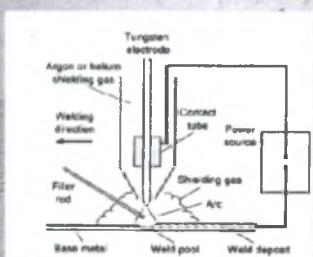
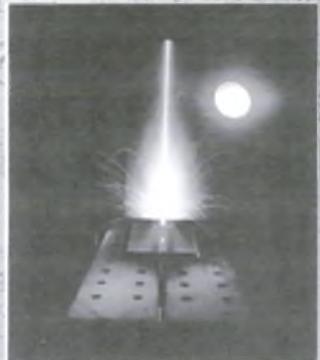


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική εργασία

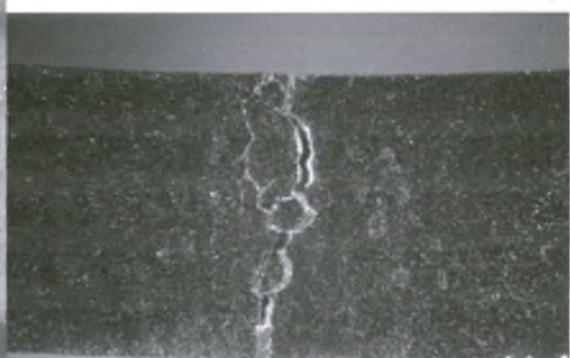
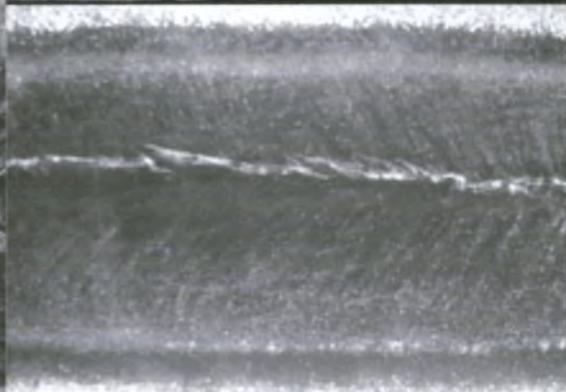


Μελέτη και σύγκριση των μεθόδων συγκόλλησης EBW και TG στο κράμα αλουμινίου 6061



Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Γρ. Χαϊδεμενόπουλος

Φοιτητής :
Ενθυμίον Ενθύμιος



Βόλος, Οκτώβριος 2006



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 5069/1

Ημερ. Εισ.: 16-11-2006

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - MMB

2006

ΕΥΘ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαίδεμενόπουλο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε το πρόσωπο μου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, στον Καθηγητή κ. Νικόλαο Αράβα και Επικ. Καθηγητή Γεώργιο Πετρόπουλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Οφείλω ευχαριστίες στην Άννα Ζερβάκη, για την αμέριστη συμπαράσταση και καθημερινή καθοδήγησή της για την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ τον κύριο Βασίλη Στεργίου Μηχ. Μηχανικό της ΕΑΒ για την παραχώρηση των δοκιμών με τη μέθοδο EB. Ευχαριστώ τους συναδέλφους μου Ορφέα Τριανταφύλλου και Μαριλένα Φυτιλή για τις πολύτιμες υποδείξεις τους στην διόρθωση της εργασίας μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Παναγιώτη και Γεωργία Ευθυμίου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ευθυμίου Παν. Ευθύμιος

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

EBW ΚΑΙ GTAW ΣΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6061

ΕΥΘΥΜΙΟΥ ΕΥΘΥΜΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2006

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος,

Καθηγητής , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μέθοδοι συγκόλλησης δέσμης Ηλεκτρονίων (EBW) και συγκόλλησης τόξου (TIG) στο κράμα αλουμινίου 6061-T6. Πραγματοποιήθηκαν περάματα bead-on-plate σε πειραματικές συνθήκες χαρακτηριστικές της κάθε μεθόδου. Τα δείγματα αξιολογήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών με μεταλλογραφία και μικροσκοπικές μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με τη μέθοδο EBW, παράγονται συγκολλήσεις ανώτερης ποιότητας από αυτές της μεθόδου TIG. Συγκεκριμένα με τη μέθοδο EB η λίμνη συγκόλλησης είναι στενότερη και το βάθος διείσδυσης μεγαλύτερο, για πολύ μικρότερα ποσά πρόσδοσης θερμότητας, απ' ότι με τη μέθοδο TIG.

Τα πειράματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την πραγματοποίηση πραγματικών συγκολλήσεων με τις δυο μεθόδους στις βέλτιστες συνθήκες που προσδιορίστηκαν. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χρήση σε προσομοιώσεις θερμοκρασιακών πεδίων και μικροδομής.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ EBW	13
2.2.1 <i>Πλεονεκτήματα της μεθόδου</i>	16
2.2.2 <i>Μειονεκτήματα της μεθόδου</i>	17
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ GTAW (TIG).....	18
2.3.1 <i>Πολικότητα</i>	21
2.3.2 <i>Πιστόλι συγκόλλησης</i>	23
2.3.3 <i>Ενανση τόξου</i>	24
2.3.4 <i>Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου</i>	25
2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ EBW ΚΑΙ TIG	26
2.5 ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΑΗΣΗΣ.....	27
2.5.1 <i>Συγκόλληση με αγωγή “conduction mode welding”</i>	27
2.5.2 <i>Συγκόλληση υψηλής διείσδυσης – keyhole</i>	27
2.6 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	29
2.6.1 <i>Αεροπορική βιομηχανία</i>	30
2.6.2 <i>Αυτοκινητοβιομηχανία</i>	31
2.6.3 <i>Βιομηχανία συσκευασίας</i>	34
2.6.4 <i>Συγκολλησιμότητα κραμάτων αλουμινίου</i>	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	38
3.1 ΣΚΟΠΟΣ - ΣΤΟΧΟΣ	38
3.2 ΥΛΙΚΟ ΒΑΣΗΣ	39
3.3 ΡΥΘΜΟΣ ΠΡΟΣΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (HEAT INPUT)	40
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ EBW	40
3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ TIG	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	42
4.1 E.B.W.....	43

4.1.1	<i>A' ομάδα πειραμάτων.....</i>	43
4.1.2	<i>B' ομάδα πειραμάτων.....</i>	50
4.1.3	<i>C' ομάδα πειραμάτων.....</i>	56
4.2	ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ EBW.....	62
4.2.1	<i>Εξάρτηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ισχύος.....</i>	62
4.2.2	<i>Μικροσκληρομετρήσεις.....</i>	65
4.3	TIG	71
4.3.1	<i>Μικροσκληρομετρήσεις TIG</i>	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....		77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		78

Περιεχόμενα πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 : ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ TIG	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 : ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (% KB) ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 6061.....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ EB	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG.....	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 : ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ Ρ.Π.Θ. ΜΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ Α ΟΜΑΔΑΣ.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ Α ΟΜΑΔΑΣ ΗΕΑΤ INPUT, ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ Λ.Σ	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 : ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ Ρ.Π.Θ. ΜΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ. Β ΟΜΑΔΑΣ	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ Α ΟΜΑΔΑΣ ΗΕΑΤ INPUT,, ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ Λ.Σ.	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5 : ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ Ρ.Π.Θ. ΜΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ. C ΟΜΑΔΑΣ	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-6 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ C ΟΜΑΔΑΣ ΗΕΑΤ INPUT, ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΘΟΥΣ Λ.Σ.....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-7 : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ TIG.....	71

Περιεχόμενα Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 2-1 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΩΝΙΩΝ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΣΕ ΠΙΕΣΗ 3 PA (2×10^{-2} TORR)	14
ΣΧΗΜΑ 2-2 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ EBW	16
ΣΧΗΜΑ 2-3 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TIG	18
ΣΧΗΜΑ 2-4 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG.....	17
ΣΧΗΜΑ 2.5 : ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΑΠ' ΤΗΝ ΜΙΑ ΠΛΕΥΡΑ	20
ΣΧΗΜΑ 2-6 : ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ...	22
ΣΧΗΜΑ 2-7 : ΠΙΣΤΟΛΙ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.	24
ΣΧΗΜΑ 2-8 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΔΙΔΟΜΕΝΗ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ..	26
ΣΧΗΜΑ 2-9 : (Α) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΑΓΩΓΗ, (Β) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ - KEYHOLE	28
ΣΧΗΜΑ 2-10 : ΑΕΡΟΠΛΑΝΟ ΤΥΠΟΥ BOEING 777	30
ΣΧΗΜΑ 2-11 : ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ BOEING	31
ΣΧΗΜΑ 2-12 : α) ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ β) ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΖΩΗΣ	32
ΣΧΗΜΑ 2-13 : ΜΕΣΗ ΧΡΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΝΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ ΕΥΡΩΠΗ	33
ΣΧΗΜΑ 2-14 : ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕ ΜΕΡΙΚΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ.	33
ΣΧΗΜΑ 2-15 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΠΟΡΟΥΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ TIG	36
ΣΧΗΜΑ 2-16 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΘΕΡΜΟΡΩΓΜΑΤΩΣΗΣ.	36
ΣΧΗΜΑ 2-17 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΜΕ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ LIQUATION CRACKING.	37
ΣΧΗΜΑ 3-1 : ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	39
ΣΧΗΜΑ 3-2 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	39
ΣΧΗΜΑ 3-3 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΣ EB ΤΗΣ ΕΑΒ.....	41
ΣΧΗΜΑ 3-4 : ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	42
ΣΧΗΜΑ 4-1 : ΠΛΑΚΙΔΙΟ ΜΕ ΠΕΡΑΣΜΑΤΑ EB ΤΗΣ Α ΟΜΑΔΑΣ.	43
ΣΧΗΜΑ 4-2 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A1 (W=1125 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	52
ΣΧΗΜΑ 4-3 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A5 (W=1125 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	52
ΣΧΗΜΑ 4-4 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A2 (W=562.5 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	53
ΣΧΗΜΑ 4-5 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A6 (W=562.5 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT -1). ...	53
ΣΧΗΜΑ 4-6 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A3 (W=281.25 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT 0)....	54

ΣΧΗΜΑ 4-7 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A7 (W=281.25 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT -1) ...	54
ΣΧΗΜΑ 4-8 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A4 (W=141 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	55
ΣΧΗΜΑ 4-9 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A8 (W=141 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	55
ΣΧΗΜΑ 4-10 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B1 (W=1800 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	58
ΣΧΗΜΑ 4-11 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B5 (W=1800 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	58
ΣΧΗΜΑ 4-12 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B2 (W=900 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	59
ΣΧΗΜΑ 4-13 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B6 (W=900 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	59
ΣΧΗΜΑ 4-14 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B3 (W=450 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	60
ΣΧΗΜΑ 4-15 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B7 (W=450 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	60
ΣΧΗΜΑ 4-16 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B4 (W=225 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	61
ΣΧΗΜΑ 4-17 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B8 (W=225 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	61
ΣΧΗΜΑ 4-18 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C1 (W=2133 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	46
ΣΧΗΜΑ 4- 19 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C5 (W=2133 W, U=2000 MM/MIN, FOCAL POINT -1)	46
ΣΧΗΜΑ 4-20 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C2 (W=1066 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	47
ΣΧΗΜΑ 4-21 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C6 (W=1066 W, U=1000 MM/MIN, FOCAL POINT -1). ...	47
ΣΧΗΜΑ 4-22 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C3 (W=533 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	48
ΣΧΗΜΑ 4-23 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C7 (W=533 W, U=500 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	48
ΣΧΗΜΑ 4-24 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C4 (W=270 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT 0).....	49
ΣΧΗΜΑ 4-25 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C8 (W=225 W, U=250 MM/MIN, FOCAL POINT -1).	49
ΣΧΗΜΑ 4-26 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ FOCAL POINT.	63
ΣΧΗΜΑ 4-27 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ FOCAL POINT.	62
ΣΧΗΜΑ 4-28 : ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΠΛΑΤΟΣ / ΒΑΘΟΣ ΤΗΣ Λ.Σ. ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ FOCAL POINT.	64
ΣΧΗΜΑ 4-29 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B₂.	65
ΣΧΗΜΑ 4-30 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B₅.	66
ΣΧΗΜΑ 4-31 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ B₆.	66
ΣΧΗΜΑ 4-32 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C₁.	67
ΣΧΗΜΑ 4-33 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C₂.	67
ΣΧΗΜΑ 4-34 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C₄.	68
ΣΧΗΜΑ 4-35 : ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ C₅.	68
ΣΧΗΜΑ 4-36 : ΚΑΤΟΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG (70 A, 7 LT/MIN).	72
ΣΧΗΜΑ 4-37 : ΚΑΤΟΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG (80 A, 10 LT/MIN).	72
ΣΧΗΜΑ 4-38 : ΚΑΤΟΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG (90 A, 12 LT/MIN).	73
ΣΧΗΜΑ 4-39 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ (70 A, 7 LT/MIN).	73

ΣΧΗΜΑ 4-40 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ (80 A, 10 LT/MIN). 74

ΣΧΗΜΑ 4-41 : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ TIG ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ (90 A, 12 LT/MIN). 74

Η αρχική ιδέα της εφαρμογής συγκολλήσεων για την σύνδεση δυο υλικών ήταν η αποφυγή περίπλοκων συνδέσεων που υπήρχαν με τις συμβατικές μεθόδους (π.χ. ηλώσεις) και η μείωση του περιττού βάρους της κατασκευής. Η πρώτη χρήση ηλεκτρικού τόξου, μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα για την τήξη μετάλλων, εφαρμόστηκε το 1881 στη Γαλλία¹.

Από την γέννηση της ιδέας της μεθόδου μέχρι σήμερα έχουν περάσει πολλά στάδια εξέλιξης. Η παγκόσμια διάδοση των μεταλλικών κατασκευών στηρίχθηκε σε μεγάλο ποσοστό στις συγκολλήσεις των στοιχείων κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο έγινε οικονομικά εφικτή η κατασκευή πολύπλοκων κατασκευών με ταυτόχρονη διασφάλιση της μεταφοράς των στατικών και δυναμικών φορτίων².

Τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η μέθοδος την έχουν καταστήσει ως πρώτη επιλογή σε διάφορες περιπτώσεις όπου απαιτείται ο συνδυασμός μέγιστης αντοχής της σύνδεσης, στεγανότητα, οικονομία σε βάρος, απλούστευση κατασκευών, μείωση χρόνου και κόστους κατασκευής. Βέβαια, υπάρχουν και μειονεκτήματα με την χρήση της μεθόδου όπως ανάπτυξη πόρων, πιθανότητα σφαλμάτων, ρηγματώσεις. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των συγκολλήσεων έχει οδηγήσει σε μεθόδους που είναι απαλλαγμένες, σε μεγάλο βαθμό, από τα παραπάνω σφάλματα.

Τα κράματα αλουμινίου είναι από τα μέταλλα τα οποία μπορούν να συγκολληθούν. Οι μηχανικές ιδιότητες και η καλή τους συμπεριφορά σε διαβρωτικό περιβάλλον σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος τα έχουν καθιερώσει ως ένα πολύ σημαντικό τεχνολογικό υλικό. Η αυξημένη χρήση των κραμάτων αλουμινίου σε πάρα πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπορική βιομηχανία,

ναυπηγική) έχουν οδηγήσει στη μελέτη εφαρμογής συγκολλήσεων σε κατασκευές που έχουν ως κύριο υλικό το αλουμίνιο.

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη δύο από τις μεθόδους συγκολλήσεων που εφαρμόζονται σήμερα, οι οποίες είναι η Electron Beam Welding (Συγκόλληση δέσμης ηλεκτρονίων) και η Gas Tungsten Arc Welding (Συγκόλληση τόξου με χρήση μη τηκόμενου βολφραμίου και με προστασία αερίου). Οι δύο αυτές μέθοδοι εφαρμόστηκαν στο κράμα αλουμινίου 6061 με τη θερμική κατεργασία Τ6. Στόχος ήταν η ποιοτική σύγκριση των δυο μεθόδων εφαρμόζοντας με μεταλλογραφικό έλεγχο και μικροσκηληρομετρήσεις.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των δύο αυτών μεθόδων συγκόλλησης και των κραμάτων αλουμινίου, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν και στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

2.1 Εισαγωγή

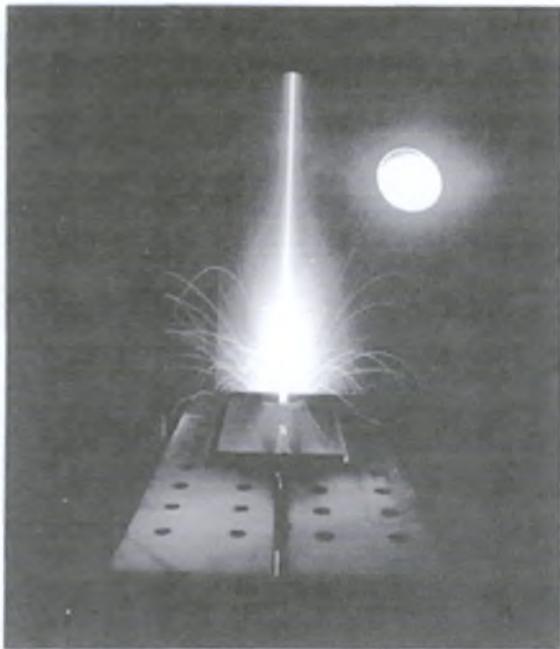
Στην ενότητα αυτή επιχειρείται μια αναδρομή στη βιβλιογραφία των δυο μεθόδων. Παρατίθενται η αρχή λειτουργίας κάθε μεθόδου και εν συντομίᾳ τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας. Στη συνέχεια γίνεται μια πρώτη ποιοτική σύγκριση μεταξύ των μεθόδων, αναλύονται οι τρόποι συγκόλλησης και τέλος παρουσιάζεται η βιβλιογραφία των κραμάτων αλουμινίου.

2.2 Μέθοδος EBW³

Η μέθοδος συγκόλλησης δέσμης ηλεκτρονίων είναι μια υψηλής πυκνότητας ισχύος διεργασία που πραγματοποιείται με βομβαρδισμό της προς συγκόλληση ένωσης μετάλλων, 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, κατά την πρόσκρουση και διάτρηση του κομματιού, προκαλεί την τήξη του μετάλλου και μετέπειτα την συγκόλληση του. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε μέταλλο μπορεί να συγκολληθεί με την μέθοδο τόξου (βλ. Πίνακα 2.1).

Καθώς η συνολική κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μπορεί να συγκεντρωθεί σε μια πολύ μικρή περιοχή στο μέταλλο, επιτυγχάνονται πυκνότητες ενέργειας της τάξης 10^8 W/cm^2 ⁴. Οι τιμές αυτές είναι υψηλότερες από οποιαδήποτε άλλη συνεχή δέσμη, συμπεριλαμβανομένης και της δέσμης *laser*. Η υψηλής πυκνότητας ενέργεια και η ισχυρά συγκεντρωμένη διείσδυση ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα την σχεδόν

ακαριαία τοπική τήξη και εξάτμιση του μετάλλου. Αυτό το χαρακτηριστικό διακρίνει την EBW από άλλες μεθόδους συγκόλλησης στις οποίες ο ρυθμός τήξης περιορίζεται από τις εκάστοτε θερμικές συνθήκες. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 2.1) απεικονίζεται μια συγκόλληση δέσμης ηλεκτρονίων σε ένα κλειστό θάλαμο πίεσης περίπου 3 Pa ($2 \times 10^{-2} \text{ torr}$).

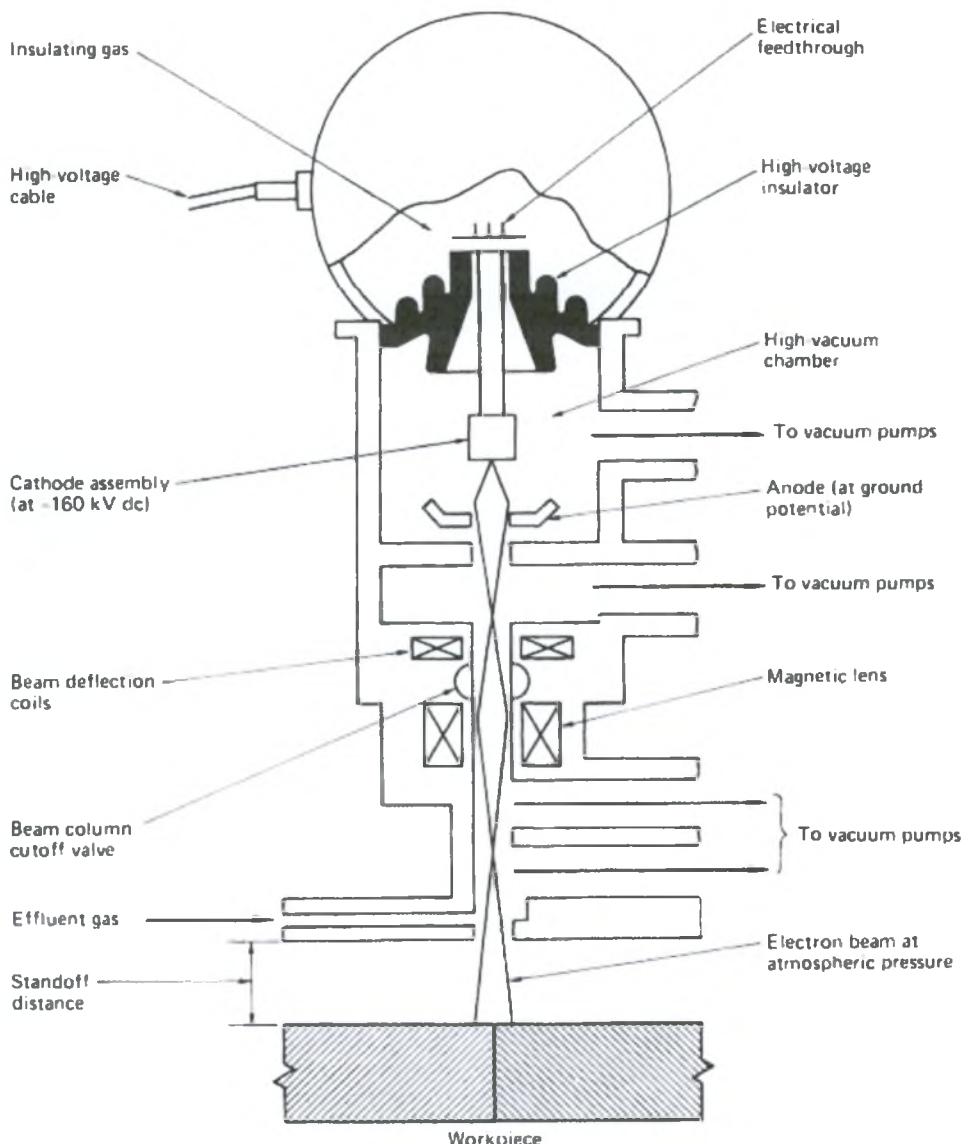


Σχήμα 2-1 : Συγκόλληση που πραγματοποιείται από δέσμη ηλεκτρονίων σε κλειστό θάλαμο σε πίεση 3 Pa ($2 \times 10^{-2} \text{ torr}$)³.

Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται, υπό συνθήκες κενού, από το «όπλο» της δέσμης (*electron gun*) το οποίο αποτελείται από την κάθοδο, μια θερμική πηγή εκπομπής ηλεκτρονίων (*emitter*) η οποία διατηρείται σε υψηλό (αρνητικό) δυναμικό, ένα ειδικά διαμορφωμένο ηλεκτρόδιο και την άνοδο.

Η κάθοδος, η οποία κατασκευάζεται συνήθως από υψηλής εκπομπής υλικό όπως είναι το βιολφράμιο ή το ταντάλιο, εκπέμπει ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται σε υψηλές ταχύτητες και σχηματίζουν μια ευθεία δέσμη, λόγω της γεωμετρίας του ηλεκτροστατικού πεδίου που παράγεται από το σύστημα κάθοδος / grid / άνοδος.

Συνεπώς, παράγεται μια σταθερή δέσμη ηλεκτρονίων που ρέει διαμέσου μιας οπής στην επίπεδη άνοδο. Ρυθμίζοντας την αρνητική διαφορά δυναμικού μεταξύ grid και της καθόδου η ροή ηλεκτρονίων μεταβάλλεται εύκολα με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τη στιγμή που τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την άνοδο αποκτούν την μέγιστη δυνατή ενέργεια που επιτρέπεται από την διαφορά δυναμικού η οποία 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. 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°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 φαινομένων²: (1) το υλικό, το οποίο βρίσκεται στην οπή που δημιουργήθηκε από την εξάτμιση, λειώνει, (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 εξάτμιση του μετάλλου κατά την προώθηση της δέσμης και στην συνέχεια στερεοποιείται δημιουργώντας μια συνεχή συγκόλληση. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.2.2) απεικονίζονται τα διάφορα μέρη της κεφαλής της δέσμης ηλεκτρονίων.



Σχήμα 2-2 : Σχηματική αναπαράσταση μηχανής EBW ³.

2.2.1 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της EBW είναι η δυνατότητα να παράγει συγκολλήσεις βαθύτερες, στενότερες και με πολύ μικρότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας από τις συγκολλήσεις τόξου. Η ικανότητα της μεθόδου να πραγματοποιεί συγκολλήσεις με μεγάλο λόγο βάθους / πλάτους λίμνης συγκόλλησης (*aspect ratio*) εξαλείφει την ανάγκη για πολλαπλά πάσα. Ο μικρότερος ρυθμός πρόσδοσης

θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα στενότερη θερμοεπηρρεαζόμενη ζώνη και αισθητά μικρότερες θερμικές επιδράσεις στο μέταλλο.

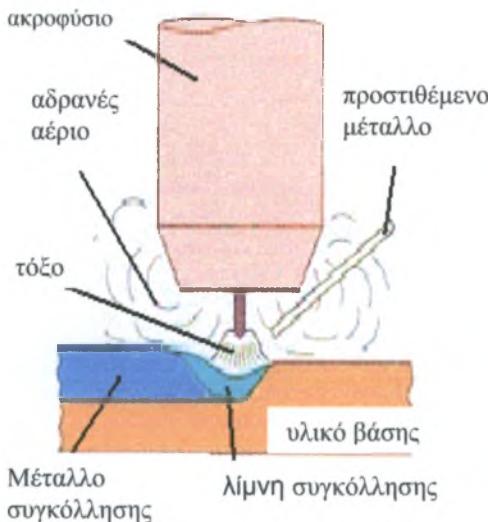
Με την μέθοδο EBW χρησιμοποιείται υψηλής καθαρότητας περιβάλλον κενού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την απαλλαγή από οξείδια και νιτρίδια. Η ικανότητα για υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης, εξαιτίας των υψηλότερων ρυθμών τήξης, σε συνδυασμό με την συγκεντρωμένη πηγή θερμότητας μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, ως εκ τούτου έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή αποτελεσματικότητα της χρήσης της ενέργειας κατά την διεργασία (περίπου 65%)².

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 με μικρή αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων στην περιοχή της συγκόλλησης, (3) διευκολύνουν τις συγκολλήσεις κοντά σε θερμοεπηρρεαζόμενα εξαρτήματα, (4) επιτρέπουν ερμητικά αποκλεισμένες από το περιβάλλον συγκολλήσεις και (5) επιτρέπουν συγκολλήσεις δύστηκτων μετάλλων και συνδυασμούς ανόμοιων μετάλλων που δεν μπορούν να συγκολληθούν με τις μεθόδους τόξου.

