

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ MIG ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΙ 5083: Επίδραση παραμέτρων και
χαρακτηρισμός**

υπό

ΑΝΔΡΕΑ ΤΖΑΜΤΖΗ

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.: 6003/1
Ημερ. Εισ.: 01-11-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2007
ΤΖΑ

© 2007 Ανδρέας Τζαμτζής

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
(Επιβλέπων)

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

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

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Ν. Χαϊδεμενόπουλο. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια του όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να γίνω μέλος του Εργαστηρίου των Υλικών. Οι διαλέξεις του και η προσωπικότητα του γενικότερα, είναι που προσέλκυσαν το ενδιαφέρον μου στο πεδίο των Υλικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Άννα Ζερβάκη για την άμεση συνεργασία, τις υποδείξεις και διορθώσεις της κατά τη διάρκεια αυτή της εργασίας. Βρισκόταν καθημερινά στο Εργαστήριο και η βοήθεια της υπήρξε καταλυτική για την άρτια ολοκλήρωση της. Αφιέρωσε πάρα πολλές ώρες για την περάτωση της εργασίας μου και της είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων.

Ευχαριστώ, από την εταιρία EBETAM A.E., τους κυρίους Παντελή Πολατίδη, Αθανάσιο Στάμου, Σπύρο Παπαευθυμίου, Νικόλαο Τριανταφυλλόπουλο, Βασίλειο Πισιώτη, Δημήτριο Τσούση για την πολύτιμη βοήθεια τους όσο αναφορά τις δοκιμές μη καταστρεπτικού ελέγχου, μηχανικών δοκιμών αλλά και γενικότερα της εργασίας μου. Επιπλέον, από την εταιρία Κιολείδης ΑΕΒΕ ευχαριστώ τους κυρίους Ρήγα Βελέντζα, Θώμα Πατακιούση, Παναγιώτη Μπουντούκο για τη βοήθεια τους στη δημιουργία συγκολλητών δοκιμών. Ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου Έλενα Καμούτση, Ελένη Δημακαράκου και Αθανάσιο Βέργο, οι οποίοι βρισκόταν καθημερινά στο Εργαστήριο και προσέφεραν την βοήθεια του ανά πάσα στιγμή.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους συναδέλφους και φίλους(ες) μου Μάκη, Τάσο, Γιάννη, Σωτήρη, Θωμά, Ιάσων, Οδυσσέα, Θοδωρή, Ναταλένα, Ανναμαρία, τους Pig in a Poke (Χρήστο, Ηλία, Νίκο, Γιάννη) και τον Matthew Bellamy για την ηθική υποστήριξή τους.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αργύρη και Γεωργία, καθώς και τον αδερφό μου και συνάδελφο Σπύρο, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου, τους αφιερώνω αυτή την εργασία.

Ανδρέας Τζαμτζής

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ MIG ΛΕΠΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΙ 5083: Επίδραση παραμέτρων και χαρακτηρισμός

ΤΖΑΜΤΖΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2007

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής Φυσικής
Μεταλλουργίας

Περίληψη

Τα κράματα αλουμινίου, λόγω των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τους, είναι σήμερα ένα από τα βασικά δομικά υλικά σε κατασκευαστικές δραστηριότητες. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η ανάδειξη και η προσπάθεια αντιμετώπισης των κυριότερων προβλημάτων, που σχετίζονται με την ποιότητα της συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων Αλουμινίου 5083 με χρήση MIG. Η επιτυχής συγκόλληση λεπτών ελασμάτων αλουμινίου θα οδηγούσε σε αξιοσημείωτη εξοικονόμηση πόρων στις κατασκευές, αλλά και σε μείωση του βάρους τους.

Τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίστηκαν είναι η ύπαρξη πόρων, η ατελής σύνδεση εξαιτίας χαμηλής ροής συγκολλητικού σύρματος (MIG), η διάτρηση του φύλλου αλουμινίου εξαιτίας υψηλής έντασης ρεύματος και, τέλος, οι παραμορφώσεις των ελασμάτων.

Η αντιμετώπιση των βασικών προβλημάτων γίνεται μέσα από τον επιτυχημένο συνδυασμό έντασης ρεύματος και ταχύτητας του τόξου, δηλαδή του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας, ώστε να αποφεύγονται τα προβλήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω και από προσπάθεια για πιο μελετημένη πειραματική διάταξη με σταθερές συνθήκες συγκόλλησης με αποτέλεσμα την αποφυγή ανομοιομορφίας κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή – Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	8
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	9
2.1 Γενικά.....	9
2.2 Ιδιότητες και χρήσεις του Αλουμινίου.....	9
2.3 Κράματα Αλουμινίου.....	10
2.3.1 Κατηγορίες κραμάτων	10
α) Με βάση το κύριο κραματικό στοιχείο	10
β) Με βάση το αν επιδέχονται θερμική κατεργασία.....	13
2.4 Κράματα Αλουμινίου – Μαγνησίου (σειρά 5xxx).....	14
2.4.1 Γενικά.....	14
2.4.2 Κράμα Αλουμινίου 5083	17
2.4.3 Συγκολλήσεις Αλουμινίου σειράς 5xxx.....	19
2.4.4 Συγκόλληση τόξου παρουσία προστατευτικού –αδρανούς αερίου Αργού, με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο, MIG (Metal Inert Gas)	20
3. Πειραματική διαδικασία	22
3.1 Οπτικός έλεγχος.....	27
3.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος NDT.....	27
3.2.1 Ραδιογραφία	28
3.2.2 Διεισδυτικά υγρά.....	29
3.3 Μηχανικές ιδιότητες	30
3.3.1 Εφελκυσμός	30
3.3.2 Κάμψη	31
3.4 Ποιότητα συγκόλλησης σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042	31
3.5 Μικροσκληρομέτρηση.....	34
3.6 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος	34
4. Αποτελέσματα	35
4.1 Οπτικός έλεγχος.....	35
4.1.1 Απλή παρατήρηση δοκιμίων	35
4.1.2 Παρατήρηση προσώπου και ρίζας συγκόλλησης με στερεοσκόπιο.....	39
4.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος NDT.....	47
4.2.1 Ραδιογραφία	47
4.2.2 Διεισδυτικά υγρά.....	48
4.3 Μηχανικές ιδιότητες	52
4.3.1 Εφελκυσμός	52
4.3.2 Κάμψη	56
4.4 Ποιότητα συγκόλλησης σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042	58
4.5 Μικροσκληρομέτρηση.....	72
4.6 Μικροσκοπικός έλεγχος.....	77
4.6.1 Μικροδομή μετάλλου βάσεως.....	77
4.6.2 Μικροδομή συγκολλητών δοκιμίων	78
4.7 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων	81
5. Σύγκριση μεθόδου με μέθοδο TIG	83
6. Συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	89
7. Συμπεράσματα –Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	90
8. Βιβλιογραφία.....	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Κράματα Αλουμινίου [1]	11
Πίνακας 2 Χημική σύσταση Αλουμινίου 5083	17
Πίνακας 3 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083 [4].....	18
Πίνακας 4 Τυπικές φυσικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083	18
Πίνακας 5 Συνθήκες 1 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων	23
Πίνακας 6 Συνθήκες 2 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων	26
Πίνακας 7 Υπολογισμός ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας.....	26
Πίνακας 8 Χημική ανάλυση κράματος 5083 και χημική σύσταση κραμάτων 5183 και 5356.....	27
Πίνακας 9 Αποδεκτά όρια ενδείξεων διεισδυτικών υγρών	30
Πίνακας 10 Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού	31
Πίνακας 11 Αποδεκτά όρια ατελειών μετωπικής συγκόλλησης σύμφωνα με την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ EN 30042.....	32
Πίνακας 12 Συγκεντρωτικός πίνακας ελέγχων δοκιμίων	35
Πίνακας 13 Πρώτη μορφή μακροσκοπικής αξιολόγησης δοκιμίων.....	36
Πίνακας 14 Ατέλειες των δοκιμίων στο πρόσωπο και στη ρίζα της συγκόλλησης.....	39
Πίνακας 15 Τμήματα δοκιμίων M1, M2, M5, M6, M7 που θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έλεγχο.....	45
Πίνακας 16 Αξιολόγηση ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων	47
Πίνακας 17 Αξιολόγηση δοκιμίων με διεισδυτικά υγρά	49
Πίνακας 18 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού μετάλλου βάσης.....	52
Πίνακας 19 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού συγκολλητών δοκιμίων.....	54
Πίνακας 20 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης.....	56
Πίνακας 21 Φωτογραφίες τομής δοκιμίων 1 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων	58
Πίνακας 22 Αποτελέσματα αξιολόγησης 1 ^{ης} σειράς δοκιμίων σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042	61
Πίνακας 23 Φωτογραφίες τομής δοκιμίων 2 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων	65
Πίνακας 24 Αποτελέσματα αξιολόγησης 2 ^{ης} σειράς δοκιμίων σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042.....	67
Πίνακας 25 Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίων.....	72
Πίνακας 26 Μέσο μέγεθος κόκκων δοκιμίων συγκόλλησης.....	81
Πίνακας 27 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων δοκιμίων 1 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων ...	81
Πίνακας 28 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων δοκιμίων 2 ^{ης} σειράς συγκολλήσεων ...	82
Πίνακας 29 Παράμετροι συγκόλλησης δοκιμίων T18, T19, M12.....	83
Πίνακας 30 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίων T18, T19, M12	84
Πίνακας 31 Προφίλ σκληρομέτρησης δοκιμίων T18, T19, M12	86

1. Εισαγωγή – Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το Αλουμίνιο είναι σήμερα ένα από τα βασικά δομικά υλικά σε κατασκευαστικές δραστηριότητες. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθώς και η υψηλή τεχνολογία επεξεργασίας του εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η συγκόλληση λεπτών ελασμάτων κράματος Al 5083 με τη μέθοδο MIG. Το κράμα Αλουμινίου 5083 είναι ένα εξαιρετικά ελαφρύ κράμα με καλή διαμορφωσιμότητα και ολκιμότητα, υψηλή αντοχή και υψηλή αντοχή σε διάβρωση, καθώς και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Η επιτυχής συγκόλληση λεπτών ελασμάτων αλουμινίου θα οδηγούσε σε αξιοσημείωτη εξοικονόμηση πόρων στις κατασκευές, αλλά και σε μείωση του βάρους τους.

Κύριος στόχος της μελέτης είναι η ανάδειξη και η προσπάθεια αντιμετώπισης των προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα της συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων καθώς και η επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στην ποιότητα της. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες και τις χρήσεις του αλουμινίου και των κραμάτων με εστίαση κυρίως στο κράμα 5083. Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση και συζήτηση των αποτελεσμάτων και κλείσιμο της μελέτης με εξαγωγή συμπερασμάτων.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Γενικά

Το Αλουμίνιο (Al) είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το Οξυγόνο και το Ψυρίτιο που συναντάται στον φλοιό της γης. Το Αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό Βωξίτης που μετά από την εξόρυξή του μετατρέπεται σε Αλουμίνα και στην συνέχεια με ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο Αλουμίνιο. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθώς και η υψηλή τεχνολογία επεξεργασίας του εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Το Αλουμίνιο είναι σήμερα ένα από τα βασικά δομικά υλικά σε κατασκευαστικές δραστηριότητες. Ανταποκρίνεται στο ακέραιο στις προσδοκίες των μηχανικών τόσο από πλευρά μηχανικών αντοχών όσο και από πλευράς αισθητικής. Ιδιαίτερα σήμερα, που η προσπάθεια εξοικονόμησης πλουτοπαραγωγικών πόρων και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν τον κύριο στόχο της σύγχρονης κοινωνίας, πρέπει ιδιαίτερα να τονιστεί η δυνατότητα ανακύκλωσης του Αλουμινίου. Το Αλουμίνιο, όπου και σε όποια μορφή και αν ευρίσκεται, μετά την χρήση των προϊόντων συλλέγεται και επαναχυτεύεται για την δημιουργία μετάλλου με ιδιότητες εφάμυλλες αυτών του πρωτόχυτου.

2.2 Ιδιότητες και χρήσεις του Αλουμινίου

Το Αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ, ελάχιστα μαγνητικό, όλκιμο και ελατό μέταλλο με υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντανάκλαστικότητα Έχει σημείο τήξης 660 °C και στους 20°C πυκνότητα 2.7 gr/cm³ και αξίζει να αναφέρουμε ότι η πυκνότητα του είναι το 1/3 από αυτή του χάλυβα. Το Αλουμίνιο έχει μέτρο ελαστικότητας 7.2 GPa. Επιπλέον, το αλουμίνιο διατηρεί την όλκιμότητά του και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να ψαθυροποιείται γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για εφαρμογές σε περιβάλλον με χαμηλές θερμοκρασίες (υπό του μηδενός). Ακόμη, το Αλουμίνιο είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό μέταλλο και οξειδώνεται παρουσία οξυγόνου, όμως δημιουργεί

παράλληλα και σε άμεση επαφή με αυτό ένα παθητικό στρώμα οξειδίου. το Al_2O_3 , που το προστατεύει από περαιτέρω οξείδωση [3,4].

Η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι αρκετά υψηλή πράγμα το οποίο το καθιστά ένα από τα προτιμητέα υλικά για μια τεράστια ποικιλία χρήσεων που σχετίζονται με μεταφορά θερμότητας και ηλεκτρισμού. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το Αλουμίνιο είναι μη-τοξικό και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται και από τη βιομηχανία τροφίμων. Τέλος, η καλή ανακλαστικότητα του αλουμινίου σε ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας (περίπου 80%) , το κάνει ιδανικό υλικό για τη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές φωτισμού.

2.3 Κράματα Αλουμινίου

Το Αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το Αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματικών στοιχείων (π.χ. Χαλκός, Μαγνήσιο, Πυρίτιο, Μαγγάνιο, Ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Τα κράματα Αλουμινίου είναι εύκολα διαμορφώσιμα με διάφορες μεθόδους όπως έλαση, χύτευση και είναι εύκολα επεξεργάσιμα.

2.3.1 Κατηγορίες κραμάτων

α) Με βάση το κύριο κραματικό στοιχείο

Το Αλουμίνιο κατηγοριοποιείται σε τρεις βασικές ομάδες: το εμπορικά καθαρό, το ελατό και το χυτό αλουμίνιο. Διεθνώς υπάρχει ένα τετραψήφιο σύστημα κατηγοριοποίησης των κραμάτων του. Το πρώτο ψηφίο προσδιορίζει το βασικό

κραματικό στοιχείο του Αλουμινίου. Στον **Πίνακα 1** παρουσιάζονται τα κράματα Αλουμινίου βάσει των κυριότερων κραματικών στοιχείων:

Πίνακας 1 Κράματα Αλουμινίου [1]	
Σειρά αλουμινίου	Κύριο κραματικό στοιχείο
1xxx	Εμπορικά καθαρό αλουμίνιο (Al 99%)
2xxx	Χαλκός
3xxx	Μαγγάνιο
4xxx	Πυρίτιο
5xxx	Μαγνήσιο
6xxx	Μαγνήσιο και Πυρίτιο
7xxx	Ψευδάργυρος
8xxx	Άλλα κραματικά στοιχεία

Στις παραπάνω σειρές, το δεύτερο βρίσκεται μεταξύ 0 και 9. Το ψηφίο 0 φανερώνει ότι δεν υπάρχει κάποιος ειδικός έλεγχος των κραματικών στοιχείων. Το ψηφία μεταξύ του 1 και του 9 προσδιορίζουν κάποιο τύπο ειδικού ελέγχου, που βασίζονται στον παραγωγό του Αλουμινίου. Τα δύο τελευταία ψηφία, στη σειρά 1xxx προσδιορίζουν το ελάχιστο ποσοστό Αλουμινίου, που δεν βρίσκεται υπό ειδικό έλεγχο, ενώ στις υπόλοιπες σειρές είναι απλώς κάποιοι σειριακοί αριθμοί.

Μετά τον τετραψήφιο αριθμό, ανάλογα με την επεξεργασία του αλουμινίου, το κράμα προσδιορίζεται με κάποια σύμβολα που περιγράφουν τη διεργασία που ακολουθήθηκε κατά την παρασκευή του. Κάποια από τα βασικά αυτά σύμβολα είναι:

- F: δηλώνει ότι το κράμα διατηρείται όπως παράχθηκε
- O: σημαίνει ανοπτημένο
- H: σημαίνει ψυχρά διαμορφωμένο. Μετά την διαμόρφωση, μπορεί να ακολουθηθεί θερμική επεξεργασία για ανόπτηση του κράματος. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την το είδος της ανόπτησης.

Το πρώτο ψηφίο δηλώνει:

- 1: Δεν έχει ακολουθήσει θερμική κατεργασία
- 2: Έχει ακολουθήσει μερική ανόπτηση
- 3: Έχει ακολουθήσει ανόπτηση

Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει:

- 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: Αυξημένη σκλήρυνση

- W: εκφράζει το θερμικά επεξεργασμένο με κατεργασία διαλυτοποίησής.
- T: που δηλώνει το θερμικά επεξεργασμένο κράμα. Το σύμβολο T ακολουθείται πάντα από ένα ή περισσότερα ψηφία, που φανερώνουν βασικές θερμικές διαδικασίες. Αυτά είναι:

- 3: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, φυσική γήρανση
- 4: Διαλυτοποίηση, φυσική
- 5: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση
- 6: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση
- 8: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, τεχνητή γήρανση
- 9: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση
- 10: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση

Τα χυτά κράματα Αλουμινίου έχουν ως κύρια κραματικά συστατικά τον Χαλκό, το Πυρίτιο, το Μαγνήσιο, τον Ψευδάργυρο, το Νικέλιο, το Μαγγάνιο, το Χρώμιο και το Βηρύλλιο. Χρησιμοποιείται διαφορετικό σύστημα αρίθμησης για τα κράματα αυτά [3, 9, 10].

β) Με βάση το αν επιδέχονται θερμική κατεργασία

Μπορεί να γίνει διαχωρισμός των κραμάτων Αλουμινίου με βάση το αν επιδέχονται ή όχι θερμική κατεργασία.

Κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία

Ελατά κράματα τα οποία αυξάνουν την αντοχή τους μέσω θερμικής κατεργασίας, στα οποία ανήκουν οι σειρές 2xxx (Al-Cu, Al-Cu-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si) και 7xxx (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu). Τα κράματα αυτά αναπτύσσουν τη μέγιστη αντοχή τους μέσω της κατεργασίας της γήρανσης και μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 κατηγορίες: αυτά που έχουν μέτρια αντοχή και είναι εύκολα συγκολλησίμα (Al-Mg-Si και Al-Zn-Mg), και κράματα με υψηλή αντοχή τα οποία έχουν σχεδιαστεί κυρίως για κατασκευές αεροναυπηγικής (Al-Cu, Al-Cu-Mg και Al-Zn-Mg-Cu), και είναι κράματα με περιορισμένη συγκολλησιμότητα.

Κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ελατά κράματα που δεν ανταποκρίνονται σε ισχυροποίηση με γήρανση, δηλαδή κράματα που ανήκουν στις σειρές 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx. Η ισχυροποίηση αναπτύσσεται με εργοσκλήρυνση (strain-hardening) κατά την ψυχρή κατεργασία (Al-Mn), ισχυροποίηση στερεού διαλύματος (solid solution-hardening) (Al-Mg) ή μαζί (Al-Mn-Mg).

- Υπέρ-καθαρό και εμπορικός-καθαρό αλουμίνιο (σειρά 1xxx)

Η σειρά 1xxx περιλαμβάνει κράματα με υψηλή περιεκτικότητα Αλουμινίου (99.99%) και πολλές κατηγορίες εμπορικός-καθαρού αλουμινίου με περιεκτικότητα πάνω από 1% σε ακαθαρσίες ή μικρών προσθηκών.

- Κράματα Al-Mn και Al-Mn-Mg (σειρά 3xxx)

Η σειρά 3xxx χρησιμοποιείται όταν απαιτείται μέτρια αντοχή σε συνδυασμό με υψηλή ολκιμότητα και εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Τα εμπορικά κράματα Al-Mn περιέχουν έως 1.25% Mn μαγγάνιο παρόλο που η μέγιστη στερεά διαλυτότητα του στο αλουμίνιο είναι 1.82%.

- Κράματα Αλουμινίου – Μαγνησίου (σειρά 5xxx)

Τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι: πολύ καλή συγκολλησιμότητα, πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικά συστήματα), πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον. μέσες μηχανικές αντοχές. Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυπηγική, στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα, κλπ. Χαρακτηριστικά κράματα: 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182.

- Σειρά 8xxx

Η σειρά 8xxx περιλαμβάνει διάφορα κράματα, π.χ. 8001 (Al - 1.1Ni - 0.6Fe) το οποίο χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας όπου η αντίσταση σε διάβρωση από νερό σε υψηλές θερμοκρασίες και πίεση είναι το επιθυμητό χαρακτηριστικό[1].

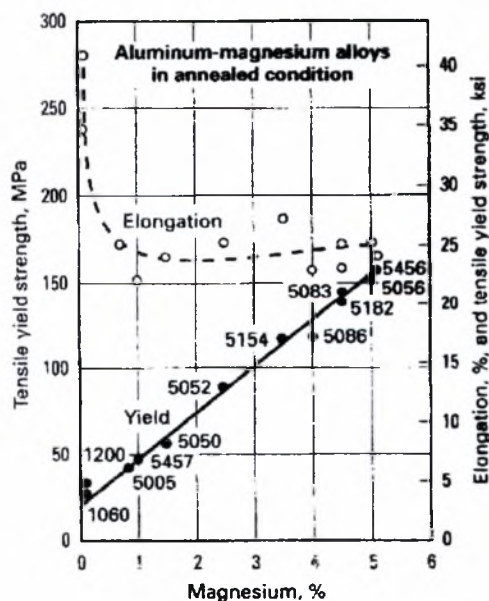
2.4 Κράματα Αλουμινίου – Μαγνησίου (σειρά 5xxx)

2.4.1 Γενικά

Το Αλουμίνιο και το Μαγνήσιο δημιουργούν στερεά διαλύματα σε ευρεία περιοχή συστάσεων, και κατά συνέπεια χρησιμοποιούνται ευρέως ελατά κράματα με περιεκτικότητες 0.8-6% Mg. Παρότι το Μαγνήσιο έχει καλή διαλυτότητα στο Αλουμίνιο (14.5% στους 451°C), η οποία ελαττώνεται σημαντικά με τη μείωση της θερμοκρασίας, τα κράματα Al-Mg δεν σκληραίνουν σημαντικά με κατακρήμνισεις για περιεκτικότητα Mg μικρότερη του 7%. Γενικότερα όμως, η κατακρήμνιση του μαγνησίου στη δομή του υλικού γίνεται με ομοιόμορφο τρόπο και διατηρείται η σταθερότητα του κράματος για δεδομένη αύξηση της αντοχής. Επιπλέον, η προσθήκη Μαγνησίου, μέχρι κάποιο όριο, δεν επηρεάζει αρνητικά τις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες

του κράματος, ούτε τη συγκολλησιμότητά του. Αυξημένες ποσότητες Μαγνησίου δυσχεραίνουν την παραγωγή του κράματος και αυξάνουν την τάση για θερμή ρηγματώση κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης εξαιτίας κάποιων σκληρών ενδομεταλλικών φάσεων, που σχηματίζονται [1, 3, 4].

Η αντοχή τους στην κατάσταση ανόπτησης κυμαίνονται από 40 MPa στο όριο διαρροής και 125 MPa στη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού για το κράμα Al-0.8Mg (κράμα 5005) έως 160 MPa στο όριο διαρροής και 310 MPa στη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού για το ισχυρότερο κράμα 5456. Η επιμήκυνση έχει σχετικά υψηλές τιμές και συνήθως υπερβαίνει το 25%. Το Αλουμίνιο με την προσθήκη του Μαγνησίου σκληραίνει με το φαινόμενο της διάλυτοποίησης και του σχηματισμού στερεού διαλύματος αντικατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το Αλουμίνιο να αποκτά τα χαρακτηριστικά κράματος, που σκληραίνει με μηχανική κατεργασία. Τα κράματα υπόκεινται σε εργοσκλήρυνση σε ρυθμό αυξανόμενο καθώς η περιεκτικότητα σε Μαγνήσιο αυξάνεται. Το πλήρως εργοσκληρωμένο κράμα 5456 έχει όριο διαρροής της τάξεως των 300 MPa και αντοχή σε εφελκυσμό της τάξεως των 385 MPa με 5% επιμήκυνση. Στο **Διάγραμμα 2.1** παρουσιάζεται η επίδραση του Mg σε στερεό διάλυμα στις μηχανικές ιδιότητες των περισσοτέρων εμπορικών κραμάτων Αλουμινίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [1, 3, 4].



Διάγραμμα 2.1 Σχέση μεταξύ περιεκτικότητας Mg και μηχανικών ιδιοτήτων στα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx [4].

Τα κράματα πιθανόν να παρουσιάσουν κάποια αστάθεια στις ιδιότητες και αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Εάν το περιεχόμενο του μαγνησίου υπερβαίνει το 3-4% υπάρχει η τάση να κατακριμνηστεί η β-φάση, Mg_5Al_8 , σε επίπεδα ολίσθησης και σε όρια κόκκων γεγονός που πιθανόν να οδηγήσει σε περικρυσταλλική προσβολή και εργοδιάβρωση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η καθίζηση της β-φάσης συμβαίνει μόνον αργά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος αλλά επιταχύνεται εάν τα κράματα βρίσκονται σε κατάσταση εντατικής κατάστασης ή αυξηθεί η θερμοκρασία.

