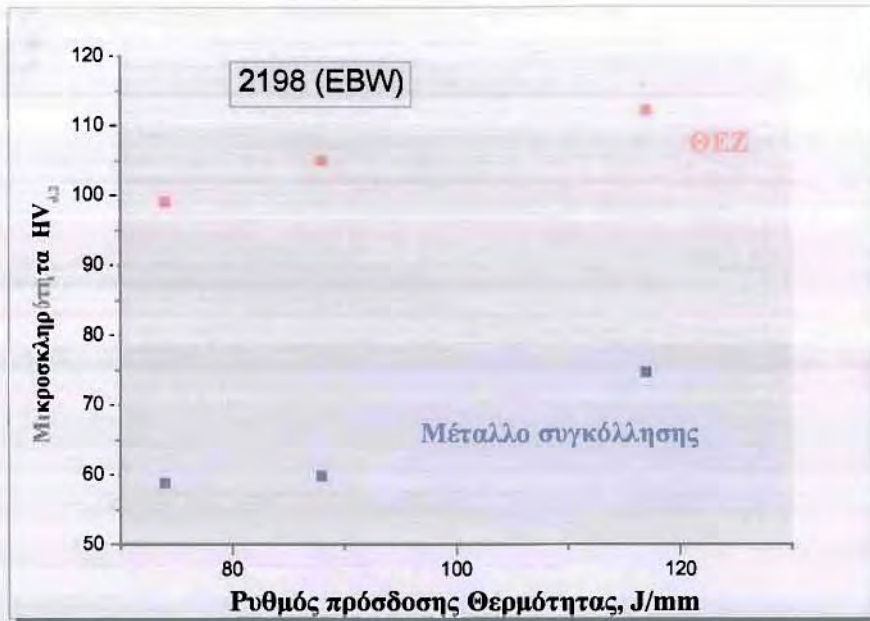
Σχήμα 4.82: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή του βάθους της λίμνης συγκόλλησης σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



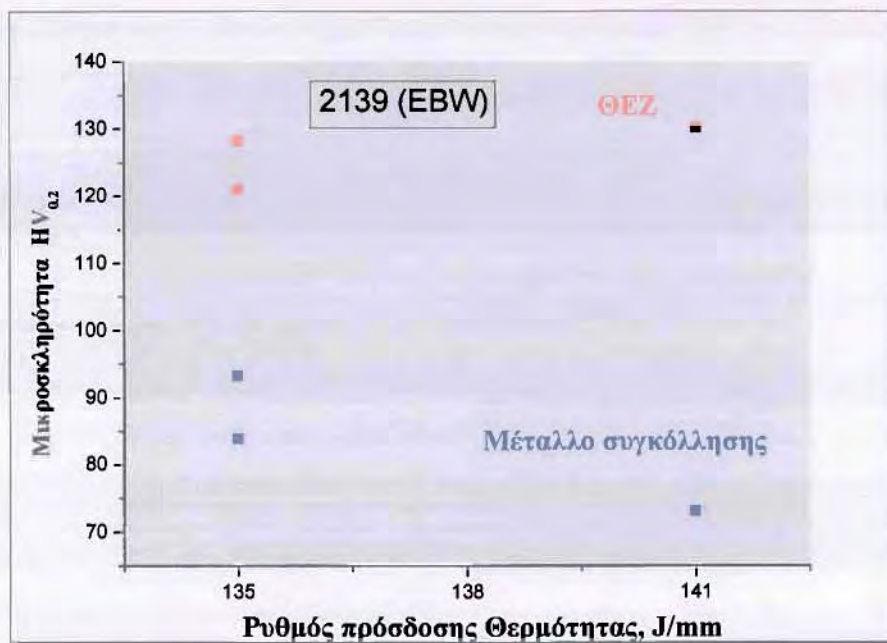
Σχήμα 4.83: Κράμα Al 2198 (LBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



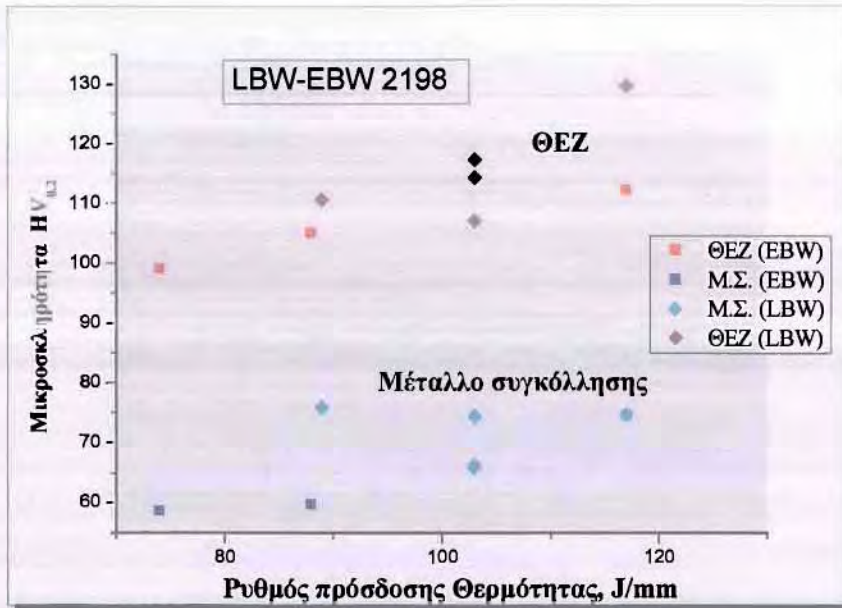
Σχήμα 4.84: Κράμα Al 2139 (LBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



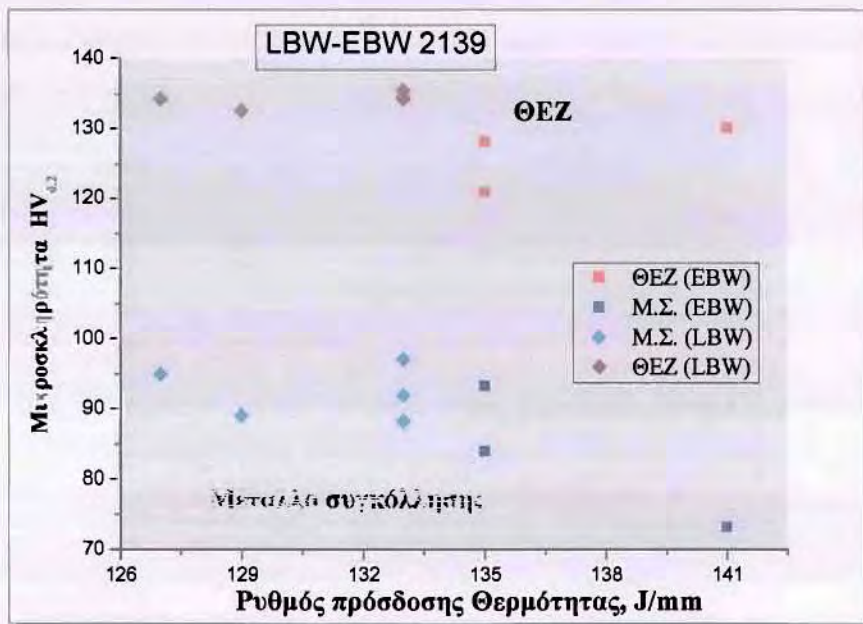
Σχήμα 4.85: Κράμα Al 2198 (EBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



Σχήμα 4.86: Κράμα Al 2139 (EBW) - Μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με τον Ρ.Π.Θ.



Σχήμα 4.87: Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης LBW – EBW



Σχήμα 4.88: Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης LBW – EBW, ως προς το ΡΠΘ, και τη μικροσκληρότητα

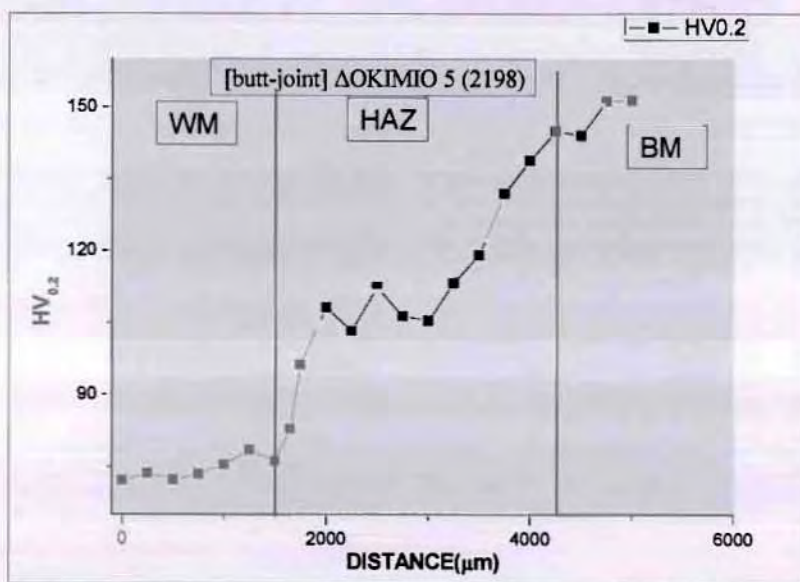
Στα Σχήματα 4.87 και 4.88 φαίνεται ότι για παρόμοιους ρυθμούς πρόσδοσης θερμότητας τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο LBW παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από αυτά που έχουν συγκολληθεί με τη μέθοδο EBW.