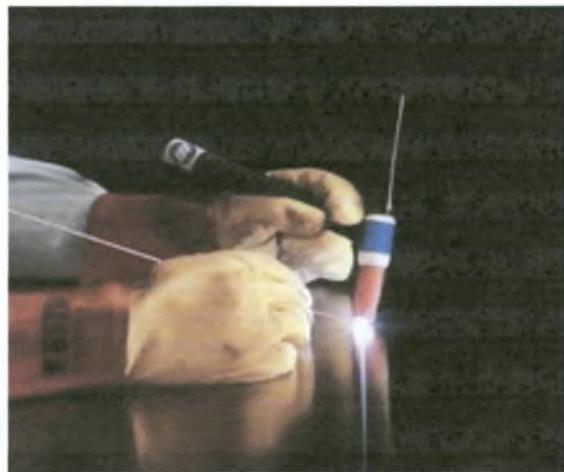
2.2.2 Μειονεκτήματα της μεθόδου

Το μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ υψηλό κόστος απόκτησης εξοπλισμού, το υψηλό κόστος λειτουργίας και η σχετικά χαμηλή παραγωγικότητα λόγω της απαίτησης δημιουργίας κενού κατά τη λειτουργία. Σε περιπτώσεις όμως που η κατασκευή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη είναι επιτακτική η χρήση της. Μπορούν να αναφερθούν παραδείγματα συγκολλήσεων κρίσιμων τμημάτων του αεροπλάνου, υποβρυχίων, δεξαμενών υψηλής πίεσης.

2.3 Μέθοδος GTAW (TIG)



Σχήμα 2-3 : Γραφική απεικόνιση της μεθόδου TIG⁵.



Σχήμα 2-4 : Φωτογραφία συγκόλλησης με TIG⁵.

Η μέθοδος TIG (Tungsten Inert Gas) άρχισε να χρησιμοποιείται μαζικά την δεκαετία του '40 για την συγκόλληση αλουμινίου (Al).⁵ Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο υλικό από μη τηκόμενο βολφράμιο και για την προστασία της λίμνης συγκόλλησης αδρανές αέριο (ήλιο, αργόν). Κατά την διεργασία, το τόξο σχηματίζεται μεταξύ του βολφραμίου και του υπό συγκόλληση μετάλλου σε αδρανές περιβάλλον (αργόν ή ήλιον), το οποίο προστατεύει την συγκόλληση από το εξωτερικό περιβάλλον. Το αρκετά λεπτό και έντονο τόξο που ξεκινά από την μύτη του ηλεκτροδίου είναι ιδανικό για υψηλής ποιότητας και ακρίβειας συγκολλήσεις. Όταν απαιτείται η χρήση προστιθέμενου μετάλλου αυτό προστίθεται στην λίμνη συγκόλλησης ξεχωριστά. Στο Σχ.2.3 φαίνεται η διάταξη της συγκόλλησης TIG, ενώ στο Σχ.2.4 φαίνεται μία φωτογραφία συγκόλλησης TIG.

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη οπουδήποτε χρειάζεται υψηλής ποιότητας συγκόλληση. Χάρη στην TIG έγινε εφικτή η αποδοχή του αλουμινίου σαν μέταλλο για υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις. Η ευρεία πλέον χρήση αυτής της μεθόδου οδήγησε στην ανάγκη όσο το δυνατόν ελαφρύτερης μηχανής συγκόλλησης, ώστε να είναι φορητή.

Στην συγκόλληση TIG δεν απαιτείται η χρήση επένδυσης (πάστας) ηλεκτροδίου, έτσι αποφεύγονται όλα τα πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με την χρήση της, όπως ο εγκλωβισμός της στην συγκόλληση, καθώς και ο καθαρισμός μετά το πέρας της συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται με συνεχές ρεύμα είναι συνήθως από καθαρό βολφράμιο με 2-5% θόριο για την ενίσχυση του τόξου έναυσης. Σε εναλλασσόμενο ρεύμα επειδή το ηλεκτρόδιο λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία χρησιμοποιείται βολφράμιο με ζιρκόνιο (0.5%) για μείωση της διάβρωσης. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο ηλεκτρόδιο (κατά τον μισό κύκλο όπου το ηλεκτρόδιο έχει θετική πολικότητα) είναι δύσκολο να διατηρείται η άκρη του ηλεκτροδίου σε μότη αλλά με την χρήση παίρνει ένα σφαιρικό σχήμα. Η επιλογή ηλεκτροδίου εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, όπου όσο πιο μικρότερη η ένταση τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το ηλεκτρόδιο⁶.

Το αέριο προστασίας, που χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα και ειδικότερα από την αντίδραση του τηγμένου μετάλλου με την ατμόσφαιρα, τροφοδοτείται στην περιοχή της συγκόλλησης από το πιστόλι συγκόλλησης, μέσω οπών που βρίσκονται περιμετρικά του ηλεκτροδίου. Το αέριο προστασίας που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το συγκολλούμενο υλικό⁵. Η χρήση του αργού είναι πιο διαδεδομένη κυρίως λόγω του μικρότερου κόστους σε σχέση με το ήλιο.

Η μέθοδος TIG εφαρμόζεται συνήθως σε συγκολλήσεις όπου η πρόσβαση είναι εφικτή μόνο από τη μία πλευρά (κλειστά προφύλ, σωλήνες κλπ. Σχ. 2.5). Η μεγάλη σταθερότητα πηγών ρεύματος επιτρέπουν την χρήση μικρής πυκνότητας ρεύματος για μικροσυγκολλήσεις αντικαθιστώντας σε αυτές τις περιπτώσεις την μέθοδο «plasma». Με χειρονακτική χρήση το μικρού μεγέθους τόξο είναι ιδανικό για λεπτά ελάσματα. Επειδή η εναπόθεση υλικού είναι αργή για πιο παχιά ελάσματα είναι προτιμότερη η χρήση πρόσθετου υλικού. Η TIG χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανικά συστήματα είτε αυτογενώς είτε με πρόσθετο σύρμα.



Σχήμα 2.5 : Περίπτωση συγκόλλησης TIG απ' την μία πλευρά⁶.

Με την μέθοδο TIG είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων και των βιομηχανικών κραμάτων, όπως οι δομικοί χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου, τα κράματα χαλκού (ορείχαλκοι και μπρούντζοι), τα κράματα νικελίου και άλλα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση διαφορετικών μετάλλων καθώς και για την επίστρωση σκληρών προστατευτικών επικαλύψεων πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα. Τέλος, μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ η επιλογή αυτή εξαρτάται από το προς συγκόλληση μέταλλο και από την εφαρμογή. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά τα επιμέρους χαρακτηριστικά της μεθόδου.

2.3.1 Πολικότητα⁷

Γενικά, όταν συγκολλούνται μέταλλα χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα με το ηλεκτρόδιο να έχει αρνητική πολικότητα για να μην υπερθερμαίνεται.

Για συνεχές ρεύμα ($\Sigma P/DC$) διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις:

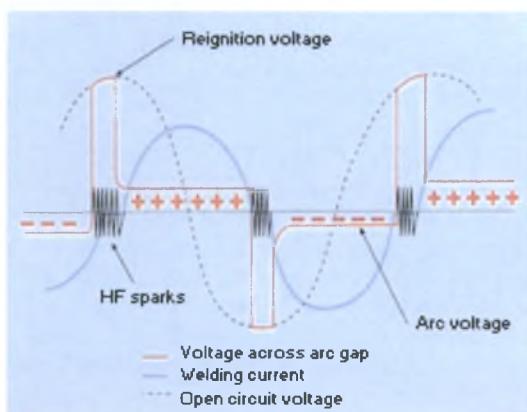
(α) Συνεχές Ρεύμα - Ηλεκτρόδιο Αρνητικό (ΣPHA) ή (DCEN)

(β) Συνεχές Ρεύμα - Ηλεκτρόδιο Θετικό ($\Sigma PH\Theta$) ή (DCEP)

Στην πρώτη περίπτωση (ΣPHA), το ηλεκτρόδιο του βολφραμίου είναι αρνητικό (-) και το προς συγκόλληση μέταλλο θετικό (+). Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το ηλεκτρόδιο προς το μέταλλο και προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας την θέρμανση και φυσικά την τήξη του μετάλλου με αποτέλεσμα η συγκόλληση να είναι στενή και να πραγματοποιείται με μεγάλη διείσδυση. Η λειτουργία ΣPHA χρησιμοποιείται στις περισσότερες συγκολλήσεις των μετάλλων.

Στη δεύτερη περίπτωση ($\Sigma PH\Theta$), η ροή των ηλεκτρονίων είναι αντίστροφη, από το μέταλλο προς το ηλεκτρόδιο και επομένως προκαλείται υπερθέρμανση και σε πολλές περιπτώσεις τήξη της κορυφής του ηλεκτροδίου με επακόλουθη αλλοίωση της χημικής σύστασης της συγκόλλησης. Για τον λόγο αυτό, στις συγκολλήσεις $\Sigma PH\Theta$ πρέπει να χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο βολφραμίου μεγαλύτερης διαμέτρου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την χαμηλότερη ένταση του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα η συγκόλληση να έχει μεγαλύτερο πλάτος και μικρότερη διείσδυση. Μία από τις σημαντικότερες επιδράσεις της συγκόλλησης $\Sigma PH\Theta$ είναι ο λεγόμενος καθοδικός καθαρισμός, ο οποίος είναι πιο εμφανής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, στις οποίες υπάρχει διάσπαση του προστατευτικού οξειδίου Al_2O_3 , διευκολύνοντας την τήξη του μετάλλου. Η διάσπαση

προκαλείται είτε από τα ηλεκτρόνια που απομακρύνονται από το μέταλλο είτε από τα ιόντα του αερίου που προσπίπτουν επάνω στο μέταλλο.



Σχήμα 2-6 : Διεργασία κατά την διάρκεια ενός κύκλου του εναλλασσόμενου ρεύματος⁶.

Κατά την συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP/AC) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει συνδυασμός ΣΡΗΑ και ΣΡΗΘ. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ.2.6 ένας πλήρης κύκλος EP αποτελείται από μισό κύκλο ΣΡΗΘ και μισό κύκλο ΣΡΗΑ. Στις συγκολλήσεις αλουμινίου το προστατευτικό φιλμ οξειδίου (Al_2O_3) παρεμποδίζει την ροή του ρεύματος όταν ο κύκλος είναι στην περιοχή ΗΘ, προκαλώντας ανόρθωση του ρεύματος (*rectification*). Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται επιπρόσθετα ένα υψίσυχο (HF) ρεύμα υψηλής τάσεως με χαμηλή ένταση, το οποίο γεφυρώνει το κενό μεταξύ του ηλεκτροδίου και του μετάλλου, ενώ ταυτόχρονα διασπά το προστατευτικό φιλμ του οξειδίου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία δίοδος για την ροή του ρεύματος συγκόλλησης. Η συγκόλληση αυτή χαρακτηρίζεται ως EP/HF (AC/HF).

Στον Πίνακα 2.1 της επόμενης σελίδας φαίνονται οι διαφορετικές μέθοδοι, σε σχέση με την πολικότητα, για την συγκόλληση μετάλλων με τη μέθοδο TIG.

Πίνακας 2-1 : Μέθοδοι συγκόλλησης TIG⁷.

Μέταλλο	ΣΡΗΑ	ΣΡΗΘ	ΕΡ
Χάλυβες	E	O	O
Χυτοσίδηροι	E	O	K (Σημ.1)
Ανοξείδωτοι χάλυβες	E	O	K (Σημ.1)
Κράματα υψηλών θερμοκρασιών	E	O	K (Σημ.1)
Πυρίμαχα μέταλλα	E	O	O
Κράματα αλουμινίου			
<0.6mm	O (Σημ.2)	K	E
>0.6mm	O (Σημ.2)	O	E
Χυτά αλουμινίου	O (Σημ.2)	O	E
Κράματα χαλκού			
Ορείχαλκοι	E	O	K (Σημ.1)
Μπρούντζοι	E	O	O
Κράματα μαγνησίου			
<3mm	O (Σημ.2)	K	E
>3mm	O (Σημ.2)	O	E
Χυτά μαγνησίου	O (Σημ.2)	O	E

E: Εξαιρετική

K: Καλή

O: Δεν συνιστάται

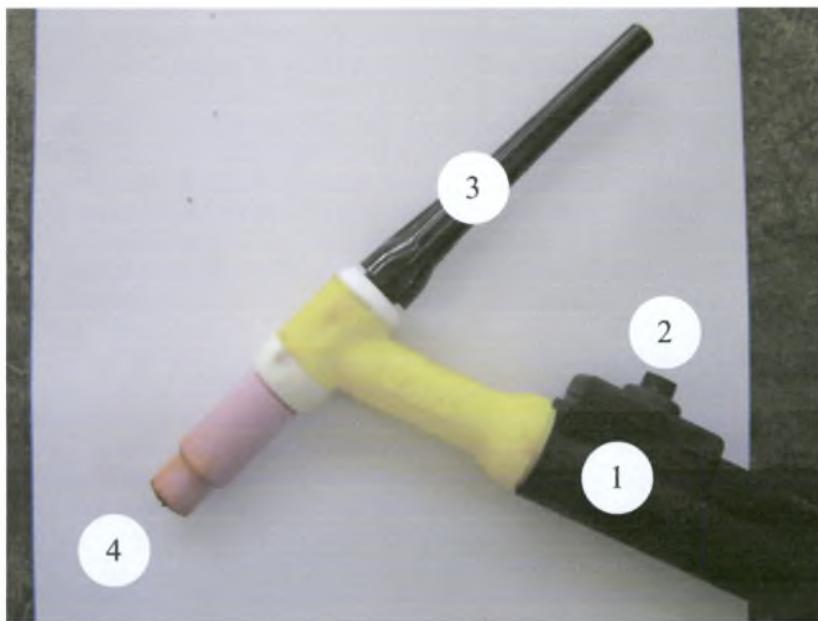
Σημ.1: Με ένταση ρεύματος κατά 25% υψηλότερη από ΣΡΗΑ

Σημ.2: Εκτός αν προηγηθεί μηχανικός ή χημικός καθαρισμός

2.3.2 Πιστόλι συγκόλλησης

Στο Σχ. 2.7 απεικονίζεται το πιστόλι που χρησιμοποιεί η μηχανή συγκόλλησης του εργαστηρίου. Τα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι :

- (1) τροφοδοσία αερίου (Argon) , (2) διακόπτης ON/OFF της τροφοδοσίας αερίου, (3) ηλεκτρόδιο, (4) περιοχή που συντελείται η συγκόλληση.



Σχήμα 2-7 : Πιστόλι μηχανής συγκόλλησης εργαστηρίου.

2.3.3 Έναυση τόξου⁵

Η έναυση του τόξου μπορεί να γίνει «ξύνοντας» την επιφάνεια, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα κλειστό κύκλωμα. Όταν αυτό το κλειστό κύκλωμα «ανοίξει», τότε και μόνο τότε το ρεύμα συγκόλλησης αρχίζει να ρέει. Σ' αυτή την περίπτωση, βέβαια, ενδέχεται να υπάρχει το ρίσκο το ηλεκτρόδιο να κολλήσει στην επιφάνεια του μετάλλου και να προκαλέσει την είσοδο μέρους του υλικού του βιολφραμίου στη συγκόλληση. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας από την μηχανή συγκόλλησης την τεχνική ‘lift arc’ όπου το κύκλωμα δημιουργείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα πυκνότητας ρεύματος. Η πιο συνήθης τεχνική για την έναρξη μιας συγκόλλησης TIG είναι η χρήση HF (*High Frequency*), σύμφωνα με την οποία παράγονται υψηλής τάσης σπίθες μερικών χιλιάδων βολτ οι οποίες διαρκούν μερικά μικροδευτερόλεπτα. Αυτές οδηγούν το περιβάλλον μεταξύ ηλεκτροδίου – μετάλλου σε ιονισμό. Κατά την λειτουργία της μηχανής συγκόλλησης με χρήση HF δημιουργούνται αέρια αλλά και διαμέσω αγώγιμων

υλικών μαγνητικά πεδία, για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την προστασία των ηλεκτρονικών συσκευών που βρίσκονται κοντά στην θέση όπου πραγματοποιείται η συγκόλληση. Μόλις δημιουργεί το σύννεφο ηλεκτρονίων το ηλεκτρικό ρεύμα αρχίζει και μεταφέρεται.

Η HF λειτουργία είναι επίσης σημαντική γιατί σταθεροποιεί το τόξο εναλλασσόμενου ρεύματος. Η πολικότητα του ηλεκτροδίου εναλλάσσεται με μία συχνότητα περί τις 50/sec, προκαλώντας την μείωση του πάχους του τόξου σε κάθε αλλαγή πολικότητας. Για την διατήρηση του τόξου έπειτα από κάθε εναλλαγή HF δημιουργούνται σπίθες για να υποβοηθήσουν την ολοκλήρωση της συγκόλλησης.

2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

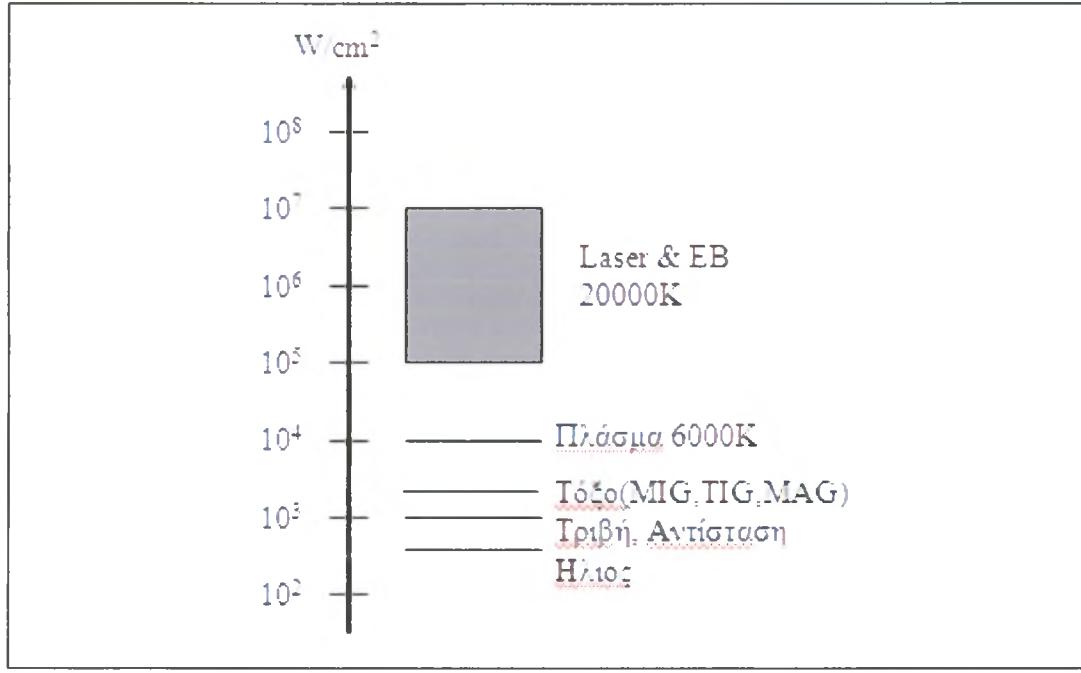
Οι συγκολλήσεις TIG παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2-2 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκολλήσεων μεθόδου TIG ⁷.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηλή ποιότητα συγκολλήσεων	Χαμηλότερη παραγωγικότητα σε σχέση με τις συγκολλήσεις SMAW και GMAW-MIG
Μικρές παραμορφώσεις	Αντιοικονομική „μέθοδος για ελάσματα μεγάλου πάχους (>10mm)
Μεγάλη ευελιξία στη χρήση μηχανών συγκόλλησης διαφορετικών τύπων	Εύκολη μόλυνση της λίμνης συγκόλλησης όταν η προστασία αερίου δεν είναι επαρκής.
Συγκόλληση με η χωρίς προσθήκη συγκολλητικού υλικού	
Ακρίβεια στον έλεγχο προσδιδόμενης θερμότητας	

2.4 Σύγκριση EBW και TIG

Στο Σχ. 2.8 παρουσιάζεται η σύγκριση από πλευράς διαθέσιμων εντάσεων των μεθόδων συγκόλλησης.



Σχήμα 2-8 : Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης σε σχέση με την προσδιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια⁸.

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα οι συμβατικές συγκολλήσεις τόξου, όπως η TIG, βρίσκεται δυο τάξεις μεγέθους χαμηλότερα από μεθόδους δέσμης, όπως είναι η EBW, σε ότι αφορά την προσδιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια.

Η EB προσφέρεται για υψηλής ποιότητας συγκολλήσεις επειδή πραγματοποιείται σε περιβάλλον κενού και τα εγκλείσματα εκλείπουν. Η αναγκαία ύπαρξη περιβάλλοντος κενού καθιστά την μέθοδο EB μη παραγωγική, ενώ η TIG αποτελεί κοινή πρακτική σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στην βιομηχανία. Το βάθος διείσδυσης που επιτυγχάνεται με την EB είναι μεγαλύτερο απ' ότι με την TIG.

2.5 Τόποι συγκόλλησης

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν οι τύποι των συγκολλήσεων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση της παραγράφου αυτής θα βοηθήσει στην κατανόηση των πειραματικών αποτελεσμάτων τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

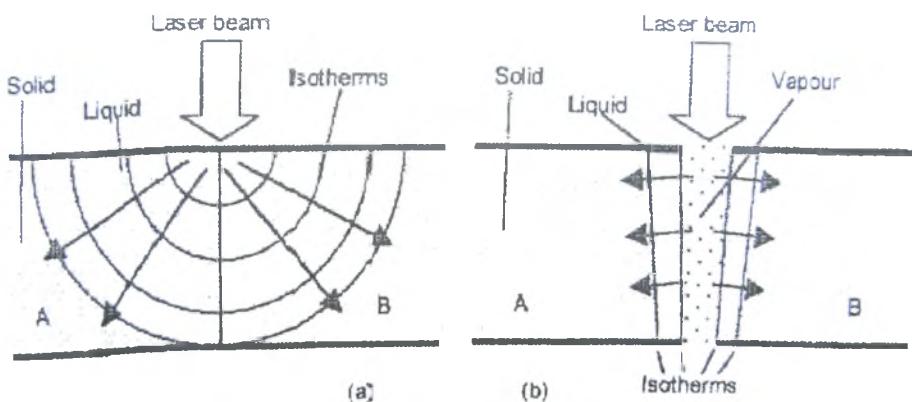
2.5.1 Συγκόλληση με αγωγή “*conduction mode welding*”

Κατά τη συγκόλληση με αγωγή (Σχ. 2.9(a)) λαμβάνει χώρα μεταφορά θερμότητας. Η μεταφορά θερμότητας είναι ο μοναδικός σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης και που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα όπως διαφορετική διείσδυση, πορώδες, έλλειψη τήξης. Είναι επίσης υπεύθυνη για τη σύσταση της λίμνης συγκόλλησης. Η γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης είναι συνάρτηση του αριθμού *Prandtl*. Σε υλικά με μικρό αριθμό *Pr*, όπως το αλουμίνιο (0.02), η λίμνη είναι πιο σφαιρική και κυριαρχείται από μεταφορά θερμότητας με αγωγή, ενώ σε υλικά με μεγαλύτερο αριθμό *Pr*, όπως ο χάλυβας (0.1), η λίμνη εμφανίζεται ρηχή και πλατιά αφού κυριαρχείται από ροή θερμότητας εξατίας της επιφανειακής τάσης.

2.5.2 Συγκόλληση υψηλής διείσδυσης – *keyhole*

Για πυκνότητες ισχύος τάξεως 10^6 W/m^2 και άνω, το μέταλλο που βρίσκεται κάτω από την δέσμη εξατμίζεται δημιουργώντας μια οπή της οποίας η διάμετρος είναι αντίστοιχη της διαμέτρου της προσπίπτουσας δέσμης. Το βάθος αυτής της οπής εξαρτάται από τις λειτουργικές παραμέτρους και το προς κατεργασία υλικό. Η δέσμη ηλεκτρονίων απορροφάται από την οπή, η οποία δρα σαν μέλαν σώμα και μεταδίδεται στο δοκίμιο διαμέσω των τοιχωμάτων της οπής. Οι ισόθερμες σε αυτή την περίπτωση είναι κυλινδρικές με πολύ υψηλή θερμοκρασιακή κλίση. Η συγκόλληση τεμαχίου A με B

προϋποθέτει τήξη μιας στενής ζώνης μετάλλου που βρίσκεται μεταξύ των ισόθερμων τήξης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συγκόλληση περιοχής υψηλής απορρόφησης – *keyhole* (Σχ. 2.9(β)). Στο σημείο αυτό πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι η περιοχή αυτή, που καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα τηγμένου μετάλλου, είναι γεμάτη με πλάσμα σε πίεση ελαφρά μεγαλύτερη από αυτή των τοιχωμάτων που την περιβάλλουν. Η περιοχή αυτή είναι δυναμικά σταθερή κάτω από υδροστατικές δυνάμεις του λιωμένου μετάλλου που περιβάλλει το εσωτερικό της τρύπας, της πίεσης των ατμών μέσα στην περιοχή υψηλής απορρόφησης και της επιφανειακής τάσης του τηγμένου μετάλλου. Όταν η δέσμη μετακινείται στο δοκίμιο, η εν λόγω περιοχή κινείται ωθώντας το τηγμένο από τα εμπρός στο πίσω μέρος της, όπου αυτό στερεοποιείται, δημιουργώντας την ένωση των δυο τεμαχίων.



Σχήμα 2-9 : (α) συγκόλληση με αγωγή, (β) συγκόλληση υψηλής απορρόφησης – *keyhole*

2.6 Κράματα αλουμινίου

Η επιλογή των κραμάτων αλουμινίου ως το υπό εξέταση υλικό δεν ήταν τυχαία καθώς το αλουμίνιο είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό τεχνολογικό υλικό. Το αλουμίνιο (Al) είναι το 13^o στοιχείο στον περιοδικό πίνακα. Είναι χαρακτηριστικού ασημί χρώματος με συγκεκριμένες ιδιότητες οι οποίες το καθιστούν κατάλληλο για διαφόρων ειδών κατασκευές. Τα βιομηχανικά κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται παγκοσμίως και η παραγωγή τους επηρεάζει την εκάστοτε οικονομία ⁹.

Στις δομικές και γενικά στις μεταλλικές κατασκευές συναντάται σε πολλές αρχιτεκτονικές προτάσεις, όπως στέγαστρα μεγάλων ανοιγμάτων ή στέγαστρα για πισίνες, γέφυρες, στοιχεία χημικών εργοστασίων και βιολογικών καθαρισμών, τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός σε δύσκολους χώρους (π.χ. κεραίες τηλεπικοινωνιών σε βουνά). Κλασσικό πεδίο εφαρμογής είναι οι θαλάσσιες πλατφόρμες για την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου όπου χρησιμοποιείται αλουμίνιο στις υπερκατασκευές. Στη βιομηχανία μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητα, τραίνα, αεροπλάνα, ναυτιλία), όπου το μικρότερο βάρος μεταφράζεται αυτόματα και σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων, σε καρότσες φορτηγών αυτοκινήτων, βυτία καυσίμων και αυτοκινούμενα σιλό τσιμέντου. Στη κατασκευή φορτηγών βαγονιών τραίνων για μεταφορά κάρβουνου, αλατιού και γενικά διαβρωτικών προϊόντων. Στη κατασκευή τροχαίου υλικού για τα εξαιρετικά γρήγορα σύγχρονα τραίνα. Στη ναυπήγηση σκαφών μεγάλων ταχυτήτων, όπως πολεμικών πλοίων και catamaran ².