Μικρές προσθήκες Χρωμίου και Μαγγανίου, τα οποία είναι παρόν στα περισσότερα κράματα, αυξάνουν την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και την αντοχή εφελκυσμού. Αυτό προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν κράματα με ελαττωμένη περιεκτικότητα μαγνησίου εάν η καθίζηση της β-φάσης μπορεί να αποφευχθεί. Για παράδειγμα, το κράμα 5454 περιέχει 2.7% Mg, 0.7% Mn και 0.12% Cr και έχει αντοχή σε εφελκυσμό παρόμοιας με αυτές του διμερούς κράματος με 4% Mg. Ακόμη, τα διμερή κράματα Al-Mg περιέχουν σε μικρότερες ποσότητες Ζιρκόνιο για τον έλεγχο των κόκκων και της δομής, και κάποιες φορές περιέχουν Σίδηρο και Πυρίτιο σε μορφή ενδομεταλλικών ενώσεων. Το Πυρίτιο σχηματίζει Mg_2Si ενώ εμφανίζονται και οι ενώσεις $FeAl_3$, $(FeMn)Al_6$, $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, $(FeCr)Al_7$, $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$. Τέτοιες ενδομεταλλικές ενώσεις συμβάλλουν στη δευτερογενή σκλήρυνση του κράματος αυξάνοντας τη σκληρότητα και την αντοχή του. Η αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας είναι ανάλογη με την παρουσία των στοιχείων, που σχηματίζουν διαμεταλλικές ενώσεις, είναι όμως μικρότερης σημασίας από τη σκλήρυνση μέσω στερεού διαλύματος παρεμβολής. Τέλος, άλλες ενώσεις που πιθανόν να εμφανιστούν είναι: $(FeMn)Al_6$, $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$, Fe_2SiAl_8 , $FeAl_3$, $(FeCr)_4Si_4Al_{13}$, $(FeCr)Al_7$, Cu_2FeAl_7 , $CuMgAl_2$, $Mg_3Zn_3Al_2$ [1, 3, 4].

Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι εργοσκληρωμένα κράματα υφίστανται μείωση της σκληρότητας τους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Μετά από ορισμένο χρόνο, οι εφελκυστικές ιδιότητες μειώνονται λόγω της περιορισμένης αποκατάστασης εντός των παραμορφωμένων κόκκων και η σειρά θερμικών κατεργασιών H3 έχει αναπτυχθεί για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα. Οι κατεργασίες αυτές περιλαμβάνουν ψυχρή κατεργασία σε επίπεδο μικρότερο από το επιθυμητό και στη συνέχεια σταθεροποίηση με θέρμανση σε θερμοκρασία 120-150 °C. Αυτό μειώνει τις εφελκυστικές ιδιότητες στο επιθυμητό επίπεδο και τις σταθεροποιεί συναρτήσει του χρόνου. Η κατεργασία επιπλέον μειώνει την τάση καθίζησης της β-φάσης σε κράματα με υψηλή περιεκτικότητα Μαγνησίου [1].

Κράματα Αλουμινίου – Μαγνησίου χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε συγκολλητές κατασκευές. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε κατασκευές μεταφοράς για πλαίσια αποθηκευτικών φορτηγών, μεγάλα οχήματα μεταφοράς πετρελαίου, γάλακτος και δημητριακών, δοχεία πίεσης, ειδικά όταν εμπλέκεται κρυογονική αποθήκευση. Ακόμη, χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική, σε κατασκευή τραινών και αρματαγωγών οχημάτων του στρατού. Η υψηλή αντοχή σε διάβρωση τα κάνει κατάλληλα για κατασκευή μικρών πλοίων έως και υπερκατασκευών μεγάλων ωκεανό-πλοίων. Επιπροσθέτως, ευρεία είναι η χρήση τους σε οικιακά σκεύη και τα κράματα με μια επιφανειακή επίκριση από υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο χρησιμοποιούνται για διακοσμητικές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε αρχιτεκτονικές συνθέσεις.

2.4.2 Κράμα Αλουμινίου 5083

Το κράμα Αλουμινίου 5083 είναι ένα εξαιρετικά ελαφρύ κράμα με καλή διαμορφωσιμότητα και ολκιμότητα, υψηλή αντοχή και υψηλή αντοχή σε διάβρωση, καθώς και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Το Αλουμίνιο 5083 ανήκει στην κατηγορία των κραμάτων που μπορούν να ισχυροποιηθούν μόνον με ψυχρή διαμόρφωση. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η χημική σύσταση του Αλουμινίου 5083.

Πίνακας 2 Χημική σύσταση Αλουμινίου 5083

Στοιχείο	Περιεκτικότητα (% κ.β.)
Al	92.4 – 95.6
Mg	4.0-4.9
Mn	0.4-1.0
Si	0.4
Fe	max 0.4
Cu	max 0.1
Zn	0.25
Ti	0.15
Λοιπά στοιχεία (έκαστο)	max 0.05
Λοιπά στοιχεία (σύνολο)	max 0.15

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τυπικές μηχανικές ιδιότητες ορισμένων κραμάτων Αλουμινίου 5083.

Πίνακας 3 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083 [4]

Θερμοκρασία °C	Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm ²)	Συμβ. όριο διαρροής (N/mm ²)	Επιμήκυνση A(%)
<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	430	175	28
<i>Ελατό πλακίδιο, Θερμική κατεργασία H113, Διαμήκης μέτρηση στη διεύθυνση έλασης</i>			
24	335	235	15
-196	465	275	31
-253	620	305	30
-269	590	280	29
<i>Ελατό πλακίδιο, Θερμική κατεργασία H113, Εγκάρσια μέτρηση στη διεύθυνση έλασης</i>			
24	345	235	16
-196	460	280	24

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται φυσικές ιδιότητες του Αλουμινίου 5083.

Πίνακας 4 Τυπικές φυσικές ιδιότητες Αλουμινίου 5083

Στοιχείο	Περιεκτικότητα (% κ.β.)
Πυκνότητα	2.65 g/cm ³
Σημείο Τήξης (solidus - liquidus)	605 – 637 °C
Μέτρο ελαστικότητας	72 GPa
Ηλεκτρική αντίσταση	0.058x10 ⁻⁶ Ω.m
Θερμική αγωγιμότητα	121 W/m.K
Θερμική διαστολή	25x10 ⁻⁶ /K

2.4.3 Συγκολλήσεις Αλουμινίου σειράς 5xxx

Τα κράματα της σειράς 5xxx παρουσιάζουν πολύ καλή συγκολλησιμότητα και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή τους σε διάβρωση, του χαμηλού τους βάρους, της μεγάλης αντοχής τους και της εξαιρετικά καλής διαμορφωσιμότητας τους, δικαιολογεί την ευρεία χρήση τους ως μέταλλο βάσης σε συγκολλήσεις τόξου τύπου MIG (Metal Inert Gas) και TIG (Tungsten Inert Gas) στη βιομηχανία.

Για την επίτευξη μιας καλής συγκόλλησης θα πρέπει ληφθούν υπόψη κάποιες ιδιότητες του Αλουμινίου ώστε να γίνει σωστή προετοιμασία των δοκιμίων για συγκόλληση καθώς και σωστή επιλογή ορισμένων παραμέτρων της συγκόλλησης. Παρακάτω, γίνεται αναφορά ορισμένων τέτοιων ιδιοτήτων του αλουμινίου που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης.

Στην επιφάνεια του αλουμινίου δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα οξειδίων (Al_2O_3). Τα οξείδια αυτά, έχουν σημείο τήξης 2050°C . το οποίο είναι πολύ υψηλότερο από το σημείο τήξης του Αλουμινίου που είναι 660°C . Επομένως κρίνεται απαραίτητη η απομάκρυνση του στρώματος οξειδίων πριν από την συγκόλληση γιατί διαφορετικά μπορεί να προκληθεί ατελή τήξη του μετάλλου στη λίμνη συγκόλλησης που συνεπάγεται ατελή σύνδεση. Ακόμη, τα οξείδια παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και έτσι αν έχουμε αρκετά παχύ στρώμα πιθανόν να προκληθούν προβλήματα έναρξης του τόξου της συγκόλλησης καθώς και διακοπές του τόξου και ακανόνιστη ροή ρεύματος κατά τη διάρκεια συγκόλλησης [4]. Η απομάκρυνση του στρώματος οξειδίων μπορεί να επιτευχθεί είτε με λείανση την επιφάνειας προς συγκόλληση λίγο πριν την έναρξη της διαδικασίας είτε με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος. Το μέταλλο βάσης έχει θετική πολικότητα σε αντίθεση με το ηλεκτρόδιο που είναι αρνητικό. Με τη χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος, κατά τη διάρκεια της αντίθετης πολικότητας, έχουμε την μεταφορά ηλεκτρονίων από το μέταλλο βάσης προς το ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα τη διάσπαση του στρώματος.

Ένα ακόμη πρόβλημα για την ποιότητα της συγκόλλησης αποτελεί η διάχυση του υδρογόνου, καθώς ευθύνεται για την δημιουργία πόρων καθώς και την ψαθυροποίηση της γραμμής συγκόλλησης. Η διαχυτότητα του υδρογόνου είναι μεγάλη σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που οδηγεί στη δέσμευσή του στο λουτρό της συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, η διαλυτότητα του υδρογόνου

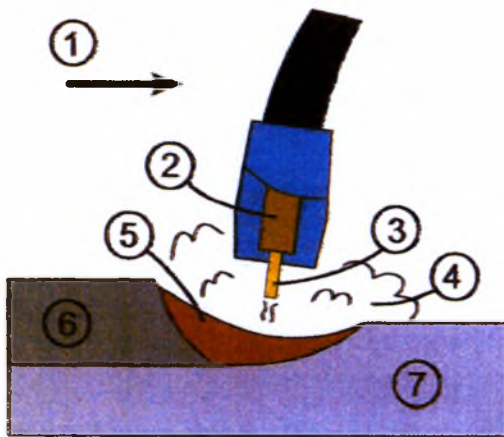
μειώνεται δραστικά και δημιουργείται ροή αέριου υδρογόνου προς την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων στη γραμμή της συγκόλλησης. Για την αποφυγή της διάχυσης υδρογόνου, η συγκόλληση γίνεται παρουσία προστατευτικής ατμόσφαιρας Αργού, Ήλιου ή μίγματος Αργού - Ηλίου. Η χρήση του Ηλίου γίνεται διότι το Ήλιο αυξάνει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια συγκόλλησης με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ψύξης του δοκιμίου που συνεπάγεται αύξηση της ροής αέριου υδρογόνου προς την ατμόσφαιρα [3, 4]

Η θερμική αγωγιμότητα του Αλουμινίου είναι 6 φορές υψηλότερη από αυτή του Χάλυβα. Παρότι το σημείο τήξης των κραμάτων Αλουμινίου είναι σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο του Χάλυβα, απαιτείται υψηλότερη εισαγωγή θερμότητας για τη συγκόλλησή τους. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα έχει σαν αποτέλεσμα το Αλουμίνιο να είναι πολύ ευαίσθητο στις θερμικές εναλλαγές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης [3].

2.4.4 Συγκόλληση τόξου παρουσία προστατευτικού –αδρανούς αερίου Αργού. με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο, MIG (Metal Inert Gas)

Η Συγκόλληση τόξου παρουσία προστατευτικού –αδρανούς αερίου Αργού. με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο, MIG, χρησιμοποιείται ευρύτατα τα τελευταία 60 χρόνια στη συγκόλληση κραμάτων Αλουμινίου για βιομηχανική χρήση. Στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο MIG ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται σύρμα χωρίς επένδυση συλλιπάσματος (γυμνό ηλεκτρόδιο), το οποίο τροφοδοτείται μέσα στη λίμνη συγκόλλησης μέσα από ένα χάλκινο στόμιο (στόμιο επαφής) από το οποίο παράλληλα διοχετεύεται και ηλεκτρικό ρεύμα. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης υπάρχει και τροφοδοσία προστατευτικού αερίου από φιάλες όπου το αέριο βρίσκεται υπό πίεση και αφού περνάει από ένα μειωτήρα πίεσης και μια διάταξη μέτρησης της παροχής, διοχετεύεται γύρω από το λουτρό συγκόλλησης. Ο σχηματισμός του ηλεκτρικού τόξου γίνεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο σημείο του υλικού που συγκολλάται. Σημαντικό ρόλο για τη σωστή και συνεχή συγκόλληση παίζουν η πηγή του ρεύματος και η τροφοδοσία του ηλεκτροδίου. Στη συγκόλληση MIG χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση πηγές ρεύματος σταθερής τάσης, δηλαδή με χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης με κλίση 3-8V ανά 100A. Ο λόγος είναι ότι

αυτές οι πηγές έχουν την ικανότητα αυτοδιόρθωσης της έντασης και του ρυθμού τήξης όταν για διάφορους λόγους προκύπτουν αυξομειώσεις της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος. Τέλος, να επισημάνουμε ότι στις συγκολλήσεις αυτού του τύπου χρησιμοποιείται αποκλειστικά συνεχές ρεύμα και αντίστροφη πολικότητα, δηλαδή το «+» στο ηλεκτρόδιο [3]. Η **Εικόνα 2.1** παρουσιάζει την περιοχή συγκόλλησης κατά τη λειτουργία της μεθόδου και η **Εικόνα 2.2** παρουσιάζει μια μηχανή συγκόλλησης MIG.



Εικόνα 2.1 Περιοχή συγκόλλησης MIG: (1) Διεύθυνση της συγκόλλησης, (2) στόμιο διοχέτευσης ηλεκτροδίου, (3) ηλεκτρόδιο, (4) προστατευτικό αέριο, (5) λουτρό συγκόλλησης, (6) στερεοποιημένο συγκολλημένο μέταλλο, (7) επεξεργασμένο κομμάτι μετάλλου [3]



Εικόνα 2.2 Μηχανή συγκόλλησης MIG

3. Πειραματική διαδικασία

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές συγκολλήσεων. Παρακάτω, ακολουθεί περιγραφή των διαδικασιών.

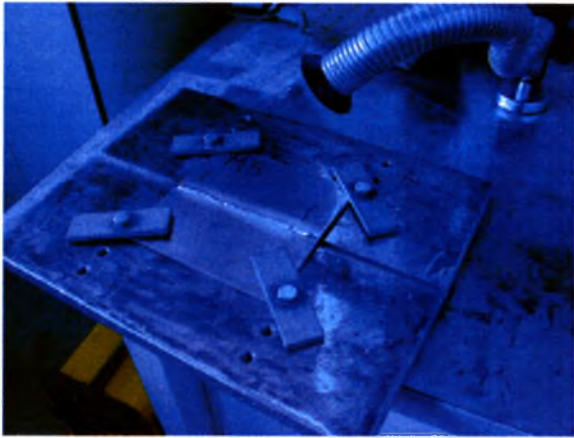
Η πρώτη σειρά συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε στις 14/2/07 στο εργαστήριο υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος του πειράματος ήταν η συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου κράματος 5083-0 με την μέθοδο συγκόλλησης GMAW-MIG. Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα με διαστάσεις: 200×100×2mm (μήκος × πλάτος × ύψος). Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή ESABMig C280. Η μετωπική συγκόλληση μεταξύ των 2 ελασμάτων έγινε πάνω σε χαλύβδινη κατασκευή που στο κέντρο της είχε εγκοπή πλάτους 1cm και βάθος 0.5cm. Τα ελάσματα τοποθετούνταν και σταθεροποιούνταν με ειδικούς σφιχτήρες πάνω στην κατασκευή και η συγκόλληση γίνονταν ακριβώς πάνω από την εγκοπή. Διαστάσεις κατασκευής: 50cm×40cm×2cm (μήκος × πλάτος × ύψος). Πάνω από την περιοχή συγκόλλησης είχε τοποθετηθεί ειδικός απορροφητήρας. Το σύρμα που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσεως ήταν κράματος 5356 (AlMg₅) και είχε διάμετρο 1.2mm. Στις Εικόνες 3.1 – 3.3 παρουσιάζονται η μηχανή συγκόλλησης, ο ειδικός εξαεριστήρας καθώς και η χαλύβδινη κατασκευή που τοποθετούνταν τα δοκίμια προς συγκόλληση.



Εικόνα 3.1 Μηχανή ESABMig C280



Εικόνα 3.2 Ειδικός απορροφητήρας



Εικόνα 3.3 Χαλύβδινη κατασκευή στερέωσης δοκιμίου προς συγκόλληση

Ως προστατευτικό αέριο συγκόλλησης: χρησιμοποιήθηκε καθαρό Αργό (Argon 99.99%) με παροχή αερίου 15lit/min. Τέλος, η απόσταση μεταξύ των δύο ελασμάτων προς συγκόλληση ήταν 0cm. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι συνθήκες συγκόλλησης των δοκιμίων. Ο υπολογισμός της ταχύτητας συγκόλλησης που παρουσιάζεται στον πίνακα, έγινε με μέτρηση του χρόνου συγκόλλησης σε συγκεκριμένο μήκος του δοκιμίου (150mm).

Πίνακας 5 Συνθήκες 1^{ης} σειράς συγκολλήσεων

Δοκίμιο	Ένταση μηχανής (I) [A]	Τάση μηχανής [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/sec]	Ταχύτητα εξαγωγής σύρματος [m/min]	Παρατηρήσεις
M1	145	11.6	27.27	8	Προηγήθηκε κοντάρισμα (3 τσιμπίδες) με MIG για αποφυγή απομάκρυνσης των 2 δοκιμίων
M2	145	11.6	7.66	8	Προηγήθηκε κοντάρισμα με TIG για καλύτερη όεισόδοση του υλικού συγκόλλησης και για αποφυγή απομάκρυνσης των 2 δοκιμίων
M3	112	12.5	-	7	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν προηγήθηκε κοντάρισμα • Πραγματοποιήθηκαν και

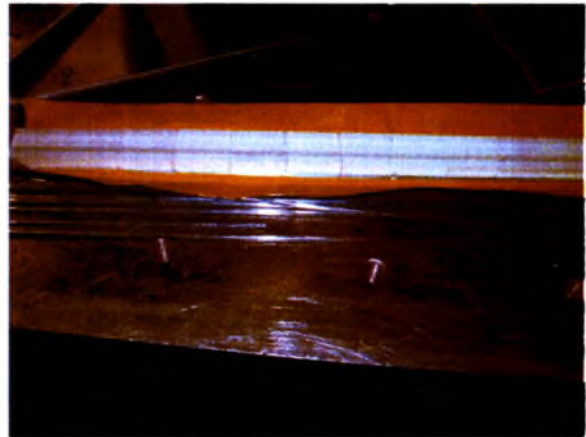
					<i>Επιλέγον συγκολλήσεις με τις ίδιες συνθήκες πάνω στο δοκίμιο με αποτέλεσμα την καταστροφή του.</i>
M4	1° πάσο: 132 2° πάσο: 149 3° πάσο: 153 4° πάσο: 206 5° πάσο: 179 6° πάσο: 145 7° πάσο: 112	1° πάσο: 13 2° πάσο: 14.3 3° πάσο: 15.1 4° πάσο: 10.8 5° πάσο: 13.1 6° πάσο: 11.6 7° πάσο: 12.5	Δεν μετρήθηκε	1° πάσο: 8 2° πάσο: 9 3° πάσο: 10 4° πάσο: 12 5° πάσο: 5 6° πάσο: 8 7° πάσο: 7	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν προηγήθηκε κοντάρισμα • Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με διαφορετικούς συνδυασμούς εντάσεως, ρεύματος, ταχύτητας, εξαγωγής σύρματος, πάνω στο έλασμα • Το δοκίμιο αποτελείόταν από μόνο ένα έλασμα
M5	132	13	12.93	8	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν προηγήθηκε κοντάρισμα
M6	132	13	21.03	8	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν προηγήθηκε κοντάρισμα
M7	132	13	19.84	8	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν προηγήθηκε κοντάρισμα • Δώσαμε μεγαλύτερη χάρη στο ξεκίνημα με σκοπό να πιάσουμε καλύτερες συνθήκες μέσα στη συγκόλληση

Η δεύτερη σειρά συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε στις 27/02/2007 στο εργοστάσιο ΚΙΟΛΕΙΔΗΣ ΑΕΒΕ. Στόχος του πειράματος ήταν η συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου 5083-0 με την μέθοδο συγκόλλησης GMAW-MIG. Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα με διαστάσεις : 200×100×2mm (μήκος × πλάτος × ύψος). Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή Transpulssynergic 4000 της Fronius. Η μετωπική συγκόλληση μεταξύ των 2 ελασμάτων έγινε πάνω σε μεταλλικό πάγκο. Αρχικά, ο συγκολλητής τρόχιζε τα δοκίμια για την απομάκρυνση των σχηματιζόμενων στην επιφάνεια οξειδίων και στη συνέχεια τα καθάριζε με οινόπνευμα. Έπειτα, έγινε συγκράτηση των 2 ελασμάτων στο τραπέζι, με διάκενο ανάμεσα στα ελάσματα σχεδόν μηδέν. και ο συγκολλητής

έκανε ποντάρισμα του δοκιμίου στις δύο άκρες και στην αντίθετη πλευρά από αυτήν που θα κάνει την συγκόλληση. Στη συνέχεια τοποθετούσε backing-strip από την κάτω πλευρά. Τέλος, ο συγκολλητής με σταθερή ταχύτητα έκανε την τελική συγκόλληση με ένα πέρασμα και μη-διακοπόμενη. Στις **Εικόνες 3.4** και **3.5** παρουσιάζεται ο τρόπος στερέωσης του δοκιμίου προς συγκόλληση, καθώς και το backing-strip που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 3.4 Δοκίμιο έτοιμο προς συγκόλληση



Εικόνα 3.5 Backing-strip

Ως προστατευτικό αέριο, χρησιμοποιήθηκε 70% Ar 30% He με παροχή φιάλης 26lit/min και παροχή αερίου μπροστά στη συγκόλληση 28lit/min. Ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιήθηκε σύρμα από αλουμίνιο 5183 με διάμετρο 1.2mm. Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζονται οι συνθήκες συγκόλλησης των δοκιμίων. Ο υπολογισμός της ταχύτητας συγκόλλησης, που παρουσιάζεται στον πίνακα, έγινε με μέτρηση του χρόνου συγκόλλησης σε συγκεκριμένο μήκος του δοκιμίου (150mm). Η τάση της μηχανής και η ταχύτητα του σύρματος άλλαξε αυτόματα με την αλλαγή της ρύθμισης του ρεύματος

Πίνακας 6 Συνθήκες 2^{ης} σειράς συγκολλήσεων

Δοκίμιο	Ένταση ρεύματος [A]	Τάση μηχανής [V]	Ταχύτητα εξαγωγής σύρματος [m/min]	Παλμοί τόξου	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/s]	Παρατηρήσεις
M10	65	17,3	4	1 ⁻	8.2	
M11	65	17,3	4	0.5 ⁻	9.2	
M12	65	17,3	4	0.5 ⁻	9.5	
M13	55	16,4	3,5	0.5 ⁻	7.1	Τα ελάσματα συγκολλήθηκαν με διάκενο 1mm
M14	75	17,5	4,5	0.5 ⁻	11	

Προκειμένου να ελέγξουμε τις μεταβολές των ιδιοτήτων και της μικροσκοπικής δομής του υλικού λόγω της μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, υπολογίζουμε το ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας για κάθε δοκίμιο. Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζεται η τιμή του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας της συγκόλλησης για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 7 Υπολογισμός ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας

Σειρά	Δοκίμιο	Ρυθμός πρόσδοσης ενέργειας τόξου [= h x (τάση τόξου x ένταση ρεύματος) / ταχύτητα συγκόλλησης], (J/mm) [5]
A	M1	49.33
	M2	175.66
	M5	106.16
	M6	65.27
	M7	69.19
B	M10	112.44
	M11	97.77
	M12	94.68
	M13	101.63
	M14	95.44

* Όπου h=0.8 ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής MIG

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χημικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην EBETAM AE με φασματοσκοπική ανάλυση πλακιδίου αλουμινίου 5083, πάχους 2,4mm σε συσκευή οπτικής εκπομπής σπινθηρισμού «Spectrolab M8» βάσει της οδηγίας εργασίας W.I./labche-01/4 καθώς και η χημική σύσταση των κραμάτων 5183 και 5356 του υλικού πλήρωσης [11].

Πίνακας 8 Χημική ανάλυση κράματος 5083 και χημική σύσταση κραμάτων 5183 και 5356

Υλικό	Si %	Mn %	Cr %	Cu %	Mg %	Fe %
5083	0,12	0,59	0,05	0,06	4,49	0,33
5183	<0.2	0.6	-	-	4.8	<0.2
5356	<0.1	0.15	-	-	4.9	<0.2

3.1 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος είναι το πρώτο στάδιο μακροσκοπικού ελέγχου των δοκιμίων. Η αξιολόγηση των δοκιμίων στον οπτικό έλεγχο περιλαμβάνει απλή παρατήρηση και φωτογράφιση των δοκιμίων. Γίνεται οπτικός έλεγχος του προσώπου και της ρίζας της συγκόλλησης καθώς και έλεγχος για εμφανής παραμορφώσεις των ελασμάτων. Στη συνέχεια έχουμε παρατήρηση του προσώπου και της ρίζας της συγκόλλησης με τη χρήση στερεοσκοπίου. Ο οπτικός έλεγχος έγινε στο εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με τη χρήση του στερεοσκοπίου Leica WILD M3Z.

3.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος NDT

Ο μη καταστρεπτικός έλεγχος των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στις 22/02/2007 για την πρώτη σειρά συγκολλήσεων και στις 22/05/2007 για την δεύτερη στην εταιρία EBETAM A.E. Η διαδικασία περιλάμβανε έλεγχο με ραδιογραφία (ακτίνες X) και στην συνέχεια με διεισδυτικά υγρά.

