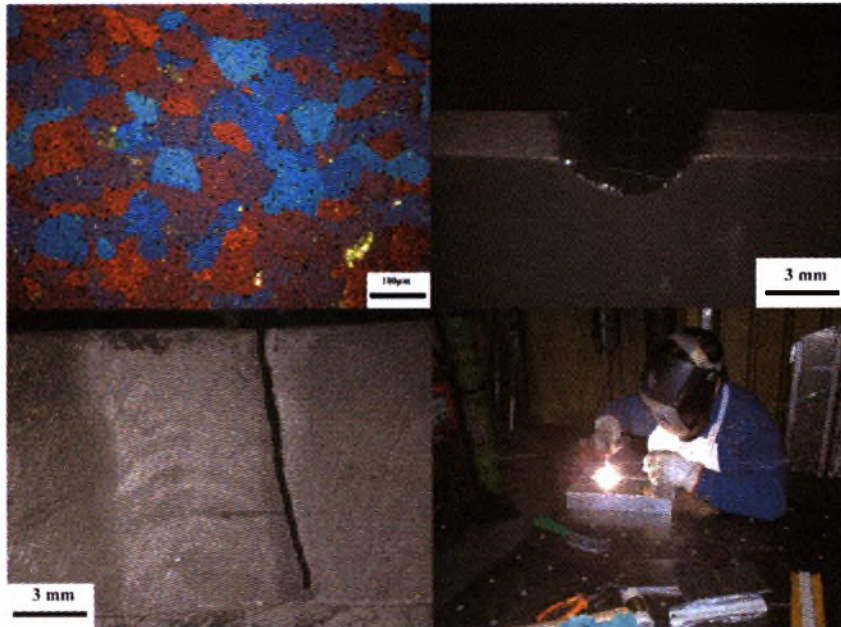




Διπλωματική Εργασία

Μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με χρήση της μεθόδου TIG.



υπό

ΕΥΘΥΜΙΟΥ ΠΟΛΑΤΙΔΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2007



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

Αριθ. Εισ.: 5994/1
Ημερ. Εισ.: 31-10-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2007
ΠΟΛ

© 2007 Ευθύμιος Πολατίδης

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σπύρος Καραμάνος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Δρ. Μεταλλουργός μηχανικός, εξειδικευμένη τεχνική υποστήριξη τμήματος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω πολλές ευχαριστίες στην Δρ. Άννα Ζερβάκη, μέλος του εργαστηρίου υλικών για την πολύτιμη βοήθεια της, την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές της. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο και Δρ. Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ την εταιρία EBETAM A.E. για το θέμα της διπλωματικής και για την υποστήριξη κατά την εκπόνησή της. Ευχαριστίες οφείλω στους Δρ. Σπύρο Παπαευθυμίου, κ. Θανάση Στάμου, κ. Νίκο Τριανταφυλλόπουλο, κ. Βασίλη Πισιώτη, κ. Νεκτάριο Παπαχατζή, κ. Δημήτρη Τσούση, κ. Θεόδωρο Παπαιωσήφ από την EBETAM A.E. κ. Ρήγα Βελέντζα, κ. Θωμά Πατακιούση από την εταιρία Κιολείδης ΑΕΒΕ και στους συγκολλητές κ. Νίκο Κουκουβίνο και κ. Μιχάλη Αλιμπερτή. Ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου των υλικών Δρ. Ελένη Καμούτση, κ. Δημακαράκου Ελένη και Δρ. Αντώνη Κατσαμά για την βοήθεια τους με τις γνώσεις και την πείρα τους. Ευχαριστώ τον συνάδελφο και φίλο Αντρέα Τζαμτζή για τη συνεργασία κατά την παράλληλη εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών. Ευχαριστώ τους φίλους μου Γιάννη, Ιάσωνα, Θοδωρή, Οδυσσέα, Σωτήρη, Τάσο για την ηθική υποστήριξή τους. Επίσης, ευχαριστώ την Μαίρη για την κατανόησή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου, στον πατέρα μου Παντελή Πολατίδη που μου με προσέλκυσε στον χώρο των υλικών αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια του όποτε τον χρειάστηκα, την μητέρα μου Ανθούλα Πολατίδου και την αδερφή μου Κέρυ Πολατίδου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου.

Ευθύμιος Πολατίδης

Μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με χρήση της μεθόδου TIG.

ΠΟΛΑΤΙΔΗΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Το κράμα αλουμίνιο 5083 συγκεντρώνει σημαντικό βιομηχανικό – κατασκευαστικό ενδιαφέρον στις κατασκευές που απαιτούν συγκολλήσεις τόξου. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων στην ποιότητα συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG. Επίσης γίνεται προσπάθεια ανάδειξης των προβλημάτων που παρουσιάζονται. Στα πλαίσια του ελέγχου διεξήχθησαν πειραματικές συγκολλήσεις.

Οι συγκολλήσεις παρουσίασαν διαφορές ως προς την ποιότητα, αποτέλεσμα των διαφορετικών συνθηκών συγκόλλησης, ενώ το κύριο πρόβλημα που ενέκυψε ήταν η παραμόρφωση των ελασμάτων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Προβλήματα όπως η εμφάνιση πόρων, η ελλιπής πλήρωση και η ατελής τήξη εμφανίστηκαν σε μικρότερο βαθμό.

Ορισμένα δοκίμια τμηματικά παρουσίασαν πολύ καλής ποιότητας συγκόλληση και η ταυτοποίηση των παραμέτρων συγκόλλησης, σε συνδυασμό με κάποια μέτρα που προτείνονται μπορούν να βοηθήσουν στην επίτευξη συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή-Ορισμός του προβλήματος.....	1
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	2
2.1. Εισαγωγή στο αλουμίνιο και στα κράματά του	2
2.1.1. Οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του	2
2.1.2. Τα κράματα αλουμινίου	4
2.1.3. Οι κατηγορίες των κραμάτων αλουμινίου	5
2.2. Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx.....	7
2.3. Το κράμα αλουμινίου 5083.....	11
2.3.1. Αντοχή στη διάβρωση	12
2.3.2. Χρήσεις κράματος αλουμινίου 5083	12
2.4. Η μέθοδος συγκόλλησης TIG	13
2.4.1. Συγκολλήσεις κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG κίνδυνοι και προτάσεις ...	17
2.5. Παραμορφώσεις κατά την συγκόλληση αλουμινίου	18
Κεφάλαιο 3. Πειραματική διαδικασία	21
3.1. Χαρακτηρισμός του μετάλλου βάσεως.....	21
3.2. Συγκολλήσεις των δοκιμίων	23
3.2.1 Συγκόλληση δοκιμίων στο T.M.M.B.....	23
3.2.2. Συγκόλληση δοκιμίων στο εργοστάσιο Κιολεΐδης A.E.B.E.....	25
3.3. Μη καταστρεπτικός έλεγχος.....	26
3.3.1. Ραδιογραφία με ακτίνες X	26
3.3.2. Διεισδυτικά υγρά.....	27
3.4. Μακροσκοπικός έλεγχος	28
3.5. Μικροσκληρομέτρηση	28
3.6. Μεταλλογραφικός έλεγχος.....	29
3.7. Δοκιμή εφελκυσμού.....	29
3.8 Δοκιμή κάμψης.....	30
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα-σχολιασμός αποτελεσμάτων	33
4.1. Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του μετάλλου βάσης.....	33
4.1.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού του μετάλλου βάσεως.....	38
4.2. Αποτελέσματα συγκόλλησης δοκιμίων.....	38
4.2.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της συγκόλλησης των δοκιμίων.....	42
4.3. Μακροσκοπικός έλεγχος της περιοχής συγκόλλησης	42
4.3.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	45
4.4. Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου.....	46
4.4.1. Αποτελέσματα ραδιογραφίας με ακτίνες X.....	46
4.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής με διεισδυτικά υγρά	49
4.4.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μη καταστρεπτικού ελέγχου.....	52
4.4. Αποτελέσματα μακροσκοπικού ελέγχου.....	53
4.4.1. Αξιολόγηση των δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042.....	55
4.4.2. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης	57
4.5. Αποτελέσματα Μικροσκληρομέτρησης	57
4.5.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μικροσκληρομέτρησης	63
4.6. Αποτελέσματα μεταλλογραφικού ελέγχου.....	63
4.6.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταλλογραφικού ελέγχου	66
4.7. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού	67

4.7.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της δοκιμής του εφελκυσμού.....	73
4.8. Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης	74
4.8.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης.....	76
Κεφάλαιο 4. Σύγκριση TIG-MIG	77
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα.....	82
Κεφάλαιο 6. Προτεινόμενη έρευνα	84
Βιβλιογραφία	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Τα πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου	4
Πίνακας 2.2. Οι σειρές των κραμάτων αλουμινίου και τα κύρια κραματικά στοιχεία τους.....	5
Πίνακας 2.3. Τα όρια περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων στα κράματα της σειράς 5xxx	7
Πίνακας 2.4. Οι μηχανικές ιδιότητες των εμπορικών κραμάτων της σειράς 5xxx μετά από διάφορες κατεργασίες.....	9
Πίνακας 2.5. Η χημική σύσταση του Αλουμινίου 5083	11
Πίνακας 2.6. Τυπικές μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου 5083.....	11
Πίνακας 2.7. Τυπικές φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου 5083	11
Πίνακας 3.1. Τα τέσσερα δείγματα, οι παράμετροι συγκόλλησης, παρατηρήσεις.	24
Πίνακας 3.2. Τα εννέα δείγματα και οι παράμετροι συγκόλλησης	26
Πίνακας 3.3. Οι συνθήκες της δοκιμής της κάμψης.....	31
Πίνακας 4.1. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού για τα τέσσερα δοκίμια του μετάλλου βάσης.....	33
Πίνακας 4.2. Φωτογραφίες από την Εστίαση στην περιοχή των σφαλμάτων και αξιολόγηση των ιχνών με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN1289 (πρώτη σειρά συγκολλήσεων).	50
Πίνακας 4.3. Φωτογραφίες από την Εστίαση στην περιοχή των σφαλμάτων και αξιολόγηση των ιχνών με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN1289 (δεύτερη σειρά συγκολλήσεων).....	51
Πίνακας 4.4. Συγκεντρωτικός πίνακας εφαρμογής του προτύπου ΕΛΟΤ EN 30042 για την πρώτη σειρά συγκολλήσεων	55
Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικός πίνακας εφαρμογής του προτύπου ΕΛΟΤ EN 30042 για την πρώτη σειρά συγκολλήσεων	56
Πίνακας 4.6. Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης των δοκιμίων T ₁₂ και T ₁₈ (×200).....	63
Πίνακας 4.7 Η περιοχή του συνόρου ΘΕΖ-λίμνης συγκόλλησης των δοκιμίων T ₁₂ και T ₁₈ (×200).....	64
Πίνακας 4.8 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης των δοκιμίων T ₁₂ και T ₁₈ (×50)	64
Πίνακας 4.9. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού.....	67
Πίνακας 4.10. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την δοκιμή κάμψης.....	74
Πίνακας 4.11. Οι παράμετροι των τριών βέλτιστων δοκιμίων	77
Πίνακας 4.12. Οι φωτογραφίες τομής των δοκιμίων T ₁₈ , T ₁₉ και M ₁₂ στο στερεοσκόπιο	78

Πίνακας 4.13. Η περιοχή του συνόρου λίμνης συγκόλλησης-βασικού μετάλλου δύο δοκιμίων συγκολλημένων με την μέθοδο TIG και MIG αντίστοιχα.....	80
Πίνακας 4.14. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των βέλτιστων δοκιμίων από κάθε μέθοδο.....	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για ένα κράμα αλουμινίου μαγνησίου 5% κ.β. και μη κραματομένου αλουμινίου καθαρότητας 99.5% . Με την προσθήκη 5% κ.β. μαγνησίου πετυχαίνουμε σημαντική βελτίωση στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες του μη κραματομένου αλουμινίου [15].	4
Σχήμα 2.2	Το διάγραμμα φάσεων αλουμινίου –Μαγνησίου.	8
Σχήμα 2.3	Η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε Μαγνήσιο (μέχρι 5% κ.β.) και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς 5xxx.[8]	9
Σχήμα 2.4	Κατασκευή (α) βυτίου καυσίμου και [20] (β) σκάφους από κράμα αλουμινίου 5083 [21]	13
Σχήμα 2.5	Η διάταξη του σημείου συγκόλλησης της μεθόδου TIG.	14
Σχήμα 2.6	Συγκόλληση TIG στο εργοστάσιο Κιολείδης Α.Ε.Β.Ε.	14
Σχήμα 2.7	Η άνω πλευρά συγκόλλησης κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG.	15
Σχήμα 2.8	(α) Πολικότητα ΣΡΗΑ, στενή συγκόλληση μεγάλη διείσδυση (β) Πολικότητα ΣΡΗΘ, ευρεία συγκόλληση μικρή διείσδυση (γ) Το ΕΡ/ΗF προκαλεί θραύση του προστατευτικού φιλμ αλουμίνιας και δημιουργείται η λίμνη συγκόλλησης.	16
Σχήμα 2.9	Η διαλυτότητα του υδρογόνου στο αλουμίνιο συναρτῆσει της θερμοκρασίας [15].	17
Σχήμα 2.10	Παραμορφώσεις των συγκολλητών κατασκευών. (α) Εγκάρσια συστολή, (β) Γωνιακή μεταβολή, (γ) Επίπεδη περιστροφή, (δ) διαμήκης συστολή, (ε) διαμήκης καμπτική παραμόρφωση, (στ) λυγισμός.	19
Σχήμα 2.11	(α) Οι ακολουθίες συγκόλλησης μπορούν να βοηθήσουν να ελαχιστοποιήσουν τη θερμική στρέβλωση. (β) Η στρέβλωση ή κατάλληλη τοποθέτηση των υλικών πριν την συγκόλληση αντισταθμίζουν την θερμική παραμόρφωση.[10]	20
Σχήμα 3.1	Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης.	22
Σχήμα 3.2	Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης.	22
Σχήμα 3.3	Η βάση όπου συγκρατήθηκαν τα δοκίμια για να συγκολληθούν. Διακρίνεται η άκρη του απαγωγού των αερίων συγκόλλησης.	25
Σχήμα 3.4	(α) Η πηγή ακτινοβολίας για την ραδιογράφιση και (β) ο τρόπος τοποθέτησης ενός δοκιμίου πάνω στο φιλμ.	27
Σχήμα 3.5	Φωτογραφίες αμέσως μετά την εφαρμογή (α)του διεισδυτικού υγρού MarkeR MR68C (β) του εμφανιστή MarkeR MR7.	28
Σχήμα 3.6	Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης. Στην σκούρα περιοχή βρίσκεται η λίμνη συγκόλλησης.	30
Σχήμα 3.7	Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης. Στο κέντρο του δοκιμίου βρίσκεται η συγκόλληση και έχει αφαιρεθεί το περίσσιο υλικό.	30
Σχήμα 3.8	Το δοκίμιο κάμψης για τα συγκολλημένα δείγματα. Στην σκούρα περιοχή βρίσκεται η λίμνη συγκόλλησης.	31
Σχήμα 3.9	Το δοκίμιο κάμψης για τα συγκολλημένα δείγματα. Στο κέντρο του δοκιμίου βρίσκεται η συγκόλληση και έχει αφαιρεθεί το περίσσιο υλικό.	31
Σχήμα 3.10	Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής της κάμψης.	32
Σχήμα 4.1	Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B _{1α} .	33
Σχήμα 4.2	Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B _{1β} .	34
Σχήμα 4.3	Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B _{2α} .	34
Σχήμα 4.4	Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B _{2β} .	35
Σχήμα 4.5	Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 χωρίς να έχει υποστεί χημική προσβολή. Τα μαύρα στίγματα είναι αδιάλυτα εγκλείσματα, πιθανόν σωματίδια Mg ₂ Si ενώ τα μεγαλύτερα γκριζας απόχρωσης σωματίδια (Fe,Mn) ₃ SiAl ₁₂ (×500).	36
Σχήμα 4.6	Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 (×200).	36
Σχήμα 4.7	Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 (×500).	37
Σχήμα 4.8	Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 (×1000).	37
Σχήμα 4.9	Φωτογραφίες των δοκιμών (α) T ₁ και (β) T ₂ που πραγματοποιήθηκαν στο T.M.M.B.	39
Σχήμα 4.10	Φωτογραφίες των δοκιμών (α) T ₃ και (β) T ₄ που πραγματοποιήθηκαν στο T.M.M.B.	39

Σχήμα 4.11 Φωτογραφίες των δοκιμίων (α) T ₁₂ και (β) T ₁₃ που συγκολλήθηκαν στο εργοστάσιο Κιολεϊδής ΑΕΒΕ.	40
Σχήμα 4.12 Φωτογραφίες των δοκιμίων (α) T ₁₈ και (β) T ₁₉ που συγκολλήθηκαν στο εργοστάσιο Κιολεϊδής ΑΕΒΕ.	40
Σχήμα 4.13 Πλάγια λήψη των δοκιμίων (α) T ₁₂ και (β) T ₁₃ όπου διακρίνεται η γωνιακή μεταβολή των ελασμάτων.	41
Σχήμα 4.14 Πλάγια λήψη των δοκιμίων (α) T ₁₈ και (β) T ₁₉ όπου διακρίνεται η γωνιακή μεταβολή των ελασμάτων.	41
Σχήμα 4.15 Ατελής διεισδυση παρουσιάστηκε σε πολλά σημεία των υπόλοιπων δειγμάτων που απορρίφθηκαν εξαρχής.	41
Σχήμα 4.16 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁ (×6.5). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει το άτηκτο τμήμα της άκρης των ελασμάτων.	42
Σχήμα 4.17 Εικόνα από (α) το μέσο της συγκόλλησης όπου διακόπηκε (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₂ (×6.5).	43
Σχήμα 4.18 Εικόνα από (α) το άνω επιφάνεια (πρόσωπο) της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₃ (×6.5). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει το άτηκτο τμήμα της άκρης των ελασμάτων....	43
Σχήμα 4.19 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₄ (×6.5). Στη κυκλωμένη περιοχή εντοπίστηκε ρωγμή.	43
Σχήμα 4.20 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₂ (×6.5).	44
Σχήμα 4.21 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₃ (×6.5).	44
Σχήμα 4.22 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₈ (×6.5).	44
Σχήμα 4.23 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₉ (×6.5). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει ατέλεια που εμφανίστηκε στο τέλος της συγκόλλησης.	45
Σχήμα 4.24 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₁	46
Σχήμα 4.25 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₂ . Διακρίνεται η περιοχή όπου διεκόπη η συγκόλληση	46
Σχήμα 4.26 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₃ . Διακρίνεται περιοχή με πόρους.....	47
Σχήμα 4.27 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₄	47
Σχήμα 4.28 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₁₂	47
Σχήμα 4.29 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₁₃ , κατά μήκος της σημειωμένης περιοχής εντοπίστηκαν πόροι σε γραμμική διάταξη.....	48
Σχήμα 4.30 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₁₈	48
Σχήμα 4.31 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T ₁₉	48
Σχήμα 4.32 Τα δοκίμιο T ₁ και T ₂ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.	49
Σχήμα 4.33 Τα δοκίμιο T ₃ και T ₄ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.	49
Σχήμα 4.34 Τα δοκίμιο T ₁₂ και T ₁₃ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.	49
Σχήμα 4.35 Τα δοκίμιο T ₁₈ και T ₁₉ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.	50
Σχήμα 4.36 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T ₁ και (β) T ₂ (×6,5).....	53
Σχήμα 4.37 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T ₃ και (β) T ₄ (×6,5).	53
Σχήμα 4.38 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T ₁₂ και (β) T ₁₃ (×6,5). Στη φωτογραφία (α) διακρίνεται ρωγμή μέσα στην λίμνη συγκόλλησης.....	54
Σχήμα 4.39 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T ₁₈ και (β) T ₁₉ (×6,5).....	54
Σχήμα 4.40 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₁	58
Σχήμα 4.41 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₂	58
Σχήμα 4.42 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₃	59
Σχήμα 4.43 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₄	59
Σχήμα 4.44 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₁₂	60
Σχήμα 4.45 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₁₃	60
Σχήμα 4.46 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₁₈	61
Σχήμα 4.47 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T ₁₉	61
Σχήμα 4.48 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μικροσκληρομέτρησης για όλα τα δοκίμια.	62
Σχήμα 4.49 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₈ , διακρίνεται η δενδριτική δομή (×100).	65

Σχήμα 4.50 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης του δοκιμίου T ₁₈ . Τα ανοιχτόχρωμα στίγματα είναι αδιάλυτα εγκλείσματα, πιθανόν σωματίδια Mg ₂ Si ή (Fe,Mn) ₃ SiAl ₁₂ (×500).....	65
Σχήμα 4.51 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₃	70
Σχήμα 4.52 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₄	70
Σχήμα 4.53 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₁₂	71
Σχήμα 4.54 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₁₃	71
Σχήμα 4.55 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₁₈	72
Σχήμα 4.56 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T ₁₉	72
Σχήμα 4.57 Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης για όλα τα δοκίμια εφελκυσμού.	73
Σχήμα 4.58 Τα δοκίμια δεν παρουσίασαν σημαντική μείωση του ορίου διαρροής σε σχέση με το μέταλλο βάσης ή την προδιαγραφή του ASM Handbook , η μείωση του ορίου θραύσης ήταν της τάξης του 8.5%... ..	74

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή-Ορισμός του προβλήματος

Η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5xxx συγκεντρώνει σημαντικό βιομηχανικό-κατασκευαστικό ενδιαφέρον και βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη χώρα μας. Η επιτυχής συγκόλληση λεπτών ελασμάτων αλουμινίου θα οδηγούσε σε αξιοσημείωτη εξοικονόμηση πόρων στις κατασκευές, αλλά και σε μείωση του βάρους τους χωρίς να υπάρξει έκπτωση στην αντοχή. Η μείωση του βάρους ιδιαίτερα στις περιπτώσεις κατασκευής οχημάτων, θα είχε ιδιαίτερα θετικό αντίκτυπο στην αύξηση του ωφέλιμου φορτίου, στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών καυσαερίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια ανάδειξης και αντιμετώπισης των σημαντικότερων προβλημάτων κατά την συγκόλληση λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG. Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας διεξήχθησαν συγκολλήσεις ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 διαστάσεων 200×100×2 mm υπό διαφορετικών συνθηκών ρεύματος, υλικού πλήρωσης και αερίου προστασίας. Η μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών συνθηκών στην ποιότητα της συγκόλλησης αξιολογήθηκε με τις εξής μεθόδους:

- Μη καταστρεπτικός έλεγχος (ραδιογραφία ακτίνων X, διεισδυτικά υγρά)
- Μακροσκοπικός έλεγχος
- Μεταλλογραφικός έλεγχος
- Δοκιμή μικροσκληρομέτρησης
- Μηχανικές δοκιμές (εφελκυσμός, κάμψη)

Τέλος γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων συγκόλλησης κράματος αλουμινίου 5083 με τις μεθόδους TIG και MIG, με χρήση στοιχείων της διπλωματικής εργασίας του Ανδρέα Τζαμτζή, *Συγκολλήσεις MIG λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083: επίδραση παραμέτρων και χαρακτηρισμός.*

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή στο αλουμίνιο και στα κράματά του

Ένας μοναδικός συνδυασμός ιδιοτήτων κατατάσσει το αλουμίνιο και τα κράματά του μεταξύ των πιο εύχρηστων υλικών. Όλα τα κράματα είναι ελαφριά, ενώ μερικά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή από χάλυβες. Η πλειοψηφία των κραμάτων αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε ποικίλες εφαρμογές. Το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και υψηλή ανακλαστικότητα στη θερμότητα και στο φως. Το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν σε οποιαδήποτε μορφή. Το χαμηλό βάρος είναι το πιο βασικό χαρακτηριστικό του αλουμινίου, η πυκνότητα του οποίου είναι περίπου $2,7 \cdot 10^3$ χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο στους 20°C.[11].

2.1.1. Οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο παρουσιάζει μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 90 MPa. Η χρησιμότητά του όμως ως το δομικό υλικό με αυτήν την μορφή είναι περιορισμένη. Εντούτοις, με κατεργασία και ψυχρή έλαση η αντοχή του μπορεί να διπλασιαστεί. Ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στην αντοχή του μπορεί να επιτευχθεί με την ανάμιξη του με τα μικρά ποσοστά ενός ή περισσότερων μετάλλων όπως μαγγάνιο, πυρίτιο, χαλκός, μαγνήσιο ή ψευδάργυρος. Το μέγεθος της βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του καθαρού αλουμινίου με την προσθήκη μικρής ποσότητας μαγνησίου αποδίδεται στο **σχήμα 2.1**.

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματα του γίνονται επίσης ισχυρότερα με την εν ψυχρώ κατεργασία. Μερικά από τα κράματα ενισχύονται περαιτέρω με θερμική κατεργασία, έτσι ώστε σήμερα τα κράματα αλουμινίου να αποκτούν αντοχή έως και 700 MPa. Μια ευρεία ποικιλία μηχανικών χαρακτηριστικών, μπορεί να προσδοθεί σε ένα κράμα αλουμινίου με τον συνδυασμό διαμόρφωσης εν ψυχρώ και θερμικής επεξεργασίας.

Σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός τα κράματα αλουμινίου σκληραίνουν χωρίς να παρουσιάζουν μείωση της ολκιμότητας τους ή προβλήματα ψαθυρής θραύσης, έτσι το αλουμίνιο είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέταλλο για εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το αλουμίνιο παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη διάβρωση επειδή στην επιφάνεια του, που έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, δημιουργείται ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα οξειδίου που προστατεύει το υπόλοιπο μέταλλο από περαιτέρω οξείδωση. Εκτός αν παραμείνει εκτεθειμένο σε κάποιο διαβρωτικό μέσο, το οποίο καταστρέφει αυτό το προστατευτικό επίστρωμα οξειδίου, το μέταλλο

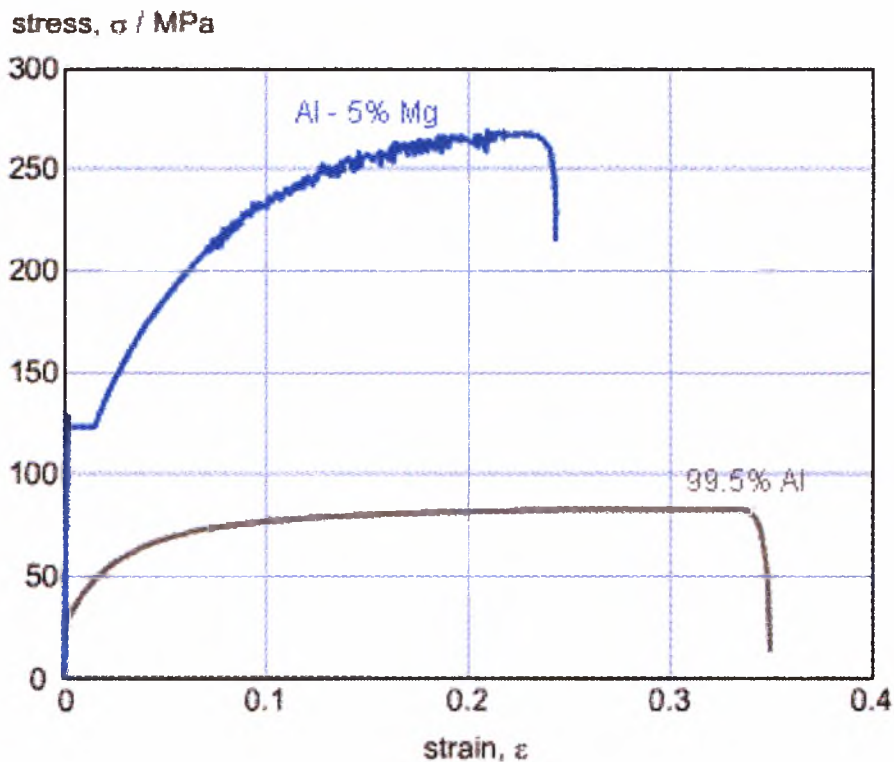
παραμένει προστατευμένο από τη διάβρωση. Το αλουμίνιο είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση, ακόμα και σε βιομηχανική ατμόσφαιρα, όπου διαβρώνονται τα περισσότερα μέταλλα. Είναι επίσης ανθεκτικό στη διάβρωση σε μερικά οξέα.

Το γεγονός ότι το αλουμίνιο είναι μη τοξικό ανακαλύφθηκε από τις αρχές της βιομηχανικής του χρήσης. Αυτό το χαρακτηριστικό, επιτρέπει στο μέταλλο να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μαγειρικών σκευών και εργαλείων χωρίς οποιαδήποτε επιβλαβή αποτελέσματα στην υγεία, ενώ σήμερα εξοπλισμός από αλουμινίου χρησιμοποιείται από τις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων. Το ίδιο χαρακτηριστικό επιτρέπει τη χρήση φύλλων αλουμινίου για το τύλιγμα τροφίμων.

Το αλουμίνιο είναι ένα από τα δύο πιο κοινά μέταλλα, που έχουν αρκετά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για τη χρήση σαν ηλεκτρικός αγωγός. Επειδή το αλουμίνιο έχει λιγότερο από το ένα τρίτο της πυκνότητας του χαλκού, ένας αγωγός αλουμινίου έχει το μισό βάρος από έναν αγωγό χαλκού που παρουσιάζει την ίδια δυνατότητα μεταφοράς φορτίου. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου εμφανίστηκε στο προσκήνιο κατά την πρώιμη χρήση του, στην κατασκευή εργαλείων μαγειρικής. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σημαντικό σε εφαρμογές ανταλλαγής θερμότητας όπου η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα μέσο σε άλλο λαμβάνει χώρα, είτε θερμαίνοντας είτε ψύχοντας. Κατά συνέπεια εναλλάκτες θερμότητας από αλουμινίου είναι κοινοί στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία πετρελαίου, στα αεροσκάφη και σε άλλες βιομηχανίες.

Το αλουμίνιο είναι επίσης ένας άριστος ανακλαστήρας της ακτινοβόλου ενέργειας σε όλο το φάσμα ακτινοβολίας, από την υπεριώδη ακτινοβολία μέχρι το ορατό φάσμα, την υπέρυθη ακτινοβολία, τη θερμότητας καθώς επίσης και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ραδιοφώνου και του ραντάρ. Το αλουμίνιο παρουσιάζει ανακλαστικότητα πάνω από 80%, το οποίο έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση του σε συσκευές φωτισμού. Αυτό το χαρακτηριστικό ανακλαστικότητας οδηγεί στη χρήση του ως μονωτικό υλικό.

Όλα τα κράματα αλουμινίου μπορούν να διαμορφωθούν σχετικά γρήγορα και εύκολα για την παραγωγή πλατέων προϊόντων. Το μέταλλο μπορεί να υποστεί έλαση, διέλαση για την παραγωγή προφίλ και να υποστεί μηχανικές κατεργασίες. Σχεδόν οποιαδήποτε μέθοδος ένωσης μπορεί να εφαρμοστεί στα κράματα αλουμινίου. Η σύνδεση των μερών αλουμινίου με ήλους έχει υιοθετηθεί επιτυχώς σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των τμημάτων αεροσκαφών και μερικών εφαρμογών οικοδόμησης. Πολλά κράματα αλουμινίου μπορούν να κολληθούν με συγκολλήσεις τήξης με πολύ καλά αποτελέσματα. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα χρήσης κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζονται στον **πίνακα 2.1**.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για ένα κράμα αλουμινίου μαγνησίου 5% κ.β. και μη κραματομένου αλουμινίου καθαρότητας 99.5% . Με την προσθήκη 5% κ.β. μαγνησίου πετυχαίνουμε σημαντική βελτίωση στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες του μη κραματομένου αλουμινίου [15].

Πίνακας 2.1. Τα πλεονεκτήματα των κραμάτων αλουμινίου.

Πλεονεκτήματα του αλουμινίου
Χαμηλό βάρος
Υψηλή αντοχή
Υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος
Όλκιμο σε σχέση με την αντοχή
Όλκιμο σε χαμηλές θερμοκρασίες
Αντοχή στη διάβρωση
Μη τοξικό
Καλή θερμική αγωγιμότητα
Καλή ανακλαστικότητα
Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
Μη μαγνητικό

2.1.2. Τα κράματα αλουμινίου

Μερικά κράματα αλουμινίου μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία, μερικά όχι. Τα θερμικώς μη κατεργάσιμα κράματα περιέχουν μικρά ποσά στοιχείων όπως μαγγάνιο, πυρίτιο, σίδηρος και μαγνήσιο σε στερεό διάλυμα. Τα κράματα αυτά μπορούν να ισχυροποιηθούν με εν

ψυχρώ κατεργασία. Τα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα περιέχουν στοιχεία όπως ο χαλκός, μαγνήσιο, ψευδάργυρος και πυρίτιο. Το πρώτο βήμα στη θερμική επεξεργασία τους είναι η θέρμανση σε μια υψηλή θερμοκρασία (300–500° C, ανάλογα με το κράμα) ώστε να διαλυτοποιηθούν όλες οι φάσεις. Μετά την ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος το μέταλλο θερμαίνεται εκ νέου στους 100–200° C για να επιτρέψει στα δευτερεύοντα σωματίδια να κατακρημνιστούν μέσα στη μικροδομή και να αυξηθεί η αντοχή του υλικού (μειώνοντας την ολκιμότητα) [11].

2.1.3. Οι κατηγορίες των κραμάτων αλουμινίου

Στα κράματα αλουμινίου δόθηκαν αρχικά τέσσερις αριθμοί ψηφίων που ορίστηκαν από την Aluminum Association USA. Τα χυτά κράματα αριθμήθηκαν με παρόμοιο τρόπο, με έναν αριθμό τεσσάρων ψηφίων συμπεριλαμβανομένου ενός δεκαδικού ψηφίου. Αυτοί οι αριθμοί δεν προσδίδουν τη σύσταση του κράματος, πέρα από πρώτο ψηφίο, που ταξινομεί τα κράματα στις ομάδες, ανάλογα με τα κύρια κραματικά στοιχεία. Συνοπτικά οι σειρές κραμάτων και τα κύρια κραματικά στοιχεία τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.2.** [13].

Πίνακας 2.2. Οι σειρές των κραμάτων αλουμινίου και τα κύρια κραματικά στοιχεία τους.