Στην συνέχεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης των κραμάτων αλουμινίου παρατίθενται αναλυτικά παραδείγματα χρήσης τους στη βιομηχανία.

2.6.1 Αεροπορική βιομηχανία

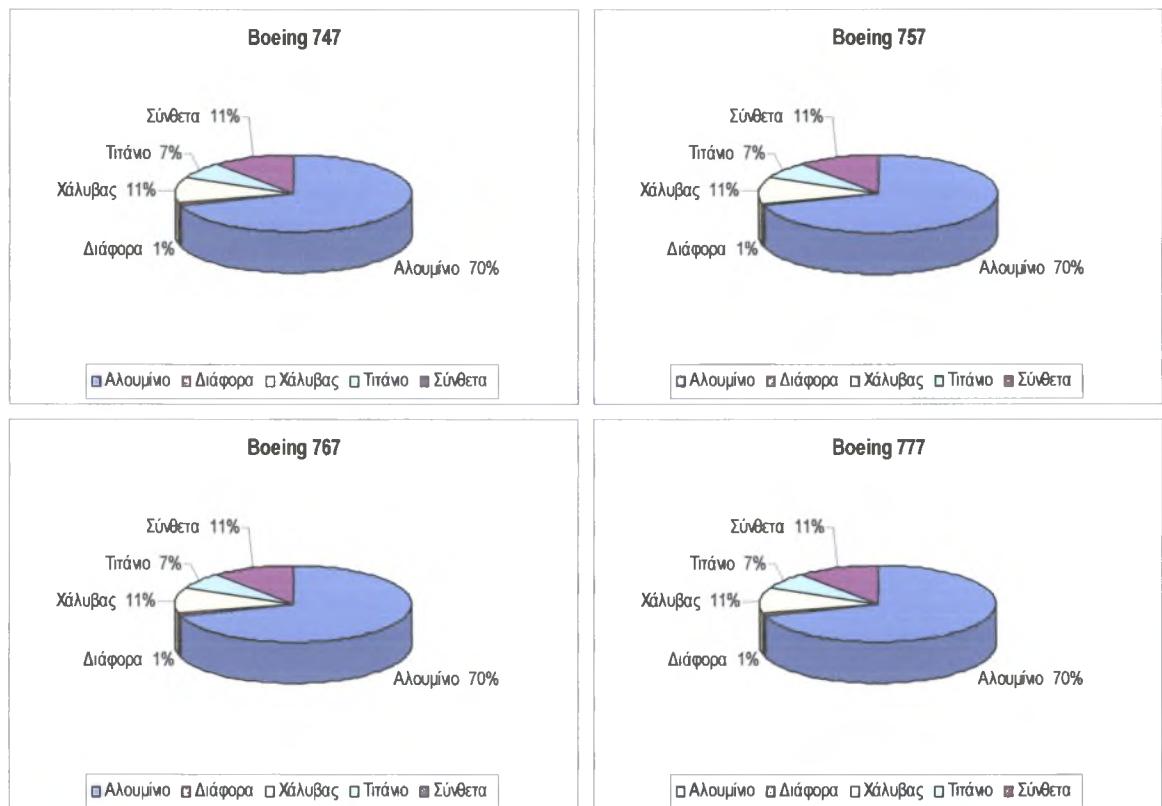


Σχήμα 2-10 : Αεροπλάνο τύπου Boeing 777¹¹.

Οι σχεδιαστές των αεροσκαφών είναι σε διαρκή αναζήτηση υλικών τα οποία θα τους επιτρέψουν τον σχεδιασμό και την υλοποίηση κατασκευών μικρού βάρους και χαμηλού κόστους, κάτι το οποίο θα επιτρέψει τη μεταφορά μεγαλύτερου ωφέλιμου φορτίου και την αντοχή σε ακραίες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, ενώ παράλληλα υψηλότερη δυνατή αντοχή σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η χρήση κραμάτων αλουμινίου στην αεροπορική βιομηχανία χρονολογείται στα 1906 μετά την τυχαία ανακάλυψη του φαινομένου της γήρανσης. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε στην ανάπτυξη ενός κράματος γνωστό ως Ντουραλουμίνιο, το οποίο γρήγορα χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του αερόπλοιου Zeppelin και του αεροσκάφους Junkers F13 το 1913. Από τότε τα κράματα αλουμινίου είναι τα κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή αεροσκαφών¹². Η επιλογή των υλικών για τις κατασκευές των αεροσκαφών εξαρτάται κάθε φορά από τις εκάστοτε λειτουργικές απαιτήσεις.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.2.11) παρουσιάζονται τα υλικά κατασκευής τεσσάρων μεταγωγικών αεροσκαφών. Είναι εμφανής η χρήση του αλουμινίου καθότι καταλαμβάνει

το μεγαλύτερο ποσοστό μεταξύ των χρησιμοποιούμενων υλικών (χάλυβας, τιτάνιο, σύνθετα υλικά).

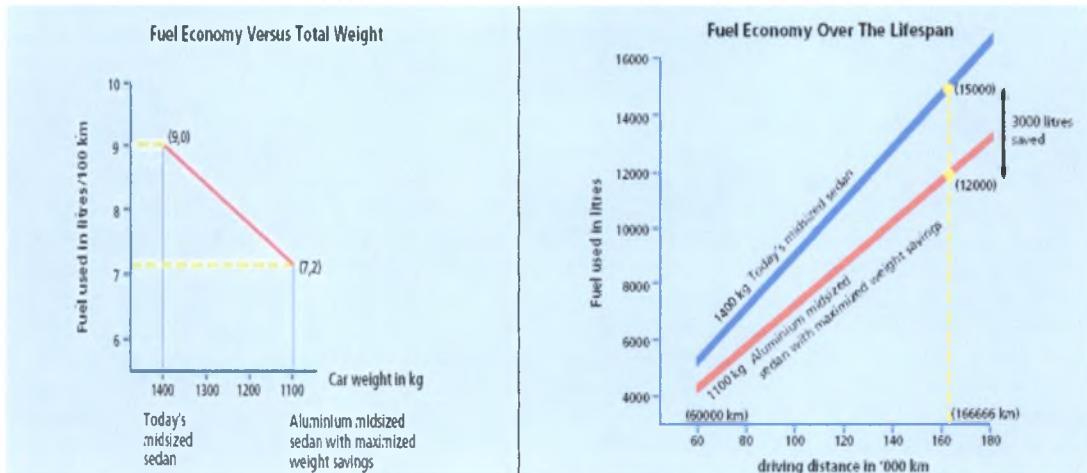


Σχήμα 2-11 : Υλικά που χρησιμοποιούνται σε επιλεγμένα μεταφορικά αεροσκάφη Boeing ¹².

2.6.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

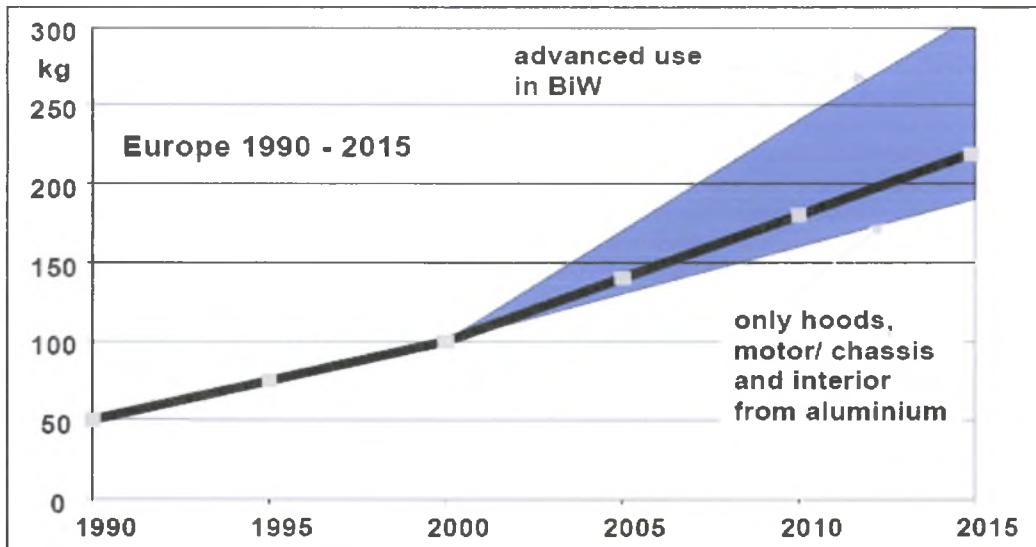
Η πρώτη προσπάθεια μείωσης του βάρουνς των αυτοκινήτων πραγματοποιήθηκε την δεκαετία του '70. Η προσπάθεια αυτή ήταν αποτέλεσμα της αύξησης της τιμής του πετρελαίου. Παράλληλα, πολλές χώρες προκειμένου να μειωθούν τα καυσαέρια των αυτοκινήτων, με τις τραγικές συνέπειες που έχουν για το περιβάλλον (φαινόμενο θερμοκηπίου, αύξηση των NO_x και SO_x κ.α.), υιοθέτησαν κατάλληλες νομοθεσίες για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Σύμφωνα με την άποψη αυτή, μία μείωση του βάρουνς του αυτοκινήτου της τάξης του 10% αντιστοιχεί σε μείωση της

κατανάλωσης καυσίμου κατά 5.5%. Στα Σχ. 2.12 (α) και (β) απεικονίζεται η εξάρτηση της οικονομίας καυσίμου από το βάρος και την χιλιομετρική απόσταση. Επιπλέον, εκτιμάται ότι για κάθε κιλό βάρους που εξοικονομείται μειώνεται η εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά 20 kg για 170000 km χιλιομετρικής απόστασης αυτοκινήτου¹².

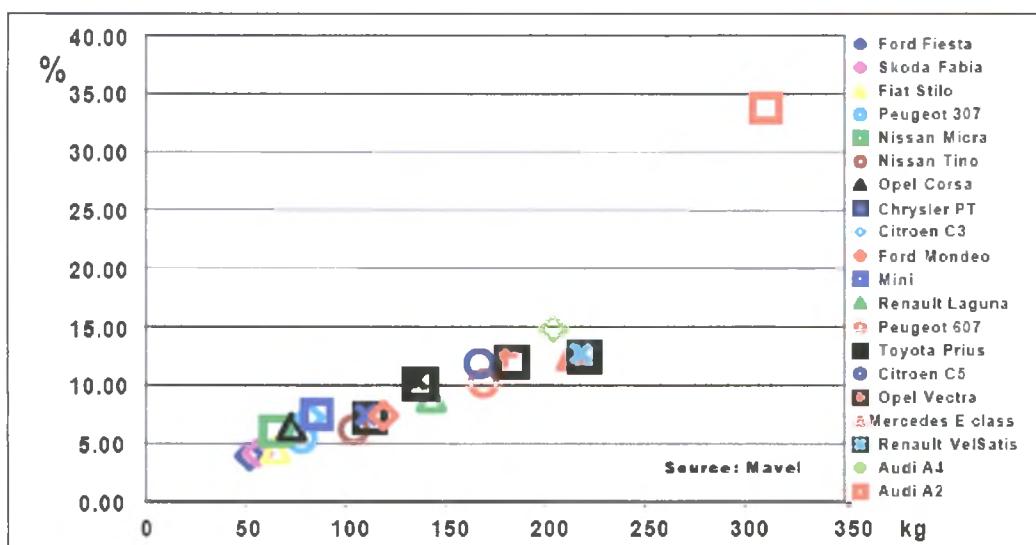


Σχήμα 2-12 : α) Οικονομία καυσίμου συναρτήσει του βάρους **β)** Οικονομία καυσίμου συναρτήσει του χρόνου ζωής¹³.

Οι παραπάνω αιτίες οδήγησαν στην κατασκευή μικρότερων σε μέγεθος οχημάτων και παράλληλα στην χρήση ελαφρύτερων υλικών, η οποία στις μέρες μας έχει λάβει μεγάλες διαστάσεις. Η προσοχή εστιάστηκε στην αντικατάσταση του χάλυβα και του χυτοσιδήρου από κράματα αλουμινίου, τα οποία οδηγούν σε μείωση του βάρους ως και 40-50%. Η μέση χρήση αλουμινίου στις ανά τον κόσμο μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες έχει συνεχώς αυξητικές τάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.13 ενώ στο σχ. 2.14 φαίνεται το ποσοστό χρήσης αλουμινίου σε μερικά ευρωπαϊκά αυτοκίνητα. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η αυξημένη χρήση αλουμινίου στο μοντέλο A₂ της Audi (40 %), ενώ στα υπόλοιπα αυτοκίνητα κυμαίνεται από 5-15 %.



Σχήμα 2-13 : Μέση χρήση κραμάτων αλουμινίου ανά αυτοκίνητο στη Δυτική Ευρώπη ¹⁴.



Σχήμα 2-14 : Ποσοστό χρησιμοποίησης αλουμινίου σε μερικά Ευρωπαϊκά μοντέλα αυτοκινήτων ¹⁴.

Ωστόσο, ένας σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας στην επιλογή κραμάτων αλουμινίου για την κατασκευή αυτοκινήτων είναι το κόστος σε σχέση με αυτό του χάλυβα ($0.7 \text{ \$/kg}$ σε σύγκριση με $3-4 \text{ \$/kg}$ για διάφορα κράματα αλουμινίου). Σε αυτοκίνητα πολυτελείας όπως είναι η Rolls Royce γίνεται εκτεταμένη χρήση κραμάτων αλουμινίου.

2.6.3 Βιομηχανία συσκευασίας¹²

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας η χρήση αλουμινίου στη βιομηχανία συσκευασίας έχει αυξηθεί σε τέτοιο ποσοστό που αποτελεί ουσιαστικά την μεγαλύτερη αγορά γι' αυτό το μέταλλο σε πολλές χώρες. Η ευρύτερη χρήση του οφείλεται στις ιδιότητες του, καθώς είναι ένα ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για συσκευασία τροφίμων και αναψυκτικών. Συγκεκριμένα έχει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση, είναι μη τοξικό, ενώ είναι αδιαπέραστο από το φως, την υγρασία και τους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κράματα τα οποία μπορούν να παρασκευαστούν εύκολα και να είναι ανακυκλώσιμα. Τα προϊόντα με την μεγαλύτερη παραγωγή και κατανάλωση είναι κουτιά για αναψυκτικά και το αλουμινόχαρτο για οικιακή χρήση.

2.6.4 Συγκολλησιμότητα κραμάτων αλουμινίου

Για ένα σημαντικό μέρος του 20ού αιώνα υπήρχε η διάχυτη αντίληψη ότι το αλουμίνιο συγκολλάται πολύ δύσκολα. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή του σε χρήσεις όπου υπερείχε ξεκάθαρα τον χάλυβα, καθυστερούσε σημαντικά².

Το 1940 ήταν το κατώφλι για το πέρασμα στις νέες τεχνολογίες συγκόλλησης του αλουμινίου. Η ανακάλυψη και η ραγδαία ανάπτυξη των μεθόδων τήξης TIG και MIG έκανε το αλουμίνιο ισότιμο με τον χάλυβα σε πολλές κατασκευαστικές εφαρμογές².

Η συγκολλησιμότητα κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες¹⁵.

- Τις συγκολλητικές ιδιότητες του κράματος :

Χημική σύσταση - Μεταλλουργικές ιδιότητες - Φυσικές ιδιότητες

- Τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις τις κατασκευής :

Σχεδιασμός - Συνθήκες φόρτισης (ακαμψία, παραμένουσες τάσεις)

- Τις συνθήκες συγκόλλησης :

Προετοιμασία για συγκόλληση - Λειτουργία συγκόλλησης - Τις κατεργασίες μετά το πέρας της συγκόλλησης.

Μερικά κράματα είναι επιφρεπή στο φαινόμενο θερμορωγμάτωσης (*hot cracking*). Κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο έχουν υψηλότερη ροπή προς το φαινόμενο της οξείδωσης προκαλώντας δυσκολίες στη να συγκολληθούν. Η εξάτμιση του Mg αντισταθμίζεται από τη χρήση συγκολλητικών υλικών με υψηλότερη περιεκτικότητα στο στοιχείο αυτό. Σε σχέση με τα μη θερμικά κατεργασμένα κράματα, τα θερμικώς κατεργασμένα (σειρά 6xxx AlMgSi, σειρά 7xxx AlZnMg) παρουσιάζουν μειωμένη συγκολλησιμότητα. Επίσης, δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πρόσθετο υλικό της ίδιας σύστασης με το μέταλλο βάσης, λόγω υψηλού ρίσκου ρηγματώσεων. Συνεπώς, μη θερμικώς κατεργασμένα προσθετικά υλικά (S-AlMg_{4,5}Mn, S-AlSi₅) χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις θερμικώς κατεργασμένων κραμάτων. Επιπλέον, η παρουσία χαλκού (σε ποσοστό >0.25%) στο κράμα μειώνει την συγκολλησιμότητα ¹⁵.

Για να πραγματοποιηθεί συγκόλληση αλουμινίου θα πρέπει πρώτα να απομακρυνθεί το στρώμα οξειδίου (Al₂O₃) το οποίο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα (βλ. § 2.3.1). Ο ένας είναι να αντιστραφεί η πολικότητα της μηχανής συγκόλλησης και να καταστεί το ηλεκτρόδιο με θετική πολικότητα και ο άλλος και πιο ενδεδειγμένος τρόπος είναι η πηγή πρόσδοσης θερμότητας να λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα που παρέχει η χρήση κραμάτων αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές, οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν και ορισμένα προβλήματα.

Χαρακτηριστικά είναι¹⁶:

- Ο σχηματισμός πορώδους

Η κύρια αιτία για την εμφάνιση πόρων είναι η προσρόφηση υδρογόνου στην λίμνη συγκόλλησης, η οποία κατά την στερεοποίηση δημιουργεί αυτούς τους πόρους (Σχ. 2.15). Η μεγαλύτερη πηγή H_2 είναι οι υδρογονάνθρακες και υδρατμοί από το προστατευτικό αέριο. Το αλουμίνιο είναι από τα μέταλλα τα οποία προσβάλλονται περισσότερο από αυτό το φαινόμενο.



Σχήμα 2-15 : Φωτογραφία με πόρους σε συγκόλληση με TIG¹⁶.

- Η ευπάθεια σε ρηγματώσεις

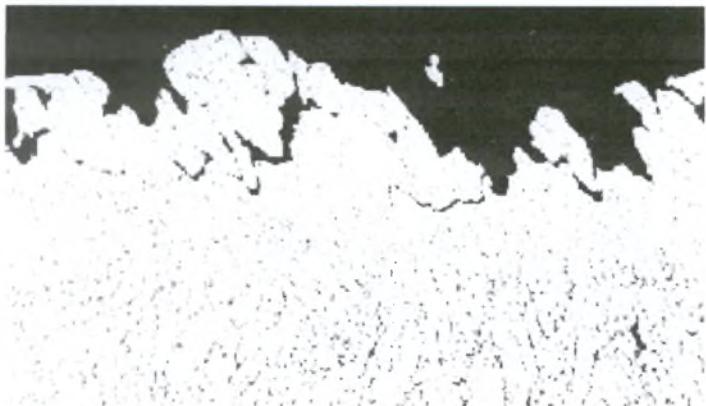
Ρωγμές εμφανίζονται στις συγκολλήσεις αλουμινίου λόγω της δημιουργίας υψηλών τάσεων κατά μήκος της συγκόλλησης που οφείλονται στη διαστολή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας (διπλάσιας από τους χάλυβες) και στη σημαντική συστολή κατά την τήξη (Σχ.2.16). Οι κύριες αιτίες ρηγμάτωσης κατά την στερεοποίηση είναι ο λάθος συνδυασμός προστιθέμενου μετάλλου και μετάλλου βάσης, η εσφαλμένη γεωμετρία συγκόλλησης και το ότι η συγκόλληση πραγματοποιείται σε πολύ περιοριστικές συνθήκες.



Σχήμα 2-16 : Φωτογραφία συγκόλλησης TIG με παρουσίαση του φαινομένου θερμορωγμάτωσης¹⁶.

- Liquefaction cracking

Συμβαίνει στην ΘΕΖ όταν χαμηλού σημείου τήξης λεπτές μεμβράνες υλικού σχηματίζονται στα όρια των κόκκων. Αυτές οι μεμβράνες δεν μπορούν να αντέξουν τις τάσεις κατά την συστολή, οι οποίες δημιουργούνται όταν το συγκόλλημένο μέταλλο στερεοποιείται και κρυώνει (Σχ.2.17). Θερμικά κατεργασμένα κράματα αλουμινίου, όπως αυτά της σειράς 6xxx και 7xxx είναι πιο επιρρεπή σε τέτοιου είδους ρωγμές.



Σχήμα 2-17 : Φωτογραφία συγκόλλησης TIG με παρουσίαση του φαινομένου liquefaction cracking¹⁶.

- Οι αλλαγές στη μικροδομή

Από την μικροδομή εξαρτώνται οι μηχανικές ιδιότητες (π.χ σκληρότητα) των κραμάτων αλουμινίου. Με την συγκόλληση εισάγεται στο έλασμα θερμικό φορτίο το οποίο διαταράσσει την ισορροπία στη μικροδομή, στις περιοχές της λίμνης συγκόλλησης και της ΘΕΖ. Συνεπώς, επιθυμητή είναι εκείνη η μέθοδος συγκόλλησης, η οποία κατά το δυνατόν δεν επιφέρει δραστικές αλλαγές.

3.1 Σκοπός - Στόχος

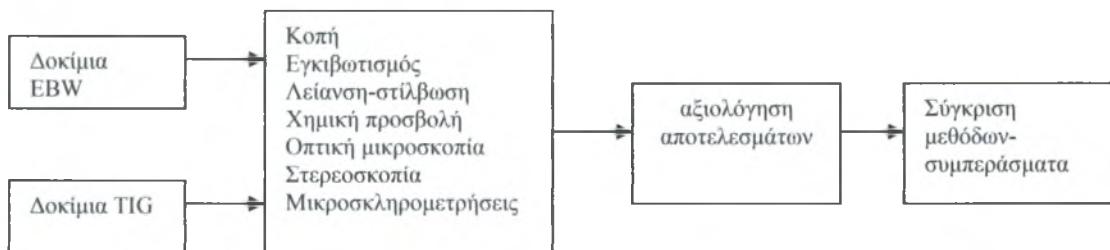
Αντικείμενο της εργασίας ήταν η εφαρμογή των μεθόδων EBW και TIG αμφότερες στο κράμα αλουμινίου 6061.

Τα πειράματα που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούσαν συγκολλήσεις bead-on-plate. Σ' αυτή την περίπτωση δεν γίνεται προσπάθεια συγκόλλησης αλουμινίου αλλά μόνο περάσματα της δέσμης πάνω από ένα πλακίδιο. Στην πράξη, πριν επιχειρηθεί μια συγκόλληση πραγματοποιούνται τέτοιου είδους πειράματα με τη διεξαγωγή των οποίων καταλήγει κανείς στις βέλτιστες συνθήκες τις οποίες θα χρησιμοποιήσει τελικά για την συγκόλληση. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία εφαρμογής μεθόδου συγκόλλησης προκειμένου να προσδιοριστεί το κατάλληλο εύρος πειραματικών συνθηκών για παραγωγή συγκολλήσεων ικανοποιητικής ποιότητας.

Σκοπός ήταν:

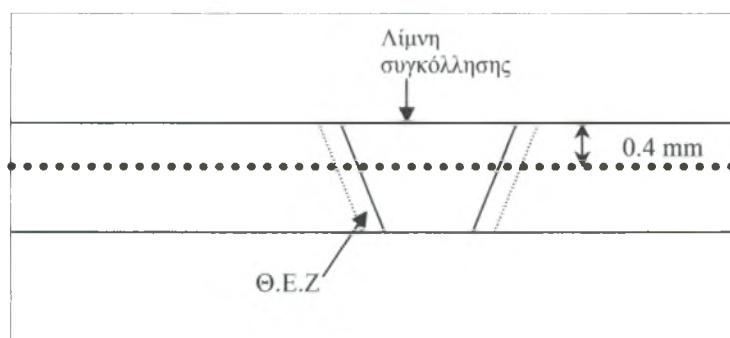
- Ο προσδιορισμός της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων της κάθε διεργασίας (ισχύς, ταχύτητα δέσμης, σημείο εστίασης) στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διείσδυση, πλάτος ραφής) και στην σκληρότητα των συγκολλημένων υλικών.
- Η συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμών με τις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες.
- Αξιολόγηση της ποιότητας των συγκολλήσεων.
- Σύγκριση των δυο μεθόδων.
- Παραγωγή πειραματικών δεδομένων για χρήση σε προσομοιώσεις θερμοκρασιακών πεδίων και μικροδομής.

Σε πρώτο στάδιο αξιολογήθηκαν τα έτοιμα δείγματα συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην EAB με την μέθοδο EBW. Στη συνέχεια, μετά από μια περίοδο προσαρμογής του γράφοντος, πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με την μέθοδο TIG σε διάφορες συνθήκες με χρήση της μηχανής συγκόλλησης που έχει το Εργαστήριο Υλικών. Στο επόμενο σχήμα (Σχ.3.1) απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της εργασίας.



Σχήμα 3-1 : Διάγραμμα ροής της διπλωματικής εργασίας.

Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια που είχαν προετοιμαστεί για μεταλλογραφικό έλεγχο. Οι μετρήσεις έγιναν σε μεταλλογραφική τομή παράλληλα προς την κατεργαζόμενη επιφάνεια και σε απόσταση 0.4 mm από την επιφάνεια της συγκόλλησης με φορτίο 200 gr εφαρμοζόμενο για 15 sec. Σχηματική παράσταση του τρόπου μέτρησης φαίνεται στο Σχ.3.2.



Σχήμα 3-2 : Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου μικροσκληρομέτρησης
3.2 Υλικό βάσης

Το υλικό που αποτέλεσε το αντικείμενο μελέτης ήταν το κράμα αλουμινίου 6061-

T6 του οποίου η χημική ανάλυση φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3-1 : Χημική ανάλυση (%) κβ) του κράματος 6061.

ΥΛΙΚΟ Κράμα αλουμινίου 6061	Χημική Σύσταση %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr
	0.637	0.4023	0.2688	0.0368	0.877	0.089	0.0056	0.1944
	Pb	Sn	Ti	P	V	Zr	Al	
	0.0013	0.002	0.0187	0.001	0.0098	0.002	97.5	

Η θερμική κατεργασία T6 αντιστοιχεί στην θερμική κατεργασία της τεχνητής γήρανσης κατά την οποία προσδίδεται στο κράμα υψηλή αντοχή μέσω ανάπτυξης λεπτομερούς διασποράς σωματιδίων στην μήτρα του κράματος αλουμινίου και συγκεκριμένη η εν λόγω φάση είναι η β-Mg₂Si

3.3 Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (*heat input*) ¹²

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να οριστεί ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας.