3.2.1 Ραδιογραφία

Ο έλεγχος του δοκιμίου με ραδιογραφία γίνεται για την εύρεση τυχόν εσωτερικών ρωγμών, πόρων και ατελειών της συγκόλλησης. Η διαδικασία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1435:1997 για πάχος δοκιμίου 2mm. Με βάση το παραπάνω πρότυπο, χρησιμοποιήθηκε πενετράμετρο 10A1en και το απαιτούμενο σύρμα του πενετράμετρου που πρέπει να εμφανίζεται στο φιλμ της ραδιογραφίας είναι το W16. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε πίνακας της μηχανής που περιείχε τυποποιημένες τιμές συνθηκών ραδιογράφησης αλουμινίου. Με βάση το υλικό και το πάχος του ελάσματος επιλέχθηκαν οι παράμετροι 100 kV, 2mA και χρόνος έκθεσης 32 sec. Η αξιολόγηση των δοκιμών έγινε από μηχανικό της EBETAM Α.Ε. εξειδικευμένο πάνω στον ποιοτικό έλεγχο. Στις Εικόνες 3.6 – 3.9 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός της διαδικασίας.



Εικόνες 3.6 Τροφοδοτικό



Εικόνες 3.7 Πηγή ακτίνων X



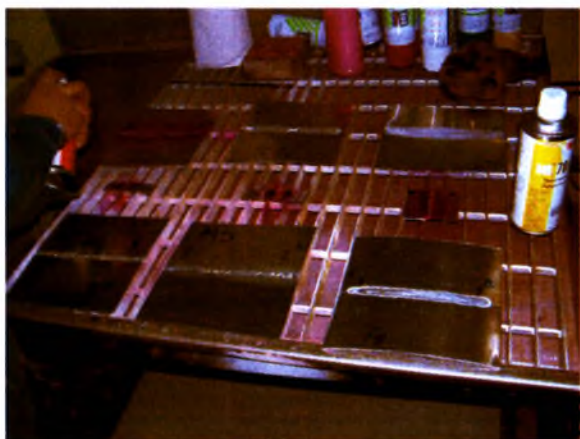
Εικόνες 3.8 Τοποθέτηση φιλμ



Εικόνες 3.9 Εμφανιστήριο φιλμ

3.2.2 Διεισδυτικά υγρά

Αρχικά, έγινε ψεκασμός του προσώπου των ραφών συγκόλλησης των δοκιμίων με κόκκινο σπρέι Marker MR68C και αφέθηκε για 10min. Στη συνέχεια, ξεπλύναμε τα δοκίμια με νερό (σε κανονική πίεση του δικτύου) και αφού τα στεγνώσαμε (απλά με λίγο χαρτί), τα ψεκάσαμε με άσπρο σπρέι Marker MR70 και το αφήσαμε λίγα λεπτά να στεγνώσει. Σε περίπτωση επιφανειακών ρωγμών και πόρων της συγκόλλησης, το κόκκινο σπρέι θα εισχωρήσει και θα εγκλωβιστεί σε αυτούς. Με το ξέπλυμα του δοκιμίου θα απομακρυνθεί το υπόλοιπο σπρέι και έπειτα με τον ψεκασμό του άσπρου σπρέι αυτά τα επιφανειακά ελαττώματα της συγκόλλησης θα γίνουν ευδιάκριτα. Οι **Εικόνες 3.10 – 3.11** είναι εικόνες από την στιγμή του ψεκασμού των δοκιμίων.



Εικόνες 3.10 Ψεκασμός δοκιμίων με Marker MR68C



Εικόνες 3.11 Δοκίμια μετά από ψεκασμό με Marker MR68C

Η αξιολόγηση των δοκιμίων έγινε με βάση την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ EN 1289. Παρακάτω, στον **Πίνακα 9** που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποδεκτά όρια των ενδείξεων.

Πίνακας 9 Αποδεκτά όρια ενδείξεων διεισδυτικών υγρών

Τύπος ένδειξης	Αποδεκτά όρια (mm)		
	1	2	3
Γραμμική ένδειξη l = μήκος ένδειξης	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Μη-γραμμική ένδειξη d = μέγιστη ακτίνα ένδειξης	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$

*Σημείωση: Στην αξιολόγηση δεν λαμβάνουμε υπ' όψιν τα πρώτα 20mm (άναμμα τόξου) και τα τελευταία 20mm της συγκόλλησης (σβήσιμο τόξου).


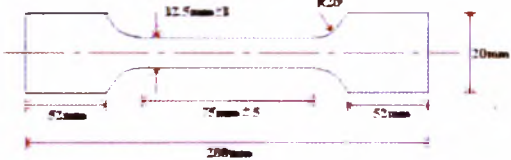
3.3 Μηχανικές ιδιότητες

Ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού περιλαμβάνει δοκιμή εφελκυσμού και δοκιμή κάμψης.

3.3.1 Εφελκυσμός

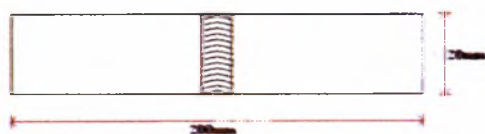
Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στις 5/06/2007 στην εταιρία EBETAM A.E. με τη μηχανή εφελκυσμού Zwick SP600. Από κάθε δοκίμιο, που υπήρχε η δυνατότητα δημιουργίας δοκιμίων για έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων, προετοιμάστηκε ένα δοκίμιο εφελκυσμού. Επιπλέον, έγινε και δοκιμή εφελκυσμού σε δοκίμια του μετάλλου βάσης. Οι διαστάσεις των δοκιμίων επιλέχθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN895 για τα συγκολλητά δοκίμια και με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN10002-1 για τα δοκίμια του μετάλλου βάσης. Παρακάτω, στον Πίνακα 10 φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού.

Πίνακας 10 Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού

Διαστάσεις συγκολλητών δοκιμών	Διαστάσεις δοκιμών μετάλλου βάσης
	

3.3.2 Κάμψη

Οι δοκιμές κάμψης πραγματοποιήθηκαν στις 19/07/2007 στην εταιρία EBETAM A.E. Από κάθε δοκίμιο, που υπήρχε η δυνατότητα δημιουργίας δοκιμών για έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων, προετοιμάστηκαν δύο δοκίμια κάμψης. Ένα δοκίμιο για έλεγχο κάμψης στο πρόσωπο της συγκόλλησης και ένα για έλεγχο κάμψης στη ρίζα της συγκόλλησης. Οι διαστάσεις των δοκιμών και οι παράμετροι της δοκιμής επιλέχθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN 50 121. Η δοκιμή έγινε με διάμετρος εμβόλου 8mm και απόσταση μεταξύ των ράουλων 20mm. Παρακάτω, στην **Εικόνα 3.12** φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμών κάμψης.



Εικόνα 3.12 Διαστάσεις δοκιμών κάμψης


3.4 Ποιότητα συγκόλλησης σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042


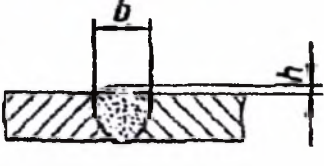
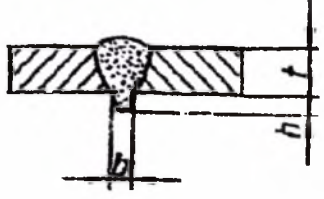
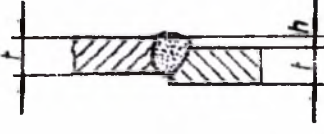
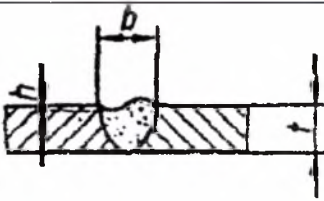
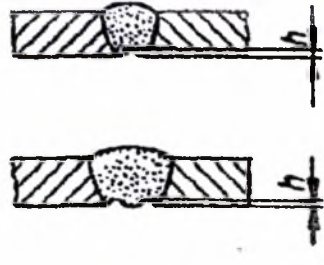
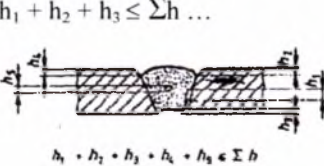
Αφού προηγήθηκε μακροσκοπικός έλεγχος και στη συνέχεια μη καταστρεπτικός έλεγχος των δοκιμών, στη συνέχεια γίνεται επιλογή κοπής κατάλληλου τμήματος του δοκιμίου για περαιτέρω έλεγχο στην τομή της συγκόλλησης.

Η κοπή του δοκιμίου έγινε με το κοπτικό μηχάνημα Unitom-2 της Struers και στη συνέχεια έγινε εγκιβωτισμός του τμήματος του δοκιμίου με ρητίνη Eprofix της Struers. Έπειτα, έγινε αφαίρεση των καλουπιών και ακολούθησε η λείανση του δοκιμίου με τους λειαντικούς τροχούς Knuth-Roter-3 της Struers με λειαντικά χαρτιά (300, 500, 800, 1000, 2400) και στίλβωση με το μηχάνημα Dap-V της Struers με διαμαντόπαστα 3μm και 1μm. Τέλος, έγινε χημική προσβολή του δοκιμίου με το αντιδραστήριο Keller's (2mL HF (48%), 3mL HCl, 5mL HNO₃, 190mL H₂O). Η αξιολόγηση των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ EN 30042, από φωτογραφίες της τομής που πάρθηκαν μέσω του στερεοσκοπίου Leica WILD M3Z.

Στον Πίνακα 11 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποδεκτά όρια των ατελειών που εμφανίζονται σε μετωπική συγκόλληση σύμφωνα με την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ EN 30042.

Πίνακας 11 Αποδεκτά όρια ατελειών μετωπικής συγκόλλησης σύμφωνα με την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ EN 30042

No.	Προσδιορισμός ατελειών	Παρατηρήσεις	Όρια ατελειών για Επίπεδα συγκόλλησης		
			Μεσαίος D	Μέτριος C	Αυστηρός B
1	Ρωγμές	Περιλαμβάνει όλων των ειδών τις ρωγμές εκτός των μικρο-ρωγμών (πάχος h x μήκος l) $\leq 1\text{mm}^2$	Μη-αποδεκτό		
4	Πορώδες	d= διάμετρος πόρου , s= πάχος συγκόλλησης	$d \leq 0.5s$	$d \leq 0.3s$	$d \leq 0.25s$
11	Ατελής τήξη	Εάν ατελής τήξη παρουσιάζεται σε διάφορα σημεία, τότε $\Sigma h = h_1 + h_2 + \dots$	Επιμήκης ατέλειες: Μη-αποδεκτό		
			Μικρές ατέλειες: $\Sigma h \leq 0.1s$		
			max. 3mm	max. 1.5mm	Μη-αποδεκτό
12	Ατελής διείσδυση		$h \leq 0.4s$	$h \leq 0.2s$	Μη-αποδεκτό
14	Υποκοπή		Επιμήκης ατέλειες:		
			$h \leq 0.6\text{mm}$	$h \leq 0.4\text{mm}$	$h \leq 0.2\text{mm}$

			Μικρές ατέλειες:		
			$h \leq 1.5\text{mm}$	$h \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0.5\text{mm}$
15	Επιπλέον / υπερβολικό μέταλλο συγκόλλησης		$h \leq 1.5\text{mm}$ $+0.2b$ max.10mm	$h \leq 1.5\text{mm}$ $+0.15b$ max.7mm	$h \leq 1.5\text{mm}$ $+0.1b$ max. 5mm
19	Επιπλέον / υπερβολική διείδυση μετάλλου συγκόλλησης		$h \leq 5\text{mm}$	$h \leq 4\text{mm}$	$h \leq 3\text{mm}$
20	Κακή ευθυγράμμιση ελασμάτων		$h \leq 0.5\text{mm}$ $+0.25t$ max.4mm	$h \leq 0.5\text{mm}$ $+0.15t$ max.3mm	$h \leq 0.5\text{mm}$ $+0.1t$ max.2.5mm
21	Ατελές γέμισμα αυλακτού		Επιμήκης ατέλειες: Μη-αποδεκτό		
			Μικρές ατέλειες:		
			$h \leq 0.2t$ max.2mm	$h \leq 0.1t$ max.1.5mm	$h \leq 0.05t$ max.1mm
23	Ρίζα με κοιλότητα ή με συστολή		Επιμήκης ατέλειες: Μη-αποδεκτό		
			Μικρές ατέλειες:		
			$h \leq 0.2t$ max.2mm	$h \leq 0.1t$ max.1.5mm	$h \leq 0.05t$ max.1mm
24	Διάφορες ατέλειες σε οποιαδήποτε κατεύθυνση	$h_1 + h_2 + h_3 \leq \Sigma h \dots$  $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq \Sigma h$	Μέγιστο όριο ατελειών Σh		
			0.3s max.10mm	0.25s max.10mm	0.2s max.10mm

3.5 Μικροσκληρομέτρηση

Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έγινε με σκοπό τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητας των δοκιμίων σε τομή, από το κέντρο της συγκόλλησης έως το μέταλλο βάσης. Έλαβε μέρος στο εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με το μικροσκληρόμετρο SHIMADZU HMV-2000. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με φορτίο 200gr ($HV_{0.2}$) και χρόνο μέτρησης 15 δευτερόλεπτα. Οι μετρήσεις ξεκινούσαν από το μέσο της λίμνης συγκόλλησης και συνέχιζαν ανά 500 μ m έως το μέταλλο βάσης.

3.6 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος

Αρχικά, έγινε λείανση του εγκιβωτισμένου δοκιμίου με τους τροχούς Knuth-Roter-3 της Struers με λειαντικά χαρτιά (300, 500, 800, 1000, 2400) και στη συνέχεια στύλωση με το μηχάνημα Dap-V της Struers με διαμαντόπαστα 3 μ m και 1 μ m. Έπειτα, έγινε ηλεκτρολυτική προσβολή του δοκιμίου στη *συσκευή ηλεκτρολυτικής προσβολής Struers Plectron* με διάλυμα Barker's (5ml HBF_4 σε 200ml H_2O) για 60sec. Ο μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος έγινε με το οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH με τη χρήση πολωμένου φωτός.

4. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι έλεγχοι που έγιναν σε κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 12 Συγκεντρωτικός πίνακας ελέγχων δοκιμίων

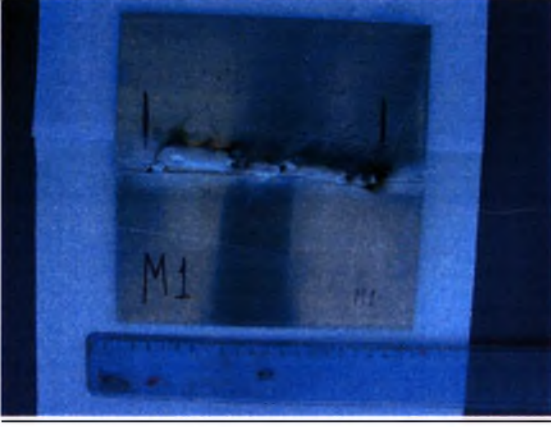


Δοκίμια	Οπτικός έλεγχος	Μη καταστρεπτικός έλεγχος NDT	Μηχανικές ιδιότητες	Τομή δοκιμίου μακροσκοπικός έλεγχος	Μικροσκληρομέτρηση	Μικροσκοπικός έλεγχος
Μέταλλο Βάσης	-	-	x	-	x	x
M1	x	x	-	x	x	x
M2	x	x	-	x	x	x
M3	x	-	-	-	-	-
M4	x	-	-	-	-	-
M5	x	x	-	x	x	-
M6	x	x	-	x	x	-
M7	x	x	-	x	x	-
M10	x	x	x	x	x	-
M11	x	x	x	x	x	-
M12	x	x	x	x	x	x
M13	x	x	x	x	x	-
M14	x	x	x	x	x	x


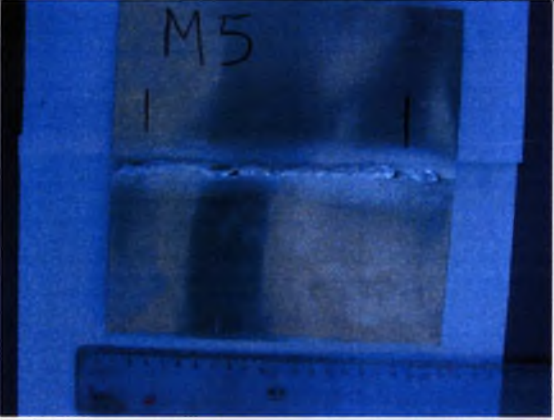


4.1 Οπτικός έλεγχος



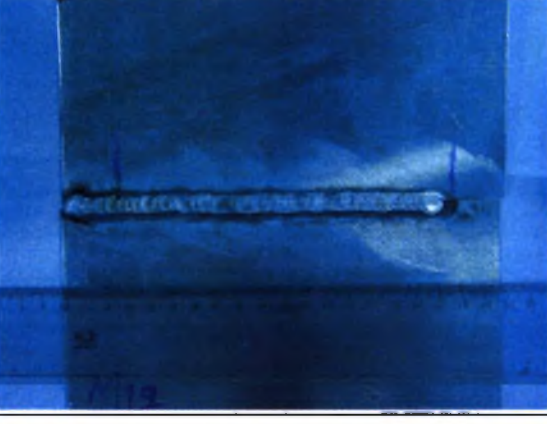

4.1.1 Απλή παρατήρηση δοκιμίων


Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται φωτογραφίες όλων των δοκιμίων και αναγράφονται παρατηρήσεις, ως μια πρώτη μορφή μακροσκοπικής αξιολόγησης.

Πίνακας 13 Πρώτη μορφή μακροσκοπικής αξιολόγησης δοκιμίων

Δοκίμιο	Φωτογραφία	Παρατηρήσεις
M1		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Κακή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Ασυνέχεια συγκόλλησης ◆ Τρύπημα δοκιμίου
M2		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Κακή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Ασυνέχεια συγκόλλησης ◆ Τρύπημα δοκιμίου
M3		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Το δοκίμιο έχει καταστραφεί λόγω διαφόρων δοκιμών των συνθηκών συγκόλλησης με αποτέλεσμα την καταστροφή του δοκιμίου και την απόρριψη του από περαιτέρω αξιολόγηση

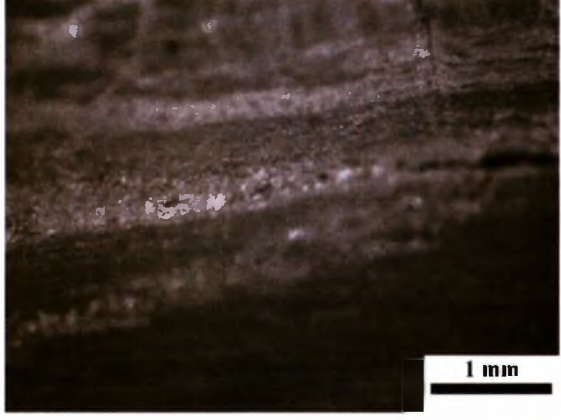
<p>M4</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Το δοκίμιο έχει καταστραφεί λόγω διαφόρων δοκιμών των συνθηκών συγκόλλησης με αποτέλεσμα την καταστροφή του δοκιμίου και την απόρριψη του από περαιτέρω αξιολόγηση
<p>M5</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Σε ορισμένα σημεία παρατηρείται κακή ευθυγράμμιση της συγκόλλησης ◆ Ασυνέχεια συγκόλλησης
<p>M6</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Κακή ευθυγράμμιση της συγκόλλησης ◆ Σε ορισμένα σημεία παρατηρείται ασυνέχεια συγκόλλησης
<p>M7</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Σε ορισμένα σημεία παρατηρείται ασυνέχεια συγκόλλησης

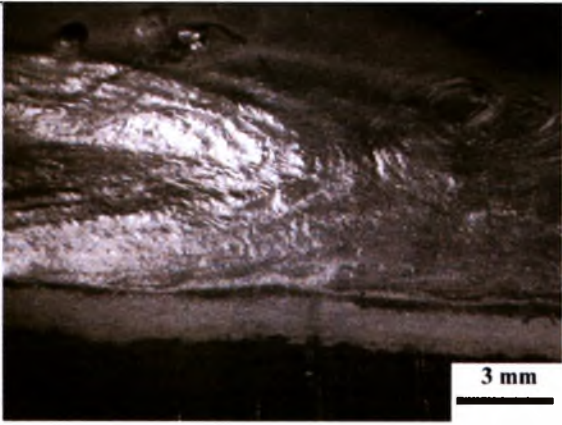
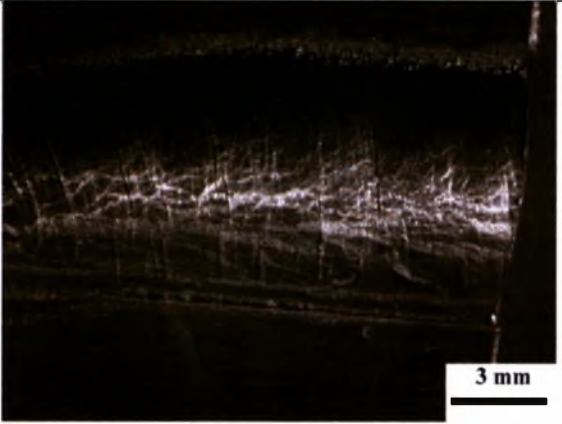
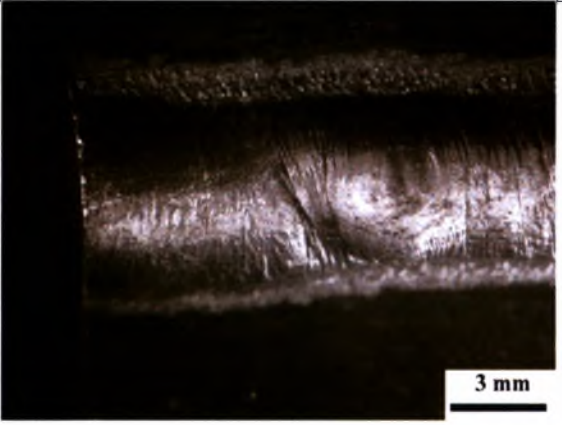
<p>M10</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καλή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Συνεχής συγκόλληση ◆ Δεν παρουσιάστηκε τρύπημα του δοκιμίου
<p>M11</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καλή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Συνεχής συγκόλληση ◆ Δεν παρουσιάστηκε τρύπημα του δοκιμίου
<p>M12</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καλή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Συνεχής συγκόλληση ◆ Δεν παρουσιάστηκε τρύπημα του δοκιμίου
<p>M13</p>		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καλή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Συνεχής συγκόλληση ◆ Δεν παρουσιάστηκε τρύπημα του δοκιμίου

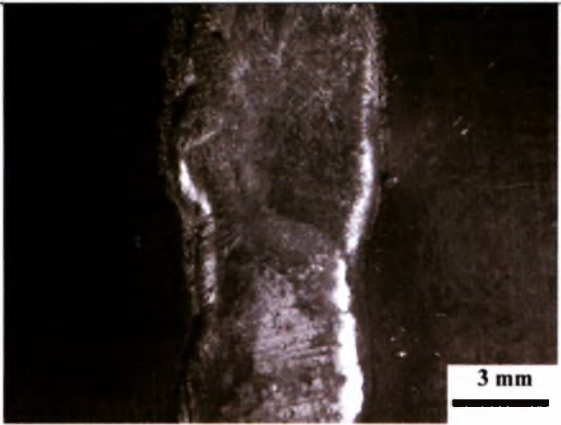
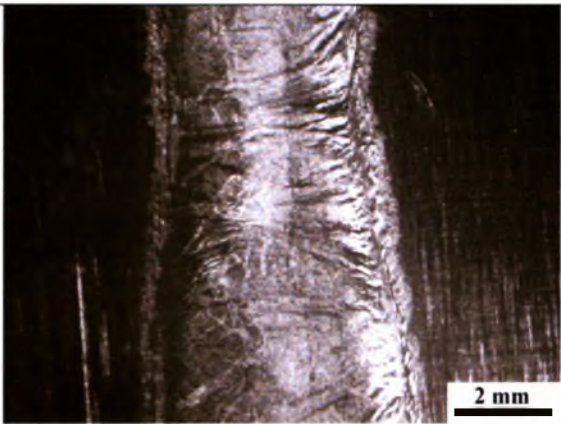
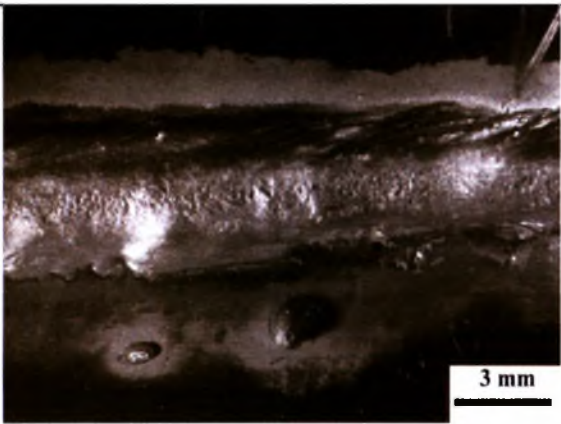
M14		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Καλή ευθυγράμμιση συγκόλλησης ◆ Συνεχής συγκόλληση ◆ Δεν παρουσιάστηκε τρύπημα του δοκιμίου
------------	---	---

4.1.2 Παρατήρηση προσώπου και ρίζας συγκόλλησης με στερεοσκόπιο

Στον **Πίνακα 14** παρουσιάζονται ατέλειες των δοκιμών στο πρόσωπο και στη ρίζα της συγκόλλησης που εντοπίστηκαν με τη χρήση στερεοσκοπίου.