4.4 Μακροδομή – Μικροσκληρότητα σε συγκολλήσεις συμβολής (LBW)

Πραγματοποιήθηκε επίσης μεταλλογραφικός έλεγχος σε συγκολλήσεις συμβολής για την αποκάλυψη της μακροδομής των συγκολλήσεων (LBW). Στα Σχήματα 4.89 και 4.91 φαίνεται η μακροδομή και των δυο κραμάτων ΑΙ της πρώτης πειραματικής σειράς και στα σχήματα 4.93 και 4.94 του κράματος ΑΙ 2139 της δεύτερης πειραματικής σειράς.



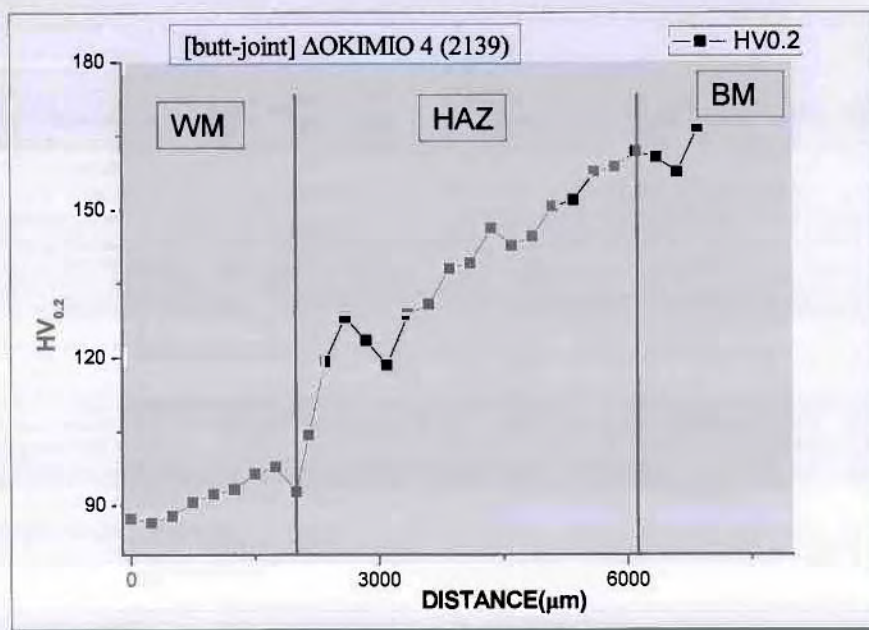
Σχήμα 4.89: Δοκίμιο 5 (2198) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 3064 W, Ταχύτητα: 2 m/min, ΡΠΘ: 92 J/mm)



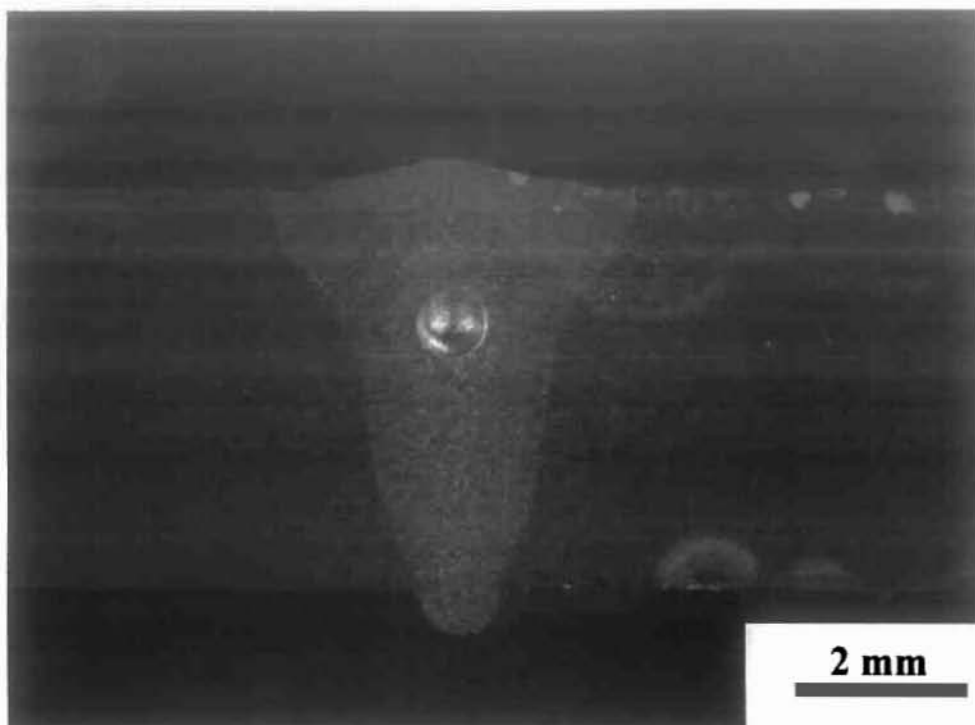
Σχήμα 4.90: Δοκίμιο 5 – Profil Μικροσκληρότητας



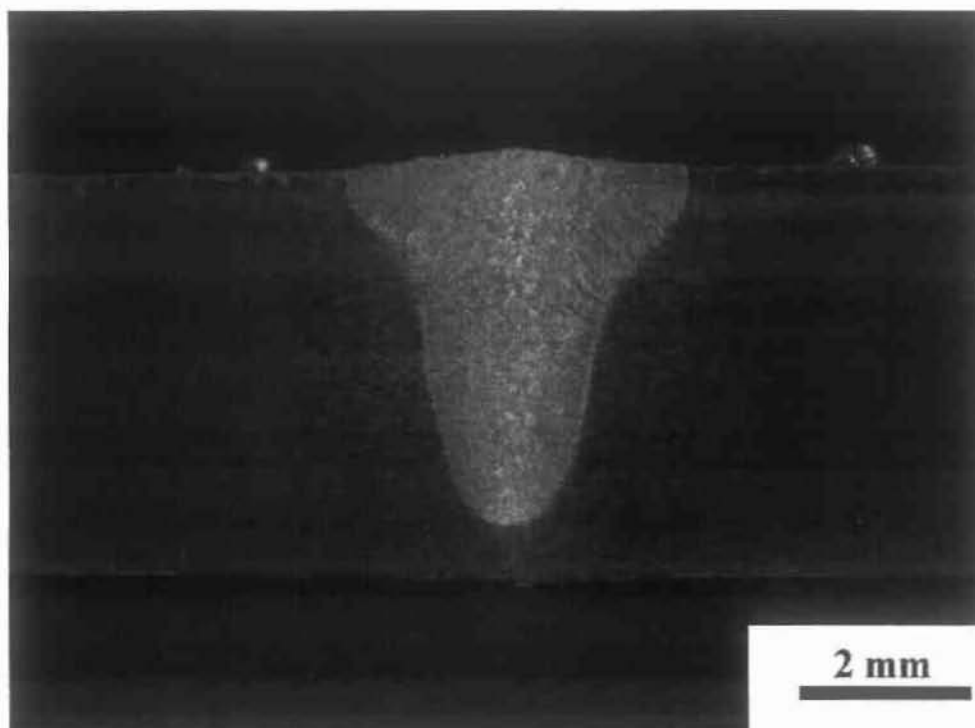
Σχήμα 4.91: Δοκίμιο 4 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
 (Ισχύς: 3818 W, Ταχύτητα: 1.6 m/min, ΡΠΘ: 143 J/mm)



Σχήμα 4.92: Δοκίμιο 4 – Profil Μικροσκληρότητας



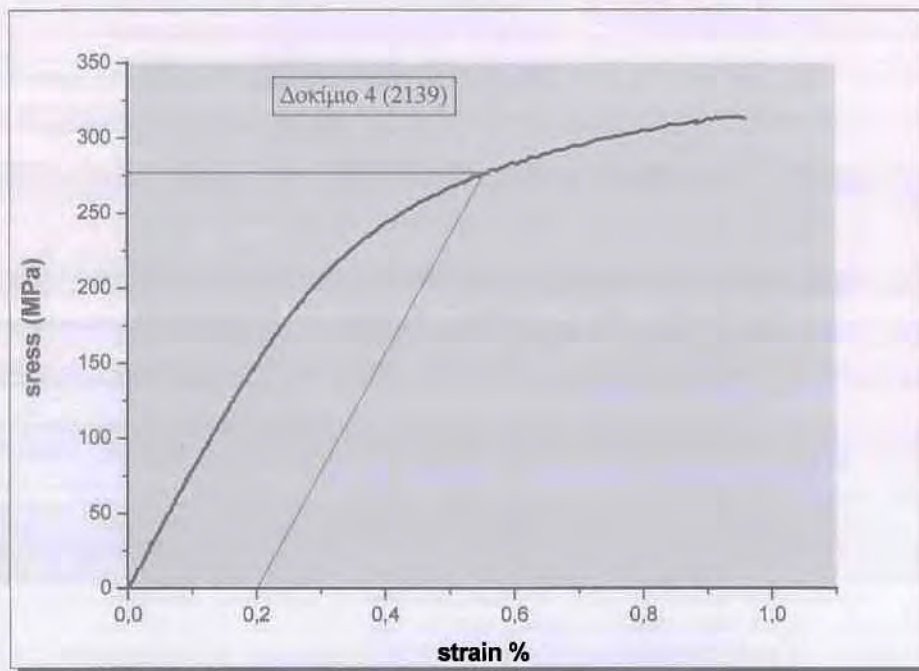
Σχήμα 4.93: Δοκίμιο 13 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 4670 W, Ταχύτητα: 2.9 m/min, ΡΠΘ: 70 J/mm)



