

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘Μελέτη ομοειδών και ετεροειδών
συγκολλήσεων ναυπηγικών κραμάτων
αλουμινίου με τη μέθοδο της τριβής με
ανάδευση’**

ΧΡΗΣΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ.Ι. Παντελής

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία περατώθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για την ολοκλήρωσή της συνέβαλε σημαντικά ένας αριθμός προσώπων τους οποίους ευχαριστώ θερμά.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, κ. Δ.Ι. Παντελή για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις του κατά την εκπόνησή της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, κ. Ν. Μ. Δανιόλο για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την προσωπική ενασχόληση με την διπλωματική εργασία μου, σαν να ήταν και δική του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για τη βοήθεια που προσέφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Χριστακόπουλος Γεώργιος,

Αθήνα 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (*Friction Stir Welding, FSW*) είναι μία καινοτομική τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης. Είναι ενεργειακά οικονομική, ευέλικτη και φιλική προς το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση αεροναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου, υψηλής αντοχής, καθώς και άλλων κραμάτων που συγκολλούνται δύσκολα με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Η FSW θεωρείται ως η πιο σημαντική εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων, την τελευταία δεκαετία.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί λειτουργικών παραμέτρων για την πραγματοποίηση ομοειδών και ετεροειδών συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση, πλακών (πάχους 6mm) των κραμάτων αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης των προαναφερθεισών συγκολλήσεων.

Για κάθε συγκόλληση, η μεταλλογραφική παρατήρηση (με χρήση μικροσκοπίας και στερεοσκοπίας) αποκάλυψε τον πυρήνα συγκόλλησης (WN), τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘMAZ, TMAZ), τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘEZ, HAZ) και κατά περίπτωση κάποιες ατέλειες.

Επιπρόσθετα, στα δοκίμια που παρήχθησαν με τη χρήση των βέλτιστων παραμέτρων, έγιναν μετρήσεις μικροσκληρότητας. Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας λήφθηκαν σε τομές των συγκολλημένων δοκιμίων και συσχετίσθηκαν με τις δημιουργούμενες ζώνες συγκόλλησης.

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a relatively new solid-state joining process. This joining technique is energy efficient, environment friendly, and versatile. In particular, it can be used to join high-strength aerospace aluminum alloys and other metallic alloys that are hard to weld by conventional fusion welding. FSW is considered to be the most significant development in metal joining in a decade.

Different combinations of FSW processing parameters were used to create similar and dissimilar FSWs of plates (6mm thick) of 5083-H111 and 6082-T6 aluminum alloys.

The aim of the present work was to define the optimal processing parameters for the aforementioned FSWs. In each case, metallographic observations (using optical stereoscopy and microscopy) revealed a weld nugget (WN), a thermo mechanically affected zone (TMAZ), a heat affected zone (HAZ) and a variety of defects and/or discontinuities.

Furthermore, the samples which were produced using the optimal parameters, were subjected to micro-hardness testing. Micro-hardness measurements were taken on cross sections of the samples and correlated with the FSW zones formation.

ΕΛΛΗΝΟ-ΑΓΓΛΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ

Αγγλικός όρος

Ελληνικός όρος

Welding Tool	Εργαλείο συγκόλλησης
Welding Head	Κεφαλή συγκόλλησης
Advancing Side	Προωθούμενη πλευρά
Retreating Side	Υποχωρούσα πλευρά
Pin/Probe	Πείρος εργαλείου συγκόλλησης
Tool Shoulder	Περιοχή εργαλείου συγκόλλησης
Welding Flash	Υπερχείλιση (γρέζι)
Tunnel Defect	Ατέλεια μορφής σύραγγας
Kissing Bond	Ατέλεια τύπου 'φιλιού'
Onion Ring	Δακτυλιοειδής δομή
Weld Nugget	Πυρήνας συγκόλλησης
Stir Zone	Ζώνη ανάδευσης
Swirl Zone	Ζώνη στροβιλισμού
Thermo-Mechanically Affected Zone	Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη
Heat Affected Zone	Θερμικά επηρεασμένη ζώνη
Shoulder Surface	Επιφάνεια περιοχής εργαλείου
Anvil Surface	Επιφάνεια συγκράτησης
Plunge Force	Κάθετη δύναμη διείσδυσης
Plunge Area	Περιοχή βύθισης πείρου
Pinhole	Οπή πείρου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	3
ΕΛΛΗΝΟ-ΑΓΓΛΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ.....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	8
1.1 Ιστορικά στοιχεία συγκολλήσεων.....	9
1.2 Βασικές τεχνικές συγκόλλησης.....	10
1.3 Σύγχρονες τεχνικές συγκόλλησης.....	10
1.3.1 Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW).....	10
1.3.2 Συγκόλληση τόξου με προστασία αερίου και τηκόμενο ηλεκτρόδιο (GMAW).....	11
1.3.3 Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW).....	11
1.3.4 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW).....	11
1.3.5 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW).....	11
1.3.6 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (LBW).....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ.....	13
2.1 Ιστορική Αναδρομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.....	14
2.2 Χρήση της FSW.....	15
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	16
2.4 Εργαλείο συγκόλλησης.....	19
2.4.1 Γεωμετρία εργαλείου.....	19
2.4.2 Κίνηση εργαλείου.....	20
2.4.3 Γωνία εργαλείου συγκόλλησης- Βάθος διείσδυσης.....	21
2.5 Πλαστικοποίηση υλικού.....	21
2.5.1 Θερμοκρασία.....	21
2.5.2 Ροή υλικού.....	22
2.6 Γεωμετρία συγκόλλησης- Ζώνες.....	23
2.6.1 Ζώνη ανάδευσης ή Πυρήνας συγκόλλησης.....	23
2.6.2 Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη.....	25
2.6.3 Θερμικά επηρεασμένη ζώνη.....	25
2.6.4 Βασικό μέταλλο.....	26
2.7 Γεωμετρίες συγκόλλησης.....	26
2.8 Τύποι ατελειών της FSW.....	28
2.9 Πλεονεκτήματα της FSW.....	30
2.10 Μειονεκτήματα της FSW.....	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....32

3	Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου.....	33
3.1	Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου.....	33
3.1.1	Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	33
3.1.2	Αντοχή στη διάβρωση.....	34
3.2	Κράματα αλουμινίου.....	34
3.2.1	Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου.....	34
3.2.2	Σύστημα χαρακτηρισμού κατεργασιών.....	36
3.2.3	Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου.....	37
3.2.3.1	Κράματα Al που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.....	38
3.2.3.1.1	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000.....	38
3.2.3.1.2	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000.....	38
3.2.3.1.3	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000.....	39
3.2.3.2	Κράματα Al που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες.....	39
3.2.3.2.1	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000.....	39
3.2.3.2.2	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000.....	40
3.2.3.2.3	Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000.....	41
3.2.4	Κράματα χύτευσης αλουμινίου.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... 43

4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση ομοειδών και ετεροειδών κραμάτων αλουμινίου.....	44
4.1	Επίδραση της γεωμετρίας κεφαλών και περιαιχενίου.....	44
4.2	Συγκολλήσεις ετεροειδών κραμάτων.....	45
-	2024-6056.....	45
-	2024-6082.....	46
-	2024-7075.....	49
-	5182-6016.....	52
-	6061-6082.....	52
-	6061-A356.....	54
-	6111-5083.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....57

5	Πειραματική διαδικασία.....	57
5.1	Χρησιμοποιούμενα υλικά.....	57
5.2	Μηχανή συγκόλλησης.....	59
5.3	Κεφαλές εργαλείου συγκόλλησης.....	60
5.4	Προετοιμασία δοκιμίων.....	61
5.4.1	Κοπή.....	61

5.4.2	Λείανση – Στίλβωση.....	61
5.4.3	Χημική προσβολή.....	62
5.5	Οπτική στερεοσκοπία.....	63
5.6	Οπτική μικροσκοπία.....	64
5.7	Σκληρομετρήσεις.....	65
5.7.1	Μικροσκληρομετρήσεις.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....		67
6	Αποτελέσματα- Συζήτηση.....	68
6.1	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA5083-H111.....	68
6.1.1	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση προς εύρεση βέλτιστων παραμέτρων.....	68
6.1.2	Μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA5083-H111.....	84
6.1.3	Κατανομή μικροσκληρότητας των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA5083-H111.....	86
6.1.4	Επίδραση των παραμέτρων στις συγκολλήσεις.....	88
6.1.5	Επίδραση ομόροπων πολλαπλών περασμάτων.....	92
6.2	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA6082-T6.....	96
6.2.1	Πειράματα προς εύρεση βέλτιστων παραμέτρων.....	96
6.2.2	Μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA6082-T6.....	108
6.2.3	Κατανομή μικροσκληρότητας των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA6082-T6.....	110
6.2.4	Επίδραση των παραμέτρων.....	111
6.3	Προκαταρκτική μελέτη συγκόλλησης ετεροειδών κραμάτων AA5083-H111 - AA6082-T6.....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		117
7	Συμπεράσματα.....	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ

1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

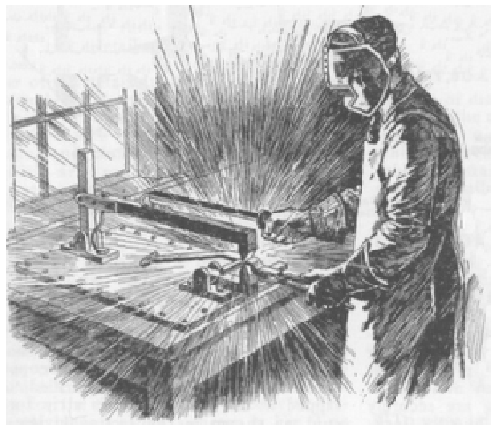
1.1 Ιστορικά Στοιχεία [1]

Η συγκόλληση των μετάλλων είναι μια εργασία που οι ρίζες της βρίσκονται κάπου στην εποχή του ορείχαλκου, με τη μορφή της διασφυρηλατήσεως συγκόλλησης. Οι πρώτες κατασκευές που έγιναν με συγκολλήσεις ήταν μικρά κυλινδρικά χρυσά κουτιά, καθώς και διάφορα χρυσά κοσμήματα. Κατά τη διάρκεια της εποχής του σιδήρου οι Αιγύπτιοι



συγκόλλησαν μεταξύ τους σιδηρά αντικείμενα επίσης με σφυρηλάτηση. Στην Αρχαία Ελλάδα, η πρώτη γραπτή αναφορά για τη συγκόλληση γίνεται με το όνομα του Γλαύκου του Χίου το 700 π.Χ, ο οποίος σφυρηλάτησε σε καμίνι μπρούντζο και σίδηρο. Έως και τα μέσα του 19^{ου} περίπου αιώνα και καθώς η μόνη πηγή θερμότητας που ήταν διαθέσιμη προερχόταν από την καύση του ξύλου, οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν περιορίζονταν σε ετερογενείς συγκολλήσεις χαμηλής (Soldering) και μέσης (Brazing) θερμοκρασίας.

Ως και τη δεκαετία του 1880 πραγματοποιούνταν υποτυπώδεις διαδικασίες συγκόλλησης υλικών μόνο από τους σιδεράδες της τότε εποχής.



Από τότε και ενώ ακολούθησε η εποχή της βιομηχανικής επανάστασης καθώς και δυο παγκόσμιοι πόλεμοι, η εξέλιξη της μοντέρνας τεχνολογίας των συγκολλήσεων ήταν ραγδαία.

Οι βασικές αρχές συγκόλλησης – συγκόλληση αντίστασης (Resistance Welding), συγκόλληση με καύση αερίου (Gas Welding) και συγκόλληση τόξου (Arc Welding) – εφευρέθηκαν όλες πριν από τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η συγκόλληση και η κοπή με χρήση φλόγας από καύση αερίου κυριαρχούσε ενώ την ίδια περίοδο άρχισαν να εμφανίζονται και τεχνικές συγκόλλησης που χρησιμοποιούσαν σαν πηγή ενέργειας τον ηλεκτρισμό.

1.2 Βασικές Τεχνικές Συγκόλλησης [2]

Διακρίνονται πέντε μεγάλες κατηγορίες μεθόδων ένωσης μετάλλων:

- **Συγκόλληση με τήξη (fusion welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα μέχρι να συμβεί σύντηξη.
- **Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electric-resistance welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος και έπειτα ασκείται εξωτερική πίεση.
- **Συγκόλληση σε στερεά φάση (solid-phase welding)**, όπου εφαρμόζεται εξωτερική πίεση χωρίς όμως τήξη των υπό συγκόλληση μετάλλων εκτός από ένα λεπτό στρώμα στις επιφάνειες συγκόλλησης.
- **Ετερογενής συγκόλληση ή ένωση σε υγρή-στερεή φάση (liquid-solid phase joining)**, όπου τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία μικρότερη του σημείου τήξης τους και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί η ένωση σε στερεή κατάσταση.
- **Ένωση με κόλλα (adhesive bonding)**, όπου οι ενώσεις δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα της μοριακής έλξης μεταξύ των προς ένωση επιφανειών και της κόλλας.

1.3 Σύγχρονες Μέθοδοι Συγκόλλησης [2]

Οι κυριότερες από τις μεθόδους συγκόλλησης με τήξη που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις μετάλλων είναι:

- Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)
- Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW)
- Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Submerged Arc Welding, SAW)
- Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (Plasma Arc Welding, PAW)
- Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW)
- Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (LBW)

1.3.1 Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW)

Είναι η μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Το χρησιμοποιούμενο

ηλεκτρόδιο είναι από μη τηκόμενο βολφράμιο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προστιθέμενο μέταλλο.

1.3.2 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (GMAW)

Είναι η μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί προστασία αερίου και όπου η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων.

1.3.3 Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW)

Είναι η μέθοδος συγκόλλησης που προκαλεί σύντηξη των μετάλλων θερμαίνοντάς τα με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών τόξων που δημιουργούνται μεταξύ ενός ή περισσότερων μεταλλικών ηλεκτροδίων και του προς συγκόλληση αντικειμένου.

1.3.4 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW)

Η συγκόλληση με τόξο πλάσματος αποτελεί εξέλιξη της συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου. Η ένωση στη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται με πρόσδοση θερμότητας από ένα στενωμένο τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση ελασμάτων (μεταφερόμενο τόξο) ή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ακροφυσίου. Προστασία του τηγμένου μετάλλου συγκόλλησης παρέχεται συνήθως από το υπέρθερμο, ιονισμένο αέριο που εξέρχεται από το στόμιο του ακροφυσίου στένωσης.

1.3.5 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW)

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι μια μέθοδος τήξης που χρησιμοποιεί μια υψηλής ενέργειας εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας. Συνήθως τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από μια θερμή κάθοδο επιταχύνονται από την επίδραση υψηλού δυναμικού και εστιάζονται μαγνητικά σε μια περιοχή με πυκνότητα ενέργειας αρκετά υψηλή.

1.3.6 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (LBW)

Η συγκόλληση με δέσμη λέιζερ γίνεται με τη βοήθεια θερμότητας από μια ισχυρή δέσμη φωτονίων που προσκρούει πάνω στις επιφάνειες των υπό συγκόλληση μετάλλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ
ΑΝΑΔΕΥΣΗ

2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

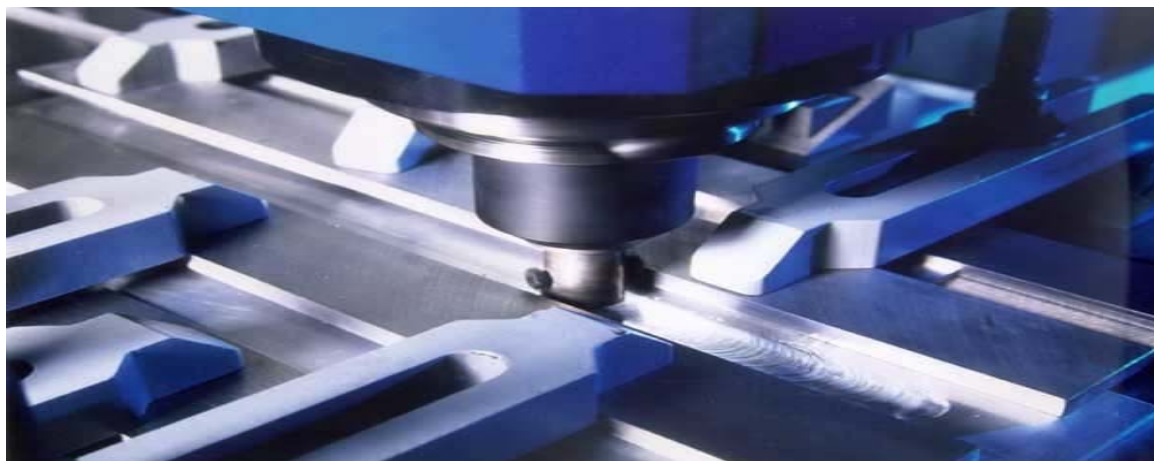
2.1 Ιστορική αναδρομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Στα τέλη του 1991, επινοήθηκε μία νέα καινοτομική μέθοδος συγκόλλησης στο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων του Ηνωμένου Βασιλείου (TWI). Η μέθοδος αυτή κατοχυρώθηκε από το TWI με την κατάθεση διεθνούς διπλώματος ευρεσιτεχνίας το Δεκέμβρη του ίδιου έτους. Η μέθοδος έλαβε το όνομα 'Συγκόλληση δια Τριβής μέσω Ανάδευσης' (Friction Stir Welding – FSW) [3].

Η ναυπηγική βιομηχανία ήταν από τους πρώτους βιομηχανικούς τομείς, όπου υιοθετήθηκε η μέθοδος FSW για εμπορικές εφαρμογές. Επιπρόσθετα, η μέθοδος FSW χρησιμοποιείται από την αεροδιαστημική βιομηχανία, από την αεροναυπηγική βιομηχανία, από τη σιδηροδρομική βιομηχανία, από την αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς και από αρκετούς άλλους βιομηχανικούς τομείς [3].

Η FSW χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές, στην Ευρώπη, από το 1995. Οι πρώτες εφαρμογές είχαν να κάνουν με τη συγκόλληση εξελασμένων μετάλλων, με σκοπό τη διαμόρφωση μεταλλικών επιφανειών για χρήσεις στη ναυπηγική βιομηχανία. Η χρήση της FSW αυξήθηκε με εντυπωσιακούς ρυθμούς και πλέον συναντάται από τον τομέα της αυτοκίνησης μέχρι τον τομέα των ιατρικών εφαρμογών [4].

Στις μέρες μας η μέθοδος προσανατολίζεται στην ολοκλήρωση όλο και πιο σύνθετων εφαρμογών, οδηγώντας σε σημαντική βελτίωση τόσο της ποιότητας όσο και του κόστους κατασκευής. Καθώς η μέθοδος αναπτύσσεται και εξελίσσεται, οι σχεδιαστές - μελετητές την εκμεταλλεύονται όλο και περισσότερο, σχεδιάζοντας προϊόντα που εκμεταλλεύονται στο έπακρο τα πλεονεκτήματά της [4].



Εικόνα 2.1: Συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης [3].

2.2 Χρήση της μεθόδου συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης

Η FSW αποτελεί μια μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, δηλαδή δεν απαιτείται τήξη των προς συγκόλληση μετάλλων. Έτσι αποφεύγονται τα ελαττώματα που δημιουργούνται από την τήξη στις συμβατικές συγκολλήσεις. Η μηχανή της συγκόλλησης περιστρέφεται, βυθίζεται και στη συνέχεια κινείται κατά μήκος της ένωσης των προς συγκόλληση υλικών [4]. Η περιστροφική κίνηση και η ειδική γεωμετρική διαμόρφωση του εργαλείου της FSW, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας για τη συγκόλληση των υλικών. Η θερμότητα σε συνδυασμό με την ανάδευση προκαλεί τη μεταφορά του πλαστικοποιημένου υλικού από τη μια πλευρά της ραφής στην άλλη.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση πολλών γεωμετρικών τύπων και πολλών συνδυασμών υλικών. Το μέγιστο επιτρεπόμενο πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων εξαρτάται κυρίως από την ισχύ της μηχανής συγκόλλησης και τη γεωμετρία του εργαλείου, με τιμές μεγαλύτερες των 50mm να είναι εφικτές. Το TWI έχει επιτύχει συγκόλληση ελασμάτων με πάχος 75mm με ένα πέρασμα, ενώ είναι δυνατή η συγκόλληση ακόμα παχύτερων ελασμάτων [3].

Όσον αφορά στα κράματα αλουμινίου, τα ακόλουθα είναι εκείνα που συγκολλούνται ευκολότερα με την FSW:

- Σειρά 2000 (Al-Cu)
- Σειρά 5000 (Al-Mg)
- Σειρά 6000 (Al-Mg-Si)
- Σειρά 7000 (Al-Zn)
- Σειρά 8000 (Al-Li)

Άλλα υλικά που συγκολλήθηκαν επιτυχώς με τη μέθοδο FSW είναι:

- Χαλκός και κράματα αυτού (ως 50mm)
- Μόλυβδος
- Τιτάνιο και κράματα αυτού
- Κράματα μαγνησίου
- Ψευδάργυρος
- Cu-Mn

- Μαλακοί χάλυβες
- Ανοξειδωτος χάλυβας (ωστενιτικός, μαρτενσιτικός και duplex)
- Κράματα νικελίου
- Πλαστικά [3].



Εικόνα 2.2: Δείγματα συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης [5].

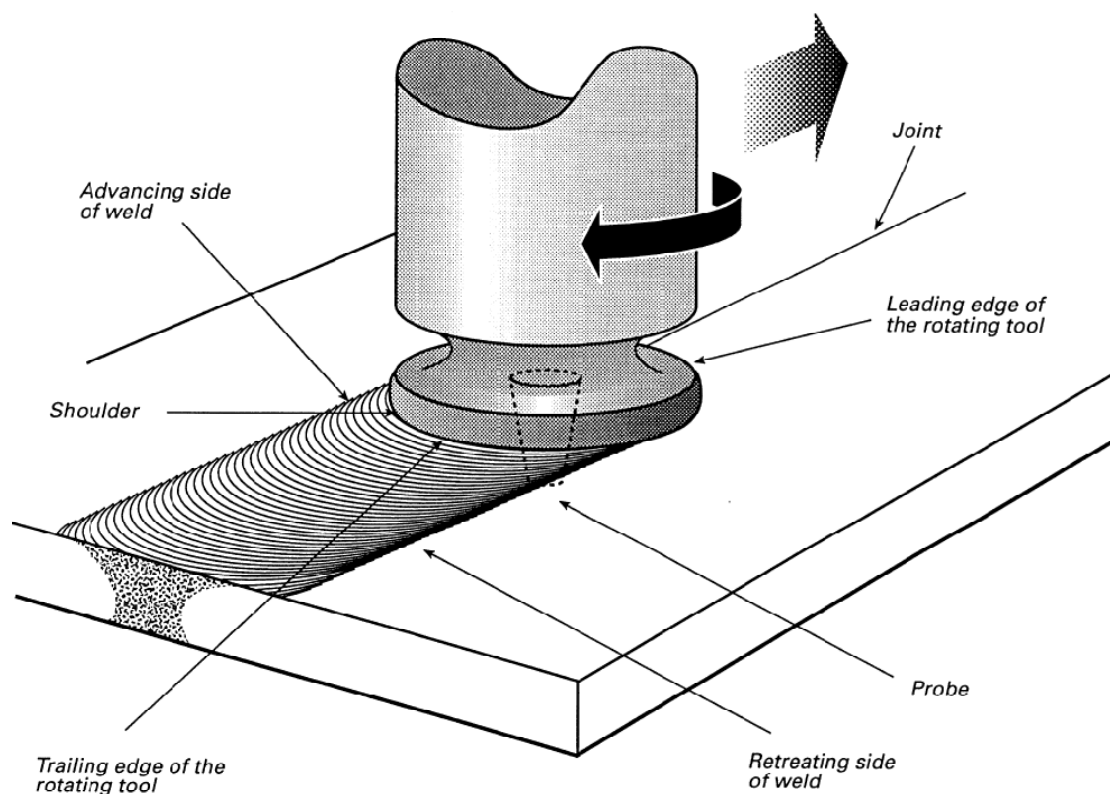
2.3 Αρχή λειτουργίας

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, η συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο, μη καταναλισκόμενο εργαλείο συγκόλλησης. Το εργαλείο συγκόλλησης είναι συνήθως κυλινδρικό με μια προεξέχουσα κεφαλή στην άκρη του, η οποία μπορεί να έχει διάφορα προφίλ. Το εργαλείο αυτό περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και η κεφαλή ή πείρος συγκόλλησης διεισδύει σιγά στο σημείο ένωσης των δυο προς συγκόλληση ελασμάτων, μέχρι το περιαιχένιο να εφάπτεται στα προς συγκόλληση τεμάχια. Τα προς συγκόλληση τεμάχια πρέπει να είναι καλά πακτωμένα με τέτοιο τρόπο που να αποτρέπεται η απομάκρυνση του ενός από το άλλο.

Το μήκος του πείρου του εργαλείου συγκόλλησης πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερο (συνήθως κατά 0,2 mm) από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων. Το περιαιχένιο του εργαλείου συγκόλλησης πρέπει να έρχεται σε άμεση επαφή με την προς συγκόλληση επιφάνεια για την παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας. Στη συνέχεια το εργαλείο αρχίζει να κινείται πάνω στην επιφάνεια ένωσης των προς συγκόλληση ελασμάτων. Σε μερικές περιπτώσεις, το εργαλείο συγκόλλησης παραμένει σταθερό και τα προς συγκόλληση μέταλλα κινούνται με σταθερή ταχύτητα και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η συγκόλληση [5].