Θερμικώς μη κατεργάσιμα	
Σειρά	Κύριο κραματικό στοιχείο
1xxx	Εμπορικά καθαρό αλουμίνιο Al>99.00%
3xxx	Μαγγάνιο
5xxx	Μαγνήσιο
8xxx	Άλλα κραματικά στοιχεία
Θερμικώς κατεργάσιμα	
Σειρά	Κύριο κραματικό στοιχείο
2xxx	Χαλκός
4xxx	Πυρίτιο
6xxx	Μαγνήσιο-Πυρίτιο
7xxx	Ψευδάργυρος

Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο είναι σημαντικά στη 1xxx σειρά αλλά όχι στις υπόλοιπες. Στη 1xxx σειρά τα τελευταία δύο ψηφία περιγράφουν την ελάχιστη καθαρότητα του αλουμινίου, για παράδειγμα το κράμα 1145 είναι περιεκτικότητας 99,45% σε αλουμίνιο, ενώ το κράμα 1200 είναι περιεκτικότητας 99,00% σε αλουμίνιο. Στις υπόλοιπες σειρές αλουμινίων το τρίτο και τέταρτο ψηφίο είναι απλοί αύξοντες αριθμοί, κατά συνέπεια 5082 και 5083 είναι δύο διακριτά κράματα αλουμίνιο-μαγνησίου. Το δεύτερο ψηφίο δείχνει κάποιες τροποποιήσεις κραμάτων και έχει μια περιέργη λειτουργία, δείχνει μια στενή σχέση μεταξύ των κραμάτων, κατά συνέπεια το κράμα 5352

συσχετίζονται πολύ με το 5052 και το 5252 ενώ τα κράματα 7075 και 7475 διαφέρουν μόνο ελαφρώς στη σύνθεση. Τα κράματα αλουμινίου μετά τον τετραψήφιο αριθμό συνοδεύονται από τον συμβολισμό της διεργασία που ακολουθήθηκε κατά την παραγωγή τους. Τα βασικότερα σύμβολα είναι:

- F: Το κράμα παρέμεινε ως είχε μετά την παραγωγή.
- O: Ανοπτημένο, έχει υποστεί ανακρυστάλλωση.
- H: Έχει υποστεί ψυχρή έλαση. Η αντοχή του αυξάνεται από την κατεργασία εν ψυχρώ, μετά την οποία μπορεί να ακολουθήσει θερμική κατεργασία για ανόπτηση. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την θερμική κατεργασία:

- H1: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, χωρίς να έχει ακολουθήσει θερμική κατεργασία
- H2: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, έχει ακολουθήσει μερική ανόπτηση
- H3: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, έχει ακολουθήσει ανόπτηση για την σταθεροποίηση της αντοχής.

Το δεύτερο ψηφίο δείχνει το επίπεδο αντοχής που επιτυγχάνεται για το κράμα:

- 0: Ανοπτημένο
- 1: 1/8 Σκλήρυνση
- 2: 1/4 Σκλήρυνση
- 3: 3/8 Σκλήρυνση
- 4: 1/2 Σκλήρυνση
- 5: 5/8 Σκλήρυνση
- 6: 3/7 Σκλήρυνση
- 7: 7/8 Σκλήρυνση
- 8: Πλήρης σκλήρυνση
- 9: Εξαιρετικά σκληρό
- W: Θερμικά κατεργασμένο με στερεό διάλυμα παρεμβολής
- T: Θερμικά κατεργασμένο κράμα. Το T ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την θερμική κατεργασία:
 - 3: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ.
 - 4: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στην συνέχεια φυσική γήρανση.

- 5: Τεχνητή γήρανση
- 6: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση.
- 8: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής, στη συνέχεια τεχνητή γήρανση και τέλος διαμόρφωση εν ψυχρώ.
- 9: Τεχνητή γήρανση και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ.

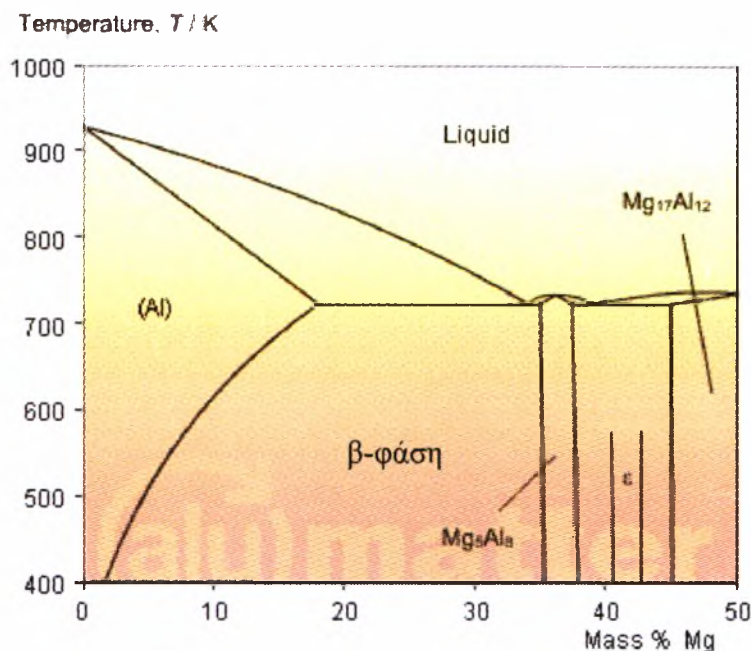
2.2. Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx ανήκουν στην κατηγορία των θερμικά μη κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου. Το κύριο κραματικό στοιχείο της σειράς είναι το μαγνήσιο ενώ στα διάφορα κράματα προστίθενται και άλλα κραματικά στοιχεία. Τα κράματα της σειράς 5xxx παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με καλή συγκολλησιμότητα. Οι χρήσεις των κραμάτων της σειράς αφορούν την αυτοκινητοβιομηχανία, στις μεταφορές, σε δοχεία πίεσης και σε θαλάσσιες κατασκευές.

Το αλουμίνιο με το μαγνήσιο δημιουργούν στερεό διάλυμα παρεμβολής. Το μαγνήσιο παρουσιάζει καλή διαλυτότητα στο αλουμίνιο (2% σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, 14.5% στους 451° C), παρόλα αυτά το εύρος της περιεκτικότητας του στα κράματα 5xxx συνήθως κυμαίνεται από 0.8% έως λίγο πάνω από το 5%. Στα κράματα της σειράς 5xxx προστίθενται χρώμιο, μαγγάνιο, σίδηρος και ζirkόνιο για την αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλωσης, την αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό και της αντοχής στη διάβρωση. Τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία που παρουσιάζονται στον **πίνακα 2.3** προκαλούν εκλέπτυνση των κόκκων, αύξηση της αντοχής στη τριματική διάβρωση, αύξηση της αντοχής, αύξηση της διαμορφωσιμότητας κτλ.

Πίνακας 2.3. Τα όρια περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων στα κράματα της σειράς 5xxx.

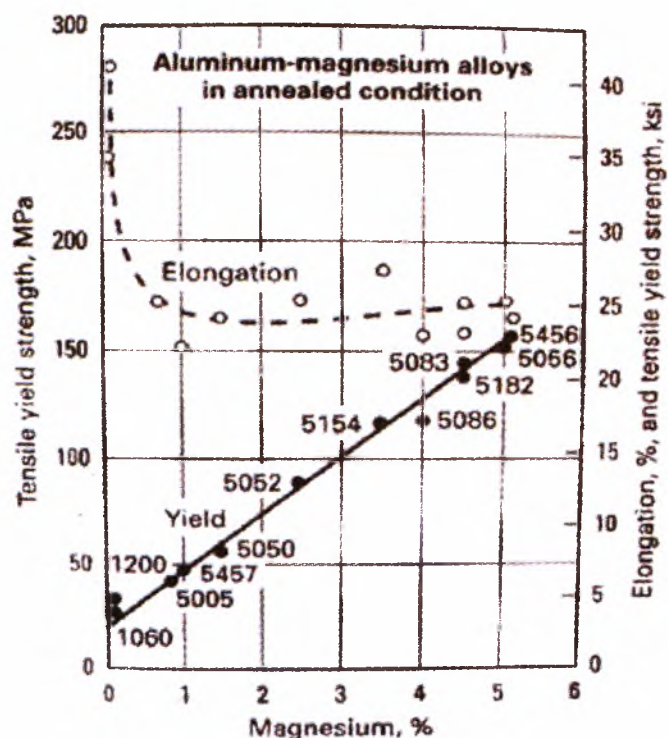
Στοιχείο	Περιεκτικότητες	Στοιχείο	Περιεκτικότητα
Mg	0.5-13 %	Zn	max 3 %
B	max 0.05 %	Li	max 3 %
Si	max 2 %	Cr	max 0.5 %
Ni	max 0.5 %	Zr	max 0.5 %
Fe	max 0.8 %	Ti	max 0.2 %
Be	max 0.01 %	Mn	max 2 %
Cu	max 0.2 %	-	-



Σχήμα 2.2 Το διάγραμμα φάσεων αλουμινίου –μαγνησίου [15].

Τα κραματικά στοιχεία δημιουργούν σύνθετα σωματίδια (ενδομεταλλικές ενώσεις), αδιάλυτα στο κράμα, τα οποία κατακρημνίζονται μέσα στο βασικό μέταλλο. Σε περιεκτικότητες μαγνησίου πάνω από 3-4% εμφανίζεται η β-φάση Mg_5Al_8 που κατακρημνίζεται στα σύνορα των κόκκων και μπορεί να οδηγήσει σε περικρυσταλλική προσβολή και εργοδιάβρωση (διάγραμμα φάσεων-**σχήμα 2.2**). Το πυρίτιο συνήθως σχηματίζει Mg_2Si , το οποίο είναι αδιάλυτο και εμφανίζεται στην δομή των κραμάτων της σειράς 5xxx. Παρουσία υψηλών περιεκτικότητας (1%-2%) σε σίδηρο, σίδηρο και μαγγάνιο, σίδηρο και χρώμιο σχηματίζονται τα σωματίδια $FeAl_3$, $(FeMn)Al_6$, $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, $(FeCr)Al_7$ και $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$. Αυτές οι ενώσεις δεν αλλάζουν τις ιδιότητες του υλικού αλλά επηρεάζουν τη διαμορφωσιμότητα, την αντοχή σε κόπωση και το χρώμα του υλικού. Τέλος άλλες ενώσεις που μπορεί να εμφανιστούν στα κράματα της σειράς 5xxx είναι τα: Fe_2SiAl_8 , $FeAl_3$, $(FeMn)Al_6$, $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, $(FeCr)Al_7$, $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$, $CuMgAl_2$, Cu_2FeAl_7 , $Mg_3Zn_3Al_2$ και εξαρτώνται από την χημική σύσταση των κραμάτων.

Το μαγνήσιο αποτελεί τον κύριο παράγοντα που καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 5xxx ενώ τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία συνεισφέρουν. Στο **σχήμα 2.3** δίνεται η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε μαγνήσιο και των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς 5xxx [13].



Σχήμα 2.3 Η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε Μαγνήσιο (μέχρι 5% κ.β.) και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς 5xxx. [8]

Η αντοχή των κραμάτων της σειράς 5xxx κυμαίνεται από 125 MPa έως 310 MPa ενώ η επιμήκυνση είναι αρκετά υψηλή και συνήθως ξεπερνά το 25%. Τα κράματα της σειράς 5xxx εργοσκληραίνουν σημαντικά όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.2**. Το κράμα αλουμινίου 5456 που έχει υποστεί εργοσκλήρυνση παρουσιάζει μέγιστη αντοχή σε εφέλκυσμό 385 MPa και επιμήκυνση 5%. Στον **πίνακα 2.4**, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων σε σχέση με την περιεκτικότητά τους σε μαγνήσιο με την χύτευσή τους ή την ανόπτηση που έχουν υποστεί.

Πίνακας 2.4. Οι μηχανικές ιδιότητες των εμπορικών κραμάτων της σειράς 5xxx μετά από Διάφορες τεχνολογίες χύτευσης-κατεργασίας [13]

Alloy	Τεχνολογία παραγωγής/θερμική κατεργασία	Σκληρότητα (HV)	όριο θραύσης σ_{UTS} (MPa)	Όριο διαρροής σ_y (MPa)	Επιμήκυνση ϵ_f (%)
0.5-1.5% Mg	Έλαση/Ανόπτηση	25-35	100-150	40-80	20-40
	Έλαση/Αποτατική ανόπτηση	60-80	200-300	150-250	5-15

1% Mg, 1% Mn	Έλαση/Ανόπτηση	35-50	150-200	50-100	20-30
	Έλαση/Αποτατική ανόπτηση	65-90	250-350	200-300	5-8
2-3% Mg, 0-2% Zn	Χυτό σε άμμο	50-60	150-200	50-100	3-7
	Χυτό-πρεσαριστό	50-70	170-220	70-150	3-8
	Έλαση/Ανόπτηση	40-55	150-250	80-150	25-35
	Έλαση/Αποτατική ανόπτηση	65-90	250-350	200-300	6-15
5-7% Mg	Χυτό σε άμμο	50-60	150-200	70-150	4-10
	Χυτό-πρεσαριστό	60-80	200-300	100-200	5-12
	Έλαση/Ανόπτηση	60-80	250-350	120-250	20-30
	Έλαση/Αποτατική ανόπτηση	80-100	400-500	250-350	10-15
8-12% Mg	Χυτό σε άμμο	70-90	150-300	100-200	3-8
	Χυτό-πρεσαριστό	75-95	200-350	100-250	5-10
	Έλαση/Ανόπτηση	80-100	350-500	150-300	10-25
	Έλαση/Αποτατική ανόπτηση	90-110	450-600	300-400	5-15

2.3. Το κράμα αλουμινίου 5083

Το κράμα αλουμινίου 5083 (*USA*: AA 5083, *EUROPE*: EN AW-A 5083, *ISO* Al Mg4.5Mn0.7) περιέχει 4.5 % κ.β. μαγνήσιο, 0.1% κ.β. μαγγάνιο και 0.1% κ.β. χρώμιο (πίνακας 2.5). Το υλικό αυτό παρουσιάζει καλή αντοχή και διατηρεί καλή διαμορφωσιμότητα χάρις στην άριστη του ολκιμότητα. Το αλουμίνιο 5083 παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση. Επίσης έχει, όπως όλα τα κράματα αλουμινίου, χαμηλή πυκνότητα και άριστη θερμική αγωγιμότητα..

Πίνακας 2.5. Η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083.

Στοιχείο	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Cu
Περιεκτικότητα % κ.β.	4.0-4.9	0.40-1.0	0.05-0.25	0.40 max	0.40 max	0.10 max

Το κράμα αλουμινίου 5083 μπορεί να διαμορφωθεί εν ψυχρώ, αλλά δεν μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία ώστε να αυξηθεί η αντοχή του. Παρουσιάζει πολύ καλή ολκιμότητα για τα επίπεδα αντοχής του, καλύτερη από τα περισσότερα κράματα της σειράς 5xxx. Στους πίνακες 2.6. και 2.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες και οι φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083.

Πίνακας 2.6. Τυπικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083-O [3].

Θερμοκρασία °C	Όριο θραύσης σ_{UTS} (MPa)	Όριο διαρροής σ_y (MPa)	Επιμήκυνση ϵ_f (%)
<i>Ελατό πλακίδιο, Θερμική κατεργασία O, Διαμήκης μέτρηση στη διεύθυνση έλασης</i>			
24	310	155	20
162	380	150	33
196	425	165	33
253	585	175	32
269	515	180	28
<i>Ελατό πλακίδιο, Θερμική κατεργασία O, Εγκάρσια μέτρηση στη διεύθυνση έλασης</i>			
24	315	160	19
162	385	155	29
196	452	175	28

Πίνακας 2.7. Τυπικές φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083 [1].

Πυκνότητα	$2.65 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Περιοχή Τήξης	580°C-645°C
Μέτρο ελαστικότητας	72 GPa
Ηλεκτρική αντίσταση	$0.058 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
Θερμική αγωγιμότητα	109 W/m.K
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	$6.1 \Omega \cdot \text{m} \times 10^{-8}$

2.3.1. Αντοχή στη διάβρωση

Το κράμα αλουμινίου 5083 παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση και χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες κατασκευές. Έχει πολύ καλή αντοχή σε υδατικά διαλύματα σε ένα εύρος από 4 pH έως 9 pH. Η αντοχή στη διάβρωση οφείλεται στο προστατευτικό φιλμ οξειδίου που σχηματίζεται από την αντίδραση του αλουμινίου με το οξυγόνο. Το προστατευτικό αυτό φιλμ σχηματίζεται εκ νέου αν η επιφάνεια του υλικού φθαρεί.

Το κράμα αλουμινίου 5083 μπορεί να ισχυροποιηθεί με ψυχρή κατεργασία (εργοσκλήρυνση) αλλά δεν μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία, επομένως δεν ενδείκνυται για χρήση σε περιβάλλον με θερμοκρασία άνω των 65°C [13].

2.3.2. Χρήσεις κράματος αλουμινίου 5083

Το κράμα αλουμινίου 5083 γενικά χρησιμοποιείται σε συγκολλητές κατασκευές που απαιτούν μέτρια-υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με αντοχή στη διάβρωση. Τέτοιες κατασκευές μπορεί να είναι θαλάσσιες κατασκευές, ναυπηγική, συγκολλητά δοχεία πίεσης, πύργοι τηλεόρασης, οχήματα μεταφοράς, κτλ. (**σχήμα 2.4**) Συνοπτικά το κράμα αλουμινίου 5083 παρουσιάζει:

- Πολύ καλή συγκολλησιμότητα
- Πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση
- Καλή διαμορφωσιμότητα
- Χαμηλή πυκνότητα
- Εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα



(α)

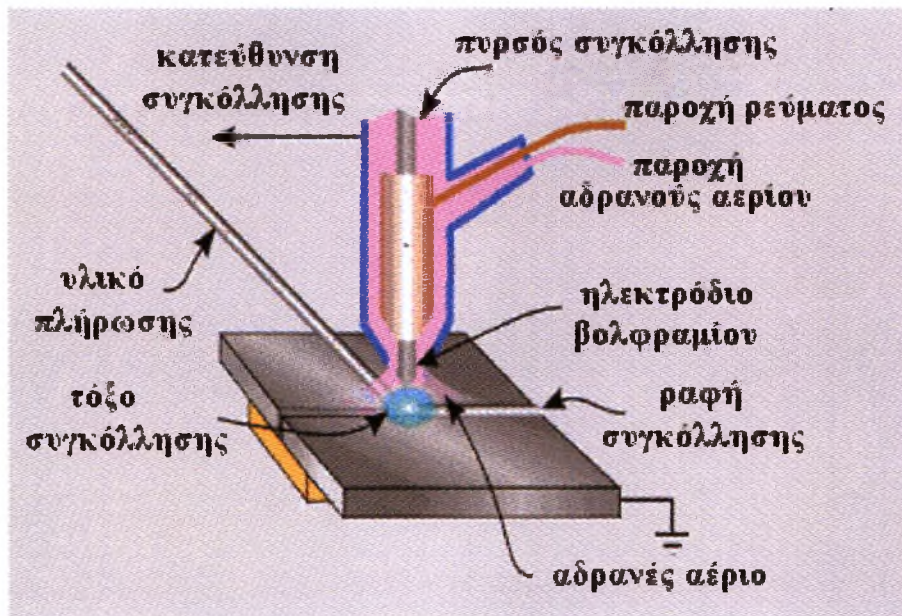


(β)

Σχήμα 2.4 Κατασκευή (α) βυτίου καυσίμου και [20] (β) σκάφους από κράμα αλουμινίου 5083 [21]

2.4. Η μέθοδος συγκόλλησης TIG

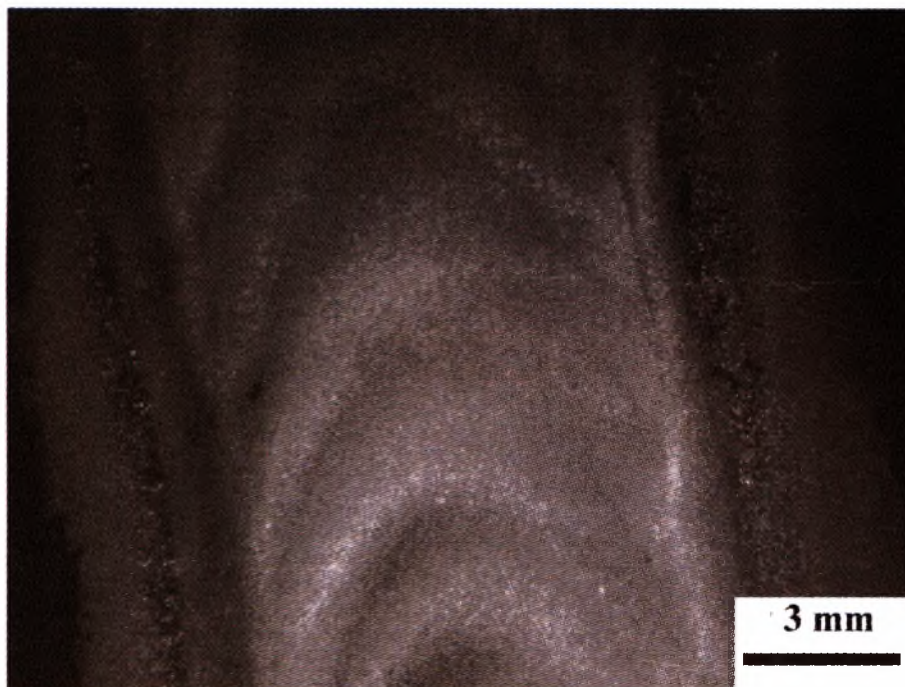
Η μέθοδος συγκόλλησης TIG (Tungsten Inert Gas) ή GTAW-welding (Gas Tungsten Arc Welding) χρησιμοποιεί ένα μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου για την δημιουργία του τόξου. Το υλικό πλήρωσης προστίθεται ξεχωριστά από λεπτές ράβδους που τήκονται μαζί με το βασικό μέταλλο δημιουργώντας την λίμνη συγκόλλησης. Είναι επίσης δυνατή η ένωση δύο υλικών χωρίς την χρήση υλικού πληρώσεως. Η συγκόλληση προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Στο **σχήμα 2.5** παρουσιάζεται η διάταξη του σημείου συγκόλλησης της μεθόδου ενώ στο **σχήμα 2.6** και στο **σχήμα 2.7** παρουσιάζονται φωτογραφίες κατά την συγκόλληση με την μέθοδο TIG και της επιφάνειας της συγκόλλησης .



Σχήμα 2.5 Η διάταξη του σημείου συγκόλλησης της μεθόδου TIG.



Σχήμα 2.6 Συγκόλληση TIG στο εργοστάσιο Κιολεϊδης Α.Ε.Β.Ε.



Σχήμα 2.7 Η άνω πλευρά συγκόλλησης κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG.

Η συγκόλληση με την μέθοδο TIG μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα, το πιο ρεύμα θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το προς συγκόλληση μέταλλο.

Στην συγκόλληση με την μέθοδο TIG με συνεχές ρεύμα (ΣΡ/DC) διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

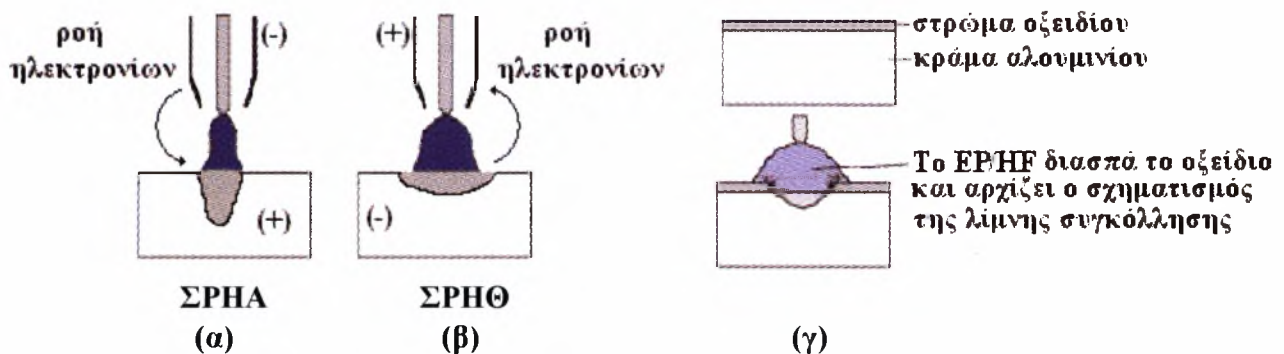
- Συνεχές ρεύμα-ηλεκτρόδιο αρνητικό (ΣΡΗΑ)
- Συνεχές ρεύμα-ηλεκτρόδιο θετικό (ΣΡΗΘ)

Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικό (ΣΡΗΑ), τα ηλεκτρόνια ρέουν από το ηλεκτρόδιο προς το μέταλλο συγκόλλησης με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας την θέρμανση και τήξη του μετάλλου. Με αυτόν τον τρόπο το πλάτος συγκόλλησης είναι μικρό και επιτυγχάνεται μεγάλη διείσδυση (**σχήμα 2.8 (α)**).

Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι θετικό (ΣΡΗΘ), τα ηλεκτρόνια ρέουν αντίστροφα, από το μέταλλο συγκόλλησης προς το ηλεκτρόδιο προκαλώντας την θέρμανση του ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις η θέρμανση του ηλεκτροδίου προκαλεί την τήξη του και την αλλοίωση της χημικής σύστασης της συγκόλλησης. Για αυτόν τον λόγο στις συγκολλήσεις ΣΡΗΘ χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο βολφραμίου μεγαλύτερης διαμέτρου σε συνδυασμό με ρεύμα χαμηλής έντασης και επιτυγχάνονται συγκολλήσεις με μεγάλο πλάτος συγκόλλησης και μικρή διείσδυση (**σχήμα 2.8 (β)**). Μία από τις σημαντικότερες επιδράσεις της συγκόλλησης ΣΡΗΘ είναι ο λεγόμενος καθοδικός καθαρισμός, ο οποίος είναι εμφανής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, όπου

προκαλείται η διάσπαση του προστατευτικού φιλμ οξειδίου (Al_2O_3) διευκολύνοντας την τήξη του μετάλλου.

Κατά την συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP/ AC) μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει συνδυασμός ΣΡΗΑ και ΣΡΗΘ. Ένας πλήρης κύκλος EP αντιστοιχεί σε 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 (ηλεκτρόδιο θετικό) προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο ανόρθωση του ρεύματος. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται ένα ηψίσυχο (HF) ρεύμα υψηλής τάσης με χαμηλή ένταση, το οποίο γεφυρώνει το κενό μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και του ηλεκτροδίου ενώ ταυτόχρονα διασπά το προστατευτικό φιλμ. Η συγκόλληση αυτή χαρακτηρίζεται ως EP/HF (AC/HF) (**σχήμα 2.8 (γ)**).



Σχήμα 2.8 (α) Πολικότητα ΣΡΗΑ, στενή συγκόλληση μεγάλη διείδυση (β) Πολικότητα ΣΡΗΘ, ευρεία συγκόλληση μικρή διείδυση (γ) Το EP/HF προκαλεί θραύση του προστατευτικού φιλμ αλουμίνιας και δημιουργείται η λίμνη συγκόλλησης.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου TIG είναι :

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ποιότητα συγκολλήσεων
- Μικρές παραμορφώσεις
- Συγκόλληση με ή χωρίς προσθήκη υλικού πλήρωσης
- Ακρίβεια και έλεγχος του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας

Μειονεκτήματα

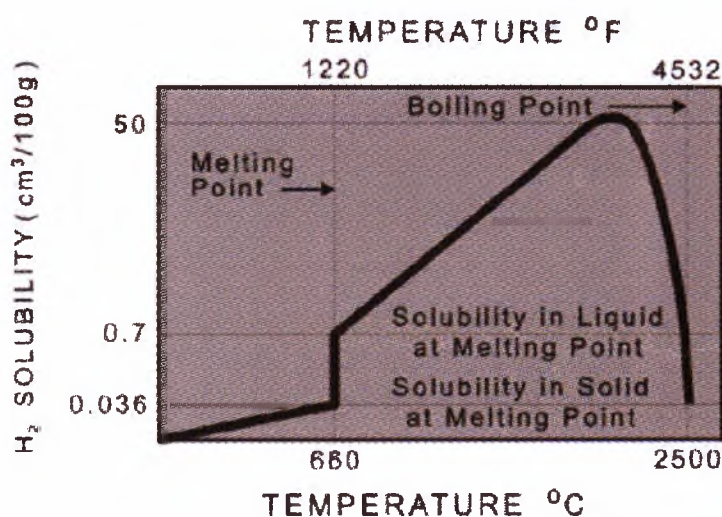
- Χαμηλή παραγωγικότητα σε σχέση με άλλες μεθόδους (SMAW, GMAW-MIG)
- Αντιοικονομική μέθοδος για ελάσματα πάχους (>10mm)
- Εύκολη μόλυνση της λίμνης συγκόλλησης εάν η προστασία του αδρανούς αερίου δεν είναι ικανοποιητική [5].

2.4.1. Συγκολλήσεις κράματος αλουμινίου 5083 με την μέθοδο TIG κίνδυνοι και προτάσεις

Παρόλο που πολλά μέταλλα συγκολλούνται με τη μέθοδο TIG, το μέταλλο που συγκολλάται συνηθέστερα με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι το αλουμίνιο. Πολλές άλλες μέθοδοι, φυσικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκόλληση αλουμινίου αλλά σε μικρότερα πάχη υπερισχύει η μέθοδος TIG. Κατά την συγκόλληση του κράματος αλουμινίου 5083 πρέπει να λαμβάνονται κάποιες παράμετροι υπ όψιν ώστε να επιτυγχάνεται καλής ποιότητας συγκολλήσεις.

Στην επιφάνεια του κράματος αλουμινίου 5083, όπως στα περισσότερα κράματα αλουμινίου, δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα οξειδίων του αλουμινίου (αλουμίνα Al_2O_3). Τα οξείδια του αλουμινίου παρουσιάζουν πολύ υψηλό σημείο τήξης (2050°C) σε σχέση με το κυρίως μέταλλο (660°C) γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ατελή τήξη του μετάλλου στη λίμνη συγκόλλησης. Επιπλέον η αλουμίνα παρουσιάζει πολύ χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα γεγονός που προκαλεί προβλήματα κατά την έναρξη του τόξου και κατά την διάρκεια της συγκόλλησης.

Η διάχυση του υδρογόνου κατά την διάρκεια συγκόλλησης αποτελεί έναν βασικό κίνδυνο για την ποιότητα της σύνδεσης, καθώς ευθύνεται για την δημιουργία πόρων. Το υδρογόνο παρουσιάζει καλή διαλυτότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και δεσμεύεται στην τηγμένη λίμνη συγκόλλησης σε μεγάλες ποσότητες. Κατά την διάρκεια της ψύξης η διαλυτότητα του υδρογόνου στο κράμα μειώνεται δραστικά (**σχήμα 2.9**) και έτσι ρέει ξανά προς την ατμόσφαιρα δημιουργώντας πόρους στη γραμμή συγκόλλησης.



Σχήμα 2.9 Η διαλυτότητα του υδρογόνου στο αλουμίνιο συναρτήσει της θερμοκρασίας [15].

Το κράμα αλουμινίου 5083, όπως και τα κράματα άλλων σειρών, παρουσιάζουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, έξι φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα. Παρότι το σημείο τήξης (γραμμή liquidus) των κραμάτων αλουμινίου είναι χαμηλό, σε σχέση με τον χάλυβα, απαιτείται υψηλότερη εισαγωγή θερμότητας για την συγκόλληση τους, εξαιτίας της υψηλής ειδικής θερμοχωρητικότητας. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα έχει σαν αποτέλεσμα το αλουμίνιο να είναι πολύ ευαίσθητο στις απότομες θερμικές εναλλαγές και να εμφανίζεται συχνά το φαινόμενο της θερμικής ρηγμάτωσης (hot-cracking).

Οι παραμορφώσεις κατά την συγκόλληση αποτελούν έναν μεγάλο κίνδυνο για τις συγκολλήσεις του κράματος αλουμινίου 5083 και των λοιπών κραμάτων αλουμινίου. Το κεφάλαιο των παραμορφώσεων αναλύεται στην παράγραφο 2.5.

Συνοψίζοντας κρίνεται απαραίτητη η απομάκρυνση το στρώματος των οξειδίων αμέσως πριν την συγκόλληση με μηχανικά μέσα. Άλλος τρόπος για την απομάκρυνση του στρώματος αλουμίνιας είναι η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4. Για την αποφυγή της διάχυσης του υδρογόνου μέσα στην λίμνη συγκόλλησης προτείνεται η χρήση μείγματος προστατευτικού αερίου που περιέχει Ήλιο. Το πλεονέκτημα τέτοιων μειγμάτων έγκειται στο γεγονός ότι το Ήλιο προσδίδει επιπλέον θερμότητα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δίνοντας την ευκαιρία στο υδρογόνο να διαχυθεί στην ατμόσφαιρα πριν η λίμνη στερεοποιηθεί. Τέλος πολλές φορές κρίνεται απαραίτητη η προθέρμανση των προς συγκόλληση μερών για την μείωση του ρυθμού ψύξης και την αποφυγή θερμικών ρηγματώσεων [8], [11].

Για την συγκόλληση του κράματος αλουμινίου 5083 χρησιμοποιούνται υλικά πλήρωσης 5183, 5356 ή 5556. Συγκολλήσεις με υλικό πλήρωσης το αλουμίνιο 5183 τείνουν να έχουν καλύτερη αντοχή ενώ με το αλουμίνιο 5356 καλύτερη ολκιμότητα. Το αέριο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι καθαρό Αργό καθώς και μείγματα Αργού και Ηλίου [15].