Με τον υπολογισμό του P.P.Θ μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για την ποιότητα των συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τις δυο μεθόδους.

Σε μια συγκόλληση γίνεται πρόσδοση ενέργειας από μια κατάλληλη πηγή στο υλικό και η πηγή ενέργειας πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί πλήρης διείσδυση της ζώνης τήξης. Ωστόσο, είναι επιτακτικό να προσδιοριστούν οι παράμετροι προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος της ζώνης τήξης και της ΘΕΖ.

Για το λόγο αυτό ορίζεται ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (*heat input*) που ισούται με :

$$n = \frac{Q}{u} \quad [J / mm] \quad (3.1)$$

3.4 Πειραματικές συνθήκες EBW

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε μορφή πλακιδίων διαστάσεων 100x100x2.5 mm. Για την διενέργεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η EBW της EAB με τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Σχ.3.3).

Μοντέλο: Sciaky VX.3-68x68x84

Ισχύς : 30 KW, 60 KV gun

Μέγεθος θαλάμου : 68" x 68" x 84"

Διαδρομή αξόνων : Διαμήκης 42", Εγκάρσιος 28", Κάθετος 30"

Έλεγχος με το υπολογιστικό πρόγραμμα W2000.

Επιτρέπει ακρίβεια ±1%

Υλικά που συγκολλούνται : Ανοξείδωτοι χάλυβες, κράματα νικελίου, κοβαλτίου, τιτανίου

Σχήμα 3-3 : Χαρακτηριστικά μηχανής EB της EAB

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες για τα δοκίμια που μελετήθηκαν. Εξετάστηκαν η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης και της θέσης του σημείου εστίασης (0: πάνω στην επιφάνεια και -1: 1mm κάτω από την επιφάνεια), καθώς και της έντασης ρεύματος σε κάθε δείγμα.

Πίνακας 3-2 : Πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης EB

Α ΟΜΑΔΑ Ρ.Π.Θ. = 34 J/mm			Β ΟΜΑΔΑ Ρ.Π.Θ = 54 J/mm			C ΟΜΑΔΑ Ρ.Π.Θ = 64 J/mm		
Ισχύς (W)	Ταχύτητα mm/min	Σημείο 'Εστίασης	Ισχύς (W)	Ταχύτητα mm/min	Σημείο 'Εστίασης	Ισχύς (W)	Ταχύτητα mm/min	Σημείο 'Εστίασης
1125	2000	0	1800	2000	0	2133	2000	0
562.5	1000	0	900	1000	0	1066	1000	0
281.25	500	0	450	500	0	533	500	0
141	250	0	225	250	0	270	250	0
1125	2000	-1	1800	2000	-1	2133	2000	-1
562.5	1000	-1	900	1000	-1	1066	1000	-1
281.25	500	-1	450	500	-1	533	500	-1
141	250	-1	225	250	-1	270	250	-1

3.5 Πειραματικές συνθήκες TIG

Τα πειράματα που εκτελέστηκαν γι' αυτή τη μέθοδο ήταν συγκολλήσεις ίδιου τύπου με τις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την EBW. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μηχανή συγκόλλησης του εργαστηρίου (Σχ.3.4). Το υλικό και οι διαστάσεις του ήταν ίδιες με τα δοκίμια που μελετήθηκαν για την EBW. Όλες οι διαδικασίες ελέγχου περιλάμβαναν τα στάδια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι πειραματικές συνθήκες της συγκόλλησης TIG που αφορούν την προσδιδόμενη τάση και ένταση ρεύματος από τη μηχανή συγκόλλησης και την παροχή αερίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε προστιθέμενο μέταλλο.

Πίνακας 3-3 : Πειραματικές συνθήκες της συγκόλλησης TIG.

ΤΑΣΗ [V]	ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ [A°]	ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΙΟΥ [lt / min]	ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΟ ΜΕΤΑΛΛΟ
80	90	12	ΟΞΙ
80	80	10	ΟΞΙ
80	70	7	ΟΞΙ

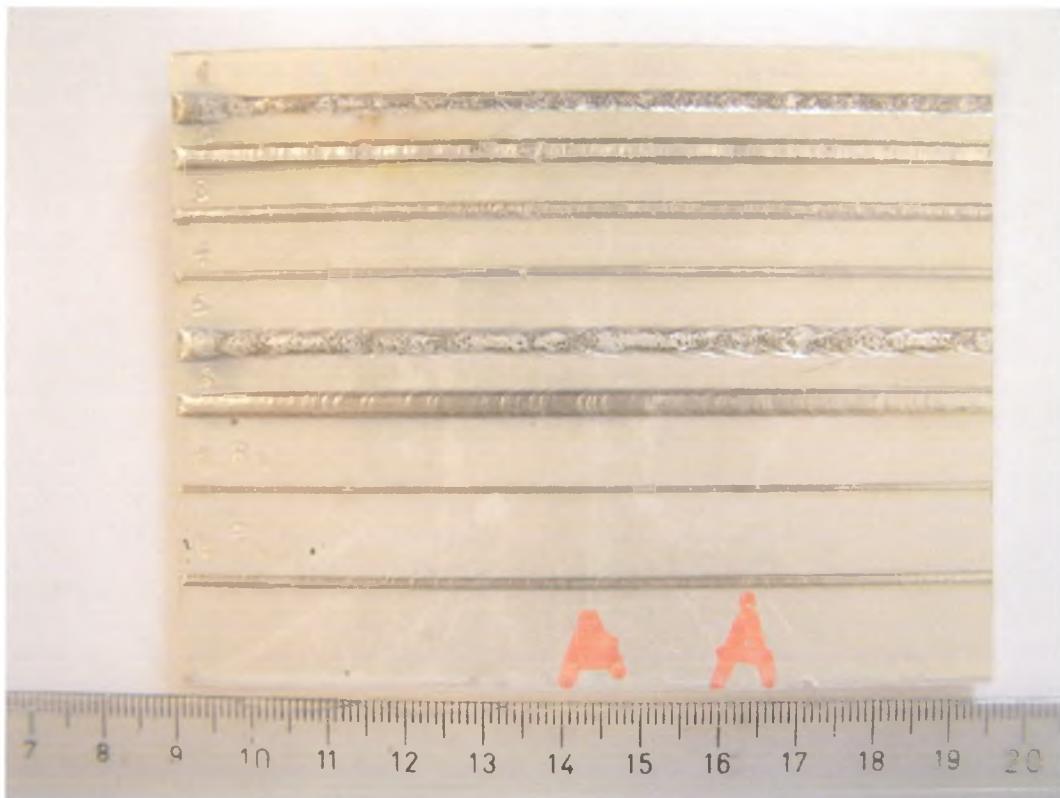


Σχήμα 3-4 : Μηχανή συγκόλλησης TIG του εργαστηρίου.

Κεφάλαιο 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 E.B.W.

Με την μέθοδο αυτή έγιναν 24 περάσματα ανά 8 πάνω σε τρία πλακίδια διαστάσεων 100x100x2.5 mm, όπως φαίνεται στο Σχ.4.1. Έτσι, μελετήθηκαν ουσιαστικά 3 ομάδες περασμάτων. Οι συνθήκες του εκάστοτε περάσματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2. Στην συνέχεια μελετήθηκε κάθε ομάδα ξεχωριστά. Βρέθηκε κάθε φορά ο Ρυθμός Πρόσδοσης Θερμότητας, ο λόγος w/d (πλάτος / βάθος διείσδυσης) και έγιναν προφίλ μικροσκληρότητας για κάποιο δοκίμια της κάθε ομάδας. Στην συνέχεια, έγινε συσχέτιση με τις πειραματικές συνθήκες.



Σχήμα 4-1 : Πλακίδιο με περάσματα ΕΒ της Α ομάδας.

4.1.1 Α' ομάδα πειραμάτων

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πίνακας 4-1 : Συσχέτιση Ρ.Π.Θ. με συνθήκες συγκόλλησης.

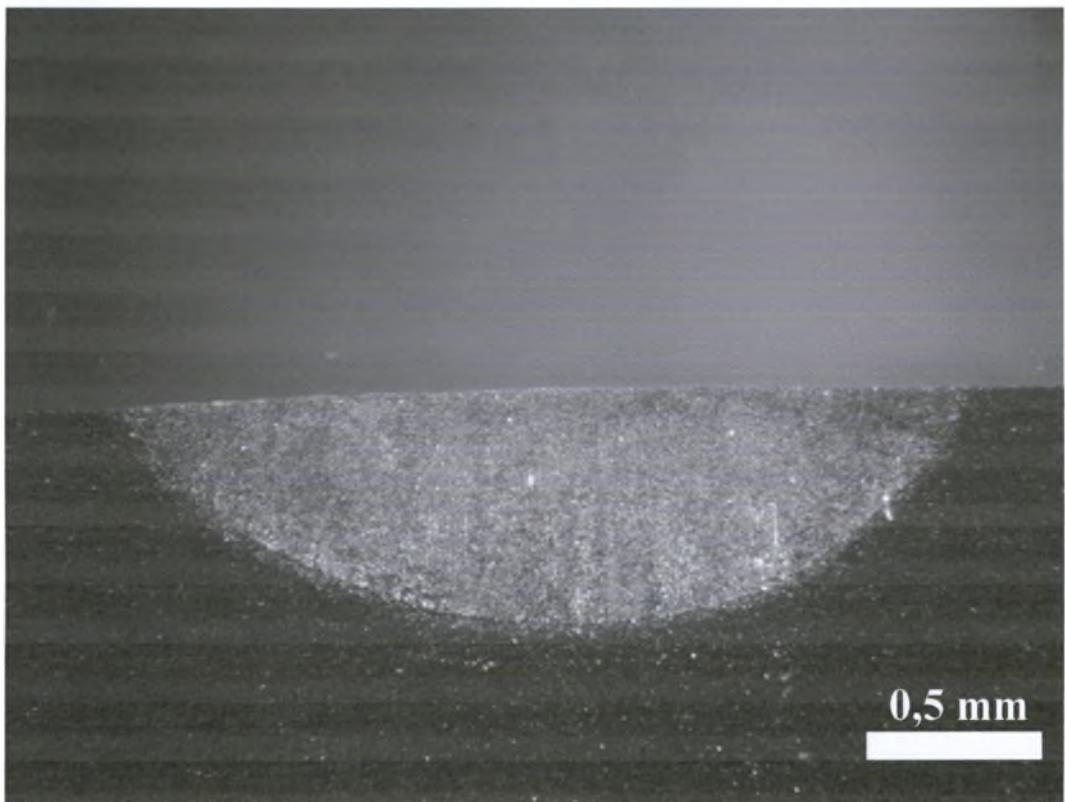
A/A	ΙΣΧΥΣ [W]	Ταχύτητα u [mm/min]	Σημείο Εστίασης [mm]	Ρ.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]
A1	1125	2000	0	34
A2	562.5	1000	0	34
A3	281.25	500	0	34
A4	141	250	0	34
A5	1125	2000	-1	34
A6	562.5	1000	-1	34
A7	281.25	500	-1	34
A8	141	250	-1	34

Πίνακας 4-2 : Πίνακας συσχέτισης Α ομάδας heat input,, πλάτους και βάθους Λ.Σ

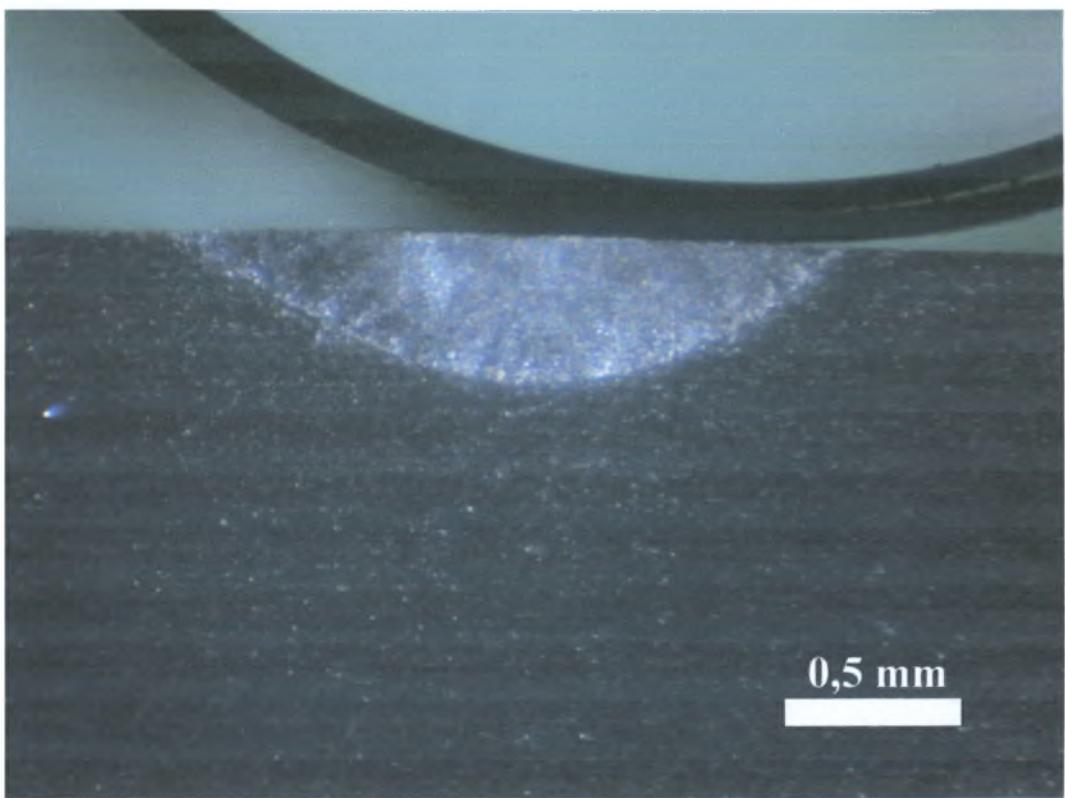
A/A	Ρ.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]	Πλάτος w [mm]	Βάθος d [mm]	w / d [-]
A1	34	2,29	0,69	3,32
A2	34	1,42	0,44	3,23
A3	34	0,54	0,13	4,15
A4	34			
A5	34	1,83	0,38	4,82
A6	34	1,08	0,25	4,32
A7	34			
A8	34	0,38	0,06	6,33

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται, για κάθε ένα πέρασμα ξεχωριστά το πλάτος, το βάθος και ο λόγος πλάτους / βάθους της λίμνης συγκόλλησης καθώς και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας. Το χαρακτηριστικό της ομάδας αυτής ήταν ο σταθερός μεν άλλα αρκετά μικρός ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας. Σε μερικά δοκίμια το πλάτος και το βάθος διείσδυσης ήταν τόσο μικρά που δεν ήταν μετρήσιμα. Κύρια αιτία υπήρξε η πολύ μικρή προσδιδόμενη ισχύς Επίστης, παρατηρείται μια εν γένει καλύτερη συμπεριφορά της μεθόδου, σ' αυτή την πειραματική ομάδα, με την θέση του σημείου εστίασης στο 0.

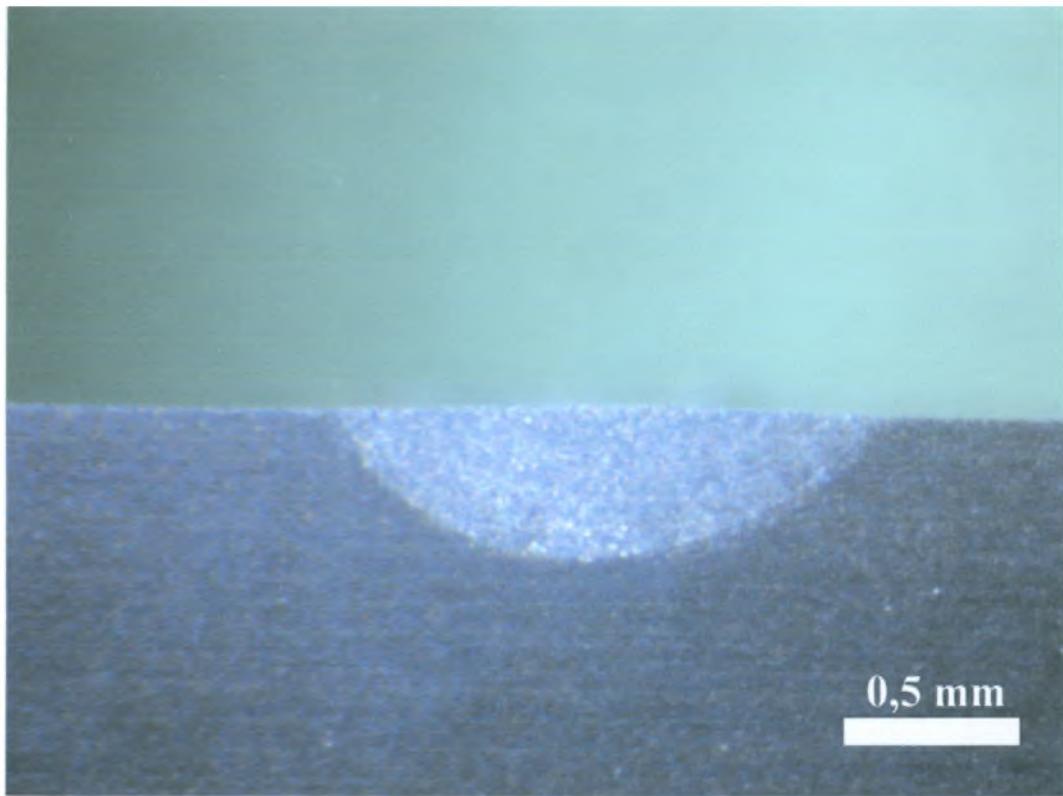
Στις παρακάτω φωτογραφίες (4.2 – 4.9) παρουσιάζονται τα δοκίμια της ομάδας A που φωτογραφήθηκαν στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου. Στα δοκίμια αναγράφονται οι συνθήκες συγκόλλησης (ισχύς, ταχύτητα, σημείο εστίασης). Μάλιστα παρουσιάζονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να γίνει μια σύγκριση δυο δοκιμίων με ίδιες συνθήκες πραγματοποίησης συγκόλλησης άλλα με διαφορετικό σημείο εστίασης.



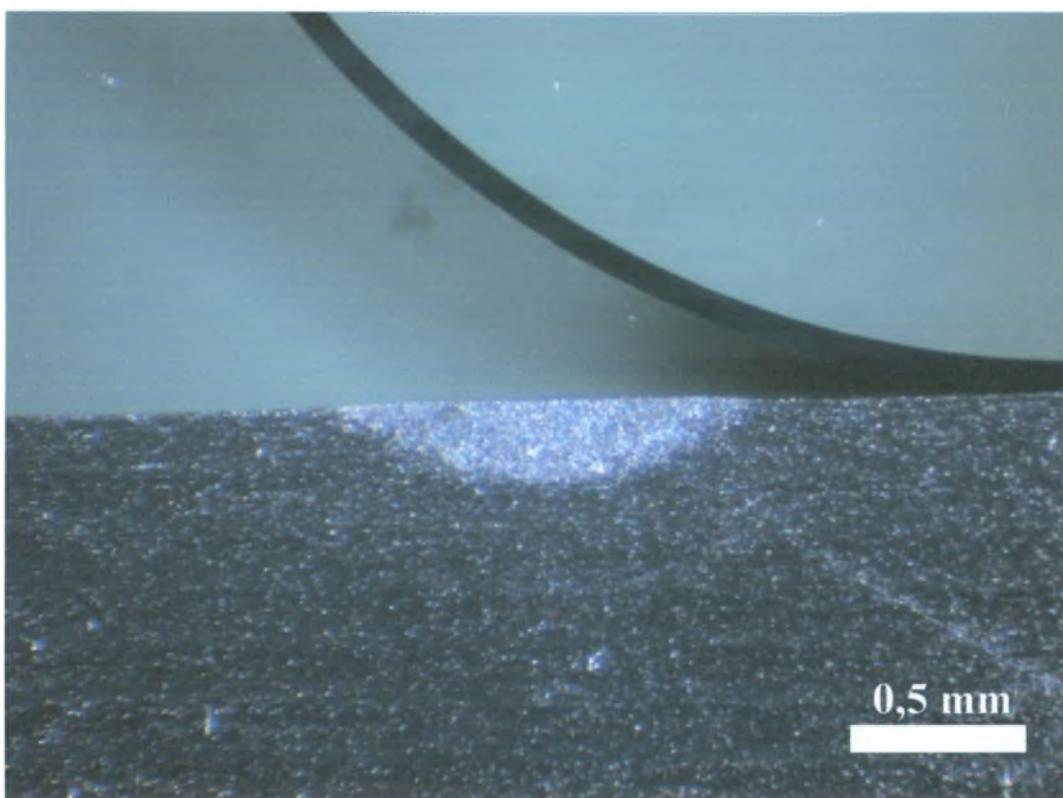
Σχήμα 4-2 : Φωτογραφία δοκιμίου A1 ($W=1125\text{ W}$, $u=2000\text{ mm/min}$, focal point 0).



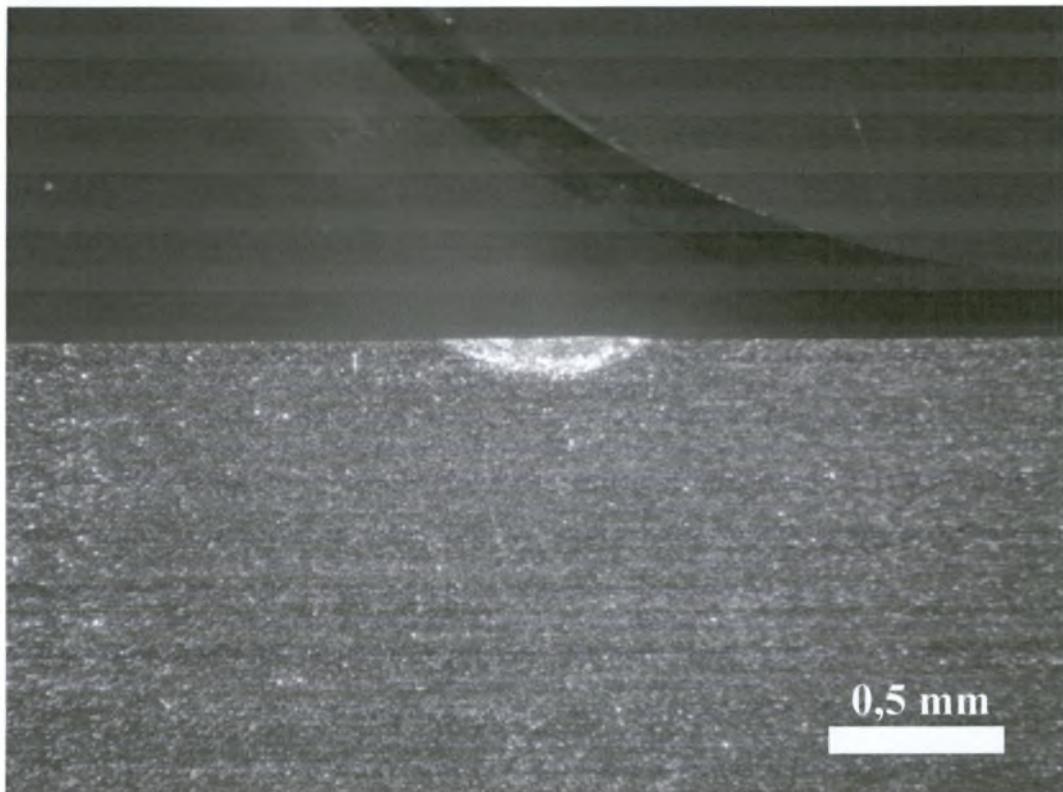
Σχήμα 4-3 : Φωτογραφία δοκιμίου A5 ($W=1125\text{ W}$, $u=2000\text{ mm/min}$, focal point -1).



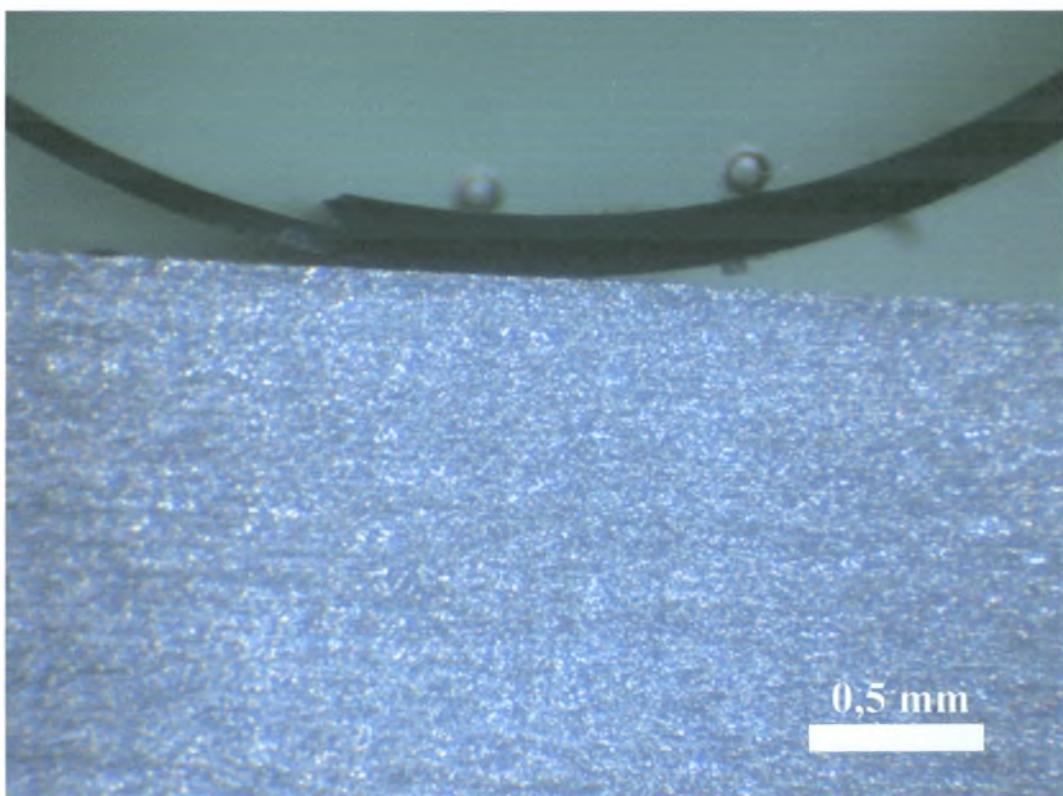
Σχήμα 4-4 : Φωτογραφία δοκιμίου A2 (W=562.5 W, u=1000 mm/min, focal point 0).