Θερμότητα λόγω τριβής αναπτύσσεται ανάμεσα στο περιαιχένιο, στον πείρο του εργαλείου συγκόλλησης και τα μέταλλα προς συγκόλληση. Η

θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής, σε συνδυασμό με τη θερμότητα που δημιουργείται από τη διαδικασία ανάδευσης, πλαστικοποιεί τα προς συγκόλληση μέταλλα, χωρίς όμως να φτάσουν ποτέ τη θερμοκρασία τήξης τους, επιτρέποντας τη διέλευση του εργαλείου συγκόλλησης σε έναν άξονα πλαστικοποιημένου μετάλλου κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης.



Εικόνα 2.3.1: Σχηματική αναπαράσταση της FSW [1].

Επειδή παρατηρείται πλαστικοποίηση του υλικού λόγω θερμότητας που αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες έως και το 0,8 του σημείου τήξης, χαρακτηρίζουμε τη συγκόλληση με τριβή και ανάδευση ως μια συγκόλληση στερεάς κατάστασης.

Καθώς το εργαλείο συγκόλλησης κινείται προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης, υποβοηθούμενο από το ειδικό προφίλ του, επιβάλλει στο πλαστικοποιημένο υλικό να κινηθεί από το μπροστά προς το πίσω μέρος του πείρου, ενώ του ασκεί μια δύναμη ουσιώδους μεγέθους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δύο διαφορετικές πλευρές στο συγκολλημένο υλικό: η προωθούμενη και η υποχωρούσα πλευρά. Η προωθούμενη πλευρά είναι εκείνη από την οποία η φορά της ταχύτητας συγκόλλησης ταυτίζεται με τη φορά της ταχύτητας περιστροφής.

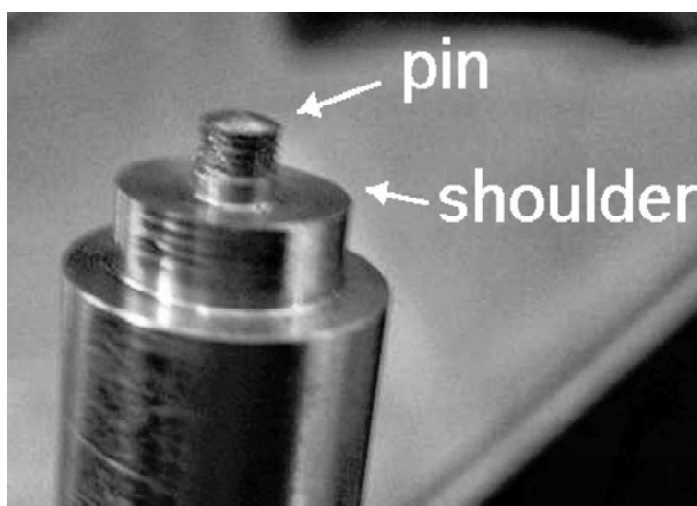
Η συγκόλληση των δύο μετάλλων διευκολύνεται από την έντονη πλαστική παραμόρφωση στη στερεά φάση, η οποία επίσης περιλαμβάνει την ανακρυστάλλωση του μητρικού υλικού και τη δημιουργία χαρακτηριστικών

λεπτών και ισοαξονικών κόκκων. Ακόμη, τα συγκολλούμενα μέταλλα παρουσιάζουν λεπτόκοκκη δομή σε σχέση με το μητρικό υλικό.

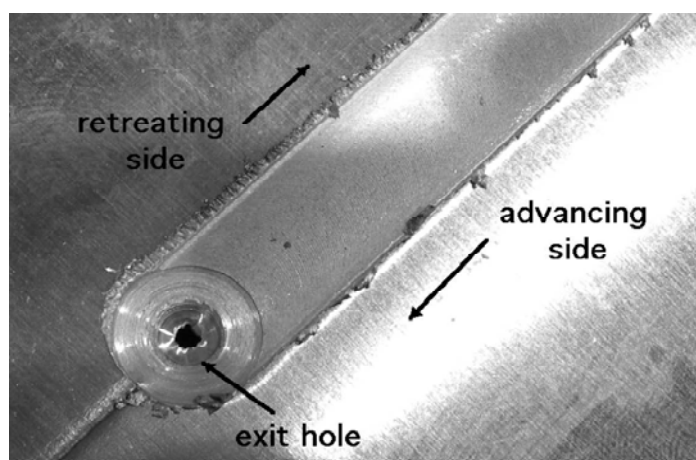
Συνοπτικά, τα βήματα του μηχανισμού της συγκόλλησης είναι:

- Περιστροφή του εργαλείου συγκόλλησης
- Εισαγωγή του πείρου στην αρχή της γραμμής συγκόλλησης
- Επαφή του περιαιχενίου με την επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων
- Ανάπτυξη θερμότητας λόγω τριβής
- Πλαστικοποίηση του υλικού λόγω θερμότητας
- Ανάδευση πλαστικοποιημένου υλικού
- Παραγωγή ραφής

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ένα εργαλείο συγκόλλησης και η μορφή του μετώπου μιας παραγόμενης με FSW συγκόλλησης:



Εικόνα 2.3.2: Εργαλείο της συγκόλλησης [15].



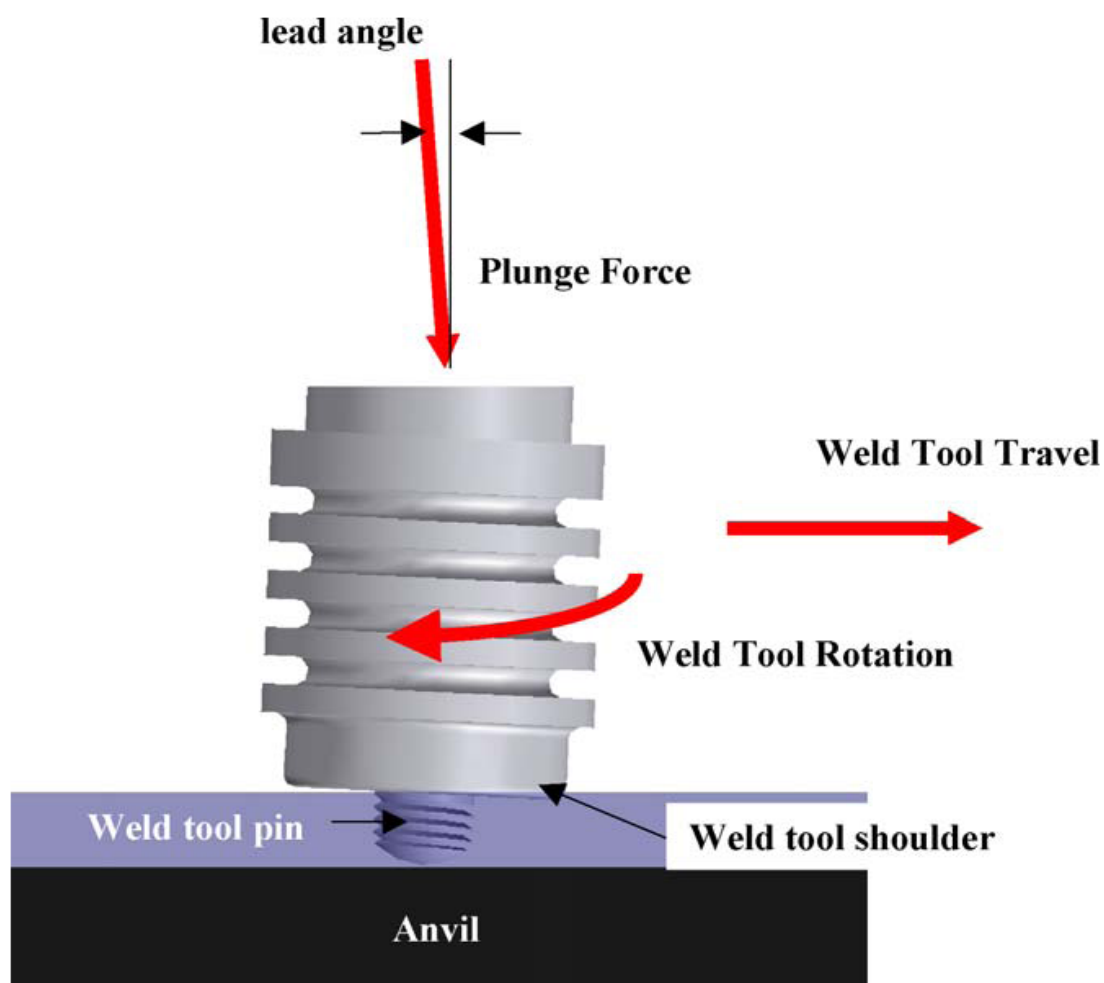
Εικόνα 2.3.3: Μορφή της συγκόλλησης FSW [15].

2.4 Εργαλείο συγκόλλησης

2.4.1 Γεωμετρία εργαλείου

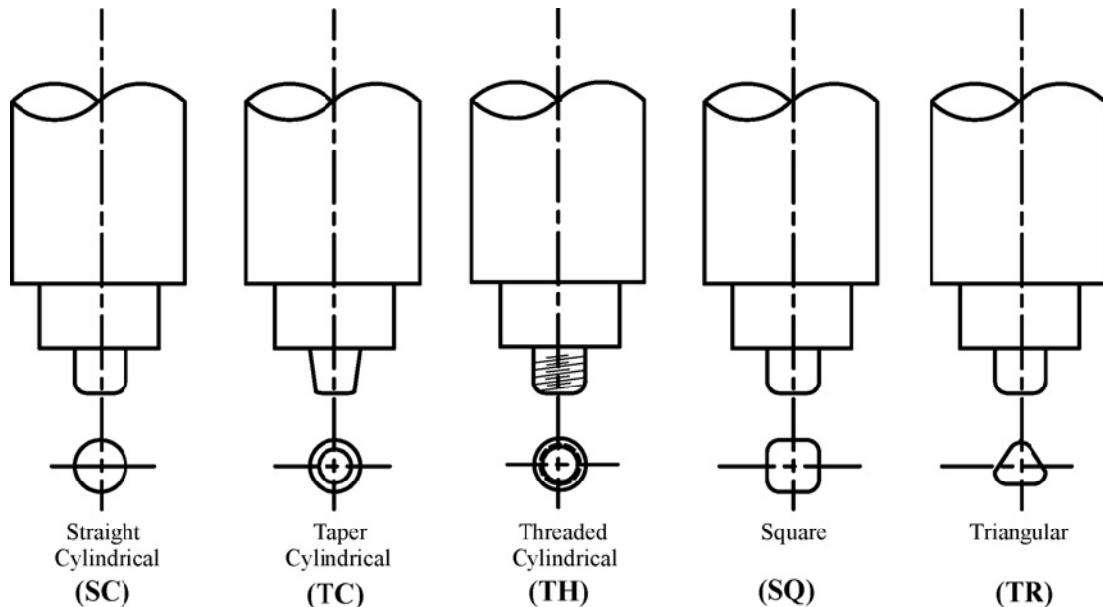
Ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκόλλησης αποτελεί βασικό παράγοντα στην ποιότητα της συγκόλλησης, καθώς μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και να αυξήσει την ταχύτητα της συγκόλλησης. Πρέπει να είναι αρκετά σκληρό και να αντέχει στη φθορά, καθώς και στις σχετικά υψηλές θερμοκρασίες συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό τα υλικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την FSW κραμάτων αλουμινίου είναι βαμένος χάλυβας ή WC (καρβίδια του βολφραμίου).

Με το περιστρεφόμενο εργαλείο συντελούνται δύο βασικές διεργασίες: η θέρμανση του προς συγκόλληση δοκιμίου μέσω τριβής, έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η πλαστική του παραμόρφωση και η ανάδευση των δυο τεμαχίων. Ο συνδυασμός της περιστροφικής και εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου προκαλεί τη μετατόπιση του μαλακού λόγω θερμότητας υλικού από το εμπρόσθιο μέρος της κεφαλής στο πίσω.

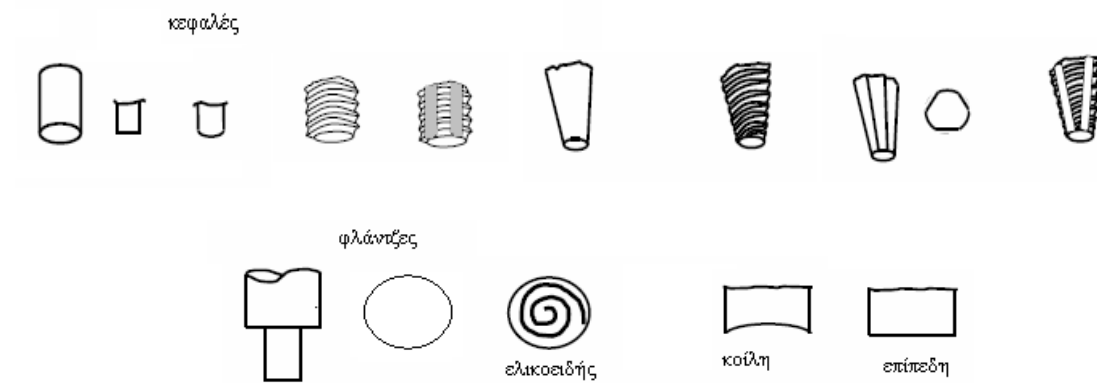


Εικόνα 2.4.1: Αναπαράσταση της λειτουργίας του εργαλείου συγκόλλησης [1].

Το μήκος του πείρου είναι, προφανώς, ανάλογο του πάχους των προς συγκόλληση τεμαχίων. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι το μήκος του πείρου πρέπει να είναι συνήθως 0,2 mm μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων [6].



Σχήμα 2.4.2: Συνήθεις μορφές πείρων του εργαλείου συγκόλλησης: κυλινδρικός, κόλινδρικός κώνος, κυλινδρικός με σπείρωμα, τετραγωνικός, τριγωνικός [5].



Σχήμα 2.4.3: Είδη πείρων του εργαλείου συγκόλλησης [5].

2.4.2 Κίνηση εργαλείου

Κατά τη διεργασία της FSW η κεφαλή συγκόλλησης εκτελεί ταυτόχρονα δύο κινήσεις: Περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα κάθετο ή σχεδόν κάθετο στο επίπεδο συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα κινείται κατά τη γραμμή συγκόλλησης. Τόσο η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου όσο και η

ταχύτητα πρόωσης (ταχύτητα συγκόλλησης) επηρεάζουν άμεσα όχι μόνο την ποιότητα της συγκόλλησης [7,8], αλλά και την παραγωγικότητά της [9], γεγονός πολύ κρίσιμο για το κόστος της εφαρμογής της.

Η περιστροφή και η πρόωση της κεφαλής είναι οι κύριες πηγές θερμότητας της συγκόλλησης και οι κύριες παράμετροι της ροής του υλικού. Πολλές χαρακτηριστικές ατέλειες που συμβαίνουν στην FSW οφείλονται στη χρήση μη κατάλληλης γεωμετρίας κεφαλής σε συνδυασμό με τη λανθασμένη επιλογή ταχύτητας πρόωσης και περιστροφής.

2.4.3 Γωνία εργαλείου συγκόλλησης- Βάθος διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης ορίζεται ως το βάθος του χαμηλότερου σημείου του πείρου συγκόλλησης, κάτω από την επιφάνεια του συγκολλούμενου μετάλλου και έχει αποδειχθεί πως αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την παραγωγή καλής ποιότητας συγκόλλησης. Καθώς ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης βυθίζεται κάτω από την επιφάνεια του συγκολλούμενου μετάλλου, αυξάνεται η πίεση που ασκείται στο πλαστικοποιημένο υλικό και επιβάλλεται η επαρκής ανάδευσή του.

Έχει αποδειχθεί πως αυτή η διαδικασία ευνοείται με την κλίση του εργαλείου συγκόλλησης κατά 2 με 4 μοίρες, έτσι ώστε το πίσω μέρος του εργαλείου να είναι χαμηλότερο από ότι το μπροστά.

Το βάθος της διείσδυσης πρέπει να υπολογιστεί σωστά ώστε να επιβληθεί η απαραίτητη αξονική δύναμη και να υποστεί ανάδευση ο απαραίτητος όγκος υλικού. Το βάθος συγκόλλησης δεν πρέπει να είναι πολύ μικρό, διότι μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ανεπαρκούς διείσδυσης, όσο αφορά στη ρίζα της συγκόλλησης. Σε αντίθετη περίπτωση, ένα μεγάλο βάθος διείσδυσης ενδεχομένως να οδηγήσει σε διαφορά πάχους, ανάμεσα στην περιοχή της συγκόλλησης και στο μητρικό υλικό, με μορφή κοιλότητας, κάτι που θα είχε ως επακόλουθο χειρότερες μηχανικές ιδιότητες [9]. Σε επιλογή ακόμη πιο μεγάλου βάθους διείσδυσης υπάρχει ενδεχόμενο επαφής του πείρου με τη βάση υποστήριξης.

2.5 Πλαστικοποίηση υλικού

2.5.1 Θερμοκρασία

Η θερμότητα που παράγεται από την περιστροφική κίνηση του περιαιχενίου λόγω τριβής είναι η κύρια πηγή θερμότητας στην FSW [3,4]. Η συνολική θερμότητα παράγεται τόσο από την τριβή του περιαιχενίου με την

επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων, όσο και από την παραμόρφωση του υλικού η οποία οφείλεται στην κίνηση του πείρου [3,4].

Η παραγωγή καλής ποιότητας συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης εξαρτάται κατά πολύ από τη μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη γραμμή συγκόλλησης των τεμαχίων. Με χαμηλή θερμοκρασία δυσχεραίνει η κίνηση του πείρου, με αποτέλεσμα την εντονότερη φθορά του εργαλείου ή ακόμη και τη θραύση του. Αντίθετα με πολύ υψηλή θερμοκρασία το μέταλλο προσκολλάται πάνω στον πείρο και το περιουχένιο προκαλώντας επίσης και πιθανή μεγέθυνση των κόκκων στη μικροδομή της συγκόλλησης.

Η προθέρμανση των τεμαχίων, καθώς και η ψύξη τους παίζουν σημαντικό ρόλο στην FSW. Σε υλικά με υψηλό σημείο τήξης όπως ο χάλυβας και το τιτάνιο ή με υψηλή θερμική αγωγιμότητα όπως ο χαλκός, η θερμότητα που παράγεται μέσω της τριβής και της ανάδευσης του υλικού μπορεί να μην είναι επαρκής για να μαλακώσει και να πλαστικοποιηθεί το υλικό γύρω από την κεφαλή συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές απαιτείται κάποια εξωτερική πηγή θέρμανσης η οποία θα βοηθήσει την πλαστικοποίηση του υλικού. Τέλος, για υλικά με χαμηλό σημείο τήξης, όπως το αλουμίνιο ή το μαγνήσιο, η ψύξη μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της μεγέθυνσης των ανακρυσταλλωμένων κόκκων και της διάλυσης των κατακρημνισμένων φάσεων μέσα και γύρω από τη ζώνη ανάδευσης [10].

2.5.2 Ροή υλικού

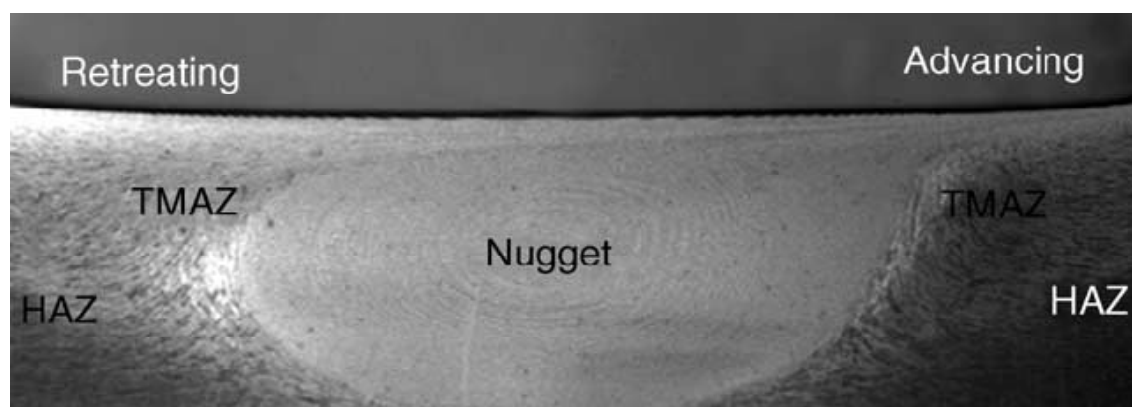
Η ροή του υλικού κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται από τη γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης, από τις λειτουργικές παραμέτρους και από το υπό συγκόλληση υλικό. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής υλικού διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο, τόσο στο βέλτιστο σχεδιασμό των εργαλείων συγκόλλησης, όσο και στην πραγματοποίηση συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε αρκετές έρευνες για τη ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της FSW. Επιπρόσθετα, έχουν αναπτυχθεί και κάποιες υπολογιστικές μέθοδοι για τη μοντελοποίησή της [10].

2.6 Γεωμετρία Συγκόλλησης- Ζώνες

Η έντονη πλαστική παραμόρφωση σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στον πυρήνα συγκόλλησης, οδηγεί στη δυναμική ανακρυστάλλωση του πυρήνα συγκόλλησης καθώς και στη διάλυση των κατακρημνισμάτων μέσα και γύρω από αυτόν [9,10,11,12,13]. Έτσι, στην περιοχή της συγκόλλησης, από απόψεως μικροδομής, διακρίνονται οι παρακάτω ζώνες:

- Η ζώνη ανάδευσης (stir zone, SZ) ή πυρήνας συγκόλλησης (weld nugget, WN)
- Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (thermomechanically affected zone, TMAZ, ΘΜΕΖ)
- Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zone, HAZ, ΘΕΖ)

Οι αλλαγές της μικροδομής στις διάφορες ζώνες επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου μετάλλου.



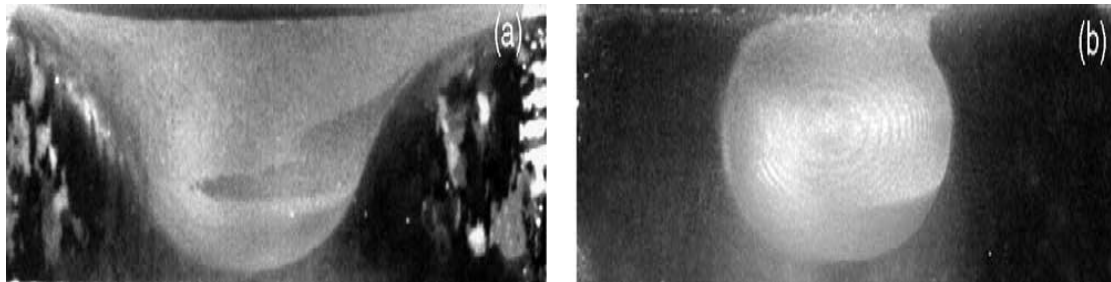
Εικόνα 2.6.1: Απεικόνιση των ζωνών που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση [10].

2.6.1 Ζώνη Ανάδευσης ή Πυρήνας Συγκόλλησης

Η έντονη πλαστική παραμόρφωση και η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών λόγω τριβής κατά τη διάρκεια της FSW, συμβάλλουν στο σχηματισμό μιας δυναμικά ανακρυσταλλωμένης μικροδομής στον πυρήνα συγκόλλησης. Η ζώνη αυτή ουσιαστικά αποτελεί το κέντρο της συγκόλλησης και αναπαριστά την περιοχή από την οποία πέρασε ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης. Ο πυρήνας συγκόλλησης έχει μέγιστο πλάτος ίσο με τη διάμετρο του περιαιχενίου και μέγιστο ύψος περίπου ίσο με το μήκος του πείρου. Ο διαχωρισμός του πυρήνα συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης είναι δυσδιάκριτος στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης, αλλά γίνεται ευδιάκριτος στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.

- Σχήμα του Πυρήνα Συγκόλλησης

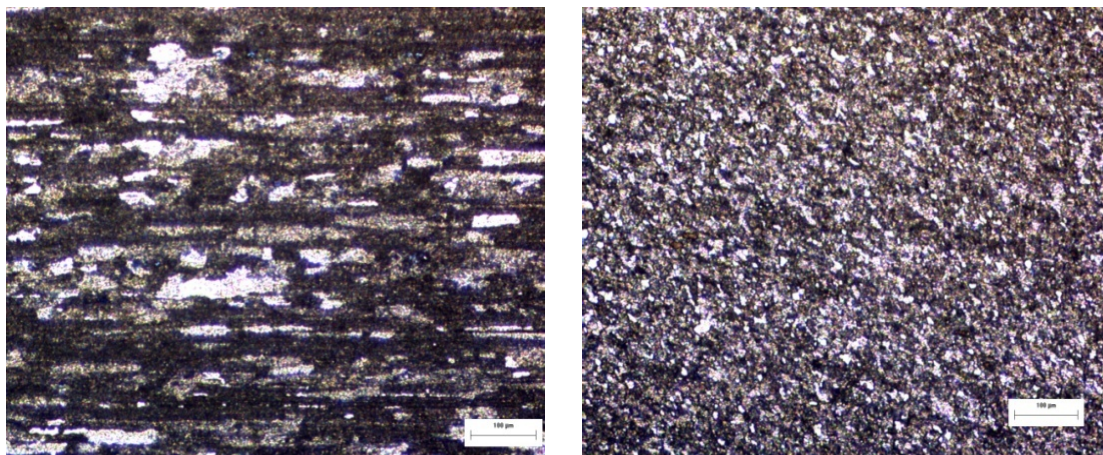
Έχουν παρατηρηθεί διάφορα σχήματα του πυρήνα συγκόλλησης που εξαρτώνται από τις λειτουργικές παραμέτρους, τη γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης, τη θερμοκρασία του υπό συγκόλληση τεμαχίου και τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Ο πυρήνας συγκόλλησης μπορεί να ταξινομηθεί σε δυο κατηγορίες: τον πυρήνα σχήματος λεκάνης που διαπλάτνεται κοντά στην άνω επιφάνεια του τεμαχίου και τον πυρήνα σχήματος έλλειψης.