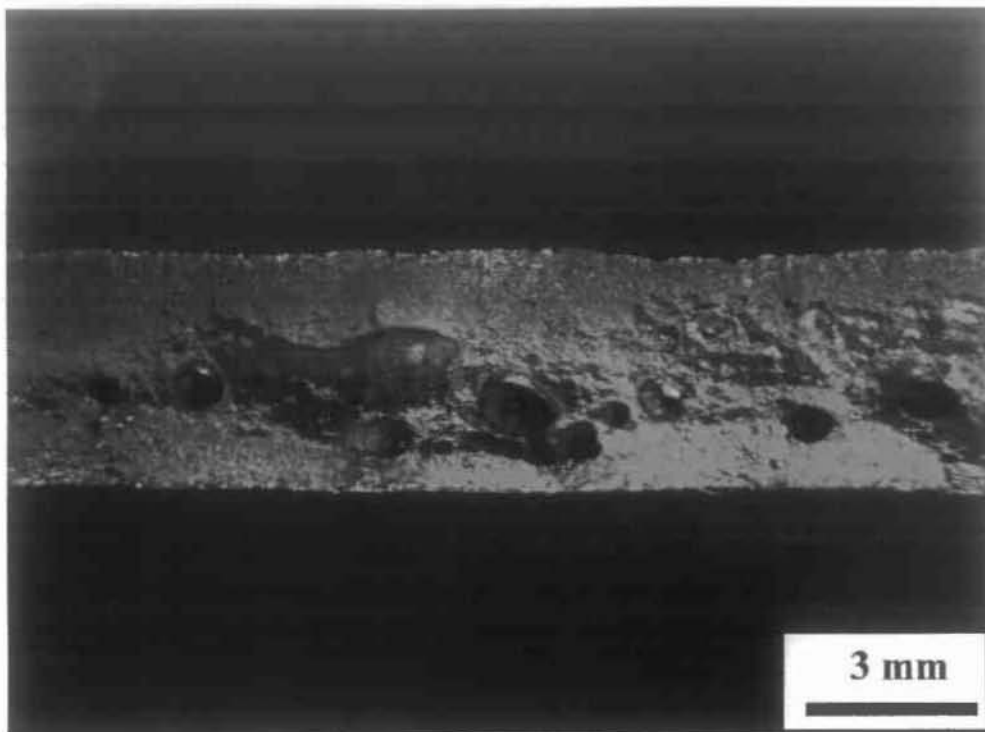
Σχήμα 4.94: Δοκίμιο 15 (2139) - Μακροδομή συγκόλλησης (Εγκάρσια τομή)
(Ισχύς: 4670 W, Ταχύτητα: 3.2 m/min, ΡΠΘ: 93 J/mm)

4.5 Δοκιμές εφελκυσμού σε συγκολλήσεις συμβολής (LBW)

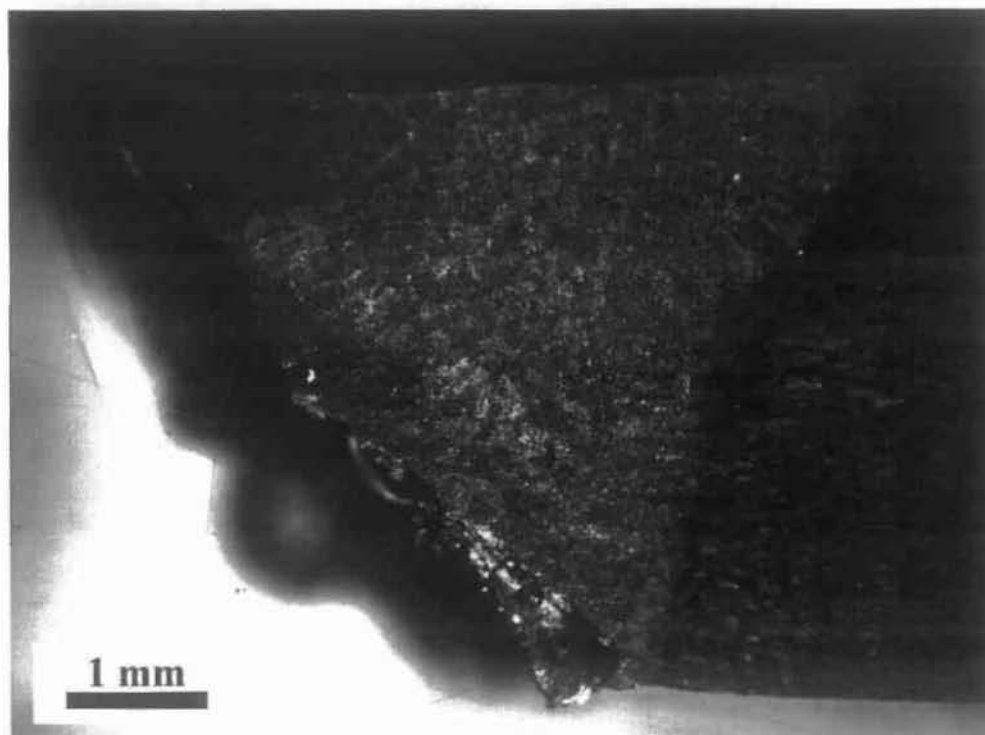
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων, δηλαδή του ορίου διαρροής ($R_{p0.2}$), του ορίου θραύσης (UTS) και της επιμήκυνσης (A%). Στα Σχήματα 4.95 και 4.98 απεικονίζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης σε συγκολλήσεις συμβολής της πρώτης πειραματικής σειράς ενώ στα Σχήματα 4.100 και 4.102 απεικονίζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης σε συγκολλήσεις συμβολής της δεύτερης πειραματικής σειράς. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμών εφελκυσμού.



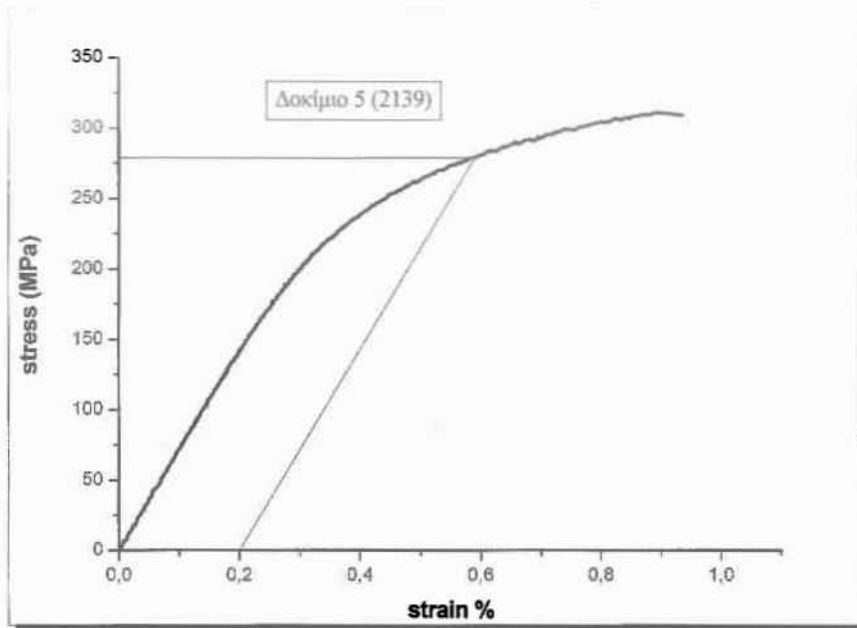
Σχήμα 4.95: Δοκίμιο 4 (2139) – Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης



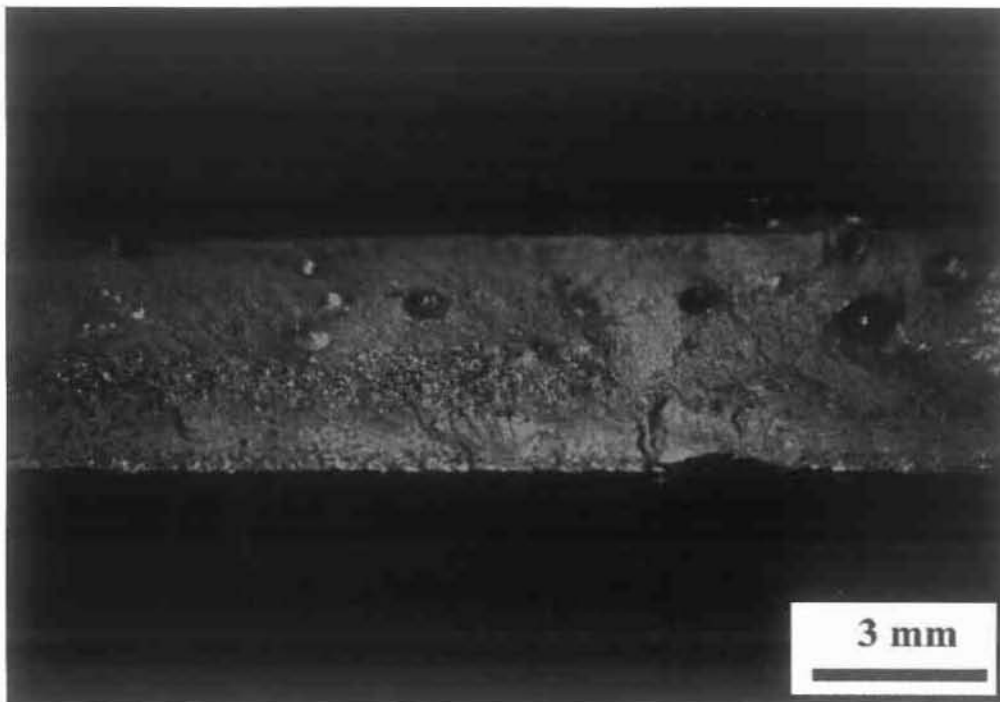
Σχήμα 4.96: Δοκίμιο 4 (2139) – Επιφάνεια θραύσης