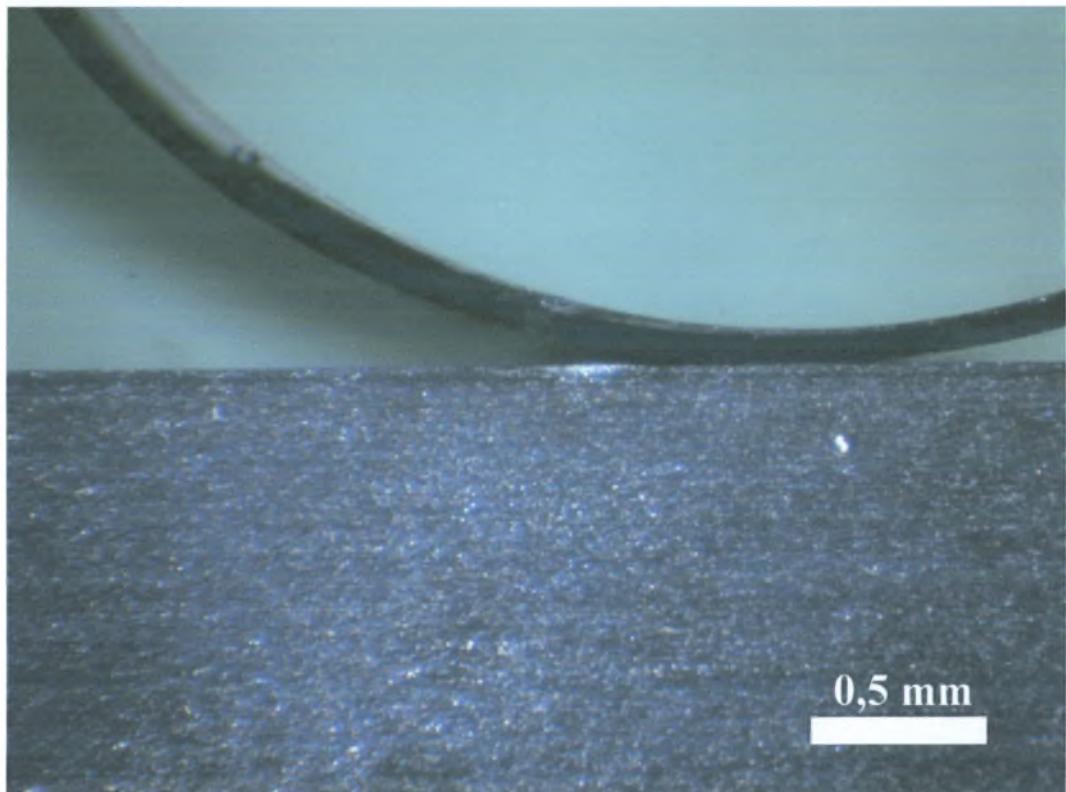
Σχήμα 4-5 : Φωτογραφία δοκιμίου A6 (W=562.5 W, u=1000 mm/min, focal point -1).



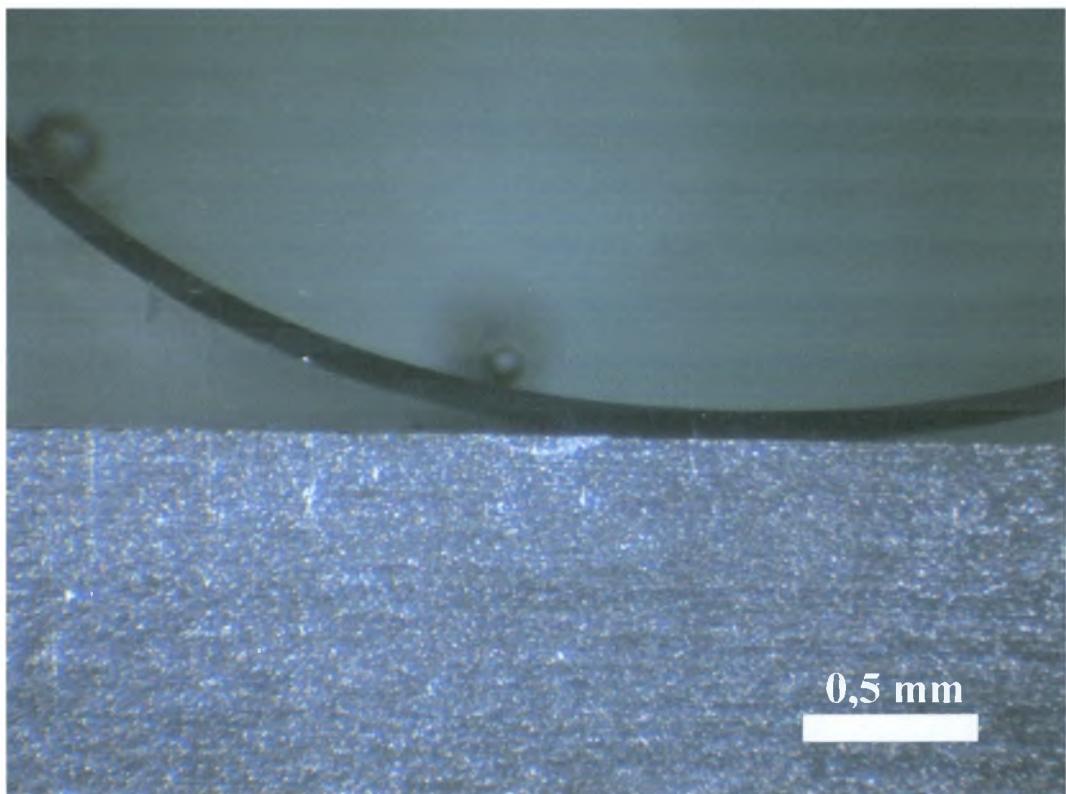
Σχήμα 4-6 : Φωτογραφία δοκιμίου A3 (W=281.25 W, u=500 mm/min, focal point 0).



Σχήμα 4-7 : Φωτογραφία δοκιμίου A7 (W=281.25 W, u=500 mm/min, focal point -1).



Σχήμα 4-8 : Φωτογραφία δοκιμίου A4 ($W=141\text{ W}$, $u=250\text{ mm/min}$, focal point 0).



Σχήμα 4-9 : Φωτογραφία δοκιμίου A8 ($W=141\text{ W}$, $u=250\text{ mm/min}$, focal point -1).

4.1.2 Β' ομάδα πειραμάτων

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πίνακας 4-3 : Συσχέτιση Ρ.Π.Θ. με συνθήκες συγκόλλησης.

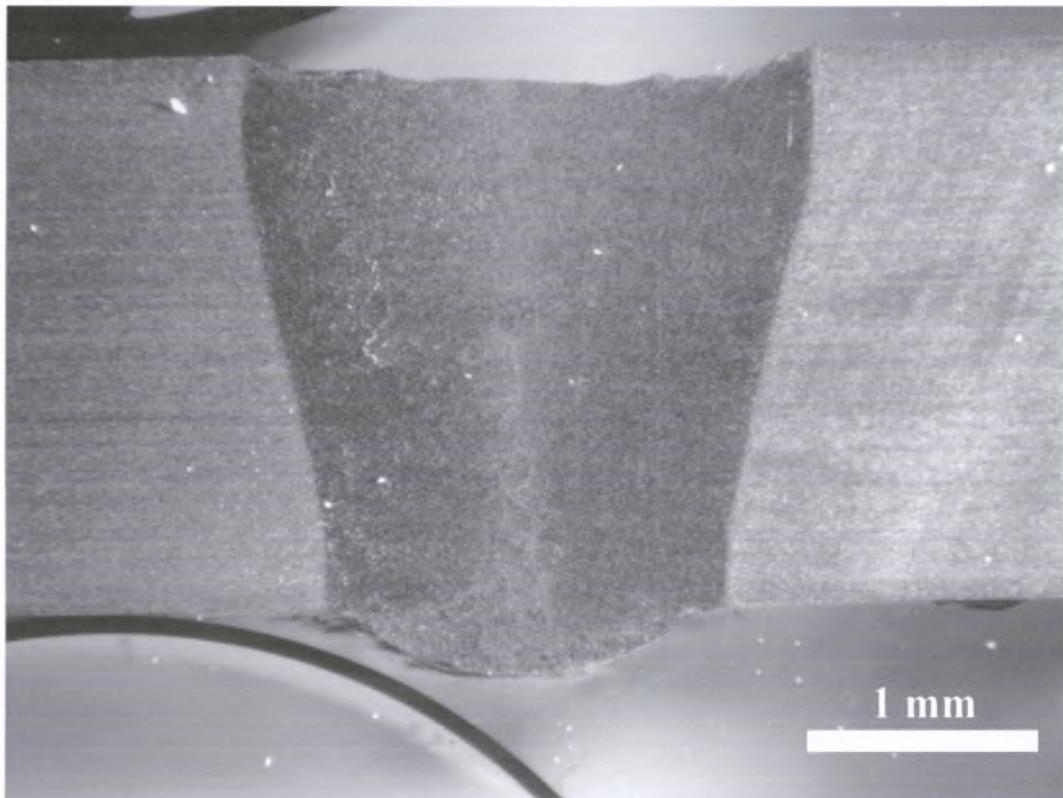
A/A	IΣΧΥΣ [W]	Ταχύτητα u [mm/min]	Σημείο Εστίασης [mm]	P.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]
B1	1800	2000	0	54
B2	900	1000	0	54
B3	450	500	0	54
B4	225	250	0	54
B5	1800	2000	-1	54
B6	900	1000	-1	54
B7	450	500	-1	54
B8	225	250	-1	54

Πίνακας 4-4 : Πίνακας συσχέτισης Β ομάδας heat input,, πλάτους και βάθους Λ.Σ. (τα * υποδηλώνουν τα περάσματα πλήρους διείσδυσης).

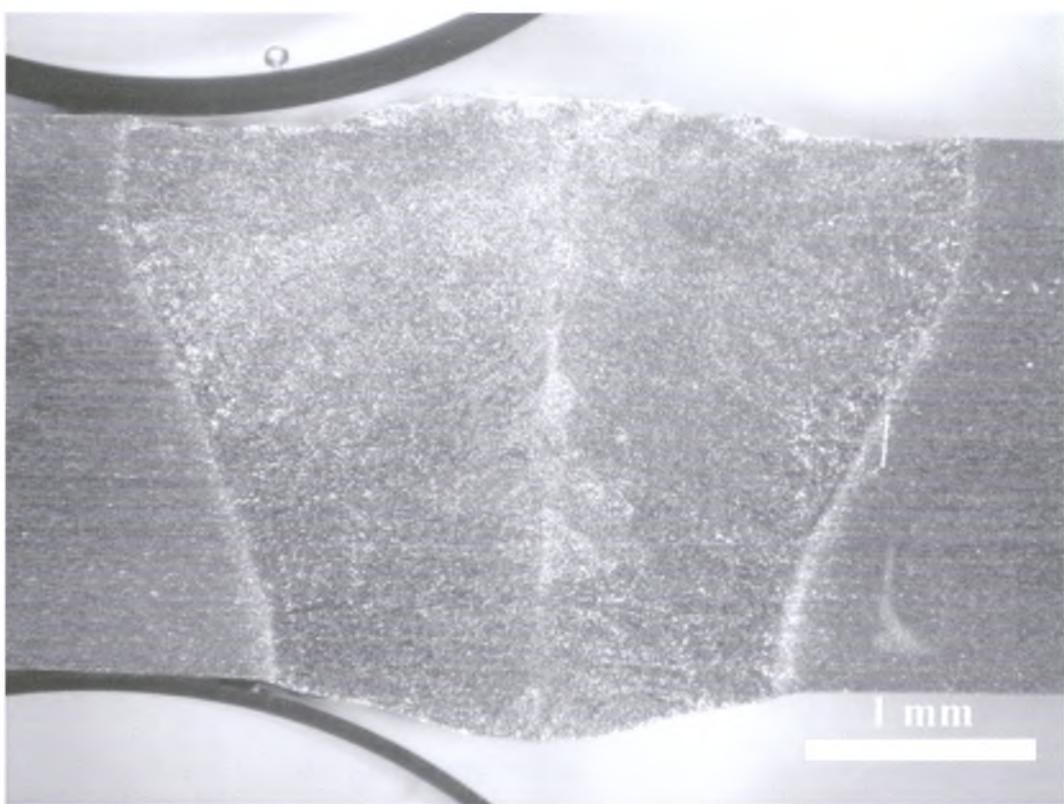
A/A	P.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]	Πλάτος w [mm]	Βάθος d [mm]	w / d [-]
B1*	54	2.44	2.5	0.98
B2	54	3.39	1.44	2.35
B3	54	2.36	1.75	1.35
B4	54	1.55	0.82	1.89
B5*	54	3.67	2.5	1.47
B6	54	3.83	1.31	2.92
B7	54	1.89	0.80	2.36
B8	54	1.22	0.37	3.30

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται, για κάθε ένα πέρασμα ξεχωριστά το πλάτος, το βάθος και ο λόγος πλάτους / βάθους της λίμνης συγκόλλησης, καθώς και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας. Από τον πίνακα αυτό μπορεί να διαπιστωθεί ότι, παρότι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας για κάθε πέρασμα διατηρείται σταθερός, δεν πραγματοποιήθηκε πλήρης διείσδυση σε όλα τα δοκίμια παρά μόνο στα B_1 και B_5 . Τα κοινά χαρακτηριστικά των συνθηκών των δύο αυτών δοκιμών, όπως θα διαπιστωθεί και στα σχήματα 4.10 και 4.11 ήταν η ισχύς και η ταχύτητα. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποίησε τα περάσματα ήταν το σημείο εστίασης (0 και -1 αντίστοιχα). Το χαρακτηριστικό το οποίο συντέλεσε στην μη πλήρη διείσδυση των υπολοίπων περασμάτων ήταν η μικρή πρόσδοση θερμότητας από το *electron gun*. Επίσης παρατηρείται μια εν γένει καλύτερη συμπεριφορά της μεθόδου, σ' αυτή την πειραματική ομάδα με την θέση του σημείου εστίασης στο 0.

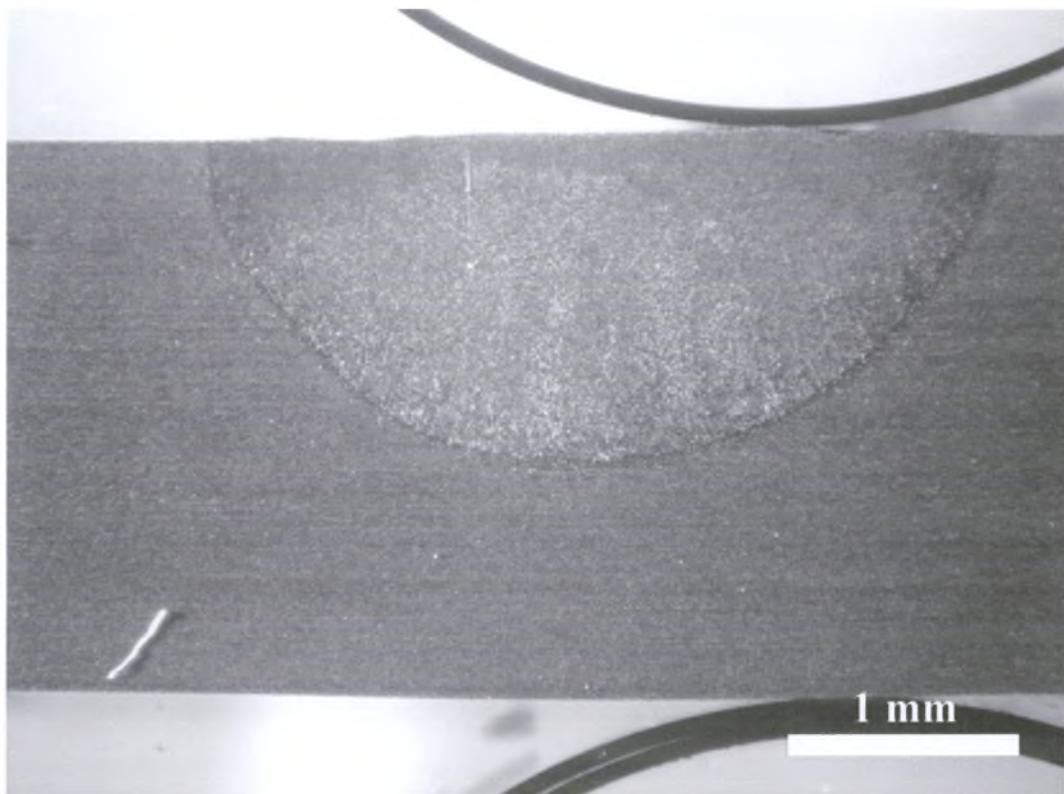
Στις παρακάτω φωτογραφίες (4.10 – 4.17) παρουσιάζονται τα δοκίμια της ομάδας Β που φωτογραφήθηκαν στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου. Στα δοκίμια αναγράφονται οι συνθήκες συγκόλλησης (ισχύς, ταχύτητα, σημείο εστίασης). Μάλιστα παρουσιάζονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να γίνει μια σύγκριση δυο δοκιμών με ίδιες συνθήκες πραγματοποίησης συγκόλλησης άλλα με διαφορετικό σημείο εστίασης.



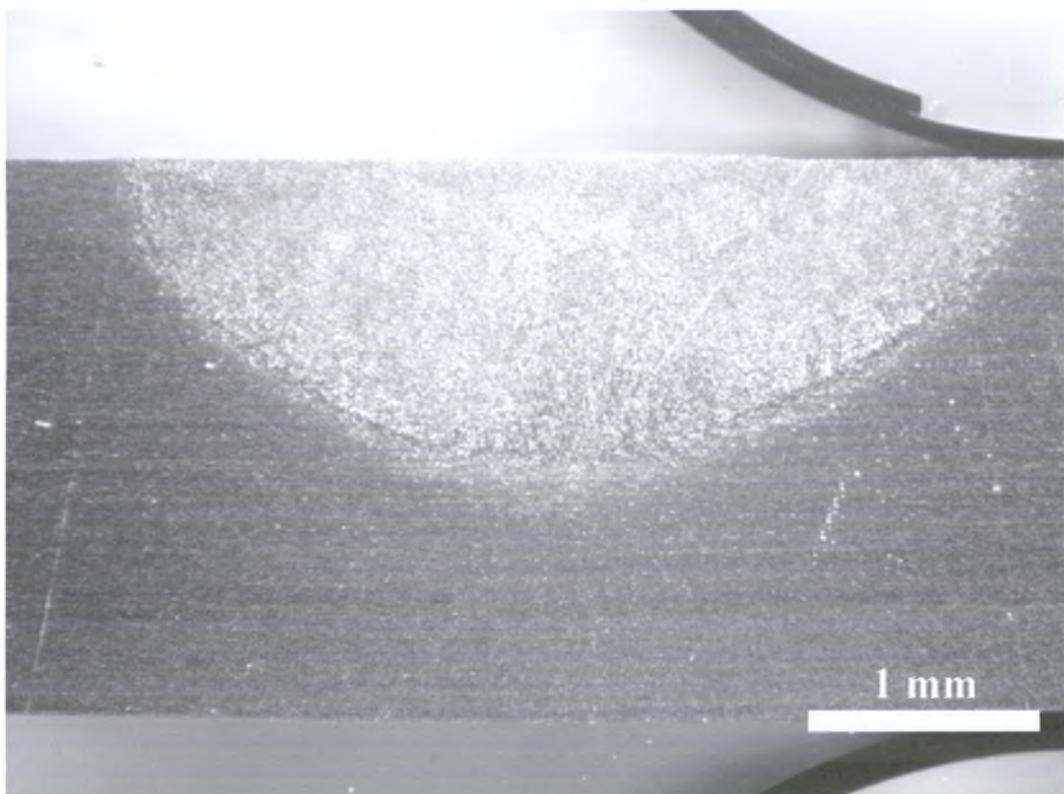
Σχήμα 4-10 : Φωτογραφία δοκιμίου B1 (W=1800 W, u=2000 mm/min, focal point 0).



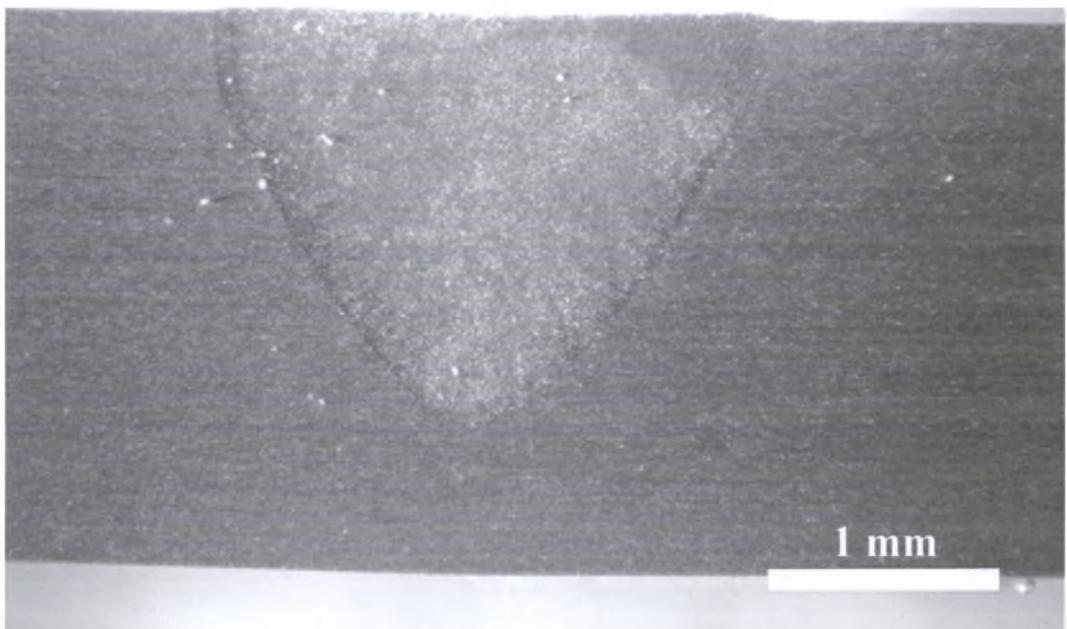
Σχήμα 4-11 : Φωτογραφία δοκιμίου B5 (W=1800 W, u=2000 mm/min, focal point -1).



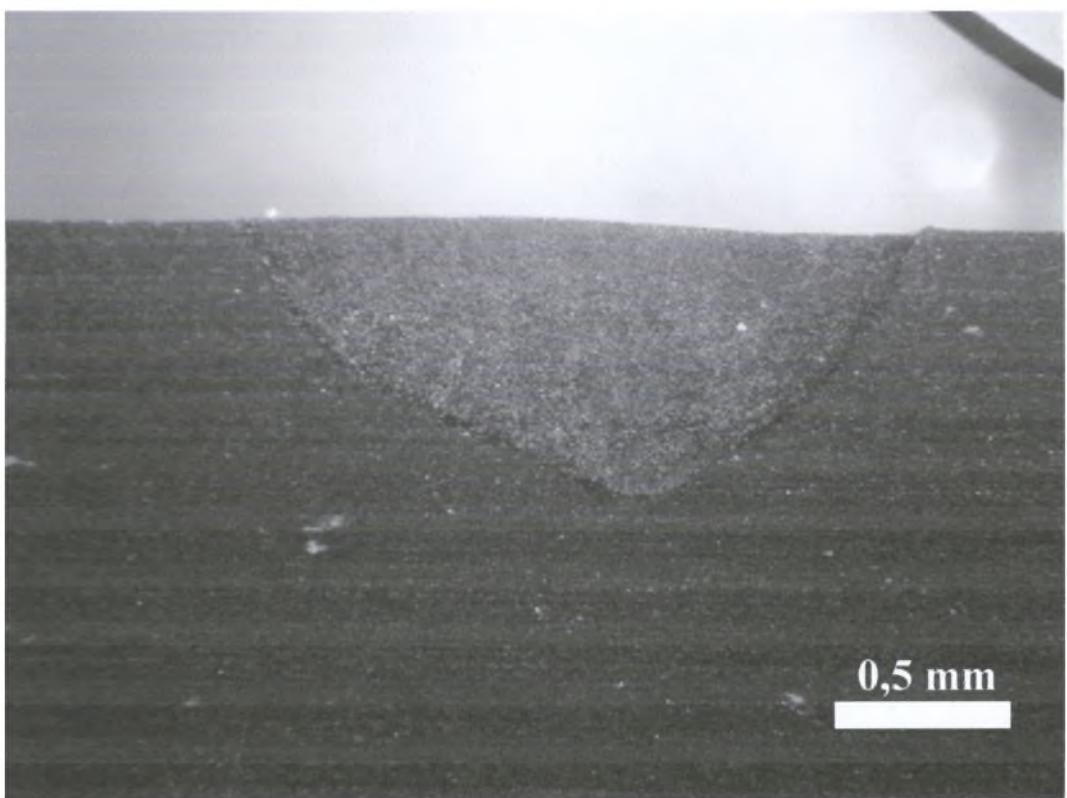
Σχήμα 4-12 : Φωτογραφία δοκιμίου B2 ($W=900\text{ W}$, $u=1000\text{ mm/min}$, focal point 0).



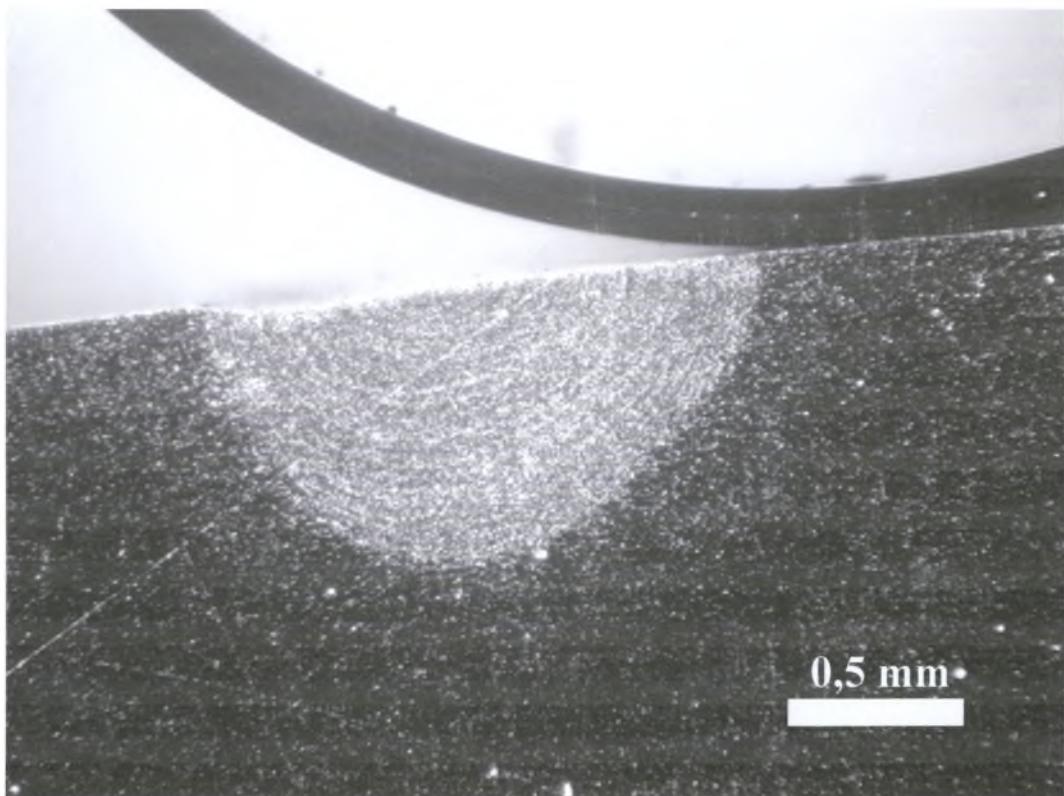
Σχήμα 4-13 : Φωτογραφία δοκιμίου B6 ($W=900\text{ W}$, $u=1000\text{ mm/min}$, focal point -1).