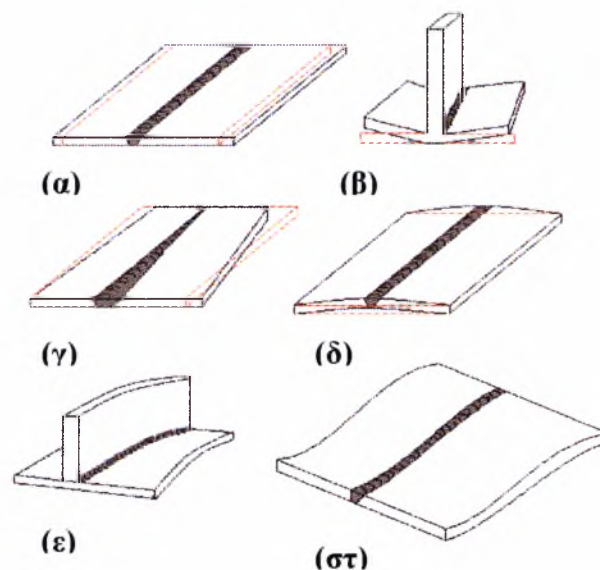
2.5. Παραμορφώσεις κατά την συγκόλληση αλουμινίου

Ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης προκαλεί παραμένουσες τάσεις. Οι παραμένουσες αυτές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν στις συγκολλητές κατασκευές παραμορφώσεις όπως, συστολή, περιστροφή, κάμψη ή λυγισμό. Οι παραμορφώσεις μπορούν να ξεπερνούν τις ανοχές που έχουν προδιαγραφεί και σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να επιφέρουν και αστοχία της συγκολλημένης κατασκευής. Οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες (σχήμα 2.10):

- Η εγκάρσια συστολή, που αφορά συστολή σε μία διεύθυνση κάθετη στον άξονα συγκόλλησης

- Η γωνιακή μεταβολή, αφορά στην περιστροφή γύρω από τον άξονα συγκόλλησης και προκαλείται από την ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά το πάχος του ελάσματος.
- Η επίπεδη περιστροφή, που σχετίζεται με την εγκάρσια συστολή και αφορά περιστροφή στο επίπεδο του ελάσματος.
- Η διαμήκης συστολή, που αφορά συστολή κατά μήκος του άξονα συγκόλλησης.
- Η διαμήκης καμπτική παραμόρφωση, που αφορά κάμψη σε ένα επίπεδο κάθετο στο έλασμα και διέρχεται από τον άξονα συγκόλλησης. Προκαλείται από ανομοιόμορφη κατανομή της διαμήκου συστολής κατά τον άξονα συγκόλλησης.
- Ο λυγισμός, που προκαλείται από τις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις.

Στις συγκολλητές κατασκευές μπορούν να εμφανιστούν ποιο σύνθετες παραμορφώσεις από τις παραπάνω, μπορούν όμως σε αρκετές περιπτώσεις να αναλυθούν στις βασικές κατηγορίες παραμορφώσεων.



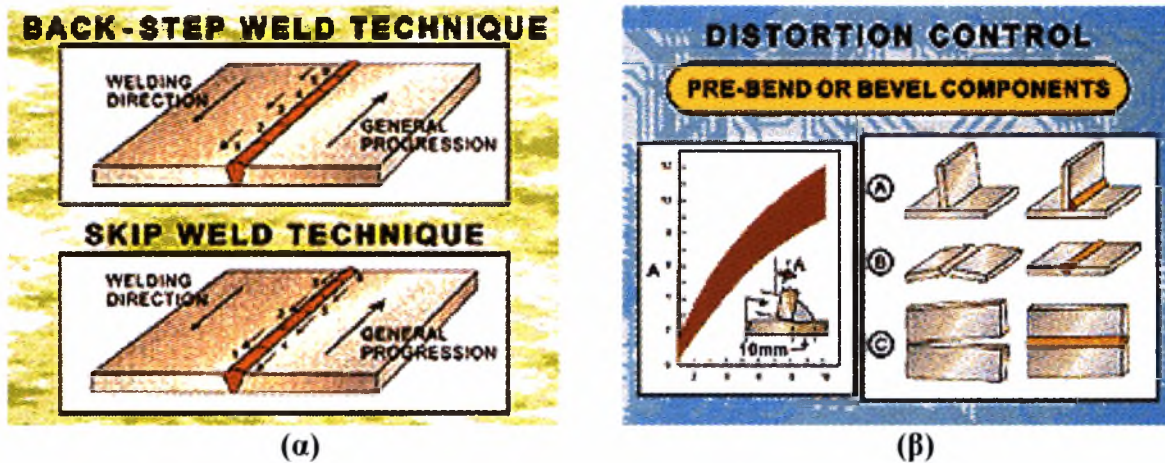
Σχήμα 2.10 Παραμορφώσεις των συγκολλητών κατασκευών. **(α)** Εγκάρσια συστολή, **(β)** Γωνιακή μεταβολή, **(γ)** Επίπεδη περιστροφή, **(δ)** διαμήκης συστολή, **(ε)** διαμήκης καμπτική παραμόρφωση, **(στ)** λυγισμός.

Μερικοί από τους τρόπους μείωσης των παραμορφώσεων κατά την συγκόλληση είναι:

- Η μείωση του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας που επιφέρει την ελαχιστοποίηση του πλάτους συγκόλλησης, ώστε να επιτυγχάνεται συγκόλληση αντοχής και μειωμένη παραμόρφωση.
- Η χρήση διακοπτόμενων συγκολλήσεων. Συχνά μπορούν να επιτευχθούν ικανοποιητικά επίπεδα αντοχής, με τον όγκο της συγκόλλησης να έχει μειωθεί κατά 70%, εάν ο

σχεδιασμός το επιτρέπει , με τη χρήση διακοπόμενων συγκολλήσεων έναντι των συνεχών.

- Η χρήση ακολουθιών συγκόλλησης (welding sequences) ή αντίθετης κατεύθυνσης συγκόλλησης (backstep welding) όπως φαίνεται στην **σχήμα 2.11α**.
- Όπου είναι εφικτό η συγκόλληση μπορεί να γίνεται από το κέντρο και προς τα έξω.
- Η συγκράτηση των υλικών συγκόλλησης σε θέσεις ώστε μετά την συγκόλληση να επανέλθουν στις επιθυμητές θέσεις τους όπως φαίνεται στην **σχήμα 2.11β**.
- Η αντίθετη στρέβλωση των υλικών προς συγκόλληση ώστε μετά την διαδικασία να επανέλθουν στις επιθυμητές θέσεις όπως φαίνεται στην **σχήμα 2.11β**.
- Η χρήση εργαλείων συγκράτησης ώστε να εμποδίζουν την παραμόρφωση των υλικών προς συγκόλληση.



Σχήμα 2.11 (α) Οι ακολουθίες συγκόλλησης μπορούν να βοηθήσουν να ελαχιστοποιήσουν τη θερμική στρέβλωση. **(β)** Η στρέβλωση ή κατάλληλη τοποθέτηση των υλικών πριν την συγκόλληση αντισταθμίζουν την θερμική παραμόρφωση.[10]

Κεφάλαιο 3. Πειραματική διαδικασία

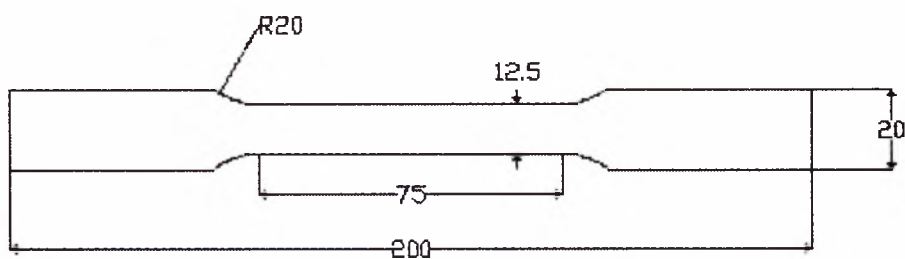
Το εργαστήριο υλικών του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών βιομηχανίας κατά το αρχικό στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρέλαβε ποσότητα ελασμάτων διαστάσεων 200×100×2 mm κράματος αλουμινίου 5083. Αρχικός σκοπός ήταν ο χαρακτηρισμός του μετάλλου βάσης και ο προσδιορισμός της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί μετά την έλαση. Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας διεξήχθησαν συγκολλήσεις δοκιμίων. Τα δοκίμια αποτελούνταν από δύο ενωμένα ελάσματα κράματος αλουμινίου 5083 σε συγκόλληση συμβολής με την μέθοδο συγκόλλησης TIG. Η αξιολόγηση των συγκολλήσεων περιλάμβανε: τον μακροσκοπικό έλεγχο της επιφάνειας συγκόλλησης, τον μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT), την μακροσκοπική αξιολόγηση βάσει προτύπου, την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης, τον μεταλλογραφικό έλεγχο και τέλος την δοκιμή εφελκυσμού και κάμψης.

3.1. Χαρακτηρισμός του μετάλλου βάσεως

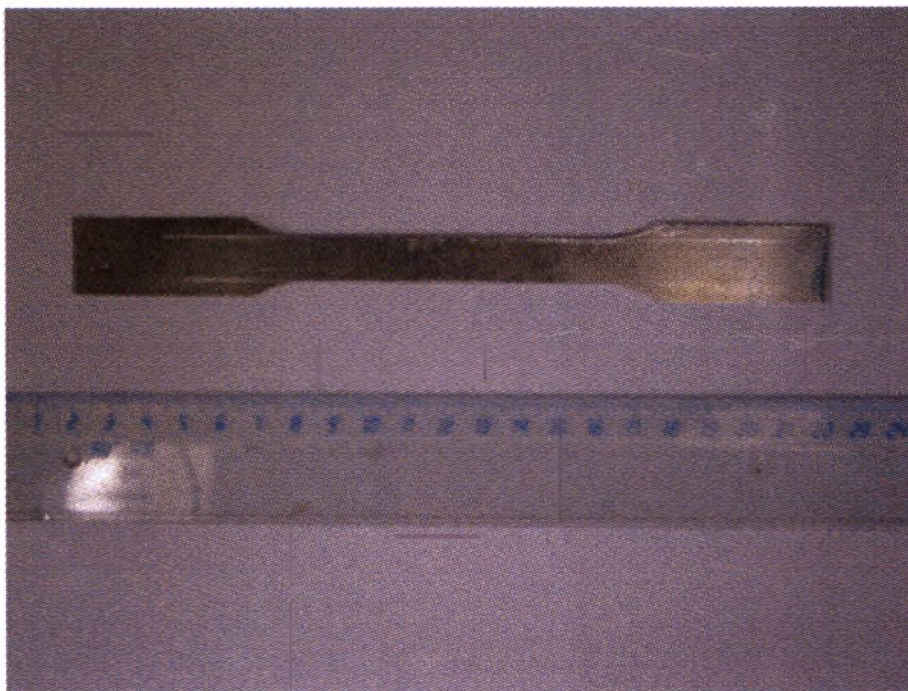
Σημαντικό ήταν σε αρχικό στάδιο να εξεταστεί το μέταλλο βάσης και να χαρακτηριστεί ποια θερμική κατεργασία έχει υποστεί κατά την παραγωγή. Για τον σκοπό αυτό αποκόπηκαν τέσσερα δοκίμια εφελκυσμού από το μέταλλο βάσης όπως ορίζει το πρότυπο EN 10002-1 και αφορά ελάσματα με πάχος μικρότερο των 3 mm . Στα **σχήματα 3.1** και **3.2**, παρουσιάζεται το δοκίμιο εφελκυσμού. Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στην EBETAM A.E. στη μηχανή εφελκυσμού Zwick sr600. Ακολούθως αποκόπηκαν δοκίμια για μικροσκληρομέτρηση. Τα κομμάτια του μετάλλου βάσεως εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη Acryfix, λειάνθηκαν με σμυριδόπανα 500-24000 grit, στιλβώθηκαν με διαμαντόπαστα 3μm και 1μm και τέλος υπέστησαν χημική προσβολή με τον αντιδραστήριο Keller's(2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc) , 5 mL HNO₃ (conc), 190 mL H₂O) για 30 περίπου δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού και της δοκιμής της σκληρομέτρησης συγκρίθηκαν στη συνέχεια, για τον χαρακτηρισμό της θερμικής κατεργασίας που έχει υποστεί το συγκεκριμένο υλικό, βάσει των πρότυπων ιδιοτήτων του ASM Specialty Handbook .

Στη συνέχεια μελετώντας τη μικροδομή του μετάλλου βάσεως προσπαθήσαμε να εντοπίσουμε την φορά έλασης του ελάσματος καθώς και την δομή του για την σύγκριση του με τα συγκολλημένα δείγματα και ποιες αλλοιώσεις υφίσταται κατά την συγκόλληση. Για τον σκοπό αυτό τα δοκίμια της σκληρομέτρησης λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν εκ νέου με σμυριδόπανα 500-

24000 grit, με διαμαντόπαστα 3 μ m και 1 μ m και με αλουμίνα Struers alumina suspension, OP-A. Στη συνέχεια απομακρύναμε την ρητίνη από τα δοκίμια ώστε να υποστεί χημική προσβολή το κομμάτι που αποκόψαμε. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το Barker's (5 mL HBF₄ (48%) σε 200 mL H₂O) και η προσβολή διήρκησε 60 δευτερόλεπτα. Το δοκίμιο εξετάστηκε στο οπτικό μικροσκόπιο με την χρήση πολωμένου φωτός. Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση του μετάλλου βάσεως στην EBETAM A.E. με φασματοσκοπική ανάλυση ελάσματος κράματος αλουμινίου 5083 σε συσκευή οπτικής εκπομπής σπινθηρισμού «Spectrolab M8» βάσει της οδηγίας εργασίας W.1./labche-01/4.



Σχήμα 3.1 Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης.



Σχήμα 3.2 Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης.

3.2. Συγκολλήσεις των δοκιμίων

Για την μελέτη των επιδράσεων διαφορετικών συνθηκών συγκόλλησης μελετήθηκαν συνολικά οκτώ συγκολλημένα δοκίμια. Τα πρώτα τέσσερα δοκίμια συγκολλήθηκαν στο εργαστήριο του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας και τα υπόλοιπα τέσσερα στο εργοστάσιο Ν.Κιολεΐδης Α.Ε.ΒΕ. Από τις ενδείξεις της έντασης του ρεύματος και της τάσης κατά την διάρκεια της συγκόλλησης θελήσαμε να υπολογίσουμε τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας. Ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας μπορεί να αναφερθεί ως "ηλεκτρική ενέργεια" που μεταφέρεται από το τόξο συγκόλλησης στο κομμάτι που συγκολλάται. Ο ρυθμός αυτός μπορεί να προσδιοριστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = k \frac{A \cdot V}{U}$$

όπου "A" η ένταση του ρεύματος (σε Ampere), "V" η τάση του τόξου (σε Volt), "U" είναι η ταχύτητα κίνησης του τόξου ή ταχύτητα συγκόλλησης (σε mm/sec). Το "κ" αποτελεί το βαθμό απόδοσης της μεθόδου συγκόλλησης, δηλαδή το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας του τόξου που εισέρχεται ως θερμότητα στο μέταλλο. Για την μέθοδο TIG η τιμή του "κ" είναι 0.6. Κατά αυτό τον τρόπο, η μονάδα μέτρησης του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας είναι J/mm.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας είναι ότι καθορίζει το ρυθμό ψύξης της συγκόλλησης και μπορεί να έχει επιπτώσεις στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης και στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη. Μια αλλαγή στη μικροδομή έχει άμεσες επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δοκίμια συγκολλήθηκαν με διαφορετικούς ρυθμούς πρόσδοσης θερμότητας και θα εξεταστεί η επιρροή στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας των συγκολλημένων δοκιμίων.

3.2.1 Συγκόλληση δοκιμίων στο T.M.M.B.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 16/02/2007 στο εργαστήριο μηχανικών κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. Τα δείγματα αποτελούνται από δύο ελάσματα 200×100×2 mm κράματος αλουμινίου 5083 που συγκολλήθηκαν με την μέθοδο GTAW-TIG. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή HandyTig 180 AC/DC της ESAB. Επίσης το

προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Αργό (Argon καθαρότητας 99.99%) ενώ για υλικό πλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι αλουμινίου 5356 διαμέτρου 2.0 mm.

Τα ελάσματα συγκρατήθηκαν πάνω σε μεταλλική βάση (σχήμα 3.4) και ο συγκολλητής αρχικά τα ένωσε με μια λεπτή, πρόχειρη «ραφή» (ποντάρισμα). Κατά το ποντάρισμα πραγματοποιείται τήξη μόνο του υλικού πληρώσεως και όχι του βασικού μετάλλου. Στην συνέχεια ο συγκολλητής έκανε την τελική συγκόλληση από την μία άκρη της ένωσης στην άλλη με σταθερή ταχύτητα.

Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης χρονομετρούσαμε την διαδικασία ανάμεσα σε δύο σημεία που απέιχαν 150mm. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα συγκόλλησης. Για την συγκόλληση των δειγμάτων δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές εντάσεις ρεύματος. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα τέσσερα δείγματα, η ένταση του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε, η παροχή του προστατευτικού αερίου, ο χρόνος συγκόλλησης καθώς και κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τα δείγματα.

Πίνακας 3.1. Τα τέσσερα δείγματα, οι παράμετροι συγκόλλησης, παρατηρήσεις.

Δείγμα	Παροχή Αερίου [lt/min]	Ένταση ρεύματος [A]	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/s]	Παρατηρήσεις
T ₁	12	100	3.8	Η ένταση ρεύματος και η ταχύτητα συγκόλλησης θεωρούνται κατάλληλες για το πάχος ελάσματος
T ₂	12	100	3.5	Στο μέσο της συγκόλλησης έμεινε ένα τμήμα χωρίς αρχική ραφή (ποντάρισμα) και στη συνέχεια κατά την κύρια ραφή το δοκίμιο τρύπησε σε εκείνο το σημείο
T ₃	12	80	2.5	Η ένταση ρεύματος είναι χαμηλή και για αυτό το λόγο σημειώθηκε μεγάλος χρόνος (μικρή ταχύτητα συγκόλλησης)
T ₄	12	120	5.5	Η ένταση ρεύματος είναι υψηλή και για αυτό το λόγο σημειώθηκε μικρός χρόνος (μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης)



Σχήμα 3.3 Η βάση όπου συγκρατήθηκαν τα δοκίμια για να συγκολληθούν. Διακρίνεται η άκρη του απαγωγού των αερίων συγκόλλησης.

3.2.2. Συγκόλληση δοκιμίων στο εργοστάσιο Κιολεΐδης Α.Ε.Β.Ε.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 27/02/2007 στο εργοστάσιο ΚΙΟΛΕΙΔΗΣ ΑΕ. Τα δείγματα αποτελούνται από δύο ελάσματα $200 \times 100 \times 2$ mm κράματος αλουμινίου 5083 που συγκολλήθηκαν με την μέθοδο GTAW-TIG. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή Magic Wave 4000 της Fronius. Επίσης το προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 70% Ar - 30% He ενώ για υλικά πλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι αλουμινίου 5183 διαμέτρου 1.6 mm και 1.2 mm και ράβδοι αλουμινίου 5356 διαμέτρου 2.0 mm .

Τα ελάσματα συγκρατήθηκαν πάνω σε μεταλλικό τραπέζι και ο συγκολλητής αρχικά τα ένωσε σε τρία διαφορετικά σημεία (στις άκρες και στο κέντρο) με «πόντους». Κατά το ποντάρισμα έλιωνε τόσο το βασικό μέταλλο όσο και το σύρμα. Στην συνέχεια ο συγκολλητής έκανε την τελική συγκόλληση από την μία άκρη της ένωσης στην άλλη με σταθερή ταχύτητα και από την αντίθετη πλευρά του πονταρίσματος.

Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης χρονομετρούσαμε την διαδικασία ανάμεσα σε δύο σημεία που απείχαν 150mm. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα συγκόλλησης. Για την συγκόλληση των δειγμάτων δοκιμάστηκαν διάφορες εντάσεις ρεύματος, διαφορετικά σύρματα πλήρωσης. Στον **πίνακα 3.2** παρουσιάζονται τα εννέα δείγματα, η ένταση

του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε, η παροχή του προστατευτικού αερίου, ο χρόνος συγκόλλησης καθώς και κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τα δείγματα.

Πίνακας 3.2. Τα εννέα δείγματα και οι παράμετροι συγκόλλησης.

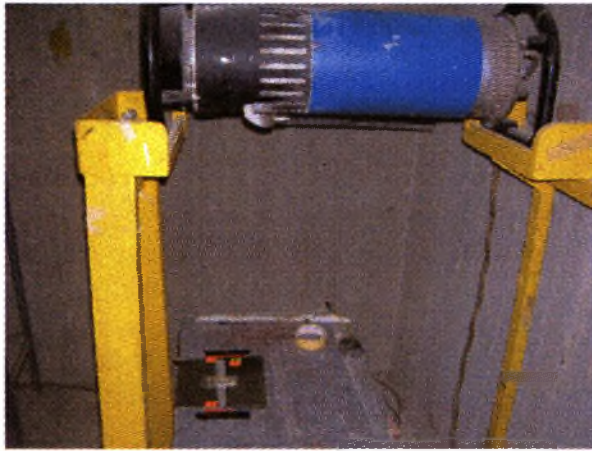
Δείγμα	Παροχή Αερίου [lt/min]	Ένταση ρεύματος [A]	Τάση [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/s]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας [J/mm]	Υλικό πλήρωσης
T ₁₀	10	60	13.4	2	-	5183 Φ1.6
T ₁₁	10	56	13.6	2.9	-	5183 Φ1.6
T ₁₂	10	63	14.6	2.3	240	5356 Φ2.4
T ₁₃	10	65	13.7	3.1	172	5183 Φ1.2
T ₁₄	10	60	13.7	2.8	-	5183 Φ1.2
T ₁₅	10	60	14.1	2.2	-	5183 Φ1.2
T ₁₆	10	60	14.7	2.2	-	5183 Φ1.2
T ₁₇	10	65	13.8	διεκόπη	-	5183 Φ1.2
T ₁₈	10	60	13.5	2.8	173	5183 Φ1.6
T ₁₉	10	55	15	2.1	235	5183 Φ1.6

3.3. Μη καταστρεπτικός έλεγχος

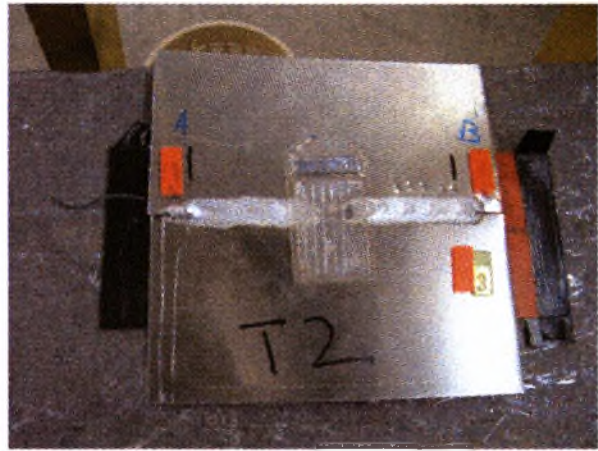
Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε στις 22/02/2007 και 22/05/2007 στην εταιρία EBETAM A.E. Η διαδικασία περιλάμβανε έλεγχο με ραδιογραφία (ακτίνες X) και στην συνέχεια με διεισδυτικά υγρά. Με τον μη καταστρεπτικό έλεγχο καθίσταται εύκολη και γρήγορη η ανίχνευση ατελειών όπως πόρους, ρωγμές κ.α όχι μόνο επιφανειακά αλλά και εντός της συγκόλλησης.

3.3.1. Ραδιογραφία με ακτίνες X

Ο έλεγχος με ραδιογραφία πραγματοποιήθηκε για την διαπίστωση τυχών εσωτερικών πόρων, ρωγμών ή άλλης ατέλειας στη συγκόλληση. Αρχικά σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1435 και βάση του υλικού και του πάχους ελάσματος (αλουμίνιο με πάχος ελάσματος περίπου 2.5mm) επιλέξαμε παραμέτρους 100 kV, 2mA και χρόνο έκθεσης 32 sec. Επίσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 1435:1997 χρησιμοποιήσαμε πενετρόμετρο 10Alen με επιθυμητή την εμφάνιση στο φιλμ του σύρματος W16. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ένα-ένα στο θάλαμο ακτίνων X και στη συνέχεια εμφανίστηκαν τα φιλμ ραδιογράφησης. Στο **σχήμα 3.11** φαίνεται η διάταξη της πηγής ακτινοβολίας και ο τρόπος που τοποθετούμε το δοκίμιο.



(α)



(β)

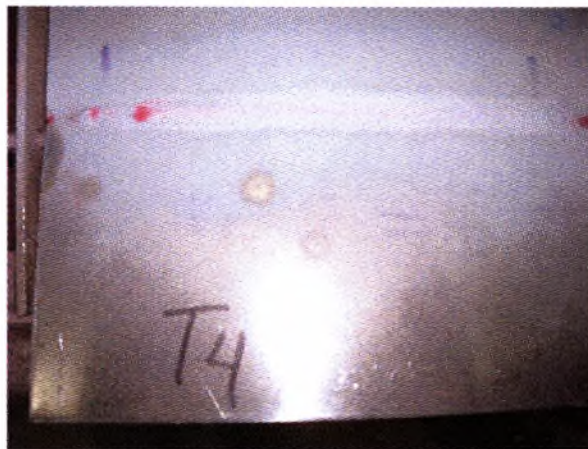
Σχήμα 3.4 (α) Η πηγή ακτινοβολίας για την ραδιογράφιση και **(β)** ο τρόπος τοποθέτησης ενός δοκιμίου πάνω στο φιλμ.

3.3.2. Διεσδυτικά υγρά

Η δοκιμή με διεσδυτικά υγρά έγινε σύμφωνα με τις αρχές που ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 571.01. Αρχικά ψεκάσαμε τις περιοχές συγκόλλησης με το διεσδυτικό υγρό MarkeR MR68C (κόκκινο χρώμα **σχήμα 3.12 (α)**) και στην συνέχεια μετά από παραμονή 10 λεπτών, ξεπλύναμε και ψεκάσαμε με τον εμφανιστή MarkeR MR70 (άσπρο χρώμα **σχήμα 3.12 (β)**). Τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν και αξιολογήθηκαν με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN1289. Το πρότυπο ορίζει τον τρόπο διεξαγωγής της δοκιμής και αποσκοπεί στην αξιολόγηση των σφαλμάτων και τη σημαντικότητα τους ανάλογα με το κόκκινο ίχνος που εμφανίζουν. Τα επίπεδα αποδοχής είναι τρία και αριθμούνται από το 1 έως το 3 με το επίπεδο 1 να αποτελεί το υψηλότερο επίπεδο.



(α)



(β)

Σχήμα 3.5 Φωτογραφίες αμέσως μετά την εφαρμογή (α) του διεισδυτικού υγρού MarkeR MR68C (β) του εμφανιστή MarkeR MR7.

3.4. Μακροσκοπικός έλεγχος

Ο μακροσκοπικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά τοποθετήθηκαν τα συγκολλημένα δοκίμια στο στερεοσκόπιο και φωτογραφήθηκαν για μία άμεση αξιολόγηση της άνω και κάτω πλευράς συγκόλλησης και για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών.

Σε δεύτερη φάση, μετά τον μη καταστρεπτικό έλεγχο κόπηκαν και εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη Acryfix μέρη από τα συγκολλημένα δείγματα. Τα δοκίμια λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν και στη συνέχεια τα υπέστησαν χημική προσβολή με το αντιδραστήριο Keller's (2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5 mL HNO₃ (conc), 190 mL H₂O) για 30 περίπου δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια τα δοκίμια εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο και φωτογραφήθηκαν για την αξιολόγηση τους σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042. Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042 θέτει 24 προϋποθέσεις που αφορούν ατέλειες μακροδομής στις συγκολλήσεις συμβολής. Υπάρχουν τρία επίπεδα ποιότητας, το υψηλότερο B (stringent), ενδιάμεσο C (Intermediate) και το μέτριο D (Moderate). Τα τρία αυτά επίπεδα ονομάστηκαν αυθαιρέτως B, C και D και μπορούν να καλύψουν την πλειονότητα των συγκολλητών εφαρμογών.

3.5. Μικροσκληρομέτρηση

Για την δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης τα δοκίμια στιλβώθηκαν εκ νέου και προσβλήθηκαν χημικά με το αντιδραστήριο Keller's ώστε να είναι ευδιάκριτη η λίμνη συγκόλλησης. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν από το κέντρο περίπου της λίμνης συγκόλλησης και προχωρούσαν προς το βασικό

μέταλλο ανά 500μm με βάρος 200 gr (HV_{0.2}). Σκοπός της δοκιμής ήταν η ανίχνευση διαφοροποιήσεων στην σκληρότητα εντός και εκτός της λίμνης συγκόλλησης καθώς και ο έλεγχος ύπαρξης θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ).

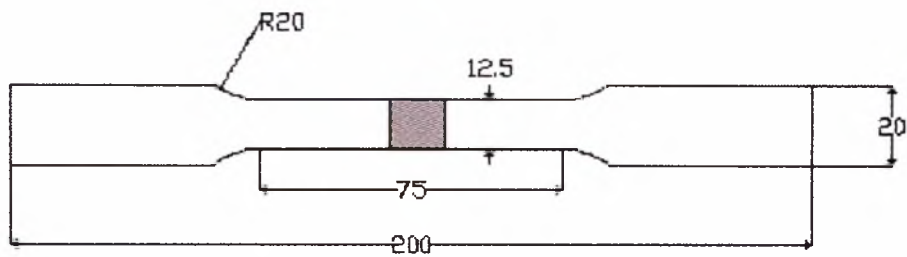
3.6. Μεταλλογραφικός έλεγχος

Για τον μεταλλογραφικό έλεγχο τα δοκίμια λειάνθηκαν εκ νέου με σμυριδόπανα 800-24000 grit, στίλβώθηκαν με διαμαντόπαστα 3μm και 1μm και υπέστησαν μια τελική στίλβωση με αλουμίνα Struers alumina suspension, OP-A. Στη συνέχεια απομακρύναμε την ρητίνη από τα δοκίμια ώστε να υποστεί χημική προσβολή το κομμάτι που αποκόψαμε. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε, όπως και στον έλεγχο της μικροδομής του μετάλλου βάσεως, ήταν το Barker's (5 mL HBF₄ (48%) σε 200 mL H₂O) με χρόνο έκθεσης 60 δευτερόλεπτα. Το δοκίμιο εξετάστηκε στο οπτικό μικροσκόπιο με την χρήση πολωμένου φωτός.

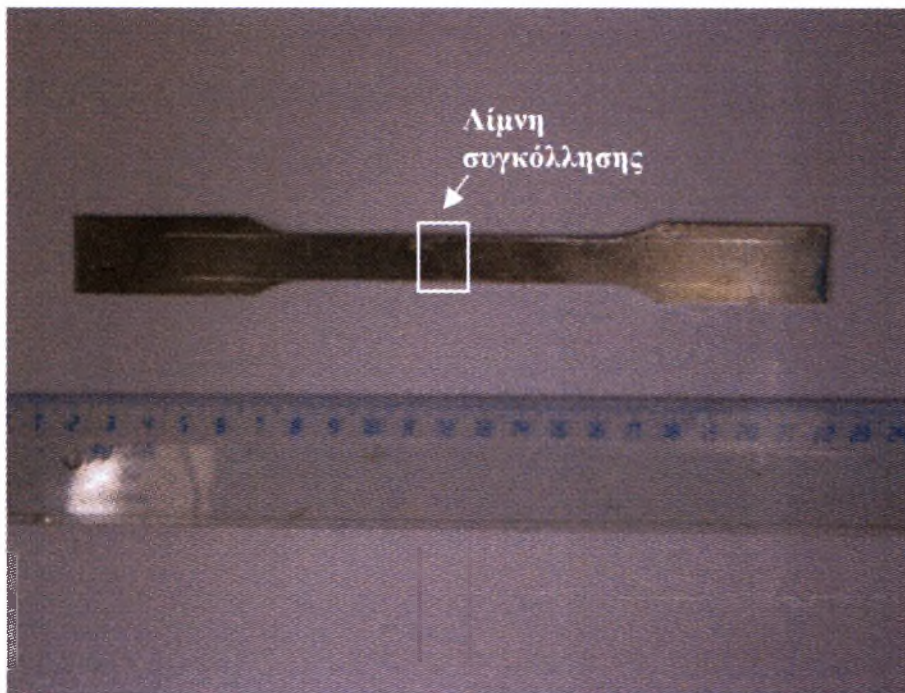
Σκοπός της δοκιμής ήταν να αποκαλυφθεί η μικροδομή των συγκολλημένων δοκιμίων, να εξεταστεί η μικροδομή της λίμνης συγκόλλησης και ο έλεγχος για ύπαρξη θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Επίσης σημαντική θα ήταν η διαπίστωση ύπαρξης ζώνης μερικής τήξης. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν (T₁₂ και T₁₈) επιλέχθηκαν βάσει του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας (μέγιστος και ελάχιστος).

3.7. Δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στις 05/06/2007 στην εταιρία EBETAM A.E. στην μηχανή εφελκυσμού Zwick sp600. Κατά την δοκιμή εφελκυσμού των συγκολλημένων δειγμάτων σημαντικός ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των δειγμάτων καθώς και το σημείο θραύσης των δοκιμίων εφελκυσμού. Τα δοκίμια του εφελκυσμού κόπηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 895 και η προετοιμασία τους περιλάμβανε την αφαίρεση του περισσίου υλικού της λίμνης συγκόλλησης (σχήμα 3.6, σχήμα 3.7).



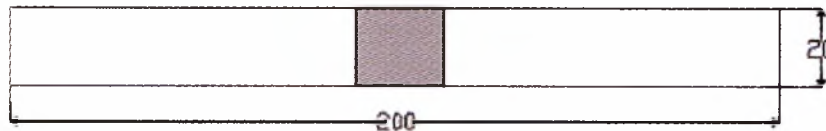
Σχήμα 3.6 Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης. Στην σκούρα περιοχή βρίσκεται η λίκνη συγκόλλησης.