Πίνακας 14 Ατέλειες των δοκιμών στο πρόσωπο και στη ρίζα της συγκόλλησης		
Δοκίμιο	Φωτογραφία	Παρατηρήσεις
M1	 <p data-bbox="310 1592 698 1636">Πρόσωπο συγκόλλησης (x25)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Δημιουργία πόρων στο πρόσωπο της συγκόλλησης λόγω κακής ευθυγράμμισης

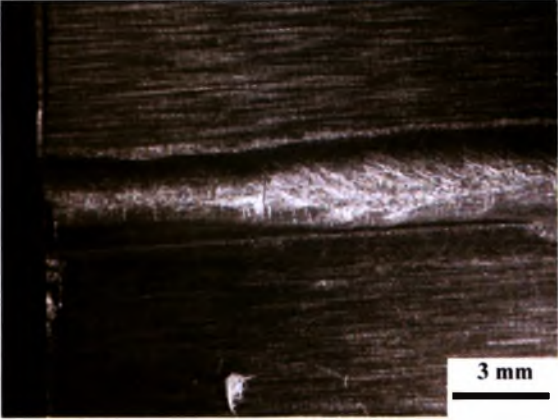
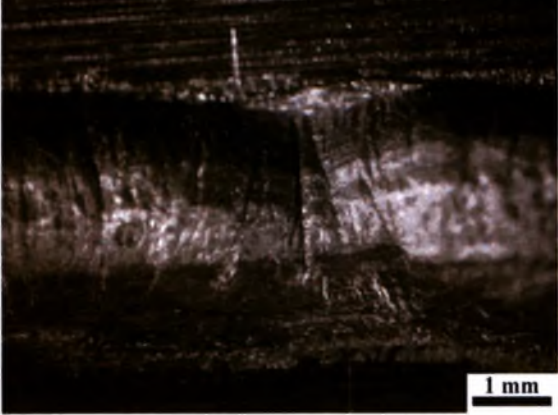
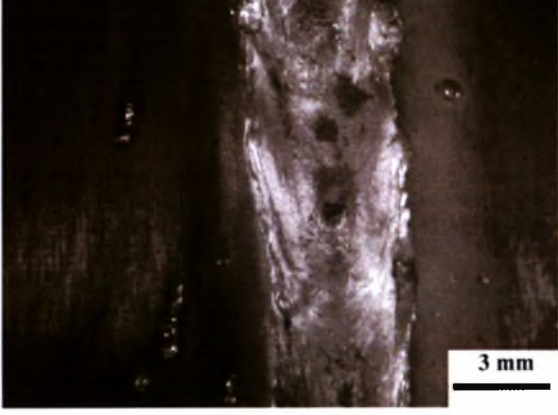
	 <p>Πρόσωπο συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p>◆ Ανομοιομορφία πλάτους συγκόλλησης</p>
	 <p>Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M2</p>	 <p>Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M3</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>M4</p>	<p>-</p>	<p>-</p>

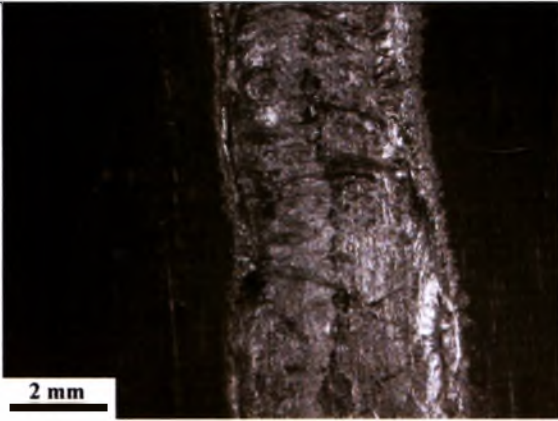
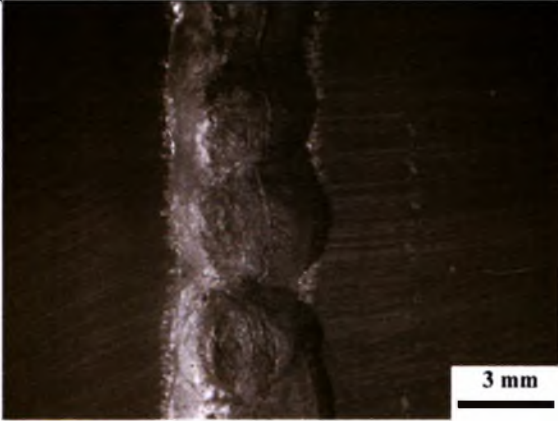
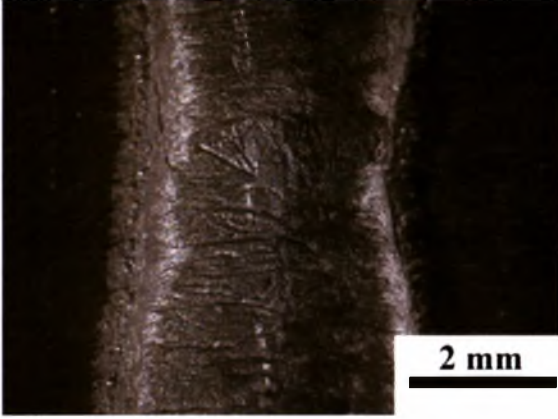
<p>M5</p>		<p>◆ Ανομοιομορφία πλάτους συγκόλλησης</p>
<p>M5</p>		<p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M6</p>		<p>◆ Ανομοιομορφία πλάτους συγκόλλησης</p>

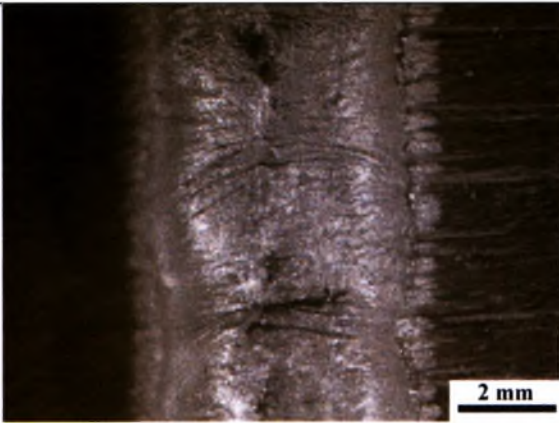
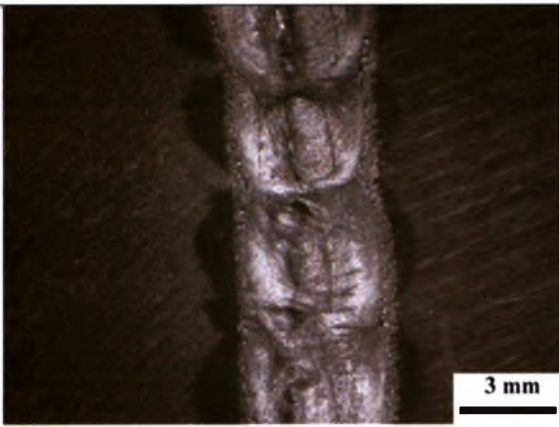
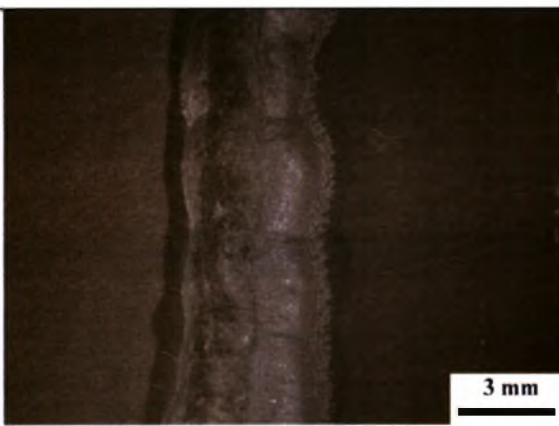
Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)

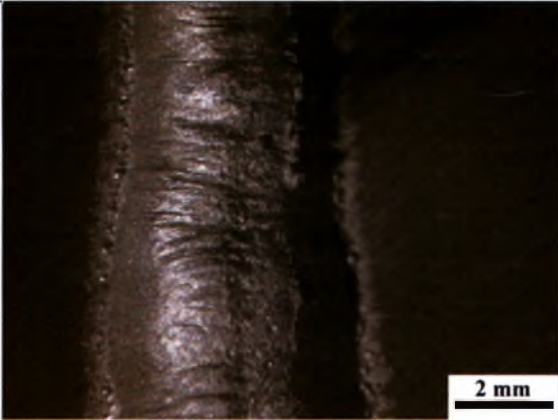
Ρίζα συγκόλλησης (x10)

Πρόσωπο συγκόλλησης (x 6.5)

		<p>◆ Κακή ευθυγράμμιση συγκόλλησης</p>
		<p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M7</p>		<p>◆ Ανομοιομορφία πλάτους συγκόλλησης</p>

	 <p data-bbox="313 608 633 652">Ρίζα συγκόλλησης (x10)</p>	<p data-bbox="902 165 1274 276">◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p data-bbox="174 718 247 763">M10</p>	 <p data-bbox="313 1161 633 1205">Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p data-bbox="902 718 1274 829">◆ Μη-σταθερή διείσδυση μετάλλου συγκόλλησης</p>
	 <p data-bbox="313 1647 633 1692">Ρίζα συγκόλλησης (x10)</p>	<p data-bbox="902 1216 1274 1327">◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>

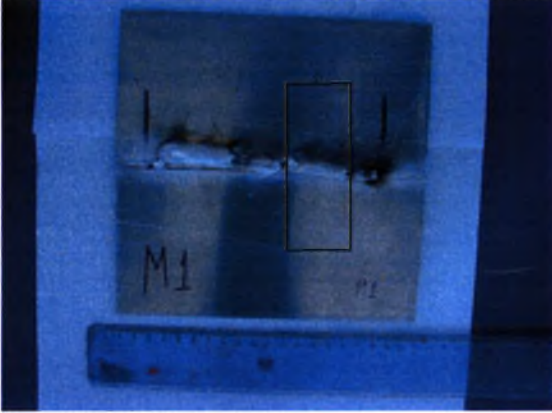
<p>M11</p>	 <p>Ρίζα συγκόλλησης (x10)</p>	<p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M12</p>	 <p>Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p>◆ Μη-σταθερή διείσδυση μετάλλου συγκόλλησης</p> <p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>
<p>M13</p>	 <p>Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)</p>	<p>◆ Μεταβλητό πάχος ρίζας συγκόλλησης</p> <p>◆ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση</p>

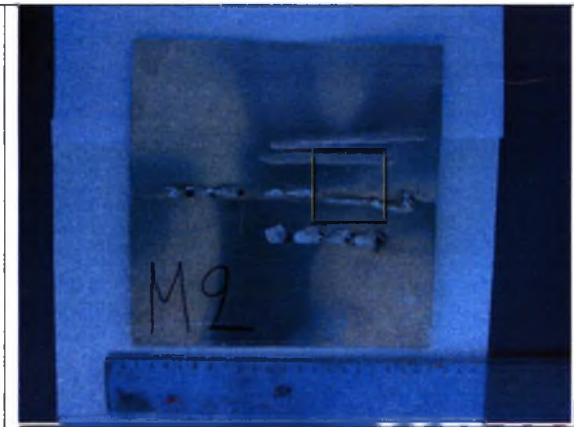
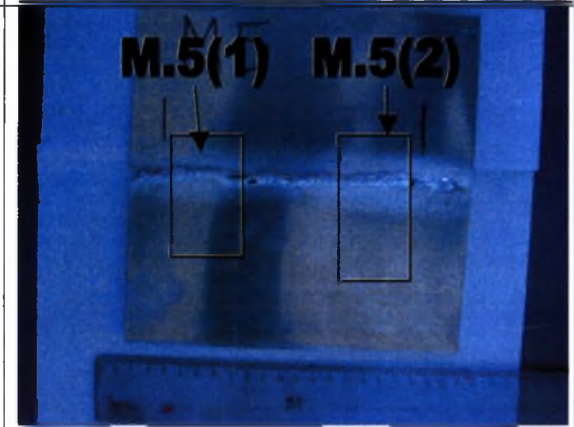

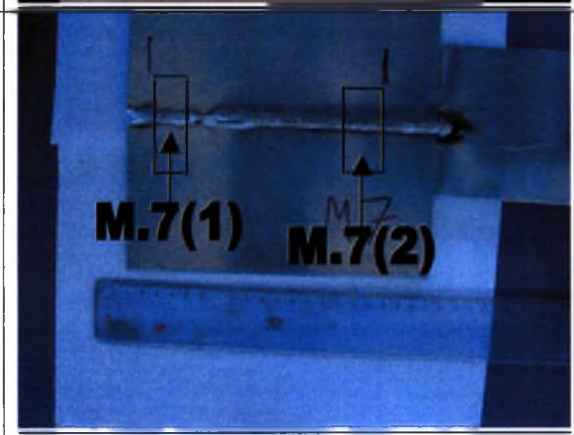
M14		♦ Ασυνέχεια κατά τη στερεοποίηση
Ρίζα συγκόλλησης (x6.5)		

Για περαιτέρω έλεγχο των M1, M2, M5, M6, M7, λόγω της ακαταλληλότητας τους, θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω μόνο συγκεκριμένα τμήματα των δοκιμίων. Σημείωση: Τα δοκίμια M5 και M7 χρησιμοποιήθηκαν ολόκληρα για μηχανοκαταστρεπτικό έλεγχο και στη συνέχεια έγινε η επιλογή των τμημάτων για περαιτέρω έλεγχο.

Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται ποια τμήματα θα χρησιμοποιηθούν.

Πίνακας 15 Τμήματα δοκιμίων M1, M2, M5, M6, M7 που θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έλεγχο

Δοκίμιο	Τμήμα δοκιμίου
M1	

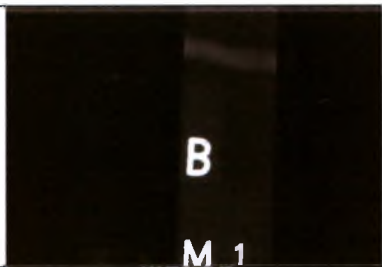




M2	
M5	
M6	
M7	



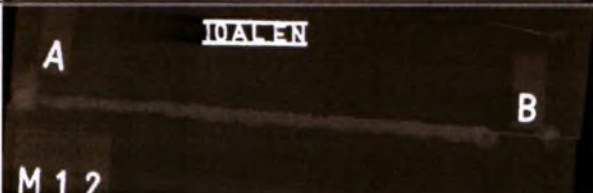


4.2 Μη καταστρεπτικός έλεγχος NDT

4.2.1 Ραδιογραφία

Στον **Πίνακα 16** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του ραδιογραφικού ελέγχου καθώς και φωτογραφίες των φιλμ.

Πίνακας 16 Αξιολόγηση ραδιογραφικού ελέγχου δοκιμίων

Σειρά	Δοκίμιο	Φωτογραφία	Αποτελέσματα αξιολόγησης
A	M1		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό
	M2		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό
	M5		Στα τμήματα, που έχουμε καλή συγκόλληση, το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό. Στα υπόλοιπα μέρη της συγκόλλησης παρουσιάζεται ατελής τήξη και “undercut”, δηλαδή κάψιμο ρίζας
	M6		Το δοκίμιο παρουσιάζει ατελή διείδυση και ασυνέχεια στη συγκόλληση
	M7		Στα τμήματα, που έχουμε καλή συγκόλληση, το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό. Στα υπόλοιπα μέρη της συγκόλλησης παρουσιάζεται ατελής τήξη και “undercut”.


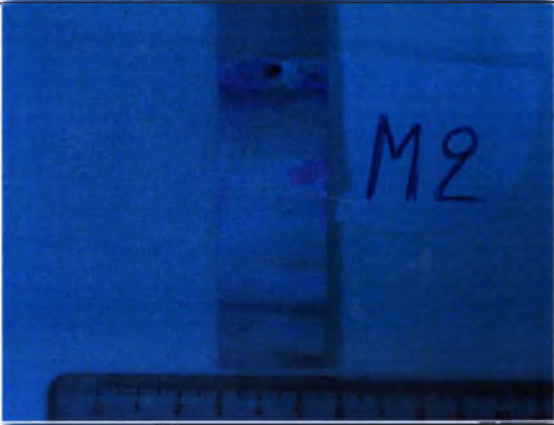
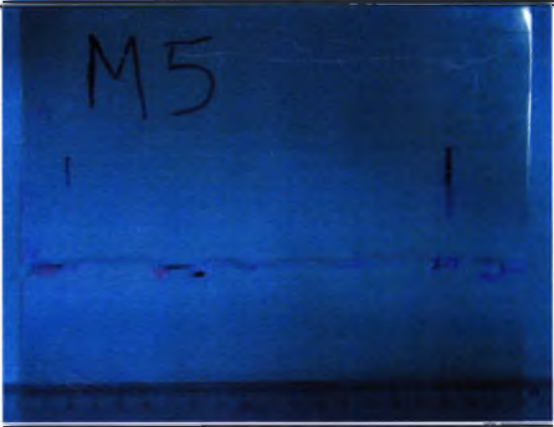
B	M10		Στο κέντρο του δοκιμίου εμφανίζεται Warm hole (δηλ. πόρος κατά την τήξη, που αποκτά γραμμικότητα)
	M11		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό
	M12		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό
	M13		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό
	M14		Το δοκίμιο ραδιογραφικά είναι αποδεκτό

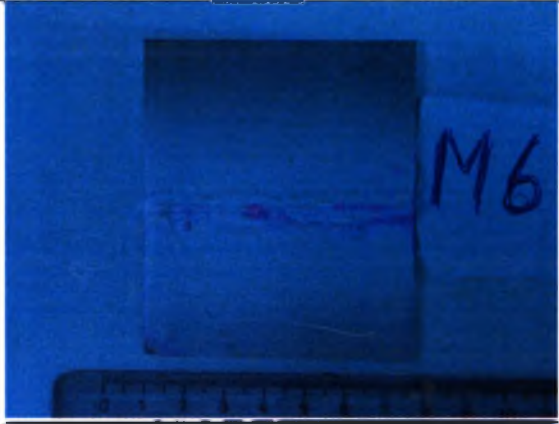
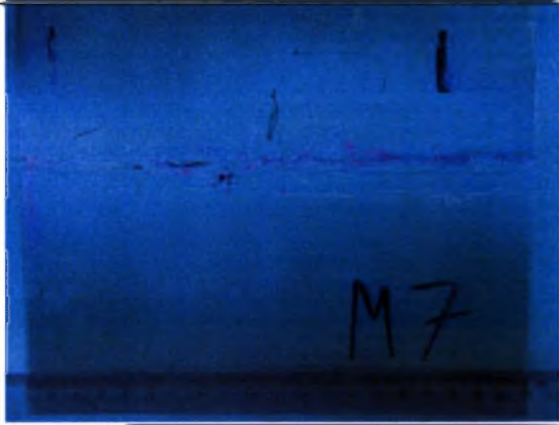
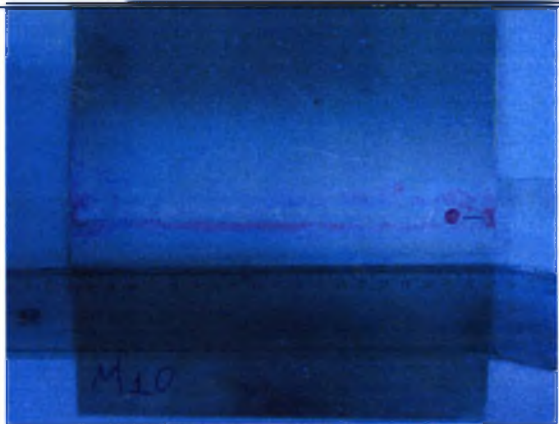

Όσο αφορά την πρώτη σειρά συγκολλήσεων, παρατηρούμε ότι μόνο τα δοκίμια M1 και M2 είναι ραδιογραφικά αποδεκτά, αλλά να υπενθυμίσουμε ότι έχουμε αξιολογήσει μόνο συγκεκριμένα τμήματα της συγκόλλησης όπου μόνο εκεί είχαμε καλή συγκόλληση. Το τμήμα του δοκιμίου M6 που αξιολογήθηκε παρουσιάζει σφάλματα, ενώ τα δοκίμια M6 και M7 εμπεριέχουν τμήματα που είναι ραδιογραφικά αποδεκτά αλλά και τμήματα με σφάλματα. Από την άλλη πλευρά, τα δοκίμια της δεύτερης σειράς συγκολλήσεων είναι όλα ραδιογραφικά αποδεκτά με εξαίρεση την εμφάνιση πόρου κατά την τήξη στο κέντρο του δοκιμίου M10.

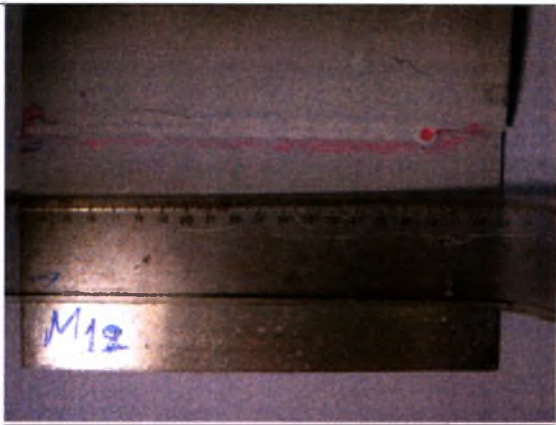


4.2.2 Διεισδυτικά υγρά

Στον **Πίνακα 17** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των διεισδυτικών υγρών καθώς και φωτογραφίες των δοκιμίων μετά τον ψεκασμό τους με τα ειδικά σπρέι.

Πίνακας 17 Αξιολόγηση δοκιμίων με διεισδυτικά υγρά

Δοκίμιο	Αποδεκτό επίπεδο		Φωτογραφία δοκιμίου	Παρατηρήσεις
	Γραμμική ή ένδειξη	Μη-γραμμική ένδειξη		
M1	1	Μη αποδεκτό		Η ένδειξη που εμφανίζεται είναι μη-γραμμική και έχει μέγιστη αξονική διάσταση: d= 9mm
M2	1	1		Η κεντρική συγκόλληση αξιολογείται
M5	1*	1*		Το δοκίμιο περιέχει περιοχές χωρίς συγκόλληση

M6	1	2		Το δοκίμιο περιέχει μέγιστη μη-γραμμική ένδειξη $d=5\text{mm}$
M7	1*	1*		Το δοκίμιο περιέχει περιοχές χωρίς συγκόλληση
M10	1	1		Το δοκίμιο είναι αποδεκτό
M11	1	1		Το δοκίμιο είναι αποδεκτό

M12	1	1		Το δοκίμιο είναι αποδεκτό
M13	1	1		Το δοκίμιο είναι αποδεκτό
M14	1	1		Το δοκίμιο είναι αποδεκτό

* Στα δοκίμια περιέχουν περιοχές χωρίς συγκόλληση γίνεται αξιολόγηση μόνο σε συγκεκριμένα τμήματα τους

Σύμφωνα με την αξιολόγηση που παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια της πρώτης σειράς συγκολλήσεων παρόλο που δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική ένδειξη, με εξαίρεση το δοκίμιο M1, περιέχουν περιοχές χωρίς συγκόλληση. Αντίθετα, τα δοκίμια της δεύτερης σειράς δεν περιέχουν καμία ένδειξη και είναι αποδεκτά και επιπέδου 1.

4.3 Μηχανικές ιδιότητες

4.3.1 Εφελκυσμός

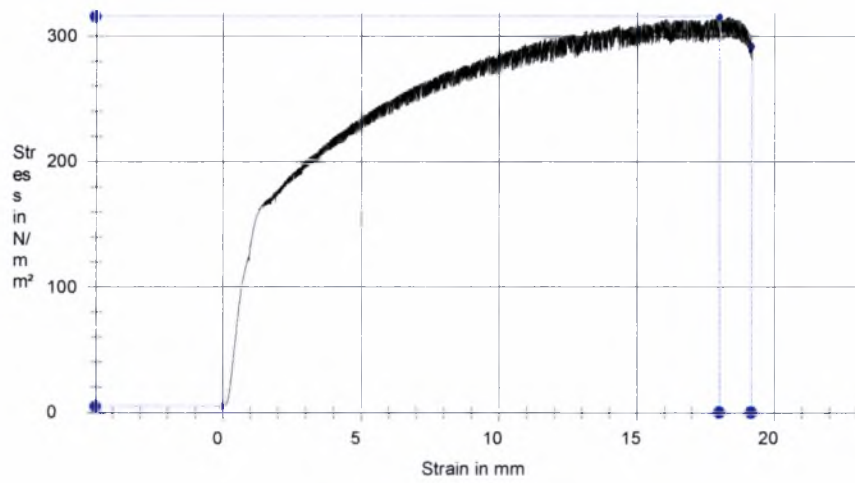
Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού για το μέταλλο βάσης.

Πίνακας 18 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού μετάλλου βάσης

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Αρχικό μήκος (mm)	Τελικό μήκος (mm)	A ₅₀ (%)	Όριο διαρροής (N/mm ²)	Όριο θραύσης (N/mm ²)
B ₁₁	12	1.98	50	62.1	24.3	166	316
B ₁₂	12	1.98	50	60.3	20.6	161	313
B ₂₁	12	2.0	50	60.8	21.6	155	307
B ₂₂	12	2.0	50	59.0	18.0	158	304
5083-0 προδιαγραφή	-	-	-	-	19	160	315

Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού του μετάλλου βάσης, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του εφελκυσμού των δοκιμίων είναι πάνω από τις ελάχιστες τιμές που μας δίνει η προδιαγραφή εκτός του B₂₂, του ορίου διαρροής και θραύσης του B₂₁ και του ορίου θραύσης του B₁₂ των οποίων οι τιμές είναι ελαφρώς πιο χαμηλές. Η απόκλιση αυτή πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν είναι εμφανής η διεύθυνση έλασης των δοκιμίων και έτσι δεν γνωρίζουμε ποιες από τις δοκιμές έγιναν παράλληλα και ποιες κάθετα στη διεύθυνση έλασης. Γενικά όμως, μπορούμε να πούμε ότι το υλικό υπόκειται 20% επιμήκυνση με τάση διαρροής περίπου 160 N/mm² και όριο θραύσης περίπου 315 N/mm².