Εικόνα 2.6.2: α) Πυρήνας σχήματος λεκάνης, β) Πυρήνας ελλειπτικού σχήματος [10].

- Μέγεθος των Κόκκων

Οι λειτουργικές παράμετροι, η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης, η θερμοκρασία του τεμαχίου, η κάθετη δύναμη και η ψύξη διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στο μέγεθος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων. Οι ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι είναι ιδιαίτερα λεπτοί εξαιτίας των πολύ ισχυρών διατμητικών δυνάμεων που ασκήθηκαν στο μέταλλο κατά την ανάδευσή του, ενώ το μέγεθός τους είναι περίπου το 1/10 του αρχικού τους μεγέθους [14]. Παρόλο που το τυπικό μέγεθος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων αλουμινίου εκτείνεται στην κλίμακα των μικρών (μm), έχουν επιτευχθεί μεγάθη κόκκων μικρότερα του 1μm με τη χρήση εξωτερικής ψύξης καθώς και ειδικών γεωμετριών εργαλείων συγκόλλησης [11].

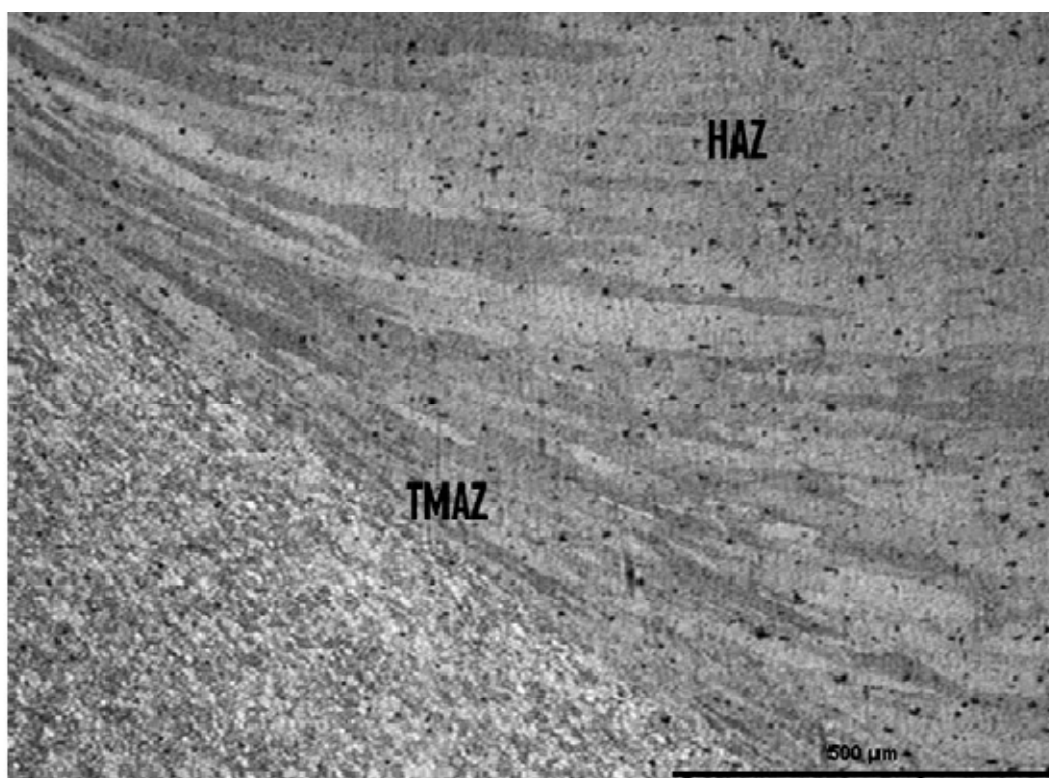


Εικόνα 2.6.3: α) Βασικό μέταλλο,

β) Πυρήνας συγκόλλησης

2.6.2 Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη

Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη είναι μια περιοχή που βρίσκεται μεταξύ της ΘΕΖ και του πυρήνα συγκόλλησης. Η ΘΜΕΖ υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και υπόκειται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τον πυρήνα συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της FSW. Οι κόκκοι του μετάλλου παραμορφώνονται και αποκτούν συγκεκριμένο προσανατολισμό ως προς τον πυρήνα συγκόλλησης. Αν και η ΘΜΕΖ παραμορφώνεται πλαστικά, δεν υφίσταται δυναμική ανακρυστάλλωση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών συγκριτικά με τη ζώνη ανάδευσης.



Εικόνα 2.6.3: Μικροδομή της ΘΜΕΖ και της ΘΕΖ [25].

2.6.3 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη

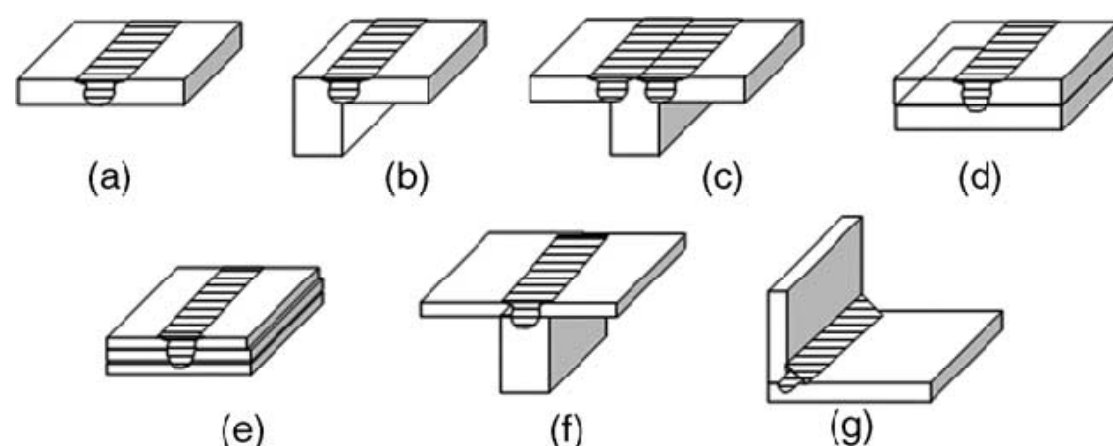
Μετά από τη ΘΜΕΖ παρατηρείται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η ζώνη αυτή επηρεάζεται μόνο θερμικά, χωρίς να υφίσταται ανακρυστάλλωση ή πλαστική παραμόρφωση. Το μέγεθος των κόκκων είναι μεγαλύτερο από αυτό της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης.

2.6.4 Βασικό Μέταλλο

Αυτή η περιοχή αποτελείται από υλικό που βρίσκεται μακριά από τη συγκόλληση, το οποίο παραμένει ανεπηρέαστο και παρά το γεγονός ότι έχει θερμανθεί από τη συγκόλληση δεν έχει επηρεαστεί ούτε η μικροδομή, ούτε οι μηχανικές ιδιότητές του.

2.7 Γεωμετρίες Συγκόλλησης

Οι πιο βολικές διατάξεις συγκόλλησης για τη μέθοδο FSW είναι οι μετωπικές συγκολλήσεις και οι συγκολλήσεις με επικάλυψη.



Σχήμα 2.7.1: Γεωμετρίες συγκολλήσεων όπου βρίσκει εφαρμογή η μέθοδος FSW: (a) Σύνδεση κατά συμβολή (Butt), (b) Γωνιακή σύνδεση (Edge penetration), (c) Σύνδεση T, (d) Σύνδεση με επικάλυψη (Lap penetration), (e) Πολλαπλή σύνδεση με επικάλυψη, (f) Σύνδεση τύπου T με επικάλυψη, (g) Αυχενική σύνδεση [10]

Πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο για μετωπικές συγκολλήσεις όσο και για συγκολλήσεις με επικάλυψη δεν χρειάζεται καμία ειδική προετοιμασία. Δυο ελάσματα μπορούν εύκολα να συγκολληθούν μεταξύ τους, χωρίς ανησυχία για τις συνθήκες των επιφανειών τους.

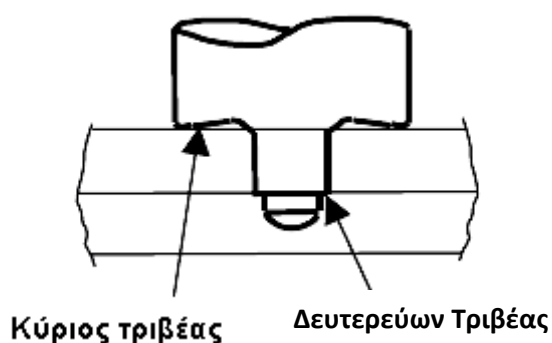
- Μετωπική Συγκόλληση

Η μετωπική συγκόλληση είναι η συνηθέστερη γεωμετρία συγκόλλησης. Τα προς συγκόλληση τεμάχια τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο και πακτώνονται καλά στη βάση υποστήριξης. Θεμελιώδους σημασίας για τη

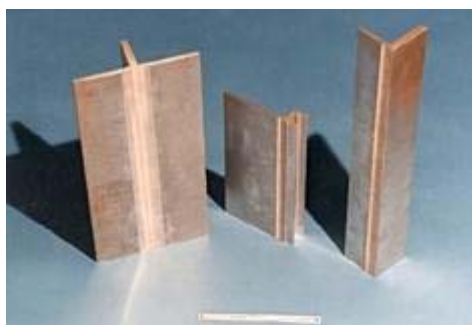
συγκεκριμένη γεωμετρία είναι η επίπεδη ροή του υλικού. Για την ολοκλήρωση της ρίζας της συγκόλλησης, ο πείρος πρέπει να διέλθει πολύ κοντά από τη βάση υποστήριξης. Ο ατελής σχηματισμός ρίζας είναι βασική αιτία αστοχίας των συγκολλήσεων [4].

- Συγκόλληση με επικάλυψη

Τα προς συγκόλληση τεμάχια τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο. Το έλασμα που βρίσκεται στην άνω πλευρά της διάταξης έρχεται σε επαφή με το περιαυχένιο του εργαλείου συγκόλλησης, ενώ το έλασμα που βρίσκεται στην κάτω πλευρά της διάταξης, έρχεται σε επαφή με το κατώτατο σημείο του πείρου του εργαλείου συγκόλλησης. Οι εγκοπές που σχηματίζονται στα δύο άκρα της συγκόλλησης αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και επομένως πιθανά σημεία έναρξης της αστοχίας του υλικού. Η συγκόλληση με επικάλυψη επιτάσσει τη χρήση εξειδικευμένου εργαλείου συγκόλλησης, το οποίο εκτός από τον κύριο τριβέα έχει και δευτερεύοντα τριβέα.



Σχήμα 2.7.2: Εξειδικευμένο εργαλείο για συγκόλληση με επικάλυψη [15].



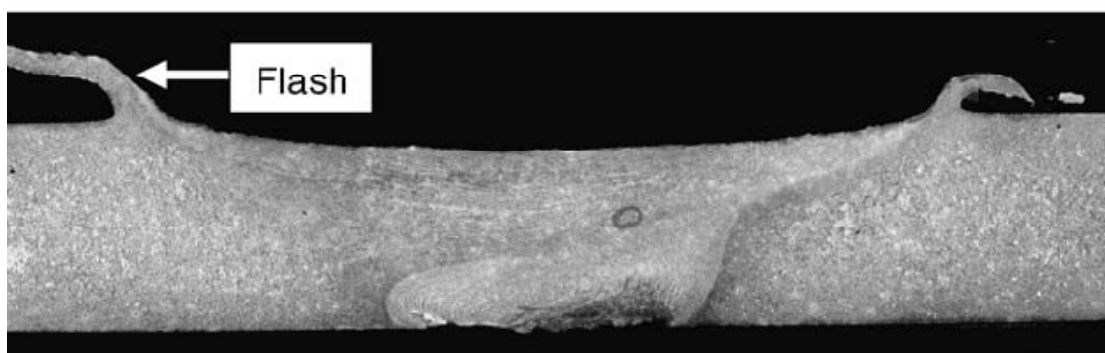
Εικόνα 2.7.1: Γεωμετρίες συγκόλλησης με χρήση της μεθόδου FSW [3].

2.8 Τύποι Ατελειών της Συγκόλλησης δια Τριβής μέσω Ανάδευσης

Οι ατέλειες της συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης παρουσιάζονται όταν γίνεται χρήση μη ικανοποιητικών λειτουργικών παραμέτρων (ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης, κάθετη δύναμη). Έτσι ο σχηματισμός των ακόλουθων ατελειών έχει άμεση σχέση με τις λειτουργικές παραμέτρους της συγκόλλησης [16].

Τύποι ατελειών:

1. Εκβολή μάζας μετάλλου εκτός της περιοχής της ραφής (γρέζι, flash) λόγω αυξημένης πρόσδοσης θερμότητας.
2. Ατέλειες που μοιάζουν με αυλάκι (groove-like defects) και ως αιτία έχουν την ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας.
3. Ατέλειες που ως αιτία έχουν την μη ομαλή ανάδευση του μετάλλου.

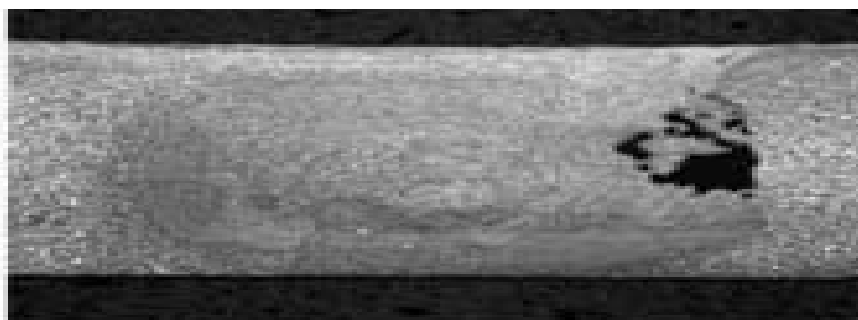


Εικόνα 2.8.1: Συνήθης ατέλεια συγκόλλησης που προκαλείται εξαιτίας της αυξημένης πρόσδοσης θερμότητας [16].

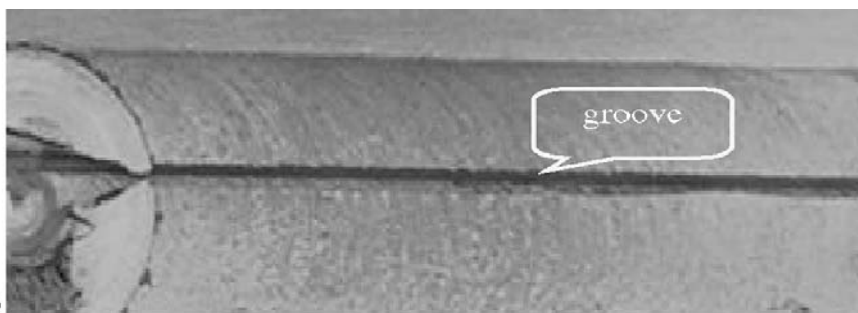
Οι ατέλειες που σχετίζονται με την αυξημένη πρόσδοση θερμότητας (1) εμφανίζονται σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής και χαμηλότερες ταχύτητες πρόωσης. Η μεγάλη μάζα του μετάλλου εκβάλλεται προς την επιφάνεια εξαιτίας της πλαστικοποίησης του μετάλλου λόγω της υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας. Αρκετές φορές η άκρη του εργαλείου συγκόλλησης έρχεται σε επαφή με την πλάκα υποστήριξης των συγκολλούμενων τεμαχίων [16].

Οι ατέλειες εξαιτίας της ανεπαρκούς πρόσδοσης θερμότητας (2) σχηματίζονται σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης. Παρατηρείται ο σχηματισμός ατελειών που έχουν τη μορφή κοιλοτήτων ή αυλακιών (groove). Οι ατέλειες μορφής τούνελ (tunnel

defects) ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Τέλος παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της κάθετης δύναμης οδηγεί σε μείωση του μεγέθους των ατελειών [16,17].

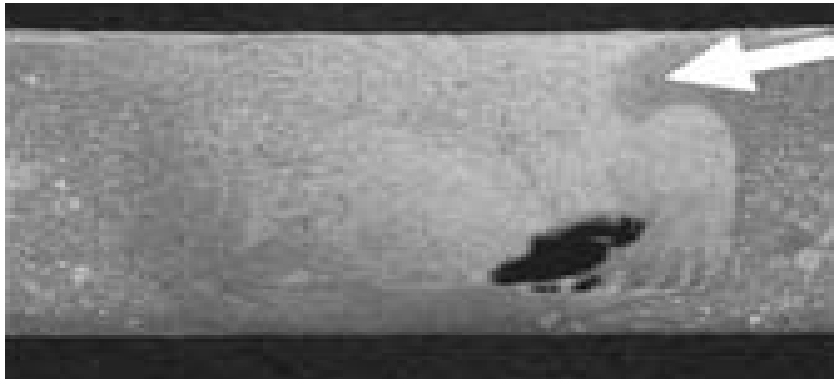


Εικόνα 2.8.2: Ατέλεια συγκόλλησης που σχετίζεται με την ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας [16].



Εικόνα 2.8.3: Ατέλεια μορφής αυλακίου [17].

Οι ατέλειες εξαιτίας της μη ομαλής ανάδευσης (3) σχηματίζονται σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής και συγκόλλησης. Η μη ομαλή ανάδευση οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της υψηλότερης περιοχής κοντά στην επιφάνεια και της χαμηλότερης περιοχής. Οι ατέλειες αυτές έχουν μεγάλη ομοιότητα με τις ατέλειες που σχετίζονται με την ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας, όμως υπάρχουν δυο χαρακτηριστικές διαφορές. Το άνω μέρος της ζώνης ανάδευσης στην προωθούμενη πλευρά είναι εντελώς διαφορετικό από αυτό μιας τυπικής συγκόλλησης. Η διαφορετικότητα αυτή οφείλεται στο ότι η ροή του υλικού είναι ασυνεχής. Επιπρόσθετα, η επίδραση της κάθετης δύναμης είναι πάρα πολύ μικρή, αν και παρατηρείται κάποια μείωση του μεγέθους των ατελειών με την αύξησή της [16].



Εικόνα 2.8.4: Ατέλειες που εμφανίζονται εξαιτίας της μη ομαλής ανάδευσης του υλικού [16].

Ένα ελάττωμα της μεθόδου που εμφανίζεται μόνο σε συγκολλήσεις ετεροειδών μετάλλων ή κραμάτων είναι το ελάττωμα δεσμού τύπου «φιλιού» (kissing bond). Αυτό το ελάττωμα είναι ιδιαίτερος ανησυχητικό, καθώς δεν ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας μη καταστρεπτικές μεθόδους, όπως ακτίνες-Χ ή τη μέθοδο υπερήχων.

Εάν η κεφαλή δεν έχει ικανοποιητικό μήκος ή έχει μήκος το οποίο υπερβαίνει το μήκος του ελάσματος που θέλουμε να συγκολλήσουμε, τότε η επιφάνεια στο κάτω μέρος της συγκόλλησης ίσως να μην αναδεύεται από το εργαλείο συγκόλλησης, συντελώντας έτσι σε ένα ελάττωμα ανεπαρκούς διείσδυσης [17].

2.9 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Το βασικότερο πλεονέκτημα της συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης είναι η ικανότητα αποτελεσματικής συγκόλλησης μετάλλων, κυρίως κραμάτων αλουμινίου, που είναι πολύ δύσκολο ή αδύνατο να συγκολληθούν με συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης [18]. Η στερεά φύση της μεθόδου αποτελεί άλλο ένα ισχυρό πλεονέκτημά της αφού αποφεύγονται όλα τα ελαττώματα που σχετίζονται με την τήξη όπως για παράδειγμα η δημιουργία πόρων, η ύπαρξη εγκλεισμάτων κτλ.

Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση συνοδεύεται από χαμηλές παραμορφώσεις, απουσία πορώδους και απουσία θερμής ρωγμάτωσης. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις ετεροειδών μετάλλων που δεν μπορούν να επιτευχθούν με χρήση κλασικών μεθόδων, όπως αυτές των κραμάτων αλουμινίου 2xxx και 7xxx. Έχει επίσης τη δυνατότητα συγκόλλησης ελασμάτων αλουμινίου μεγάλου πάχους με ένα πέρασμα [18].

Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται τόσο η μηχανική αντοχή των συγκολλούμενων υλικών, όσο και βελτίωση των ιδιοτήτων κόπωσης τους.

Επίσης τα προϊόντα είναι πολύ πιο σταθερά στο σημείο της ραφής της συγκόλλησης και είναι λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση από το περιβάλλον.

Γενικώς, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει παρατηρηθεί πως παράγει μικρό αριθμό ελαττωμάτων. Η μέθοδος δεν είναι ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως άλλες μέθοδοι συγκόλλησης, και δεν απαιτεί εκπαιδευμένο συγκολλητή. Επίσης, μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η εξαιρετική επαναληψιμότητά της.

Για την ταυτόχρονη συγκόλληση από τις δύο αντίθετες πλευρές του ελάσματος χρησιμοποιούνται διπλές κεφαλές συγκόλλησης κάτι που καθιστά δυνατή τη συγκόλληση τεμαχίων μεγάλου πάχους καθώς και τη δημιουργία συγκολλήσεων τύπου “sandwich” , μειώνοντας ταυτόχρονα και την προσδιδόμενη στη συγκόλληση θερμότητα. Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα της συγκόλλησης επίσης αυξάνεται καθώς η κεφαλή κινείται σε μικρότερο (ουσιαστικά στο μισό) πάχος.

Η μέθοδος γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, καθώς δίνει συγκολλήσεις με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και με μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση σε σχέση με τις συγκολλήσεις όπου υπάρχει τήξη.

2.10 Μειονεκτήματα της μεθόδου

Ένα μειονέκτημα της FSW, ειδικά σε πιο πολύπλοκες εφαρμογές, είναι το κόστος του πάγιου κεφαλαίου. Επίσης, για τη συγκράτηση των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι απαραίτητη η άσκηση υψηλών πλάγιων και κάθετων πιέσεων σε αυτά. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Γι’ αυτό τον λόγο ίσως είναι απαραίτητη η χρήση υδραυλικών συστημάτων [18].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

3 Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων, των μετάλλων, δηλαδή, των οποίων η πυκνότητα έχει χαμηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα του αλουμινίου είναι $2,7 \text{ g/cm}^3$. Η σημασία του αλουμινίου για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη, διότι τόσο αυτό όσο και τα κράματά του, παρουσιάζουν υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Το αλουμίνιο παρουσιάζει επίσης αρκετά καλή αντοχή σε διάβρωση [19].

3.1 Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου

Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό για τη βιομηχανία είναι το χαμηλό του ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες. Το αλουμίνιο υφίσταται εύκολα κατεργασία με χύτευση και με αφαίρεση υλικού. Παρουσιάζει, επίσης, πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα [20].

3.1.1 Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισούται με το 75% εκείνης του χαλκού. Παρ'όλα αυτά το αλουμίνιο, λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός. Αν αφεθεί στον αέρα οξειδώνεται ταχέως προς ένα λεπτό στρώμα Al_2O_3 , το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία [2,19].

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τα κράματα χύτευσης και τα κράματα διαμόρφωσης. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, το μαγγάνιο, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος [19].

3.1.2 Αντοχή στη διάβρωση

Το αλουμίνιο έχει αρκετά καλή αντοχή στη διάβρωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο σχηματισμό ενός λεπτού και ισχυρά προσφυόμενου επιφανειακού στρώματος οξειδίου (Al_2O_3). Αν, για οποιοδήποτε λόγο, το στρώμα αυτό διασπαστεί, τότε αμεσως σχηματίζεται καινούριο που συνεχίζει να προστατεύει το βασικό μέταλλο [18]. Η καλή αντοχή στη διάβρωση, το κάνει τόσο δημοφιλές στη Δόμηση, στη Ναυπηγική καθώς και στη βιομηχανία κατασκευής μεταφορικών μέσων (Αυτοκίνητα, Τρένα, Αεροπλάνα) [21].

Το αλουμίνιο σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα και παρουσία ηλεκτρολύτη μπορεί να διαβρωθεί λόγω του σχηματισμού γαλβανικού στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό συνήθως παρουσιάζεται στις επιφανειακές ενώσεις του αλουμινίου με άλλα μέταλλα, όπως στις περιοχές όπου σωληνώσεις άλλων μετάλλων διαπερνούν αλουμινένιες φρακτές και στη σύνδεση αλουμινένιας υπερκατασκευής με χαλύβδινο κατάστρωμα. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται εφαρμογή ειδικών διατάξεων για την προστασία των μετάλλων [21].

3.2 Κράματα αλουμινίου

Το καθαρό αλουμίνιο κραματοποιείται εύκολα με πολλά άλλα μέταλλα, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλης ποικιλίας φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων [2,21].

Το καθαρό αλουμίνιο είναι πολύ μαλακό και όλκιμο. Στις περισσότερες, όμως, πρακτικές εφαρμογές απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη άλλων στοιχείων για την παραγωγή κραμάτων [2,21].

3.2.1 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminium Association, αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα.

Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης:

(α) Στην πρώτη περίπτωση (κράματα διαμόρφωσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίνακας 1). Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου

υψηλότερες του 99,00%, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας [19].