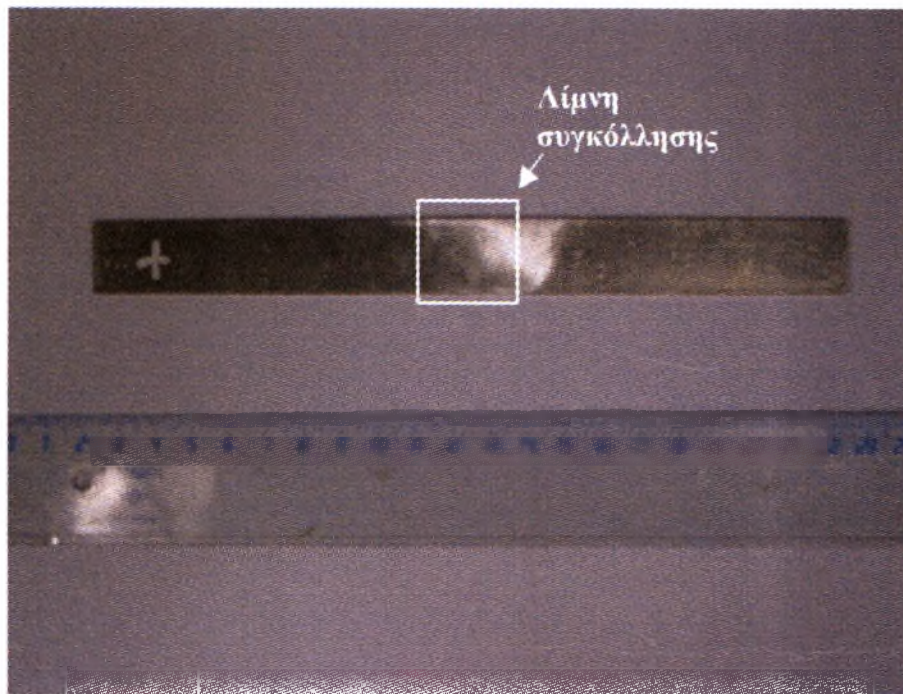
Σχήμα 3.7 Το δοκίμιο εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης. Στο κέντρο του δοκιμίου βρίσκεται η συγκόλληση και έχει αφαιρεθεί το περίσσιο υλικό.

3.8 Δοκιμή κάμψης

Η δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε στις 19/07/2007 στην εταιρία EBETAM A.E. Κατά την δοκιμή κάμψης των συγκολλημένων δειγμάτων εξετάσαμε την ολκιμότητα των δοκιμίων και ποια η διαφορά της σε κάμψη από την μεριά της συγκόλλησης (κάμψη σε πρόσωπο) και από την ρίζα της συγκόλλησης (κάμψη σε ρίζα). Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στην εταιρία EBETAM A.E. Τα δοκίμια του κάμψης κόπηκαν σύμφωνα με το πρότυπο DIN 50 121 και η προετοιμασία τους περιλάμβανε την αφαίρεση του περίσσιου υλικού της λίκνης συγκόλλησης (σχήμα 3.8,σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8 Το δοκίμιο κάμψης για τα συγκολλημένα δείγματα. Στην σκούρα περιοχή βρίσκεται η λίμνη συγκόλλησης.

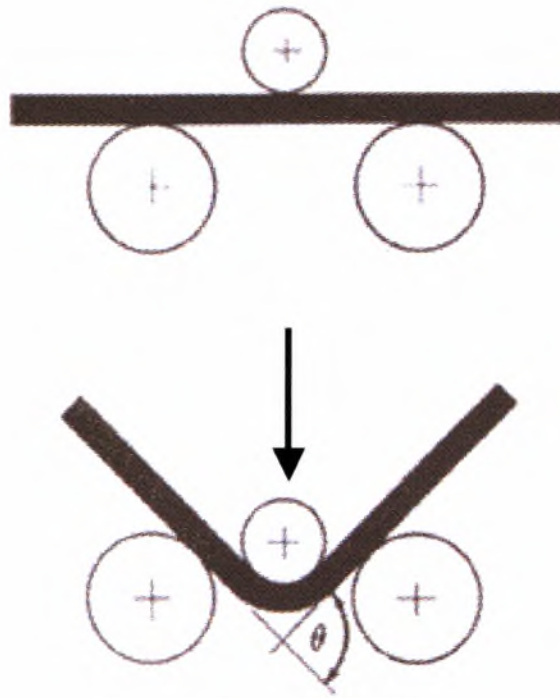


Σχήμα 3.9 Το δοκίμιο κάμψης για τα συγκολλημένα δείγματα. Στο κέντρο του δοκιμίου βρίσκεται η συγκόλληση και έχει αφαιρεθεί το περίσσιο υλικό.

Οι συνθήκες της δοκιμής ήταν ευνοϊκότερες των συνθηκών που ορίζει το πρότυπο BS EN 910:1996 λόγω έλλειψης εξοπλισμού (μεγάλα έμβολα). Οι συνθήκες κάμψης της δοκιμής κάμψης παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Στο **σχήμα 3.10** παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής της κάμψης.

Πίνακας 3.3. Οι συνθήκες της δοκιμής της κάμψης.

Συνθήκες κάμψης A	Συνθήκες κάμψης B	BS EN 910:1996
Διάμετρος εμβόλου: 8mm	Διάμετρος εμβόλου: 12mm	Διάμετρος εμβόλου: 6mm
Απόσταση ράουλων: 20mm	Απόσταση ράουλων: 30mm	Απόσταση ράουλων: 20mm



Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής της κάμψης.

Στο **κεφάλαιο 4** που ακολουθεί περιγράφονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός τους.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα-σχολιασμός αποτελεσμάτων

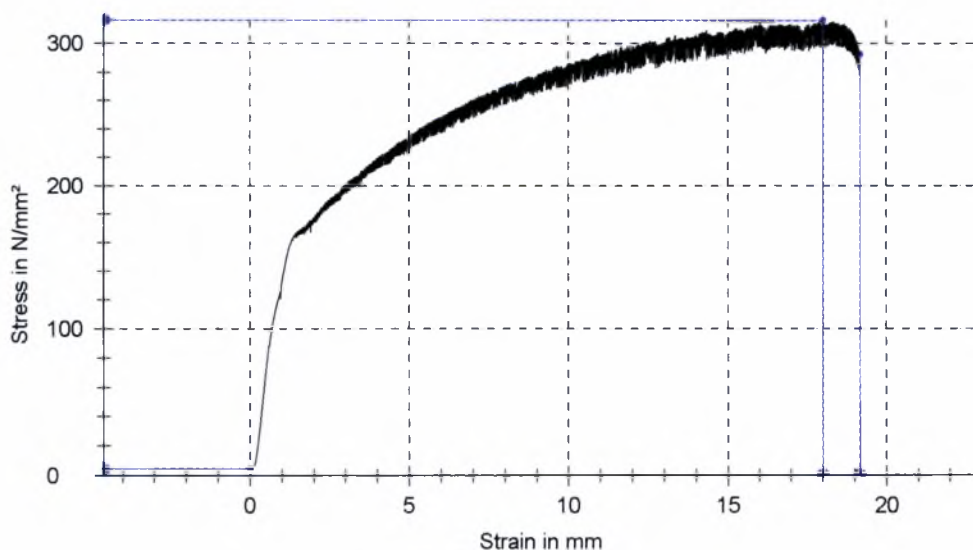
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αποτελέσματα της πειρατικής διαδικασίας και των μεθόδων αξιολόγησης των συγκολλήσεων.

4.1. Αποτελέσματα χαρακτηρισμού του μετάλλου βάσης.

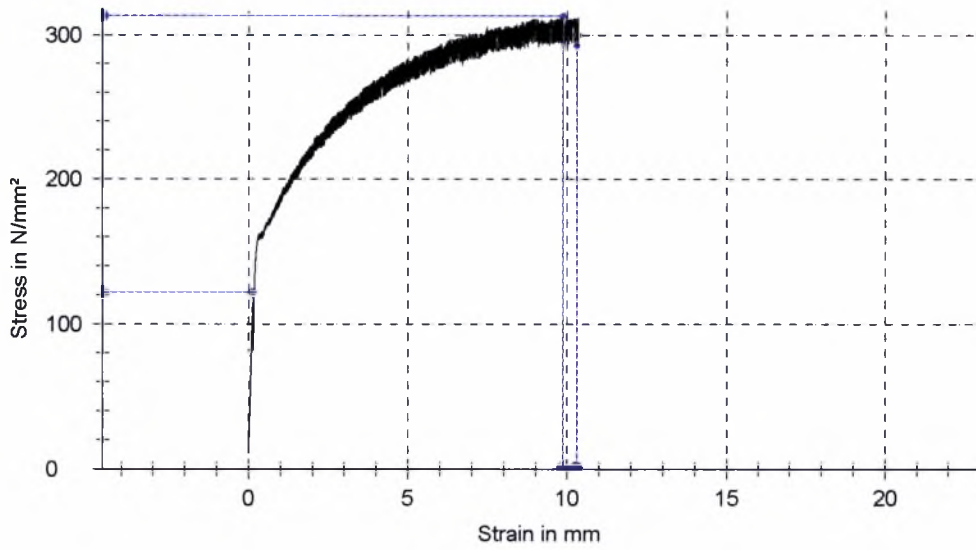
Στον πίνακα 4.1. παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού στο μέταλλο βάσης στα σχήματα 4.1 έως 4.4 τα διαγράμματα τάσης-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 4.1. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού για τα τέσσερα δοκίμια του μετάλλου βάσης

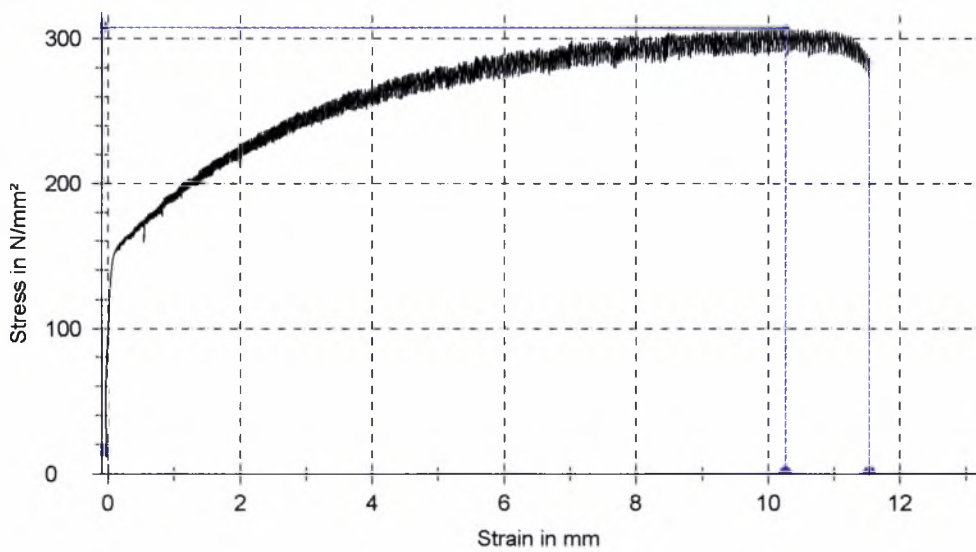
Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Αρχικό μήκος (mm)	Τελικό μήκος (mm)	ϵ_{50} (%)	Όριο διαρροής σ_y (MPa)	Όριο θραύσης σ_{UTS} (MPa)
B _{1α}	12	1.98	50	62.1	24.3	166	316
B _{1β}	12	1.98	50	60.3	20.6	161	313
B _{2α}	12	2	50	60.8	21.6	155	307
B _{2β}	12	2	50	59.0	18.8	158	304



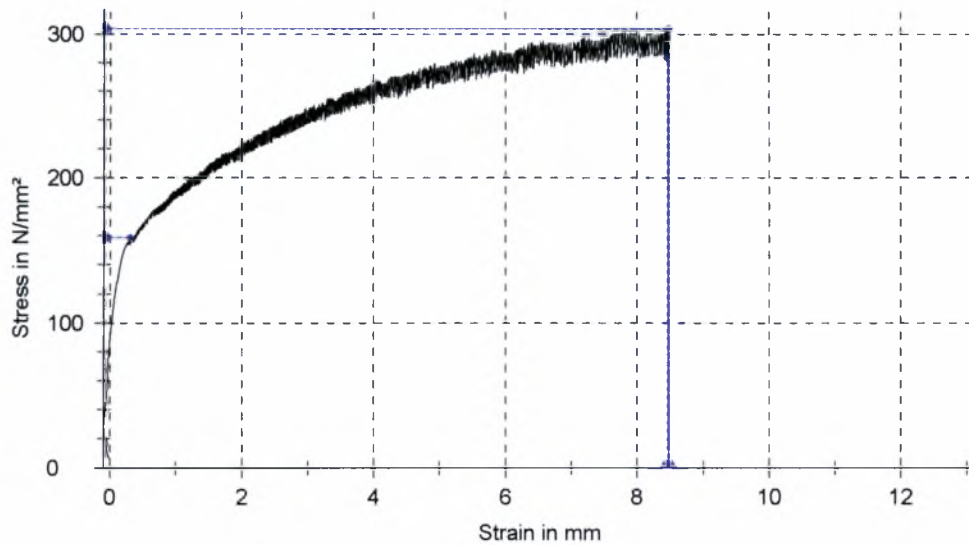
Σχήμα 4.1 Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B_{1α}.



Σχήμα 4.2 Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B_{1β}.



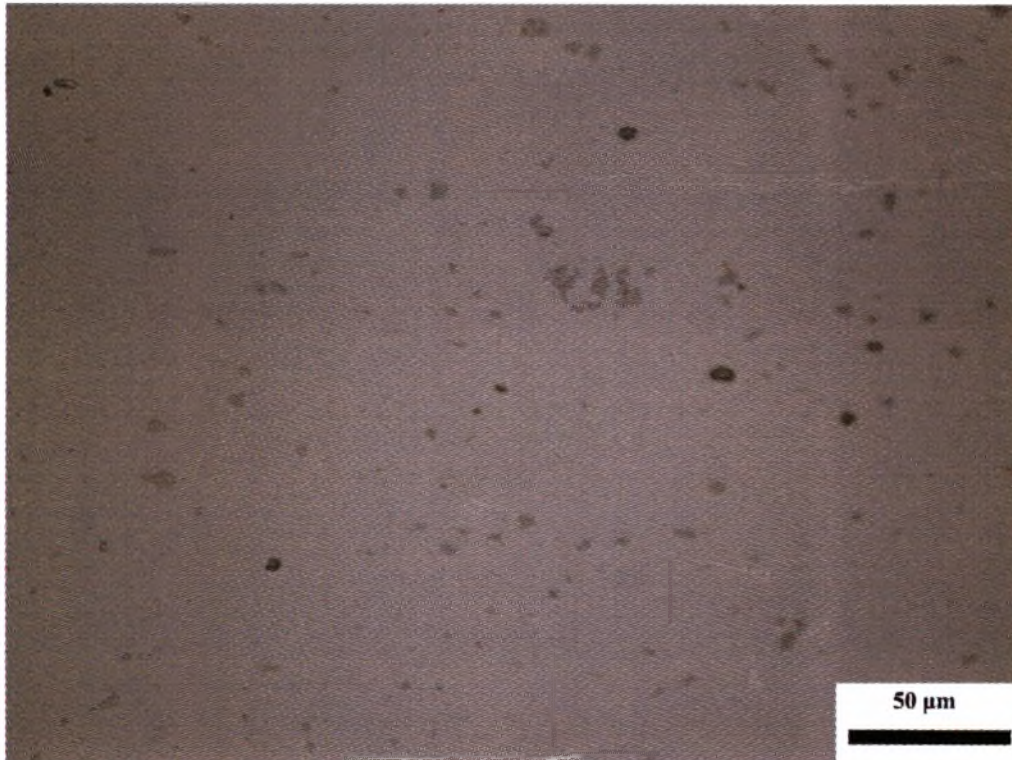
Σχήμα 4.3 Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B_{2α}.



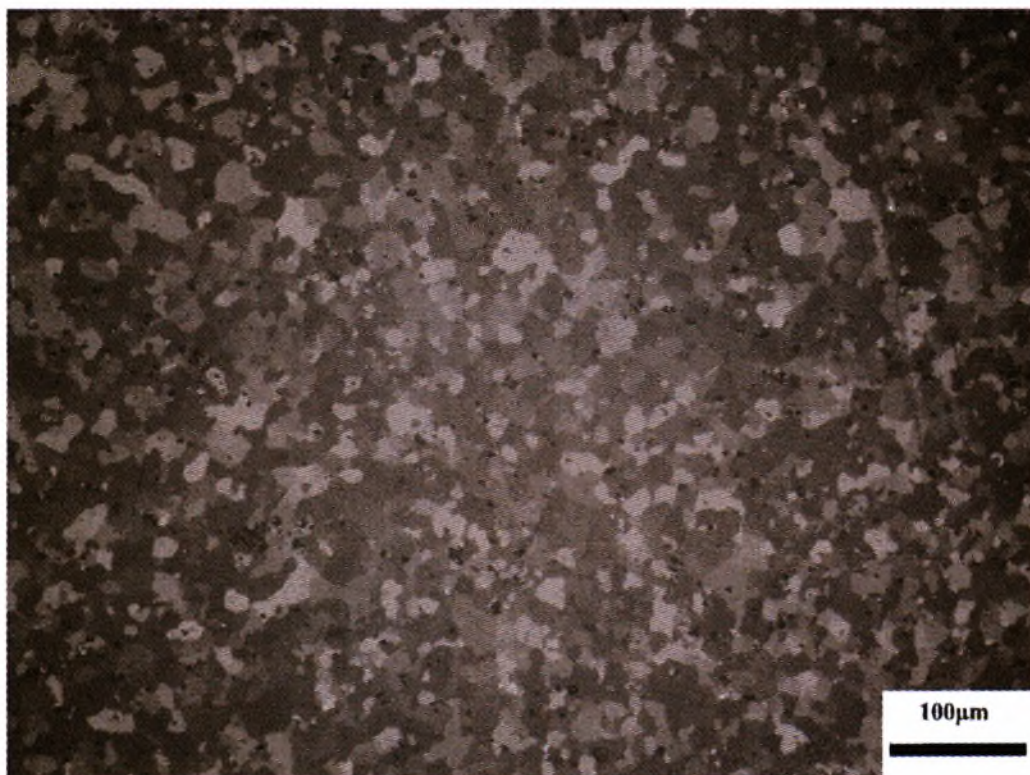
Σχήμα 4.4 Το διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για το δοκίμιο B_{2β}.

Κατά την φάση του χαρακτηρισμού του μετάλλου βάσης μετρήθηκε η σκληρότητα ενός δοκιμίου. Για την δοκιμή της σκληρομέτρησης αποκόπηκε ένα κομμάτι από μη συγκολλημένο πλακίδιο και εγκιβωτίστηκε σε ρητίνη Acryfix, ακολούθησε λείανση με σμυριδόπανα 500-2400 grit, στίλβωση με διαμαντόπαστα 3μm και 1μm. Η σκληρότητα του μετάλλου βάσης μετρήθηκε, από δέκα μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία, κατά μέσο όρο 70 HV_{0.2}.

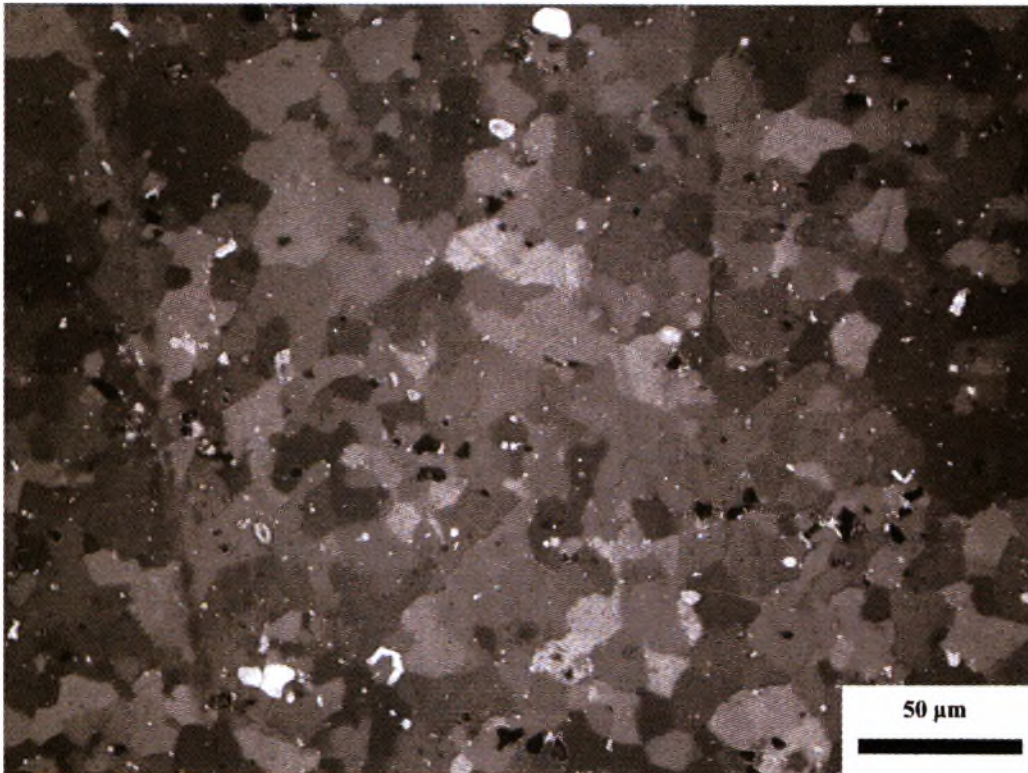
Η μικροδομή του μετάλλου βάσης παρουσιάζεται στα **σχήματα 4.5** έως **4.9**.



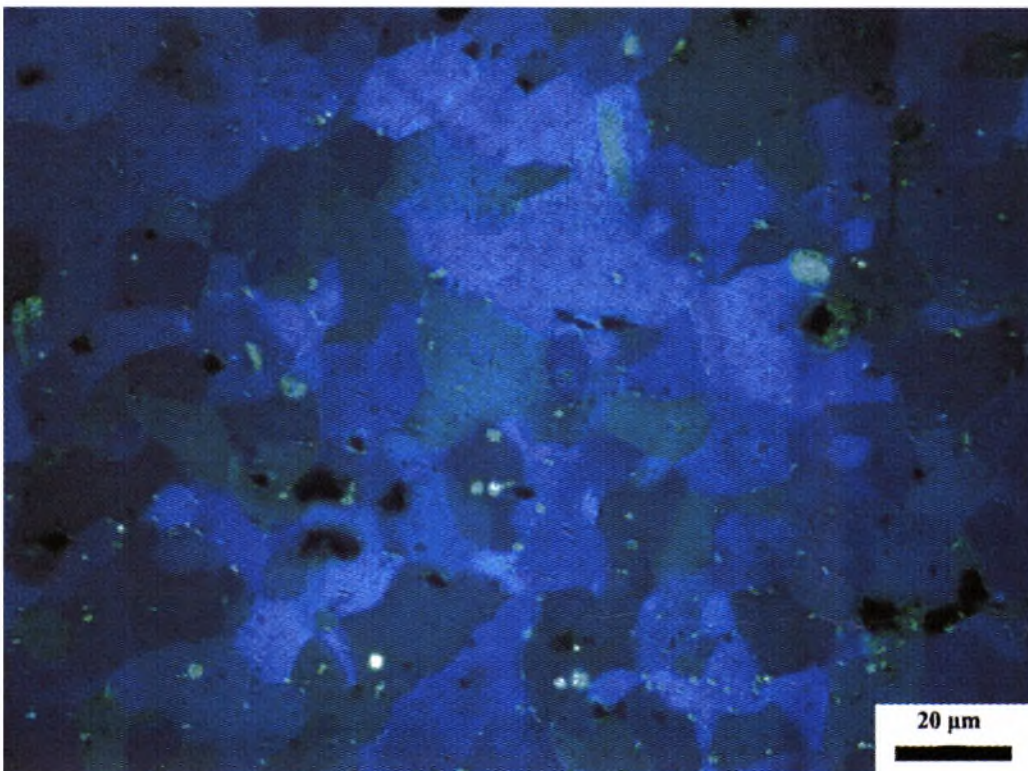
Σχήμα 4.5 Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 χωρίς να έχει υποστεί χημική προσβολή. Τα μαύρα στίγματα είναι αδιάλυτα εγκλείσματα, πιθανόν σωματίδια Mg_2Si ενώ τα μεγαλύτερα γκριζας απόχρωσης σωματίδια $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ ($\times 500$).



Σχήμα 4.6 Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 ($\times 200$).



Σχήμα 4.7 Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 ($\times 500$).



Σχήμα 4.8 Η μικροδομή του αλουμινίου 5083 ($\times 1000$).

4.1.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού του μετάλλου βάσεως

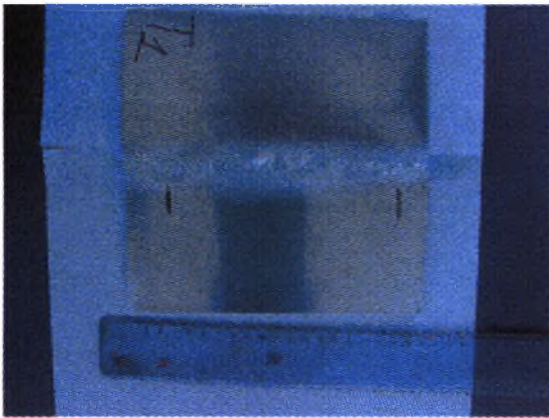
Τα τέσσερα δοκίμια εφελκυσμού αποκόπηκαν από δύο διαφορετικά ελάσματα. Έτσι παρατηρώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού τα δύο πρώτα δοκίμια παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αυτή η μικρή διαφοροποίηση πιθανόν να οφείλεται στη κοπή των δοκιμίων σε διαφορετικές διευθύνσεις σε σχέση με την φορά έλασης.

Το όριο διαρροής, η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και η επιμήκυνση προσεγγίζουν τις τιμές που παρουσιάζει το κράμα 5083-O σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Η σκληρότητα επίσης προσεγγίζει την σκληρότητα του κράματος 5083-O. Από τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το κράμα αλουμινίου 5083-O, το κράμα έχει υποστεί δηλαδή ανόπτηση στους 340° C με 410°C μετά την έλαση.

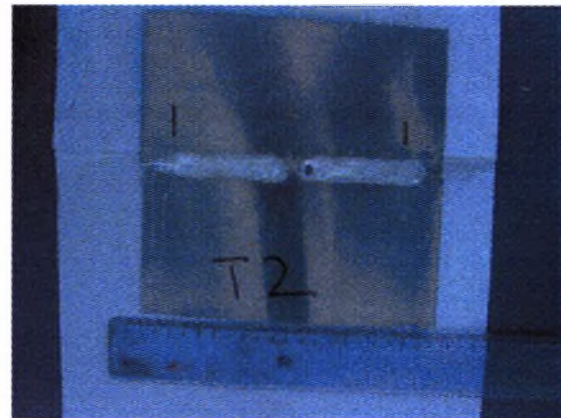
Η ανόπτηση που ακολούθησε μετά την έλαση δικαιολογείται και από την μικροδομή των δοκιμίων. Οι κόκκοι του μετάλλου δεν εμφανίζουν επιμήκυνση προς την διεύθυνση έλασης. Η ιασοαξονικότητα των κόκκων οφείλεται στην ανακρυστάλλωση που συνέβη κατά τη διάρκεια της ανόπτησης. Έτσι επιβεβαιώθηκε ότι η θερμοκρασία ανόπτησης του συγκεκριμένου μετάλλου είναι αρκετή ώστε να υποστεί ανακρυστάλλωση. Η διάμετρος των κόκκων του μετάλλου βάσεως εκτιμήθηκε στα 17 μm κατά μέσο όρο.

4.2. Αποτελέσματα συγκόλλησης δοκιμίων.

Από τα πειράματα συγκολλήσεων στο T.M.M.B. (σχήμα 4.1 και σχήμα 4.2) και στο εργοστάσιο Κιολεϊδης ΑΕΒΕ προέκυψαν οχτώ δοκίμια που παρουσιάζονται στα σχήματα 4.1. έως 4.4.



(α)

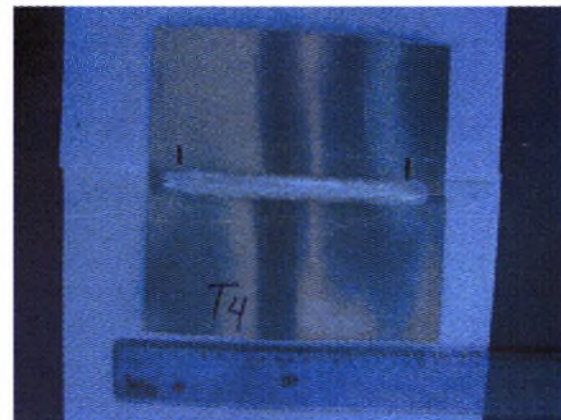


(β)

Σχήμα 4.9 Φωτογραφίες των δοκιμών (α) T₁ και (β) T₂ που πραγματοποιήθηκαν στο Τ.Μ.Μ.Β.

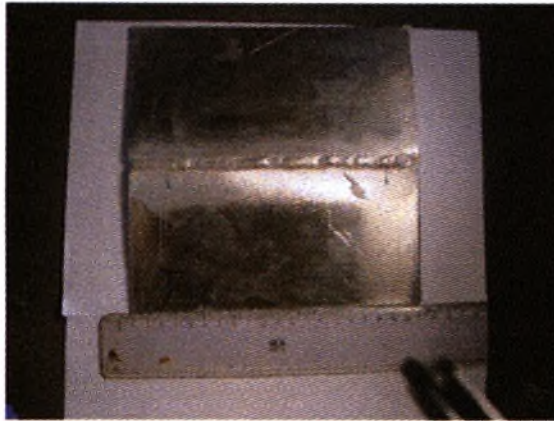


(α)

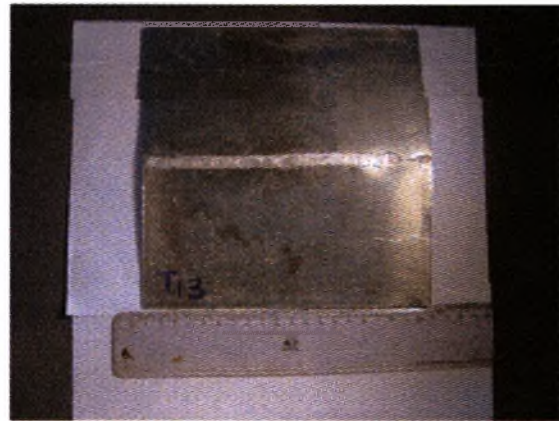


(β)

Σχήμα 4.10 Φωτογραφίες των δοκιμών (α) T₃ και (β) T₄ που πραγματοποιήθηκαν στο Τ.Μ.Μ.Β.

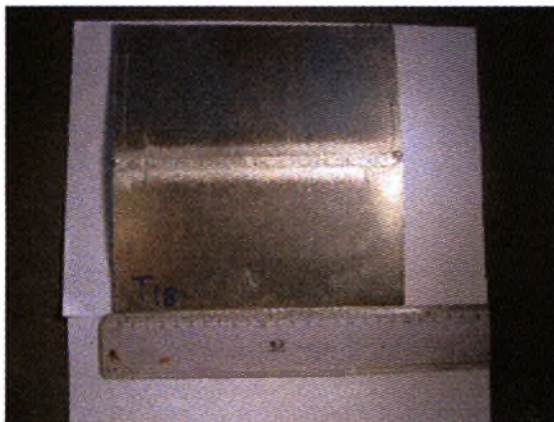


(α)

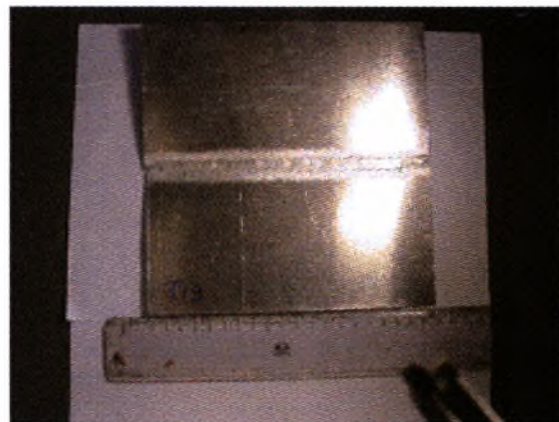


(β)

Σχήμα 4.11 Φωτογραφίες των δοκιμίων (α) T₁₂ και (β) T₁₃ που συγκολλήθηκαν στο εργοστάσιο Κιολεΐδης ΑΕΒΕ.



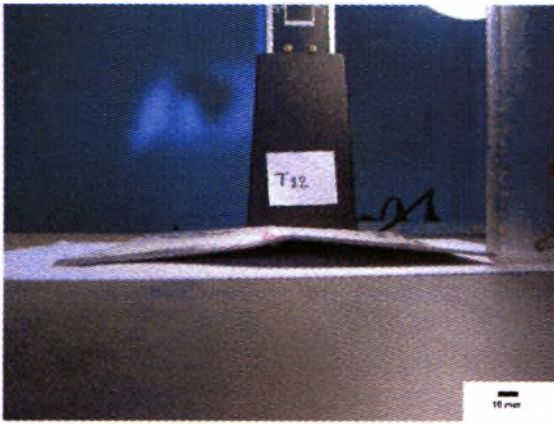
(α)



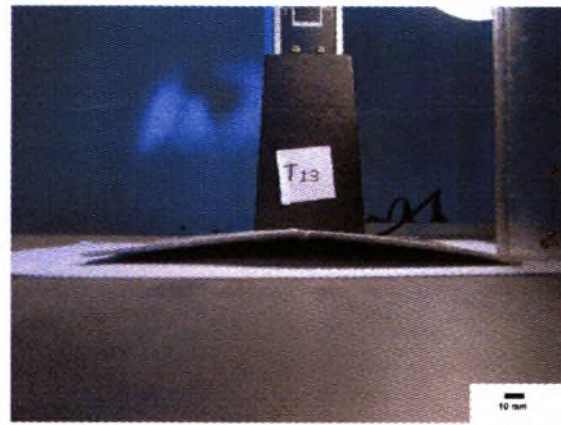
(β)

Σχήμα 4.12 Φωτογραφίες των δοκιμίων (α) T₁₈ και (β) T₁₉ που συγκολλήθηκαν στο εργοστάσιο Κιολεΐδης ΑΕΒΕ.

Μετά το πείραμα ακολούθησε οπτικός και μακροσκοπικός έλεγχος για την πρώτη προσπάθεια ανίχνευσης ατελειών στις συγκολλήσεις. Οι συγκολλήσεις παρουσίαζαν εμφανή προβλήματα στρέβλωσης (**σχήμα 4.13** και **σχήμα 4.14**). Οι στρεβλώσεις που εμφανίστηκαν ήταν κατά κύριο λόγο γωνιακή μεταβολή των συγκολλημένων ελασμάτων. Στα υπόλοιπα δοκίμια εντοπίστηκαν προβλήματα ατελούς διεΐσδυσης καθιστώντας τα ακατάλληλα για περαιτέρω έλεγχο (**σχήμα 4.15**).