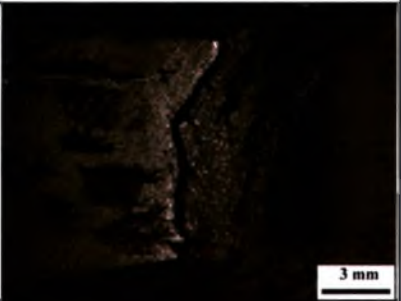
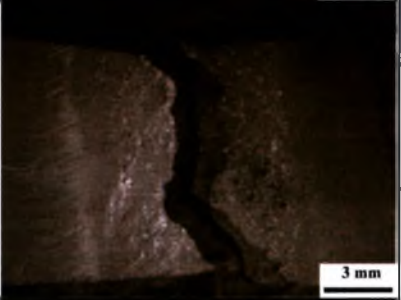


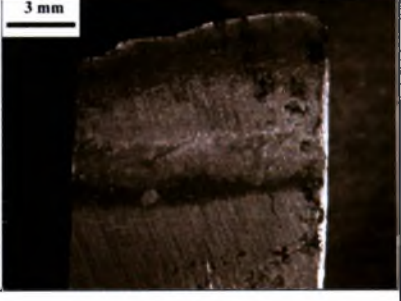
Παρακάτω, στο Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης-μετατόπισης του δοκιμίου B₁₁.



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης δοκιμίου B₁₁

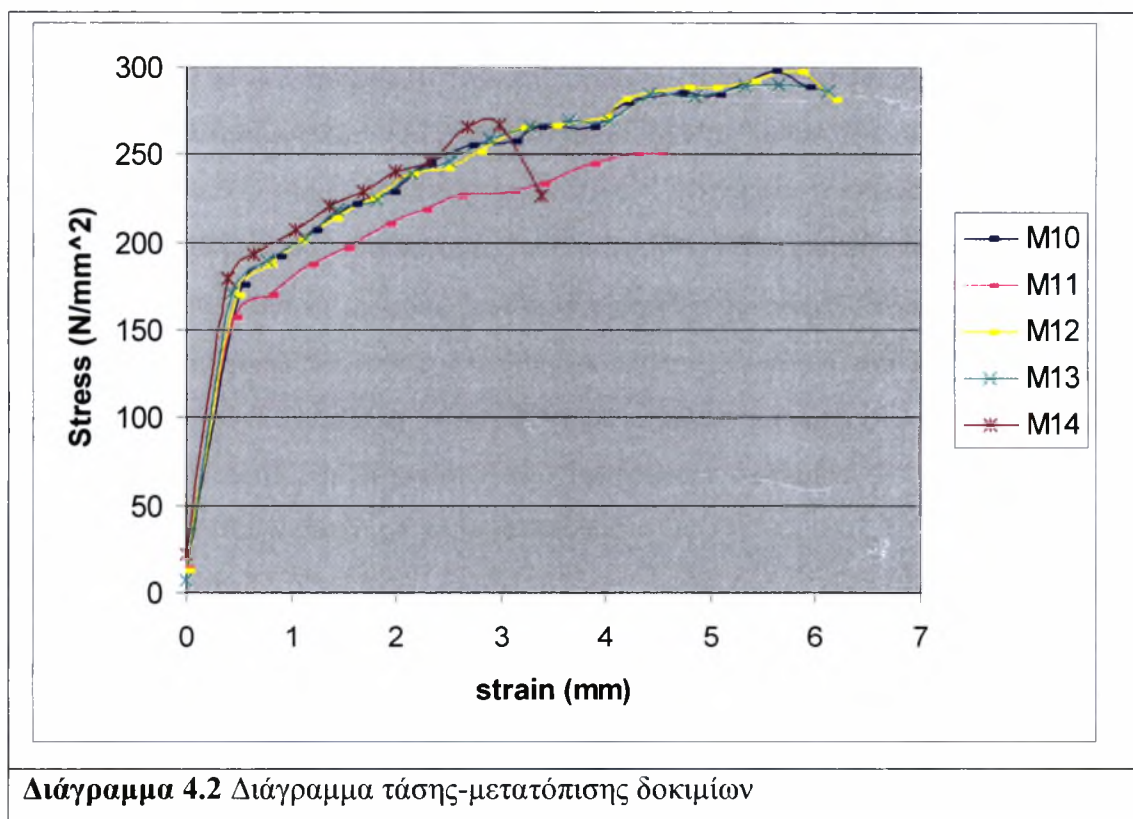
Στον **Πίνακα 19** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού των συγκολλητών δοκιμίων.

Πίνακας 19 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού συγκολλητών δοκιμίων

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Τάση διαρροής (N/mm ²)	Τάση θραύσης (N/mm ²)	Θέση θραύσης	Φωτογραφία
M ₁₀	12	1,74	174	299	Λίμνη συγκόλλησης	
M ₁₁	12	1,98	155	257	Λίμνη συγκόλλησης	
M ₁₂	12	1,81	170	303	Λίμνη συγκόλλησης	
M ₁₃	12	1,76	173	302	Λίμνη συγκόλλησης	
M ₁₄	12	1,73	177	275	Εκτός της λίμνης συγκόλλησης	
Συγκολλητά 5083 με 5183 (ASM Specialty Handbook)	-	-	155	290	-	-


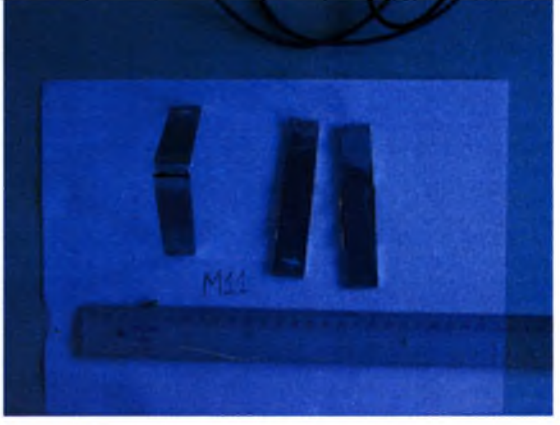

Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού των συγκολλητών δοκιμίων, παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής από 0 μέχρι 22 N/mm^2 , ενώ το όριο θραύσης μόνο τα δοκίμια M10, M12 και M13 κατά 9, 13 και 12 N/mm^2 αντίστοιχα. Τα συγκολλητά δοκίμια σε σχέση με τα δοκίμια του μετάλλου βάσης διατηρούν σχεδόν στα ίδια επίπεδα το όριο διαρροής, ενώ έχουν μια αισθητή διαφορά στο όριο θραύσης της τάξεως του $\sim 3.5\%$ - 18% . Η διαφορά αυτή οφείλεται, όπως βλέπουμε και στην 3^η στήλη του **Πίνακα 19**, στο γεγονός ότι τα δοκίμια παρουσίαζαν σημαντική ανομοιομορφία στο πάχος της συγκόλλησης μετά τη μηχανουργική κατεργασία αφαίρεσης υλικού για την απομάκρυνση της ενίσχυσης της συγκόλλησης.



Παρακάτω, στο **Διάγραμμα 4.2** παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης - μετατόπισης όλων των δοκιμίων.



4.3.2 Κάμψη

Πίνακας 20 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Δοκίμιο	Κάμψη σε πρόσωπο	Κάμψη σε ρίζα	Φωτογραφία δοκιμών
M10	Αποδεκτό	Αποδεκτό	
M11	Μη αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
M12	Αποδεκτό	Αποδεκτό	

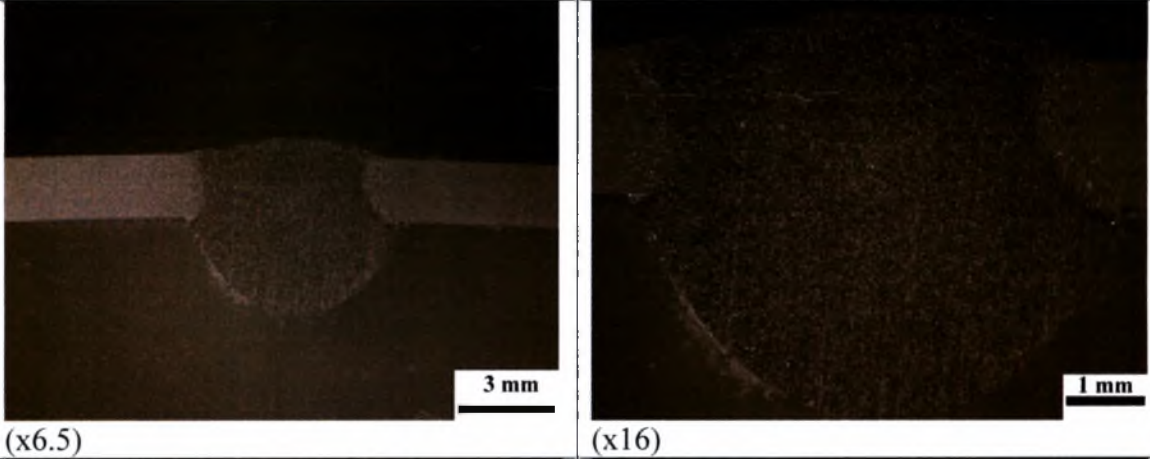
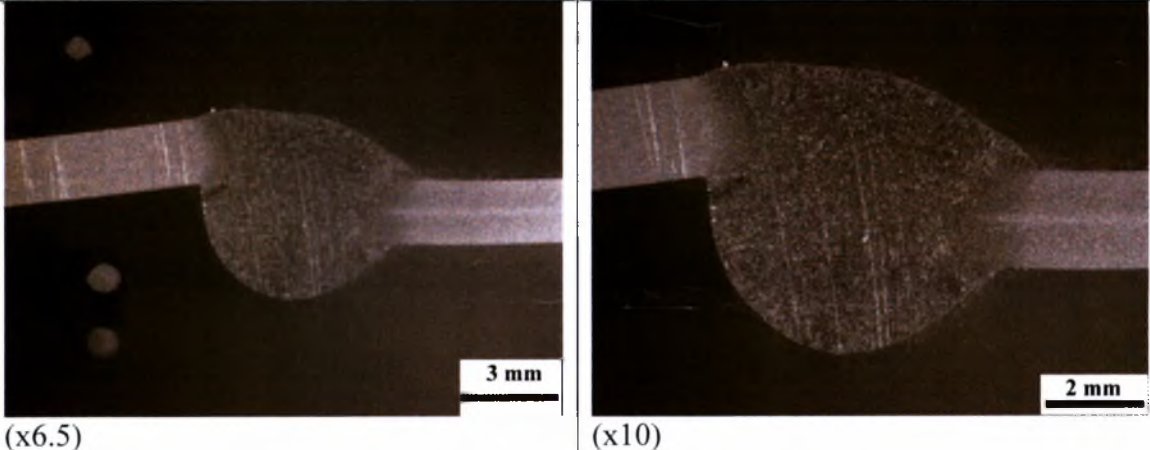
M13	Μη αποδεκτό	Μη αποδεκτό	
M14	Μη αποδεκτό	Μη αποδεκτό	

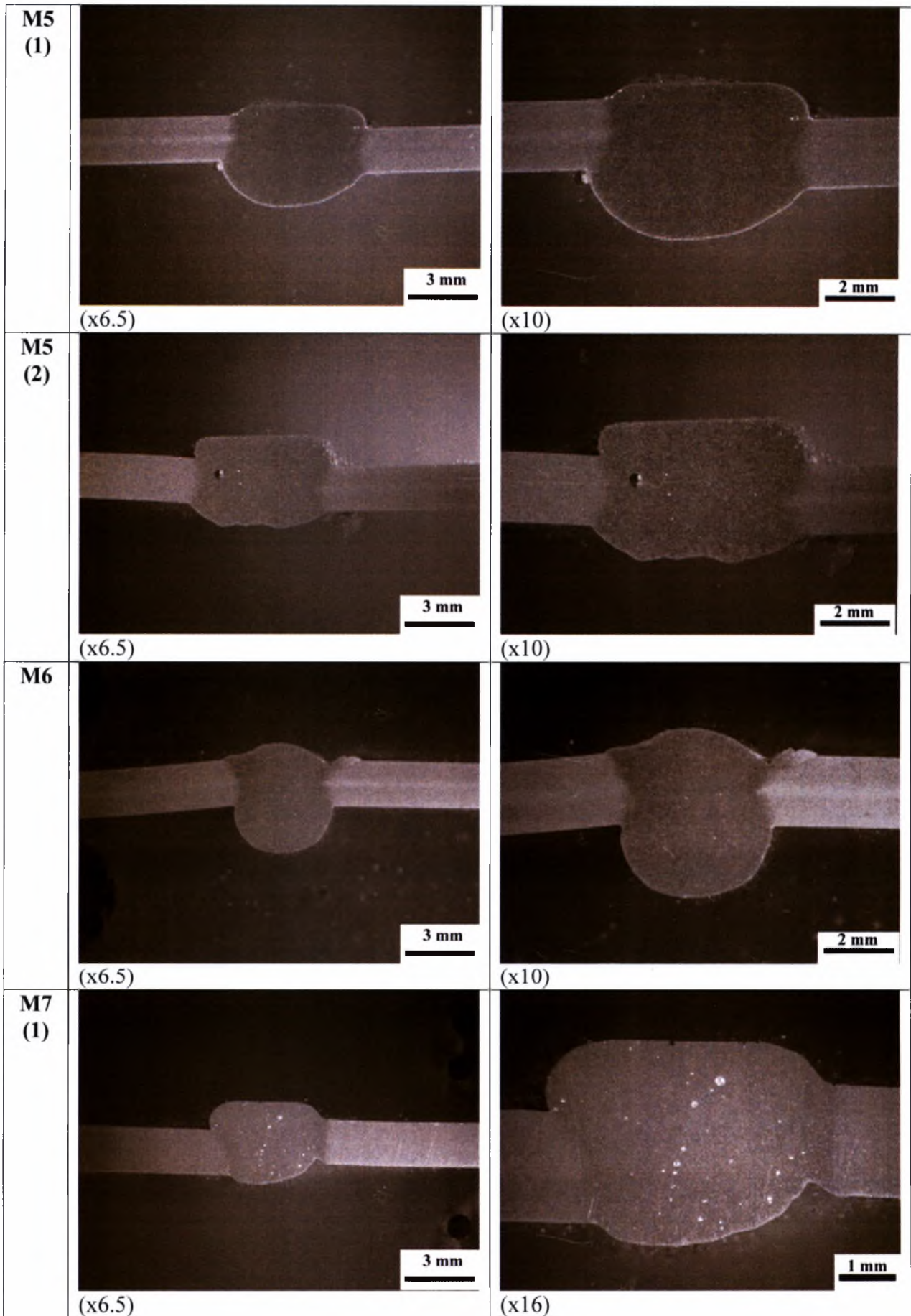
Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 20** τα μόνα δοκίμια που πέρασαν επιτυχώς τη δοκιμή κάμψης ήταν τα δοκίμια M10 και M12. Και τα δύο δοκίμια συγκολλήθηκαν με ένταση ρεύματος 65A, τάση ρεύματος 17.3V και ταχύτητα διεξαγωγής σύρματος 4m/min. Οι ταχύτητες συγκόλλησης είχαν μια διαφορά του 1.3mm/s (8.2mm/sec το M10 και 9.5mm/sec το M12 αντίστοιχα).

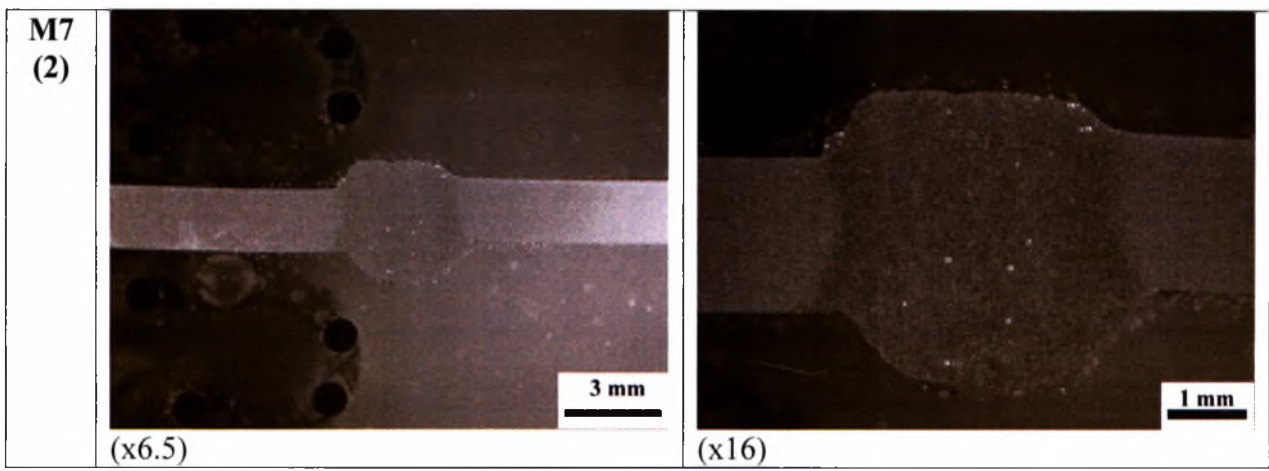
4.4 Ποιότητα συγκόλλησης σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042

Παρακάτω, στους Πίνακες 21, 22, 23, 24 παρουσιάζονται φωτογραφίες της τομής των δοκιμίων καθώς και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης τους σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042.




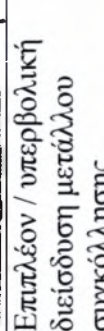
Πίνακας 21 Φωτογραφίες τομής δοκιμίων 1^{ης} σειράς συγκολλήσεων

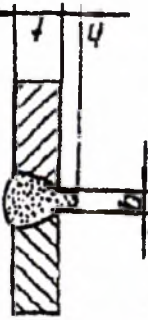
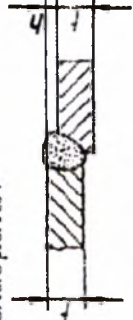
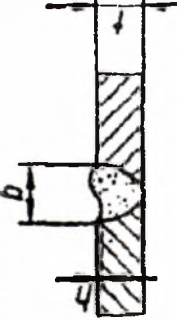
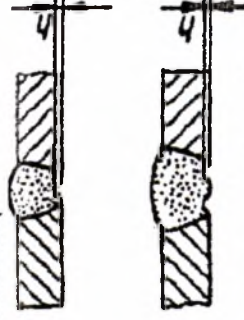
Δοκ.	Φωτογραφίες
M1	
M2	

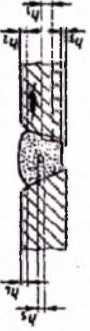




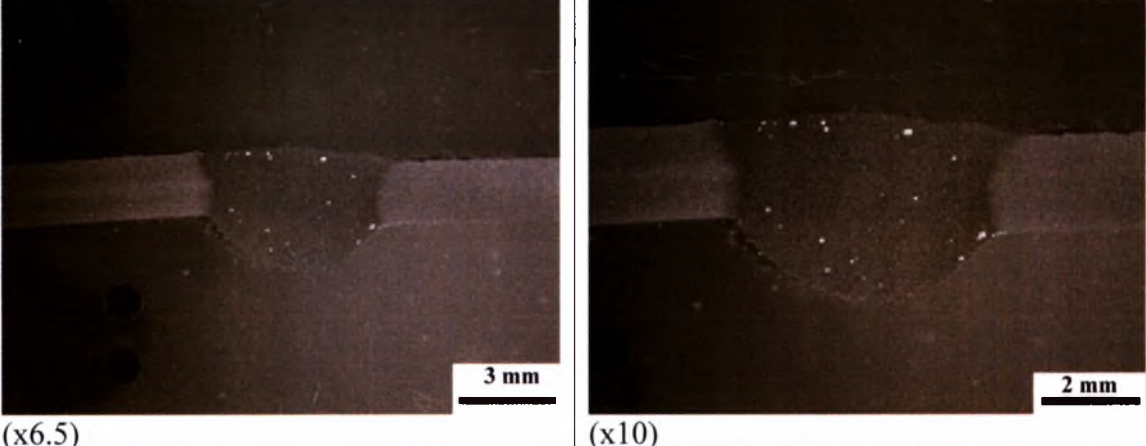
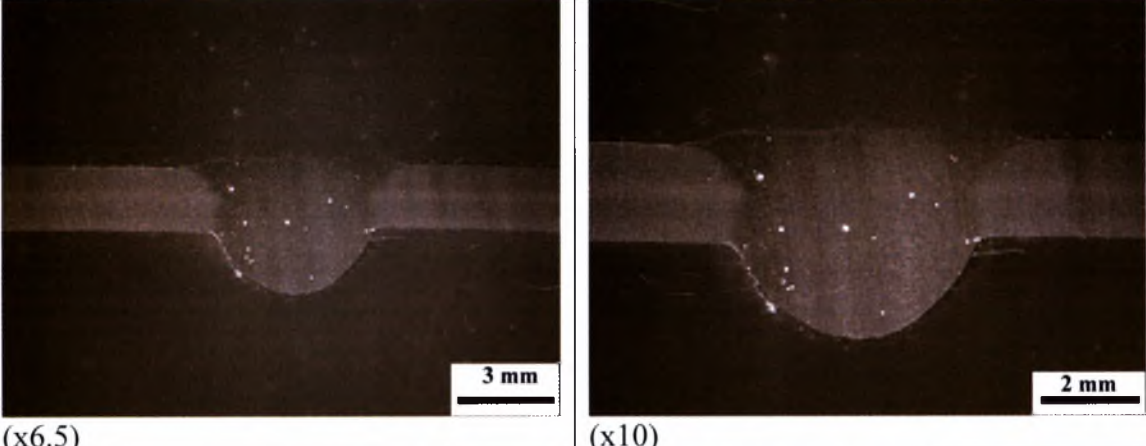
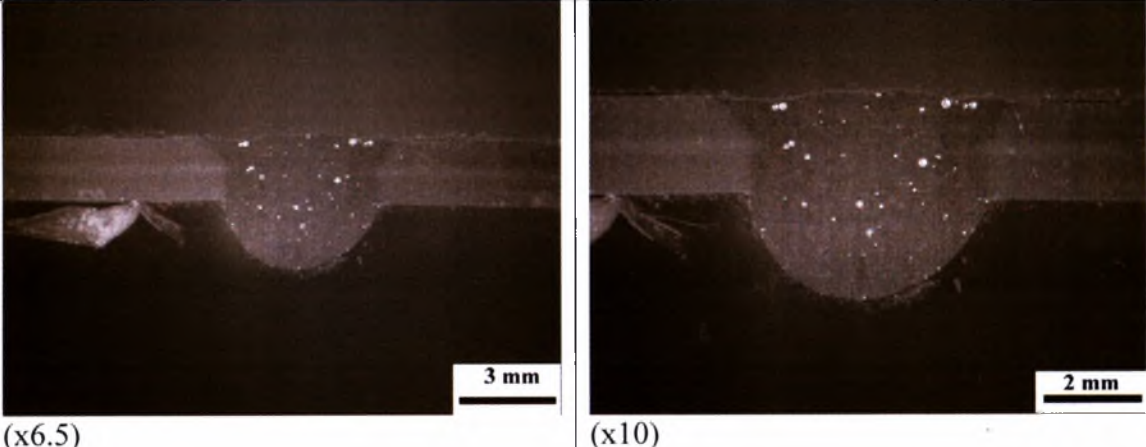
Πίνακας 22 Αποτελέσματα αξιολόγησης 1^{ης} σειράς δοκιμών σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042

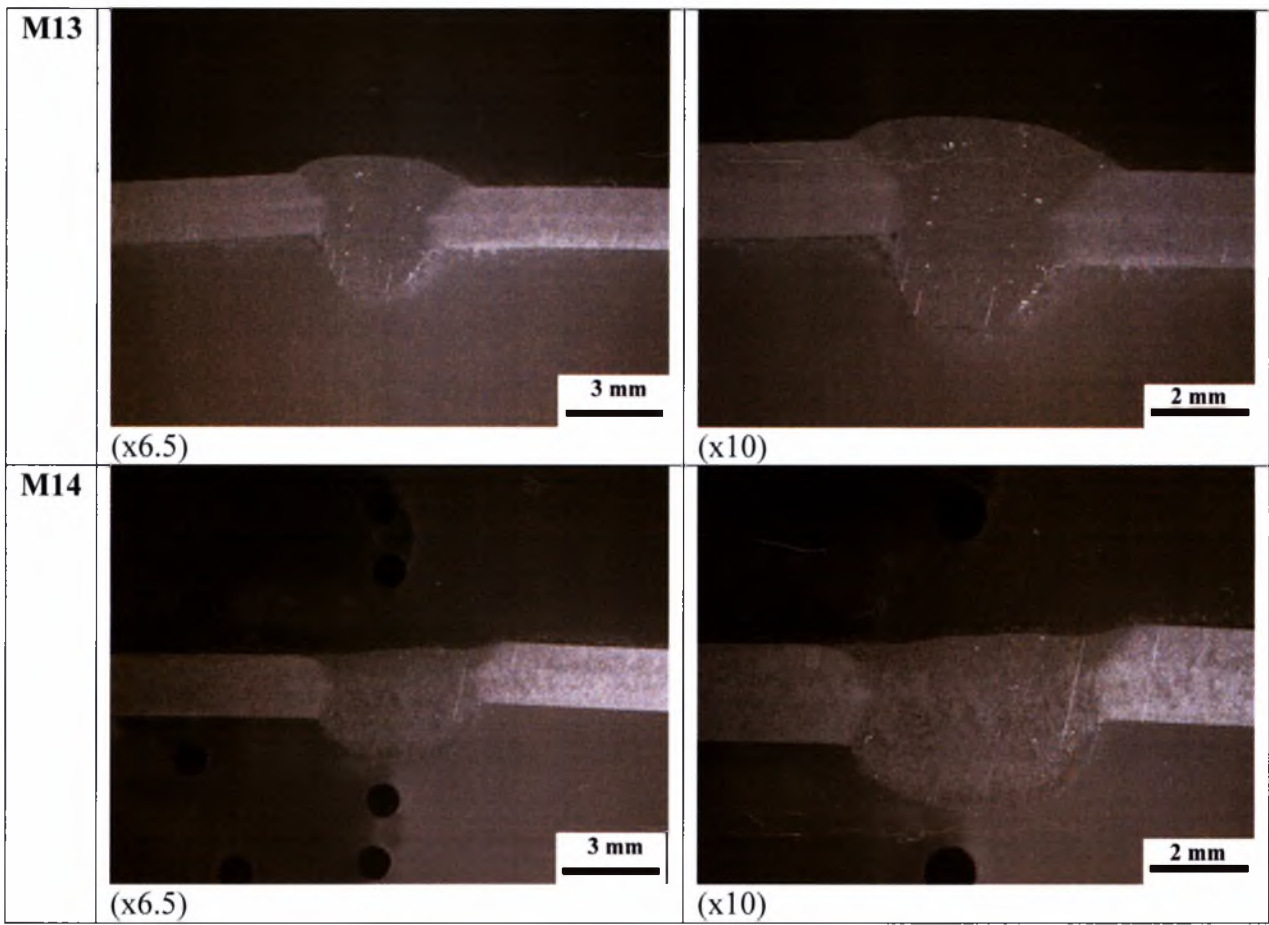
No.	Προδιορισμός ατελειών	Επίπεδο ποιότητας						
		M1	M2	M5 (1)	M5 (2)	M6	M7 (1)	M7 (2)
1	Ρωγμές	-	-	-	-	-	-	-
4	Πορόδες	-	-	-	B	B	B	B
					s=3,91mm d=0,375mm d ≤ 0,25s	s=3,57mm d=0,18mm d ≤ 0,25s		s=3,62mm d=0,08mm d ≤ 0,25s
11	Ατελής τήξη	-	-	-	-	-	-	-
12	Ατελής διείσδυση	-	-	-	-	-	-	-
								