Κωδικός	Κύρια Προσθήκη
1xxx	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2xxx	Χαλκός
3xxx	Μαγγάνιο
4xxx	Πυρίτιο
5xxx	Μαγνήσιο
6xxx	Μαγνήσιο και πυρίτιο
7xxx	Ψευδάργυρος
8xxx	Άλλα στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Πίνακας 3.2.1:Κωδικοποίηση των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης [19].

(β) Στη δεύτερη περίπτωση (κράματα χύτευσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, επίσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίνακας 2). Ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό [19].

Κωδικός	Κύρια Προσθήκη
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Μαγγάνιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μαγνήσιο και πυρίτιο
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Άλλα στοιχεία
9XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Πίνακας 3.2.2: Κωδικοποίηση των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης [19].

3.2.2 Σύστημα χαρακτηρισμού κατεργασιών

Για τη διευκόλυνση των χρηστών των κραμάτων αλουμινίου, το τετραψήφιο χαρακτηριστικό κάθε κράματος που αναφέρθηκε προηγουμένως, συνοδεύεται από ένα γράμμα και από ένα έως τρία ψηφία, τα οποία υποδηλώνουν την ακολουθία των κατεργασιών που υπέστη το κράμα με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του [2].

Κωδικός	Κατεργασία
F	Καμία κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση
H1	Μόνο ενδοτράχυνση
H2	Ενδοτράχυνση και μερική ανόπτηση
H3	Ενδοτράχυνση και σταθεροποίηση

T	Θερμική κατεργασία
T1	Βαφή και φυσική γήρανση
T2	Βαφή, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T3	Υπερβαφή, κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T4	Υπερβαφή και φυσική γήρανση
T5	Απόψυξη μετά από διαμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία και τεχνητή γήρανση
T6	Υπερβαφή και τεχνητή γήρανση
T7	Υπερβαφή και σταθεροποίηση για έλεγχο χαρακτηριστικών υλικού
T8	Υπερβαφή, κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
T9	Υπερβαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία διμόρφωσης εν ψυχρώ
T10	Βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, μόνο για κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση

Πίνακας 3.2.3: Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί [2,19].

3.2.3 Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά με μικρό αριθμό εγκλεισμάτων και μεσομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

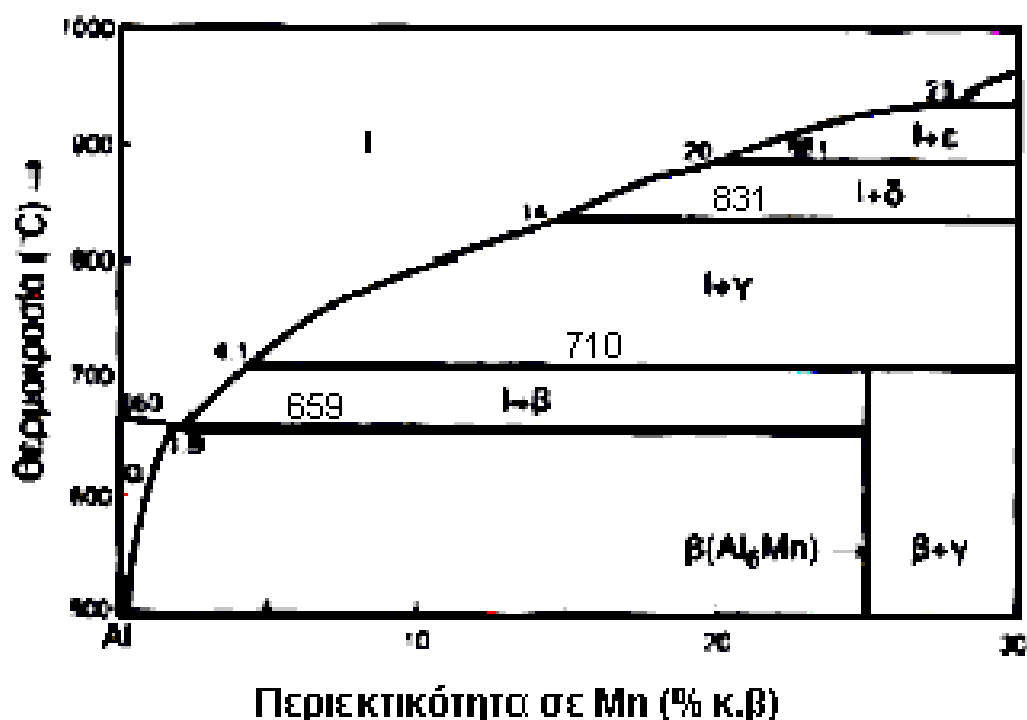
3.2.3.1 Κράματα Al που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

3.2.3.1.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000

Τα κράματα της σειράς αυτής έχουν ποσοστό αλουμινίου τουλάχιστον 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά μπορούν να βελτιωθούν με ενδοτράχυνση. Προσφέρονται για εν ψυχρώ κατεργασία και παρουσιάζουν σημαντική αντοχή σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική αγωγιμότητα και καλή αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται σε αυτά είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο σε ποσοστό έως 1% (κράμα 1100) [2,19].

3.2.3.1.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το Mn. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al που είναι 1,8% στους 659°C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία.



Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση Al_6Mn . Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία της Al_6Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής (κράμα 3003).

Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος (κράμα 3004).

Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευχέρεια διαμόρφωσης του υλικού και όχι υψηλή αντοχή [2,19].

3.2.3.1.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο, σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Σ' αυτά, το μεγαλύτερο μέρος του Mg, βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 (φάση β), η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη [19].

Το μαγνήσιο, χρησιμοποιούμενο ως κύριο στοιχείο κραματοποίησης, οδηγεί στη δημιουργία κράματος μέσης έως υψηλής αντοχής, το οποίο δεν επιδέχεται θερμική κατεργασία. Τα κράματα αυτά παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά συγκολλητότητας και υψηλή αντοχή στο θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον [2]

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική με κυριότερους εκπροσώπους τα 5052, 5083, 5086, 5454 και 5456. Τα κράματα 5086, 5083, 5456 στην κατεργασία H116 είναι τα κυριότερα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου ή άλλων ναυπηγικών κατασκευών [2].

3.2.3.2 Κράματα Al που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες

3.2.3.2.1 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6-6,3%, και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων $CuAl_2$ και $CuMgAl_2$, που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% (κράμα 2014), ευνοεί το σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας [19].

Η παρουσία του Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Εάν ωστόσο, προστεθεί συγχρόνως, και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230°C . Για παράδειγμα, το κράμα 2618, με σύσταση 2,3%Cu-1,6%Mg-1%Ni-1,1%Fe-0,18%Si-0,07%Ti, χρησιμοποιείται για την κατασκευή στοιχείων των τουρμποκινητήρων των υπερηχητικών αεροπλάνων [19].

Τα κράματα της σειράς αυτής, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα, καθώς οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης ζώνες, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά [19].

Η σειρά 2017 (Ντουραλουμίνιο - κράμα που περιέχει 3-5% χαλκό και μικρή ποσότητα μαγνησίου 0,2 - 0,75% και μαγγανίου 0,4-1%) που χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροναυπηγική παρουσιάζει μέση μηχανική αντοχή και καλή διαμορφωτική ικανότητα. Οι κυριότεροι τομείς που χρησιμοποιούνται τα κράματα της σειράς 2000 είναι η αεροναυπηγική και η διαστημική (στις δεξαμενές καυσίμων των προωθητικών πυραύλων) [19].

3.2.3.2.2 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000

Πρόκειται για κράματα Al-Mg-Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στο σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία, συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si, όπως, π.χ. στο κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση [19].

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση. Τα κράματα αυτά μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, με τη χρήση τους να περιορίζεται μέχρι τους 150°C . Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση [19].

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 6000 χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική, με κυριότερο εκπρόσωπο το κράμα 6061. Με αυτό κατασκευάζονται μορφοδοκοί που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά των ελασμάτων [2].

3.2.3.2.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000

Πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Αυτά, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα του αλουμινίου [19].

Το ποσοστό του Zn μεταβάλλεται από 4% έως 8% και αυτό του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού μειώνει την εμβαισιμότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%, βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητά τους [19].

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η μέτρια συγκολλησιμότητά τους καθώς και η μειωμένη αντοχή εν θερμώ. Έτσι χρησιμοποιούνται κυρίως σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (έως 120 °C).

Τα κράματα της σειράς 7000, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση και απαιτούν ισχυρή μηχανική αντοχή και αντοχή σε διάβρωση [19].

3.2.4 Κράματα χύτευσης αλουμινίου

Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ενός κράματος χύτευσης διαφέρουν από εκείνα των κραμάτων διαμόρφωσης. Τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση [19].

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι: η καλή χυτευσιμότητα, η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιογενής κατανομή του πορώδους (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση), η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων, η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων του αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιείται με τρεις τρόπους [19]:

- Χύτευση σε άμμο. Η μέθοδος εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας ομοίων χυτών αντικειμένων, πολύπλοκων εξαρτημάτων ή αντικειμένων ιδιαίτερης δομής.

- Χύτευση σε μεταλλικό τύπο. Το κράμα χυτεύεται με τη βοήθεια της βαρύτητας ή χαμηλής πίεσης. Με τη μέθοδο αυτή, τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο I χύτευσης. Ωστόσο, η μέθοδος αντενδείκνυται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων, εργαλείων ή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.
- Χύτευση υπό πίεση. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται λεπτόκοκκα χυτά, με λείες επιφάνειες και γεωμετρική ακρίβεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

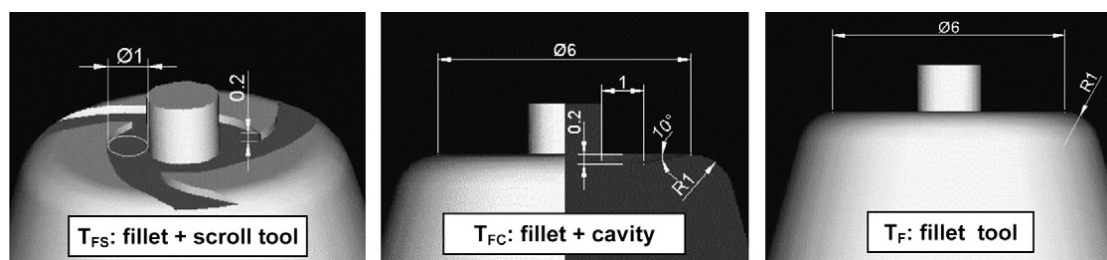
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ
ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΟΜΟΕΙΔΩΝ ΚΑΙ
ΕΤΕΡΟΕΙΔΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΟΜΟΕΙΔΩΝ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΕΙΔΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

4.1 Επίδραση της Γεωμετρίας του Πείρου και του Περιαιχενίου

Οι A. Scialpi , L.A.C. De Filippis a και P. Cavaliere [22] μελέτησαν την επίδραση της γεωμετρίας του περιαιχενίου του εργαλείου συγκόλλησης στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου κράματος αλουμινίου 6082, με τη μέθοδο FSW. Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες περιαιχενίου:

- ο Περιαιχένιο με σπείρωμα (scroll)
- ο Περιαιχένιο με κοιλότητα (cavity)
- ο Περιαιχένιο με Fillet



Εικόνα 4.1: (α) Περιαιχένιο με σπείρωμα, (β) Περιαιχένιο με κοιλότητα, (γ) Περιαιχένιο με fillet [22].

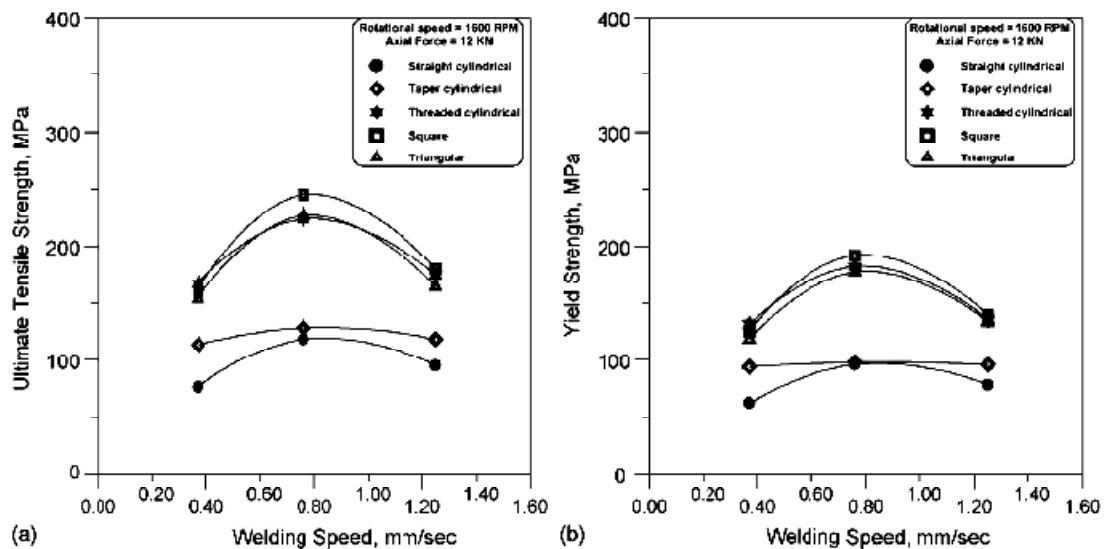
Μέσα από την εργασία τους παρατήρησαν τα εξής:

- ο Εργαλεία με διαφορετικά περιαιχένια παράγουν ραφές με μεγάλες διαφορές ως προς την ποιότητα της επιφάνειας συγκόλλησης.
- ο Η ραφή που παρήχθη από το περιαιχένιο με την κοιλότητα (cavity) χαρακτηρίζεται από πολύ λεία επιφάνεια ενώ παρατηρείται και μια πολύ μικρή ποσότητα υπερχειλίσης (flash). Η επιφάνεια συγκόλλησης που παράγει το συγκεκριμένο εργαλείο μπορεί να θεωρηθεί η ποιοτικά καλύτερη.
- ο Η μικροδομή των δοκιμίων διερευνήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο όπου φάνηκε η επίδραση του περιαιχενίου στο μέγεθος των κόκκων του πυρήνα συγκόλλησης.
- ο Στις δοκιμές παραμόρφωσης εγκάρσια στην τομή του δοκιμίου, όλες οι συγκολλήσεις παρουσίασαν καλή αντοχή.
- ο Στις δοκιμές παραμόρφωσης κατά το διαμήκη άξονα της τομής του δοκιμίου, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην αντοχή του

πυρήνα συγκόλλησης, με τη συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε με το περιουχένιο που φέρει σπείρωμα να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντοχή [22].

Οι K. Elangovan και V. Balasubramanian [7] μελέτησαν την επίδραση που έχει το σχήμα του πείρου στην ποιότητα της FSW σε κράμα αλουμινίου 2219-T87. Χρησιμοποίησαν πείρους διαφόρων σχημάτων: απλό κυλινδρικό, κόλουρο κωνικό, κυλινδρικό με σπείρωμα, τετραγωνικό και τριγωνικό. Μέσα από την εργασία τους παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Η τετραγωνική διατομή προσδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην ποιότητα της συγκόλλησης.
- Υπάρχει συσχετισμός της δυναμικής τροχιάς του πείρου με την ποιότητα της συγκόλλησης.
- Υπάρχει ένας συνδυασμός ταχύτητας πρόωσης και ταχύτητας περιστροφής όπου η συγκόλληση παρουσιάζει τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες ανεξαρτήτως του σχήματος του πείρου [7].



Διάγραμμα 4.1: Μηχανικές ιδιότητες -(a) οριο αντοχής και (b) οριο διαρροής-συναρτήσεως της ταχύτητας πρόωσης για διάφορα είδη πείρων [7].

4.2 Συγκολλήσεις ετεροειδών κραμάτων

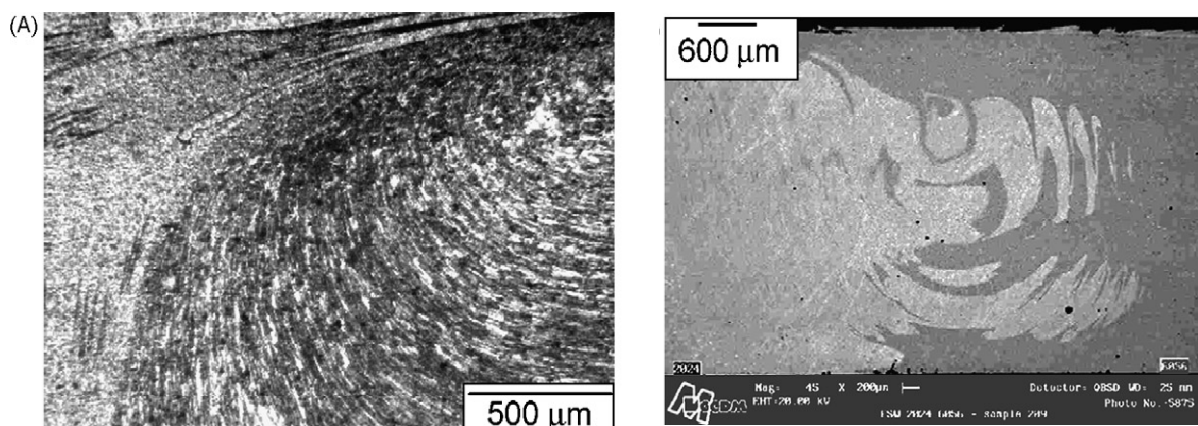
- 2024-6056

Οι Amancio-Filho, Sheikhi, dos Santos και Bolfarini [23] πραγματοποίησαν συγκολλήσεις μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου 2024-T351 και 6056-T4 με τη μέθοδο FSW, με σκοπό τη μελέτη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) παρατηρήθηκε μείωση της μικροσκληρότητας, ενώ στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή της και για τα δυο κράματα. Αύξηση της

μικροσκληρότητας παρατηρείται στην περιοχή μετάβασης από την TMAZ προς τον πυρήνα συγκόλλησης (WN).

Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής έχουν ως εξής. Η αλλαγή του προσανατολισμού των κόκκων ξεκινά στην περιοχή μετάβασης TMAZ/SZ και συνοδεύεται από μερική ανακρυστάλλωση και μείωση του μεγέθους των κόκκων. Πλήρης ανακρυστάλλωση πραγματοποιείται στην SZ και αποδεικνύεται από μια ικανοποιητική μείωση του μεγέθους των κόκκων.



Εικόνα 4.2: (α) Μικρογραφία της ζώνης μετάβασης μεταξύ TMAZ-SZ (β) Μικρογραφία του πυρήνα συγκόλλησης από SEM-BSE [23].

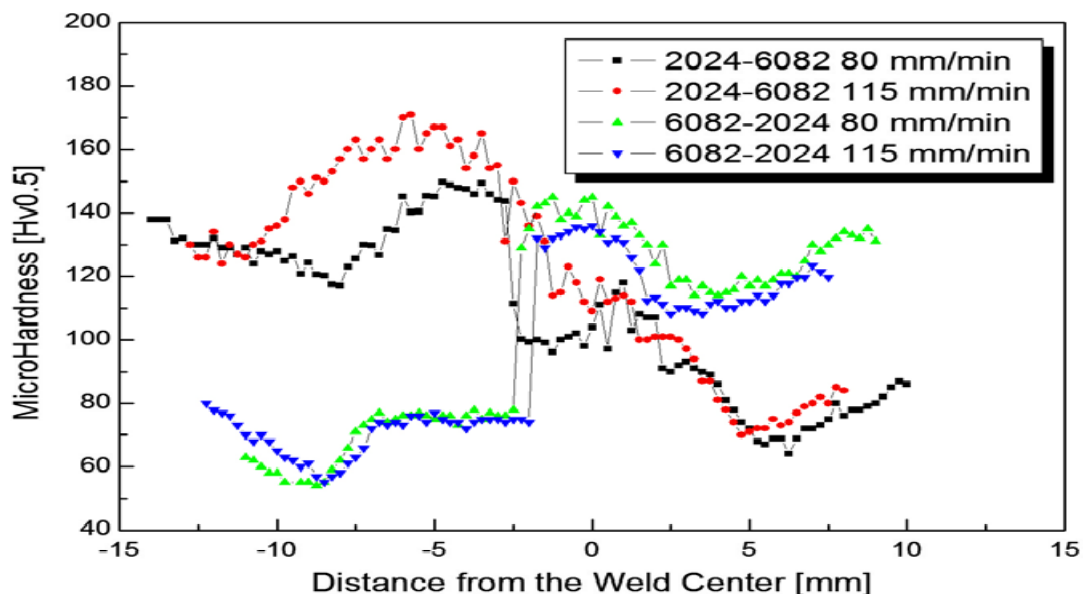
Τέλος, η μελέτη έδειξε ότι σε συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων, η απόδοση της συγκόλλησης καθορίζεται από το πιο αδύναμο, από άποψη αντοχής, κράμα της συγκόλλησης [23].

- **2024-6082**

Οι Cavaliere, Panella, De Santis και Squillace [24] μελέτησαν την επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή των κραμάτων AA6082 και AA2024 που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο FSW. Παράχθηκαν διάφορα δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου και εναλλάσσοντας τη θέση των κραμάτων έτσι ώστε να έχουν τοποθετηθεί και τα δυο στην προωθούμενη αλλά και στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης. Σε όλα τα πειράματα η ταχύτητα περιστροφής κρατήθηκε σταθερή στις 1600 RPM.

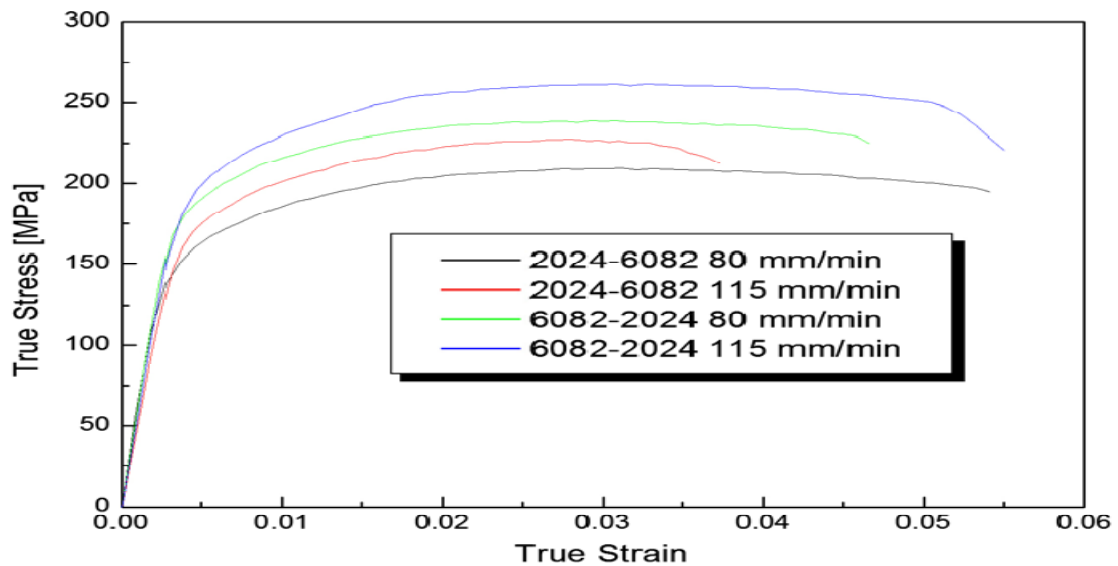
Οι υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας επιτυγχάνονται στην περίπτωση που το κράμα 2024 βρίσκεται στη προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Στην περίπτωση που στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης βρίσκεται το κράμα 6082, το προφίλ της μικροσκληρότητας του πυρήνα της συγκόλλησης παρουσιάζεται περισσότερο ομοιογενές, αναδεικνύοντας την καλύτερη ανάμιξη των υλικών. Οι χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας παρουσιάζονται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη εξαιτίας του φαινομένου της υπεργήρανσης. Στην περίπτωση που πραγματοποιείται

ανόπτηση μετά τη συγκόλληση, οι τιμές της μικροσκληρότητας για όλες τις περιπτώσεις των συγκολλήσεων μειώνονται.



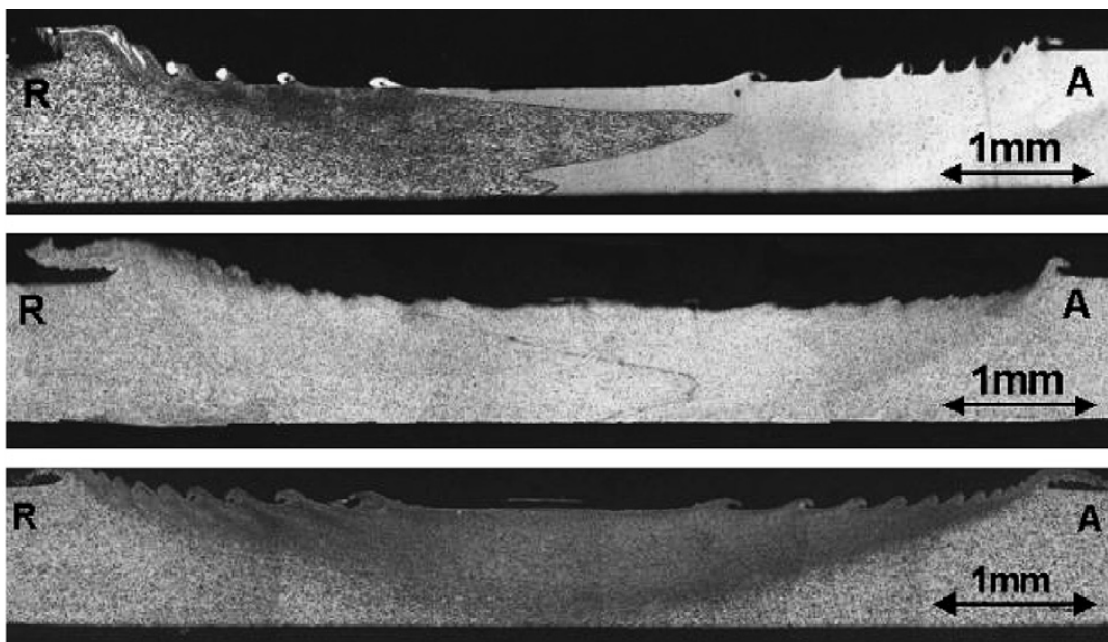
Διάγραμμα 4.2: Κατανομές μικροσκληρότητας των υπό μελέτη συγκολλήσεων [24].