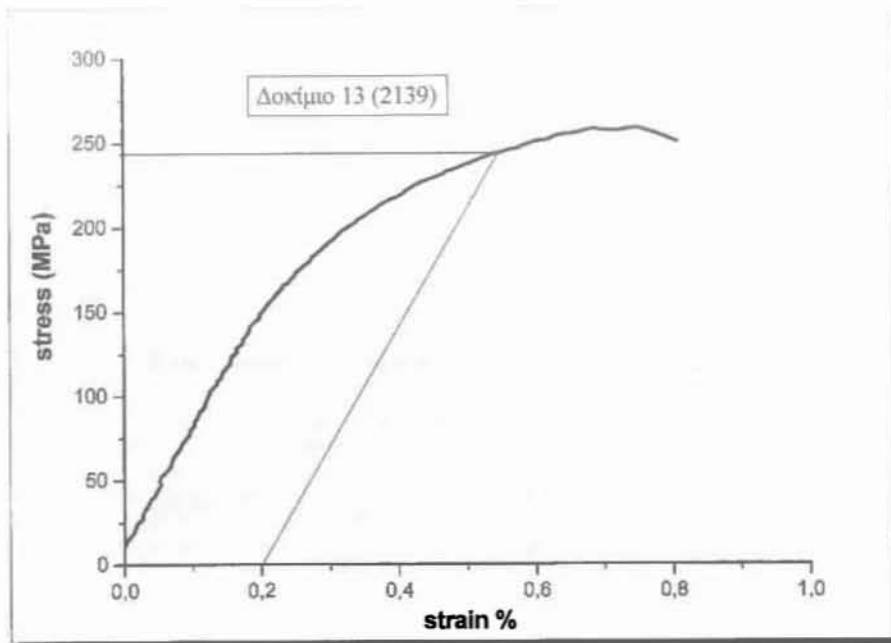
Σχήμα 4.97: Δοκίμιο 4 (2139) – Επιφάνεια θραύσης (Εγκάρσια τομή)



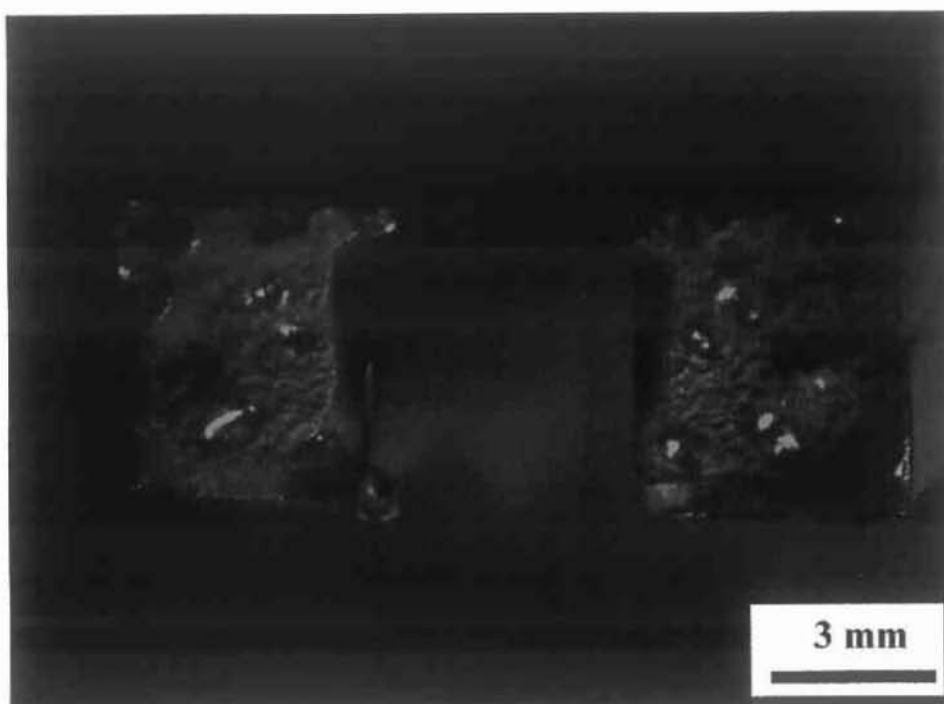
Σχήμα 4.98: Δοκίμιο 5 (2139) – Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης



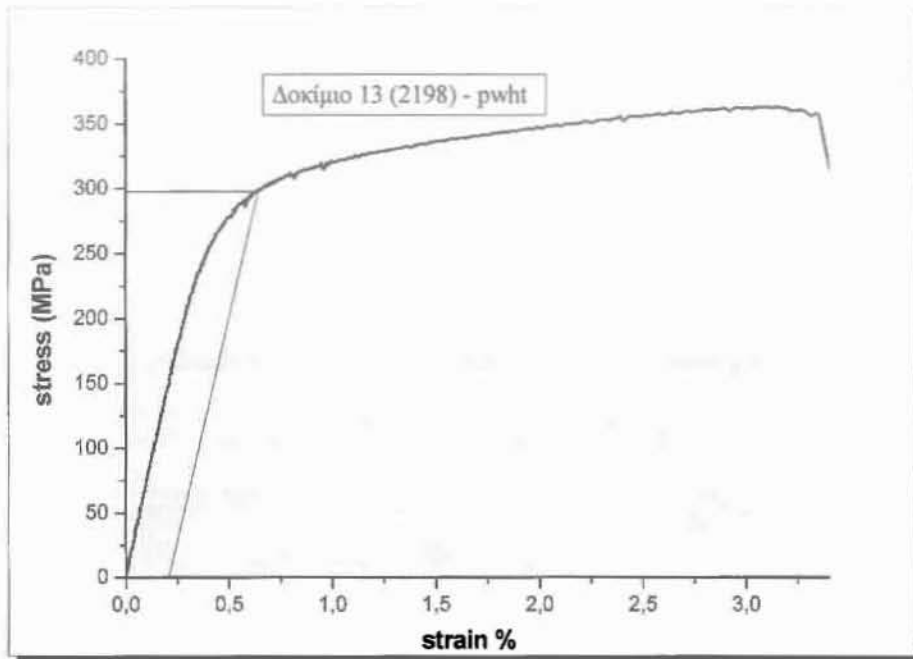
Σχήμα 4.99: Δοκίμιο 5 (2139) – Επιφάνεια θραύσης



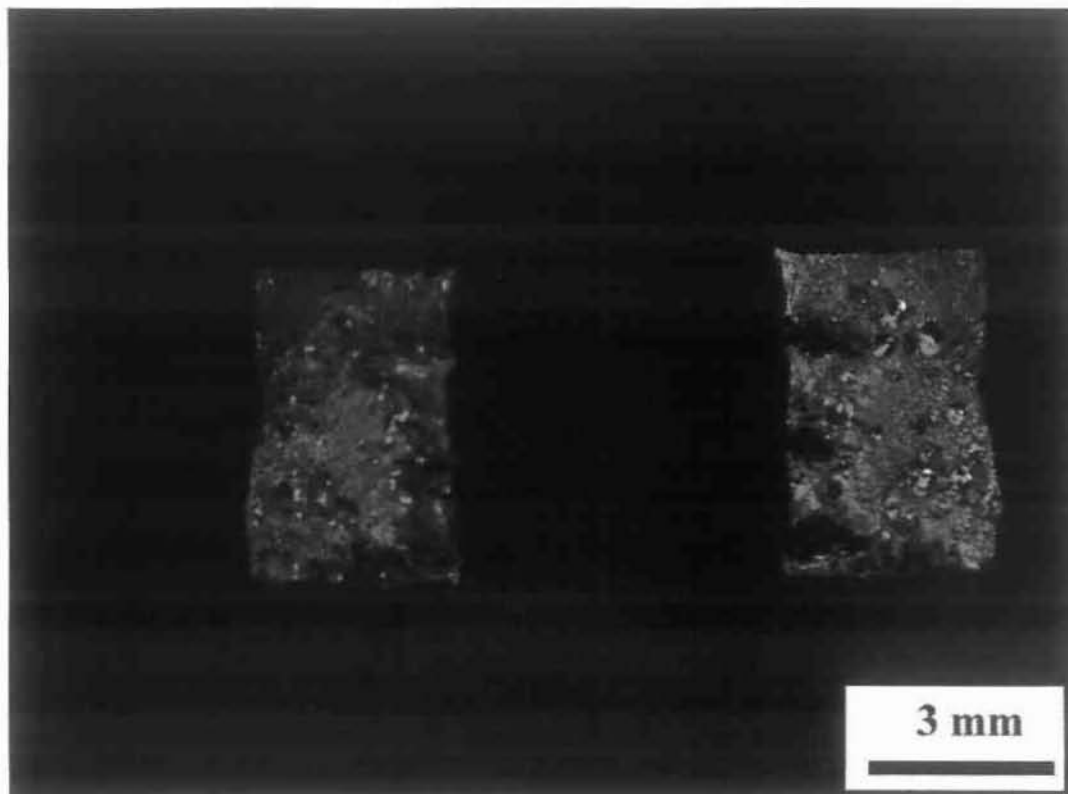
Σχήμα 4.100: Δοκίμο 13 (2139) – Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης



Σχήμα 4.101: Δοκίμο 13 (2139) – Επιφάνεια θραύσης



Σχήμα 4.102: Δοκίμο 13 (2198)_RWHT – Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης



Σχήμα 4.103: Δοκίμο 13 (2198)_RWHT – Επιφάνεια θραύσης

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών

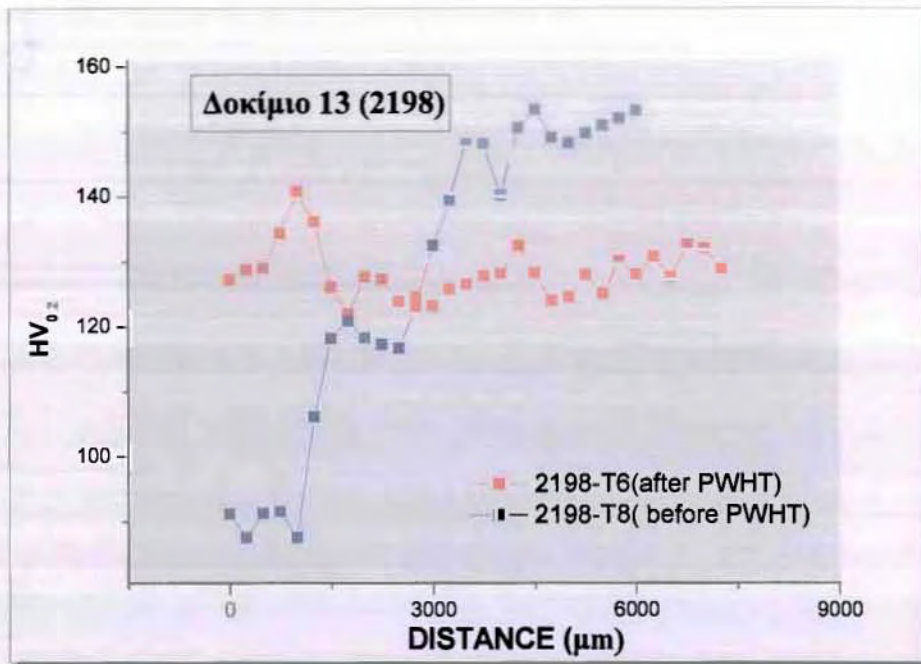
Δοκίμιο	Rp _{0.2} (MPa)	UTS (MPa)	A%	Παρατηρήσεις
4 (2139)	276.5	-	-	Έσπασε πριν το όριο θραύσης εξαιτίας του υψηλού πορώδους
5 (2139)	279	-	-	Έσπασε πριν το όριο θραύσης εξαιτίας του υψηλού πορώδους
13 (2139)	246	257	0.75	Έπιασε όριο θραύσης λόγω χαμηλότερου πορώδους
13 (2198)	297	358	3.2	Καλύτερα αποτελέσματα λόγω PWHT

Στα δοκίμια 4 και 5 του κράματος 2139 (Σχήματα 4.95-4.98) φαίνεται ότι στα δύο πρώτα η θραύση έγινε πολύ γρήγορα, έσπασαν πριν φτάσουν στο όριο θραύσης. Όπως φαίνεται και στις επιφάνειες θραύσης σε ένα μεγάλο ποσοστό ευθύνεται το πορώδες που υπήρχε στην περιοχή της συγκόλλησης και μείωνε την αντοχή του υλικού σε θραύση.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του πορώδους στα κράματα αλουμινίου αποδίδεται στο υδρογόνο που εγκλωβίζεται κατά τη συγκόλληση. Η διαλυτότητα του υδρογόνου στο υγρό αλουμίνιο είναι μια εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας γι' αυτό και το πορώδες στις συγκολλήσεις LBW και EBW είναι πολύ πιο υψηλό σε σχέση με τις συμβατικές συγκολλήσεις λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών. Υπάρχει πιθανώς μια κρίσιμη ταχύτητα συγκόλλησης, η οποία μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά, με την οποία μπορεί να προληφθεί ή τουλάχιστον να μειωθεί ο σχηματισμός και η ανάπτυξη του πορώδους. Επίσης ένας άλλος τρόπος για τη μείωση του πορώδους είναι η αύξηση της πυκνότητας ισχύος επειδή διατηρεί το keyhole σταθερό, αυξάνει το χρόνο στερεοποίησης και έτσι επιτρέπει στο υδρογόνο να διαφύγει[17].

Στο Σχήμα 4.100 φαίνεται ότι το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του δοκιμίου 13 του κράματος 2139 έφτασε το όριο θραύσης διότι όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.101 το πορώδες ήταν χαμηλότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το δοκίμιο επιλέχθηκε από μια περιοχή με χαμηλό πορώδες σύμφωνα με τη ραδιογραφία που είχε προηγηθεί στα δοκίμια. Παρ' όλα αυτά οι μηχανικές του ιδιότητες είναι χαμηλές και ιδιαίτερα η επιμήκυνση.

Έπειτα από PWHT φαίνεται στο Σχήμα 4.102 ότι το δοκίμιο 13 του κράματος 2198 έχει ανακτήσει μέρος των τις μηχανικών του ιδιοτήτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.104.