14	Υποκοπή	-	-	-	-	C	-	-
						h = 0,6mm h ≤ 1mm		
15	Επιπέδον / υπερβολικό μέταλλο συγκόλλησης	B	C	B	B	B	B	B
		b=6mm h=0,56mm h ≤ 1,5+0,1b	b=6,56mm h=2,19mm h ≤ 1,5+0,15b	b=5,75mm h=1,04mm h ≤ 1,5+0,1b	b=6,04mm h=1,33 mm h ≤ 1,5+0,1b	b=4,56mm h=0,83mm h ≤ 1,5+0,1b	b=5,08mm h=1,41mm h ≤ 1,5+0,1b	b=3,75mm h=0,91mm h ≤ 1,5+0,1b
19	Επιπέδον / υπερβολική διείσδυση μετάλλου συγκόλλησης	B	C	B	B	B	B	B
		b=6,25mm h=2,95mm h ≤ 3mm	b=5,93mm h=3,56mm h ≤ 4mm	b=6,04mm h=2mm h ≤ 3mm	b=5,75mm h=1,04mm h ≤ 3mm	b=4,19mm h=2,08mm h ≤ 3mm	b=4,37mm h=1mm h ≤ 3mm	b=3,81mm h=1,33mm h ≤ 3mm

		<p>B</p> <p>$h=0.31mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>Απορρίπτεται</p> <p>$h=2mm$ $t=2mm$ $h \geq 0.5+0.25t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.69mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.63mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.1mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.62mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.56mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	
20	<p>Κακή ευθυγράμμιση ελασμάτων</p> 	<p>B</p> <p>$h=0.31mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>Απορρίπτεται</p> <p>$h=2mm$ $t=2mm$ $h \geq 0.5+0.25t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.69mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.63mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.1mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.62mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	<p>B</p> <p>$h=0.56mm$ $t=2mm$ $h \leq 0.5+0.1t$</p>	
21	<p>Ατελές γέμισμα αυλακιού</p> 	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	
23	<p>Ρίζα με κοιλότητα ή με συστολή</p> 	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>D</p> <p>$h=0.25mm$ $h \leq 0.2t$</p>	<p>-</p>	
24	<p>Διάφορες ατέλειες σε</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	




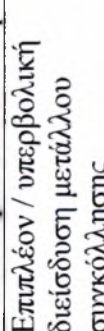
	<p>οποιαδήποτε κατεύθυνση</p> 		Απορρίπτεται	B	B	B	C	D	B
<p>Συνολικό επίπεδο ποιότητας</p>	$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10} + h_{11} + h_{12} + h_{13} + h_{14} + h_{15} + h_{16} + h_{17} + h_{18} + h_{19} + h_{20} + h_{21} + h_{22} + h_{23} + h_{24} + h_{25} + h_{26} + h_{27} + h_{28} + h_{29} + h_{30} + h_{31} + h_{32} + h_{33} + h_{34} + h_{35} + h_{36} + h_{37} + h_{38} + h_{39} + h_{40} + h_{41} + h_{42} + h_{43} + h_{44} + h_{45} + h_{46} + h_{47} + h_{48} + h_{49} + h_{50} + h_{51} + h_{52} + h_{53} + h_{54} + h_{55} + h_{56} + h_{57} + h_{58} + h_{59} + h_{60} + h_{61} + h_{62} + h_{63} + h_{64} + h_{65} + h_{66} + h_{67} + h_{68} + h_{69} + h_{70} + h_{71} + h_{72} + h_{73} + h_{74} + h_{75} + h_{76} + h_{77} + h_{78} + h_{79} + h_{80} + h_{81} + h_{82} + h_{83} + h_{84} + h_{85} + h_{86} + h_{87} + h_{88} + h_{89} + h_{90} + h_{91} + h_{92} + h_{93} + h_{94} + h_{95} + h_{96} + h_{97} + h_{98} + h_{99} + h_{100}$	B	B	B	B	C	D	B	

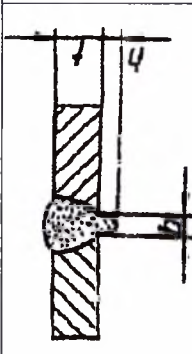
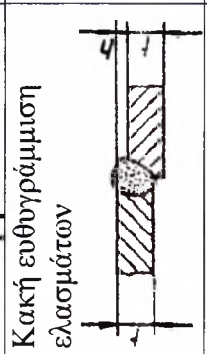
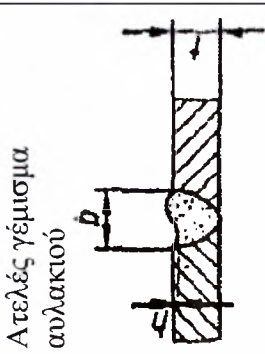
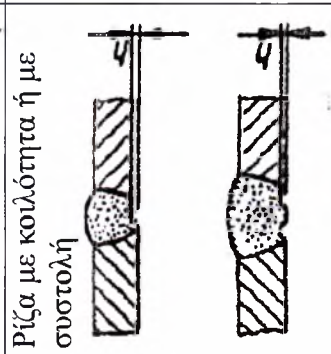
Πίνακας 23 Φωτογραφίες τομής δοκιμών 2^{ης} σειράς συγκολλήσεων

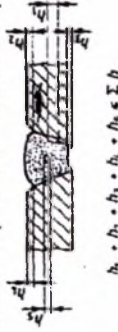
Δοκ.	Φωτογραφίες
M10	
M11	
M12	



Πίνακας 24 Αποτελέσματα αξιολόγησης 2^{ης} σειράς δοκίμων σύμφωνα με προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042

No.	Προσδιορισμός ατελειών	Επίπεδο ποιότητας				
		M10	M11	M12	M13	M14
1	Ρωγμές	-	-	-	-	-
4	Πορώδες	B s=3.62mm d=0.25mm d ≤ 0.25s	B s=4mm d=0.18mm d ≤ 0.25s	B s=4.16mm d=0.2mm d ≤ 0.25s	B s=4.2mm d=0.2mm d ≤ 0.25s	B s=3.54mm d=0.16mm d ≤ 0.25s
11	Ατελής τήξη	-	-	-	-	-
12	Ατελής διείσδυση 	-	-	-	-	-
14	Υποκοπή 	-	-	-	-	-
15	Επιπέλον / υπερβολικό μέταλλο συγκόλλησης 	B b=5.6mm h=0.62mm h ≤ 1.5mm + 0.1b	B b=5.8mm h=0.24mm h ≤ 1.5mm + 0.1b	B b=5.62mm h=0.2mm h ≤ 1.5mm + 0.1b	B b=5mm h=1.12mm h ≤ 1.5mm + 0.1b	B b=5.6mm h=0.25mm h ≤ 1.5mm + 0.1b
19	Επιπέλον / υπερβολική διείσδυση μετάλλου συγκόλλησης 	B b=5.04mm h=1.62mm h ≤ 3mm	B b=4.8mm h=2.18mm h ≤ 3mm	B b=4.8mm h=2mm h ≤ 3mm	B b=3.2mm h=1.75mm h ≤ 3mm	B b=5mm h=1.87mm h ≤ 3mm

											
20	Κακή ευθυγράμμιση ελασμάτων 	B $h=0.62\text{mm}$ $t=2\text{mm}$ $h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$	B $h=0.16\text{mm}$ $t=2\text{mm}$ $h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$	B $h=0.08\text{mm}$ $t=2\text{mm}$ $h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$	B $h=0.6\text{mm}$ $t=2\text{mm}$ $h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$	B $h=0.48\text{mm}$ $t=2\text{mm}$ $h \leq 0.5\text{mm} + 0.1t$					
21	Ατελές γέμισμα αυλακιού 	-	-	B $b=5.62\text{mm}$ $h=0.8\text{mm}$ $h \leq 0.05t$							
23	Ρίζα με κοιλότητα ή με συστολή 	-	-	-	-	-					

24	<p>Διάφορες ατέλειες σε οποιαδήποτε κατεύθυνση</p>  <p>$h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 \cdot h_4 \cdot h_5 \cdot h_6$</p>	-	-	-	-	-	-
Συνολικό επίπεδο ποιότητας		B	B	B	B	B	B

Όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες της τομής των δοκιμίων καθώς και από την αξιολόγηση ΕΛΟΤ EN 30042, στα περισσότερα δοκίμια παρουσιάστηκε υπερβολική διείδυση μετάλλου συγκόλλησης (αριθμός 21 προδιαγραφής), αλλά λόγω του ότι η προδιαγραφή επιτρέπει την υπερβολική διείδυση μετάλλου συγκόλλησης έως και 3mm, πολλά από τα δοκίμια χαρακτηρίστηκαν ποιότητας B. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η προδιαγραφή, αν και αναφέρει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για λεπτότερα ελάσματα, αναφέρεται κυρίως σε ελάσματα πάχους από 3 έως 63mm. Επιπλέον, στα περισσότερα δοκίμια υπήρχαν πόροι αλλά ήταν εντός της ανοχής της προδιαγραφής. Το κυριότερο πρόβλημα ήταν η κακή ευθυγράμμιση ορισμένων δοκιμίων (κυρίως της πρώτης σειράς) η οποία αν και ήταν μέσα στα επίπεδα ανοχής της προδιαγραφής, οφείλονταν σε μεγάλο βαθμό στις στρεβλώσεις των δοκιμίων λόγω των εσωτερικών τάσεων. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί το δοκίμιο M14 στο οποίο υπάρχει μια υποψία για ατελής γέμισμα του αυλακιού το οποίο οφείλεται στην κακή ευθυγράμμιση των ελασμάτων.

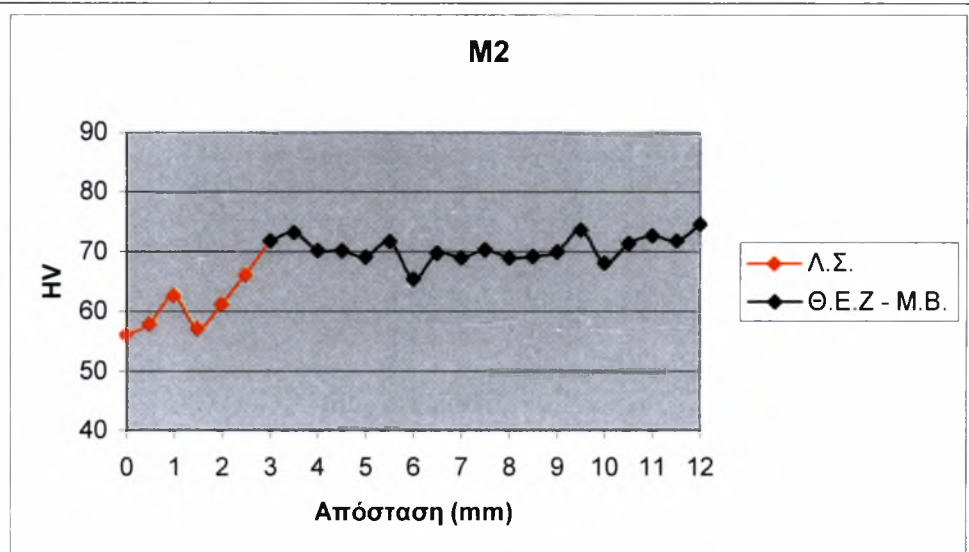
4.5 Μικροσκληρομέτρηση

Παρακάτω, στον **Πίνακα 25** παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης των δοκιμίων.

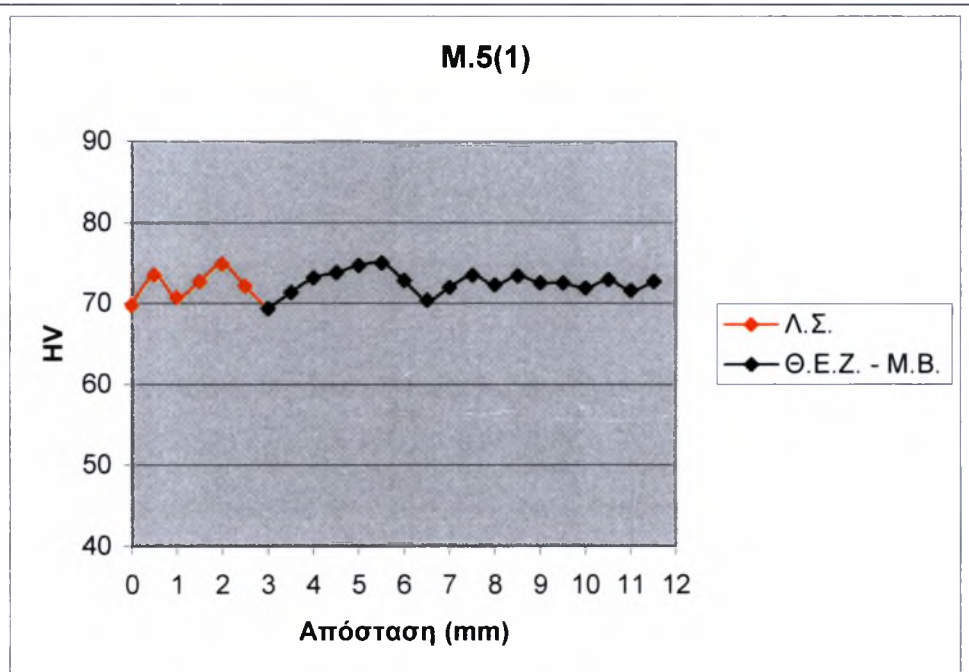
Πίνακας 25 Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίων

Δοκίμιο	Διάγραμμα																																																															
Μέταλλο βάσης	<p style="text-align: center;">Μέταλλο Βάσης</p> <table border="1"> <caption>Data for Metal Base Graph</caption> <thead> <tr> <th>Μετρήσεις</th> <th>HV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>68</td></tr> <tr><td>2</td><td>69</td></tr> <tr><td>3</td><td>70</td></tr> <tr><td>4</td><td>69</td></tr> <tr><td>5</td><td>70</td></tr> <tr><td>6</td><td>69</td></tr> </tbody> </table>	Μετρήσεις	HV	1	68	2	69	3	70	4	69	5	70	6	69																																																	
Μετρήσεις	HV																																																															
1	68																																																															
2	69																																																															
3	70																																																															
4	69																																																															
5	70																																																															
6	69																																																															
M1	<p style="text-align: center;">M1</p> <table border="1"> <caption>Data for M1 Graph</caption> <thead> <tr> <th>Απόσταση (mm)</th> <th>HV (Λ.Σ.)</th> <th>HV (Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>62</td><td>-</td></tr> <tr><td>1</td><td>58</td><td>-</td></tr> <tr><td>1</td><td>66</td><td>-</td></tr> <tr><td>2</td><td>67</td><td>-</td></tr> <tr><td>2</td><td>62</td><td>-</td></tr> <tr><td>3</td><td>65</td><td>-</td></tr> <tr><td>3</td><td>70</td><td>72</td></tr> <tr><td>4</td><td>72</td><td>73</td></tr> <tr><td>5</td><td>76</td><td>73</td></tr> <tr><td>5</td><td>72</td><td>70</td></tr> <tr><td>6</td><td>70</td><td>70</td></tr> <tr><td>7</td><td>76</td><td>70</td></tr> <tr><td>8</td><td>74</td><td>74</td></tr> <tr><td>8</td><td>74</td><td>73</td></tr> <tr><td>9</td><td>76</td><td>71</td></tr> <tr><td>9</td><td>76</td><td>76</td></tr> <tr><td>10</td><td>71</td><td>71</td></tr> <tr><td>11</td><td>73</td><td>71</td></tr> <tr><td>11</td><td>71</td><td>70</td></tr> <tr><td>12</td><td>71</td><td>71</td></tr> </tbody> </table>	Απόσταση (mm)	HV (Λ.Σ.)	HV (Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β.)	0	62	-	1	58	-	1	66	-	2	67	-	2	62	-	3	65	-	3	70	72	4	72	73	5	76	73	5	72	70	6	70	70	7	76	70	8	74	74	8	74	73	9	76	71	9	76	76	10	71	71	11	73	71	11	71	70	12	71	71
Απόσταση (mm)	HV (Λ.Σ.)	HV (Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β.)																																																														
0	62	-																																																														
1	58	-																																																														
1	66	-																																																														
2	67	-																																																														
2	62	-																																																														
3	65	-																																																														
3	70	72																																																														
4	72	73																																																														
5	76	73																																																														
5	72	70																																																														
6	70	70																																																														
7	76	70																																																														
8	74	74																																																														
8	74	73																																																														
9	76	71																																																														
9	76	76																																																														
10	71	71																																																														
11	73	71																																																														
11	71	70																																																														
12	71	71																																																														

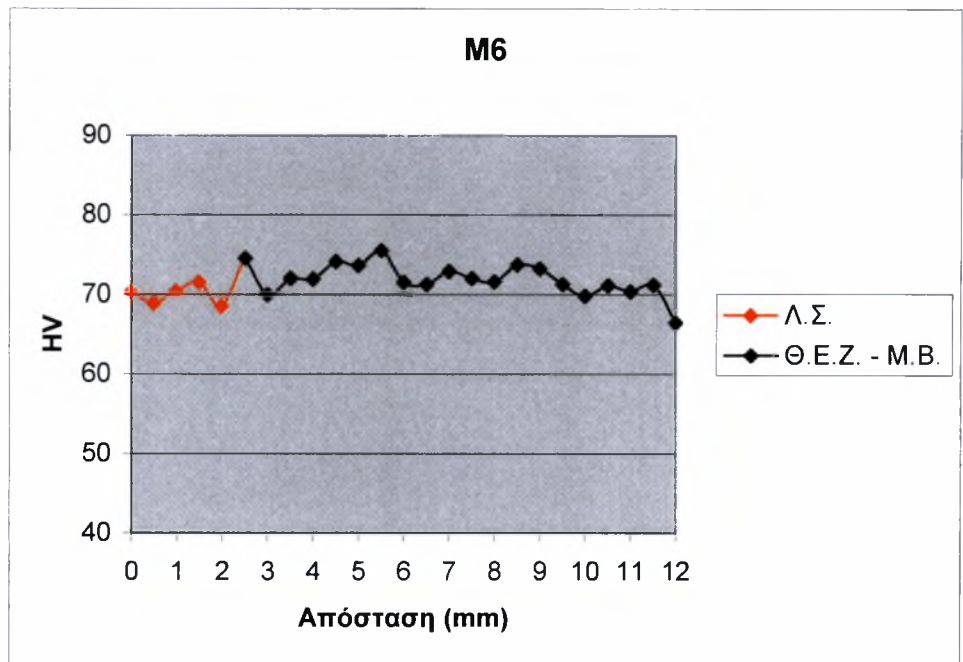
M2



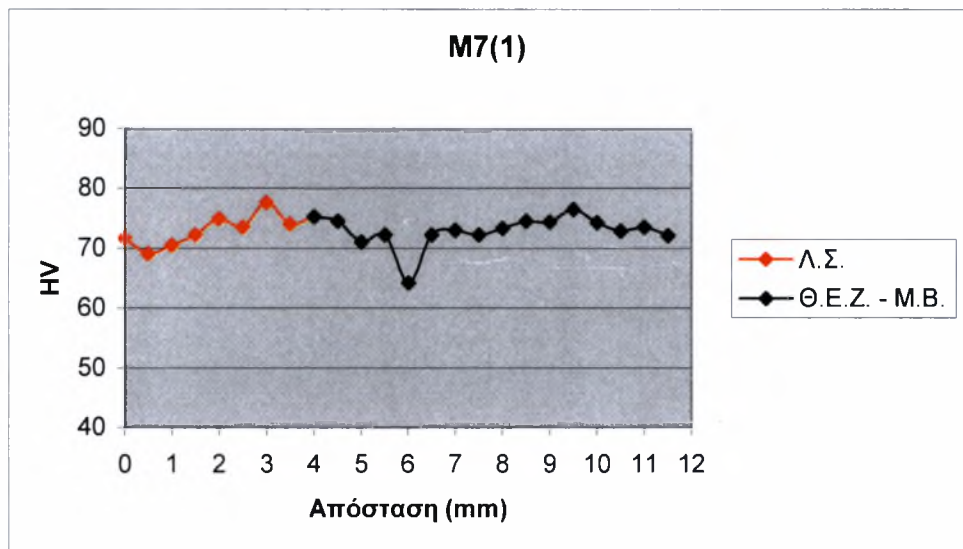
M5(1)



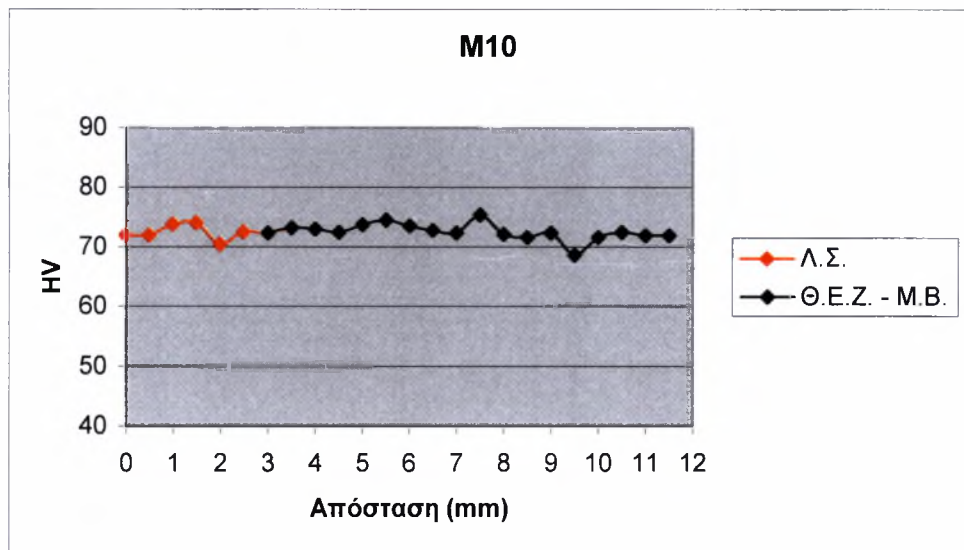
M6



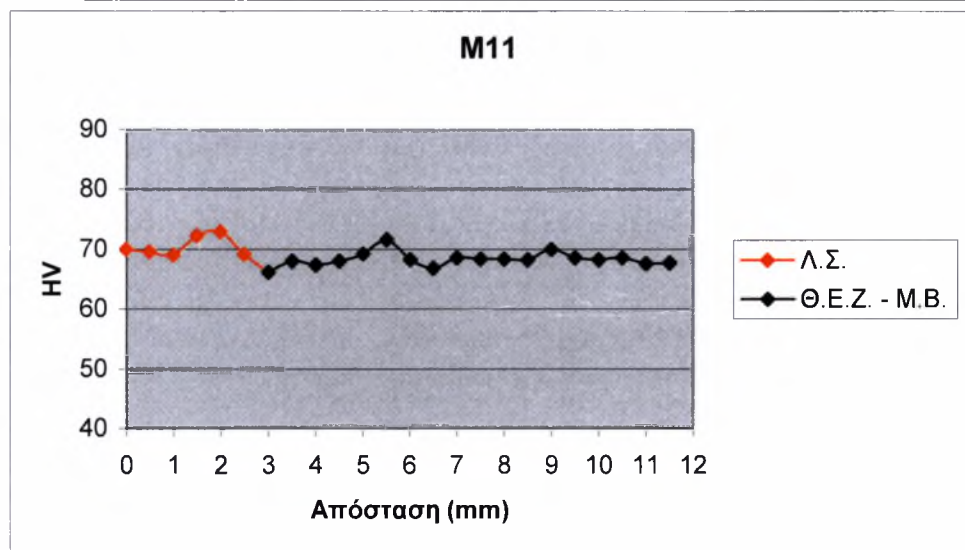
M7(1)