Εν συνεχεία, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου. Η ολκιμότητα, στην περίπτωση που το AA6082 βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, ενώ μειώνεται στην περίπτωση που το AA2024 βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Καλύτερη αντοχή και ολκιμότητα επιτυγχάνονται όταν το AA6082 βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά και η ταχύτητα πρόωσης είναι 115 mm/min. Η ανόπτηση συνέβαλε στην αύξηση της αντοχής και της ολκιμότητας της συγκόλλησης εξαιτίας της χαλάρωσης των παραμενουσών τάσεων. Η κοπωτική συμπεριφορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου στην περίπτωση που το 6082 βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Αντίθετα η ταχύτητα πρόωσης δεν επηρεάζει έντονα την κοπωτική συμπεριφορά όταν το 2024 βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά [24].



Διάγραμμα 4.3: Εντατικές ιδιότητες των υπό μελέτη συγκολλήσεων [24]

Οι Scialpi, De Giorgi, De Filippis, Nobile και Panella [25] χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μFSW (παραλλαγή της FSW για εξαιρετικά λεπτά ελάσματα), έκαναν συγκολλήσεις μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου 2024-T3 και 6082-T6, για ελάσματα πάχους 0,8 mm.



Εικόνα 4.3: Μακρογραφία των υπό μελέτη συγκολλήσεων: (α) συγκόλληση κραμάτων 2024-6082, (β) συγκόλληση κραμάτων 6082, (γ) συγκόλληση κραμάτων 2024 [25].

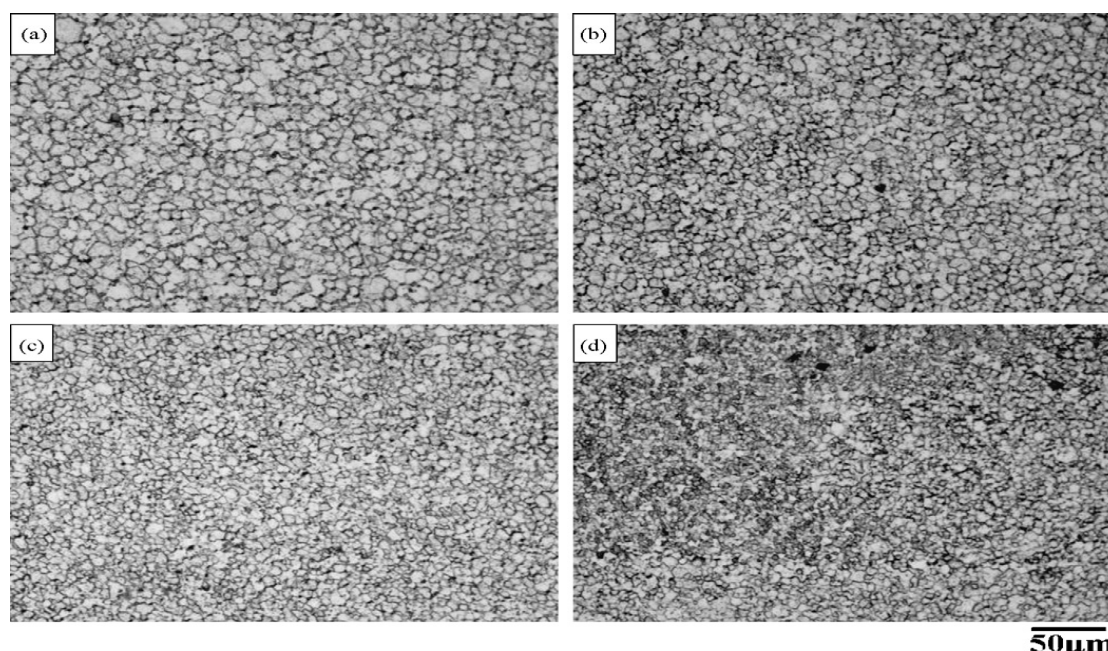
Η ανάλυση της μικροδομής δείχνει ότι όλες οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν τις παρακάτω τέσσερις χαρακτηριστικές περιοχές: α) μέταλλο βάσης (PM), β) θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ), γ) θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ), δ) ζώνη πυρήνα συγκόλλησης (NZ). Η NZ είναι η

περιοχή όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τάσεις, ενώ υφίσταται και ανακρυστάλλωση που οδηγεί σε κόκκους διαστάσεων <3μm τόσο για το κράμα 2024 όσο και για το κράμα 6082.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, η συγκόλληση μεταξύ των ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου 2024-6082 παρουσιάζει μείωση της μηχανικής αντοχής σε σχέση με εκείνη των αρχικών υλικών, ενώ η ολκιμότητα μειώνεται ελαφρά. Η συγκόλληση των δοκιμίων AA2024 έδειξε μεγάλες τιμές σ_{TS} (μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό), η οποία ανέρχεται περίπου στο 91% του μετάλλου βάσης, ενώ οι συγκολλήσεις των AA6082 και AA2024-AA6082 παρουσίασαν παρόμοια αντοχή, με το σ_{TS} να βρίσκεται περίπου στο 69% του κράματος 6082-T6. Τέλος, τα πειράματα έδειξαν αστοχία λόγω θραύσης στο κέντρο της συγκόλλησης για τα όμοια υλικά, ενώ για τα ανόμοια η θραύση επήλθε στην πλευρά του κράματος 6082 [25].

- **2024-7075**

Οι Khodir και Shibayanagi [26] μελέτησαν τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου 2024-T3 και 7074-T6, που παράχθηκαν με τη μέθοδο FSW, ως συνάρτηση της ταχύτητας συγκόλλησης και της θέσης των προς συγκόλληση μετάλλων.



Εικόνα 4.4: Μικρογραφίες του πυρήνα συγκόλλησης με το AA2024 στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης [26]

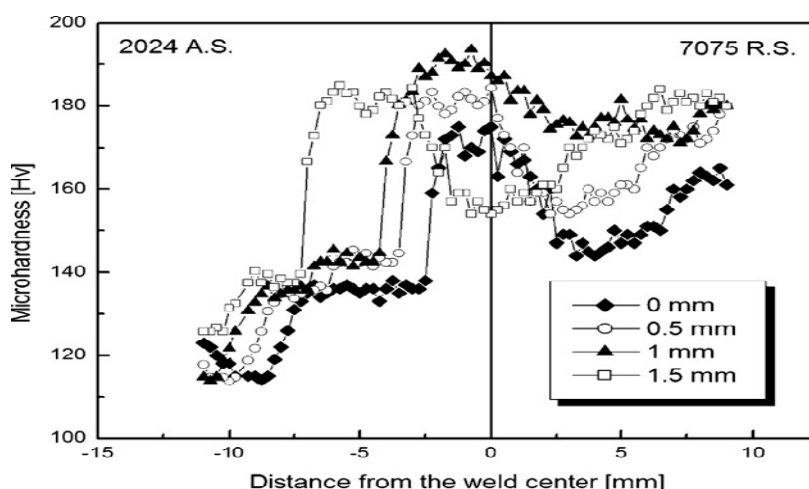
Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης ευνοούσε τη δημιουργία ατέλειας δεσμού τύπου 'φιλιού', αλλά και πόρων, κυρίως όταν το κράμα αλουμινίου 2024 βρισκόταν στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης. Η δακτυλιοειδής δομή που δημιουργήθηκε χαρακτηριζόταν από ομάδες κόκκων διαφορετικών μεγεθών, καθώς και από ετερογενή κατανομή στοιχείων κραμάτωσης στη ζώνη πυρήνα συγκόλλησης (nugget zone, NZ). Η ελάχιστη τιμή της σκληρότητας βρέθηκε και στις δυο πλευρές,

στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ). Τα τμήματα των συγκολλήσεων που δεν περιείχαν ατέλειες παρουσίασαν ρωγμάτωση στη HAZ στην πλευρά του κράματος αλουμινίου 2024 και τα τμήματα που περιείχαν ατέλειες παρουσίασαν ρωγμάτωση στον πυρήνα συγκόλλησης (WN). Η μέγιστη τάση εφελκυσμού της συγκόλλησης ήταν 423 MPa και επιτεύχθηκε για ταχύτητα συγκόλλησης 1,7 mm/s όταν το κράμα 2024 βρισκόταν στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης [26].

Οι Cavaliere και Panella [27] μελέτησαν την επίδραση της διαφορετικής θέσης του εργαλείου ως προς τη γραμμή συγκόλλησης στη συμπεριφορά σε κόπωση καθώς και στην αύξηση του μεγέθους ρωγμής λόγω κόπωσης, στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου 2024-7075 που παρήχθησαν με τη μέθοδο FSW. Κάποιες συγκολλήσεις παρήχθησαν με το εργαλείο σε απόσταση 0 mm από τη γραμμή της συγκόλλησης ενώ άλλες συγκολλήσεις παρήχθησαν μετακινώντας το εργαλείο 0,5, 1, 1,5 mm προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.

Η μικροδομή των παραγόμενων συγκολλήσεων δεν παρουσίαζε μεγάλες διαφορές για τις αποστάσεις 0, 0,5, 1 mm από τη γραμμή συγκόλλησης, ενώ διέφερε σημαντικά για την απόσταση 1,5 mm όπου η ζώνη του πυρήνα της συγκόλλησης (NZ) χαρακτηριζόταν από ομάδες κόκκων διαφορετικών μεγεθών εξαιτίας της μη ιδανικής ανάμιξης των δύο κραμάτων.

Η υψηλότερη τιμή σκληρότητας παρατηρήθηκε στη NZ της συγκόλλησης που παρήχθη με απόσταση του εργαλείου 1 mm από τη γραμμή συγκόλλησης, ενώ η χαμηλότερη τιμή παρατηρήθηκε για τη συγκόλληση με απόσταση εργαλείου 1,5 mm. Η υψηλότερη τιμή αντοχής της συγκόλλησης παρατηρήθηκε για απόσταση 1 mm.

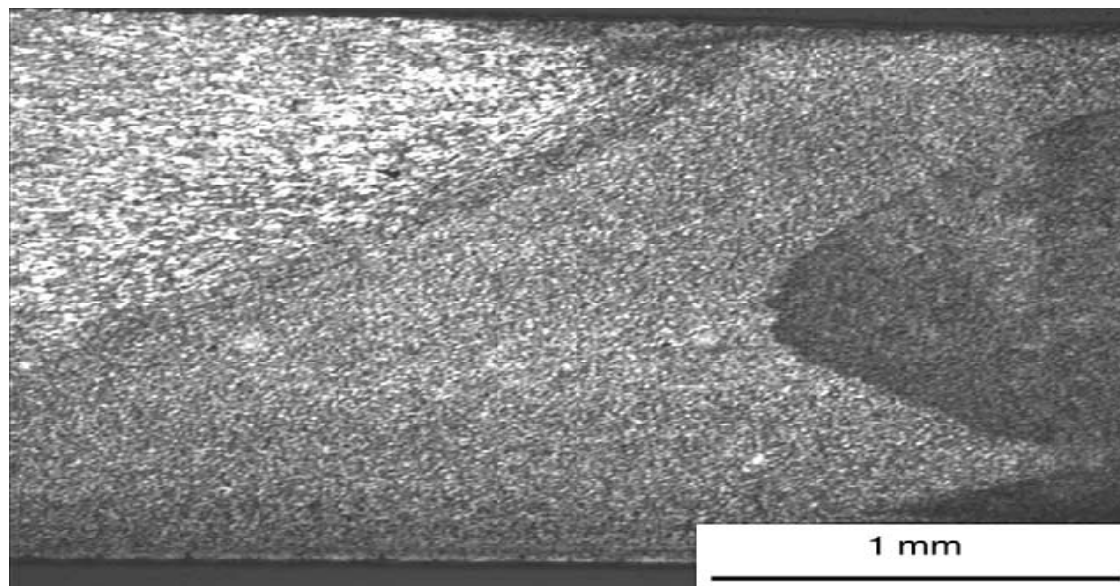


Διάγραμμα 4.4: Κατανομές μικροσκληρότητας των υπό μελέτη συγκολλήσεων [27].

Η ολκιμότητα της συγκόλλησης βρέθηκε σχετικά χαμηλότερη από εκείνη των βασικών μετάλλων, ενώ παίρνει τη μέγιστη τιμή της για απόσταση 0,5 mm. Ο μικρότερος ρυθμός αύξησης ρωγμής παρατηρήθηκε για τα κράματα που συγκολλήθηκαν στο 1 mm, ενώ ο μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης

ρωγμής βρέθηκε στο 1,5 mm. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων [27].

Οι Cavaliere, Nobile, Panella και Squillace [28] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή φύλλων αλουμινίου που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο FSW.



Εικόνα 4.5: Τομή της συγκόλλησης: Μακρογραφία στην οποία απεικονίζεται η ζώνη του πυρήνα συγκόλλησης, η TMAZ και το μέταλλο βάσης [26].

Η μικροσκληρότητα έφτασε την τιμή των 150 HV στο κέντρο της συγκόλλησης, στη συνέχεια αυξάνεται (σε απόσταση 2 mm) και για τα δυο κράματα και έπειτα μειώνεται ξανά. Οι μικρότερες τιμές της μικροσκληρότητας παρατηρήθηκαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) και για τα δυο κράματα.

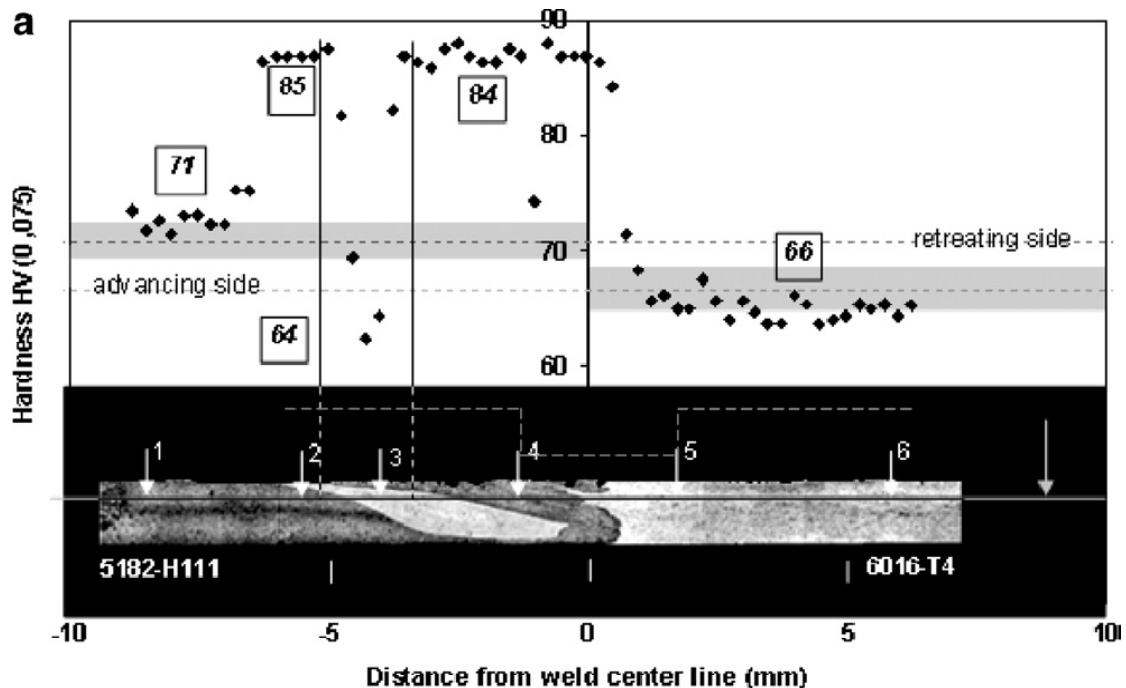
Η ολκιμότητα της συγκόλλησης βρέθηκε αρκετά ικανοποιητική και το μέγιστο όριο τάσης βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν σε πολύ κοντινή στη HAZ περιοχή από την πλευρά του κράματος 2024.

Οι δοκιμές αντοχής παρουσίασαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον αν και εν συγκρίσει με τα δεδομένα των μετάλλων βάσης βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο, εξακολουθούν να είναι αποδεκτά.

Η επιφάνεια θραύσης της συγκόλλησης παρουσίασε έναν αρκετά μεγάλο πληθυσμό μικροκενών (dimples) διαφορετικού μεγέθους και σχήματος κατά τη διάρκεια των δοκιμών εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα βρέθηκαν δυο τύποι μικροκοιλοτήτων: αυτές που βρίσκονται εξαιρετικά κοντά στα κενά και αυτές που σχετίζονται με ενδοτράχυνση και κατακρημνίσεις δεύτερης φάσης που οδηγεί σε μικρότερες και πιο ρηχές κοιλοότητες [28].

- **5182-6016**

Οι Leitao, Leal, Rodrigues, Loureiro και Vilaca [29] μελέτησαν τη συμπεριφορά σε εφελκυσμό όμοιων και ανόμοιων συγκολλήσεων σε ελάσματα πάχους 1 mm, μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου 6016-T4 και 5182-H111. Η ετερογένεια των ιδιοτήτων των συγκολλήσεων μελετήθηκε με την μέτρηση της μικροσκληρότητας και την ανάλυση της μικροδομής.



Διάγραμμα 4.5: Κατανομή μικροσκληρότητας της συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου 5182-H111-6016-H14 [29].

Οι συγκολλήσεις του κράματος αλουμινίου 5182 παρουσίασαν αύξηση της σκληρότητας, της τάξης του 20%, στην TMAZ. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε αύξηση στο όριο διαρροής του υλικού της συγκόλλησης. Στην HAZ δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές με το μέταλλο βάσης, ούτε στη μικροδομή ούτε στη μικροσκληρότητα.

Οι συγκολλήσεις του κράματος αλουμινίου 6016 συνοδεύτηκαν από πτώση της τάξης του 15% όσον αφορά στη σκληρότητα και 20% αναφορικά με την αντοχή. Η πτώση της αντοχής ακολουθείται από σημαντική πτώση της ολκιμότητας [29].

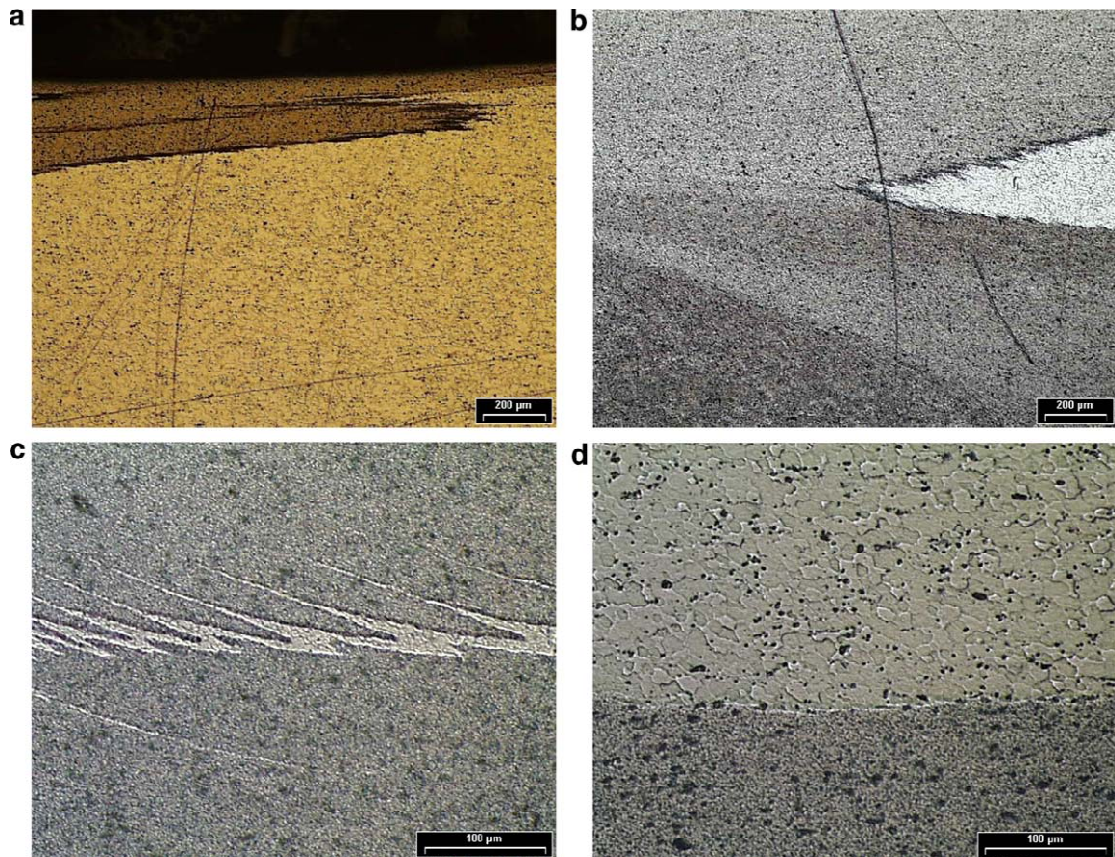
- **6061-6082**

Οι Moreira, Santos, Tevares, Richter-Trummer, Villaca και de Castro [30] πραγματοποίησαν μηχανικό και μεταλλουργικό χαρακτηρισμό των συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου 6061-T6 και 6082-T6. Η εργασία περιλαμβάνει επίσης εξέταση της μικροδομής και μετρήσεις μικροσκληρότητας, εφελκυσμού και κάμψης των συγκολλήσεων.

Η συγκόλληση του κράματος αλουμινίου 6061 καθώς και το αρχικό υλικό AA6061 παρουσίασαν τα μεγαλύτερα όρια διαρροής και θραύσης. Η συγκόλληση των ανόμοιων κραμάτων AA6061-AA6082 παρουσιάζει μέγιστο όριο θραύσης πολύ κοντά σε αυτό του συγκολλημένου AA6082. Στα συγκολλημένα ελάσματα η θραύση προέκυψε κοντά στο άκρο της γραμμής συγκόλλησης (near the weld edge line), όπου βρίσκεται η περιοχή μετάβασης από τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ).

Σε όλες τις συγκολλήσεις παρατηρήθηκε μείωση της μικροσκληρότητας, καθώς πλησιάζουμε προς την TMAZ. Η μέση σκληρότητα της ζώνης του πυρήνα της συγκόλλησης βρέθηκε σημαντικά μικρότερη από εκείνη του βασικού μετάλλου. Η συγκόλληση των AA6061-AA6082 παρουσίασε τις μικρότερες τιμές σκληρότητας από όλες τις συγκολλήσεις. Οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στην πλευρά που βρίσκεται το κράμα AA6082. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώθηκε ότι για όλες τις συγκολλήσεις οι μικρότερες τιμές της σκληρότητας σχετίζονται με τα όρια του περιαιχενίου.

Η μεταλλογραφική ανάλυση δείχνει ότι σε κάθε συγκόλληση είναι εμφανείς και αναγνωρίσιμες οι ζώνες HAZ, TMAZ και NZ. Στην NZ είναι εμφανής η ανάμιξη των δυο διαφορετικών κραμάτων. Επίσης, η NZ υπόκειται σε έντονες παραμορφώσεις και σε ανακρυστάλλωση [30].



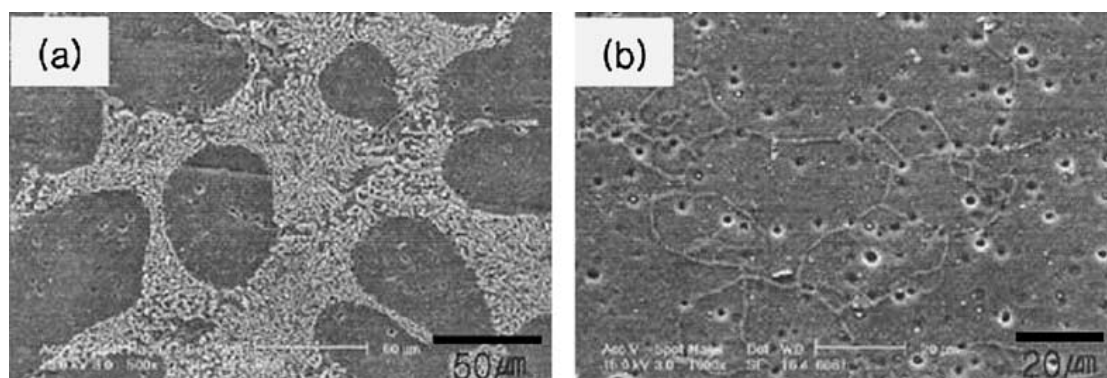
Εικόνα 4.6: (a) Ανάμιξη των κραμάτων στην πλευρά του περιαιχενίου (b) Τρεις διαφορετικές ζώνες στην ανάμιξη των δυο κραμάτων (c) Ραβδώσεις που δημιουργούνται λόγω της περιστροφής του εργαλείου συγκόλλησης (d) Μετάβαση μεταξύ των διαφορετικών υλικών στη ζώνη πυρήνα συγκόλλησης [30].