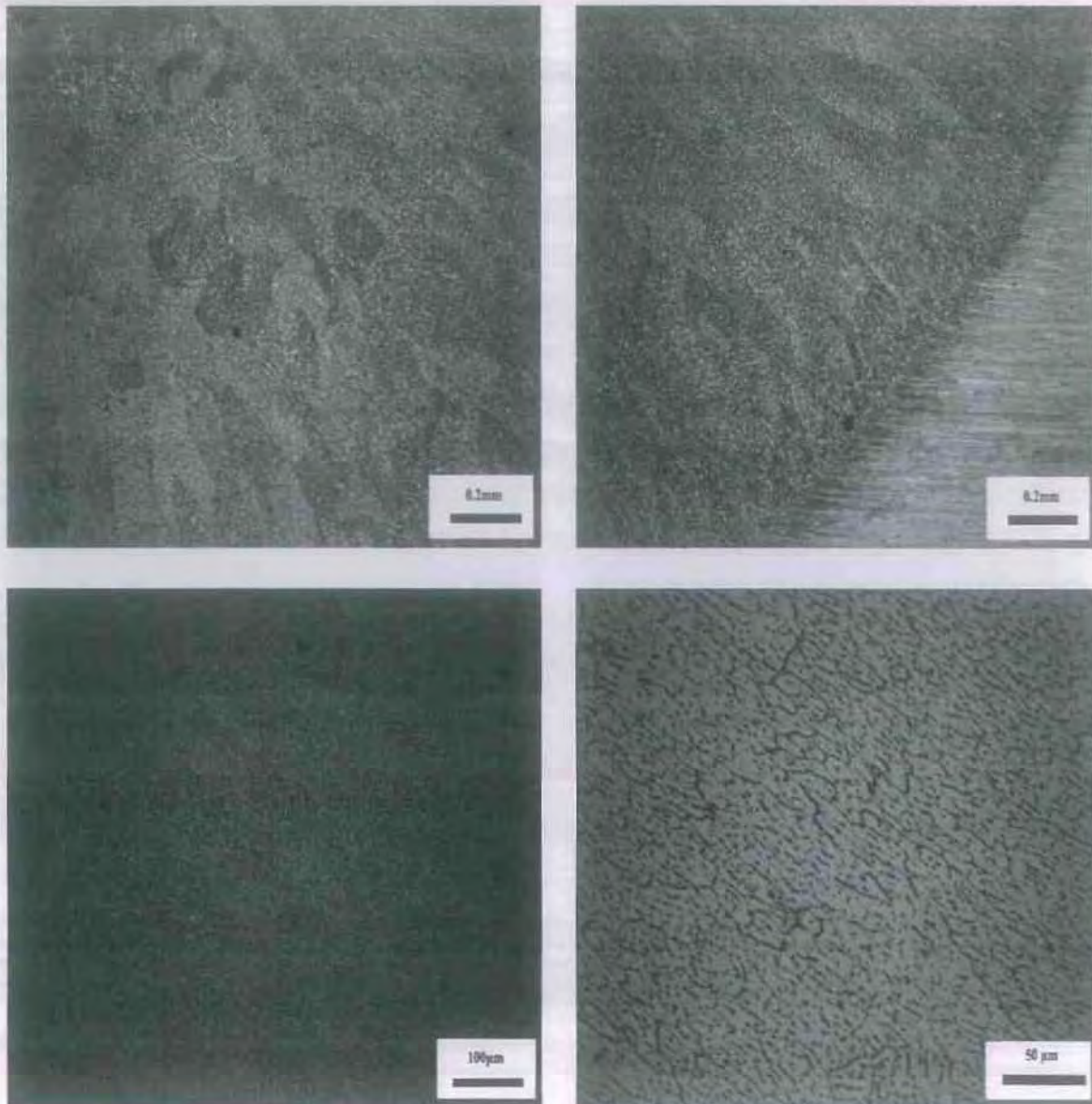


Σχήμα 4.104: Προφίλ μικροσκληρότητας Δοκιμίου 13 (2139) πριν και μετά την PWHT

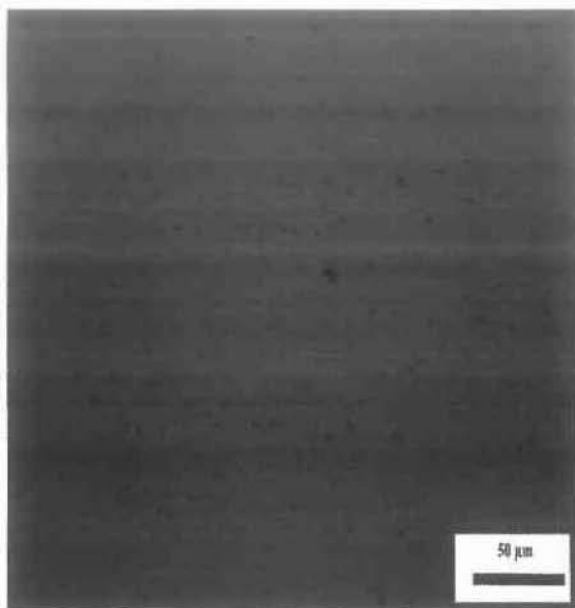
4.6 Μικροδομή - χημική ανάλυση σε συγκολλήσεις bead-on-plate (LBW)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το οπτικό μικροσκόπιο και για τα δύο κράματα ΑΙ στις εξής περιοχές: Λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ), θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και μέταλλο βάσης (ΜΒ).

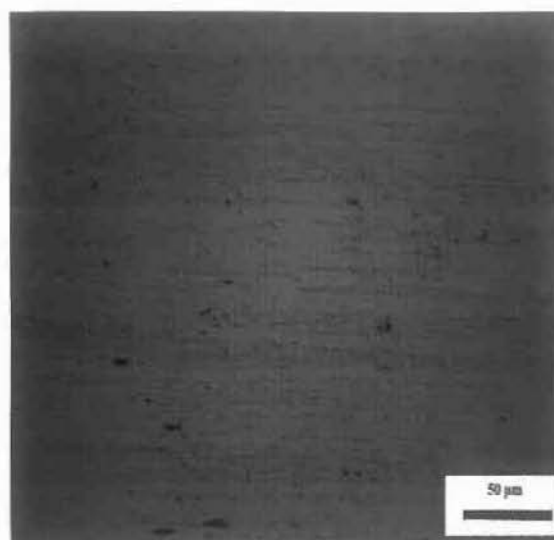
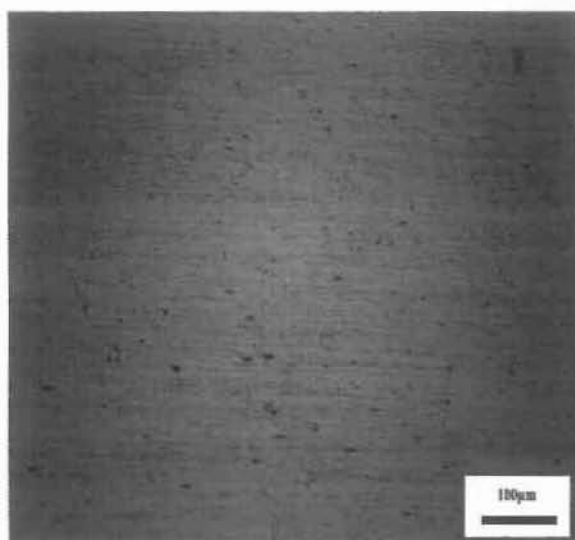
- **Κράμα ΑΙ 2198 (Δοκίμιο 7)**



Σχήμα 4.105: Κράμα 2198 – Μικροδομή ΛΣ

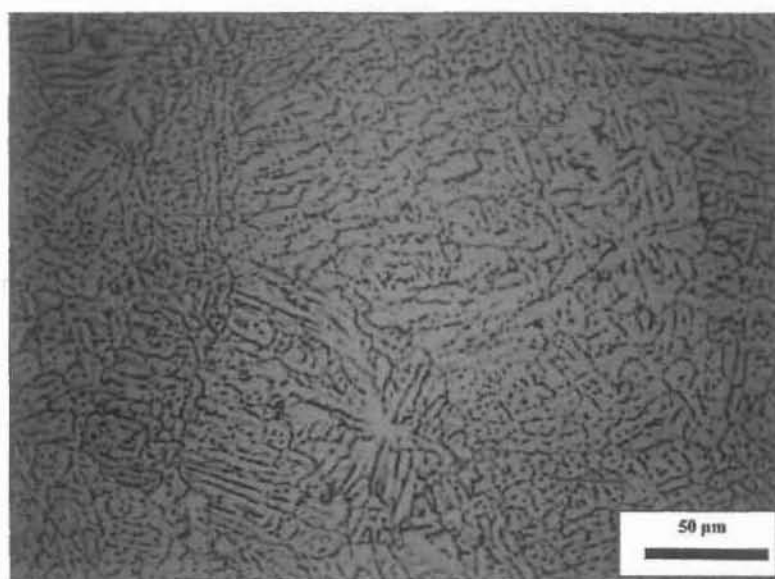
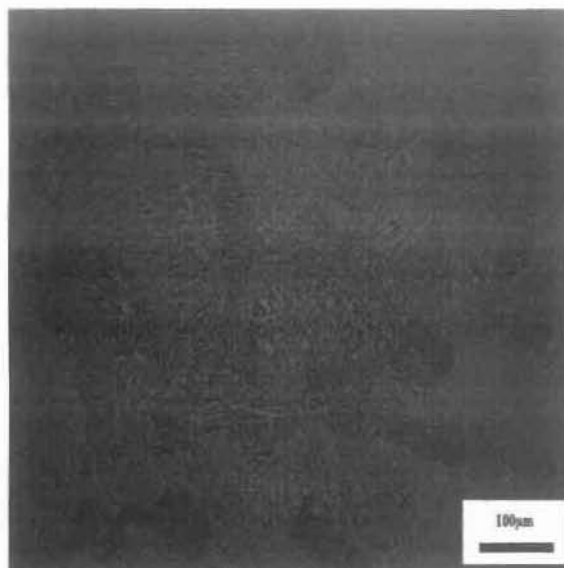
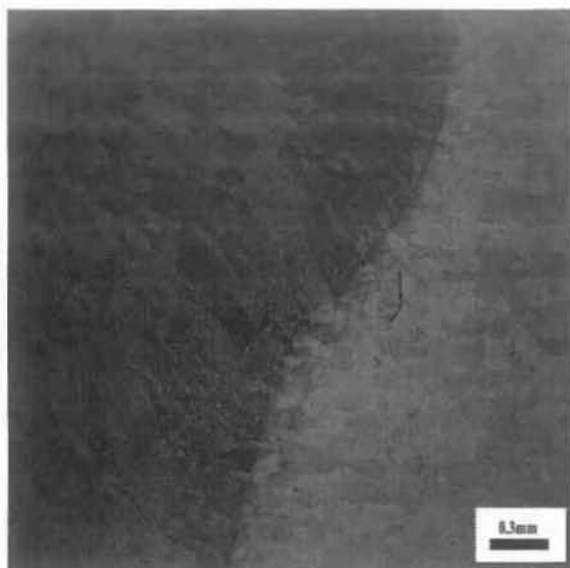


Σχήμα 4.106: Κράμα 2198 – Μικροδομή GEZ

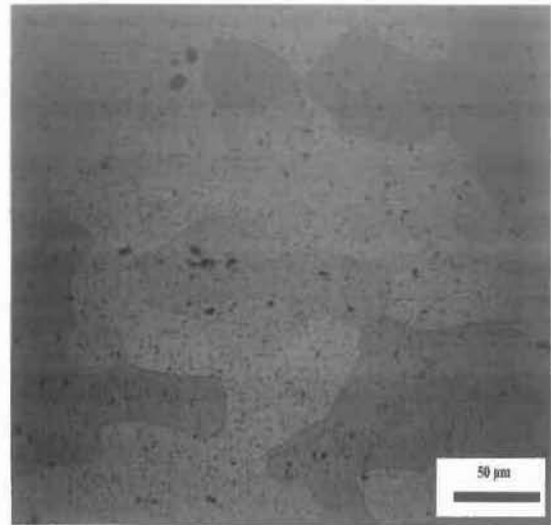
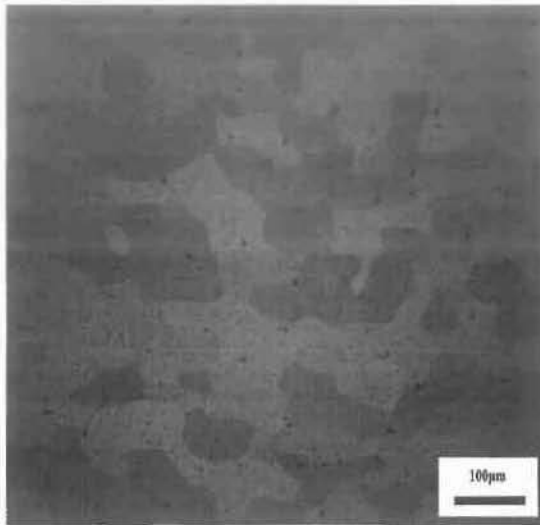