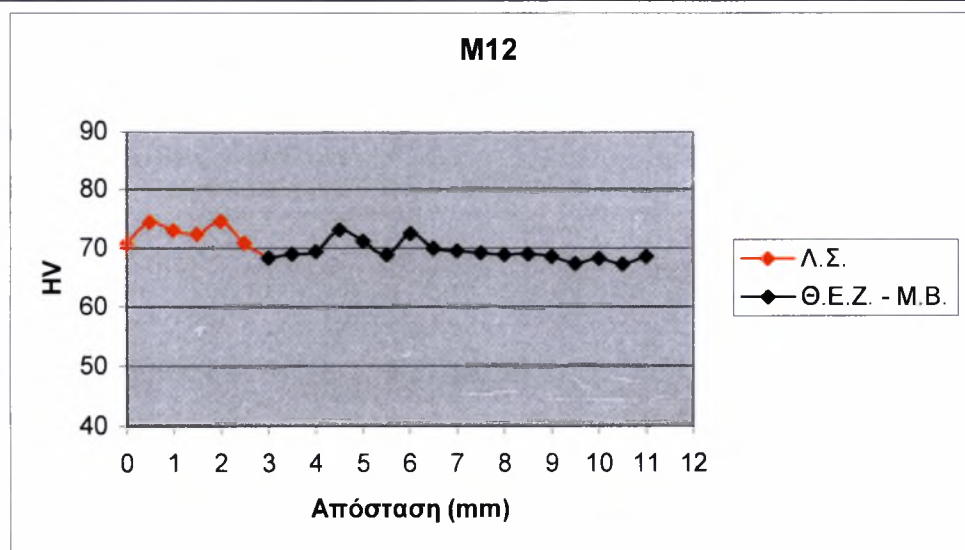
M10

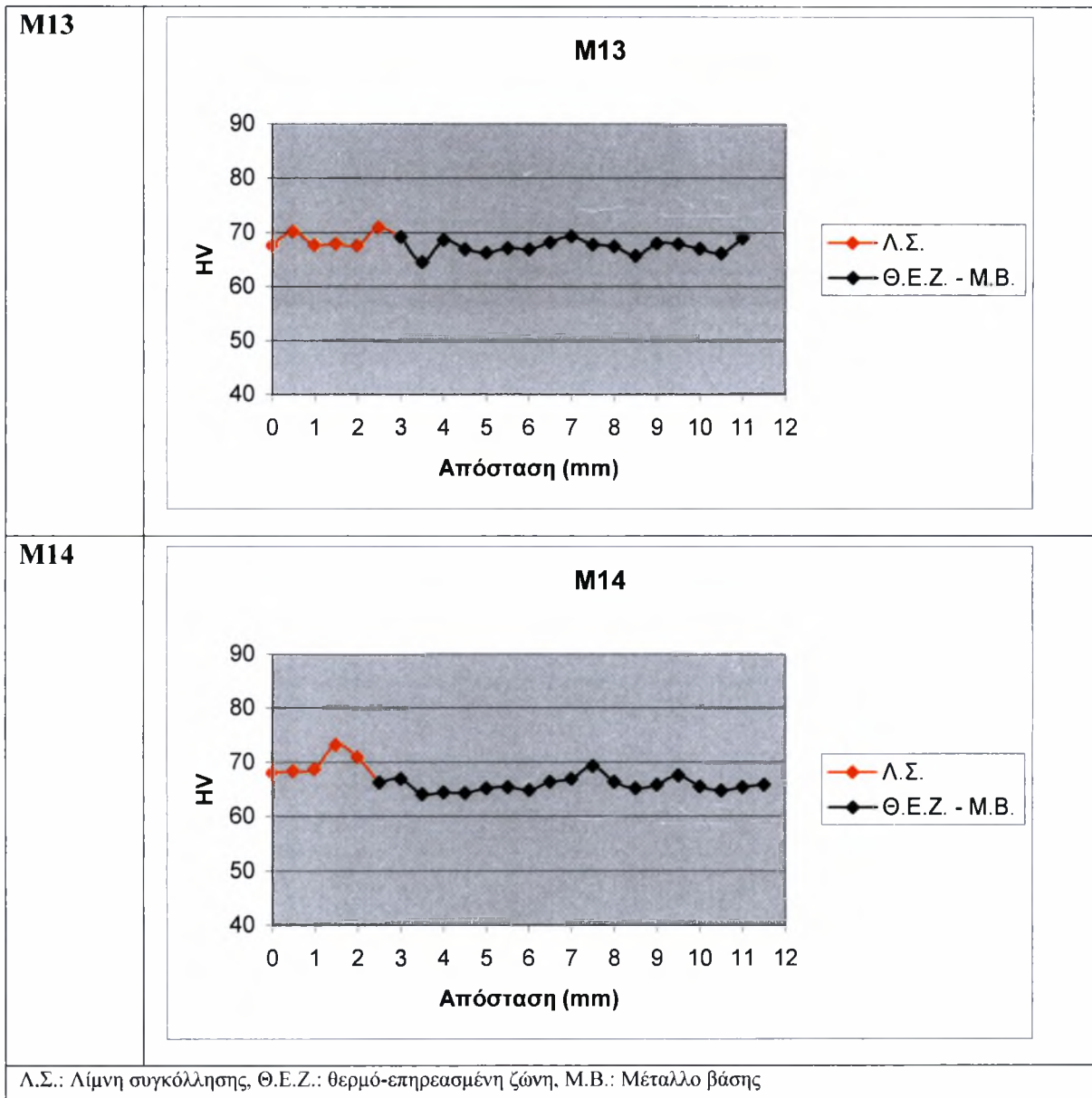


M11



M12



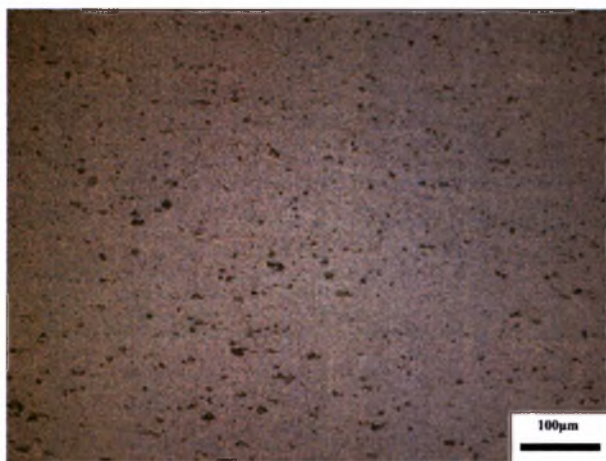


Στα προφίλ σκληρότητας των δοκιμίων παρατηρούμε πολύ μικρές μεταβολές των τιμών της σκληρομέτρησης καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο της συγκόλλησης. Έτσι, δεν είναι εμφανές στα διαγράμματα τα όρια της Θ.Ε.Ζ. και του μετάλλου βάσης που έχει μείνει ανεπηρέαστο από τη συγκόλληση. Αυτό ήταν αναμενόμενο να συμβεί δεδομένου ότι τα υλικά πλήρωσης, που ήταν κράματος 5386 και 5183, δεν παρουσιάζουν αισθητή διαφορά σκληρότητας από το μέταλλο βάσης (5083). Επιπλέον, το κράμα 5083 είναι θερμικά μη-κατεργάσιμο με αποτέλεσμα να μην έχουμε μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού στη Θ.Ε.Ζ. όπου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είχαμε την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε καμία αισθητή διαφορά ανάμεσα στα προφίλ σκληρότητας των δοκιμίων λόγω των αλλαγών ορισμένων παραμέτρων της συγκόλλησης.

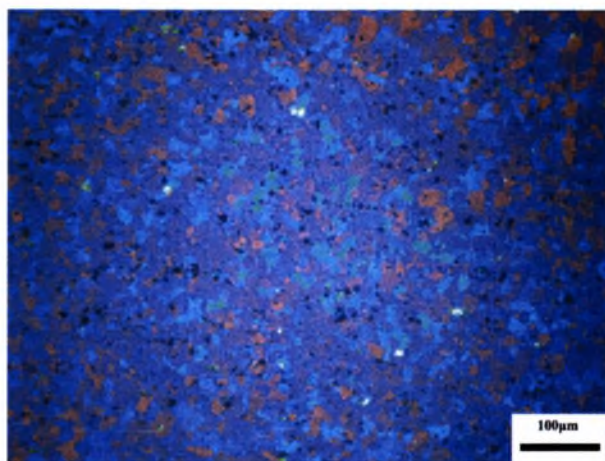
4.6 Μικροσκοπικός έλεγχος

4.6.1 Μικροδομή μετάλλου βάσεως

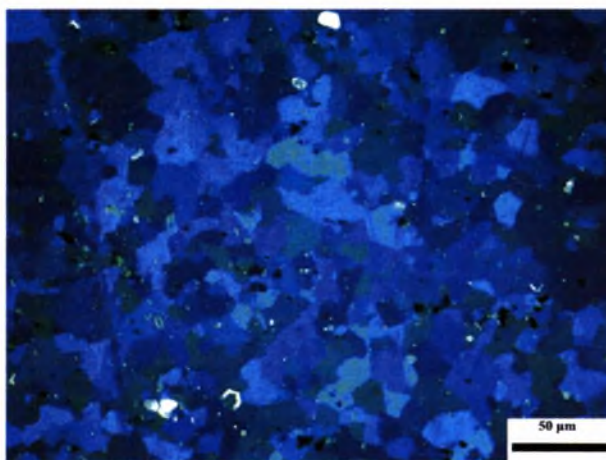
Στις **Εικόνες 4.1 –4.3** παρουσιάζονται φωτογραφίες τις μικροδομής του μετάλλου βάσεως από το μικροσκόπιο.



Εικόνα 4.1 Μικροδομή μετάλλου βάσεως (χωρίς χημική προσβολή δοκιμίου)



Εικόνα 4.2 Μικροδομή μετάλλου βάσεως μετά από ηλεκτρολυτική προσβολή (πολωμένο φως)



Εικόνα 4.3 Μικροδομή μετάλλου βάσεως μετά από ηλεκτρολυτική προσβολή (πολωμένο φως)

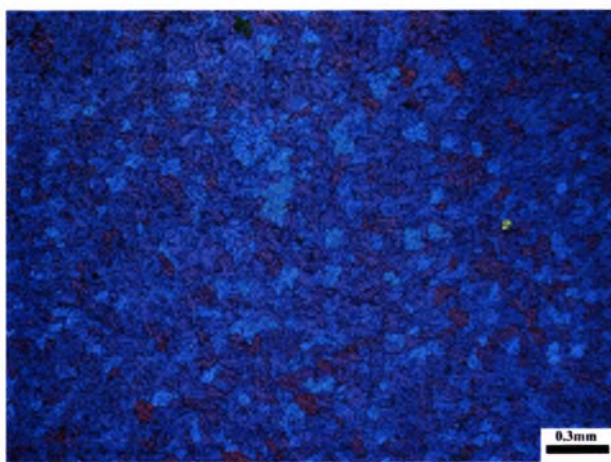
Στην **Εικόνα 4.1** παρουσιάζεται φωτογραφία της μικροδομής του μετάλλου βάσεως χωρίς χημική προσβολή του δοκιμίου. Τα μαύρα στίγματα που εμφανίζονται είναι διάφορες αδιάλυτες φάσεις, όπως ενώσεις μαγνησίου (π.χ. Mg_2Si). Για

λεπτομερής χημική ανάλυση των διαφόρων φάσεων που εμφανίζονται, θα πρέπει να γίνει μια σειρά πειραματικών διαδικασιών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

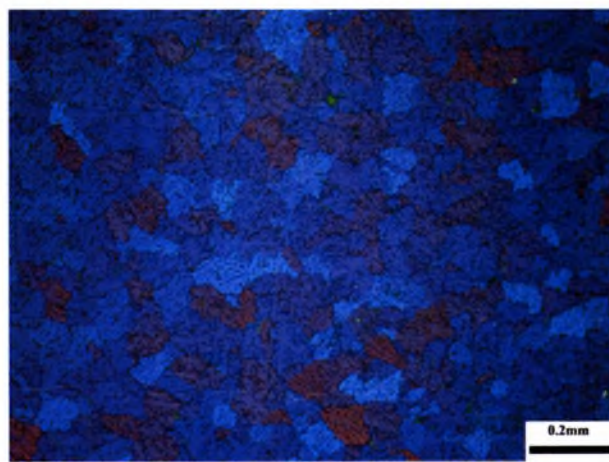
Στις **Εικόνες 4.2** και **4.3** παρουσιάζονται φωτογραφίες της μικροδομής του μετάλλου βάσεως μετά από ηλεκτρολυτική προσβολή του δοκιμίου υπό την παρουσία πολωμένου φωτός. Στις φωτογραφίες αυτές, φαίνεται ότι το μέσο μέγεθος κόκκου του μετάλλου βάσεως είναι περίπου 15 μ m. Γενικά, το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται μεταξύ 12~30 μ m και έτσι συμπεραίνουμε ότι το κράμα 5083-0 είναι ένα λεπτόκοκκο υλικό. Τέλος, με βάση τον μικροσκοπικό έλεγχο του μετάλλου βάσεως, οι κόκκοι είναι ισοαξονικοί και επομένως η διεύθυνση έλασης των δοκιμίων δεν είναι εμφανείς.

4.6.2 Μικροδομή συγκολλητών δοκιμίων

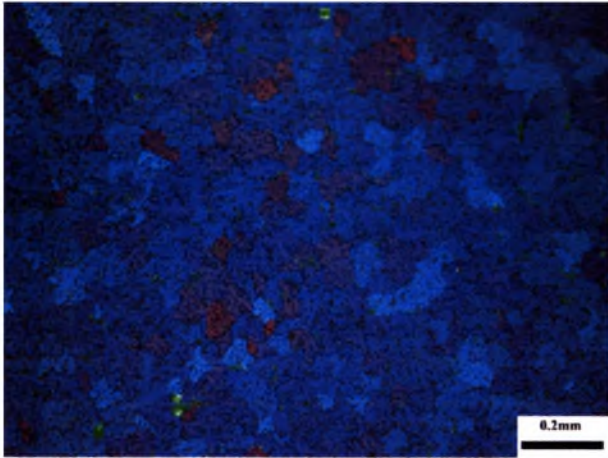
Για τον έλεγχο της μικροδομής των συγκολλητών δοκιμίων, επιλέχθηκαν για εξέταση τα δοκίμια M1 και M2, καθώς όπως βλέπουμε στον **Πίνακα 7** είναι τα δοκίμια με το χαμηλότερο και υψηλότερο ρυθμό απόδοσης θερμότητας αντίστοιχα, το δοκίμιο M12, καθώς είναι δοκίμιο που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα στον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων, και τέλος τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμή εφελκυσμού από τις συγκολλήσεις M12 και M14.



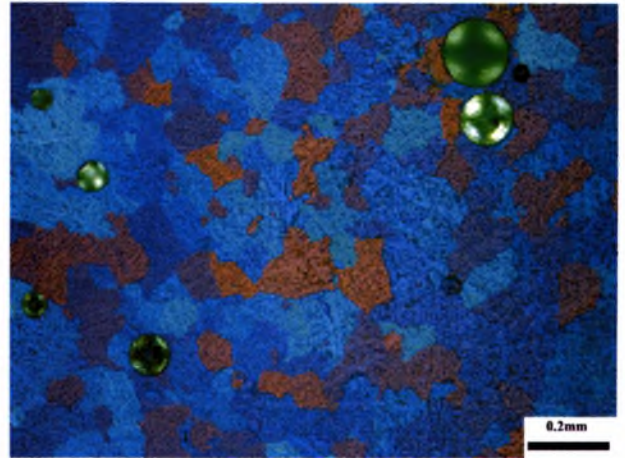
Εικόνα 4.4 Μικροδομή δοκιμίου M1 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης



Εικόνα 4.5 Μικροδομή δοκιμίου M1 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης

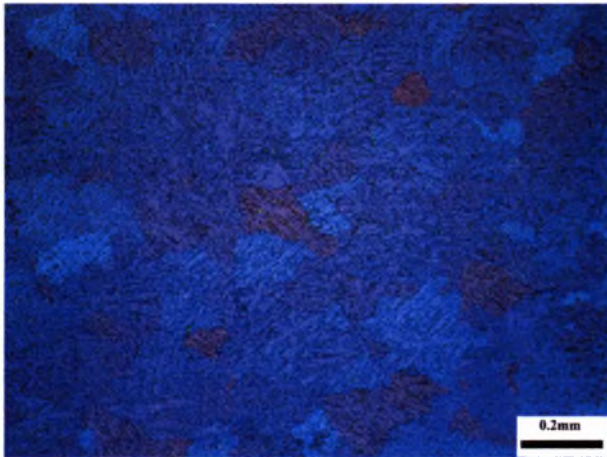


Εικόνα 4.6 Μικροδομή δοκιμίου M2 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης

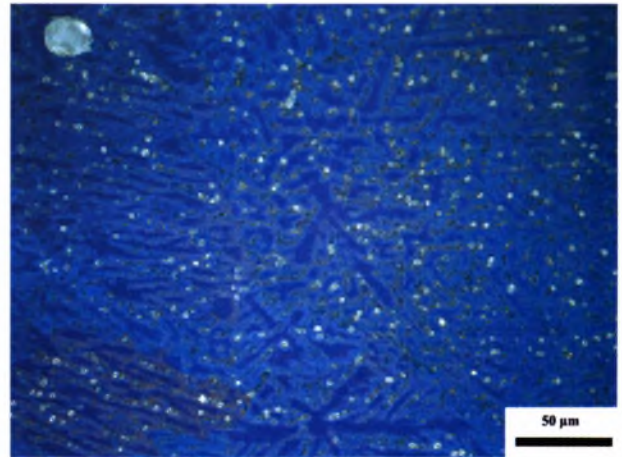


Εικόνα 4.7 Μικροδομή δοκιμίου M12 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης

Παρατηρούμε ότι στο κέντρο της συγκόλλησης ανεξαρτήτως της διαφοράς του ρυθμού πρόσδοσης θερμότητας, τα δοκίμια έχουν παρόμοιο μέσο μέγεθος κόκκων, περίπου 75 μ m. Στην **Εικόνα 4.7** τα μεγάλα κιτρινόμαυρα στίγματα που φαίνονται, είναι πόροι. Τέλος, στους κόκκους της λίμνης παρατηρούμε την ανάπτυξη δενδριτών. Οι δενδρίτες είναι ευδιάκριτοι παρακάτω στις **Εικόνες 4.8** και **4.9**.

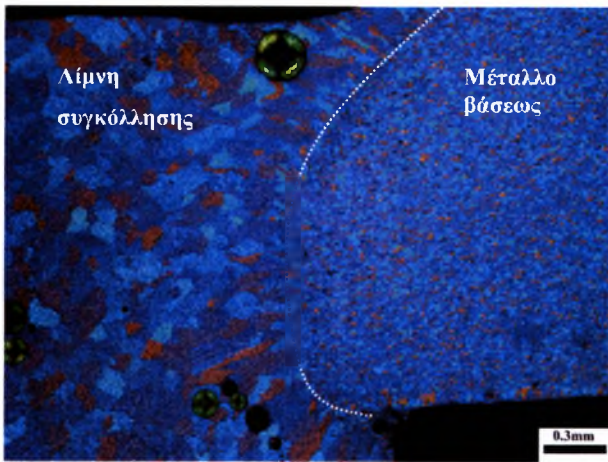


Εικόνα 4.8 Μικροδομή δοκιμίου εφελκυσμού M14 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης

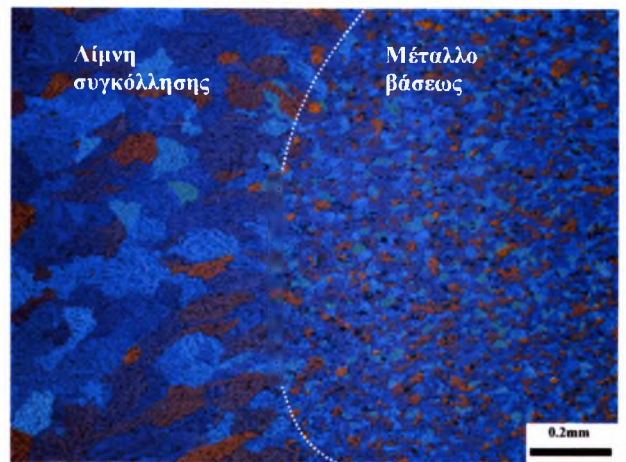


Εικόνα 4.9 Μικροδομή δοκιμίου εφελκυσμού M14 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης

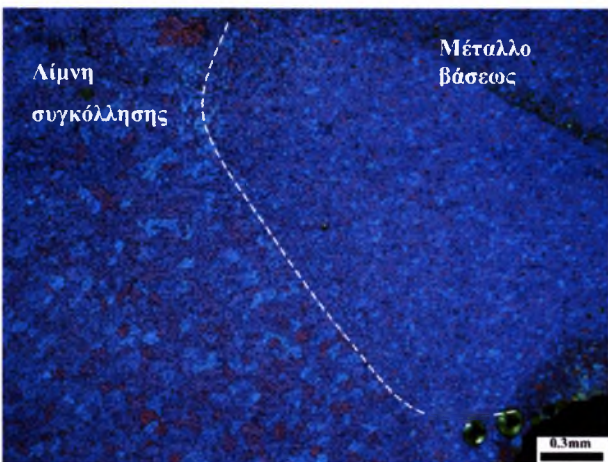
Στις **Εικόνες 4.10** έως **4.15** παρουσιάζονται τα όρια της λίμνης συγκόλλησης και του μετάλλου βάσεως των δοκιμίων M1, M2 και M12.



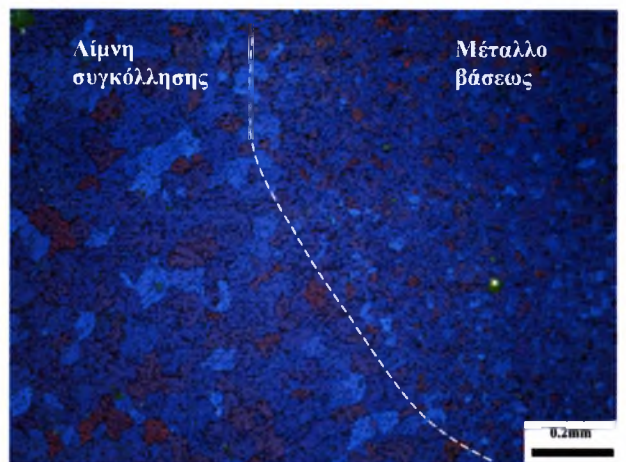
Εικόνα 4.10 Μικροδομή δοκιμίου M12 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως



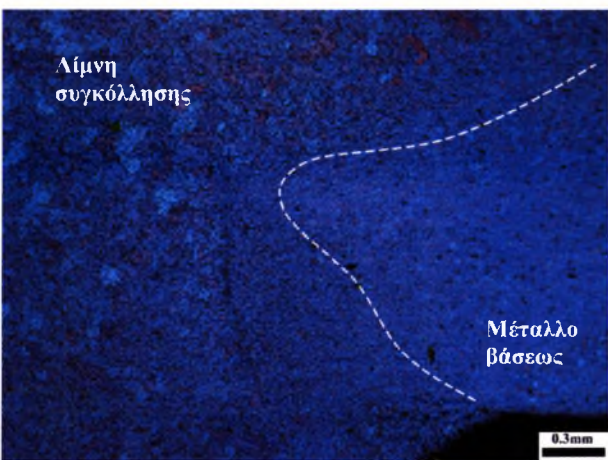
Εικόνα 4.11 Μικροδομή δοκιμίου M12 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως



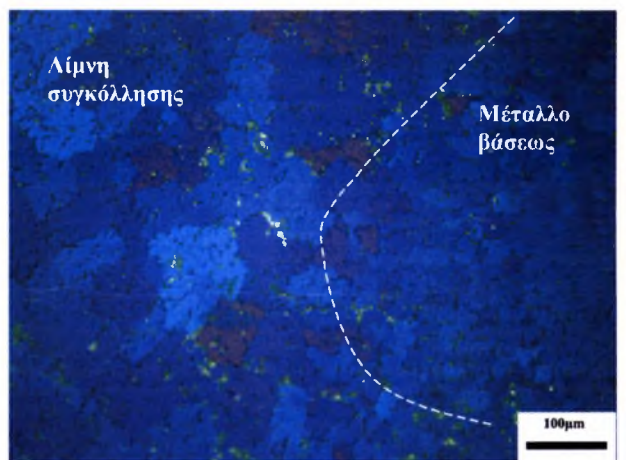
Εικόνα 4.12 Μικροδομή δοκιμίου M1 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως



Εικόνα 4.13 Μικροδομή δοκιμίου M1 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως



Εικόνα 4.14 Μικροδομή δοκιμίου M2 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως



Εικόνα 4.15 Μικροδομή δοκιμίου M2 στο όριο λίμνης συγκόλλησης-μετάλλου βάσεως

Στις παραπάνω εικόνες βλέπουμε ότι δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στο μέγεθος των κόκκων καθώς κινούμαστε από το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης προς τα όρια. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι δεν είναι εμφανής κάποια θερμοεπηρρεασμένη ζώνη και δεν υπάρχει κάποια διαφορά του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου βάσεως στα όρια με τη λίμνη συγκόλλησης. Στον **Πίνακα 26** παρουσιάζεται το μέσο μέγεθος κόκκων των δοκιμίων συγκόλλησης.