- **6061- A356**

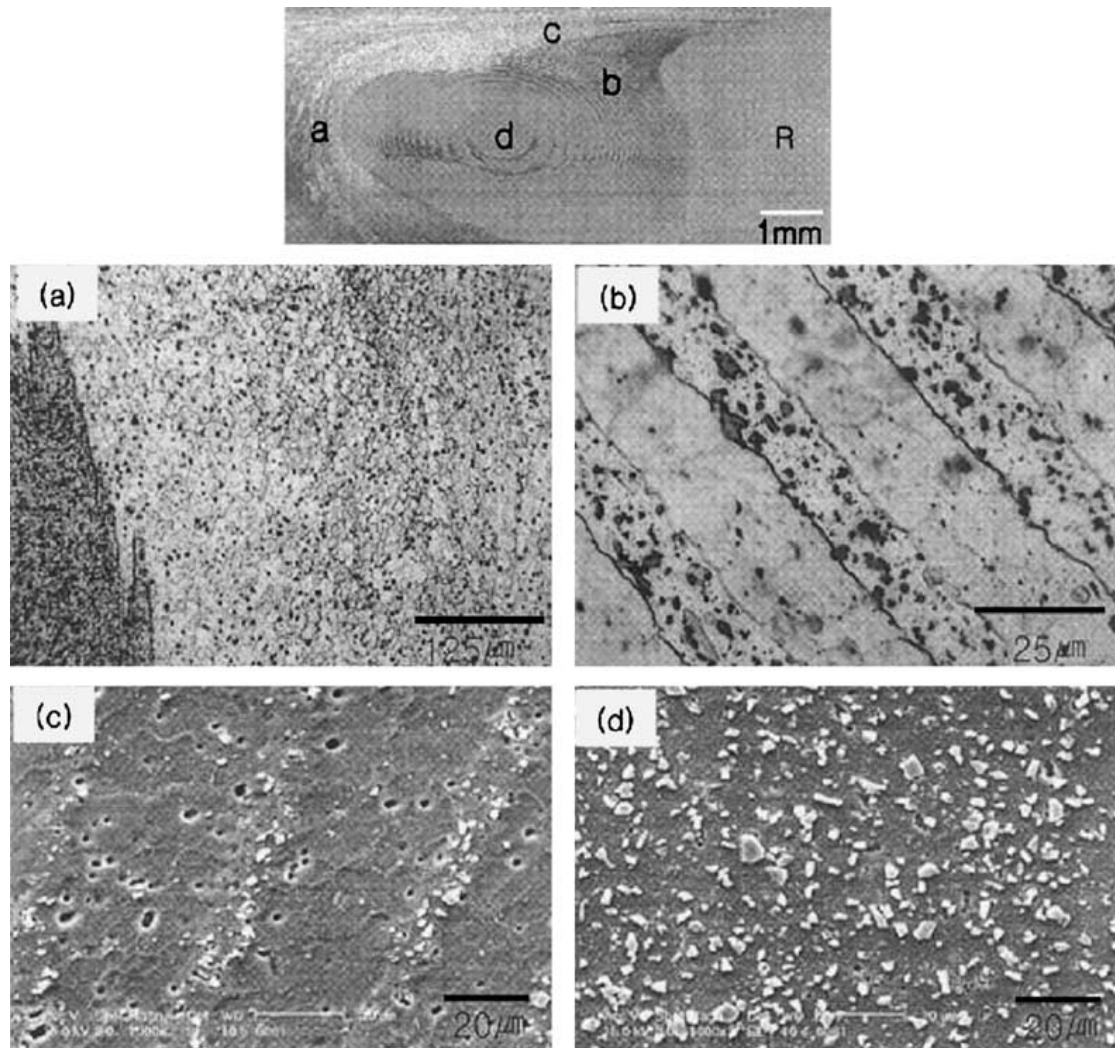
Οι Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon και Seung-Boo Jung [31], συμπέραναν ότι οι μηχανικές ιδιότητες μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW εξαρτώνται κυρίως από το υλικό που βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης. Επίσης μελέτησαν τη σχηματιζόμενη δακτυλιοειδή δομή. Στην εν λόγω εργασία, μελετήθηκαν συγκολλήσεις μεταξύ του χυτού αλουμινίου A356 και του κράματος AA6061, οι οποίες έγιναν με διάφορες τιμές ταχυτήτων συγκόλλησης.

Οι μικρογραφικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι η μικροδομή του πυρήνα συγκόλλησης εξαρτάται κυρίως από το υλικό της υποχωρούσας πλευράς της συγκόλλησης. Η δακτυλιοειδής δομή παρατηρήθηκε κυρίως στο δεξί μέρος του πυρήνα συγκόλλησης. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε μείωση του μεγέθους του πυρήνα συγκόλλησης με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης.

Στην περίπτωση που στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης βρισκόταν το A356, η προωθούμενη πλευρά παρουσίασε ανακρυσταλλωμένους κόκκους του κράματος αλουμινίου 6061, που είχαν μέγεθος πολύ μικρότερο από εκείνο των κόκκων του αρχικού υλικού AA6061. Η δακτυλιοειδής δομή παρουσιάστηκε κυρίως στην υποχωρούσα πλευρά του πυρήνα συγκόλλησης. Η άνω πλευρά του πυρήνα συγκόλλησης αποτελούνταν κυρίως από ελαφρώς επιμηκυμένους και ανακρυσταλλωμένους κόκκους 6061 και αραιά διασκορπισμένα σωματίδια Si.



Εικόνα 4.7: Μικροδομή των κραμάτων αλουμινίου (α) AA356, (β) AA6061 [31].



Εικόνα 4.8: Μικροδομές του πυρήνα συγκόλλησης στην περίπτωση που το A356 βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης [31].

Στην περίπτωση που στην υποχωρούσα πλευρά ήταν τοποθετημένο το AA6061, η ζώνη μετάβασης μεταξύ της TMAZ και του WN της προωθούμενης πλευράς, είχε μικροδομή παρόμοια με εκείνη του A356, ενώ τα μόρια Si διατάσσονταν σύμφωνα με τη διεύθυνση περιστροφής του εργαλείου συγκόλλησης.

Η σκληρότητα του πυρήνα συγκόλλησης εμφάνισε τιμές υψηλότερες από εκείνες του A356, αλλά χαμηλότερες από εκείνες του AA6061. Η σκληρότητα παρουσίασε υψηλότερη τιμή όταν το AA6061 βρισκόταν στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης [31].

- **6111-5083**

Οι W. Gan, K. Okamoto, S. Hirano, K. Chung, C. Kim και R. H. Wagoner [32], χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους συνδυασμούς λειτουργικών παραμέτρων της FSW, έκαναν μετρήσεις των ατελειών στις συγκολλήσεις των ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου 5183-H18 - 6111-T4. Η μηχανική

συμπεριφορά των συγκολλήσεων που έγιναν με το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων, καθορίστηκε μέσω δοκιμών εφελκυσμού και μετρήσεων σκληρότητας και συσχετίστηκε με τις μικροδομές τόσο του συγκολλημένου όσο και του βασικού μετάλλου.

Όσον αφορά στη σκληρότητα, το συγκολλημένο AA5083 ήταν αρκετά πιο μαλακό από το αντίστοιχο μέταλλο βάσης, ενώ στο κράμα αλουμινίου 6111 η σκληρότητα μειώνεται ελάχιστα. Το συγκολλημένο AA5083 παρουσιάζει μείωση του ορίου διαρροής και της αντοχής σε εφελκυσμό και αύξηση της ολκιμότητας. Το συγκολλημένο AA6111 παρουσιάζει παρόμοιες τιμές αντοχής και σκληρότητας με το βασικό μέταλλο.

Το μέταλλο βάσης AA5083 παρουσιάζει αρκετές ατέλειες εξαιτίας των επιμηκυμένων κόκκων του (τυπική κατάσταση λόγω της εν ψυχρώ κατεργασίας H18). Οι μικροδομές των συγκολλήσεων έχουν μικρότερη πυκνότητα ατελειών.

Το μέταλλο βάσης AA6111 είναι ισοαξονικών κόκκων (equiaxed) και σχετικά ελεύθερο ατελειών. Η συγκόλληση παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα ατελειών και κατακρημνίσεων. Το μέγεθος των κόκκων του πυρήνα συγκόλλησης ήταν 5 μm ενώ οι κόκκοι του βασικού μετάλλου είχαν μέγεθος 50 μm .

Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η διαδικασία της φυσικής γήρανσης μελετώντας την εξέλιξη της σκληρότητας σε σχέση με το χρόνο. Το κέντρο της συγκόλλησης ήταν πιο μαλακό από το μέταλλο βάσης ενώ η σκληρότητά του δεν αυξήθηκε σημαντικά με τη διαδικασία της γήρανσης. Αντίθετα, η σκληρότητα της HAZ αυξήθηκε σημαντικά με το χρόνο κυρίως κατά την πρώτη εβδομάδα μετά τη συγκόλληση.

Το συγκολλημένο AA5083 υπέστη θερμική κατεργασία στους 465° C για 5 min έτσι ώστε να προσεγγιστεί η ανόπτηση. Η σκληρότητα των συγκολλημένων μετάλλων δεν άλλαξε ενώ εκείνη των μετάλλων βάσης ήταν αρκετά χαμηλότερη. Μετά την κατεργασία, τόσο το μέταλλο βάσης όσο και το συγκολλημένο μέταλλο παρουσίασαν παρόμοιο όριο διαρροής και παρόμοια ολκιμότητα. Επίσης το κράμα αλουμινίου 5083 , μετά την κατεργασία, παρουσίασε μια αφύσικη αύξηση του μεγέθους των κόκκων, η οποία έγινε εντονότερη καθώς αυξήθηκε η ταχύτητα πρόωσης και μειώθηκε η ταχύτητα περιστροφής [32].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5 Πειραματική Διαδικασία

Τα πειράματα συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματοποιήθηκαν ομοειδείς συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6, καθώς και ετεροειδείς συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6.

5.1 Χρησιμοποιούμενα Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ήταν τα ακόλουθα:

- ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5083- H111
- ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 6082- T6

Όλα τα ελάσματα είχαν πάχος 6mm, με εξαίρεση την περίπτωση της ομοειδούς συγκόλλησης του AA5083-H111 με κωνικό πείρο, που χρησιμοποιήθηκαν πλάκες πάχους 5,4mm.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των δυο χρησιμοποιούμενων κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Στοιχείο	Σύσταση (% κ.β.)
Si	0.7-1.3
Fe	0.5
Cu	0.1
Mn	0.4-1.0
Mg	0.6-1.2
Zn	0.2
Ti	0.1
Cr	0.25
Al	Balance

Πίνακας 5.1(α): Χημική σύσταση του κράματος **AA6082-T6**.

Στοιχείο	Σύσταση (% κ.β.)
Si	0.4
Fe	0.4
Cu	0.1
Mn	0.4-1.0
Mg	4.0-4.9
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.05-0.25
Al	Balance

Πίνακας 5.1(β): Χημική σύσταση του κράματος **AA5083-H111**.

Κράμα Αλουμινίου	Σκληρότητα	Μέτρο Ελαστικότητας	Σημείο Τήξης	Πυκνότητα
AA5083-H111	96 HV	70,3 Gpa	577 °C	2,66g/cm ³
AA6082-T6	100 HV	70 Gpa	555 °C	2,70g/cm ³

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων υλικών.

5.2 Μηχανή Συγκόλλησης

Η μηχανή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των πειραμάτων ήταν μια τροποποιημένη φρέζα (εικόνα 5.1) με δυνατότητα ανάπτυξης των εξής ταχυτήτων πρόωσης (mm/min):

19, 30, 60, 75, 85, 118, 150, 190,
230, 235, 335, 375, 475, 600, 750, 950

και των εξής ταχυτήτων περιστροφής (rpm):

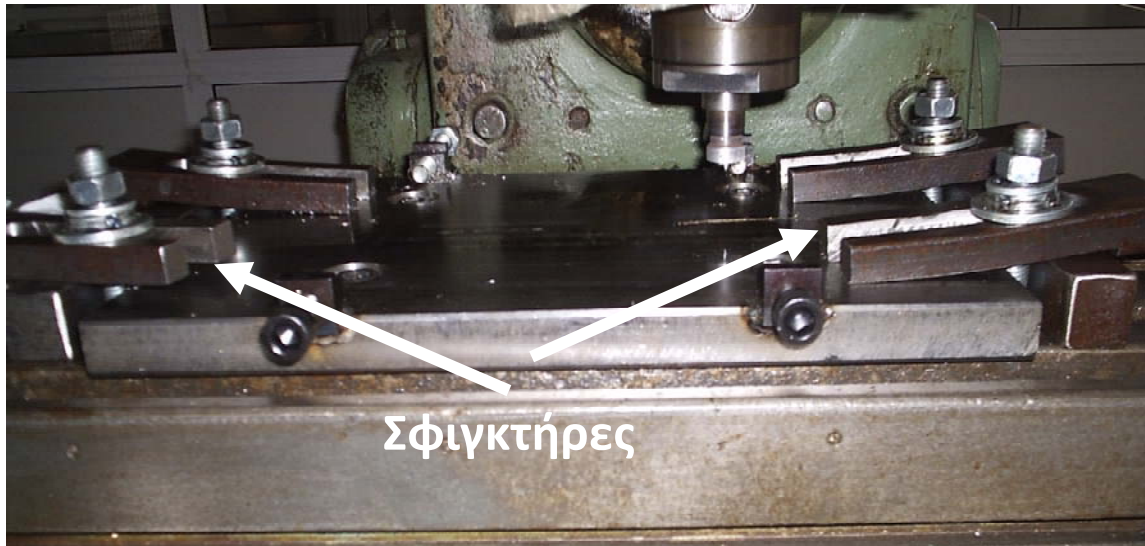
60, 75, 95, 118, 150, 190, 235, 300,
375, 475, 600, 750, 950, 1180, 1500.

Η μηχανή διαθέτει τράπεζα στην οποία τοποθετούνται τα προς συγκόλληση μέταλλα που συγκρατούνται από τέσσερις ειδικούς σφιγκτήρες (εικόνα 5.2). Έπειτα επιλέγονται οι επιθυμητές ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής και ξεκινά η διαδικασία της συγκόλλησης.



Εικόνα 5.1: Η μηχανή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

Η μηχανή παρέχει τη δυνατότητα κίνησης της τράπεζας είτε κατακόρυφα προς την κεφαλή του εργαλείου συγκόλλησης, είτε δεξιά και αριστερά από αυτήν. Συνεπώς, η τράπεζα έρχεται σε κατάλληλη θέση, έτσι ώστε ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης να εισχωρήσει στο μέταλλο και να αρχίσει η διαδικασία.



Εικόνα 5.2: Διάταξη συγκράτησης των υπό συγκόλληση τεμαχίων στη μηχανή συγκόλλησης.

5.3 Κεφαλές Εργαλείου Συγκόλλησης

Οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση των πειραμάτων παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



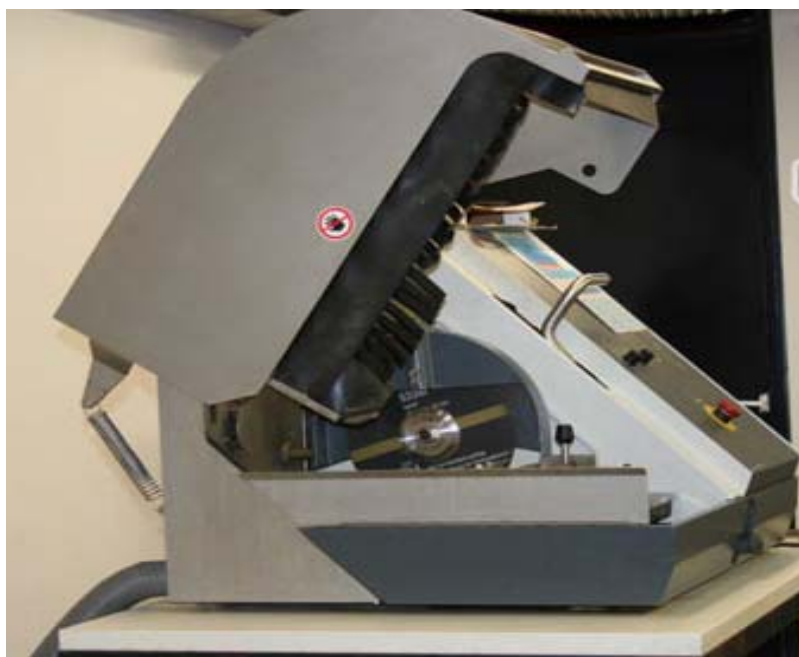
Εικόνα 5.3.1: Χρησιμοποιούμενες κεφαλές συγκόλλησης: (α) Κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου φέρουσα κωνικό πείρο, (β) Κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου φέρουσα πείρο με σπείρωμα και εγχοπές.

5.4 Προετοιμασία Δοκιμίων για Μεταλλογραφική Μελέτη

Μετά τη συγκόλληση, τα δοκίμια που πρόκειται να μελετηθούν, πρέπει να υποστούν μια σειρά διεργασιών με σκοπό τη σωστή προετοιμασία της επιφάνειάς τους.

5.4.1 Κοπή

Το πρώτο βήμα της προετοιμασίας των δοκιμίων για την αποκάλυψη της μικροδομής τους είναι η κοπή τους στο κατάλληλο μέγεθος και στα κατάλληλα σημεία για περαιτέρω μελέτη. Τα δοκίμια κόπηκαν εγκάρσια στη ραφή, έτσι ώστε να είναι διακριτή η τομή της επιφάνειας που συγκολλήθηκε. Οι τομές πραγματοποιήθηκαν σε τυχαία σημεία των δοκιμίων, με σκοπό την παρατήρηση και παρουσίαση αυτών, έτσι ώστε να γίνει μελέτη και παρατήρηση της προκύπτουσας μικροδομής. Η κοπή πραγματοποιήθηκε σε δισκοτόμο του οίκου Struers τύπου Discotom 50 που παρουσιάζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 5.4.1: Δισκοτόμος ENT

5.4.2 Λείανση - Στίλβωση

Επόμενο βήμα αποτελεί η προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων για μεταλλογραφική παρατήρηση, με λείανση και στίλβωση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι η συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers (εικόνα 5.4). Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό. Για την ψύξη του δείγματος κατά την λείανση, χρησιμοποιείται παροχή νερού ενσωματωμένη στη συσκευή.

Αρχικά προσαρμόζεται το κατάλληλο χαρτί SiC στη βάση της συσκευής. Στα αρχικά στάδια λείανσης επιλέγεται χονδρόκοκο χαρτί SiC (#80 dots/in²) καρβίδια του πυριτίου.

Όταν το δοκίμιο έχει λειανθεί με το γυαλόχαρτο #80 πραγματοποιείται ξανά η ίδια διαδικασία λείανσης, χρησιμοποιώντας πιο λεπτόκοκο γυαλόχαρτο έως ότου το δοκίμιο έχει ικανοποιητική επιφάνεια. Για τη λείανση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά SiC με μέγεθος κόκκων 80, 220, 500, 800, 1000, 1200, 2400 και 4000 grit (dots/in²).

Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της λείανσης ακολουθεί η στίλβωση. Χρησιμοποιείται δίσκος στίλβωσης από ειδικό βελούδο με τη βοήθεια πάστας αλούμινας (Al₂O₃) μεγέθους κόκκων 1μm και 0,1μm.



Εικόνα 5.4.2: Μηχάνημα λείανσης-στίλβωσης (Struers LaboPol-5) των δοκιμών στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

5.4.3 Χημική Προσβολή

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται για την αποκάλυψη της μικροδομής των δοκιμών και την παρατήρησή τους στο οπτικό μικροσκόπιο. Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια.

Για την παρούσα πειραματική διαδικασία, η προσβολή του αλουμινίου έγινε με χημική και ηλεκτρολυτική προσβολή. Έπειτα από διάφορες δοκιμές

με αντιδραστήρια, επιλέχθηκαν εκείνα, τα οποία παρείχαν τη δυνατότητα βέλτιστης παρατήρησης της μικροδομής.

Για τη χημική προσβολή τα δοκίμια AA5083-H111 εμβαπτίστηκαν για 5-8 δευτερόλεπτα σε τροποποιημένο διάλυμα Roulton του οποίου η σύσταση φαίνεται παρακάτω:

- 20 ml Διάλυμα Roulton
- 10 ml HNO₃
- Διάλυμα 4,8 gr Cr₂O₃ σε 16 ml H₂O.

Διάλυμα Roulton:

- 12 ml HCl
- 1 ml HF
- 6 ml HNO₃
- 1 ml H₂O.

Για τη διαδικασία της ηλεκτρολυτικής προσβολής, στην περίπτωση της παρατήρησης των βέλτιστων FSW δοκιμίων AA6082-T6 και των FSW δοκιμίων AA5083-H111 με AA6082-T6, χρησιμοποιήθηκε το διάλυμα Barker το οποίο αποτελείται από 5ml HBF₄ διαλυμένο σε 200ml H₂O. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στο διάλυμα Barker για περίπου 100 δευτερόλεπτα υπό σταθερή τάση 20V.

5.5 Οπτική Στερεοσκοπία

Για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο LEICA MZ6 (εικόνα 5.5), του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Το στερεοσκόπιο διαθέτει βηματικές μεγεθύνσεις (0,63x, 0,80x, 1,00x, 1,25x, 1,6x, 2,0x, 2,5x, 3,2x, 4,0x) για να είναι δυνατή η κατάλληλη μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων.



Εικόνα 5.5: Το στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Τα δοκίμια παρατηρήθηκαν αρχικά μακροσκοπικά, στο στερεοσκόπιο του εργαστηρίου, όπου και φωτογραφήθηκαν.

5.6 Οπτική μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία είναι η μέθοδος της παρατήρησης της μικροδομής των εξεταζόμενων δοκιμίων. Στη μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε πριν (για τον εντοπισμό ατελειών) είτε μετά από προσβολή. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση της μικροδομής.

Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση και η ερμηνεία των ζωνών συγκόλλησης, η σύγκριση της μεταξύ τους μικροδομής, καθώς και οι αλλαγές της μικροδομής σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Για να καταστεί αυτό δυνατό, προηγείται χημική προσβολή των δειγμάτων με τα διαλύματα που προαναφέρθηκαν.

Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το LEICA DM ILM (εικόνα 5.6), του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς x10, x20, x50 και x100 και προσοφθάλμιο φακό x10. Με τη χρήση αυτού του οπτικού μικροσκοπίου δίνεται δυνατότητα μεγέθυνσης έως και x1000. Διαθέτει τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας (x,y, α-περιστροφή) με δυνατότητα στήριξης φορτίου και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.



Εικόνα 5.6: Οπτικό μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

5.7 Σκληρομετρήσεις

Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται ως η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από από αυτή του εξεταζόμενου υλικού. Η σκληρότητα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείσδυση του σκληρού υλικού αναφοράς.

Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διαφορετικό διεισδυτή, κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων και μετρούμενα μεγέθη.

5.7.1 Μικροσκληρομετρήσεις

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Vickers, όπου το ρόλο του διεισδυτή παίζει μια αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής 136° .

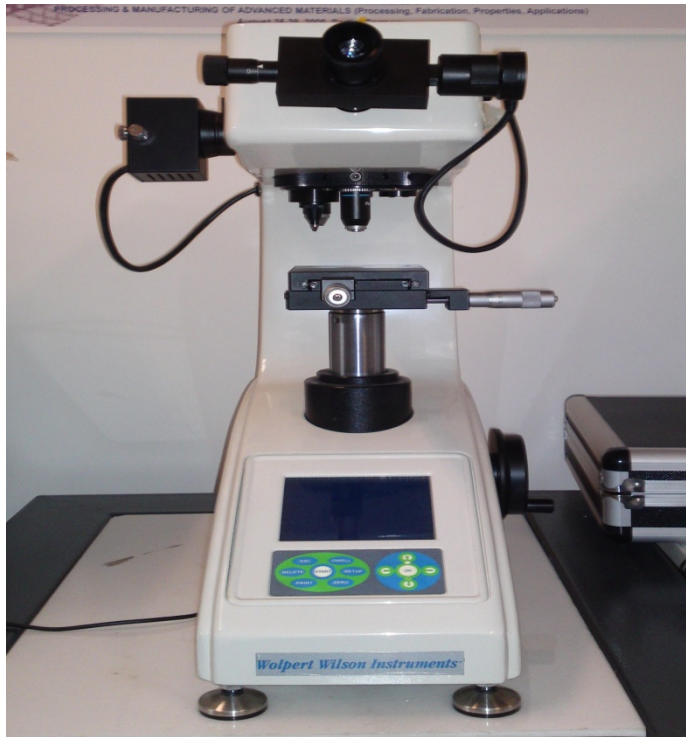
Η σκληρότητα Vickers για κλίμακα από 5 έως 1000 Vickers δίνεται σε kg/mm^2 και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$HV \text{ ή } VPN = \frac{F}{d^2} 2 \sin \frac{136}{2} = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

όπου F η εφαρμοζόμενη δύναμη (5-120kg) για 15 sec και d η μέση τιμή των δυο διαγωνίων του αποτυπώματος.

Οι τιμές Brinell (HB) και Vickers (HV) συμπίπτουν, σχεδόν, μέχρι περίπου την τιμή 400. Για τιμές σκληρότητας μεγαλύτερες των 400 η μέθοδος Vickers είναι ακριβέστερη.

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης κάθετα και παράλληλα σε τομή των δοκιμίων, ανά 500 μm . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια που κρίθηκαν βέλτιστα, είτε σε αυτά όπου οι ατέλειές τους ήταν αποδεκτές. Το φορτίο ήταν 300gr και ο χρόνος διείσδυσης ήταν 15sec. Για τη μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Πρόκειται για μικροσκληρόμετρο της εταιρίας Wolpert Wilson Instruments, τύπου 402NVD.