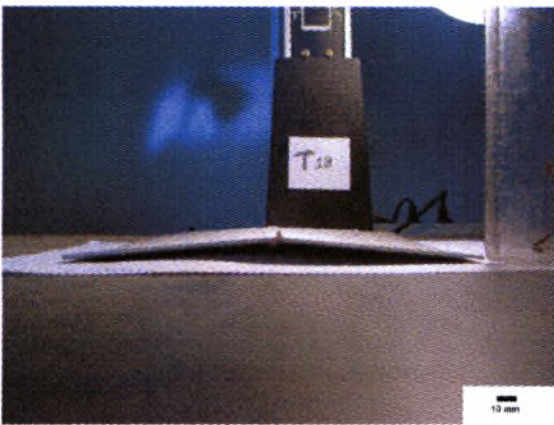


(α)



(β)

Σχήμα 4.13 Πλάγια λήψη των δοκιμίων (α) T₁₂ και (β) T₁₃ όπου διακρίνεται η γωνιακή μεταβολή των ελασμάτων.

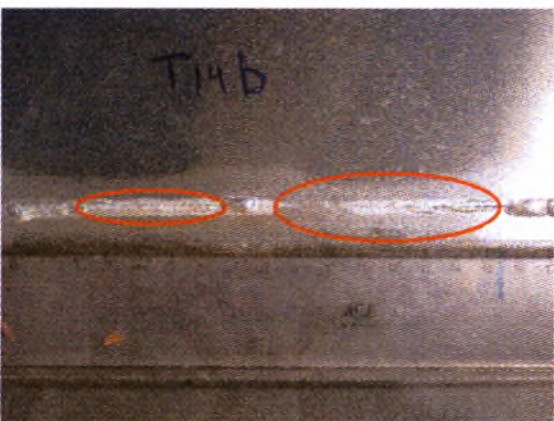


(α)

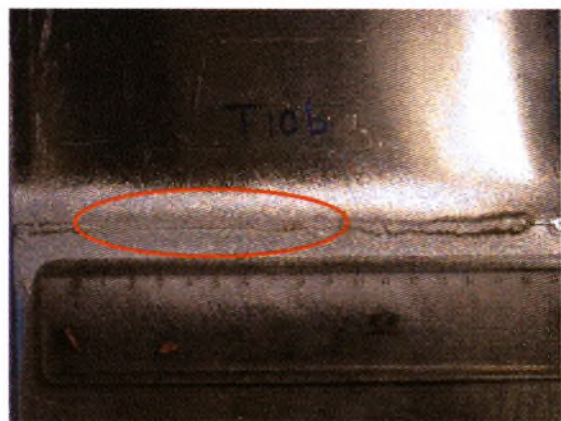


(β)

Σχήμα 4.14 Πλάγια λήψη των δοκιμίων (α) T₁₈ και (β) T₁₉ όπου διακρίνεται η γωνιακή μεταβολή των ελασμάτων.



(α)



(β)

Σχήμα 4.15 Ατελής διείσδυση παρουσιάστηκε σε πολλά σημεία των υπόλοιπων δειγμάτων που απορρίφθηκαν εξ αρχής.

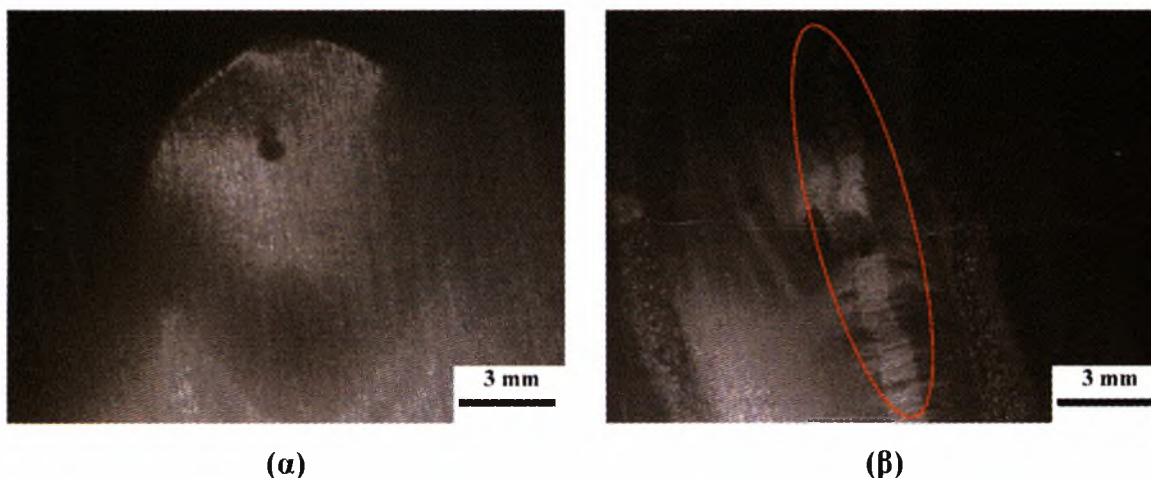
4.2.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της συγκόλλησης των δοκιμίων

Η συγκόλληση των λεπτών ελασμάτων Αλουμινίου είναι εξαιρετικά δυσχερής, εξαιτίας των στρεβλώσεων, που παρατηρούνται στα ελάσματα από την έντονη πρόσδοση θερμότητας κατά τη σύνδεση. Η γωνιακή μεταβολή ήταν η κυριότερη παραμόρφωση που εμφανίστηκε στα δείγματα. Πιθανόν οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή της εγκάρσια συστολής στη διεύθυνση του πάχους. Προσπάθειες για μείωση της προσδιδόμενης θερμότητας (αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης) οδηγούν σε ατελή διείδυση σε μη αποδεκτά επίπεδα.

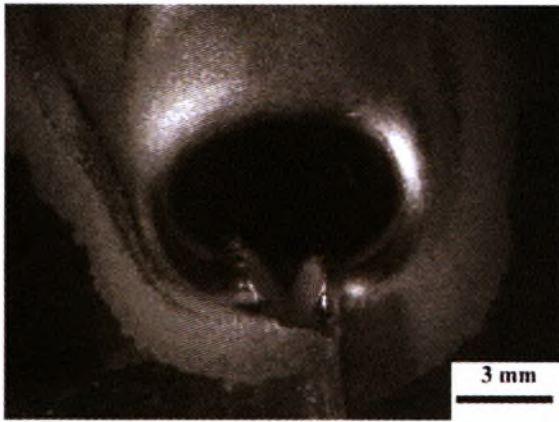
Η ουσιαστική διαφορά των δύο σειρών συγκολλήσεων ήταν η χρήση διαφορετικών αέριων μιγμάτων. Στην περίπτωση χρήσης Ηλίου η προσδιδόμενη θερμότητα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το καθαρό Αργό για ίδιες εντάσεις ρεύματος. Έτσι παρατηρήθηκε η χρήση χαμηλότερης έντασης ρεύματος στην δεύτερη σειρά συγκολλήσεων

4.3. Μακροσκοπικός έλεγχος της περιοχής συγκόλλησης

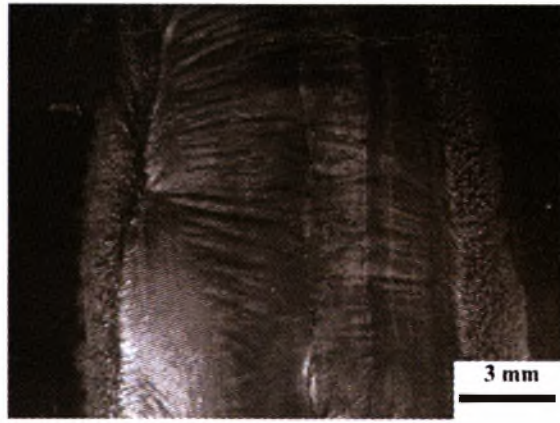
Μετά το πείραμα ακολούθησε μακροσκοπικός έλεγχος για την πρώτη προσπάθεια ανίχνευσης ατελειών στις συγκολλήσεις. Τα συγκολλημένα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο στερεοσκόπιο και εξετάστηκε η περιοχή συγκόλλησης από τις δύο πλευρές (άνω και κάτω πλευρά συγκόλλησης). Στα **σχήματα 4.16** έως **4.23**, παρουσιάζονται οι άνω κάτω πλευρά συγκόλλησης των δοκιμίων.



Σχήμα 4.16 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₁ (×6.5). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει το άτηκτο τμήμα της άκρης των ελασμάτων.

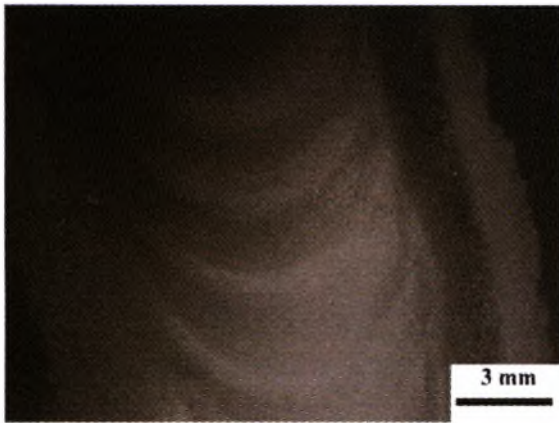


(α)

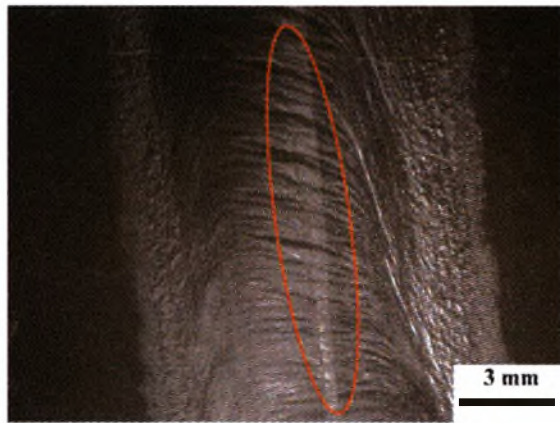


(β)

Σχήμα 4.17 Εικόνα από (α) το μέσο της συγκόλλησης όπου διακόπηκε (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₂ (×6.5).

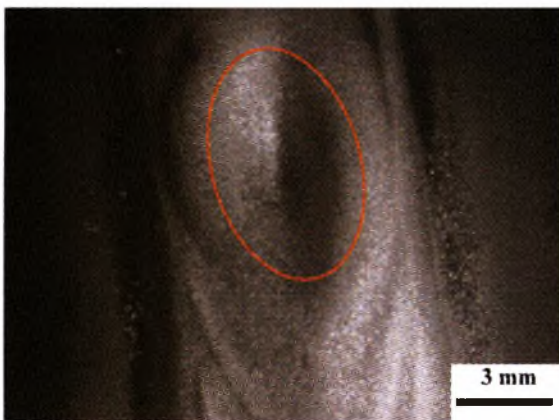


(α)

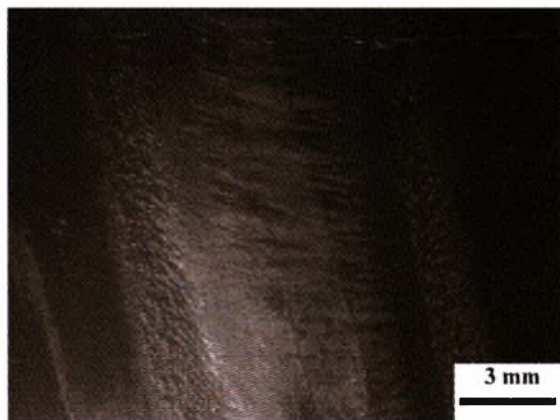


(β)

Σχήμα 4.18 Εικόνα από (α) το άνω επιφάνεια (πρόσωπο) της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₃ (×6.5). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει το άτηκτο τμήμα της άκρης των ελασμάτων.

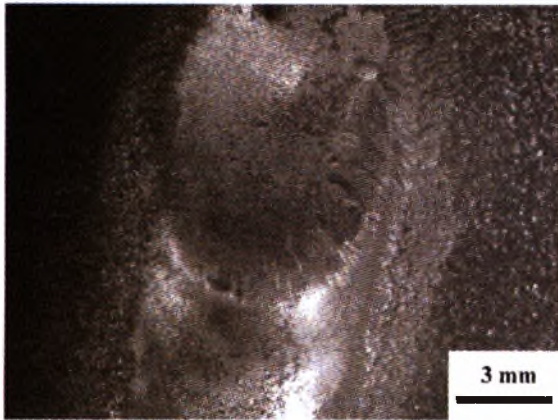


(α)

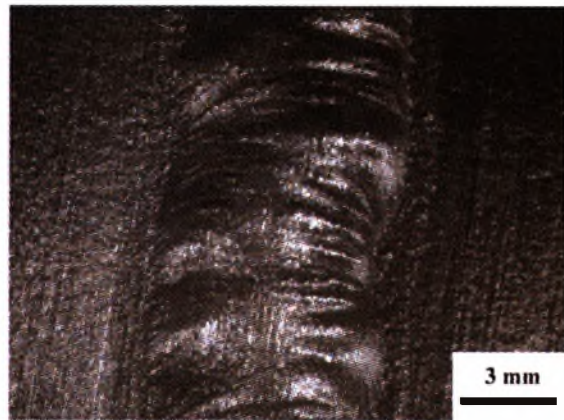


(β)

Σχήμα 4.19 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₄ (×6.5). Στη κυκλωμένη περιοχή εντοπίστηκε ρωγμή.

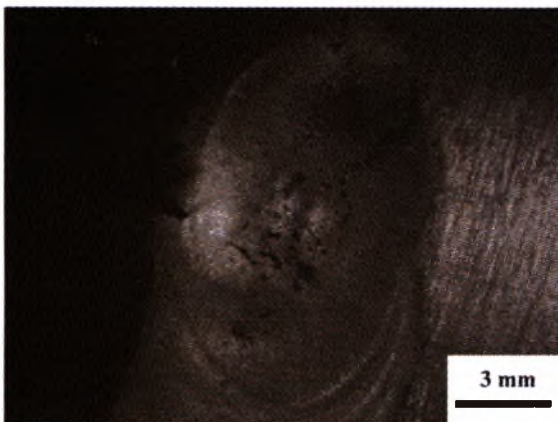


(α)

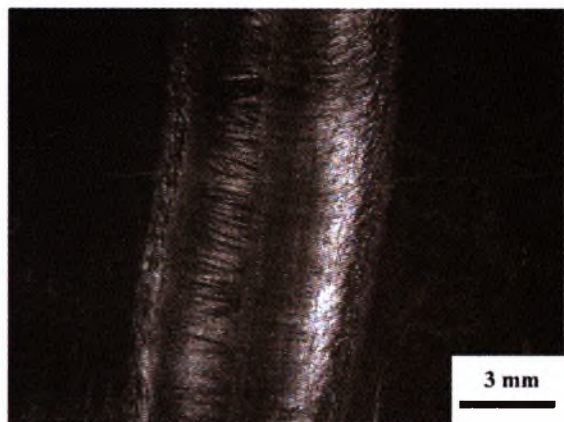


(β)

Σχήμα 4.20 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₂ (×6.5).

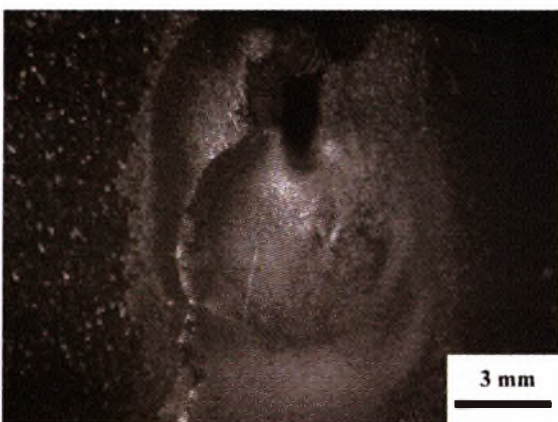


(α)

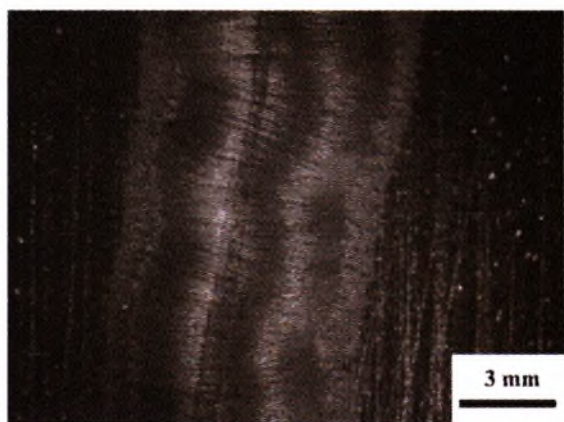


(β)

Σχήμα 4.21 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₃ (×6.5).

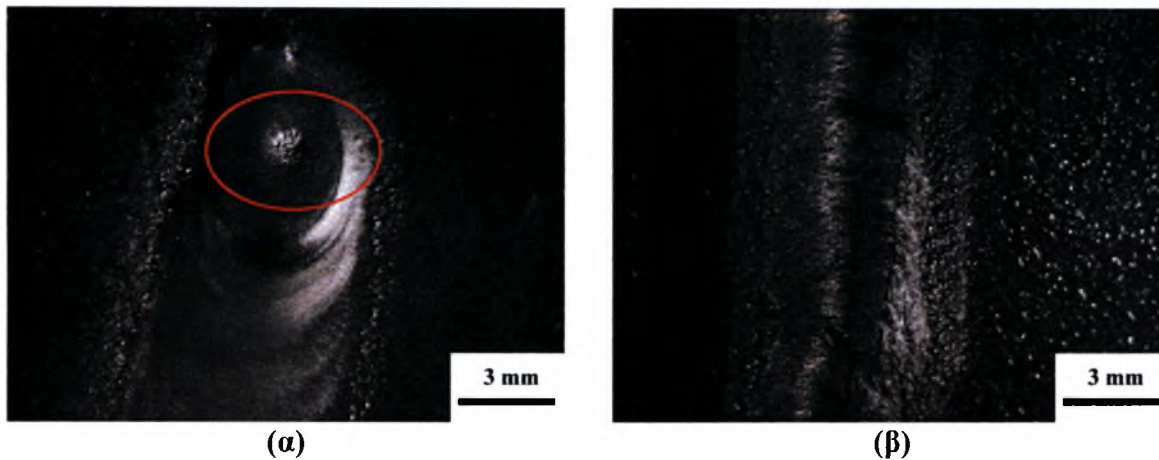


(α)



(β)

Σχήμα 4.22 Εικόνα από (α) το τέλος της συγκόλλησης και (β) τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₈ (×6.5).



Σχήμα 4.23 Εικόνα από **(α)** το τέλος της συγκόλλησης και **(β)** τη ρίζα της συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₉ ($\times 6.5$). Η κυκλωμένη περιοχή περιέχει ατέλεια που εμφανίστηκε στο τέλος της συγκόλλησης.

4.3.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Οι συγκολλήσεις παρουσίασαν καλή εικόνα χωρίς πιτσιλιές συγκόλλησης, και σχηματιζόμενη αιθάλη (καπνιά). Εντούτοις τα δοκίμια παρουσίαζαν ατέλειες στο τέλος της συγκόλλησης στο σημείο που σβήνει το τόξο (**σχήμα 4.19.(α), σχήμα 4.23.(α)**). Επίσης απαιτείται η προσεκτική απομάκρυνση του οξειδίου ακόμα στις άκρες των ελασμάτων. Η μη απομάκρυνση αυτού το οξειδίου εμπόδισε την τήξη και ένωση των δύο άκρων δημιουργώντας τη διαμήκη μη τηγμένη περιοχή στην ρίζα της συγκόλλησης (**σχήμα 4.16 (β), σχήμα 4.18 (β)**).

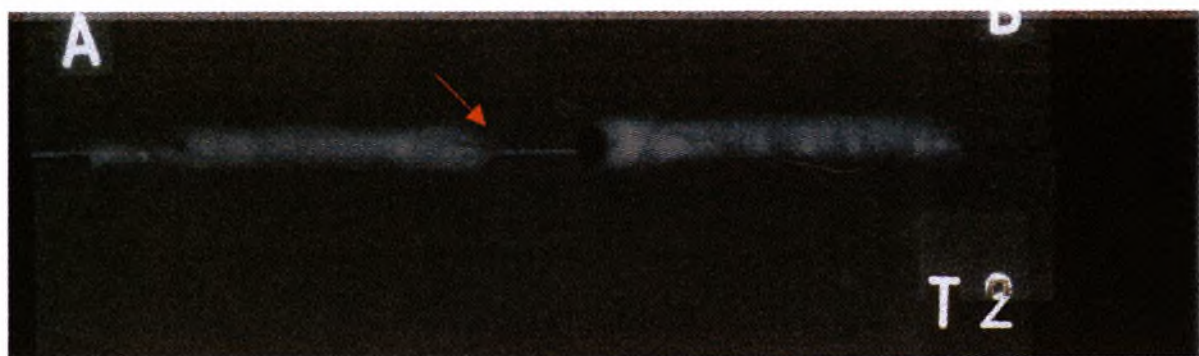
4.4. Αποτελέσματα μη καταστρεπτικού ελέγχου

4.4.1. Αποτελέσματα ραδιογραφίας με ακτίνες X

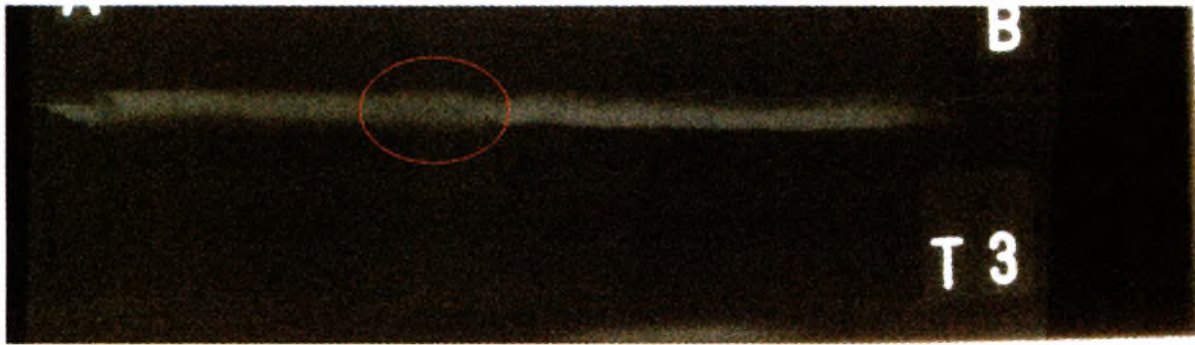
Στα σχήματα παρουσιάζονται τα φιλμ ραδιογράφισης των οκτώ δοκιμίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις διακρίνονται εσωτερικοί πόροι.



Σχήμα 4.24 Το φιλμ ραδιογράφισης του δοκιμίου T₁.



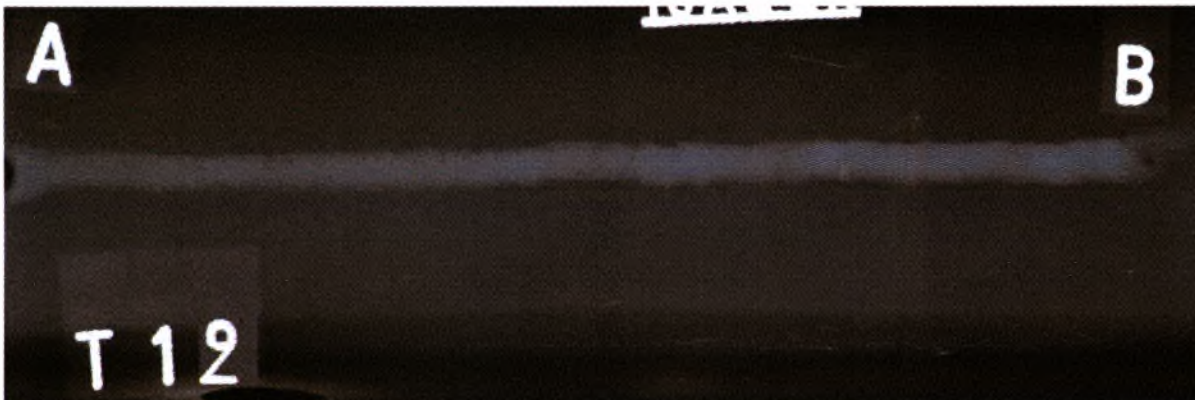
Σχήμα 4.25 Το φιλμ ραδιογράφισης του δοκιμίου T₂. Διακρίνεται η περιοχή όπου διεκόπη η συγκόλληση.



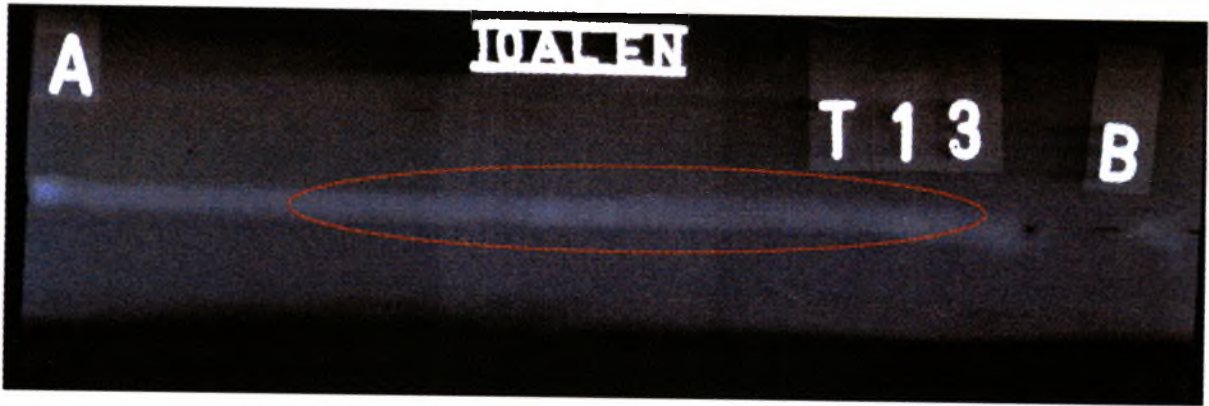
Σχήμα 4.26 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₃. Διακρίνεται περιοχή με πόρους.



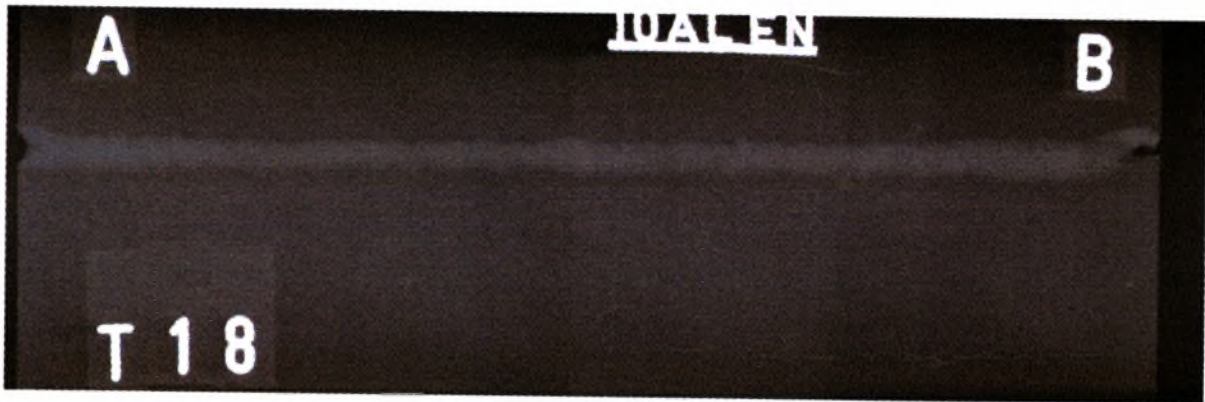
Σχήμα 4.27 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₄.



Σχήμα 4.28 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₁₂.



Σχήμα 4.29 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₁₃, κατά μήκος της σημειωμένης περιοχής εντοπίστηκαν πόροι σε γραμμική διάταξη.



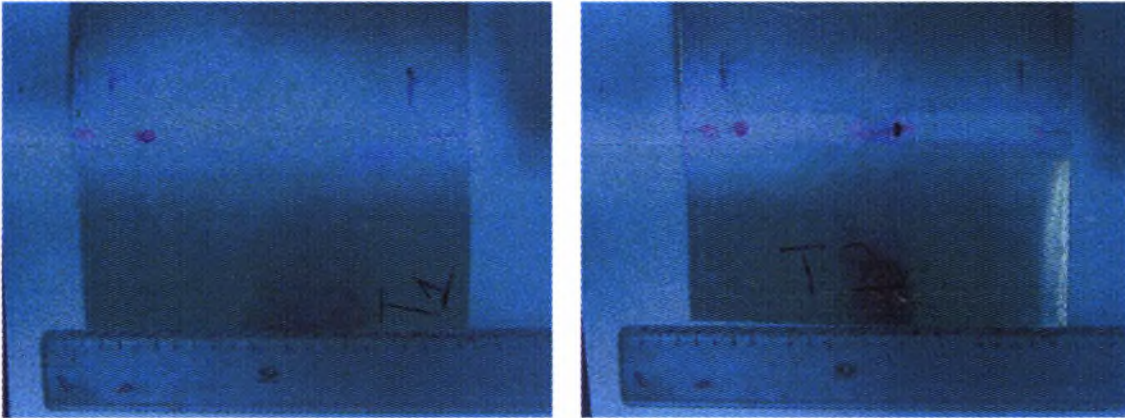
Σχήμα 4.30 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₁₈.



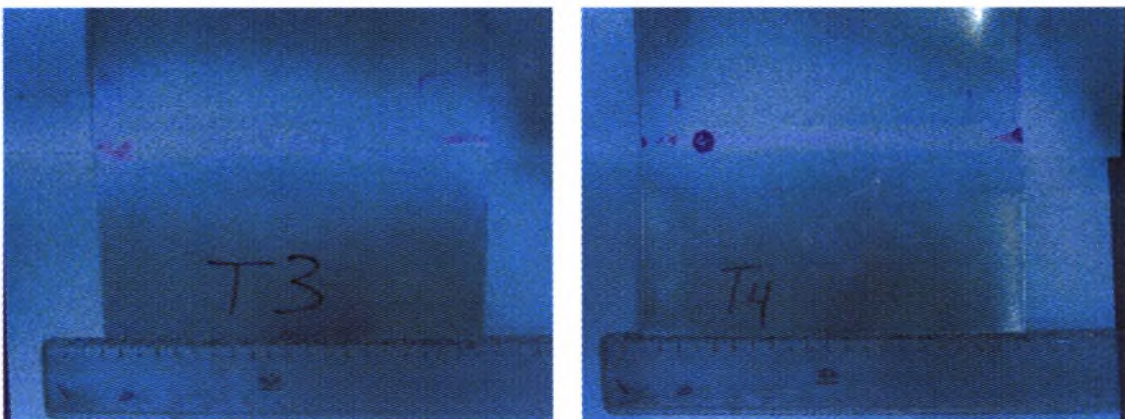
Σχήμα 4.31 Το φιλμ ραδιογράφησης του δοκιμίου T₁₉.

4.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής με διεισδυτικά υγρά

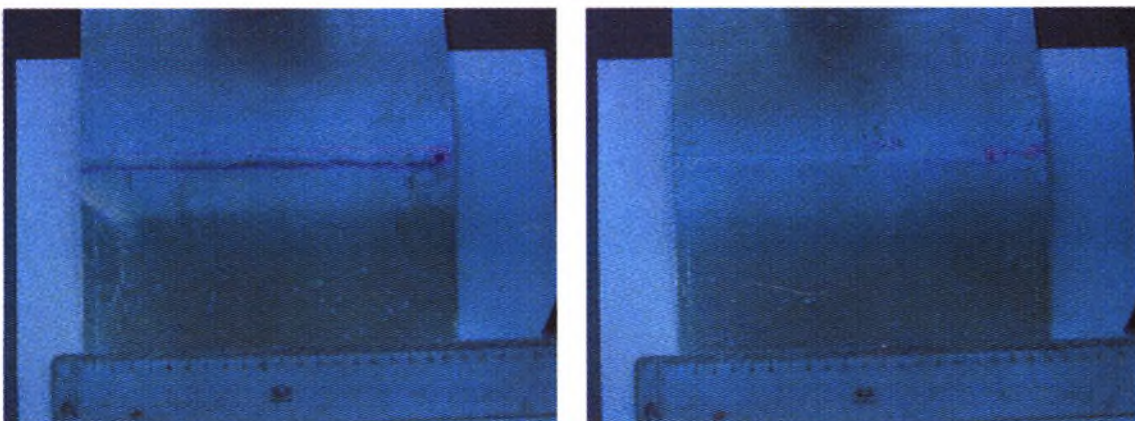
Στα **σχήματα 4.32** έως **4.35** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δοκιμών μετά την εφαρμογή των διεισδυτικών υγρών. Οι **πίνακες 4.2.** και **4.3.** περιέχουν την αξιολόγηση βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ EN1289 .



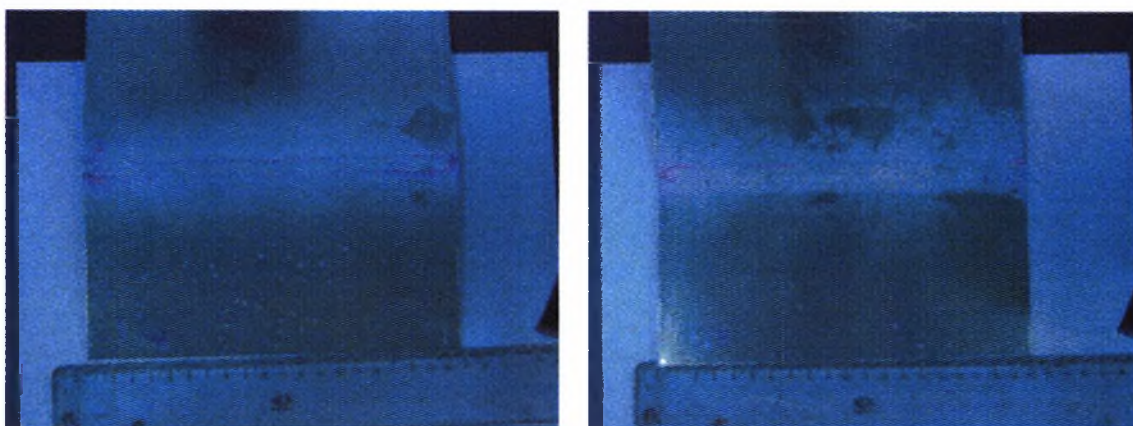
Σχήμα 4.32 Τα δοκίμιο T₁ και T₂ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.