Πίνακας 26 Μέσο μέγεθος κόκκων δοκιμίων συγκόλλησης

Λίμνη συγκόλλησης	Όριο		Μέταλλο βάσεως
	Λίμνης συγκόλλησης	Μέταλλο βάσεως	
75 μm	75 μm	15 μm	15 μm

4.7 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Στους **Πίνακες 27** και **28** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των ελέγχων που έγιναν σε κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 27 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων δοκιμίων 1^{ης} σειράς συγκολλήσεων

	M1	M2	M5		M6	M7	
Οπτικός έλεγχος	x	x	x		x		x
Δεισδυτικά υγρά	x	1	1		2		1
Ακτίνες X	√*	√*	√*		√*		√*
Εφελκυσμός	-	-	-		-		-
Κάμψη	-	-	-		-		-
Αξιολόγηση ΕΛΟΤ_ΕΝ 30042	B	x	B	D	C	D	B
Μικροσκοπικός έλεγχος	√	√	-		-		-

* Αξιολόγηση μόνο σε συγκεκριμένα τμήματα της συγκόλλησης λόγω ανομοιομορφίας στο μήκος ραφής

Πίνακας 28 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχων δοκιμών 2^{ης} σειράς συγκολλήσεων

		M10	M11	M12	M13	M14
Οπτικός έλεγχος		✓	✓	✓	✓	✓
Διεισδυτικά υγρά		1	1	1	1	1
Ακτίνες Χ		✓	✓	✓	✓	✓
Εφελκυσμός	Όριο διαρροής (N/mm ²)	174	155	170	173	177
	Όριο θραύσης (N/mm ²)	299	257	303	302	275
	Περιοχή θραύσης	Λίμνη συγκόλλησης	Λίμνη συγκόλλησης	Λίμνη συγκόλλησης	Λίμνη συγκόλλησης	Εκτός λίμνης συγκόλλησης
Κάμψη		✓	×	✓	×	×
Αξιολόγηση ΕΛΟΤ EN 30042		B	B	B	B	B
Μικροσκοπικός έλεγχος		✓	✓	✓	✓	✓

Παρατηρούμε μια γενική ανομοιομορφία της ποιότητας συγκόλλησης κατά το μήκος της ραφής. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στην πρώτη σειρά συγκολλήσεων. Είδη από τον πρώτο οπτικό έλεγχο των δοκιμών της πρώτης σειράς είναι εμφανής η κακή ποιότητα της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά, τα δοκίμια αυτά περιείχαν και ορισμένα υγιή τμήματα συγκόλλησης τα οποία μπορούμε να πούμε ότι μας έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Από την άλλη πλευρά, τα δοκίμια της δεύτερης σειράς ποιοτικά ήταν σαφέστερα καλύτερα από αυτά της πρώτης, αφού δεν εμφάνιζαν μεγάλη ανομοιομορφία κατά μήκος της ραφής με αποτέλεσμα την αξιολόγηση ολόκληρης της συγκόλλησης. Τα δοκίμια της δεύτερης σειράς πέρασαν επιτυχώς τον οπτικό έλεγχο, το μη-καταστρεπτικό έλεγχο και την αξιολόγηση βάση προδιαγραφής ΕΛΟΤ_ΕΝ 30042, ενώ τα δοκίμια M12 και M14 πέρασαν και τη δοκιμή κάμψης και τα δοκίμια M10, M12, M13 πέρασαν και δοκιμή εφελκυσμού.

5. Σύγκριση μεθόδου με μέθοδο TIG

Για τη σύγκριση της μεθόδου με τη μέθοδο TIG, πήραμε αποτελέσματα από δύο δοκίμια ίδιων διαστάσεων και ίδιου υλικού με αυτά που χρησιμοποιήσαμε στην πειραματική διαδικασία τα οποία έγιναν με αφορμή αντίστοιχη διπλωματική εργασία του εργαστηρίου υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μηχανή TIG Magic Wave 4000 της Fronius. Το προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα Αργού-Ηλίου (Ar 70%, He 30%) ενώ ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιήθηκαν σύρματα αλουμινίου 5183 διαμέτρου 1.6mm. Για τη σύνδεση των δοκιμίων προηγήθηκε ποντάρισμα. Στον **Πίνακα 29** παρουσιάζονται ορισμένοι παράμετροι των δύο δοκιμίων καθώς και του δοκιμίου M12 με το οποίο θα συγκριθούν.

Πίνακας 29 Παράμετροι συγκόλλησης δοκιμίων T18, T19, M12

Δοκίμιο	Παροχή Αερίου [lt/min]	Ένταση ρεύματος [A]	Τάση [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης [mm/s]	Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας [J/mm]	Υλικό πλήρωσης
T18	10	60	13.5	2.8	173	5183 Φ1.6
T19	10	55	15	2.1	235	5183 Φ1.6
M12	28	65	17.3	9.5	95	5183 Φ1.2



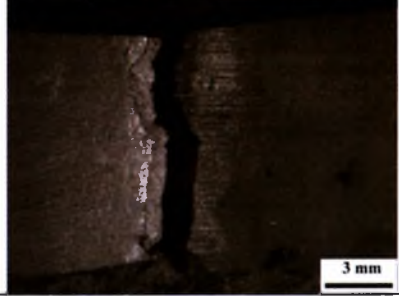
Από τις τιμές των παραμέτρων της πειραματικής διαδικασίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 παρατηρούμε ότι έχουμε κοντινές εντάσεις ρεύματος και τάσης και για τις 2 μεθόδους. Αντιθέτως, οι ταχύτητα συγκόλλησης του δοκιμίου M12 είναι περίπου τριπλάσια από αυτές των T18 και T19. Πέρα από την ταχύτητα συγκόλλησης, η μέθοδος TIG ήταν ακόμη πιο χρονοβόρα λόγω του γεγονότος ότι πριν την συγκόλληση απαιτούνταν ποντάρισμα των δοκιμίων.

Όσο αφορά το ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας της συγκόλλησης, συνήθως με τη μέθοδο MIG έχουμε να αντιμετωπίσουμε υψηλότερες τιμές θερμότητας. Επιπλέον, ο υπολογισμός του ρυθμού πρόσδοσης γίνεται από τον τύπο: Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας = $h \times (\text{τάση τόξου} \times \text{ένταση ρεύματος}) / \text{ταχύτητα συγκόλλησης}$, όπου h είναι το ποσοστό του ρυθμού της θερμότητας που προσδίδεται στο δοκίμιο (60% για TIG και 80% MIG). Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας της μεθόδου TIG είναι περίπου διπλάσιος από αυτόν της

MIG. Η διαφορά αυτή ανάμεσα στις δύο μεθόδους οφείλεται στη μεγάλη διαφορά των ταχυτήτων συγκόλλησης.

Στον **Πίνακα 30** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού των τριών δοκιμίων.

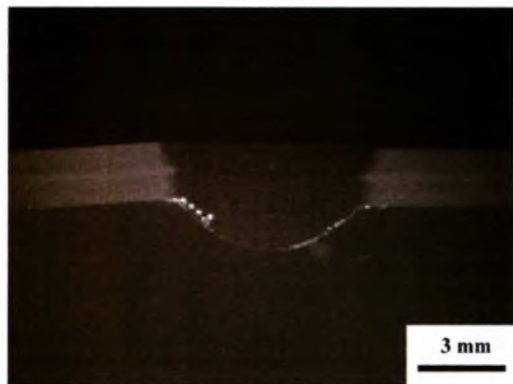
Πίνακας 30 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού δοκιμίων T18,T19,M12

Δοκίμιο	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Τάση διαρροής (N/mm ²)	Τάση θραύσης (N/mm ²)	Θέση θραύσης	Φωτογραφία
T18	12	1,98	153	252	Στο σύνορο λίμνης-ΘΕΖ	
T19	12	1,83	163	301	Λίμνη συγκόλλησης	
M12	12	1,81	170	303	Λίμνη συγκόλλησης	
Συγκολλητά 5083 με 5183 (ASM Specialty Handbook)	-	-	155	290	-	-

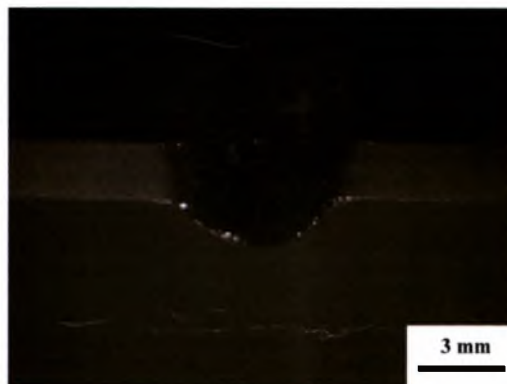
Τα δοκίμια παρουσιάζουν κοντινές τιμές τάσεως διαρροής και θραύσεως. Τα δοκίμια T19 και M12 ξεπερνούν τα όρια που δίνονται από το ASM Specialty Handbook ενώ το δοκίμιο T18 βρίσκεται λίγο χαμηλότερα.

Στον μη-καταστρεπτικό έλεγχο, στα δοκίμια δεν παρατηρήθηκε κάποια μορφή ατέλειας της συγκόλλησης εκτός των ανεκτών ορίων και στη δοκιμή κάμψης προσώπου και ρίζας βγήκαν αποδεκτά.

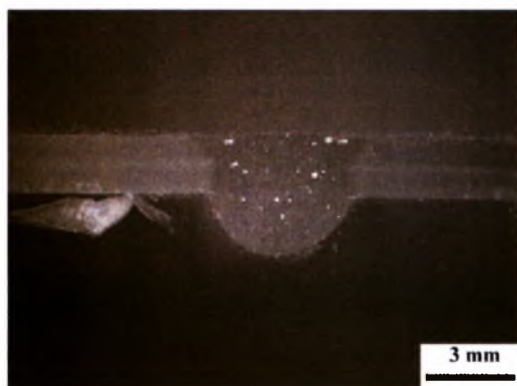
Στις **Εικόνες 7.1-7.3** παρουσιάζονται φωτογραφίες από την τομή της συγκόλλησης των τριών δοκιμίων.



Εικόνα 7.1 Τομή δοκιμίου T18



Εικόνα 7.2 Τομή δοκιμίου T19



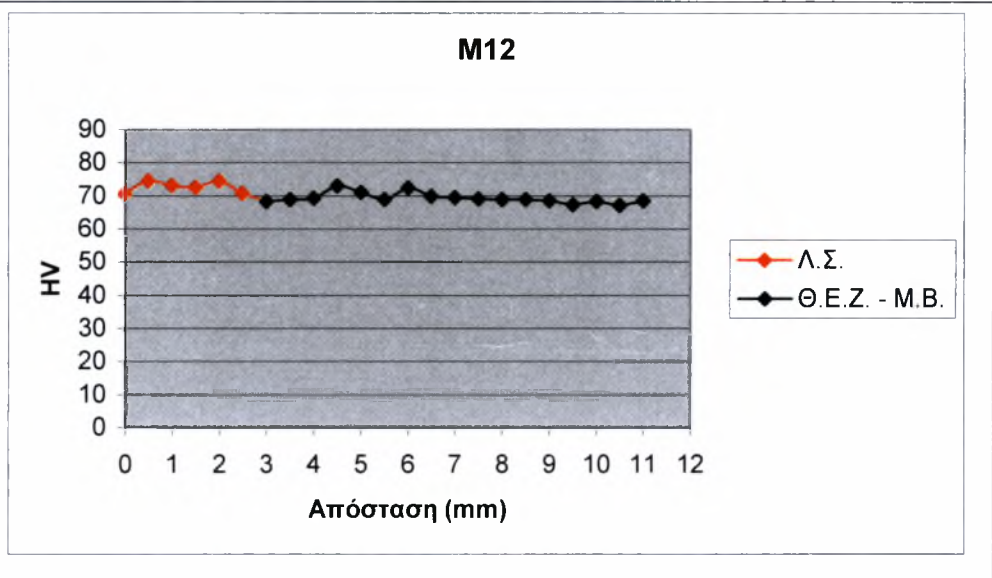
Εικόνα 7.3 Τομή δοκιμίου M12

Σύμφωνα με την αξιολόγηση που έγινε με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042 η ποιότητα των δοκιμίων είναι επιπέδου B. Παρόλα αυτά , παρατηρούμε ότι τα δοκίμια της μεθόδου TIG ποιοτικά είναι καλύτερα από το δοκίμιο της MIG, διότι στο M12 εμφανίζονται πόροι και η ρίζα συγκόλλησης είναι αρκετά μεγαλύτερη (υπερβολική διείδυση).

Στον **Πίνακα 31** παρουσιάζονται τα προφίλ της σκληρομέτρησης των δοκιμίων.

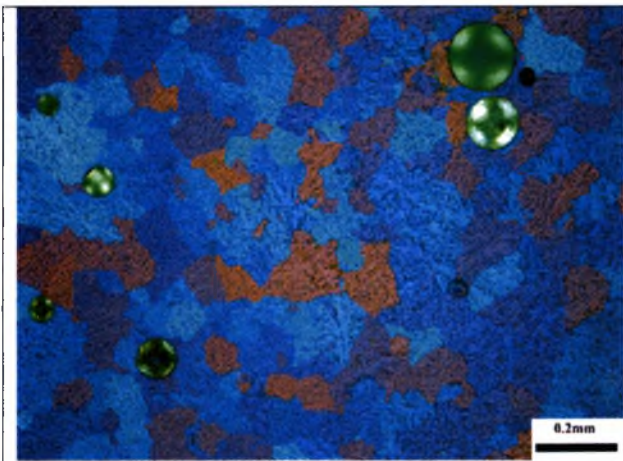
Πίνακας 31 Προφίλ σκληρομέτρησης δοκιμίων T18, T19, M12

Δοκίμιο	Διάγραμμα																																							
T18	<p style="text-align: center;">T18</p> <p>The graph for T18 displays two data series. The first series, labeled 'Λ.Σ.', is represented by red diamonds connected by a line, with values ranging from approximately 70 to 75. The second series, labeled 'Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β.', is represented by black diamonds connected by a line, with values ranging from approximately 70 to 75. The x-axis is labeled 'Απόσταση mm' and ranges from 0 to 12. The y-axis is labeled 'HV' and ranges from 0 to 90.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for T18</caption> <thead> <tr> <th>Απόσταση (mm)</th> <th>Λ.Σ. (HV)</th> <th>Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β. (HV)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>75</td><td>75</td></tr> <tr><td>1</td><td>72</td><td>72</td></tr> <tr><td>2</td><td>71</td><td>71</td></tr> <tr><td>3</td><td>70</td><td>70</td></tr> <tr><td>4</td><td>71</td><td>72</td></tr> <tr><td>5</td><td>72</td><td>72</td></tr> <tr><td>6</td><td>71</td><td>71</td></tr> <tr><td>7</td><td>72</td><td>73</td></tr> <tr><td>8</td><td>73</td><td>72</td></tr> <tr><td>9</td><td>72</td><td>71</td></tr> <tr><td>10</td><td>71</td><td>70</td></tr> <tr><td>11</td><td>72</td><td>73</td></tr> </tbody> </table>	Απόσταση (mm)	Λ.Σ. (HV)	Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β. (HV)	0	75	75	1	72	72	2	71	71	3	70	70	4	71	72	5	72	72	6	71	71	7	72	73	8	73	72	9	72	71	10	71	70	11	72	73
Απόσταση (mm)	Λ.Σ. (HV)	Θ.Ε.Ζ. - Μ.Β. (HV)																																						
0	75	75																																						
1	72	72																																						
2	71	71																																						
3	70	70																																						
4	71	72																																						
5	72	72																																						
6	71	71																																						
7	72	73																																						
8	73	72																																						
9	72	71																																						
10	71	70																																						
11	72	73																																						
T19	<p style="text-align: center;">T19</p> <p>The graph for T19 displays two data series. The first series, labeled 'Λ.Σ.', is represented by red diamonds connected by a line, with values ranging from approximately 70 to 75. The second series, labeled 'Θ.Ε.Ζ. - Λ.Σ.', is represented by black diamonds connected by a line, with values ranging from approximately 68 to 70. The x-axis is labeled 'Απόσταση (mm)' and ranges from 0 to 12. The y-axis is labeled 'HV' and ranges from 0 to 90.</p> <table border="1"> <caption>Approximate data for T19</caption> <thead> <tr> <th>Απόσταση (mm)</th> <th>Λ.Σ. (HV)</th> <th>Θ.Ε.Ζ. - Λ.Σ. (HV)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>72</td><td>72</td></tr> <tr><td>1</td><td>70</td><td>70</td></tr> <tr><td>2</td><td>73</td><td>71</td></tr> <tr><td>3</td><td>71</td><td>69</td></tr> <tr><td>4</td><td>72</td><td>68</td></tr> <tr><td>5</td><td>71</td><td>68</td></tr> <tr><td>6</td><td>70</td><td>67</td></tr> <tr><td>7</td><td>71</td><td>68</td></tr> <tr><td>8</td><td>70</td><td>66</td></tr> <tr><td>9</td><td>71</td><td>68</td></tr> <tr><td>10</td><td>70</td><td>68</td></tr> <tr><td>11</td><td>70</td><td>69</td></tr> </tbody> </table>	Απόσταση (mm)	Λ.Σ. (HV)	Θ.Ε.Ζ. - Λ.Σ. (HV)	0	72	72	1	70	70	2	73	71	3	71	69	4	72	68	5	71	68	6	70	67	7	71	68	8	70	66	9	71	68	10	70	68	11	70	69
Απόσταση (mm)	Λ.Σ. (HV)	Θ.Ε.Ζ. - Λ.Σ. (HV)																																						
0	72	72																																						
1	70	70																																						
2	73	71																																						
3	71	69																																						
4	72	68																																						
5	71	68																																						
6	70	67																																						
7	71	68																																						
8	70	66																																						
9	71	68																																						
10	70	68																																						
11	70	69																																						

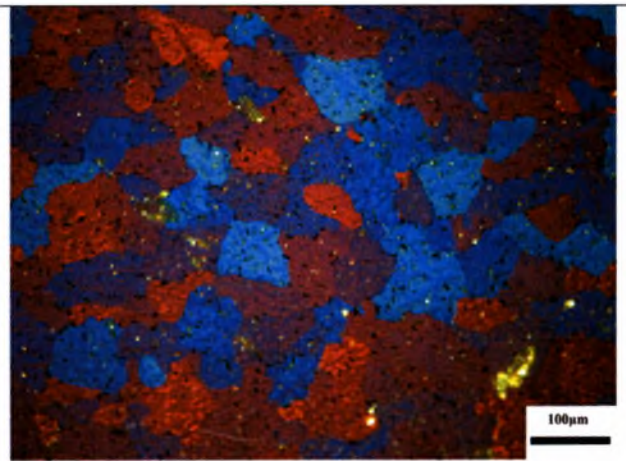
M12

Από τα προφίλ σκληρομέτρησης που εμφανίζονται παραπάνω, παρατηρούμε ότι η σκληρότητα των δοκιμίων παρουσιάζει κοντινές τιμές μεταξύ τους, τόσο μέσα στη λίμνη συγκόλλησης όσο και στο μέταλλο βάσης.

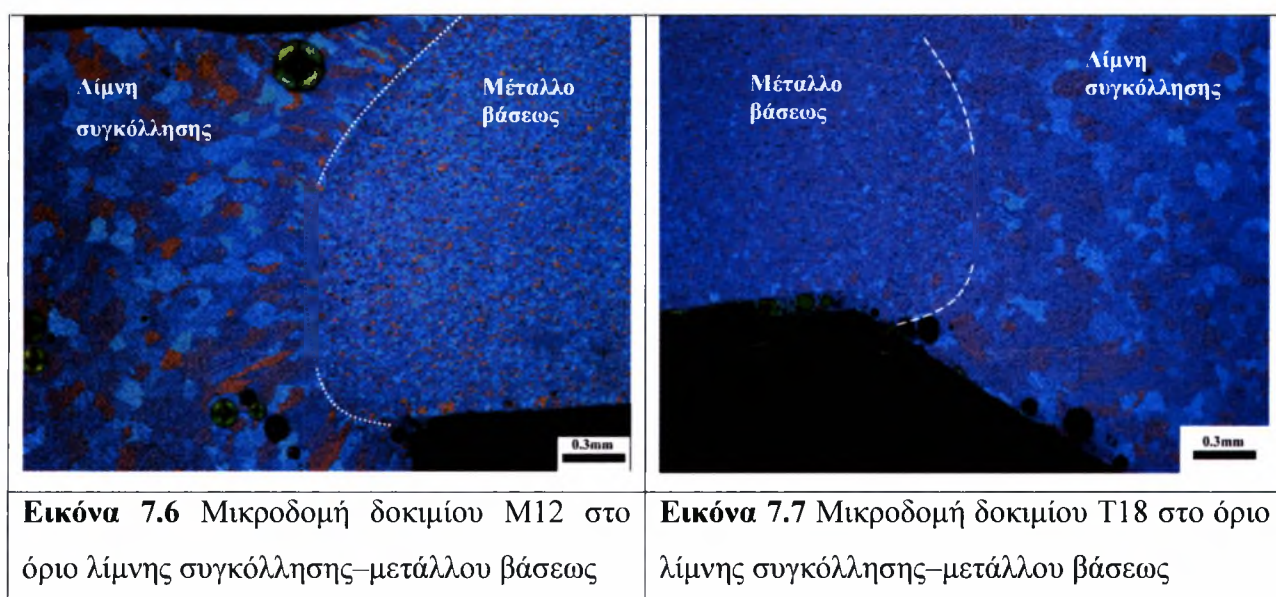
Στις **Εικόνες 7.4** έως **7.7** παρουσιάζονται φωτογραφίες της μικροδομής των δοκιμίων M12 και T18.



Εικόνα 7.4 Μικροδομή δοκιμίου M12 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης



Εικόνα 7.5 Μικροδομή δοκιμίου T18 στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης



Στις **Εικόνες 7.4** έως **7.7** δεν παρατηρούμε κάποια εμφανής διαφορά στη μικροδομή των δοκιμίων των 2 μεθόδων. Το μέσο μέγεθος κόκκων των δοκιμίων στη λίμνη συγκόλλησης αλλά και στα όρια της λίμνης με το μέταλλο βάσεως είναι σχεδόν το ίδιο (60-110μm και 12-30μm αντίστοιχα).

6. Συζήτηση των αποτελεσμάτων

- Η συγκόλληση λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 παρουσιάζει δυσκολίες, εξαιτίας των παραμορφώσεων, που παρατηρούνται στα ελάσματα από τον έντονο ρυθμό εισαγωγής θερμότητας κατά τη συγκόλληση.
- Μικρότερες εντάσεις ρεύματος βελτίωσαν το αποτέλεσμα όσον αφορά στις παραμορφώσεις, οδηγούν όμως τις περισσότερες φορές σε μειωμένη διείσδυση λόγω ατελειών και πόρων στη ζώνη τήξης.
- Ανομοιομορφία της ποιότητας συγκόλλησης κατά το μήκος της ραφής. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στην πρώτη σειρά συγκολλήσεων.
- Η μέθοδος μας έδωσε καλύτερα αποτελέσματα όταν πραγματοποιήθηκε με χαμηλές εντάσεις ρεύματος (65A), υψηλότερες τάσεις μηχανής (17V) και ταχύτητα συγκόλλησης $\sim 9\text{mm/s}$ (2^η σειρά συγκολλήσεων).
- Η ποιότητα της συγκόλλησης των δοκιμίων της 2^{ης} σειράς σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 30042 ήταν επιπέδου B. Στα περισσότερα δοκίμια υπήρχαν πόροι αλλά ήταν εντός της ανοχής της προδιαγραφής. Το κυριότερο πρόβλημα ήταν η κακή ευθυγράμμιση ορισμένων δοκιμίων η οποία αν και ήταν μέσα στα επίπεδα ανοχής της προδιαγραφής, οφείλονταν σε μεγάλο βαθμό στις στρεβλώσεις των δοκιμίων λόγω των εσωτερικών τάσεων.
- Παρατηρήθηκε ελαφρά μείωση του ορίου διαρροής και μεγαλύτερη διακύμανση του ορίου θραύσης των συγκολλημένων τεμαχίων και του μετάλλου βάσης. Η μικρή διακύμανση των μηχανικών ιδιοτήτων, που πιστοποιείται τόσο από τις μικροσκοπιομετρήσεις όσο και τις δοκιμές εφελκυσμού, αποδίδεται στο ότι το Al 5083 δεν είναι θερμικά κατεργάσιμο. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις, που εμφανίζονται στο όριο θραύσης πιθανόν σχετίζονται και με την ποιότητα της συγκόλλησης και την ανομοιομορφία που παρουσίασε.
- Όσο αφορά τη μικροδομή της συγκόλλησης, παρατηρούμε ότι δεν είναι εμφανής κάποια θερμοεπηρεασμένη ζώνη και δεν υπάρχει κάποια διαφορά του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου βάσεως και του μετάλλου πλήρωσης στα όρια με τη λίμνη συγκόλλησης.

7. Συμπεράσματα –Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η συγκόλληση λεπτών ελασμάτων κράματος αλουμινίου 5083 παρουσιάζει δυσκολίες λόγω των παραμορφώσεων και των ατελειών συγκόλλησης. Τα περισσότερα προβλήματα (πόροι και εγκλείσματα) οφείλονται στον υψηλό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας. Όταν χρησιμοποιηθεί ο βέλτιστος ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας (με κατάλληλη επιλογή ρεύματος, τάσης και ταχύτητας συγκόλλησης), τότε τα προβλήματα ελαχιστοποιούνται. Από τις δύο μεθόδους συγκόλλησης, η μέθοδος TIG δίνει καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης ενώ η μέθοδος MIG μεγαλύτερη παραγωγικότητα.

Όσο αφορά την μελλοντική έρευνα, βασικός στόχος για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας συγκόλλησης αποτελεί η προσπάθεια για πιο μελετημένη πειραματική διάταξη με σταθερές συνθήκες συγκόλλησης με αποτέλεσμα την αποφυγή ανομοιομορφίας κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης. Τέλος, ένα μεγάλο κομμάτι της μελλοντικής έρευνας πρέπει να αποτελέσει η μελέτη και ο εντοπισμός των παραγόντων που ενεργούν θετικά στην ανάπτυξη παραμορφώσεων και παραμένουσων τάσεων στα δοκίμια λόγω της συγκόλλησης και να βρεθούν λύσεις για την εξάλειψη τους.

8. Βιβλιογραφία

- [1] ASM Metals Handbook, Vol 9, ASM International, Materials park, Ohio, USA, 1992
- [2] Esab, Welding Handbook, seventh edition, 'Consumables for manual and automatic welding'
- [3] Βελτιστοποίηση των μεθόδων συγκόλλησης στα κράματα Al της σειράς 5xxx, Δρ. Σπ.Α. Παπαευθυμίου, Ήρων 2006-7
- [4] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM INTERNATIONAL
- [5] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων, Β.Ι.Παπάζογλου, Αθήνα 1989
- [6] Μελέτη συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κράματος Al 5083 με τη μέθοδο TIG, Διπλωματική εργασία, Πολατίδης Ευθύμιος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 2007
- [7] <http://www.alunet.gr>
- [8] <http://www.aluminium.org.gr>
- [9] <http://www.azon.com>
- [10] <http://www.grantadesign.com>
- [11] <http://www.esab.com>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000085995