Σχήμα 4.107: Κράμα 2198 – Μικροδομή MB

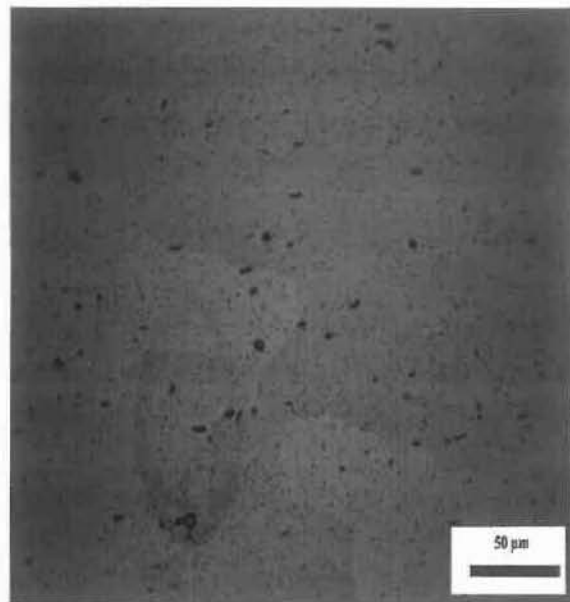
- Κοάμα Al 2139 (Δοκίμιο 14)



Σχήμα 4.108: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΛΣ



Σχήμα 4.109: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΘΕΖ

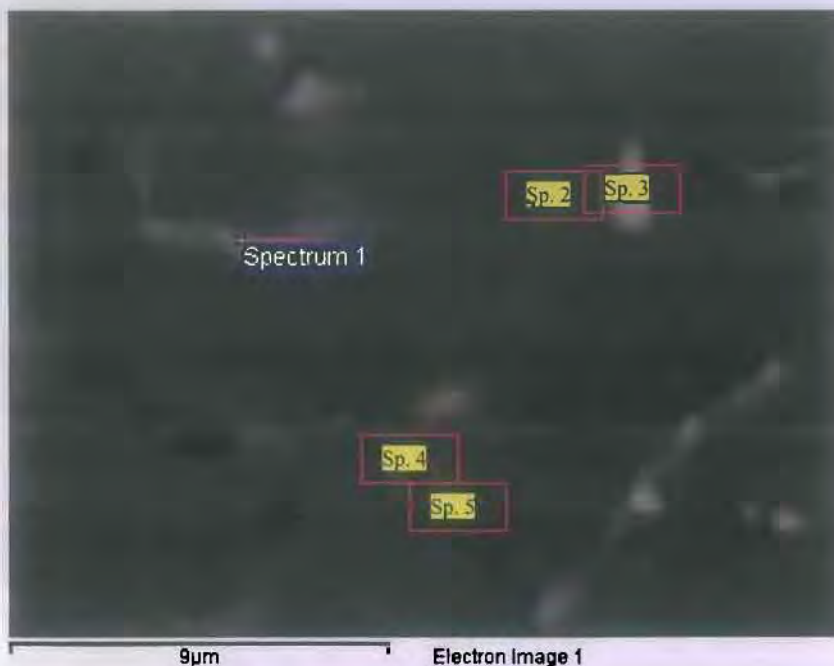


Σχήμα 4.110: Κράμα 2139 – Μικροδομή ΜΒ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης με την οποία πραγματοποιήθηκαν τοπικές χημικές αναλύσεις στη λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ) και στη ζώνη μερικής τήξης (ZMT) στο δοκίμιο 7 του κράματος 2198, και στη λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ), στη ζώνη μερικής τήξης (ZMT) και στη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) στο δοκίμιο 14 του κράματος 2139. Ο σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να προσδιοριστεί η κατανομή των κραματικών στοιχείων στις φάσεις που δημιουργούνται μετά τη συγκόλληση στα 2 κράματα.

- **Κράμα Al 2198 (Δοκίμιο 7)**

Στο Σχήμα 4.111 παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις μέσα στη ΛΣ. Ανιχνεύονται τα κραματικά στοιχεία Ag, Mg και Cu, η περιεκτικότητα των οποίων είναι υψηλότερη στις φάσεις που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση και αναπτύσσονται γύρω από τη μήτρα του Al.



Στοιχείο	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	Sp.5
O K	-	-	1.44	0.98	1.01
Mg K	1.01	0.65	0.89	0.64	0.48
Al K	82.57	90.23	80.14	89.78	90.35
Fe K	0.26	-	-	-	-
Cu K	11.74	2.62	13.02	2.03	1.99
Ag L	4.41	6.50	4.51	6.58	6.17

Σχήμα 4.111: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-5) στη ΛΣ

Στο Σχήμα 4.112 παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις μέσα στη ZMT. Ανιχνεύονται τα κραματικά στοιχεία Ag, Mg και Cu, η περιεκτικότητά των οποίων είναι ελάχιστα υψηλότερη στις φάσεις που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση και αναπτύσσονται γύρω από τη μήτρα του Al.

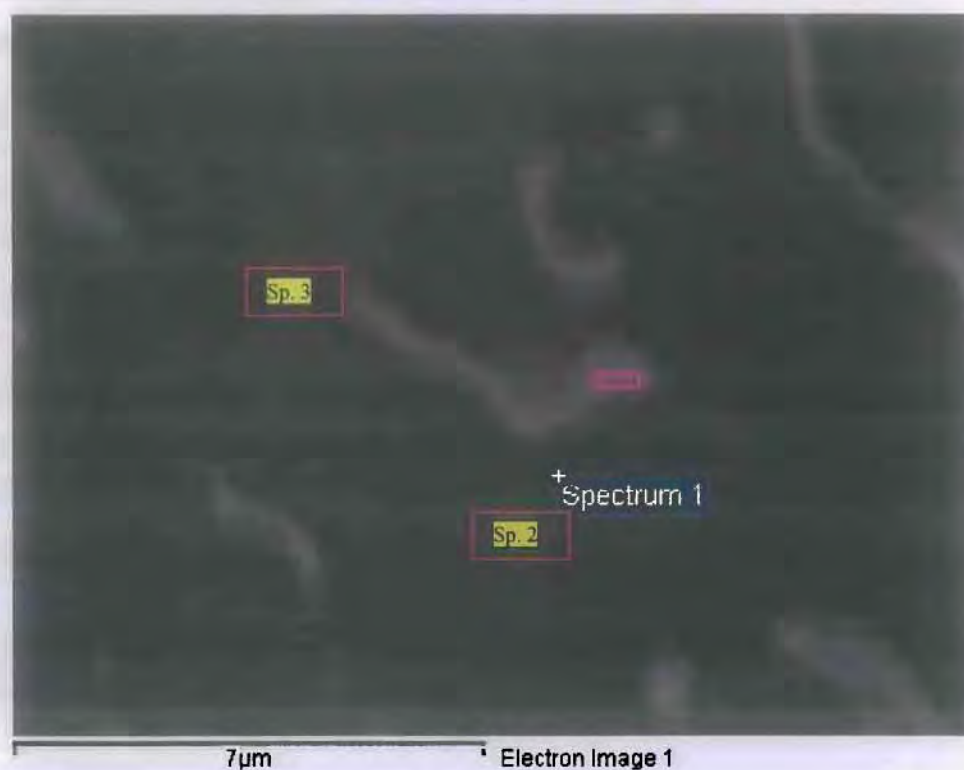


Στοιχείο	Sp.1	Sp.3	Sp.5
O K	1.82	1.16	0.93
Mg K	0.69	0.62	0.57
Al K	87.52	90.34	90.75
Cu K	5.98	3.70	4.03
Ag L	3.99	4.19	3.72