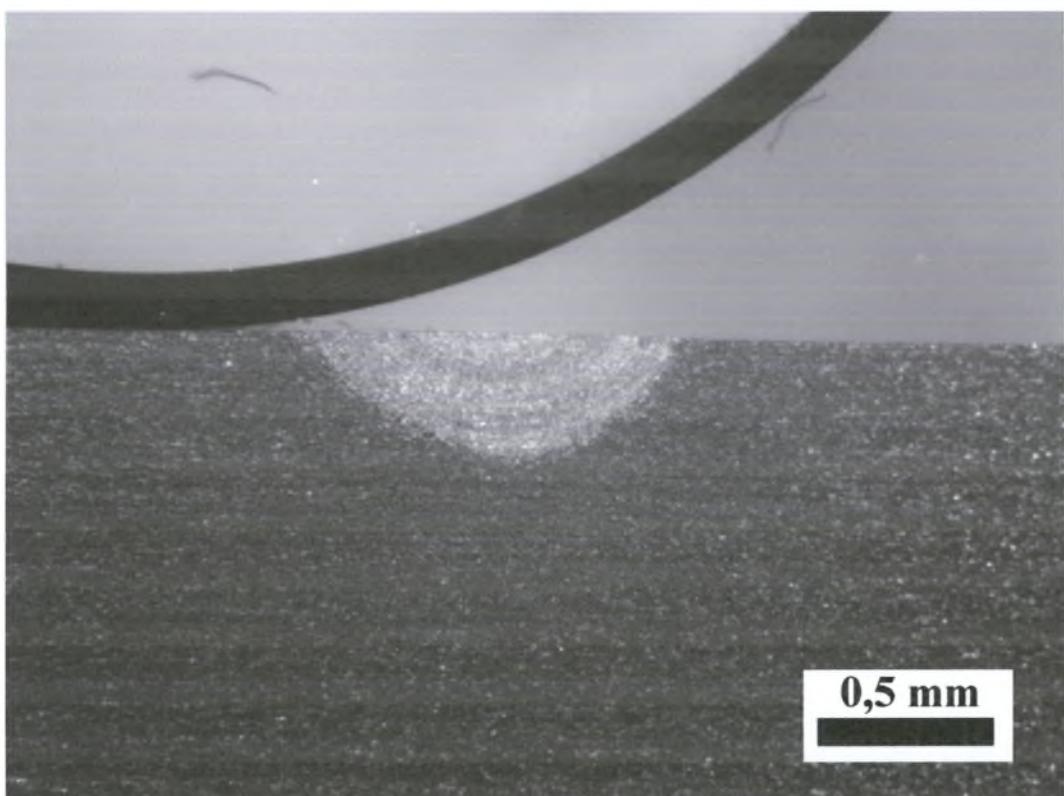
Σχήμα 4-14 : Φωτογραφία δοκιμίου B3 (W=450 W, u=500 mm/min, focal point 0).



Σχήμα 4-15 : Φωτογραφία δοκιμίου B7 (W=450 W, u=500 mm/min, focal point -1).



Σχήμα 4-16 : Φωτογραφία δοκιμίου B4 (W=225 W, u=250 mm/min, focal point 0).



Σχήμα 4-17 : Φωτογραφία δοκιμίου B8 (W=225 W, u=250 mm/min, focal point -1).

4.1.3 C' ομάδα πειραμάτων

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πίνακας 4-5 : Συσχέτιση Ρ.Π.Θ. με συνθήκες συγκόλλησης.

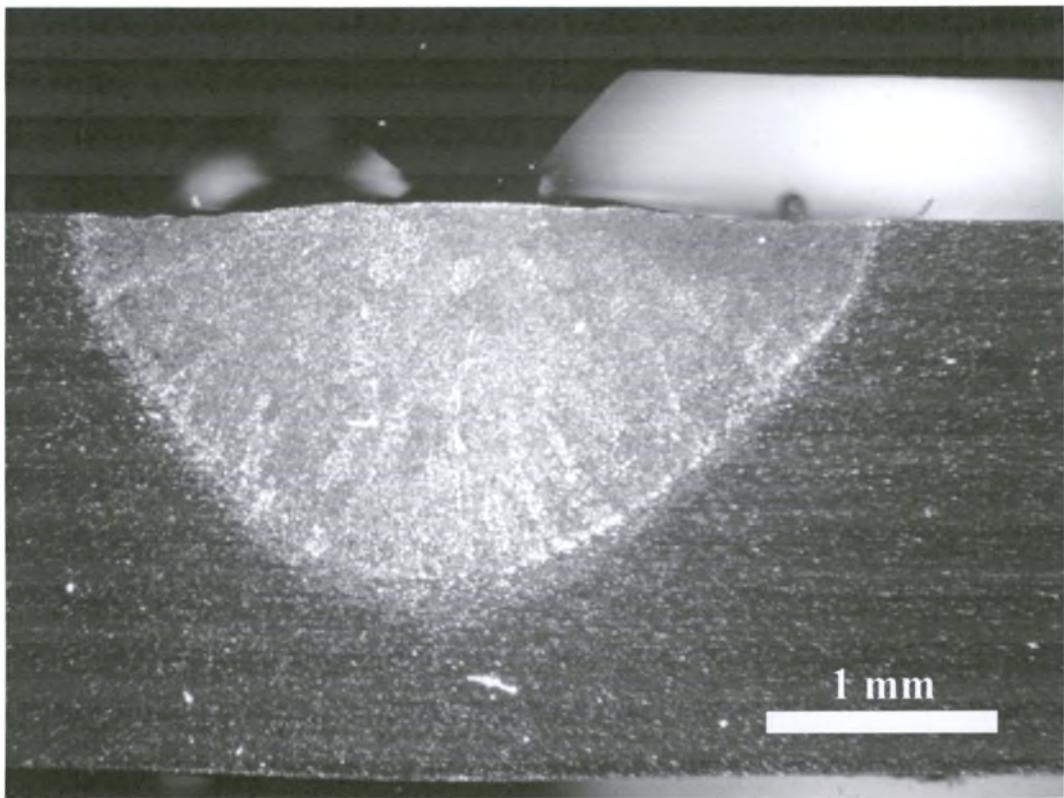
A/A	ΙΣΧΥΣ [W]	Ταχύτητα u [mm/min]	Σημείο Εστίασης [mm]	Ρ.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]
C1	2133	2000	0	64
C2	1066	1000	0	64
C3	533	500	0	64
C4	270	250	0	64
C5	2133	2000	-1	64
C6	1066	1000	-1	64
C7	533	500	-1	64
C8	270	250	-1	64

Πίνακας 4-6 : Πίνακας συσχέτισης C ομάδας heat input., πλάτους και βάθους Λ.Σ.

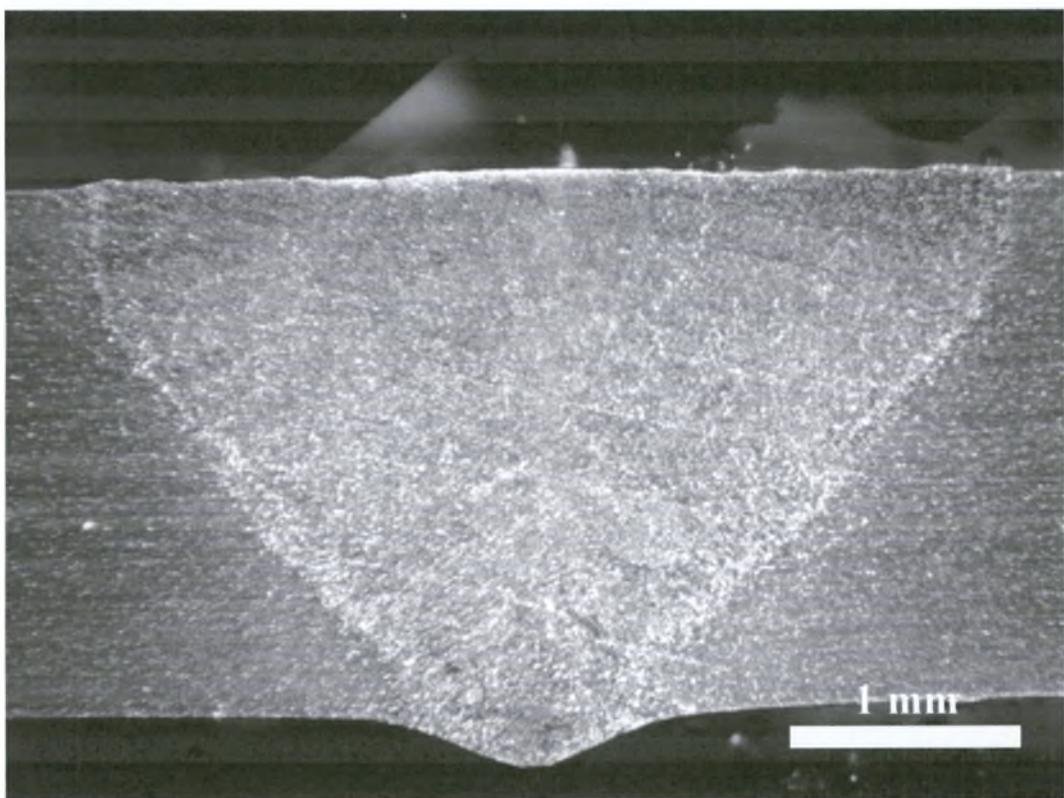
A/A	Ρ.Π.Θ $n = \frac{Q}{u}$ [J/mm]	Πλάτος w [mm]	Βάθος d [mm]	w / d [-]
C1	64	3,39	1,67	2,03
C2	64	3,00	1,37	2,19
C3	64	1,25	0,56	2,23
C4	64	1,96	1,32	1,49
C5'	64	3,91	2,5	1,53
C6	64	2,93	0,98	2,99
C7	64	2,35	1,27	1,85
C8	64	1,92	0,75	2,56

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται, για κάθε ένα πέρασμα ξεχωριστά το πλάτος, το βάθος και ο λόγος πλάτους / βάθους της λίμνης συγκόλλησης, καθώς και ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας. Από τον πίνακα αυτό μπορεί να διαπιστωθεί ότι, παρότι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας για κάθε πέρασμα διατηρείται σταθερός, δεν πραγματοποιήθηκε πλήρης διείσδυση σε όλα τα δοκίμια παρά μόνο στο C₅. Το σαφώς αξιοπρόσεκτο χαρακτηριστικό ήταν ότι παρόλο που υπήρξε η απαραίτητη προσδιδόμενη ισχύς στο δοκίμιο C₁, υπό ίδιες συνθήκες με το C₅, δεν παρατηρήθηκε σε αυτό πλήρης διείσδυση κάτι το οποίο πιθανότατα να οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα. Επίσης αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι αν και η ισχύς σε αυτή την περίπτωση ήταν μεγαλύτερη από αυτή του αντίστοιχου δοκιμίου της Β ομάδας η συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε εδώ δεν ήταν καλύτερη. Τέλος δεν μπορεί να διευκρινιστεί με σαφήνεια η επίδραση του σημείου εστίασης καθότι δεν παρατηρήθηκε η συμπεριφορά μιας θέσης του να παράγει σε κάθε περίπτωση καλύτερες συγκολλήσεις.

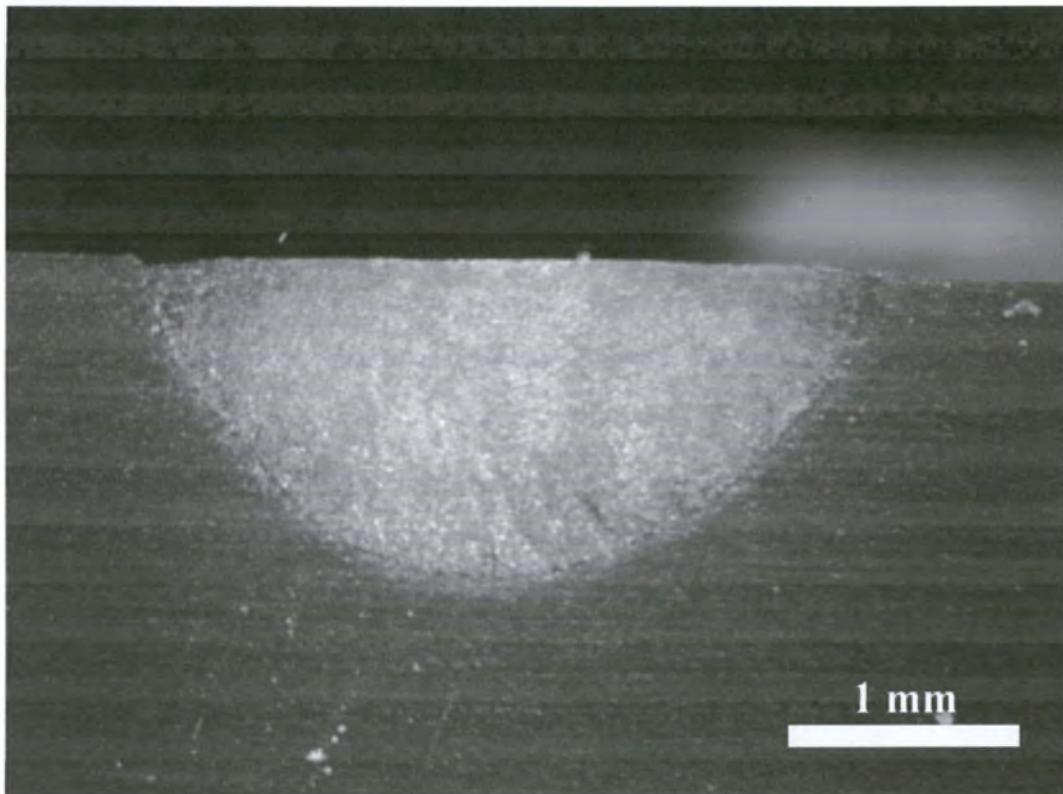
Στις παρακάτω φωτογραφίες (4.18 – 4.25) παρουσιάζονται τα δοκίμια της ομάδας C που φωτογραφήθηκαν στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου. Στα δοκίμια αναγράφονται οι συνθήκες συγκόλλησης (ισχύς, ταχύτητα, σημείο εστίασης). Μάλιστα παρουσιάζονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να γίνει μια σύγκριση δυο δοκιμών με ίδιες συνθήκες πραγματοποίησης συγκόλλησης άλλα με διαφορετικό σημείο εστίασης.



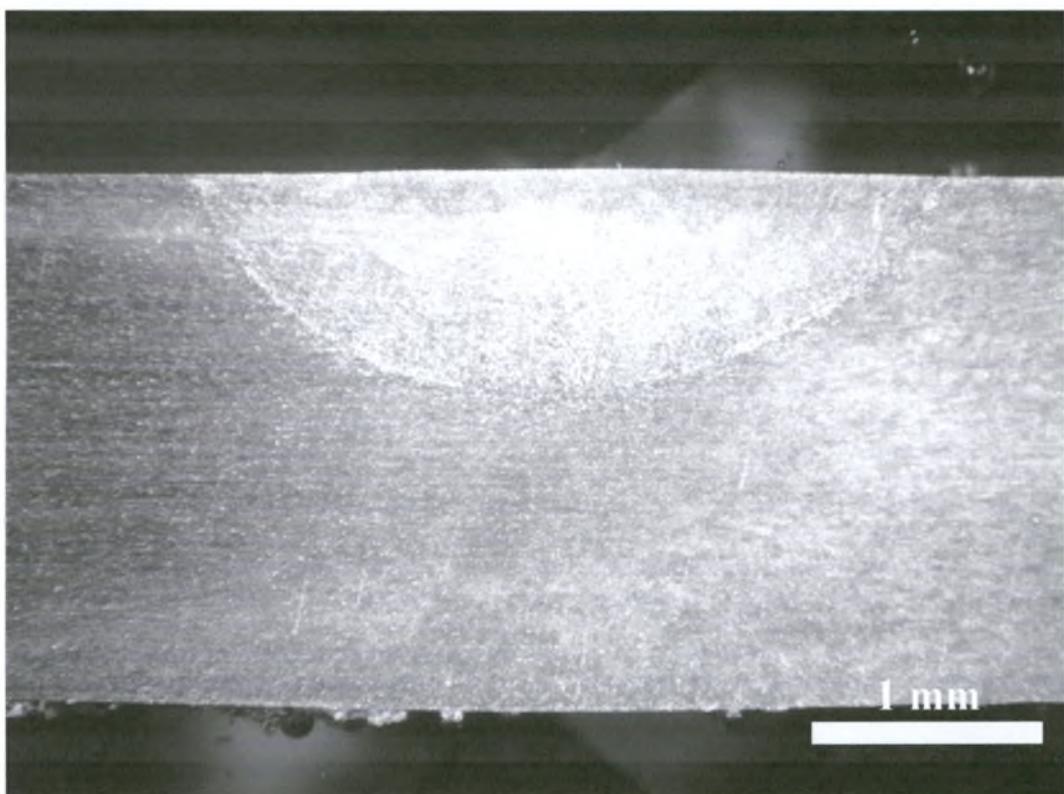
Σχήμα 4-18 : Φωτογραφία δοκιμίου C1 ($W=2133$ W, $u=2000$ mm/min, focal point 0).



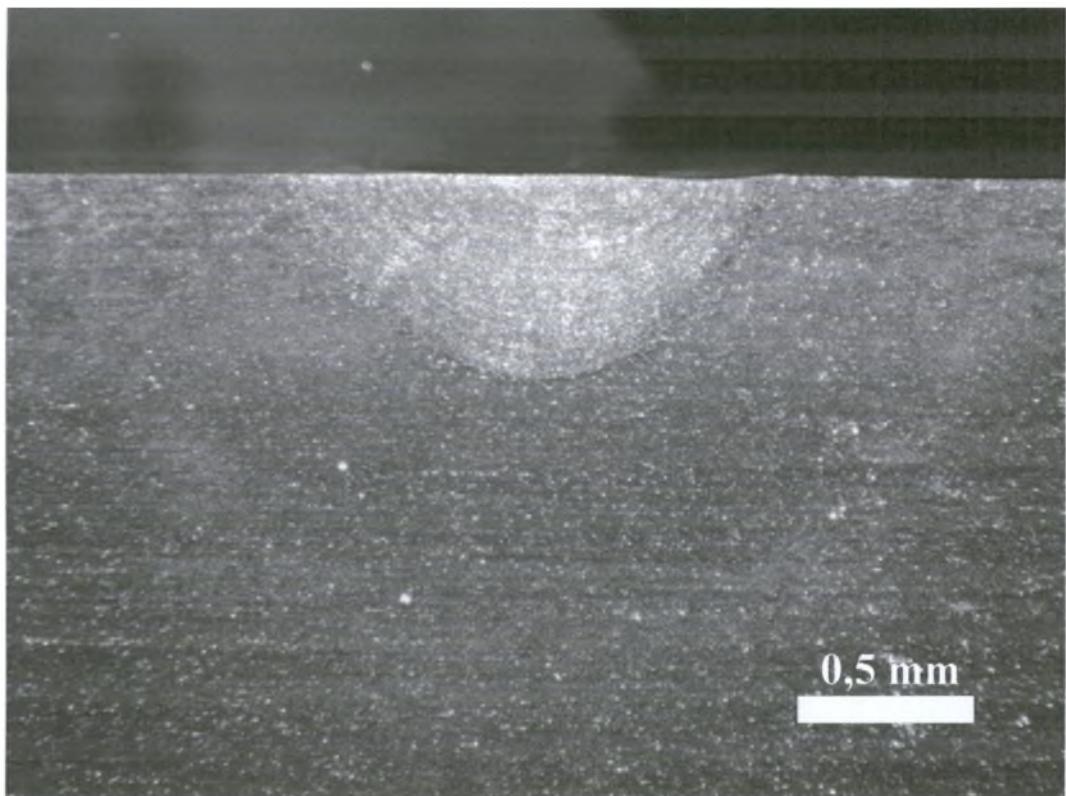
Σχήμα 4-19 : Φωτογραφία δοκιμίου C5 ($W=2133$ W, $u=2000$ mm/min, focal point -1).



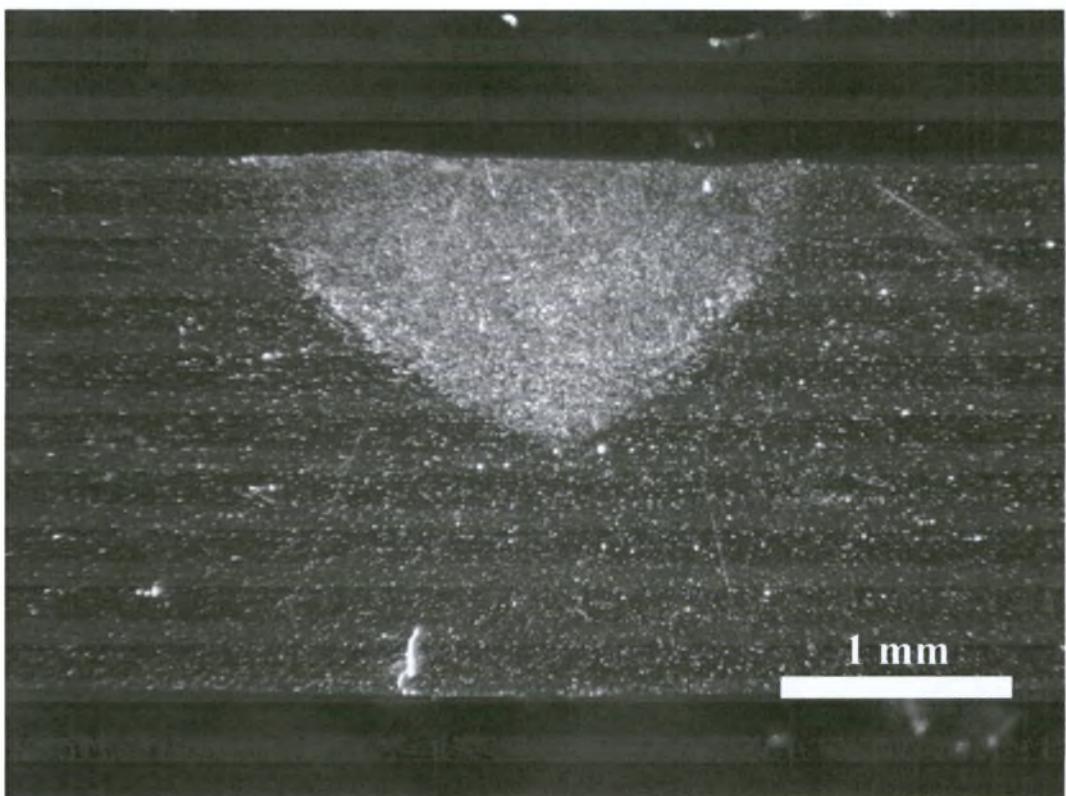
Σχήμα 4-20 : Φωτογραφία δοκιμίου C2 (W=1066 W, u=1000 mm/min, focal point 0).



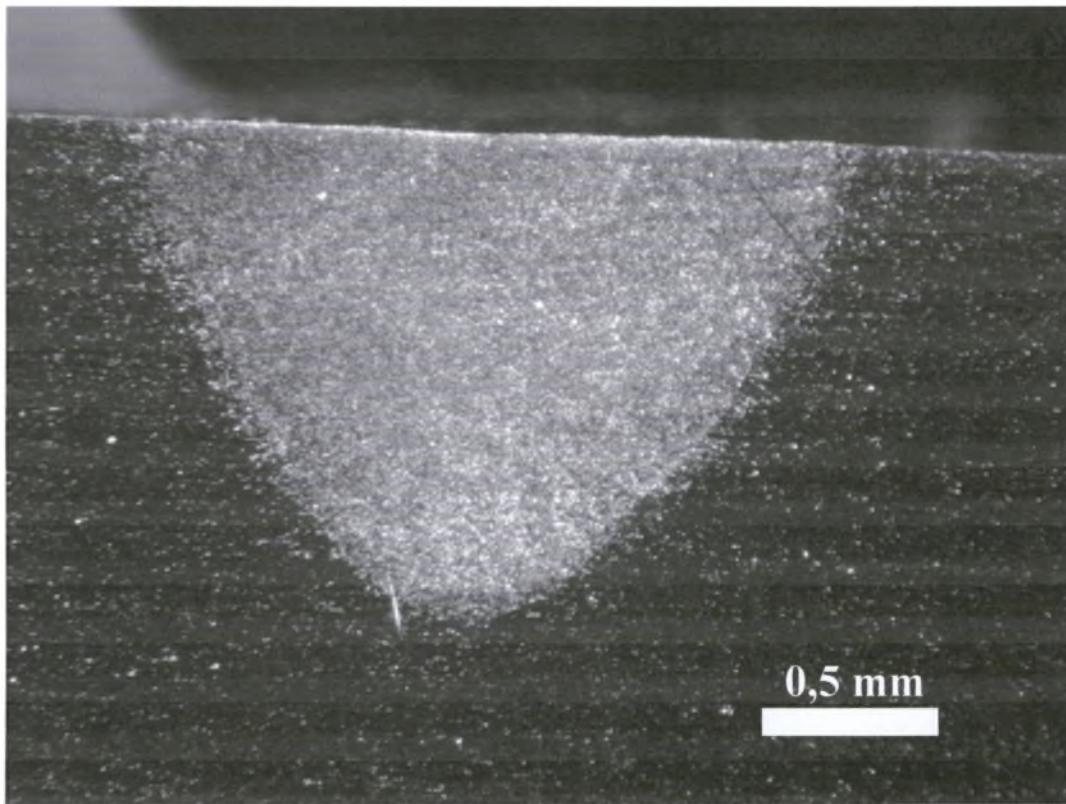
Σχήμα 4-21 : Φωτογραφία δοκιμίου C6 (W=1066 W, u=1000 mm/min, focal point -1).



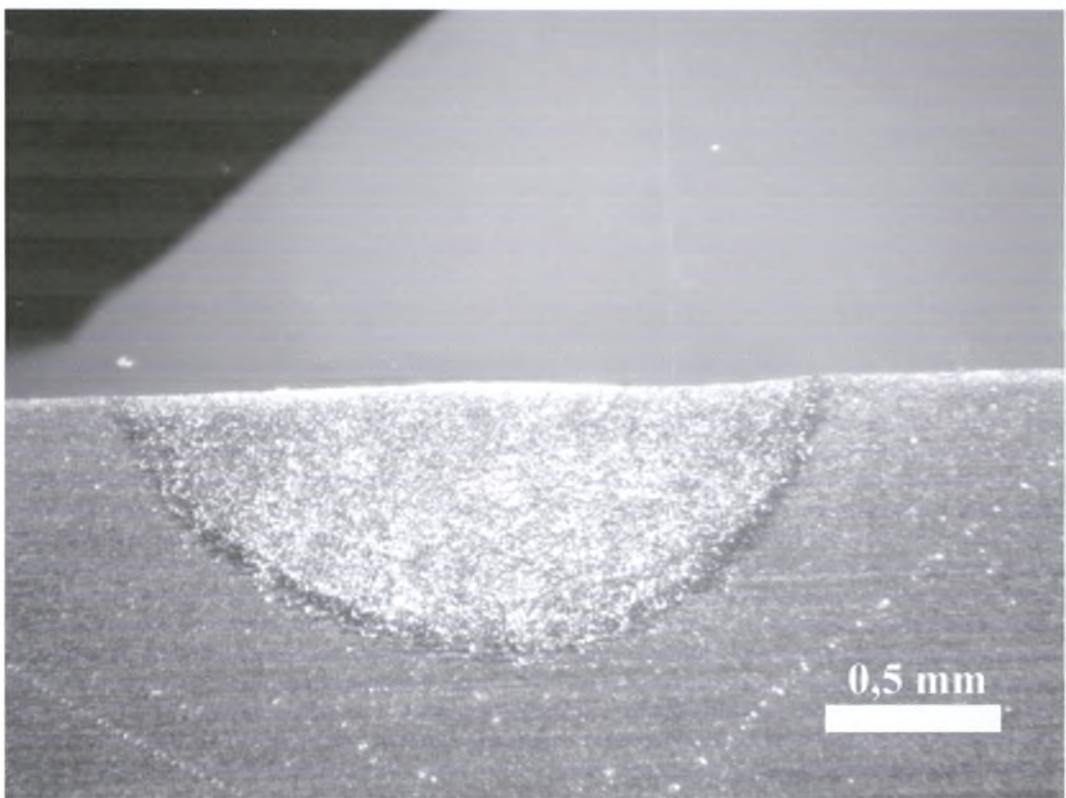
Σχήμα 4-22 : Φωτογραφία δοκιμίου C3 (W=533 W, u=500 mm/min, focal point 0).