Εικόνα 5.7: Το μικροσκληρόμετρο του ENT.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6 Αποτελέσματα- Συζήτηση

6.1 Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA5083-H111

6.1.1 Πειράματα προς εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων

Πραγματοποιήθηκαν ραφές συγκολλήσης FSW σε πλάκες του κράματος αλουμινίου 5083-H111, πάχους 6mm, κάνοντας χρήση επτά διαφορετικών σετ παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Σκοπός των δοκιμών είναι η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για τη συγκόλληση του συγκεκριμένου κράματος.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι πραγματοποίησης των συγκολλήσεων.

No.	Ταχύτητα Περιστροφής (RPM)	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)	Τύπος Πείρου Συγκόλλησης	Κλίση Εργαλείου Συγκόλλησης
1	375	85	Κωνικός	-
2	475	85	Κωνικός	-
3	600	85	Κωνικός	-
4	300	118	Με σπείρωμα	-
5	375	85	Με σπείρωμα	-
6	600	85	Κωνικός	2°
7	600	85	Με σπείρωμα	2°

Η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της συγκόλλησης, επηρεάζοντάς την είτε θετικά είτε αρνητικά.

Σε όλες τις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι αρκετά ευδιάκριτες οι ζώνες που δημιουργούνται. Παρατηρείται επίσης, η αλληλοεξάρτηση των ταχυτήτων πρόωσης και περιστροφής και το πως αυτές συμβάλλουν στην καλή ανάδευση του υλικού, στο μέγεθος των ατελειών, καθώς και στο είδος τους.

Όλες οι συγκολλήσεις του κράματος AA5083-H111 πραγματοποιήθηκαν με διεύθυνση συγκόλλησης κάθετη στη διεύθυνση της έλασης.

Έγιναν πρώτα έξι δοκιμές με πέρασμα σε πλάκα (bead on plate) (πίνακας 6.1, αρ.1-5, 7) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ομοειδής συγκόλληση (αρ.6) κάνοντας χρήση των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα δοκίμια του κράματος AA5083-H111 πριν από τη στερεοσκοπική και μικροσκοπική παρατήρησή τους, προσβλήθηκαν με το τροποποιημένο χημικό διάλυμα Poulton.

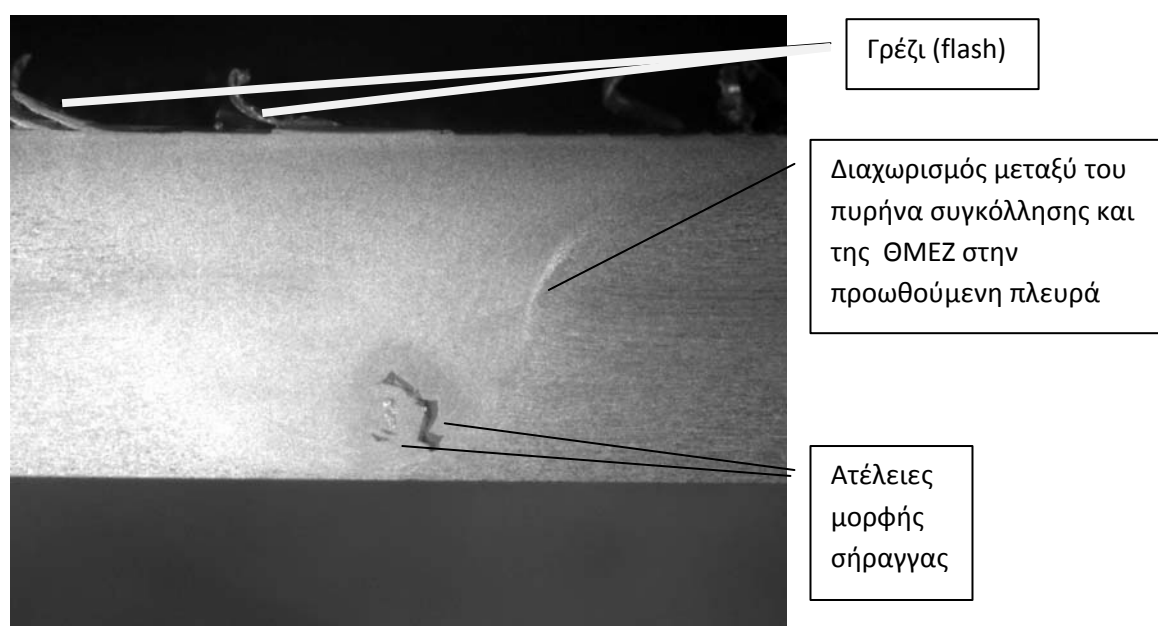
Οι συγκολλήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια ταξινομημένες (πίνακας 6.1), με κριτήριο το μέγεθος και το είδος των ατελειών που εμφανίζονται στις ραφές των συγκολλήσεων, σε φθίνουσα σειρά.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μακροσκοπική μελέτη των δοκιμίων (μακρογραφίες, σχολιασμός) και ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπικής μελέτης τους.

Οι λειτουργικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη δοκιμή (αρ.4 βλ. πίνακα 6.1) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
118 mm/sec	300 rpm	Με σπείρωμα

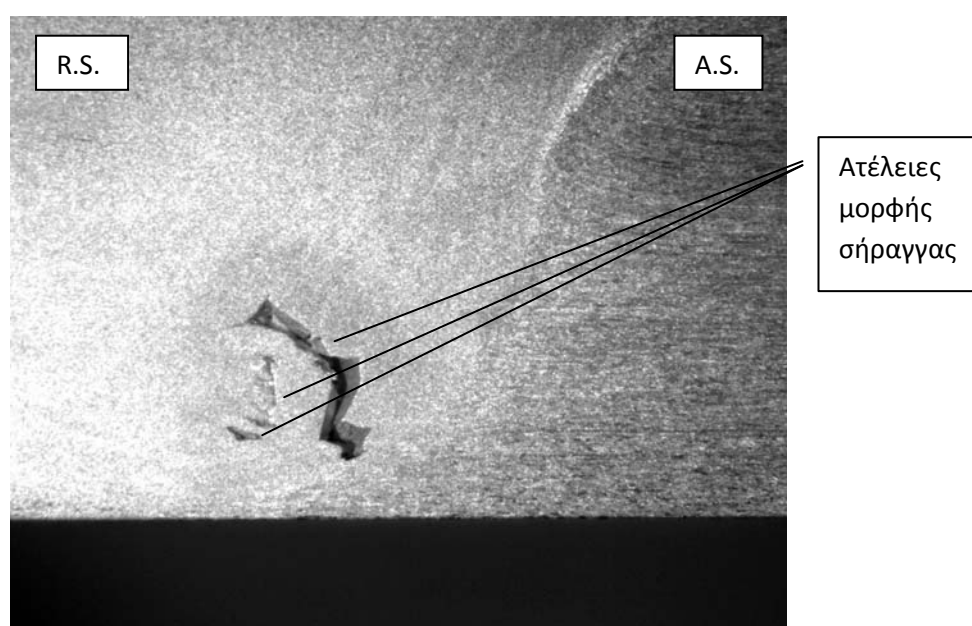
Για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, επιλέχθηκε υψηλή ταχύτητα πρόωσης και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Το αποτέλεσμα της πρώτης συγκόλλησης καθορίζει τις αυξομειώσεις που θα γίνουν στην επιλογή των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες δοκιμές, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση μεγέθους ή απαλοιφή των ατελειών. Στόχος των δοκιμών είναι η επίτευξη ενός βέλτιστου συνδυασμού λειτουργικών παραμέτρων.



Εικόνα 6.1: Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου (εικόνα 6.1) συμπεραίνεται ότι παρουσιάζονται ατέλειες πολύ μεγάλου μεγέθους που συνεχίζονται καθ'όλο το μήκος της ραφής (ατέλεια μορφής σήραγγας). Επιπρόσθετα, στην επιφάνεια περιαιχενίου παρατηρείται το γρέζι (flash) που δημιουργείται από την πίεση που ασκεί το εργαλείο συγκόλλησης στην επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων.

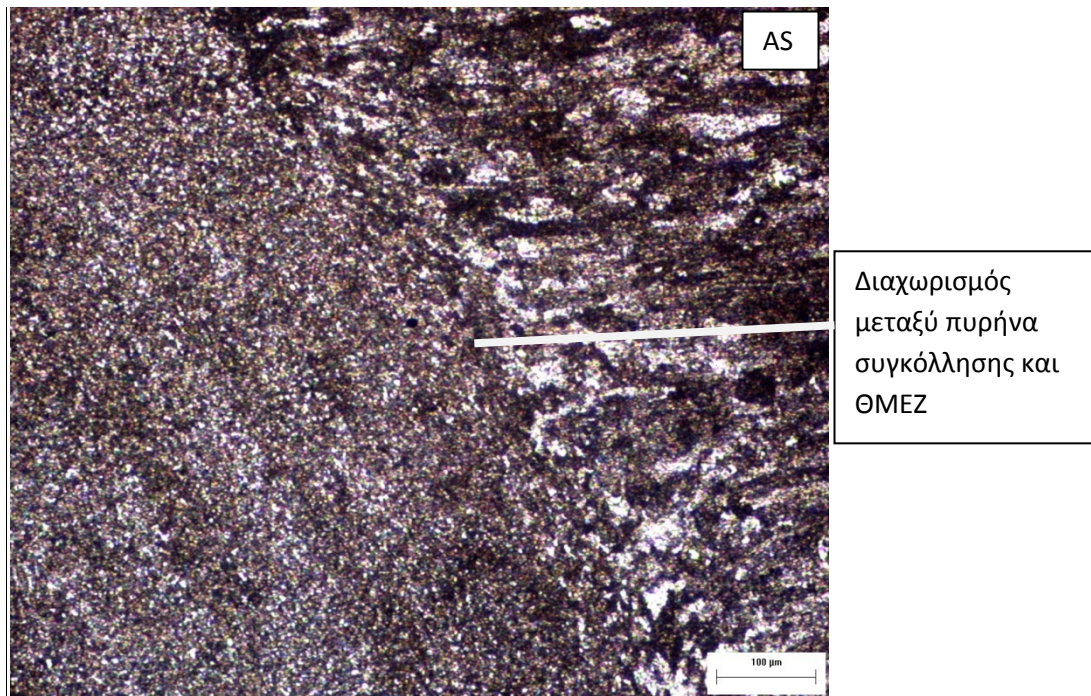
Παρατηρώντας το δοκίμιο μακροσκοπικά (εικόνες 6.1, 6.2), φαίνεται καθαρά ο διαχωρισμός μεταξύ του πυρήνα της συγκόλλησης και της ΘΜΕΖ (TMAZ) στην προωθούμενη πλευρά (advancing side, AS) της συγκόλλησης. Αντίθετα, ο διαχωρισμός αυτός στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side, RS) της συγκόλλησης γίνεται δυσδιάκριτος, ακόμη και στη μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων, λόγω της μη ύπαρξης σαφούς ορίου.



Εικόνα 6.2: Μεγέθυνση των παρατηρούμενων ατελειών στο στερεοσκόπιο.

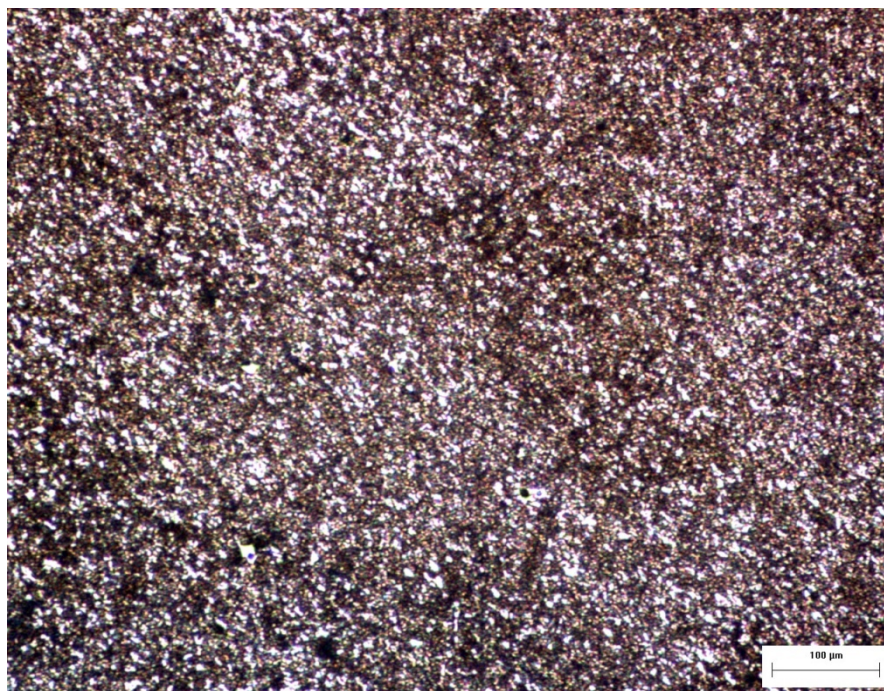
Οι ατέλειες εμφανίζονται χαμηλά στον πυρήνα της συγκόλλησης, περιοχή που παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στην εμφάνιση ατελειών, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.

Παρατηρείται ότι η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης δεν μπορεί να προσδώσει στο δοκίμιο την απαιτούμενη θερμική παροχή για την ικανοποιητική ανάδευση και συγκόλληση του υλικού.



Εικόνα 6.3: Μικρογραφία του πυρήνα συγκόλλησης (αριστερά), της ΘΜΕΖ (περίπου μέση) και της ΘΕΖ (δεξιά).

Στην εικόνα 6.3 γίνεται εμφανής ο διαχωρισμός μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Οι κόκκοι της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης προσανατολίζονται σύμφωνα με τη διεύθυνση της διαχωριστικής γραμμής μεταξύ των δυο ζωνών. Επιπρόσθετα έχουν μέγεθος εμφανώς μεγαλύτερο από εκείνο των κόκκων του πυρήνα συγκόλλησης.



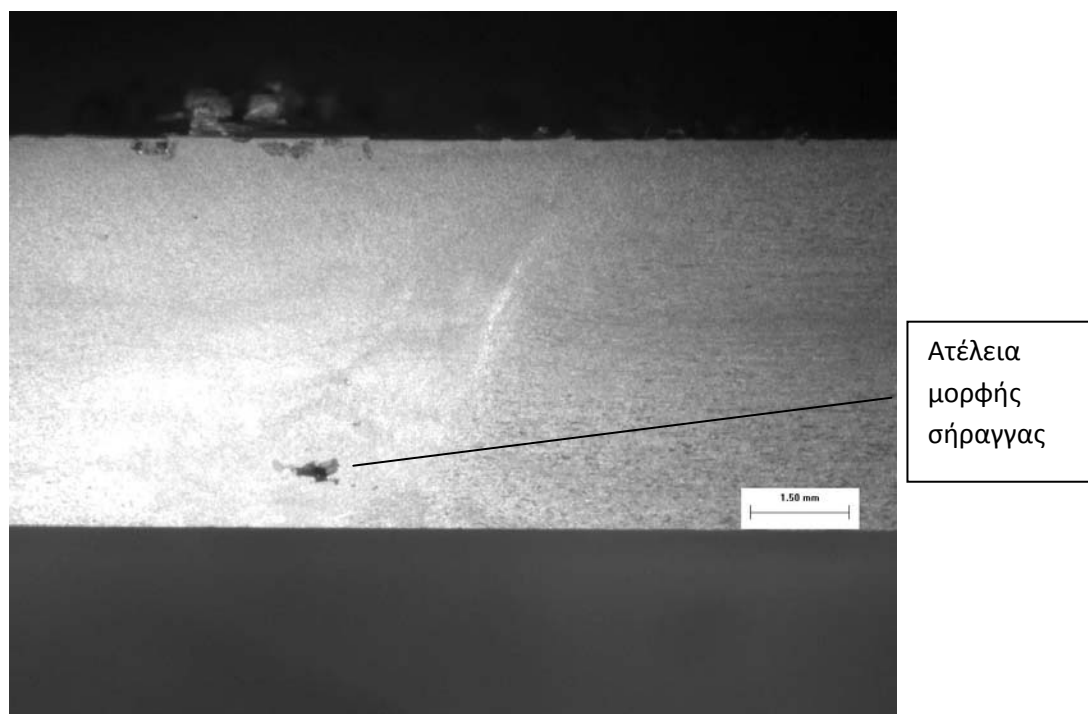
Εικόνα 6.4: Μικρογραφία του πυρήνα συγκόλλησης.

Ο πυρήνας συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρό μέγεθος κόκκων, που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1/10 του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου βάσης. Η ζώνη αυτή αποτελείται από λεπτούς κόκκους που όταν προσβάλλονται μερικοί δεν αντανακλούν το φως και για αυτό το λόγο παρουσιάζονται ως σκοτεινές περιοχές.

Η δεύτερη συγκόλληση (αρ.5 βλ. πίνακα 6.1) πραγματοποιήθηκε υπό τις ακόλουθες λειτουργικές παραμέτρους:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	375 rpm	Με σπείρωμα

Στην παρούσα συγκόλληση αυξήθηκε η ταχύτητα περιστροφής έτσι ώστε να υπάρξει ανάπτυξη μεγαλύτερης θερμοκρασίας, ενώ μειώθηκε η ταχύτητα πρόωσης με σκοπό την καλύτερη ανάδευση του πλαστικοποιημένου υλικού.



Εικόνα 6.5: Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

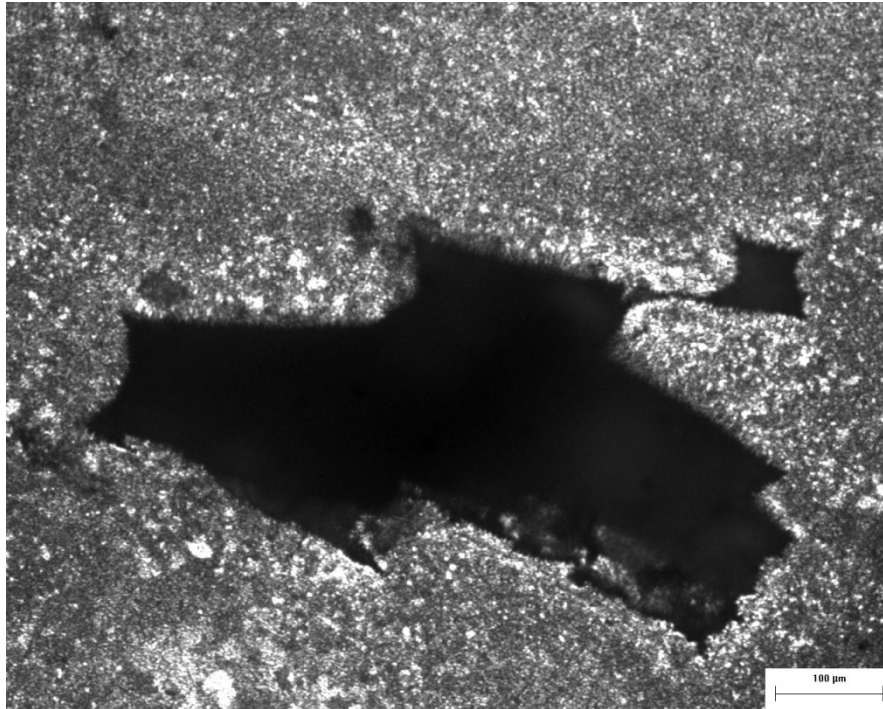
Όπως φαίνεται στη μακρογραφία της εικόνας 6.5 παρουσιάζεται ξανά ατέλεια μεγάλου μεγέθους στην ίδια περιοχή που παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο δοκίμιο, δηλαδή στην κατώτερη και προς τα δεξιά πλευρά του πυρήνα της συγκόλλησης.

Πρέπει λοιπόν να αυξηθεί ακόμη περισσότερο η ταχύτητα περιστροφής αφού είναι η κύρια αιτία εμφάνισης ατελειών μορφής σήραγγας, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως [13].

Οι εικόνες 6.6 και 6.7 παρουσιάζουν ευκρινέστερα το μέγεθος και τη μορφή των ατελειών. Η πρώτη εικόνα, προερχόμενη από τη στερεοσκοπική μελέτη του δοκιμίου, παρουσιάζει την ακριβή θέση των ατελειών. Η δεύτερη εικόνα, προϊόν της μικροσκοπικής παρατήρησης, δίνει μια καλύτερη αίσθηση τόσο του μεγέθους όσο και της μορφής των παρουσιαζόμενων ατελειών.

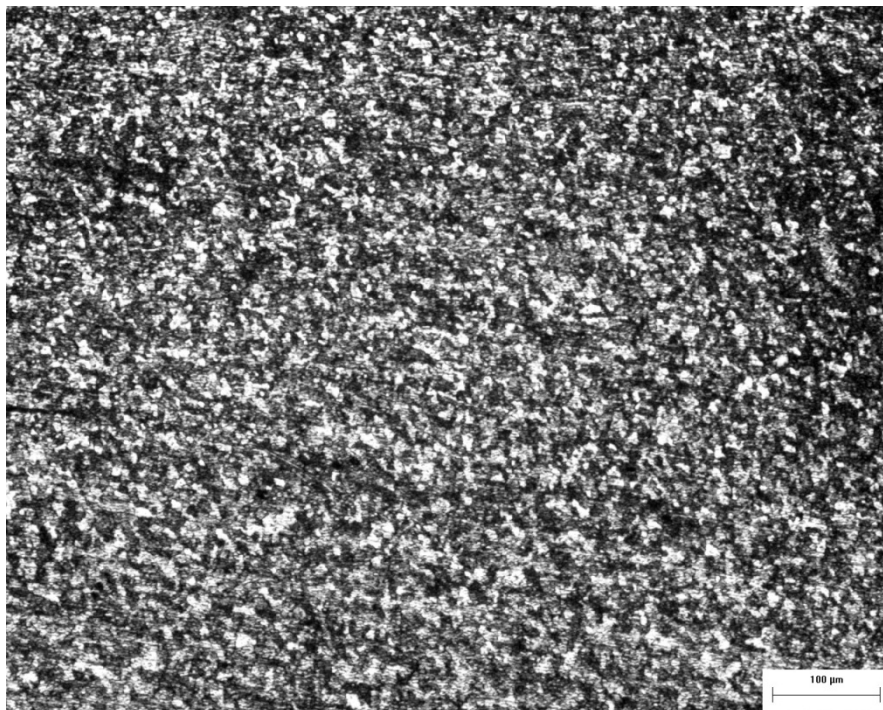


Εικόνα 6.6:Μακροσκοπική παρατήρηση της θέσης των παρατηρούμενων ατελειών.



Εικόνα 6.7: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής της ατέλειας.

Στην εικόνα 6.8, φαίνεται ο πυρήνας της συγκόλλησης και στην εικόνα 6.9 παρουσιάζονται οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης σε αρκετά μεγάλη μεγέθυνση.



Εικόνα 6.8: Μικρογραφία του πυρήνα της συγκόλλησης .

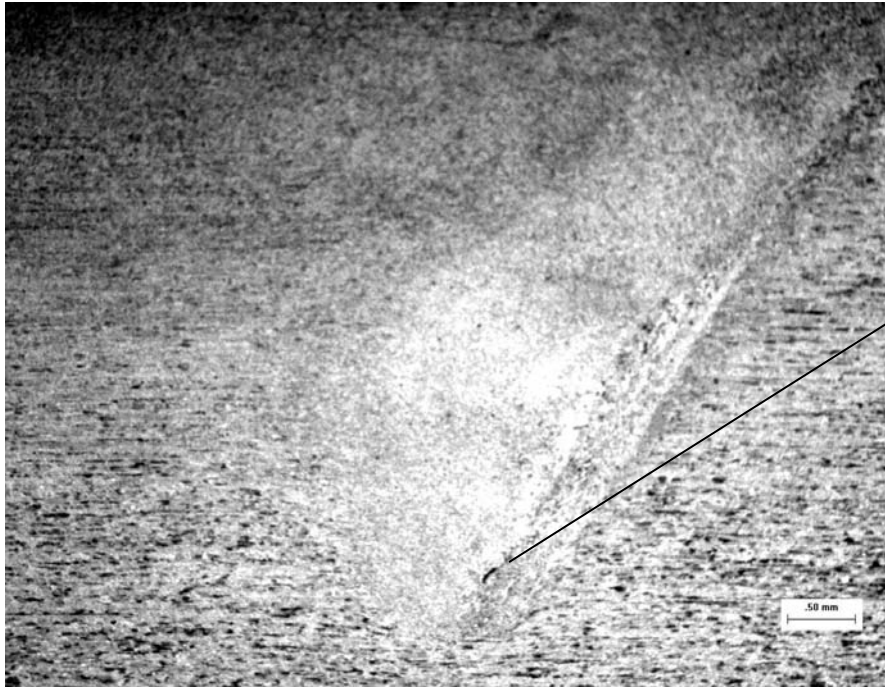


Εικόνα 6.9: Μικρογραφία του πυρήνα της συγκόλλησης (x1000).