Σχήμα 4.112: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1,3,5) στη ZMT

- **Κοσμά ΑΙ 2139 (Δοκίμιο 14)**

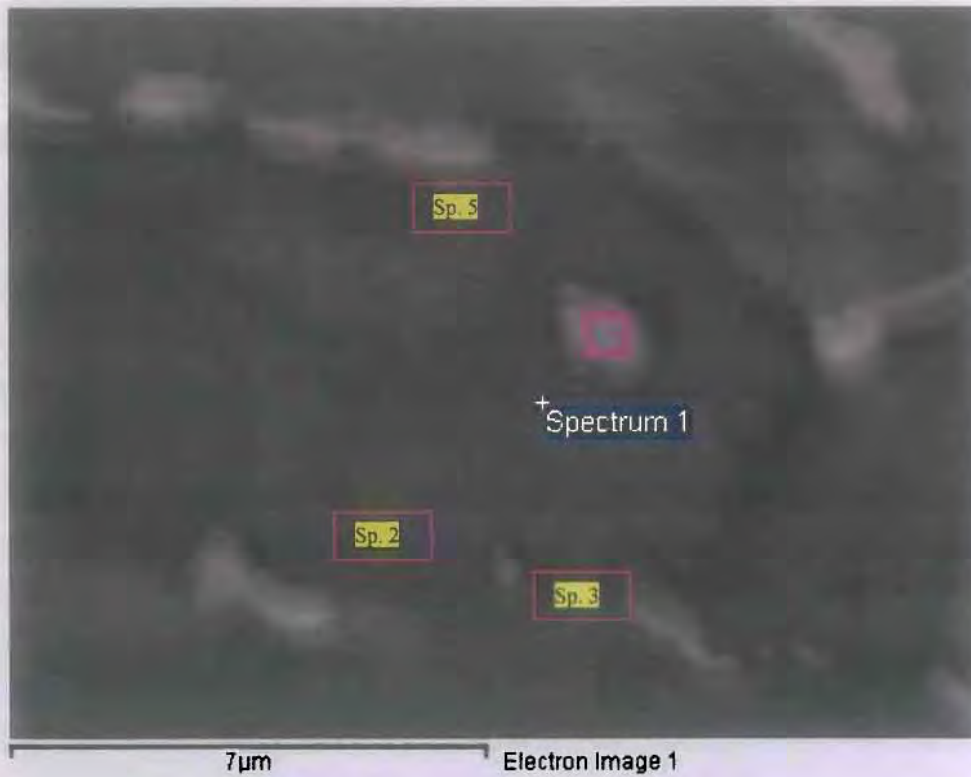
Στο Σχ. 4.113 παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις μέσα στη ΛΣ. Ανιχνεύονται τα κραματικά στοιχεία Ag, Mg και Cu, η περιεκτικότητα των οποίων είναι υψηλότερη στις φάσεις που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση και αναπτύσσονται γύρω από τη μήτρα του ΑΙ.



Στοιχείο	Sp.1	Sp.2	Sp.3
O K	3.83	0.72	1.87
Mg K	0.99	0.76	0.75
Al K	76.42	90.68	86.88
Mn K	0.22	0.40	0.23
Fe K	0.32	-	-
Cu K	15.97	2.90	6.53
Ag L	2.25	4.54	3.74

Σχήμα 4.113: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-3) στη ΛΣ

Στο Σχ. 4.114 παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις μέσα στη ZMT. Ανιχνεύονται τα κραματικά στοιχεία Ag, Mg και Cu, η περιεκτικότητά των οποίων είναι υψηλότερη στις φάσεις που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση και αναπτύσσονται γύρω από τη μήτρα του Al.



Στοιχείο	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.5
O K	4.58	1.12	0.79	3.25
Mg K	0.85	0.61	0.64	0.87
Al K	78.46	90.57	91.13	80.95
Mn K	0.24	0.21	0.24	0.31
Cu K	12.63	2.46	2.04	11.15
Ag L	3.24	5.03	5.15	3.47

Σχήμα 4.114: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-5) στη ZMT

Στο Σχήμα 4.115 παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις μέσα στη ΘΕΖ. Ανιχνεύονται τα κραματικά στοιχεία Ag, Mg και Cu, η περιεκτικότητά των οποίων είναι υψηλότερη στις φάσεις που σχηματίζονται κατά τη στερεοποίηση και αναπτύσσονται γύρω από τη μήτρα του Al.



Στοιχείο	Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4
O K	4.25	0.79	0.59	2.36
Mg K	1.08	0.68	0.85	0.85
Al K	79.08	87.91	88.40	81.81
Mn K	0.22	0.39	0.37	0.20
Cu K	11.27	5.50	5.00	10.56
Ag L	4.12	4.72	4.80	4.22

Σχήμα 4.115: Τοπικές χημικές αναλύσεις (% κ.β.) στις περιοχές που σημειώνονται (1-4) στη ΘΕΖ

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις LBW με ΡΠΘ από 51 – 160 J/mm με μήκος ΘΕΖ 2.7mm κατά μέσο όρο για το κράμα 2198 και 3.2 mm για το κράμα 2139. Το πλάτος συγκόλλησης είχε τιμές από 3 – 4.8 mm για το κράμα 2198 και από 4.1 – 5.2 mm για το κράμα 2139. Πλήρης διείσδυση παρατηρείται για τιμές του ΡΠΘ υψηλότερες από 98J/mm για το κράμα 2198 και από 120J/mm για το κράμα 2139.
- Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις EBW με ΡΠΘ από 88 – 141 J/mm με μεγάλο μήκος ΘΕΖ. Το κράμα 2198 είχε υψηλό πορώδες σε αντίθεση με το κράμα 2139 που είχε πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης.
- Η θερμική κατεργασία PWHT βοηθάει το κράμα να ανακτήσει μέρος των μηχανικών του ιδιοτήτων.
- Τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων (πλάτος, βάθος διείσδυσης, μικροσκληρότητα) συνδέονται άμεσα με τις συνθήκες συγκόλλησης.

6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν συγκριτικά πειραματικά αποτελέσματα συγκολλήσεων σε νέα αεροπορικά κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση CO₂ laser υψηλής ισχύος (LBW), καθώς και με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW). Αντικείμενο προς περαιτέρω μελέτη θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα παρακάτω:

- Πραγματοποίηση PWHT σε όλα τα δοκίμια και έπειτα πειράματα εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων.
- Συγκολλήσεις συμβολής με τη μέθοδο EBW και μηχανικές δοκιμές.
- Περαιτέρω μεταλλογραφικός έλεγχος σε συγκολλήσεις συμβολής
- Περαιτέρω μεταλλογραφικός έλεγχος σε συγκολλήσεις συμβολής
- Προσπάθεια ελαχιστοποίησης των ρηγματώσεων με την προσθήκη υλικού πλήρωσης κράματος 4047 και ελαχιστοποίηση του πορώδους με τον προσδιορισμό μιας κρίσιμης ταχύτητας συγκόλλησης που ελαχιστοποιεί το πορώδες ή με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]: Ph. Lassince, Ph. Lequeu, H. Ribes, Alcan Rhenalu, Issoire, France
F. Eberl, J.C. Ehrstrom, T. Warner, Alcan R&D Center, Voreppe, France
'Developing new solutions for metallic airframe parts'
- [2]: M. Kocak V. Uz, 'Application of its Fracture module to the Stiffened Al-alloys panels of Airframe Structures', European FITNET Fitness-for-Service Procedure
- [3]: Κωνσταντίνος Μαλλιαρός, 'Προσομοίωση Μεταβολής Μικροσκληρότητας στη ΘΕΖ συγκόλλησης με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΤΜΜΒ, 2008
- [4]: Dr. Alex Morris, 'Aluminium Alloys for Aerospace', Materials World, Vol. 6, no. 7, pp. 407-08 July 1998
- [5]: Σταύρος Β. Καραπατάκης, 'Σχεδίαση – Τεχνολογία κατασκευής και Βιομηχανοποίηση Παραγωγής Ολισθακάτων Αλουμινίου', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, 2008
- [6]: M. Vural, J. Caro, 'Experimental analysis and constitutive modeling for the newly developed 2139-T8 alloy', Materials Science and Engineering A, 2009, 56–65
- [7]: I. J. Polmear, Light Alloys, 1981, Arnold Publishers, London
- [8]: http://asm.confex.com/asm/aero06/techprogram/paper_13855.htm
- [9]: <http://www.asmfoundation.org/static/Static%20Files/IP/Magazine/AMP/V166/I02/amp16602p047.pdf?authToken=48653da80feea3757d1244830ef1dbd5102ca51d>
- [10]: Άννα Ζερβάκη, 'Συγκολλήσεις Κραμάτων Αλουμινίου με LASER: Πειραματική Μελέτη και Προσομοίωση της Διαμόρφωσης Μικροδομής της ΘΕΖ', Διδακτορική Διατριβή, ΤΜΜΒ, 2004
- [11]: Ευθύμιος Ευθυμίου, 'Μελέτη και σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης EBW και TIG στο κράμα αλουμινίου 6061', Διπλωματική Εργασία, ΤΜΜΒ, 2006
- [12]: Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Εισαγωγή στις συγκολλήσεις*, εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [13]: Ευθύμιος Πολατίδης, 'Μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με χρήση της μεθόδου TIG', Διπλωματική εργασία, ΤΜΜΒ, 2007
- [14]: a) <http://www.weldreality.com/aluminumalloys.htm>
b) 2. Y. C. CHEN, H. J. LIU, J. C. FENG, 'Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-O friction stir welded joints', JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 41, 2006, pg 297-299
- [15]: <http://www.kevtometals.com/Article12.htm>
- [16]: Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007
- [17]: Alexander Grant Paleocrassas, 'Feasibility investigation of Laser Wending Aluminum alloy 7075-T6 through the use of a 300W, single-mode, ytterbium fiber optical laser', Master thesis, Mecanical and Aerispace Enginnering (North Carolina State University), 2005

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104662