Σχήμα 4-23 : Φωτογραφία δοκιμίου C7 (W=533 W, u=500 mm/min, focal point -1).



Σχήμα 4-24 : Φωτογραφία δοκιμίου C4 (W=270 W, u=250 mm/min, focal point 0).

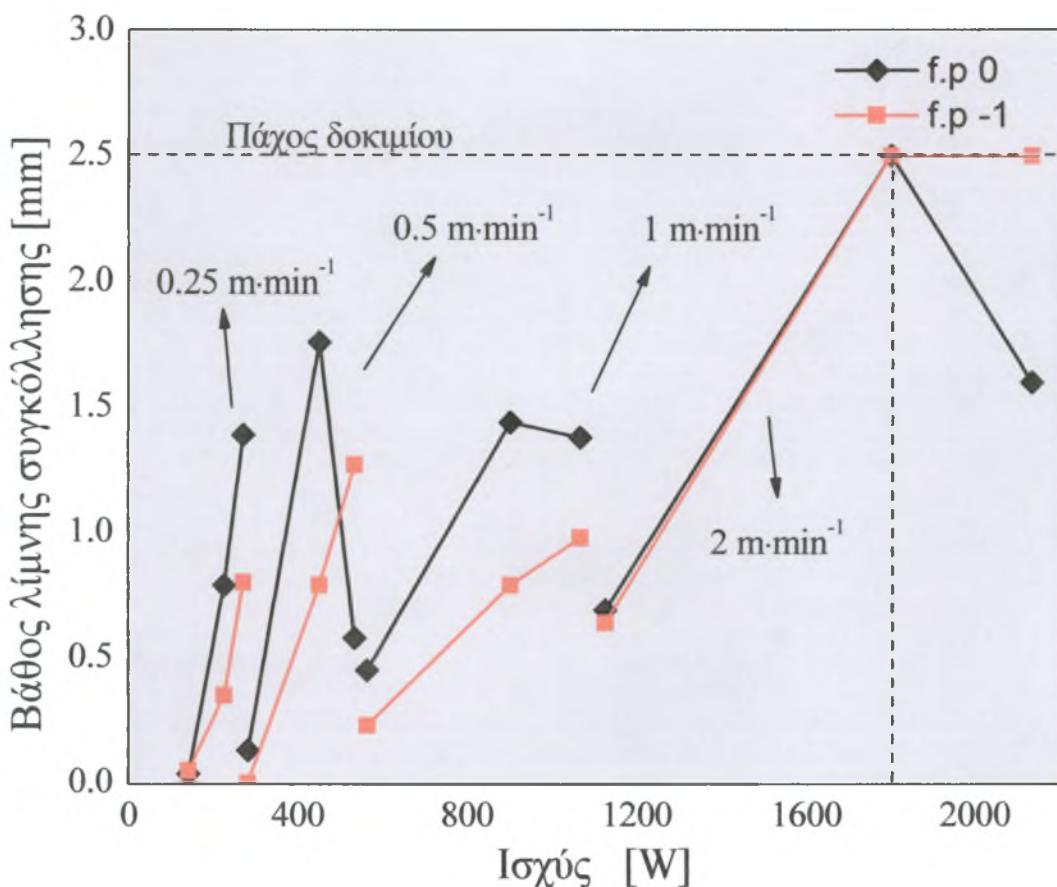


Σχήμα 4-25 :Φωτογραφία δοκιμίου C8 (W=270 W, u=250 mm/min, focal point -1).

4.2 Γραφικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων EBW

4.2.1 Εξάρτηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ισχύος

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικές απεικονίσεις της εξάρτησης του βάθους λίμνης συγκόλλησης, του πλάτους λίμνης συγκόλλησης και του λόγου w/d από την ισχύ και το σημείο εστίασης.

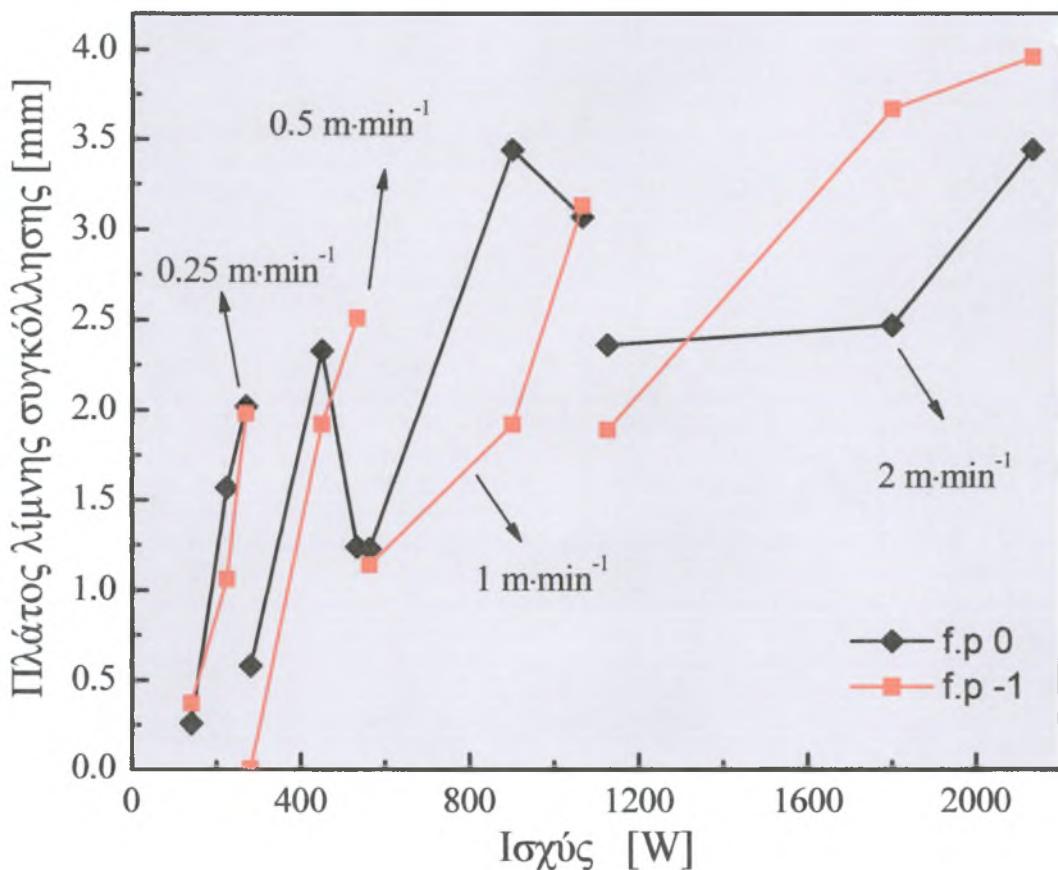


Σχήμα 4-28 : Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του βάθους λίμνης συγκόλλησης συναρτήσει της ισχύος και του focal point.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται ομαδοποιημένες οι τιμές του βάθους Λ.Σ. των τριών ομάδων για τις δύο τιμές του *focal point* (0 και -1). Για μικρές ταχύτητες συγκόλλησης (0.25–0.5–1 m/min) παρατηρείται ότι με το σημείο εστίασης στο 0 η

μέθοδος παράγει βαθύτερες και άρα λειτουργεί καλύτερα απ' ότι με το σημείο εστίασης στο -1. Για μεγάλες ταχύτητες (2 m/min) όμως από το διάγραμμα φαίνεται ότι με το σημείο εστίασης της δέσμης στο 0 και στο -1 η μέθοδος πραγματοποιεί ίδιου βάθους συγκολλήσεις και στις δυο περιπτώσεις. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση του C₁ δοκιμίου η περίπτωση του οποίου αναλύθηκε προηγουμένως.

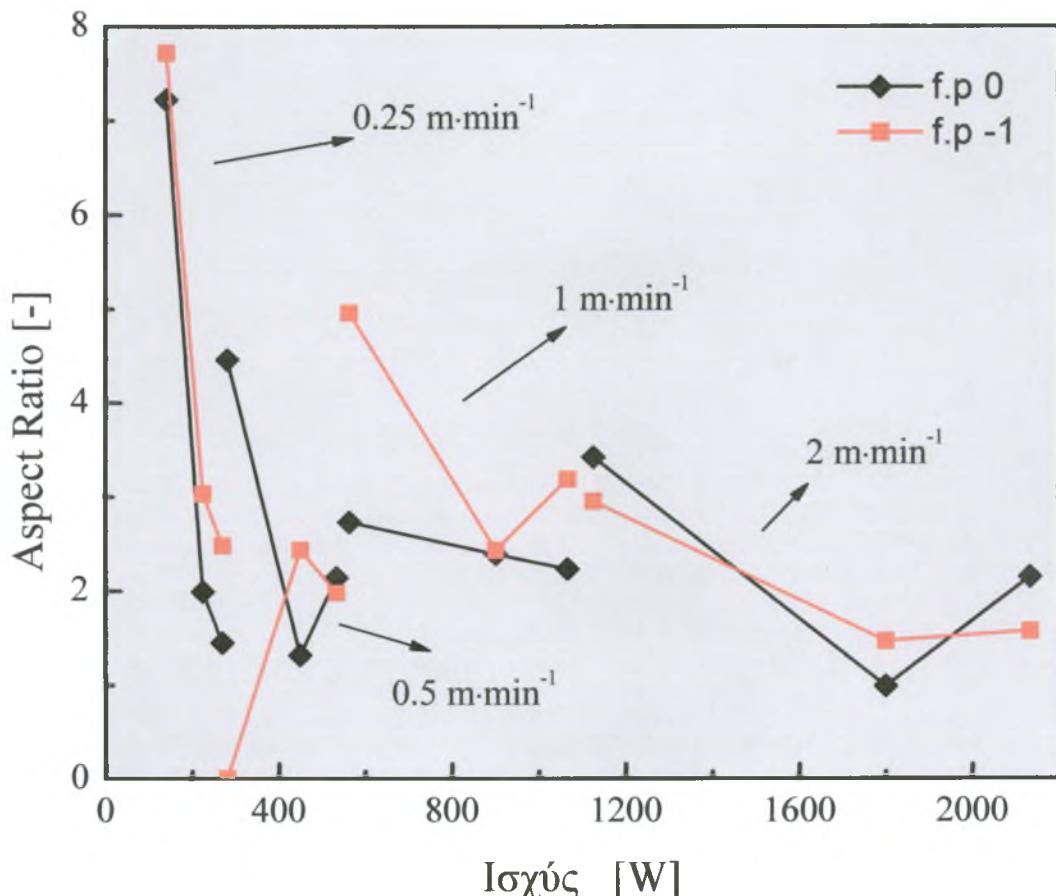
Τέλος από το διάγραμμα διαπιστώνει κανείς ότι για την επίτευξη πλήρους διείσδυσης η ισχύς της δέσμης ηλεκτρονίων πρέπει να ξεπερνά τα 1800 W.



Σχήμα 4-27 : Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του πλάτους λίμνης συγκόλλησης συναρτήσει της ισχύος και του focal point.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται ομαδοποιημένες οι τιμές του πλάτους Λ.Σ. των τριών ομάδων για τις δύο τιμές του *focal point* (0 και -1). Για μικρές ταχύτητες

συγκόλλησης ($0.25\text{--}0.5\text{--}1 \text{ m/min}$) παρατηρείται ότι με το σημείο εστίασης στο -1 η μέθοδος παράγει μικρότερου πλάτους συγκολλήσεις και άρα λειτουργεί καλύτερα απ' ότι με το σημείο εστίασης στο 0. Για μεγαλύτερες ταχύτητες (2 m/min) όμως από το διάγραμμα φαίνεται ότι με το σημείο εστίασης της δέσμης στο 0 παράγονται στενότερες συγκολλήσεις.



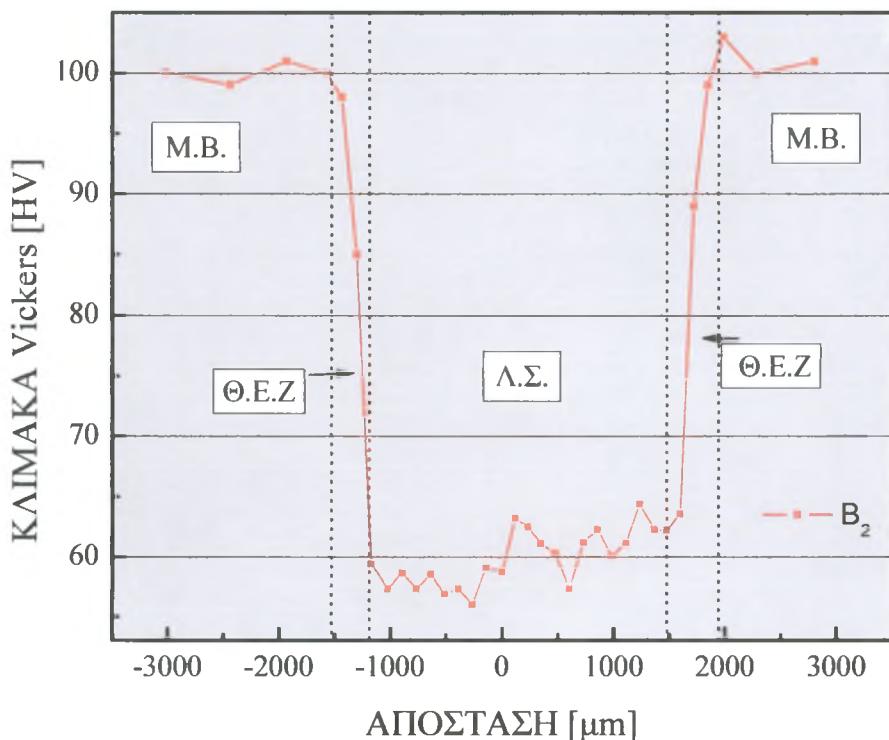
Σχήμα 4-29 : Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του λόγου πλάτος / βάθος της Λ.Σ. συναρτήσει της ισχύος και του focal point.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται ομαδοποιημένες οι τιμές του *aspect ratio* δηλ. του λόγου πλάτος / βάθος των τριών ομάδων για τις δύο τιμές του *focal point* (0 και -1). Πρέπει να δωθεί προσοχή στο γεγονός ότι στο διάγραμμα οι μικρότερες τιμές του

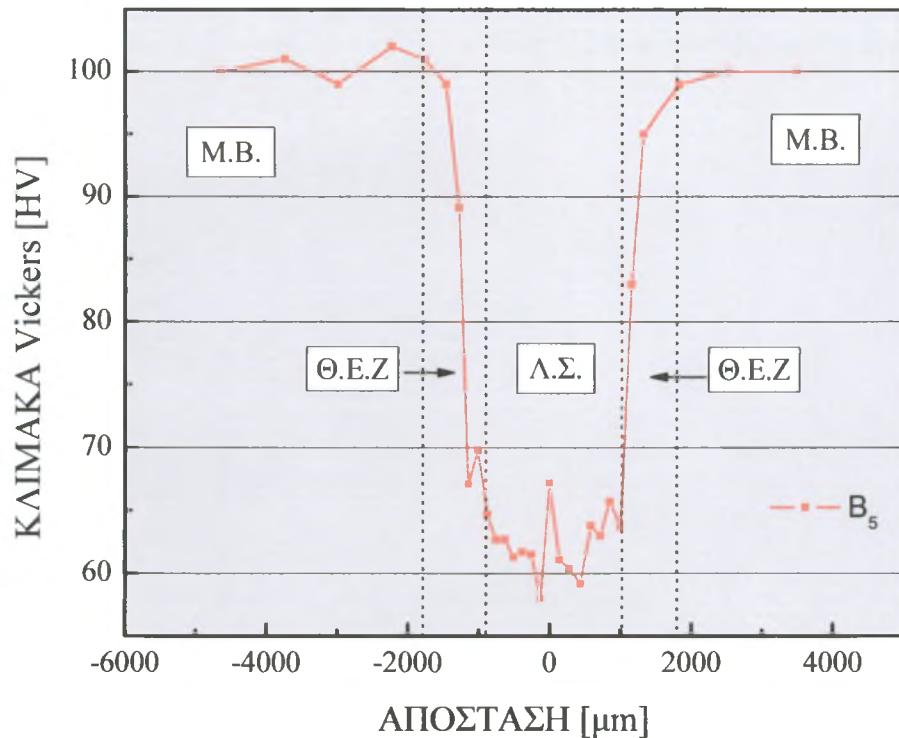
aspect ratio είναι αυτές που δείχνουν σε ποιες περιπτώσεις παρήχθησαν καλύτερα αποτελέσματα.

Για ταχύτητα 0.25 m/min παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της μεθόδου είναι καλύτερη με το σημείο εστίασης στο 0. Για ταχύτητα 0.5 m/min δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα λόγω του ότι υπήρχαν περιπτώσεις που δεν μπόρεσαν να μετρηθούν, για ένα πέρασμα, το πλάτος και το βάθος της Λ.Σ. Για υψηλότερες ταχύτητες (1–2 m/min) παρατηρείται η καλύτερη συμπεριφορά της μεθόδου με το σημείο εστίασης στο 0.

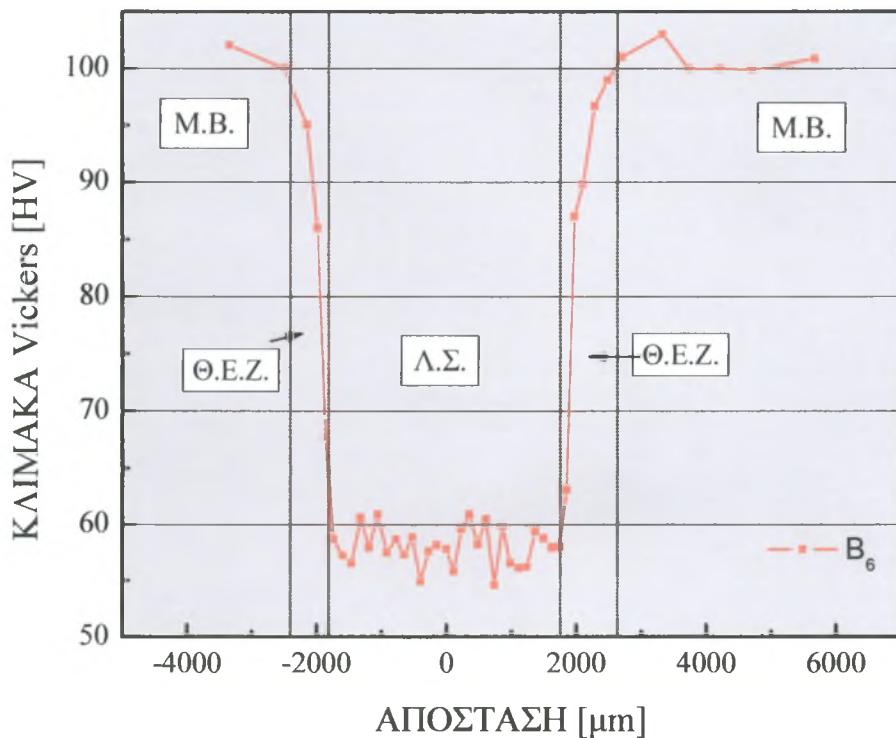
4.2.2 Μικροσκληρομετρήσεις



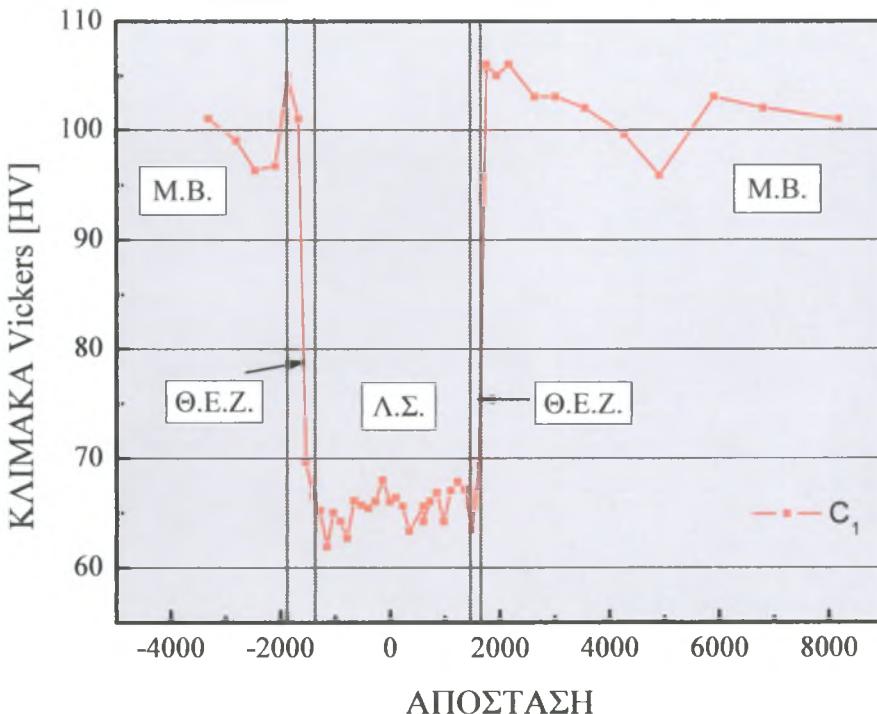
Σχήμα 4-30 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου B₂.



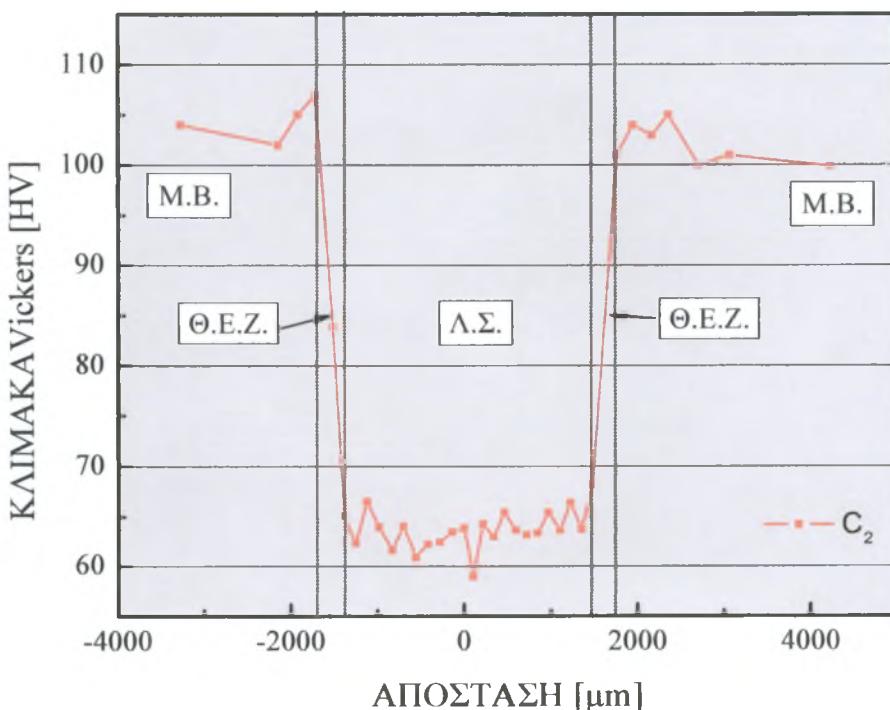
Σχήμα 4-31 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου B₅.



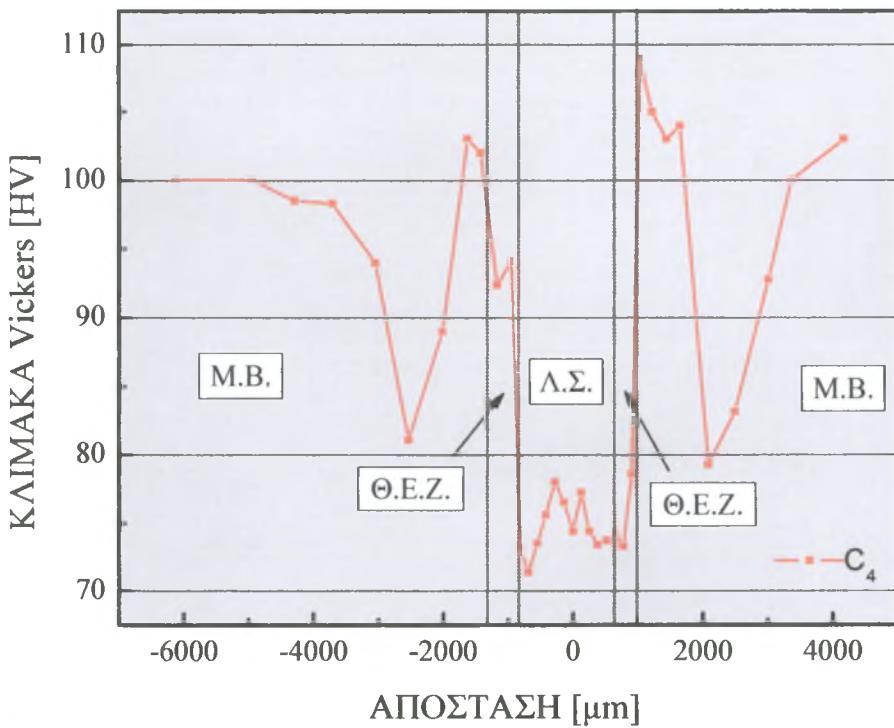
Σχήμα 4-32 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου B₆.



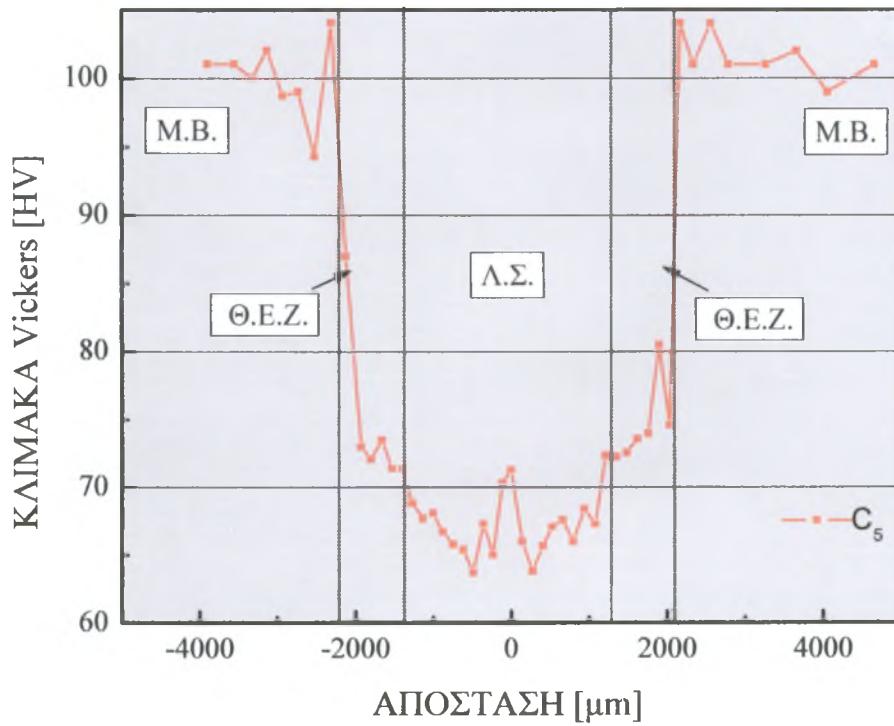
Σχήμα 4-33 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου C₁.