Σχήμα 4.33 Τα δοκίμιο T₃ και T₄ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.

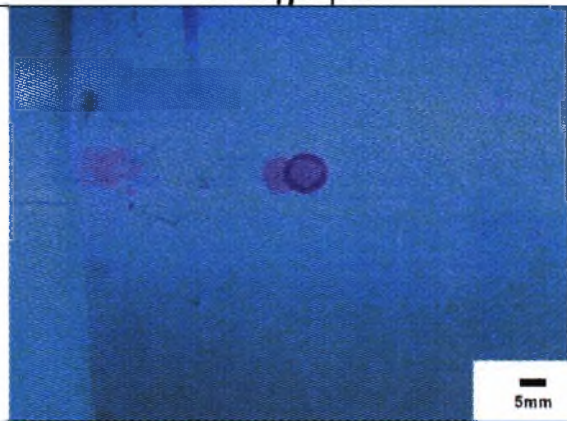
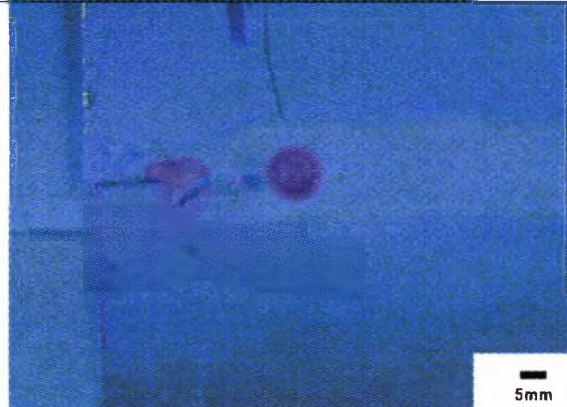


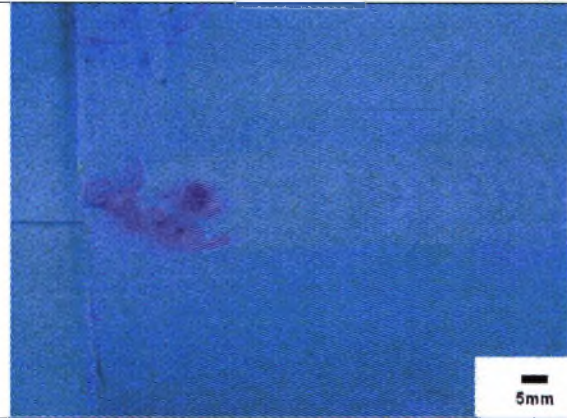

Σχήμα 4.34 Τα δοκίμιο T₁₂ και T₁₃ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.



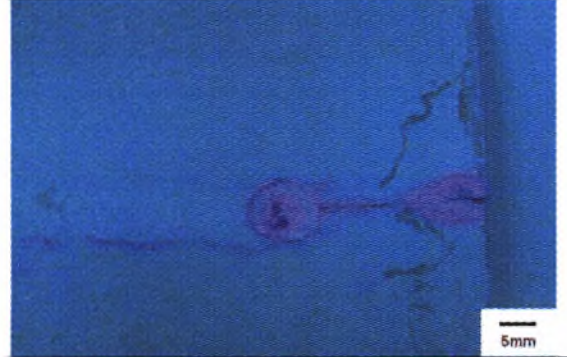

Σχήμα 4.35 Τα δοκίμιο T₁₈ και T₁₉ μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών.

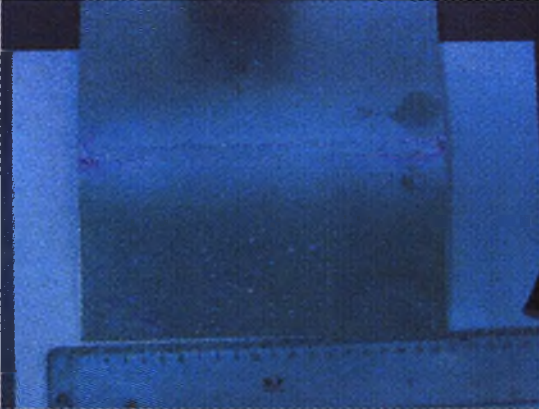
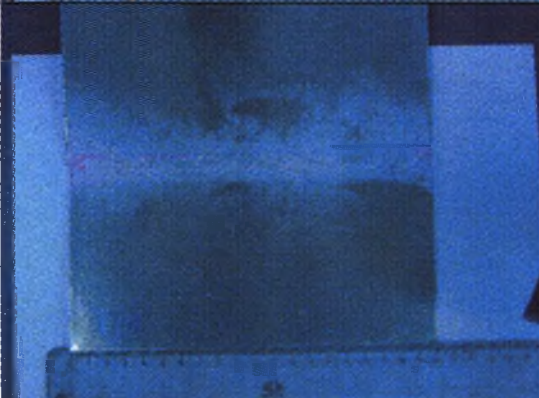
Πίνακας 4.2. Φωτογραφίες από την Εστίαση στην περιοχή των σφαλμάτων και αξιολόγηση των ίχνων με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN1289 (πρώτη σειρά συγκολλήσεων).

Δοκίμιο	Φωτογραφία	Αποτέλεσμα
T ₁		Παρουσιάζει δύο ίχνη στο τέλος της συγκόλλησης διαμέτρου d ₁ =7 mm και d ₂ = 5 mm. Επίπεδο αποδοχής 3.
T ₂		Παρουσιάζει ένα ίχνος στο τέλος της συγκόλλησης διαμέτρου d ₁ = 8mm. Επίπεδο αποδοχής 3.

T ₃		<p>Παρουσιάζει ένα ίχνος στο τέλος της συγκόλλησης διαμέτρου $d_1 = 3.5\text{mm}$. Επίπεδο αποδοχής 2.</p>
T ₄		<p>Παρουσιάζει δύο ίχνη στο τέλος της συγκόλλησης διαμέτρου $d_1 = 10.2\text{mm}$ και $d_2 = 4.5\text{mm}$. Επίπεδο αποδοχής κάτω του 3.</p>

Πίνακας 4.3. Φωτογραφίες από την Εστίαση στην περιοχή των σφαλμάτων και αξιολόγηση των ιχνών με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN1289 (δεύτερη σειρά συγκολλήσεων).

Δοκίμιο	Φωτογραφία	Αποτέλεσμα
T ₁₂		<p>Παρουσιάζει ένα ίχνος στο τέλος της συγκόλλησης διαμέτρου $d_1 = 10\text{mm}$. Επίπεδο αποδοχής κάτω του 3.</p>
T ₁₃		<p>Δεν παρουσιάζει κανένα ίχνος για επιφανειακή ατέλεια..</p>

T ₁₈		Δεν παρουσιάζει κανένα ίχνος για επιφανειακή ατέλεια..
T ₁₉		Δεν παρουσιάζει κανένα ίχνος για επιφανειακή ατέλεια.

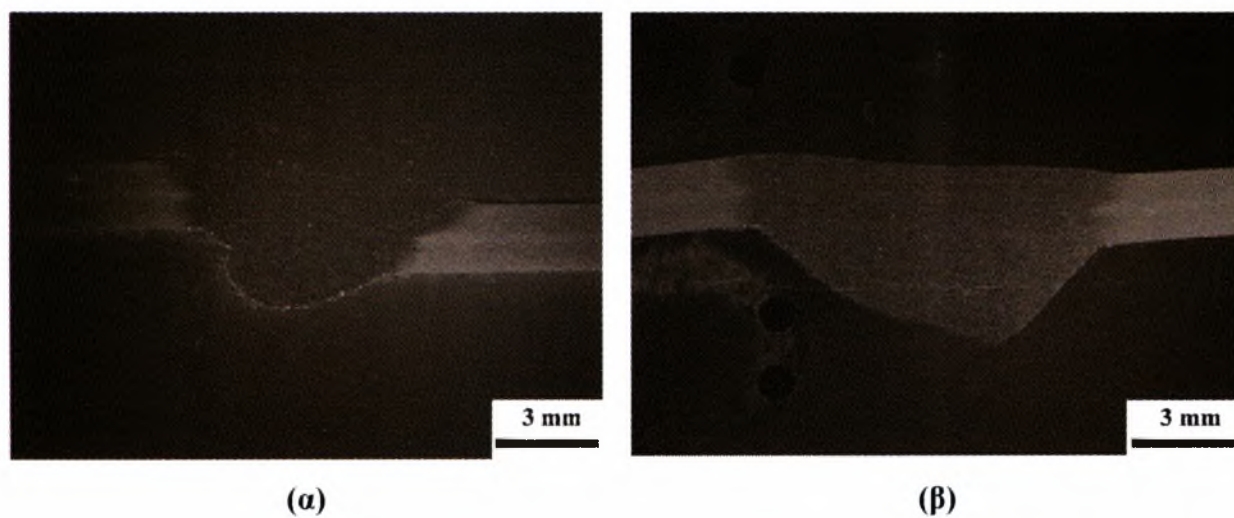
4.4.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μη καταστρεπτικού ελέγχου

Κατά τον έλεγχο με ακτίνες X εντοπίστηκαν, σε μερικές περιπτώσεις, πόροι μέσα στη λίμνη συγκόλλησης (σχήμα 4.26, σχήμα 4.29) . Οι πόροι αυτοί πιθανόν να δημιουργήθηκαν από την παρουσία υδρογόνου κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Επιπλέον από τα φιλμ ραδιογράφησης των δοκιμίων μπορούμε να διακρίνουμε ότι το πάχος συγκόλλησης δεν παραμένει σταθερό κατά μήκος της συγκολλητικής ραφής, γεγονός που δικαιολογείται από την δυσκολία διατήρησης σταθερής ταχύτητας κατά την χειροκίνητη συγκόλληση.

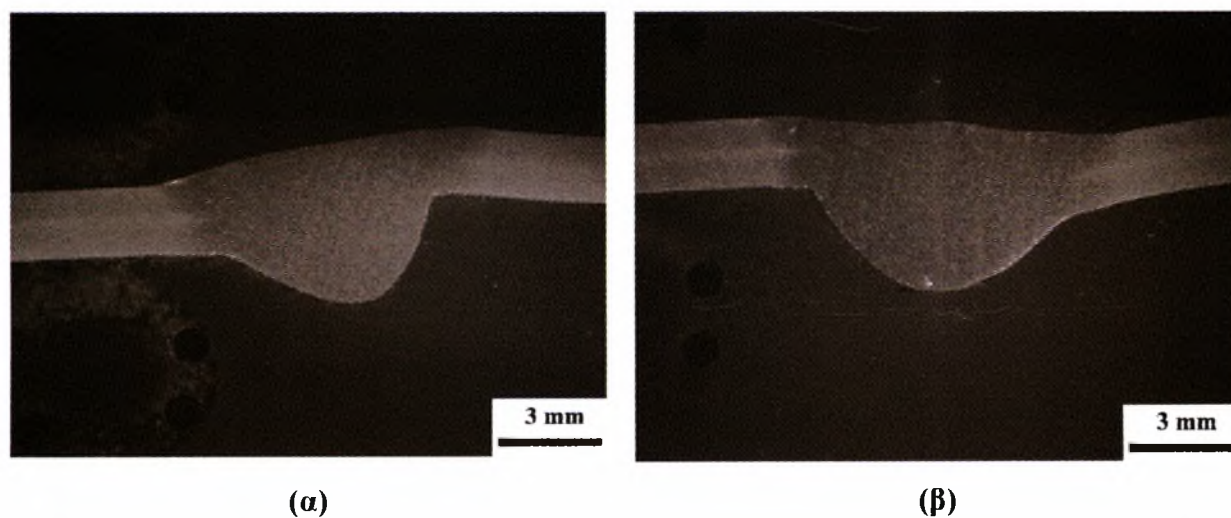
Κατά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά δεν εντοπίστηκαν σημαντικές επιφανειακές ρηγματώσεις ή πόροι. Εξαιρεση αποτελούν οι ρηγματώσεις και οι πόροι που εμφανίζονται στο τέλος της συγκόλλησης. Συμπεραίνουμε ότι στα σημεία που ξεκινά ή σταματά το τόξο συγκόλλησης παρουσιάζονται ανεπιθύμητα σφάλματα.

4.4. Αποτελέσματα μακροσκοπικού ελέγχου

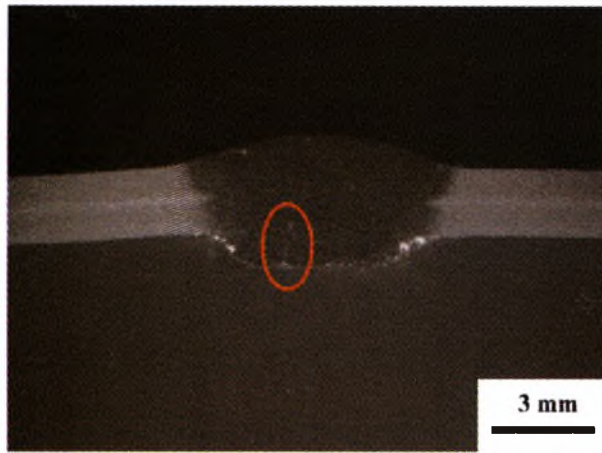
Τα δοκίμια εξετάστηκαν στο στερεοσκόπιο και φωτογραφήθηκαν για την αξιολόγησή τους σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042. Στα **σχήματα 4.36** έως **4.39** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δοκιμίων στο στερεοσκόπιο.



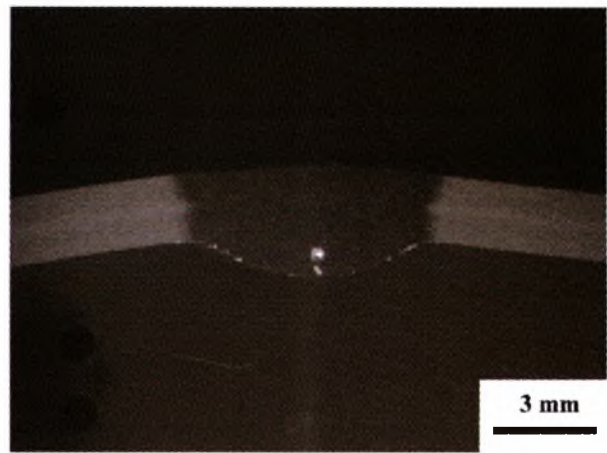
Σχήμα 4.36 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T₁ και (β) T₂ (×6,5).



Σχήμα 4.37 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T₃ και (β) T₄ (×6,5).

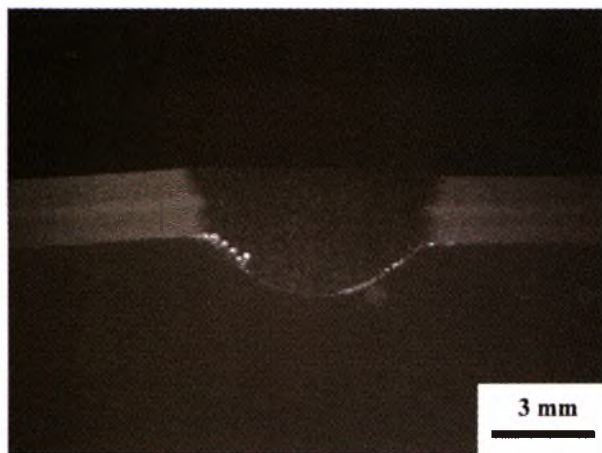


(α)

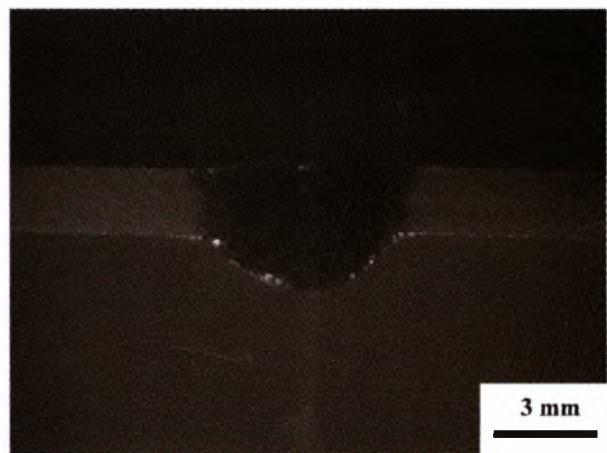


(β)

Σχήμα 4.38 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T₁₂ και (β) T₁₃ (×6,5). Στη φωτογραφία (α) διακρίνεται ρωγμή μέσα στην λίμνη συγκόλλησης.



(α)



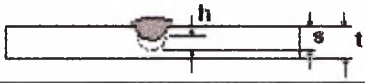

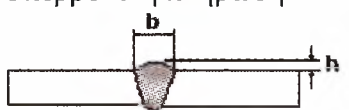
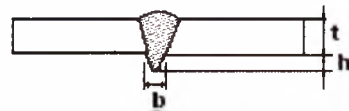
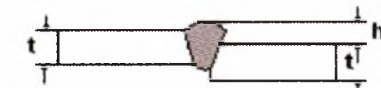
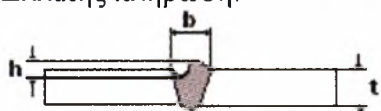
(β)

Σχήμα 4.39 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο των δοκιμίων (α) T₁₈ και (β) T₁₉ (×6,5).


4.4.1. Αξιολόγηση των δοκιμών σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042

Στους πίνακες 4.4. και 4.5. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των δοκιμών στις 23 προϋποθέσεις που θέτει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042 και αφορούν τη συγκόλληση μακροσκοπικά..

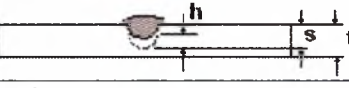

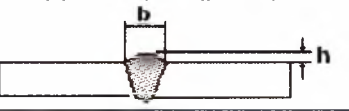
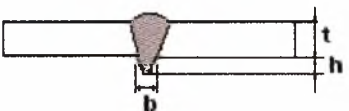
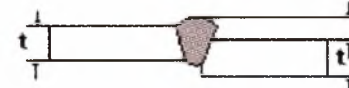
Πίνακας 4.4. Συγκεντρωτικός πίνακας εφαρμογής του προτύπου ΕΛΟΤ EN 30042 για την πρώτη

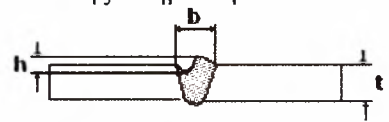

α/α	Ατέλεια	Δοκίμια-Επίπεδα ποιότητας			
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
1	Ρωγμές στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
2	Ρωγμές στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
3	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
4	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
5	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
6	Πόροι στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
7	Πόροι στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
8	Στερεά εγκλείσματα	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
9	Στερεά εγκλείσματα Βολφραμίου	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
10	Στερεά εγκλείσματα Χαλκού.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
11	Ατελής τήξη.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
12	Ατελής διείσδυση. 	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0
14	Αυλακώσεις. 	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0
15	Υπερβολική πλήρωση 	B (stringent) b=8.3mm h=0.63mm	B (stringent) b=10.85mm h=2.51mm	B (stringent) b=8.61mm h=1.08mm	B (stringent) b=9.25mm h=0
19	Υπερβολική πλήρωση στην κάτω πλευρά συγκόλλησης. 	B (stringent) b=4.7mm h=2.23mm	B (stringent) b=10mm h=3mm	B (stringent) b=7mm h=2.66mm	B (stringent) b=8.1mm h=2.87mm
20	Κακή ευθυγράμμιση (misalignment) 	<D (Moderate) h=1.08mm	B (stringent) h=0.57mm	<D (Moderate) h=1.78mm	B (stringent) h=0.38mm
21	Ελλiptής πλήρωση. 	B (stringent) h=0mm	D (Moderate) h=0.4mm	B (stringent) h=0mm	D (Moderate) h=0.31mm

σειρά συγκολλήσεων.

22	Κοίλωμα στην ρίζα. 	<D (Moderate) h=0.44 mm	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0
23	Συνολικό μήκος πολλαπλών ατελειών	$\sum h = 0.44$ C(Intermediate)	$\sum h = 0$ B (stringent)	$\sum h = 0$ B (stringent)	$\sum h = 0$ B (stringent)

Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικός πίνακας εφαρμογής του προτύπου ΕΛΟΤ EN 30042 για την δεύτερη σειρά συγκολλήσεων.

α/α	Ατέλεια	Δοκίμια-Επίπεδα ποιότητας			
		T ₁₂	T ₁₃	T ₁₈	T ₁₉
1	Ρωγμές στο δοκίμιο.	εκτός προδιαγραφής	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
2	Ρωγμές στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
3	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
4	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
5	Πόροι στο δοκίμιο	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
6	Πόροι στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
7	Πόροι στο δοκίμιο.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
8	Στερεά εγκλείσματα	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
9	Στερεά εγκλείσματα Βολφραμίου	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
10	Στερεά εγκλείσματα Χαλκού.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
11	Ατελής τήξη.	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)	B (stringent)
12	Ατελής διείδυση. 	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0
14	Αυλακώσεις. 	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0	B (stringent) h=0
15	Υπερβολική πλήρωση 	B (stringent) b=7.6 mm h=0.93 mm	B (stringent) b=7.1 mm h=0 mm	B (stringent) b=6.6 mm h=0.2 mm	B (stringent) b=6.6 mm h=0.3 mm
19	Υπερβολική πλήρωση στην κάτω πλευρά συγκόλλησης. 	B (stringent) b=6.33 mm h=0.8 mm	B (stringent) b=6.9 mm h=1 mm	B (stringent) b=6.6 mm h=1.6 mm	B (stringent) b=6 mm h=1.6 mm
20	Κακή ευθυγράμμιση (misalignment) 	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0.26 mm

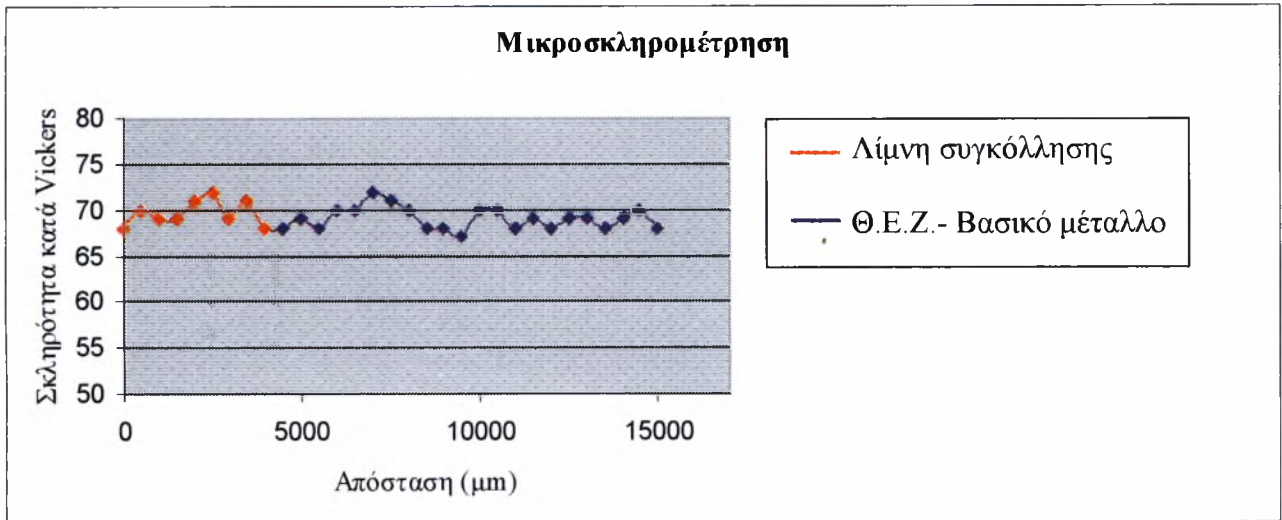
21	Ελλιπής πλήρωση. 	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0.1 mm	B (stringent) h=0.1 mm	B (stringent) h=0 mm
22	Κοίλωμα στην ρίζα. 	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0 mm	B (stringent) h=0 mm
23	Συνολικό μήκος πολλαπλών ατελειών	$\sum h = 0$ B (stringent)	$\sum h = 0.1\text{mm}$ B (stringent)	$\sum h = 0.1\text{mm}$ B (stringent)	$\sum h = 0$ B (stringent)

4.4.2. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης

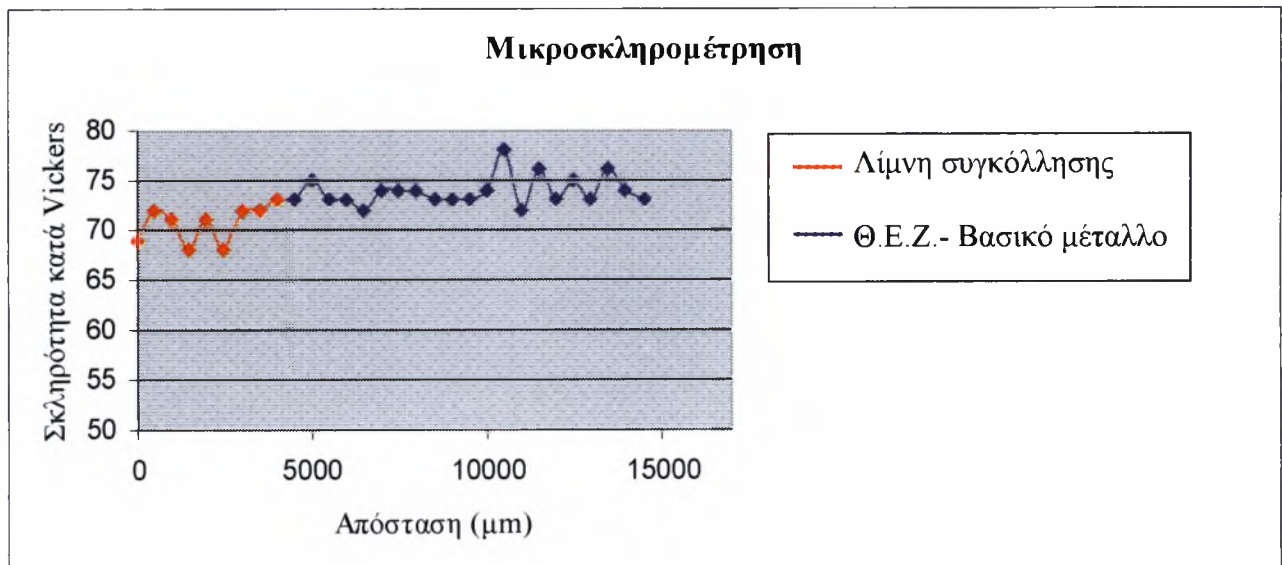
Κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο τα κυριότερα σφάλματα που παρουσιάστηκαν αφορούσαν στην κακή ευθυγράμμιση των προς συγκόλληση ελασμάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις στην ελλιπή πλήρωση της άνω πλευράς συγκόλλησης. Η κακή ευθυγράμμιση των ελασμάτων οφείλεται κατά κύριο λόγο στην κακή προετοιμασία των ελασμάτων πριν την συγκόλληση και κατά ένα μικρό μέρος στην γωνιακή μετατόπιση τους κατά την συγκόλληση. Στο **σχήμα 4.38 (β)** φαίνεται μία περίπτωση υπερβολικής γωνιακής μεταβολής. Η αρχική πρόχειρη ένωση των ελασμάτων με πόντους βοηθάει ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο της κακής ευθυγράμμισης. Η ελλιπής πλήρωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης.

4.5. Αποτελέσματα Μικροσκληρομέτρησης

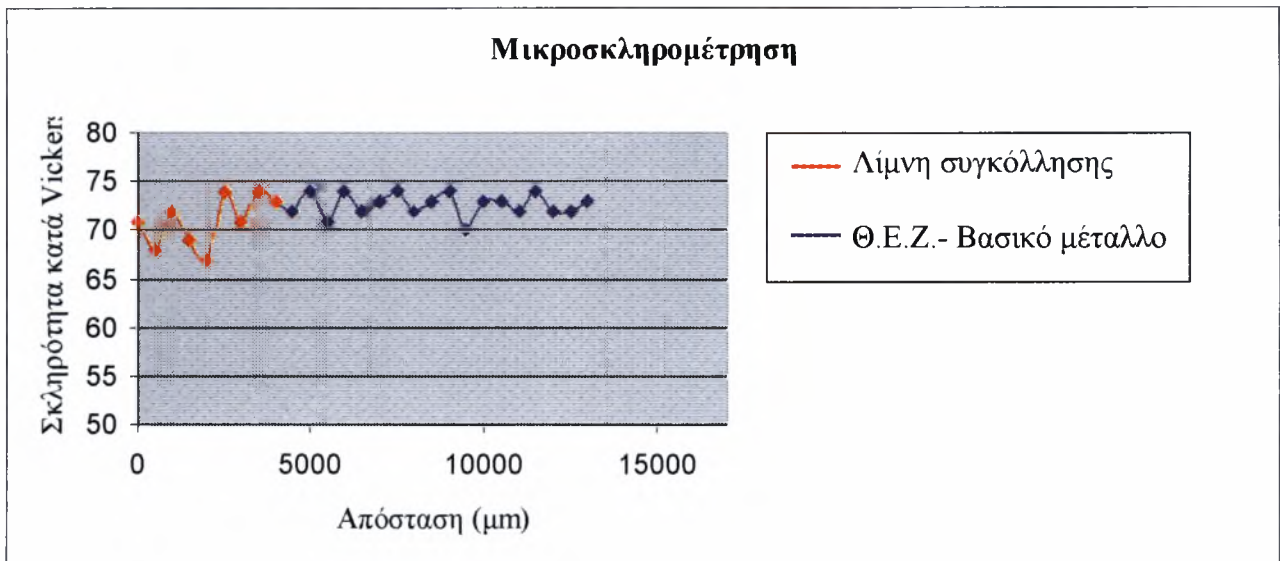
Τα προφίλ μικροσκληρομέτρησης των δοκιμίων παρουσιάζονται στα **σχήματα 4.40** έως **4.47**. Στο **σχήμα 4.48** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα προφίλ μικροσκληρομέτρησης, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις τιμές της σκληρότητας.



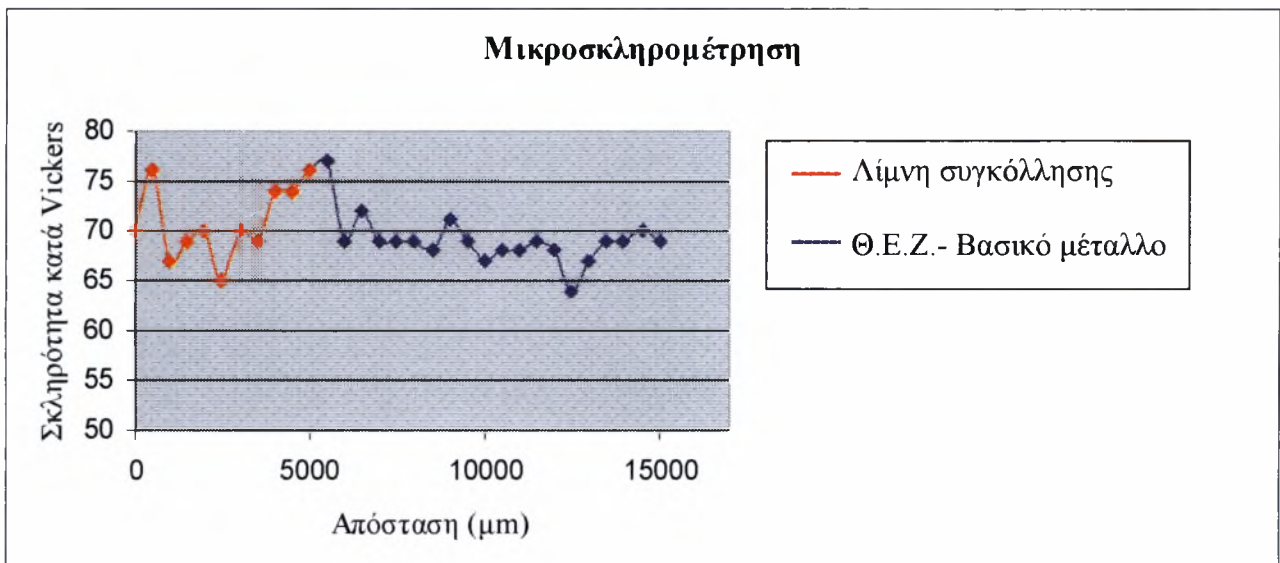
Σχήμα 4.40 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₁.



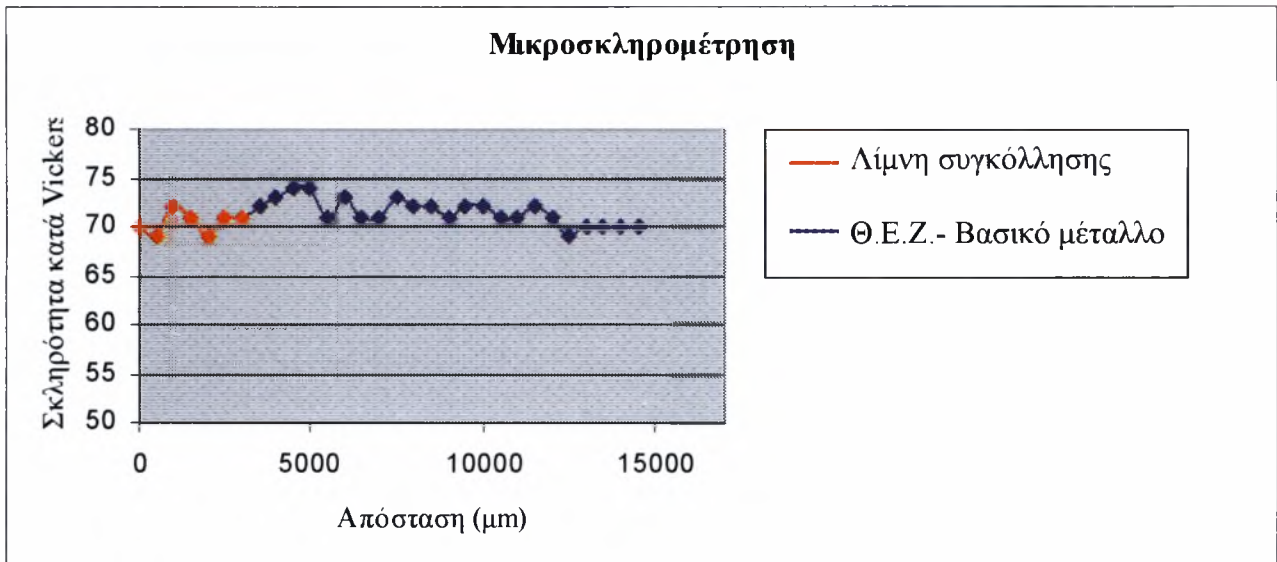
Σχήμα 4.41 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₂.



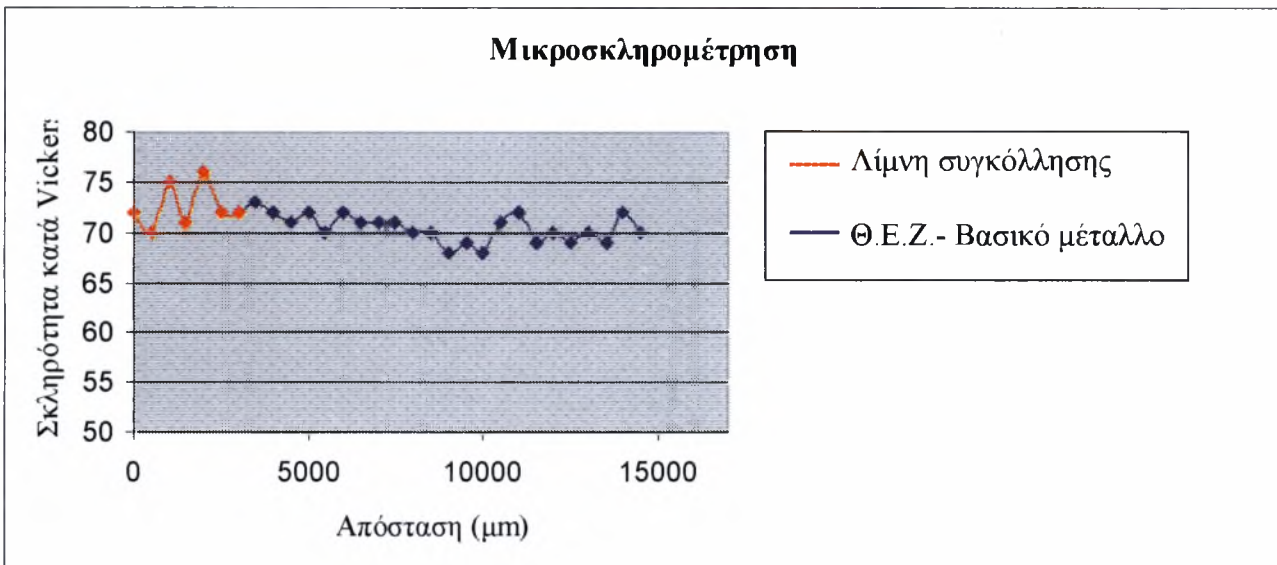
Σχήμα 4.42 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₃.



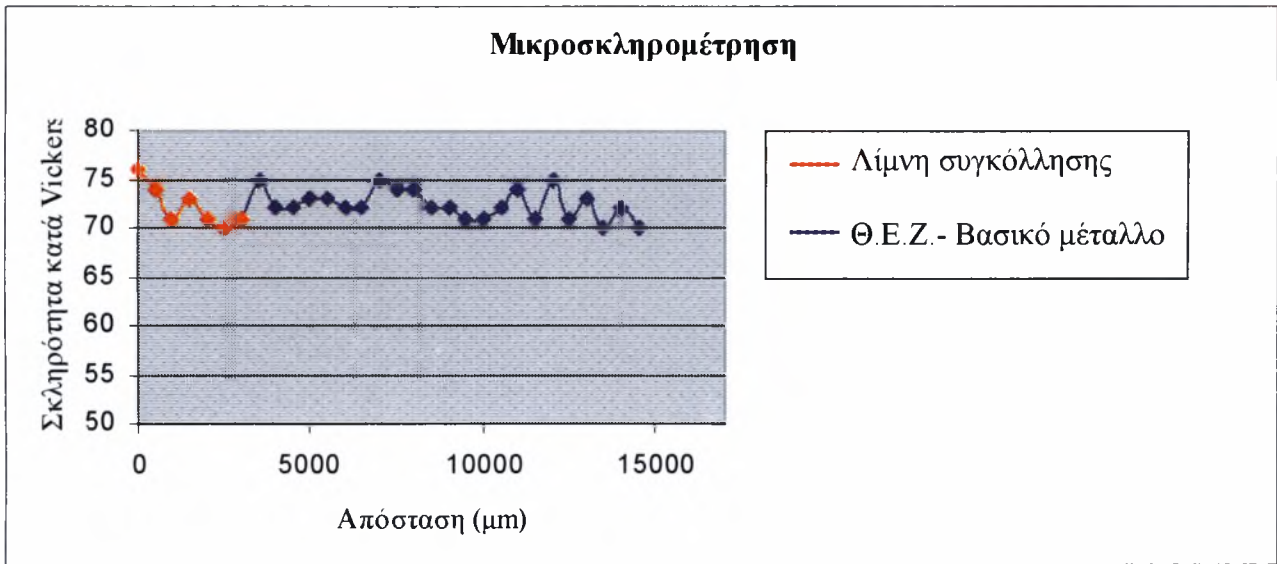
Σχήμα 4.43 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₄.



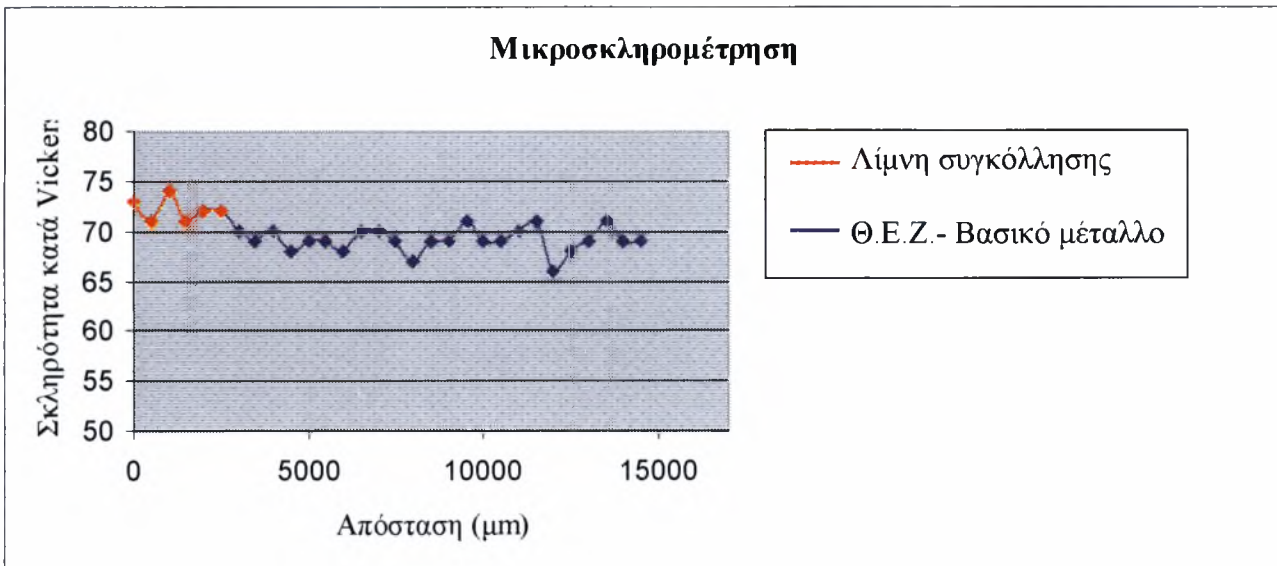
Σχήμα 4.44 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₁₂.



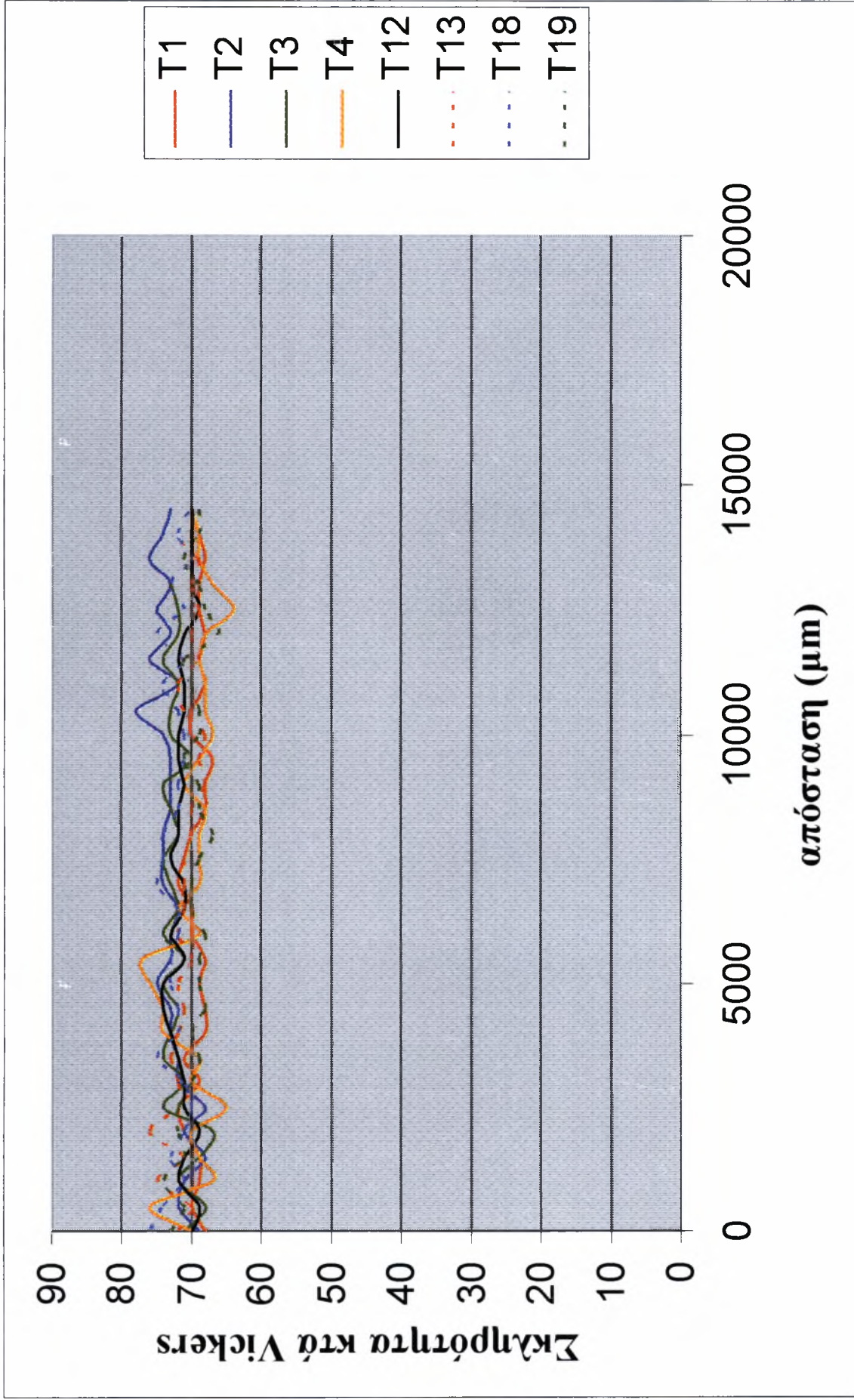
Σχήμα 4.45 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T₁₃.



Σχήμα 4.46 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T18.



Σχήμα 4.47 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για το δοκίμιο T19.



Σχήμα 4.48 Συγκενρωτικό διάγραμμα μικροσκληρομέτρησης για όλα τα δοκίμια.

4.5.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μικροσκληρομέτρησης

Από τα προφίλ σκληρομέτρησης των οκτώ δοκιμίων δεν παρατηρούμε σαφή μεταβολή της σκληρότητας από την λίμνη συγκόλλησης, την ΘΕΖ μέχρι το ανεπηρέαστο βασικό μέταλλο. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται σε δύο λόγους:

α) Το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε, αλουμίνιο 5356 ή αλουμίνιο 5183, παρουσιάζει την ίδια σκληρότητα με το βασικό μέταλλο, αλουμίνιο 5083.

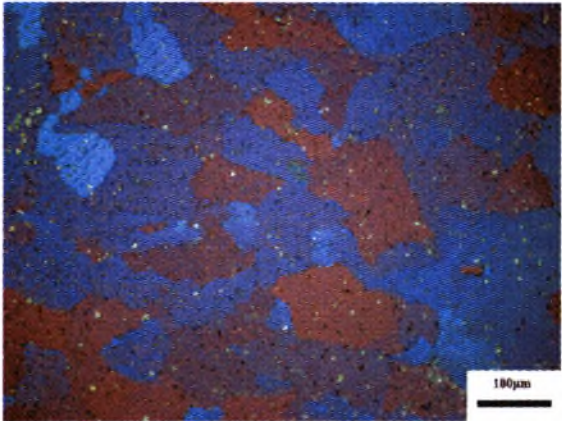
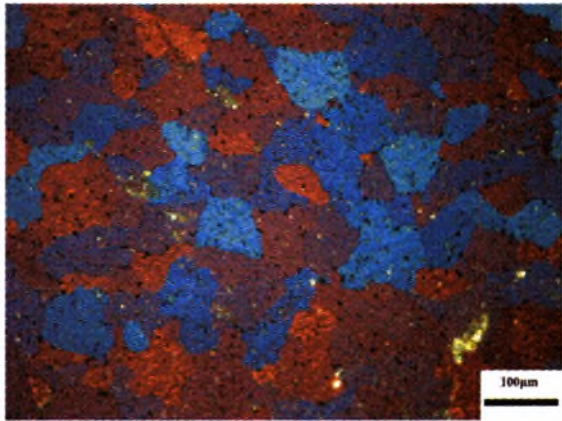
β) Το αλουμίνιο 5083 είναι θερμικά μη κατεργάσιμο. Έτσι η περιοχή που αναπτύχθηκαν υψηλές θερμοκρασίες (ΘΕΖ) έμεινε ανεπηρέαστη και δεν προκλήθηκαν μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Με την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης δεν έγινε εφικτός ο προσδιορισμός της έκτασης της ΘΕΖ. Επίσης τα οκτώ δείγματα παρουσιάζουν πολύ κοντινή μέση τιμή σκληρότητας και εύρους τιμών δείχνοντας ότι οι παράμετροι δεν είχαν συστηματική επίδραση στην σκληρότητα των δοκιμίων.

4.6. Αποτελέσματα μεταλλογραφικού ελέγχου

Στους πίνακες 4.6 έως 4.8 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες μικροδομής των δοκιμίων και μία εκτίμηση του μεγέθους των κόκκων. Η εκτίμηση του μεγέθους έγινε προσεγγιστικά από τις φωτογραφίες μικροδομής και από την κλίμακα για κάθε μεγέθυνση. Στα σχήματα 4.49 και 4.50 παρουσιάζεται η μικροδομή εντός της λίμνης συγκόλλησης.

Πίνακας 4.6 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης των δύο δοκιμίων ($\times 200$).

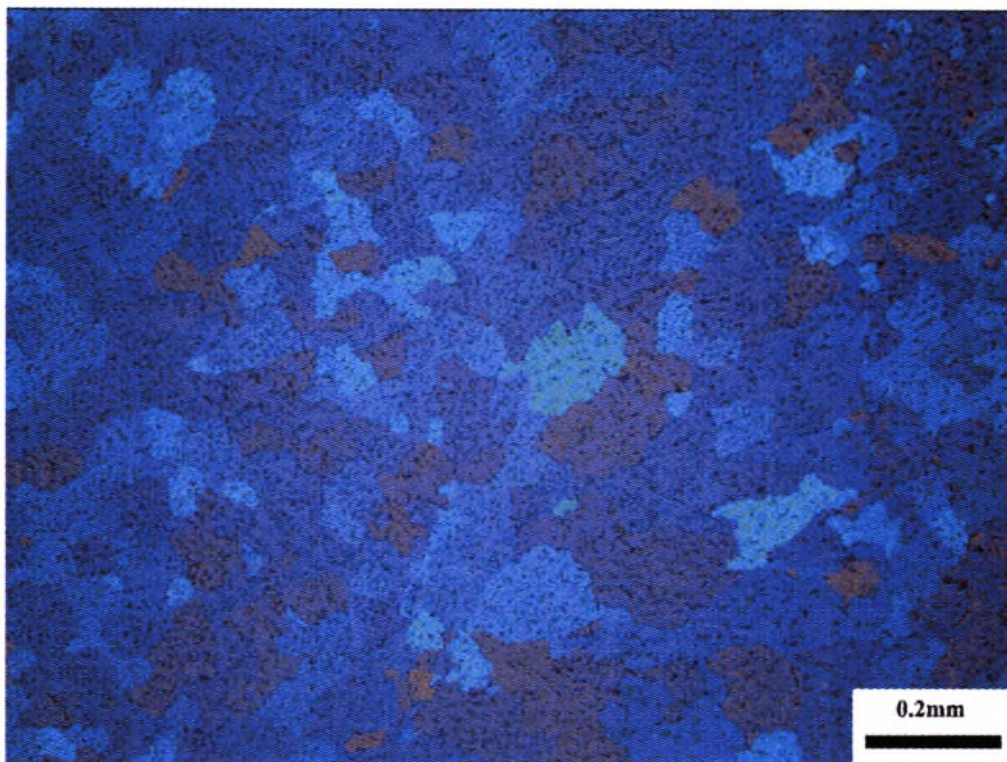
Δοκίμιο	T ₁₂	T ₁₈
Φωτογραφία		
Μέγεθος κόκκου	75 µm	75 µm

Πίνακας 4.7 Η περιοχή του συνόρου λίμνης συγκόλλησης-βασικού μετάλλου των δύο δοκιμίων ($\times 200$).

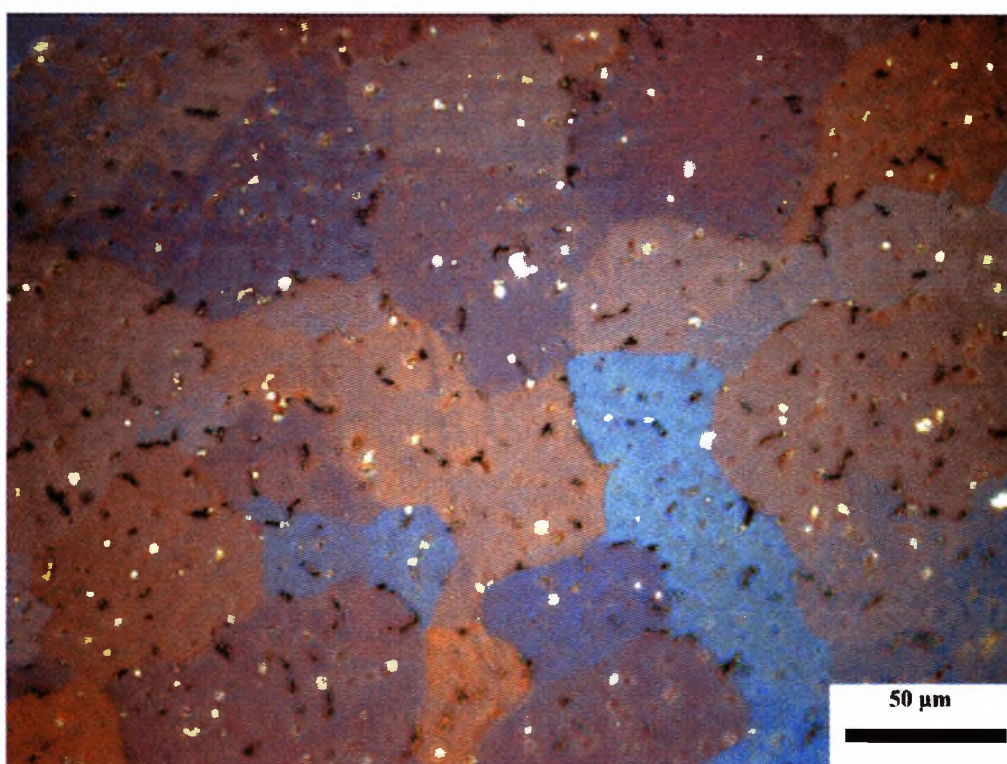
Δοκίμιο	T ₁₂	T ₁₈
Φωτογραφία		
Μέγεθος κόκκου λίμνης συγκόλλησης	75 μm	75 μm
Μέγεθος κόκκου βασικού μετάλλου	17 μm	17 μm
Μέγεθος κόκκου βασικού μετάλλου μη συγκολλημένου (§5.4)	17 μm	

Πίνακας 4.8 Η περιοχή του συνόρου λίμνης συγκόλλησης-βασικού μετάλλου των δύο δοκιμίων ($\times 50$)

Δοκίμιο	T ₁₂	T ₁₈
Φωτογραφία		



Σχήμα 4.49 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₈, διακρίνεται η δενδριτική δομή (×100).



Σχήμα 4.50 Η περιοχή της λίμνης συγκόλλησης του δοκιμίου T₁₈. Τα ανοιχτόχρωμα στίγματα είναι αδιάλυτα εγκλείσματα, πιθανόν σωματίδια Mg₂Si ή (Fe,Mn)₃SiAl₁₂ (×500).

4.6.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μεταλλογραφικού ελέγχου

Παρατηρούμε στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης εμφανίζεται δενδριτική δομή, ενώ το μέγεθος των κόκκων είναι αρκετά μεγαλύτερο από το βασικό μέταλλο γεγονός που δικαιολογείται από τον υψηλό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας και τον χαμηλό ρυθμό ψύξης της λίμνης συγκόλλησης. Στην περίπτωση των λεπτών ελασμάτων, για τον υπολογισμό του ρυθμού ψύξης, χρησιμοποιείται ο τύπος του Adams:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2\pi k \rho c \left(\frac{H}{h}\right)^2 (T - T_0)^3 \quad [5]$$

Έτσι για το δοκίμιο T₁₉ με ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας 235 J/mm και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του αλουμινίου k=0.237 W/mK, ρ=2.67 gr/cm³, c=0.897 J/grK ο ρυθμός ψύξης υπολογίστηκε 2.9° C/sec (αργή διαδικασία ψύξης). Η δομή της λίμνης και η παρουσία μεγάλης διαμέτρου κόκκων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του σημείου της συγκόλλησης [6].

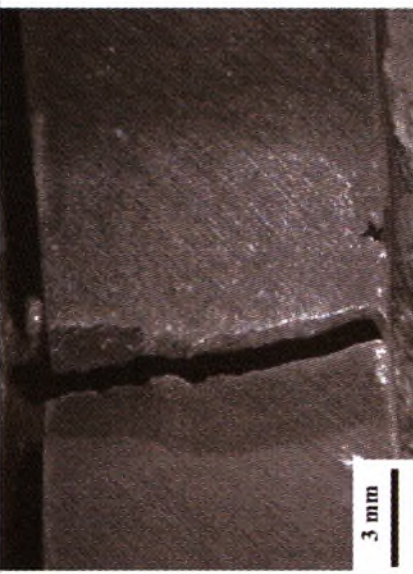

Συγκρίνοντας το μέγεθος των κόκκων στο σύνορο λίμνης συγκόλλησης και βασικού μετάλλου και το μέγεθος των κόκκων του μη συγκολλημένου βασικού μετάλλου δεν παρατηρούμε διαφοροποιήσεις, έτσι μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι στο σύνορο της λίμνης συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου δεν εμφανίζεται θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) ή ζώνη μερικής τήξης.

Από το έλεγχο της μικροδομής των δύο δοκιμίων δεν προέκυψαν διαφορές, συμπεραίνοντας ότι η διαφορά στον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας αυτής της τάξης δεν επηρεάζει την μικροδομή της λίμνης και του συνόρου λίμνης συγκόλλησης-βασικού μετάλλου.


4.7. Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού

Ο πίνακας 4.9 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής του εφελκυσμού.

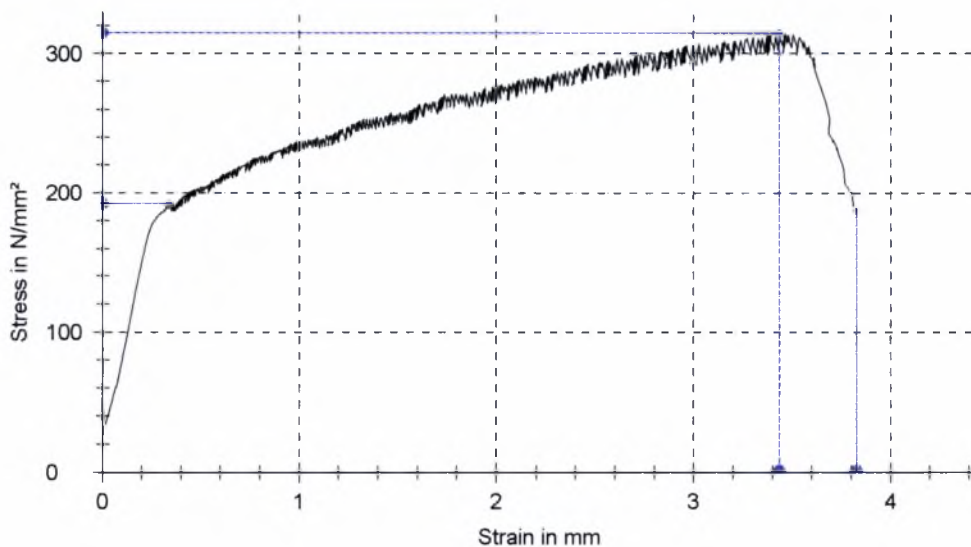
Πίνακας 4.9 Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού.

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Όριο διαρροής (N/mm ²)	Όριο θραύσης (N/mm ²)	Θέση θραύσης	Φωτογραφία
T ₃	12	1,98	153	252	Λίμνη συγκόλλησης	
T ₄	12	1,98	152	237	Λίμνη συγκόλλησης	

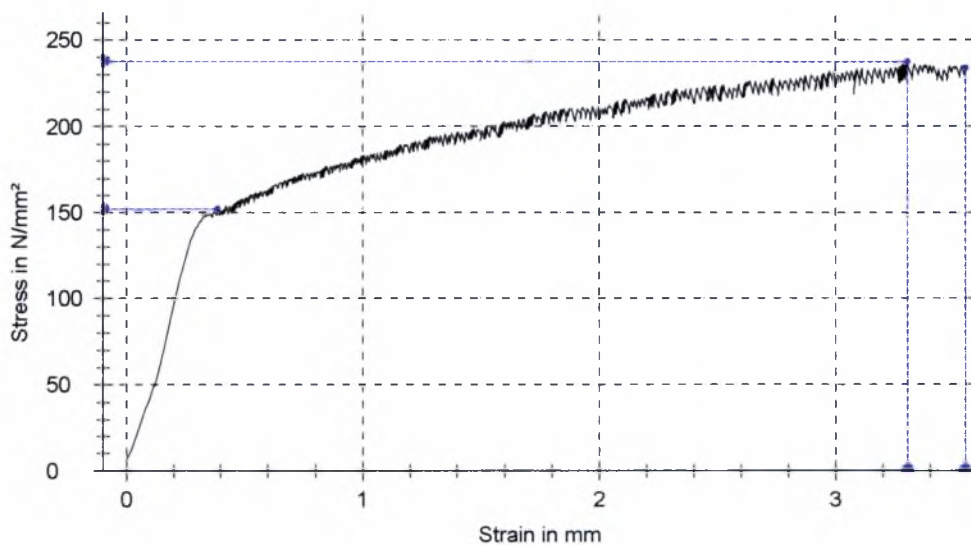
T ₁₂	12	1,98	152	270	Λίμνη συγκόλλησης	
T ₁₃	12	1,98	144	278	ΘΕΖ	
T ₁₈	12	1,98	153	252	Στο σύνορο λίμνης-ΘΕΖ	

T ₁₉	12	1,83	163	301	Λίμνη συγκόλλησης	
Συγκολλητά 5083 με 5183 (ASM Specialty Handbook)	-	-	155	290	-	-
Συγκολλητά 5083 με 5356 (ASM Specialty Handbook)	-	-	145	290	-	-

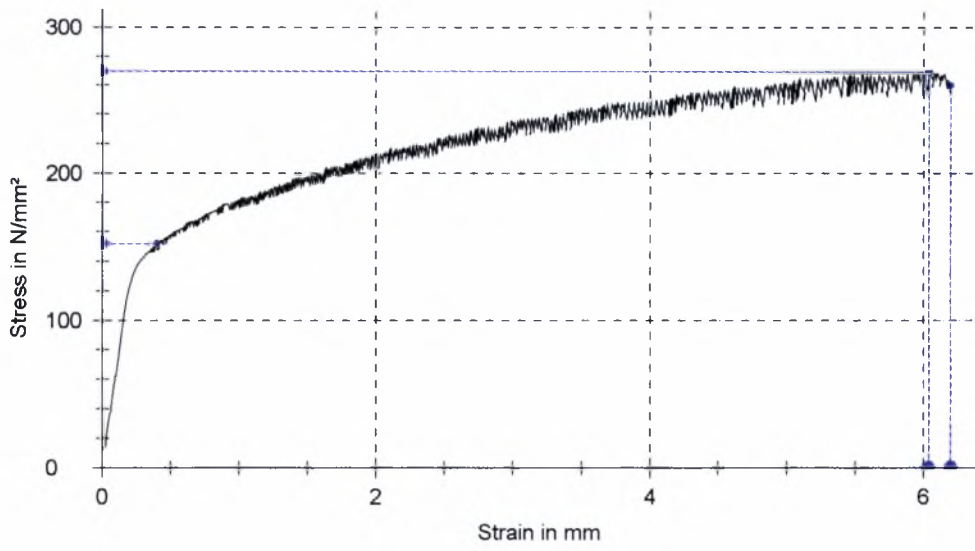
Στα **σχήματα 4.51** έως **4.56** παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-επιμήκυνσης των δοκιμίων T₃, T₄, T₁₂, T₁₃, T₁₈, T₁₉. Στο **σχήμα 4.57** παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης για όλα τα δοκίμια.



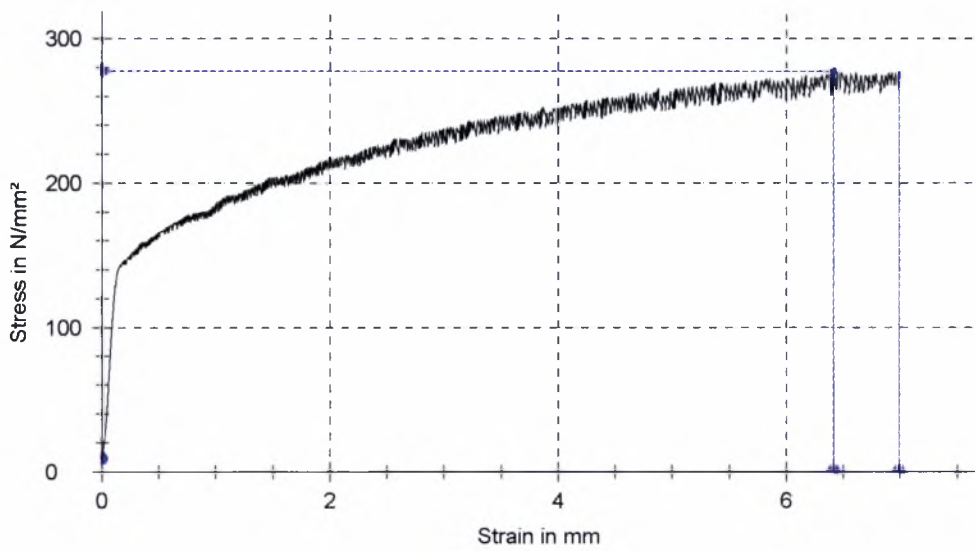
Σχήμα 4.51 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₃.



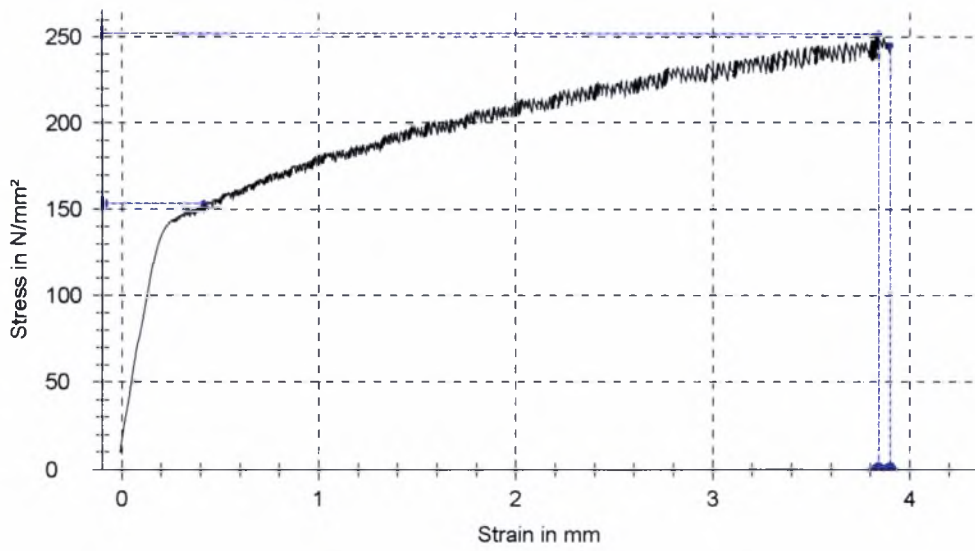
Σχήμα 4.52 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₄.