Σχήμα 4-34 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου C₂.



Σχήμα 4-35 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου C₄.



Σχήμα 4-36 : Μικροσκληρομέτρηση δοκιμίου C₅.

Μικροσκληρομετρήσεις για την Α ομάδα δεν πραγματοποιήθηκαν καθότι κρίθηκε ότι λόγω της μικρής πρόσδοσης θερμότητας το βάθος διείσδυσης ήταν πολύ μικρό.

Το μέταλλο βάσης έχει σκληρότητα 100 HV. Στη Λ.Σ. και στη ΘΕΖ η τιμή αυτή ελαττώνεται. Συγκεκριμένα στη Λ.Σ. είναι 60-65, ενώ στη ΘΕΖ μεταβάλλεται από 70 (στην επαφή με τη ΛΣ) έως 98 (στην περιοχή του Μετάλλου Βάσης).

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 τεχνητής 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 επανακατακρήμνισης (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.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα όσον αφορά την μέθοδο EBW:

- Για να πραγματοποιηθεί πλήρους διείσδυσης συγκόλληση θα πρέπει η προσδιδόμενη ισχύς να ξεπερνά τα 1800 W.
- Η ταχύτητες συγκόλλησης ήταν εν γένει μικρές κι έτσι δεν πραγματοποιήθηκε συγκόλληση υψηλής απορρόφησης - *keyhole*. Η μικρή ταχύτητα της δέσμης και άρα η μεγάλη παραμονή της πάνω από το συγκολλούμενο δοκίμιο οδήγησε και σε μεταφορά της θερμότητας και με αγωγή στο δοκίμιο. Αυτό είναι ορατό σχεδόν σε όλες της φωτογραφίες που υπάρχουν για την EB στο 4° κεφάλαιο. Η μοναδική περίπτωση που πλησιάζει το φαινόμενο *keyhole* είναι στο δοκίμιο B₁ αλλά και πάλι η τιμή του λόγου w/d είναι αρκετά μεγάλη.
- Το σημείο εστίασης διαδραματίζει κι αυτό σημαντικό ρόλο στην παραγωγή της συγκόλλησης, καθότι από αυτό εξαρτάται ισχυρά το σημείο που θα προσπέσουν τα ηλεκτρόνια. Στα πειράματα που διεξήχθησαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, λόγω και του λεπτού πάχους των δοκιμών, η επιλογή του σημείου εστίασης 0 ήταν η καλύτερη επιλογή.
- Για τα περισσότερα δοκίμια ο λόγος πλάτους / βάθους της Λ.Σ. ήταν αρκετά μεγάλος.
- Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την μελέτη συγκολλήσεων αλλά δεν μπορούν να εξαχθούν μόνο από αυτό ασφαλή συμπεράσματα.

4.3 TIG

Με αυτή την μέθοδο πραγματοποιήθηκαν περάσματα ίδιου τύπου με την EBW.

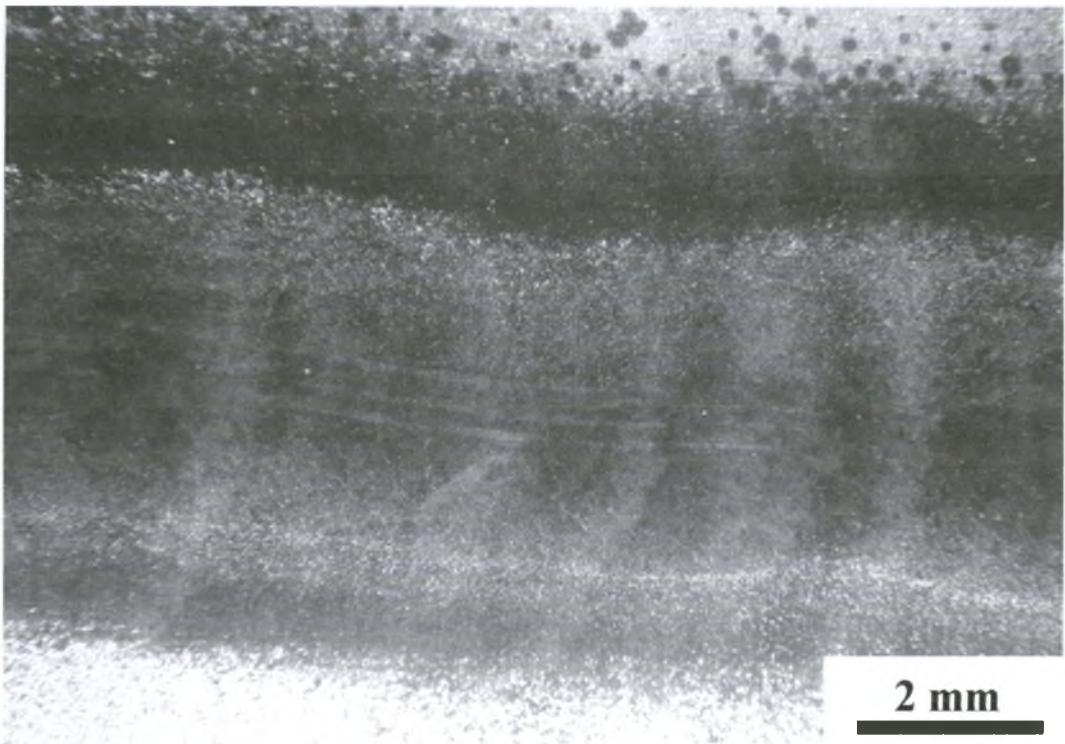
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται όλες οι παράμετροι που υπολογίστηκαν και για την μέθοδο EB. Η τάση της συγκεκριμένης μηχανής συγκόλλησης ήταν 80 V.H. ταχύτητα ήταν 5 mm/sec → 300 mm/min. Η ισχύς υπολογίστηκε από την σχέση $P = V * I$, όπου I είναι η ένταση του ρεύματος. Ο P.P.Θ. υπολογίστηκε με βαθμό απόδοσης 60%. Στον Πίνακα 4.7 απεικονίζονται τα συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 4-7 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων TIG.

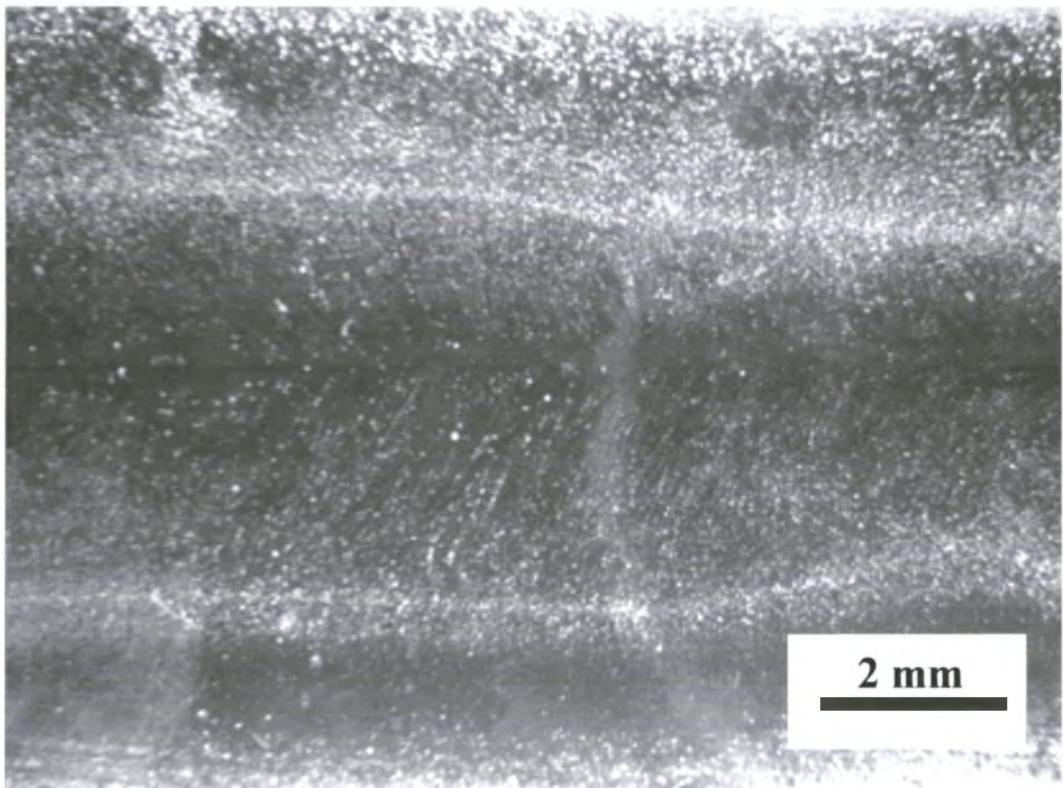
ΈΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ	ΙΣΧΥΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	P.Π.Θ	ΠΛΑΤΟΣ Λ.Σ	ΒΑΘΟΣ Λ.Σ	w/d
[A]	[V]	[W]	[mm/min]	J/mm	[mm]	[mm]	[-]
70	80	5600	300	672	5,13	1,39	3,69
80	80	6400	300	768	6,86	2,5	2,74
90	80	7200	300	864	6,71	2,5	2,68

Από τον πίνακα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι ο λόγος πλάτους / βάθους της λίμνης συγκόλλησης είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν που υπολογίστηκε για τις συγκολλήσεις με EB. Από τις τρεις συγκολλήσεις πλήρη διείσδυση είχαμε στις δύο.

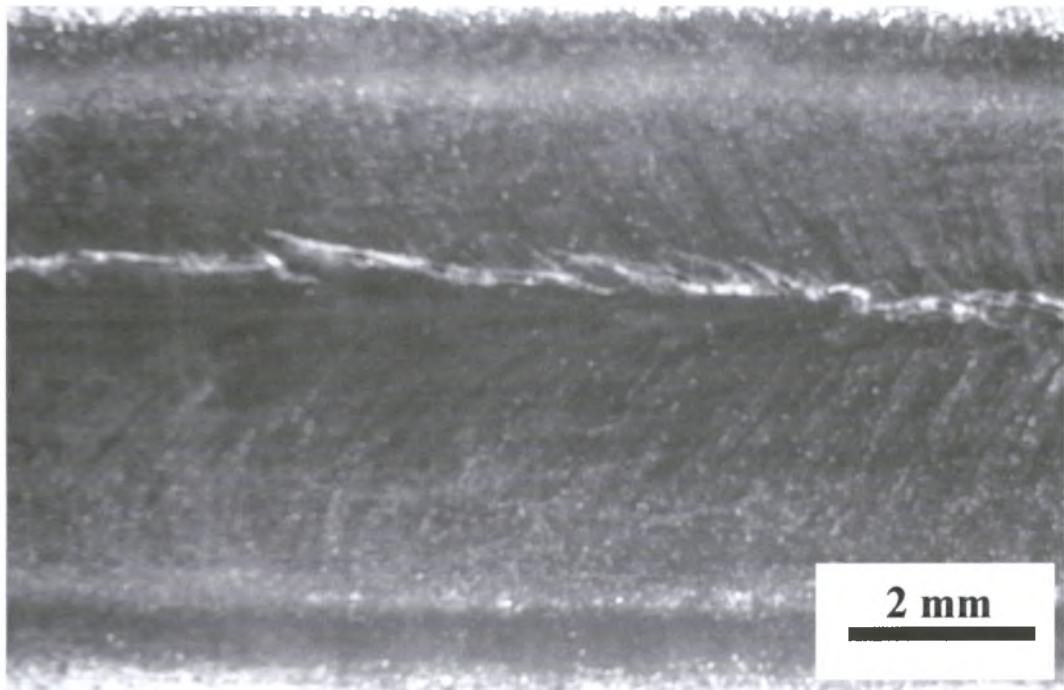
Στην περίπτωση της συγκόλλησης με συνθήκες 7200 W, 500 mm/min παρατηρήθηκε το φαινόμενο της θερμορωγμάτωσης. Η ρωγμή σχηματίστηκε ακριβώς στο κέντρο της συγκόλλησης όπως φαίνεται στα Σχ. 4.39 και 4.42. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υψηλός ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας οδήγησε σε ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας κατά τη συγκόλληση και αυτή με τη σειρά της στην ανάπτυξη θερμικών τάσεων κατά την διεργασία τήξης – στερεοποίησης.



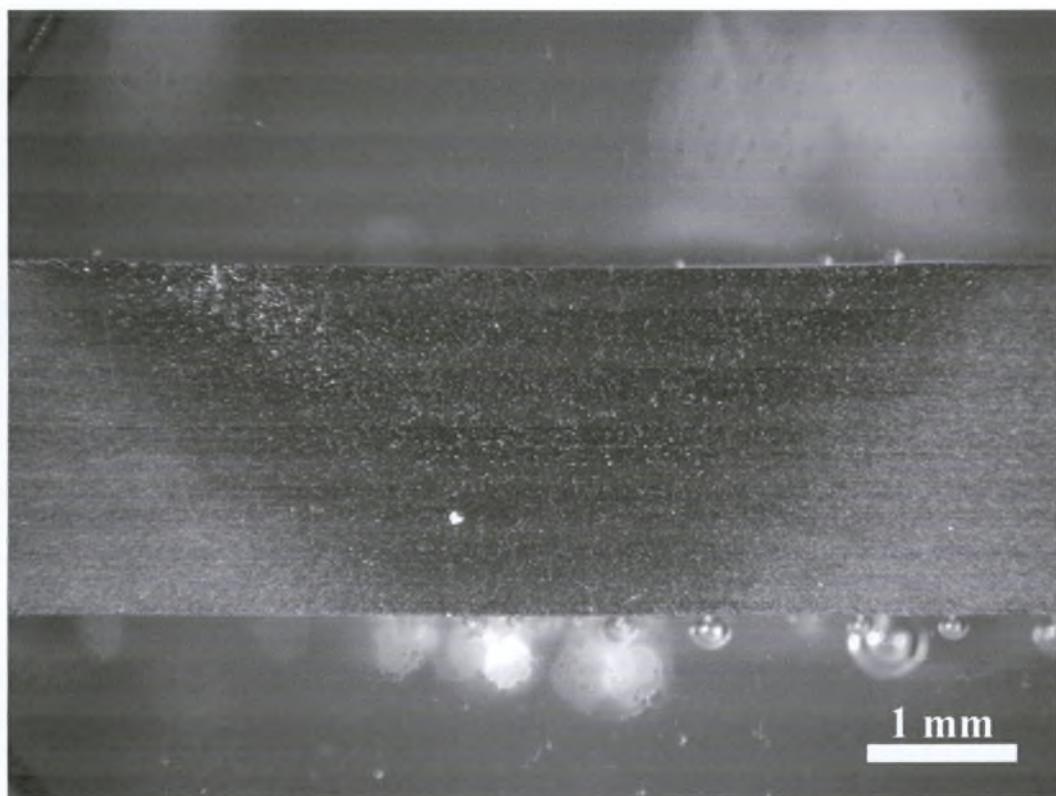
Σχήμα 4-37 : Κάτοψη φωτογραφίας συγκόλλησης TIG (70 A, 7 lt/min).



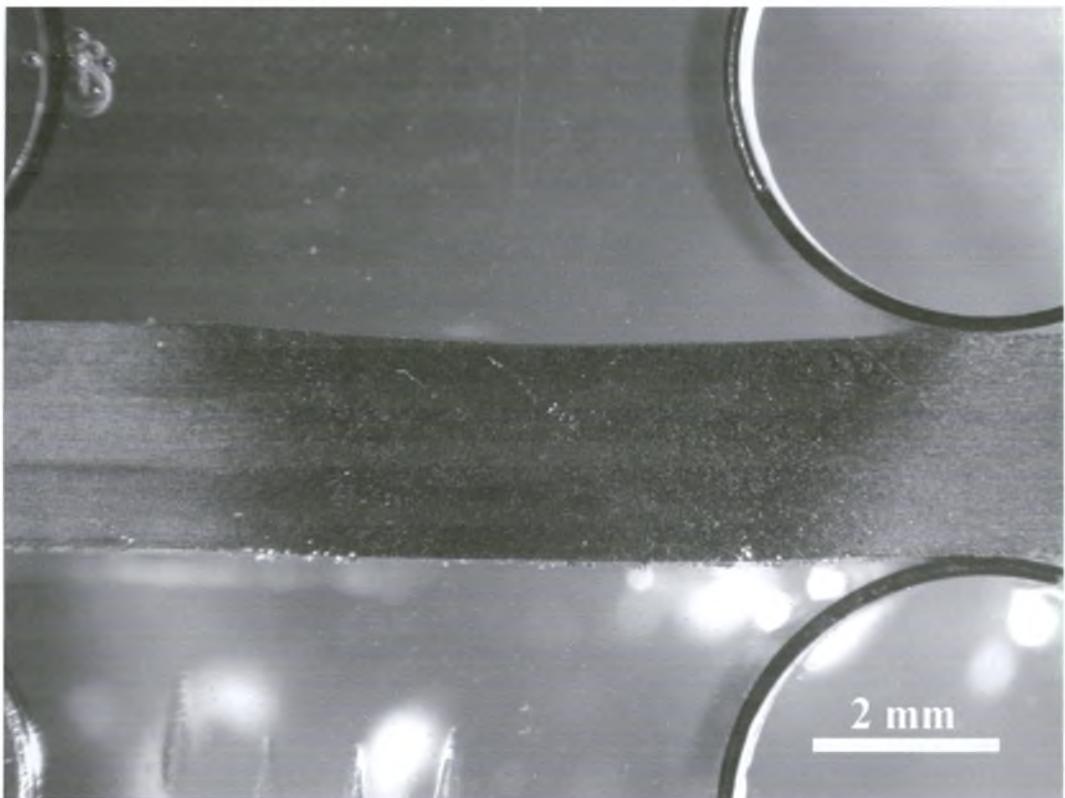
Σχήμα 4-38 : Κάτοψη φωτογραφίας συγκόλλησης TIG (80 A, 10 lt/min).



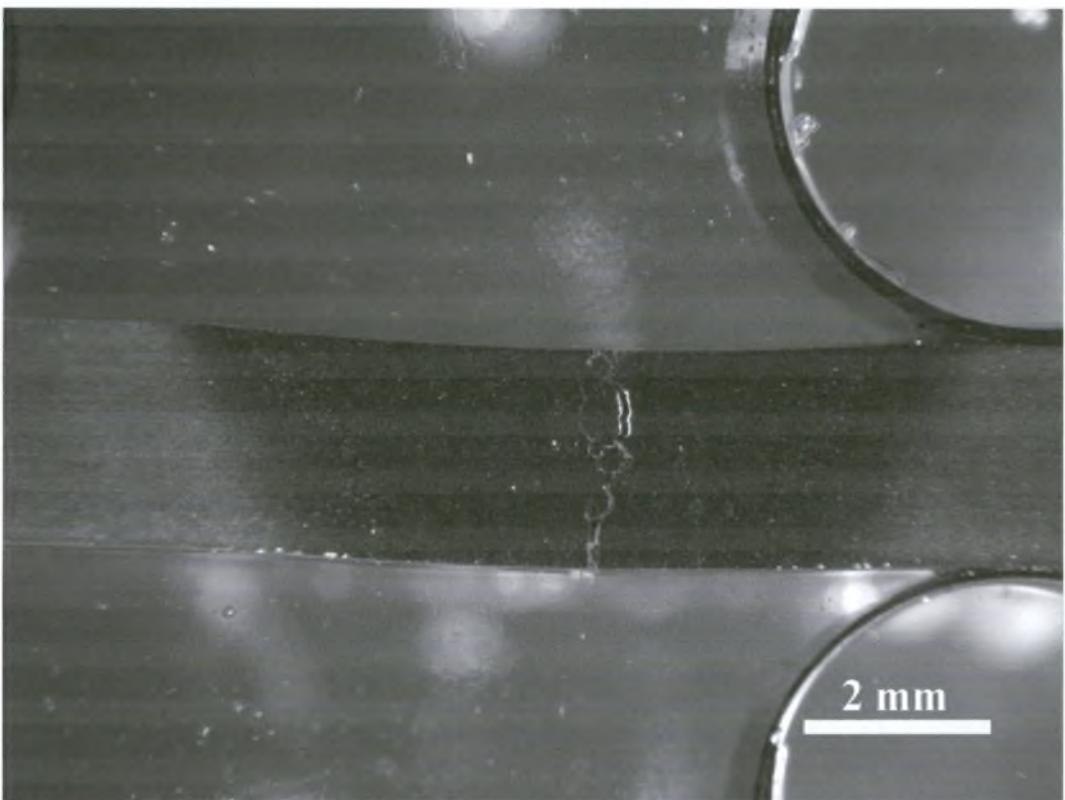
Σχήμα 4-39 : Κάτοψη φωτογραφίας συγκόλλησης TIG (90 A, 12 lt/min).



Σχήμα 4-40 : Φωτογραφία συγκόλλησης TIG σε εγκάρσια τομή (70 A, 7 lt/min).



Σχήμα 4-41 : Φωτογραφία συγκόλλησης TIG σε εγκάρσια τομή (80 A, 10 lt/min).



Σχήμα 4-42 Φωτογραφία συγκόλλησης TIG σε εγκάρσια τομή (90 A, 12 lt/min).

4.3.1 Μικροσκληρομετρήσεις TIG

Μετά την εφαρμογή μικροσκληρομετρήσεων στα δοκίμια που παρήχθησαν παραπάνω σχήματα παρατηρήθηκε ότι η μικροσκληρομετρήσεις δεν έφτασαν ως το μέταλλο βάσης. Αίτια υπήρξαν η μεγάλη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και το γεγονός ότι οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σχετικά κοντά η μια στην άλλη πράγμα που επηρέασε τις μετρήσεις μικροσκληρότητας. Για τεχνικούς λόγους λοιπόν τα διαγράμματα δεν υπήρξαν απόλυτα ακριβή και δεν παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέταλλο βάσης ήταν και σε αυτή την περίπτωση 100 HV. Στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης οι τιμές είχαν ένα εύρος από 60-80 HV ενώ στην Θ.E.Z κυμαίνονταν από 60-83.

Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν σε μεταγενέστερη φάση σε αυτογενείς συγκολλήσεις συμβολής κραμάτων Αλουμινίου της σειράς 6xxx με EBW KAI TIG :

- Παρήχθησαν συγκολλήσεις bead-on-plate πλήρους διείσδυσης σε συγκεκριμένες τιμές του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας που υπολογίστηκαν για την EBW (54, 64 J/mm) και για την TIG (768, 864 J/mm). Παρατηρείται ότι ο Ρ.Π.Θ της TIG είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν της EB.
- Η αύξηση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας συνεπάγεται αύξηση τόσο στο βάθος διείσδυσης όσο και στο πλάτος της λίμνης συγκόλλησης.
- Οι διαστάσεις της λίμνης συγκόλλησης και της ΘEZ ,για τα δοκίμια που επιτεύχθει πλήρης διείσδυση, που παράγονται με την EB είναι κατά πολύ μικρότερες από εκείνες των συγκολλήσεων TIG και κατά συνέπεια η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων αφορά πολύ μικρές περιοχές. Το εύρος τιμών της Λ.Σ για την EB είναι 0.54 – 3.91 ενώ για την TIG 5.83 – 6.86.
- Η μείωση της μικροσκληρότητας στη ΘEZ σε σχέση με το βασικό μέταλλο ήταν: για την EB 2-30% ενώ για την TIG 17-40%. Στην Λ.Σ η μείωση ήταν : για την EB 30-35% ενώ για την TIG 20-40%.
- Με την EB δεν εμφανίστηκαν προβλήματα που έχουν να κάνουν με τις συγκολλήσεις αλουμινίου (πορώδες, ρωγματώσεις κ.α.) σε αντίθεση με την TIG που σε μια περίπτωση (με συνθήκες 90 A, 12 lt/min) παρατηρήθηκε το φαινόμενο της θερμορωγμάτωσης

- Πραγματοποίηση συγκολλήσεων συμβολής (butt joints) στις βέλτιστες συνθήκες που προσδιορίστηκαν για κάθε μέθοδο.
- Αξιολόγηση των συγκολλήσεων αυτών με μεθόδους ποιοτικού ελέγχου όπως ραδιογραφία, διεισδυτικά υγρά, υπέρηχοι.
- Αξιολόγηση των συγκολλήσεων αυτών με μεθόδους καταστρεπτικού ελέγχου όπως δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης, στρέψης.
- Εφαρμογή μικροσκληρομετρήσεων στα δοκίμια της TIG για πλήρη συσχέτιση με τις αντίστοιχες της EBW.
- Εκτενής μελέτη διαμηκών τομών με τις δύο μεθόδους για σύγκριση μετώπου στερεοποίησης.
- Χρήση των πειραματικών δεδομένων σε προσομοιώσεις θερμοκρασιακών πεδίων και μικροδομής.

1. Παπάζογλου Ι. ΒΑΣ., Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων, Ε.Μ.Π, 1999.
2. www.elval.gr
3. ASM Handbook Vol. 6, Welding and soldering, σελ. 740-754.
4. Cary H.B. , *Modern Welding Technology*,2nd Ed., Prentice Hall, 1989, σελ. 256.
5. www.twi.com job knowledge for welders 6 : tungsten inert gas welding.
6. www.twi.com job knowledge for welders 17 : equipment for tungsten inert gas welding.
7. Χαϊδεμενόπουλος Ν. Γρηγ., *Σημειώσεις μαθήματος Συγκολλήσεις*, 2006, Παν. Θεσσαλίας
8. Ζερβάκη Α. , *Προσομοίωση μικροδομής συγκολλήσεων ειδικών κραμάτων αλουμινίου με laser*, Διδακτορική Διατριβή, 2004, Παν. Θεσσαλίας.
9. www.businesswiz.com
- 10.www.eea.com – aluminium for future generations.
- 11.www.boeing.com
- 12.Αλεξόπουλος Ν. , *Συγκολλήσεις Laser σε κράματα αλουμινίου*, Διπλωματική Εργασία, 1998, Παν.Θεσσαλίας.
13. www.eea.com – aluminium automotive industry.
14. Hirch J. , *Automotive trends in aluminium – the European prospective, materials forum vol.28*, 2004.
15. Urlich Kruger, *Talat lecture 4202 about weld ability*, 1994.
16. www.twi.com job knowledge for welders 21 : weldability of materials (al-alloys), 1996.
17. Χαϊδεμενόπουλος Ν. Γρηγ., *Φυσική Μεταλλουργία*, , Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2000, σελ 352-362.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000089107