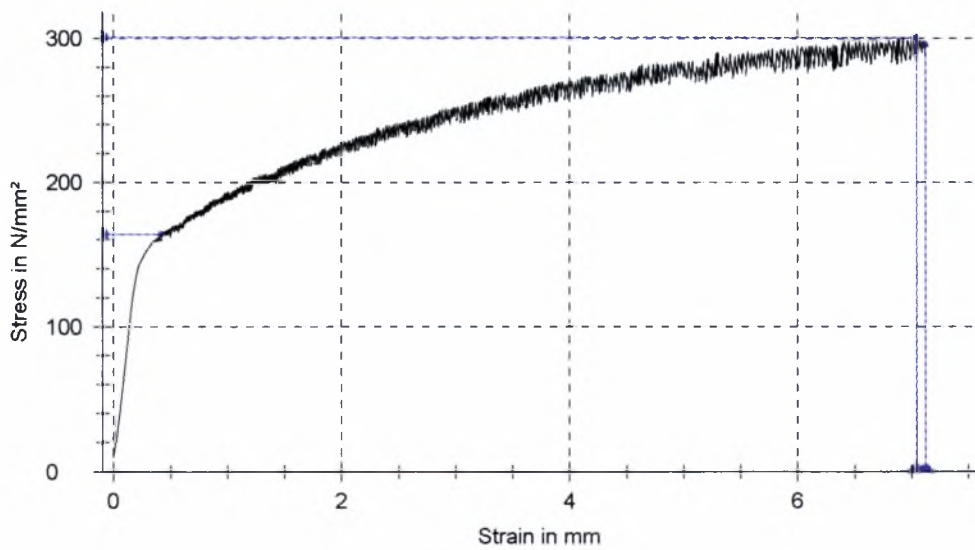
Σχήμα 4.53 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₁₂.



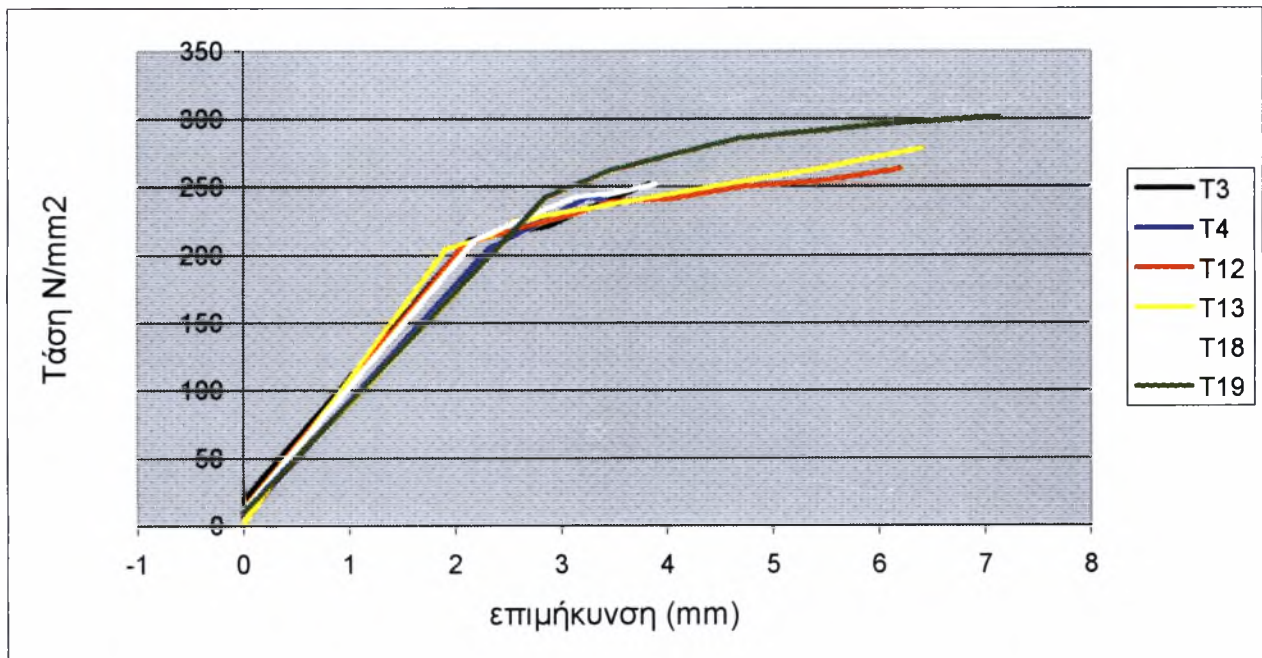
Σχήμα 4.54 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₁₃.



Σχήμα 4.55 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₁₈.



Σχήμα 4.56 Το διάγραμμα τάσης- επιμήκυνσης για το δοκίμιο T₁₉.

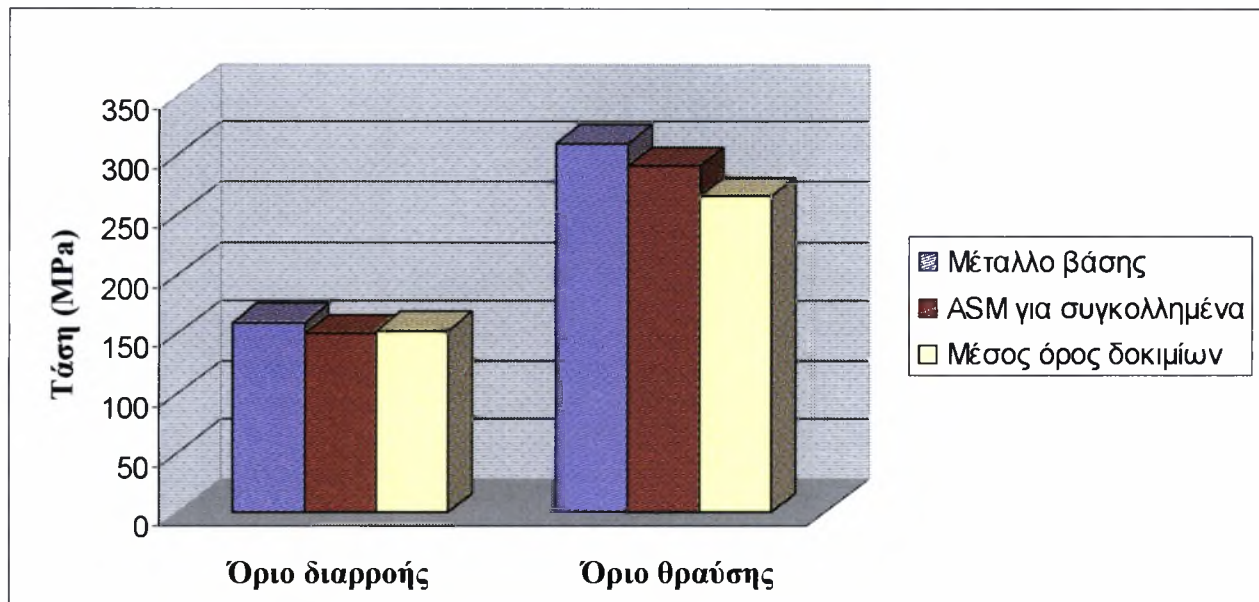


Σχήμα 4.57 Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης για όλα τα δοκίμια εφελκυσμού.

4.7.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της δοκιμής του εφελκυσμού

Τα συγκολλημένα δοκίμια παρουσιάζουν κατά μέσο όρο μικρή μείωση στο όριο θραύσης σε σχέση με το μέταλλο βάσης και με τα πρότυπα συγκολλημένα του ASM Specialty Handbook. Η μείωση αυτή είναι της τάξης του 8.5% έναντι των τιμών που δίνει το ASM Specialty Handbook για συγκολλημένο αλουμίνιο 5083 με υλικό πλήρωσης αλουμίνια 5356 και 5183. Τα όρια διαρροής είναι κοντά τόσο στο όριο διαρροής του μετάλλου βάσεως όσο και στα όρια διαρροής των συγκολλημένων προτύπων του ASM Specialty Handbook (**σχήμα 4.58**). Το δοκίμιο T₁₉ παρουσίασε βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες.

Όσον αφορά τη θέση θραύσης στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτή εμφανίζεται εντός της λίμνης συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από την μειωμένη διατομή που εμφάνιζαν τα δοκίμια αποτέλεσμα της προετοιμασίας των δοκιμίων του εφελκυσμού (απομάκρυνση περίσσιου υλικού από την άνω και κάτω πλευρά συγκόλλησης). Η μειωμένη διατομή που εμφανίστηκε σε μερικά δοκίμια λήφθηκε υπόψη στον υπολογισμό του ορίου διαρροής και της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Έτσι είναι αναμενόμενο η θραύση να επέλθει σε σημείο εντός της λίμνης συγκόλλησης όπου παρουσιάζεται μια σχετική μείωση του πάχους της διατομής και συγκέντρωση τάσεων.




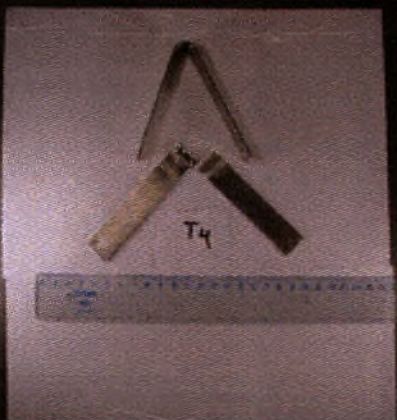
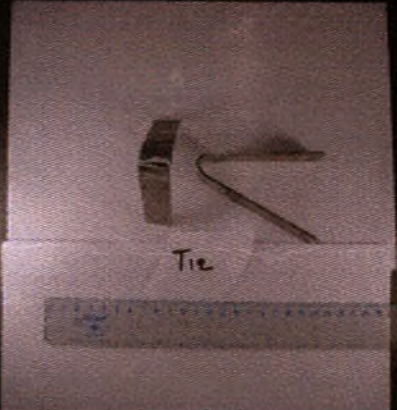


Σχήμα 4.58 Τα δοκίμια δεν παρουσίασαν σημαντική μείωση του ορίου διαρροής σε σχέση με το μέταλλο βάσης ή την προδιαγραφή του ASM Handbook , η μείωση του ορίου θραύσης ήταν της τάξης του 8.5%.

4.8. Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής της κάμψης παρουσιάζονται στον **πίνακα 4.10**.

Πίνακας 4.10. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την δοκιμή κάμψης.

Δοκίμιο	Κάμψη σε πρόσωπο	Κάμψη σε ρίζα	Φωτογραφία
T ₃	Μη αποδεκτό	Μη αποδεκτό	

T ₄	Αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
T ₁₂	Αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
T ₁₃	Αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
T ₁₈ ¹	Αποδεκτό *	Αποδεκτό *	

¹ Με ευνοϊκότερες συνθήκες κάμψης (B-Πίνακας 12.1.) κατά την δοκιμή του δοκιμίου T₁₈.

T ₁₉	Μη αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
-----------------	-------------	-------------	--

4.8.1. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης

Τα δοκίμια κατά την δοκιμή κάμψης παρουσίασαν ρωγμές και σε πολλές περιπτώσεις επήλθε θραύση πριν την κάμψη στην προδιαγραφόμενη γωνία. Τα μη αποδεκτά αποτελέσματα προέκυπταν κατά την κάμψη σε ρίζα που οφείλεται σε κάποιον συστηματικό παράγοντα για την ρίζα της συγκόλλησης. Πιθανή αιτία είναι η ατελής τήξη των άκρων των πλακιδίων και η εμφάνιση της διαμήκους μη τηγμένης περιοχής όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3 του μακροσκοπικού ελέγχου της συγκόλλησης.

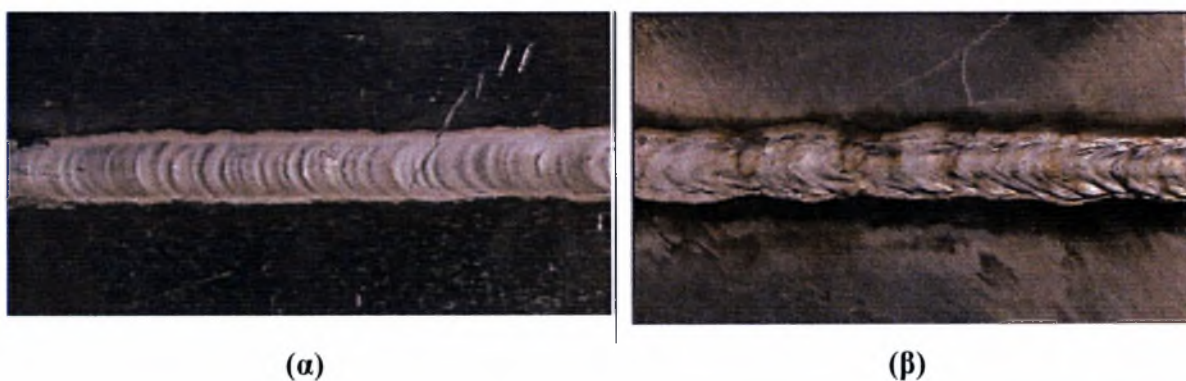
Κεφάλαιο 4. Σύγκριση TIG-MIG

Μετά τον έλεγχο και την αξιολόγηση των δοκιμών προέκυψαν τρία δοκίμια (ένα συγκολλημένο με την μέθοδο MIG και δύο με την μέθοδο TIG) που παρουσιάζουν βέλτιστη ποιότητα συγκόλλησης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι συγκόλλησης για τα βέλτιστα δοκίμια.

Πίνακας 4.11. Οι παράμετροι των τριών βέλτιστων δοκιμών.

Δείγμα	Παροχή Αερίου [lt/min]	Ένταση ρεύματος [A]	Τάση [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/s]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας [J/mm]	Υλικό πλήρωσης
T ₁₈	10	60	13.5	2.8	173	5183 Φ1.6
T ₁₉	10	55	15	2.1	235	5183 Φ1.6
M ₁₂	28	65	17.3	9.5	95	5183 Φ1.2

Παρατηρούμε ότι με την μέθοδο MIG η διαδικασία συγκόλλησης είναι αρκετά πιο σύντομη. Η μέθοδος MIG είναι τέσσερις φορές ταχύτερη και για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερη έναντι της TIG στην βιομηχανική παραγωγή. Η μέθοδος MIG παρουσιάζει επίσης χαμηλότερο ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας έναντι της TIG. Η διαφορά στον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας ανάμεσα στις δύο μεθόδους οφείλεται στην διαφορά στις ταχύτητες συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις με την μέθοδο TIG παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη εξωτερική επιφάνεια συγκόλλησης ενώ εκλύεται ελάχιστη αιθάλη έναντι της μεθόδου MIG (**σχήμα 4.59**)

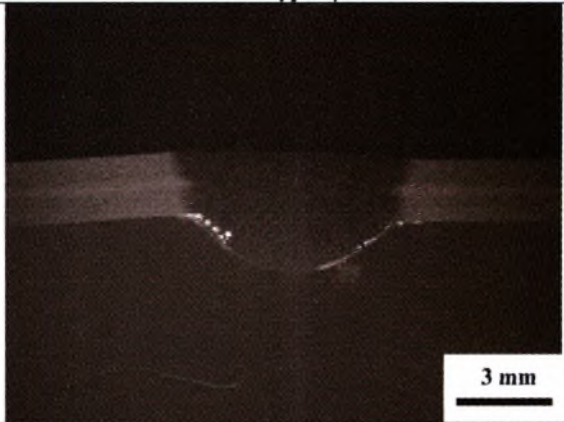
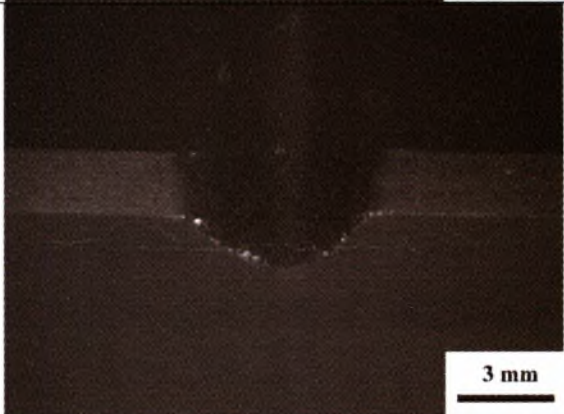


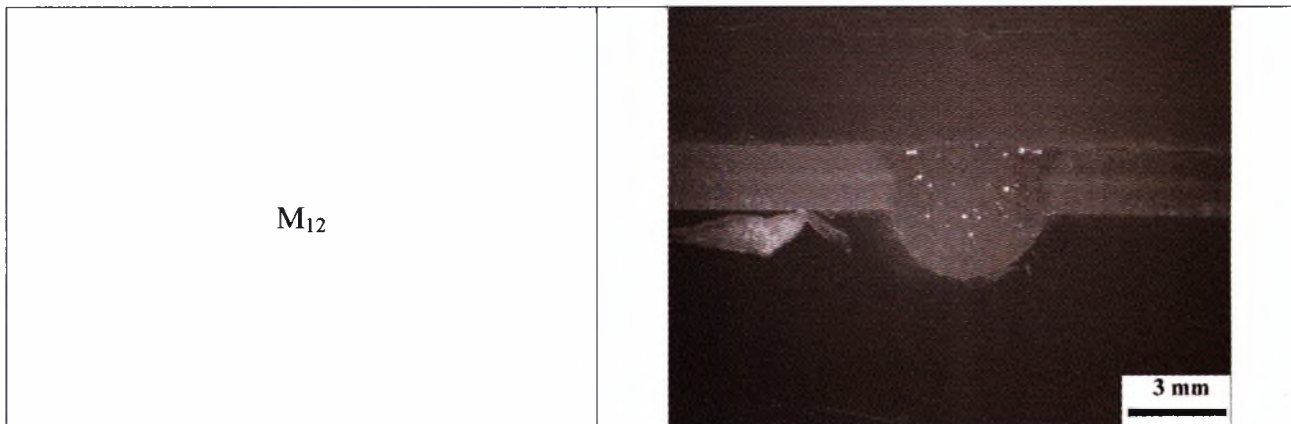
Σχήμα 4.59 Η επιφάνεια συγκόλλησης της μεθόδου συγκόλλησης (α) TIG (β) MIG όπου διακρίνεται το ίχνος της εκλυόμενης αιθάλης.

Κατά τον μη καταστρεπτικό έλεγχο τα τρία δοκίμια δεν παρουσίασαν ατέλειες εκτός των αναμενόμενων στο τέλος της συγκόλλησης όπου εμφανίζονταν επιφανειακοί κρατήρες και πόροι. Μεμονωμένες περιπτώσεις παρουσίας εσωτερικών πόρων υπήρχαν πιθανόν από κακή προετοιμασία των μελών προς συγκόλληση ή την παρουσία υδρογόνου.

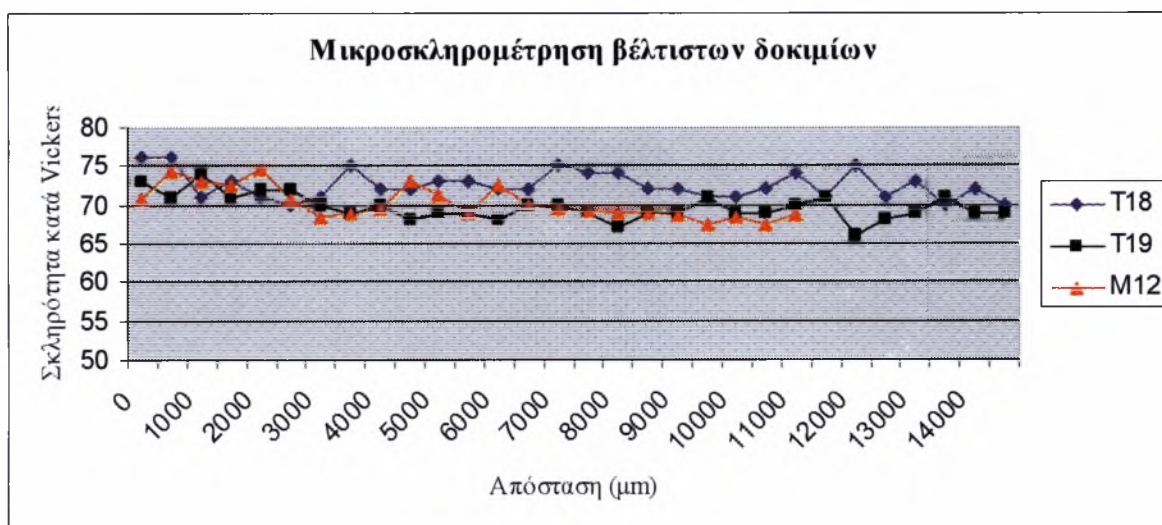
Η ποιότητα και των τριών δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 30042 είναι επιπέδου B (stringent). Παρόλα αυτά μακροσκοπικά οι συγκολλήσεις με την μέθοδο TIG παρουσιάζουν καλύτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς στο δοκίμιο M₁₂ παρατηρείται υπερβολική πλήρωση στην κάτω μεριά της συγκόλλησης. Επίσης στη λίμνη συγκόλλησης του δοκιμίου M₁₂ παρατηρήθηκαν πόροι. Οι φωτογραφίες της τομής των δοκιμίων παρουσιάζονται στον **πίνακα 4.12**.

Πίνακας 4.12. Οι φωτογραφίες τομής των δοκιμίων T₁₈, T₁₉ και M₁₂ στο στερεοσκόπιο.

Δοκίμιο	Φωτογραφία
T ₁₈	
T ₁₉	



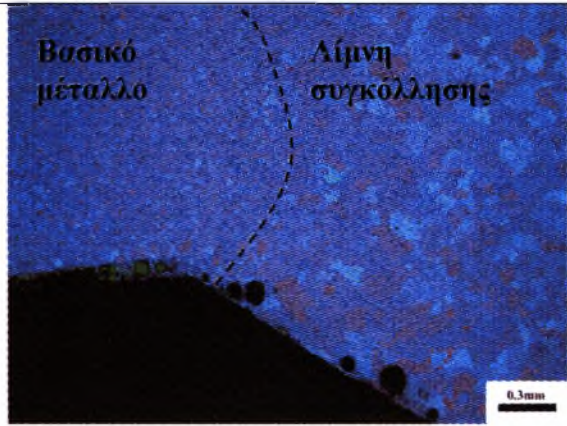
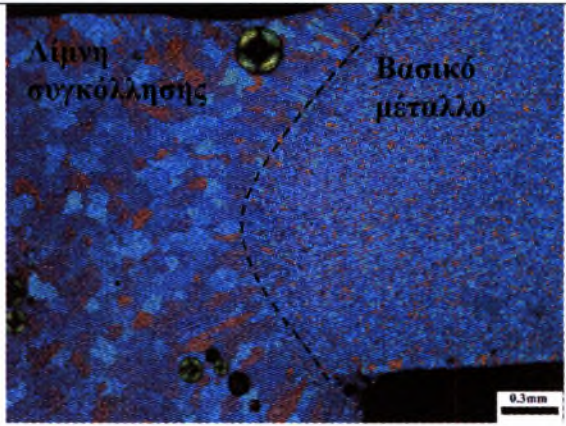
Η σκληρότητα των τριών δοκιμίων δεν μεταβάλλεται σημαντικά από μέθοδο σε μέθοδο (σχήμα 4.60). Οι μετρήσεις δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και η μέση σκληρότητα των τριών δοκιμίων είναι πολύ κοντινή, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.60 Το προφίλ μικροσκληρομέτρησης για τα δοκίμια T₁₈, T₁₉, M₁₂.

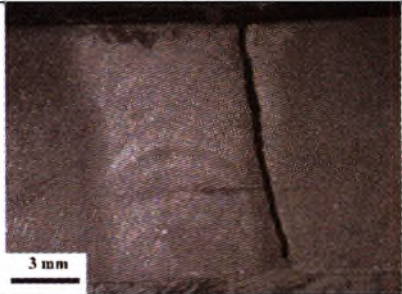

Μικρογραφικά οι δύο μέθοδοι δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές, το μέγεθος των κόκκων μέσα στη λίμνη συγκόλλησης είναι ίδιος για τις δύο μεθόδους καθώς επίσης δεν παρατηρείται θερμικά επηρεασμένη ζώνη σε καμία από τις δύο περιπτώσεις (πίνακας 4.13).

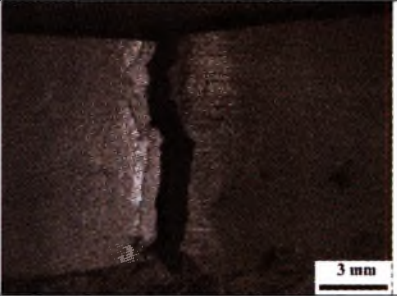
Πίνακας 4.13. Η περιοχή του συνόρου λίμνης συγκόλλησης-βασικού μετάλλου δύο δοκιμίων συγκολλημένων με την μέθοδο TIG και MIG αντίστοιχα ($\times 50$).

Μέθοδος	TIG	MIG
Φωτογραφία		
Μέγεθος κόκκου	75 μm	75 μm

Οι δύο μέθοδοι συγκόλλησης δεν φέρονται να επηρεάζουν διαφορετικά τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Το συγκολλημένο δοκίμιο με την μέθοδο MIG παρουσίασε πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες προσεγγίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του βασικού μετάλλου και του δοκιμίου T₁₉. Ο **πίνακας 4.14** περιέχει την σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των βέλτιστων δοκιμίων από κάθε μέθοδο.

Πίνακας 4.14. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των βέλτιστων δοκιμίων από κάθε μέθοδο.

Δοκίμιο	Πάχος (mm)	Τάση διαρροής (N/mm ²)	Τάση θραύσης (N/mm ²)	Θέση θραύσης	Φωτογραφία
T ₁₈	1,98	153	252	Στο σύνоро λίμνης-ΘΕΖ	
T ₁₉	1,83	163	301	Λίμνη συγκόλλησης	

M ₁₂	1,81	170	303	Λίμνη συγκόλλησης	
Συγκολλητά 5083 με 5183 (ASM Specialty Handbook)	-	155	290	-	-
Συγκολλητά 5083 με 5356 (ASM Specialty Handbook)	-	145	290	-	-

Τέλος κατά την δοκιμή κάμψης τα δοκίμια των δύο μεθόδων παρουσίασαν μέτρια συμπεριφορά και πολλά από αυτά απορρίφθηκαν λόγω θραύσης ή εμφάνισης ρωγμών.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Η συγκόλληση λεπτών ελασμάτων αλουμινίου είναι εξαιρετικά δυσχερής λόγω του προβλήματος της θερμικής παραμόρφωσης που εμφανίζεται. Η παραμόρφωση ήταν εμφανής σε όλα τα δοκίμια και σε βιομηχανικές συνθήκες το φαινόμενο αυτό θα ήταν απαγορευτικό για την παραγωγή λεπτών συγκολλητών μερών. Πιθανή προσπάθεια για μείωση της έντασης του ρεύματος ή αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης ώστε να μειωθεί ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας θα είχε σαν αποτέλεσμα την ατελή διείσδυση του υλικού πλήρωσης και θα οδηγούσε σε μη αποδεκτές συγκολλήσεις. Αυτό συνέβη αρκετές φορές κατά την πειραματική διαδικασία οδηγώντας στην εξαρχής απόρριψη κάποιων δοκιμίων.

Κατά τον μη καταστρεπτικό έλεγχο παρουσιάστηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις εσωτερικοί πόροι στη γραμμή συγκόλληση πιθανόν από την παρουσία υδρογόνου κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Επίσης σε αρκετά δοκίμια εμφανίστηκαν επιφανειακά σφάλματα στην αρχή και στο τέλος της συγκόλλησης κατά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών. Οι περιοχές δηλαδή όπου ξεκινά και σβήνει το τόξο παρουσιάζουν ατέλειες, αυτός είναι ο λόγος άλλωστε που οι συγκολλητές ξεκινούν και σταματούν το τόξο συγκόλλησης σε περιοχές εκτός της επιθυμητής συγκόλλησης.

Κατά τον μακροσκοπικό έλεγχο τα κυριότερα σφάλματα που παρουσιάστηκαν αφορούσαν στην κακή ευθυγράμμιση των προς συγκόλληση ελασμάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις στην ελλιπή πλήρωση της άνω πλευράς συγκόλλησης.

Από μικρογραφικής άποψης τα δοκίμια δεν παρουσίασαν διαφορές μεταξύ τους, γεγονός που σημαίνει ότι οι διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης δεν επηρεάζουν σημαντικά την μικροδομή της συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης.

Οι μηχανικές ιδιότητες των περισσότερων δοκιμίων κυμάνθηκαν κάτω από τα όρια του μετάλλου βάσεως. Σε πολλές περιπτώσεις το όριον διαρροής και η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό ήταν πολύ κάτω του αναμενόμενου. Τα δύο βέλτιστα δοκίμια παρουσίασαν αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες με το δοκίμιο T₁₉ να παρουσιάζει μέγιστη τάση εφελκυσμού κοντά στο μέταλλο βάσης. Παρόλα αυτά η θέση θραύσης του δοκιμίου T₁₉ σε εφελκυσμό ήταν μέσα στη λίμνη συγκόλλησης ίσως λόγω της μειωμένης διατομής στο σημείο αυτό μετά την προετοιμασία των δοκιμίων του εφελκυσμού (απομάκρυνση περίσσιου υλικού από την άνω και κάτω πλευρά συγκόλλησης).

Οι βέλτιστες συγκολλήσεις των ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 (δοκίμια T₁₈ και T₁₉) επιτεύχθηκαν με μέτριας έντασης ρεύμα (55-60Ampere), με αέριο μίγμα Ήλιου-Αργού και με υλικό πλήρωσης αλουμίνιο 5183. Τα δοκίμια αυτά τμηματικά παρουσίασαν πολύς καλής ποιότητας συγκόλληση.

Η μέθοδος συγκόλλησης TIG σε σχέση με την μέθοδο MIG επιφέρει καλύτερης ποιότητας συγκολλήσεις με λιγότερους πόρους και καλύτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αντιθέτως η συγκόλληση με την μέθοδο MIG είναι περισσότερο παραγωγική. Οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων με τις δύο μεθόδους κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα.

Οι συγκολλήσεις του κράματος αλουμινίου 5083, όπως και σε όλα τα συγκολλησιμα κράματα αλουμινίου, θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και να τηρείται αυστηρά ο καθαρισμός των μερών προς συγκόλληση από οργανικές ουσίες και υγρασία. Επίσης σημαντική είναι η απομάκρυνση του λεπτού φιλμ οξειδίου από όλη την επιφάνεια συγκόλλησης των προς συγκόλληση μερών, συμπεριλαμβανομένης και της άκρης των ελασμάτων, που αποτελεί την ισχυρότερη αιτία για τα χαμηλά ποσοστά ολκιμότητας που παρουσίασαν τα δοκίμια στην κάμψη της ρίζας. Η μεγάλη συνέπεια πριν την συγκόλληση θα επιφέρει καθαρές, χωρίς πόρους και χωρίς εγκλείσματα οξειδίου συγκολλήσεις.

Πιθανή λύση στο πρόβλημα της θερμικής παραμόρφωσης είναι η χρήση διακοπόμενων συγκολλήσεων όπου δεν απαιτείται συνεχής συγκόλληση, η χρήση ακολουθιών συγκόλλησης (welding sequences) ή αντίθετης κατεύθυνσης συγκόλλησης (backstep welding). Επίσης η αντίθετη στρέβλωση των υλικών προς συγκόλληση ώστε μετά την διαδικασία να επανέλθουν στις επιθυμητές θέσεις και γεωμετρίες και η χρήση εργαλείων συγκράτησης ώστε να εμποδίζουν την παραμόρφωση των υλικών προς συγκόλληση θα μπορούσαν να μετριάσουν το φαινόμενο.

Κεφάλαιο 6. Προτεινόμενη έρευνα

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήσαμε τις επιδράσεις των διαφορετικών συνθηκών συγκόλλησης στην ποιότητα των συγκολλήσεων λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083. Οι διαφοροποιήσεις των συνθηκών συγκόλλησης αφορούσαν στις εντάσεις του ρεύματος, την χρήση διαφορετικού αερίου προστασίας και την χρήση διαφορετικού υλικού πλήρωσης. Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η παραμόρφωση. Αντικείμενο προς μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει η προσπάθεια ελαχιστοποίησης του φαινομένου αυτού, με την προσπάθεια μείωσης του υλικού πλήρωσης, με την χρήση ακολουθιών συγκόλλησης, με την χρήση συγκόλλησης σε τμήματα ή με συγκράτηση των ελασμάτων κατά την συγκόλληση και η αξιολόγηση της επίδρασής τους στην ποιότητα της συγκόλλησης. Για παράδειγμα η χρήση ακολουθιών συγκόλλησης εισάγει σφάλματα εκκίνησης και σβησίματος του τόξου εντός της συγκόλλησης.

Οι συνθήκες συγκόλλησης της παρούσας διπλωματικής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την περαιτέρω προσπάθεια εύρεσης βέλτιστων παραμέτρων και την βελτίωση της ποιότητας συγκόλλησης. Βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό και της συμπεριφοράς των συγκολλημένων δοκιμίων σε κάμψη μπορεί να επιφέρει η μικρή διαφοροποίηση των παραμέτρων και η καλύτερη προετοιμασία των προς συγκόλληση ελασμάτων.

Βιβλιογραφία

βιβλιογραφία

- [1] Norman A. Waterman & Michael F. Ashby, *Elsevier Materials Selector-Vol 2*, Elsevier Applied science London, 2000.
- [2] ASM Metals Handbook, Vol 9, ASM International, Materials park, Ohio, USA, 1992.
- [3] Aluminum and aluminum alloys, ASM Specialty Handbook, Materials park, Ohio, 1996.
- [4] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [5] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, σημειώσεις συγκολλήσεων.
- [6] Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, University of Wisconsin-Madison, 1974.
- [7] Αντρέας Τζαμτζής, *Συγκολλήσεις MIG λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083: επίδραση παραμέτρων και χαρακτηρισμός*, Διπλωματική εργασία ΤΜΜΒ, 2007
- [8] Δρ. Σπύρος Α. Παπαευθυμίου, *Βελτιστοποίηση των μεθόδων συγκόλλησης στα κράματα Al της σειράς 5xxx*. Τεχνική έκθεση EBETAM A.E., 2006.

Δικτυακοί τόποι

- [9] “The Aluminum Association, INC.” www.aluminum.org
- [10] “American Welding Society” www.aws.org
- [11] “Key to non-Ferrous” www.key-to-nonferrous.com
- [12] “Key to metals” www.key-to-metals.com
- [13] “Austral Wright Metals” www.australwright.com.au
- [14] “The A to Z of materials” www.azom.com
- [15] “Alumatter” aluminium.matter.org.uk
- [16] “Miller Electric MFG.” www.millerwelds.com
- [17] “ESAB welding and cutting” www.esab.com
- [18] “Struers”: www.struers.com
- [19] “Granta-Material Intelligence” www.grantadesign.com
- [20] “Κιολεΐδης Α.Ε.Β.Ε.” www.kioleides.com
- [21] “Working Boats” www.working-boats.co.uk



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085990