Η τρίτη δοκιμή (αρ.1 βλ. πίνακα 6.1) πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση των ακόλουθων λειτουργικών παραμέτρων:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	375 rpm	Κωνικός

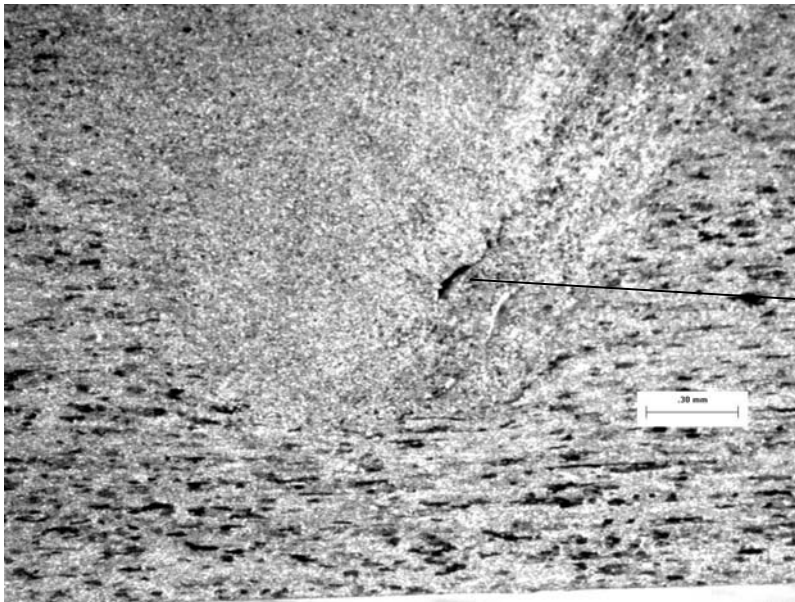
Όπως και στις προηγούμενες συγκολλήσεις, έτσι και σε αυτήν, παρουσιάζονται ατέλειες μορφής σήραγγας που γίνονται εμφανείς από την μακροσκοπική εξέταση του δοκιμίου.



Ατέλεια
μορφής
σήραγγας

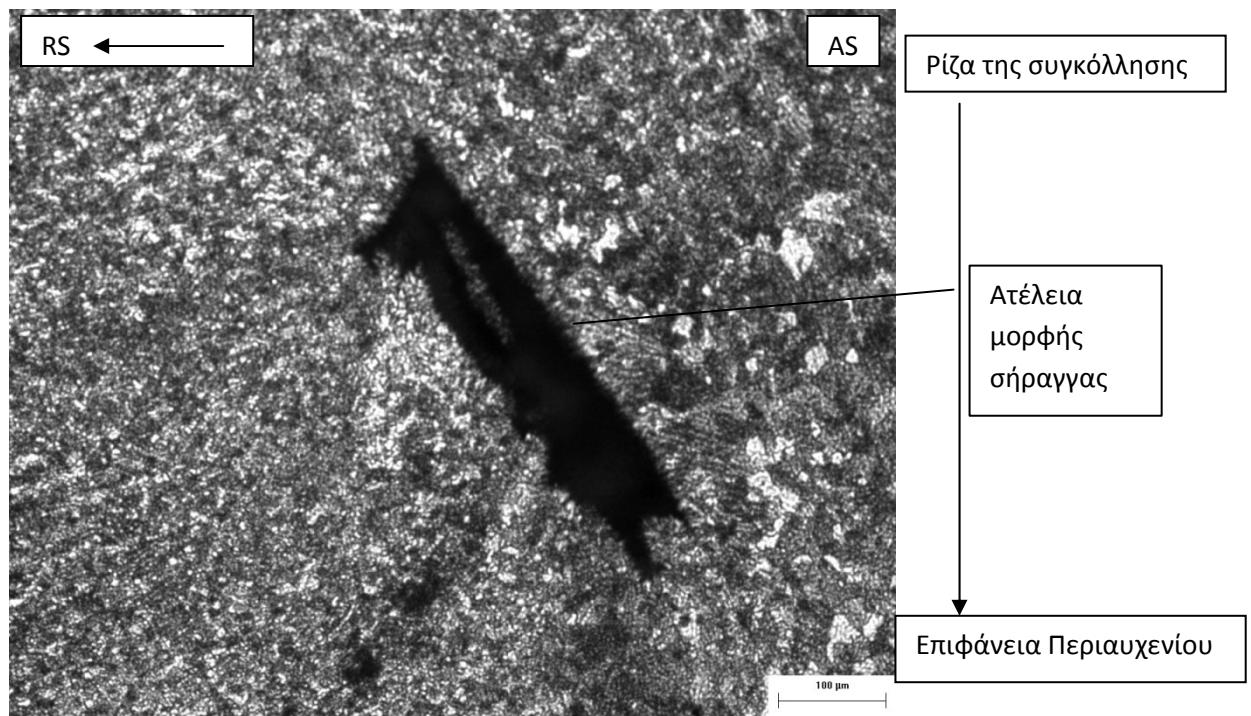
Εικόνα 6.10: Μακροφραφία του δοκιμίου.

Οι ατέλειες κάνουν την εμφάνισή τους στο κάτω δεξί μέρος του πυρήνα συγκόλλησης, σχεδόν στην περιοχή διαχωρισμού του από τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Στην προκειμένη περίπτωση όμως παρατηρείται αισθητή μείωση του μεγέθους των ατελειών.



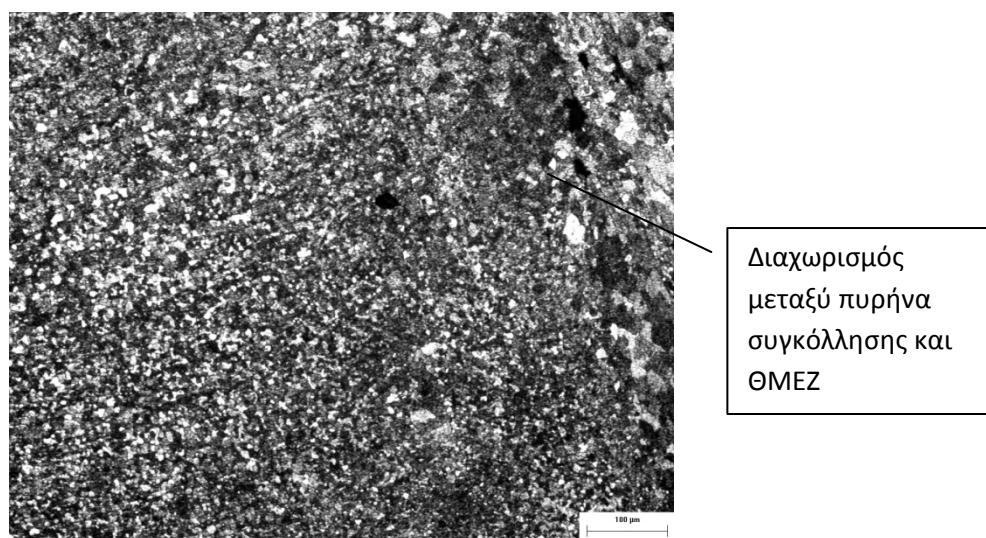
Ατέλεια
μορφής
σήραγγας

Εικόνα 6.11: Θέση της παρουσιαζόμενης ατέλειας



Εικόνα 6.12: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών.

Στην παραπάνω εικόνα (6.12), που προέρχεται από τη μικροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου, φαίνεται καθαρά η περιοχή εμφάνισης των ατελειών που συμπίπτει με τα συμπεράσματα της μακροσκοπικής παρατήρησης. Τα μεγέθη των κόκκων (εικόνα 6.13) αριστερά (πυρήνας συγκόλλησης) και δεξιά (ΘΜΕΖ) της ατέλειας επιβεβαιώνουν τους προηγούμενους ισχυρισμούς, αφού γίνεται προφανές ότι οι ατέλειες εμφανίζονται ξανά κοντά στη διαχωριστική περιοχή μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης και της ΘΜΕΖ.



Εικόνα 6.13: Πυρήνας συγκόλλησης και ΘΜΕΖ

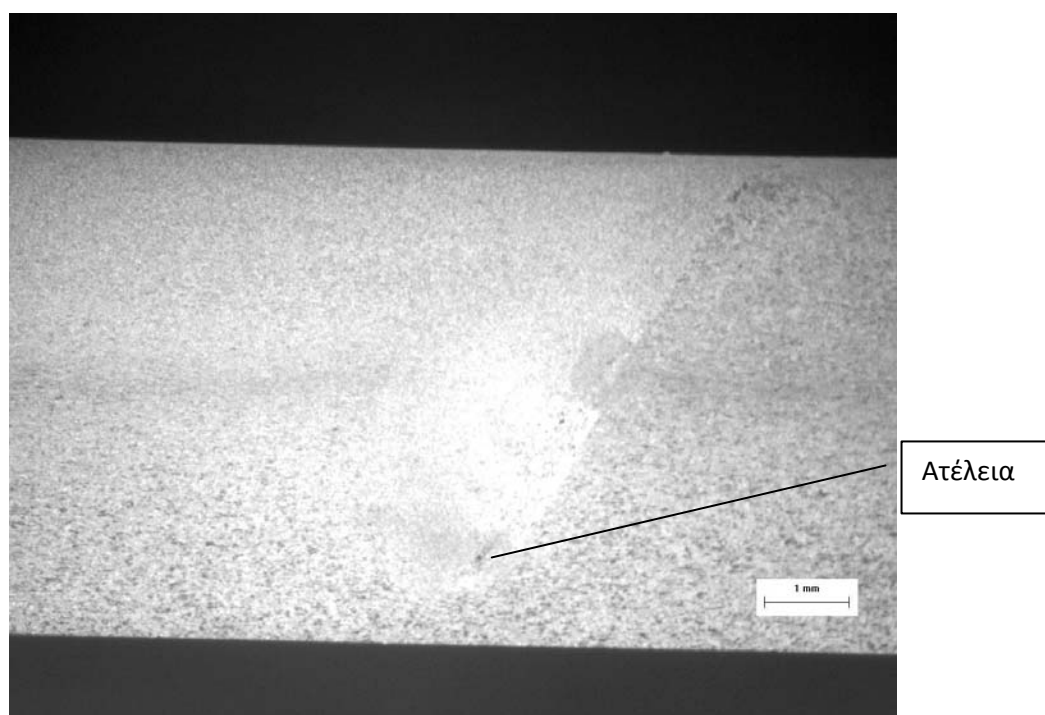
Στο δεξί μέρος της μικρογραφίας της εικόνας 6.13 φαίνονται καθαρά οι ευμεγέθεις κόκκοι της ΘΜΕΖ, ενώ αριστερά από την περιοχή μετάβασης φαίνονται οι πολύ μικρότεροι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης. Οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης παρουσιάζονται ομοιόμορφοι, ισαξονικοί και χωρίς προσανατολισμό. Είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκοι, τόσο που τα όρια τους γίνονται πολύ δύσκολα διακριτά. Το κυρίαρχο φαινόμενο που επικρατεί στη διαμόρφωση του μεγέθους των κόκκων είναι η δυναμική ανακρυστάλλωση.

Στην τέταρτη δοκιμή (αρ.2 βλ. πίνακα 6.1) επιλέχθηκαν οι εξής λειτουργικές παράμετροι:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	475 rpm	Κωνικός

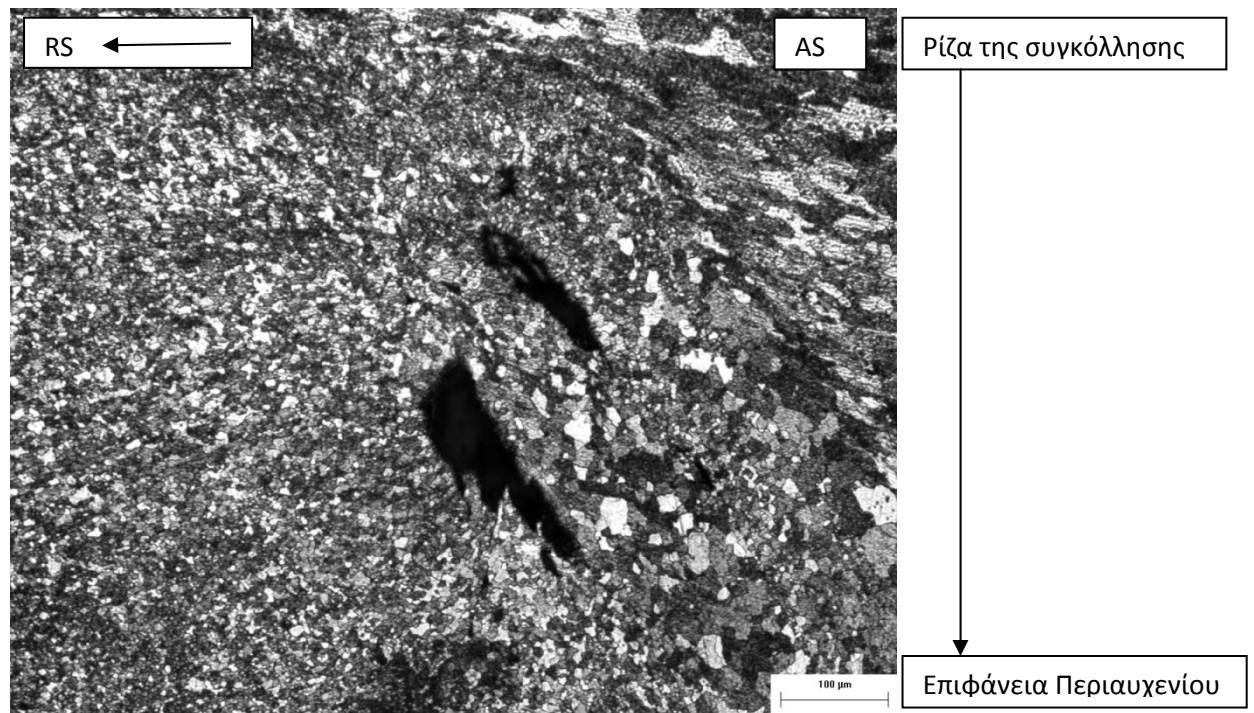
Στην ακόλουθη δοκιμή συγκόλλησης αυξήθηκε ακόμη περισσότερο η ταχύτητα περιστροφής, ενώ η ταχύτητα πρόωσης κρατήθηκε σταθερή.

Πλέον, οι ατέλειες που εμφανίζονται είναι δύσκολο να φανούν στη μακροσκοπική παρατήρηση, πράγμα που σημαίνει ότι η βελτίωση στην ποιότητα των συγκολλήσεων είναι αισθητή. Επιπλέον, οι ατέλειες συνεχίζουν να εμφανίζονται στην περιοχή όπου αναμένονταν.



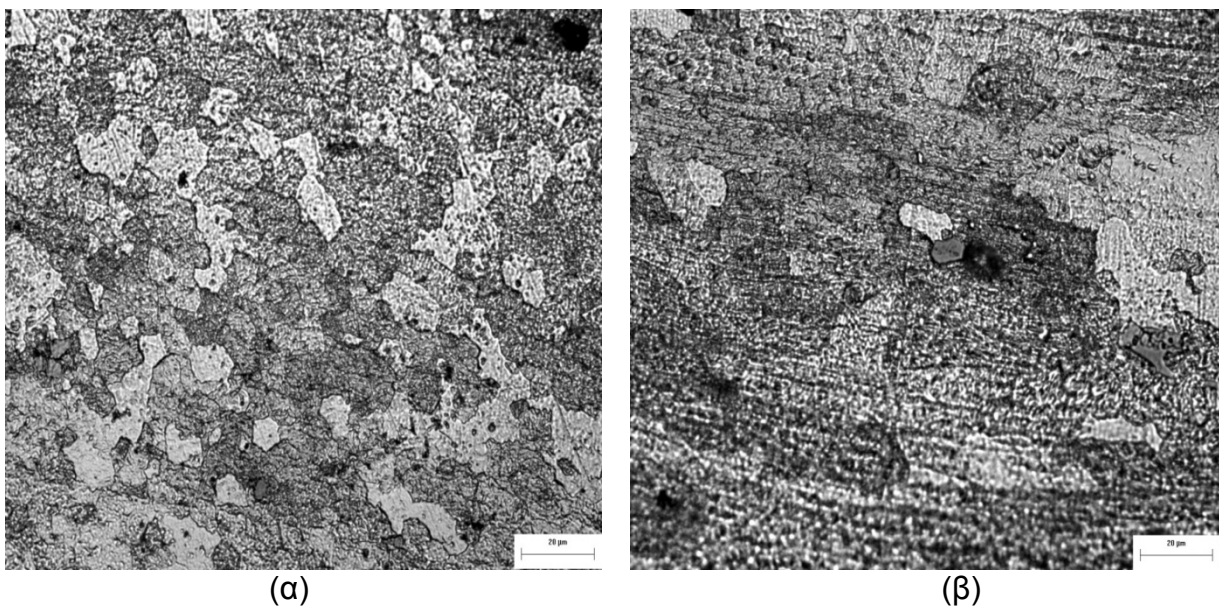
Εικόνα 6.14: Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου

Η μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου αποκαλύπτει την έκταση των ατελειών, τον αριθμό τους και τις ακριβείς περιοχές που αυτές εμφανίζονται.



Εικόνα 6.15: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής και της θέσης των παρατηρούμενων ατελειών.

Τέλος, στις μικρογραφίες της εικόνας 6.16, παρατηρούνται σε μεγέθυνση οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης σε αντιδιαστολή με τους κόκκους της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης (η μεγέθυνση που χρησιμοποιήθηκε στο μικροσκόπιο είναι η ίδια και για τις δυο φωτογραφίες).

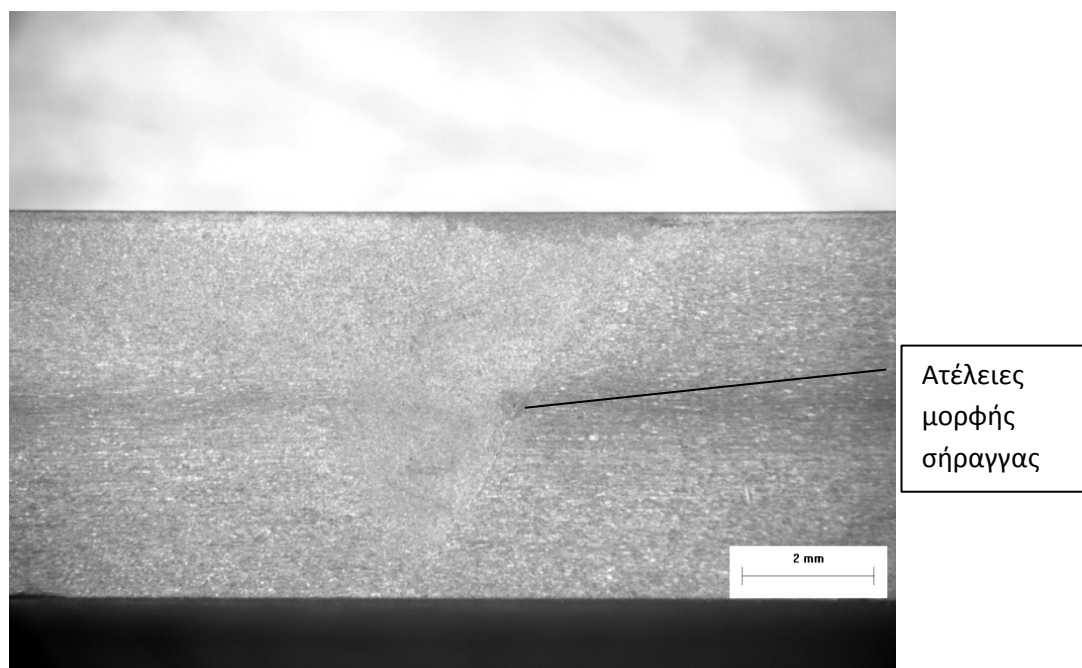


Εικόνα 6.16: Σύγκριση του μεγέθους των κόκκων μεταξύ (α) του πυρήνα συγκόλλησης και (β) της ΘΜΕΖ.

Η πέμπτη δοκιμή (αρ.3 βλ. πίνακα 6.1) πραγματοποιήθηκε με χρήση των ακόλουθων παραμέτρων:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Κωνικό

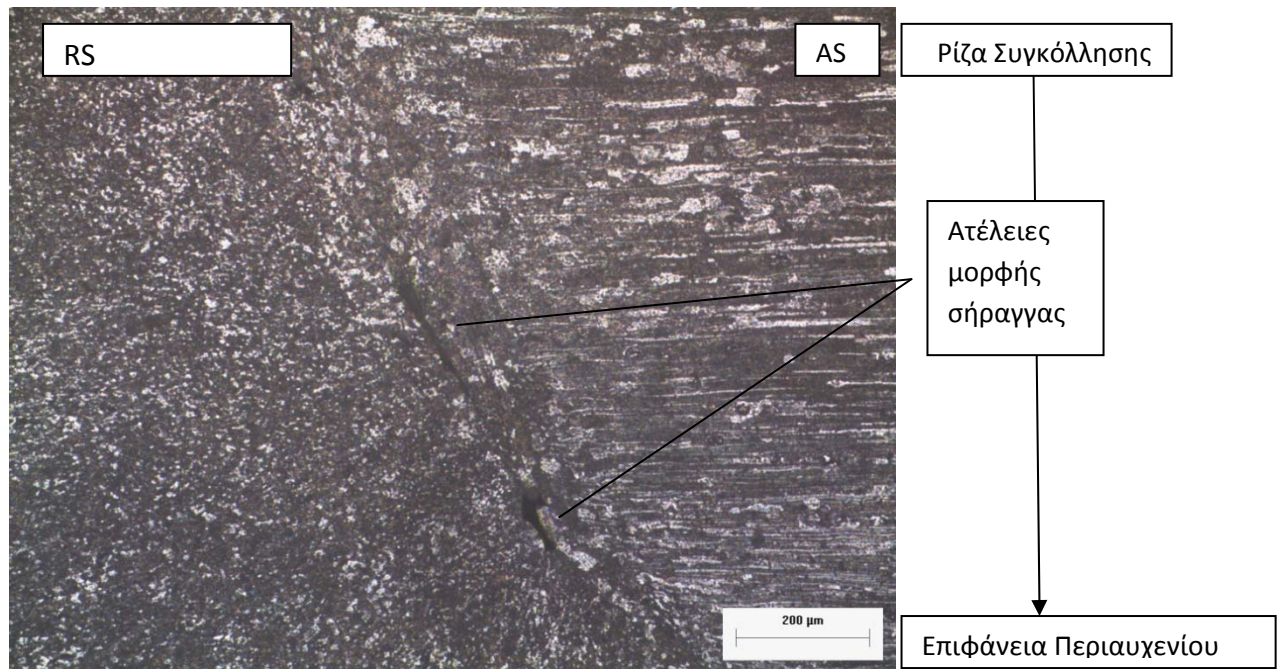
Η συνεχής εμφάνιση ατελειών μορφής σήραγγας μεγάλου μεγέθους, οδηγεί στην περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, ενώ η ταχύτητα πρόωσης διατηρείται σταθερή.



Εικόνα 6.17: Μακροσκοπική παρατήρηση της τομής του δοκιμίου.

Παρατηρείται μεγάλη μείωση στο μέγεθος των ατελειών. Οι ατέλειες εμφανίζονται στη μέση και δεξιά στον πυρήνα συγκόλλησης, σχεδόν πάνω στην περιοχή που διαχωρίζεται από τη ΘΜΕΖ, όπως φαίνεται και στη μακρογραφία της εικόνας 6.17.

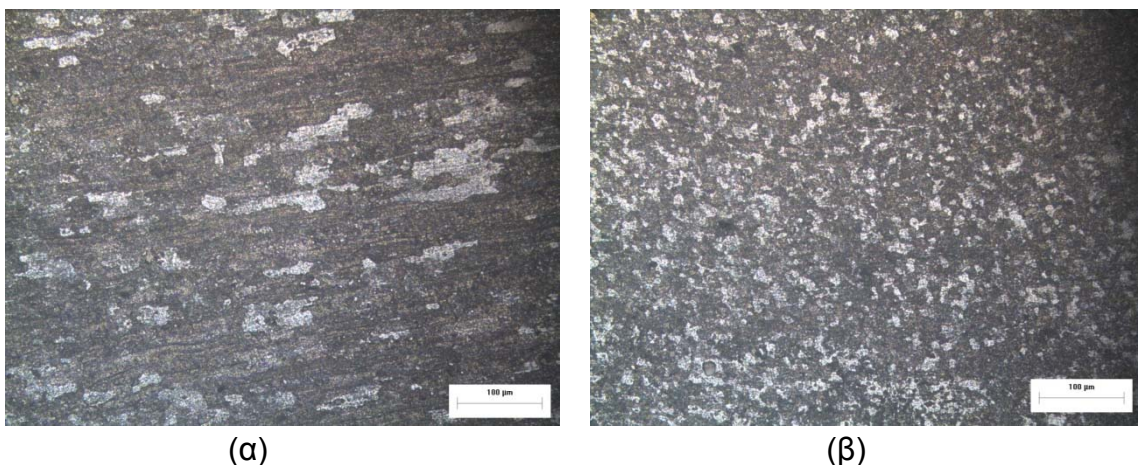
Η μικροσκοπική παρατήρηση (εικόνα 6.18) αποκαλύπτει το μικρό μέγεθος των ατελειών, καθώς και την ακριβή περιοχή εμφάνισής τους.



Εικόνα 6.18: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μορφής σήραγγας.

Ατέλειες τέτοιου μεγέθους θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ελαττώματα 'flaws' (χαρακτηρίζονται ως 'flaws' οι ατέλειες που είναι επιτρεπτές). Εκτός του μεγέθους, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των ατελειών είναι η μορφή τους. Ατέλειες με στρογγυλεμένα άκρα δεν ευνοούν τη συγκέντρωση τάσεων. Στην παρούσα συγκόλληση οι ατέλειες, όπως φαίνεται (εικόνα 6.18), δεν έχουν τέτοια μορφή.

Στις ακόλουθες μικρογραφίες (εικόνα 6.19) φαίνονται οι κόκκοι των γειτονικών περιοχών ΘΜΕΖ και πυρήνα συγκόλλησης, η διαφορά μεγέθους τους, καθώς και ο έντονος προσανατολισμός των κόκκων της ΘΜΕΖ.



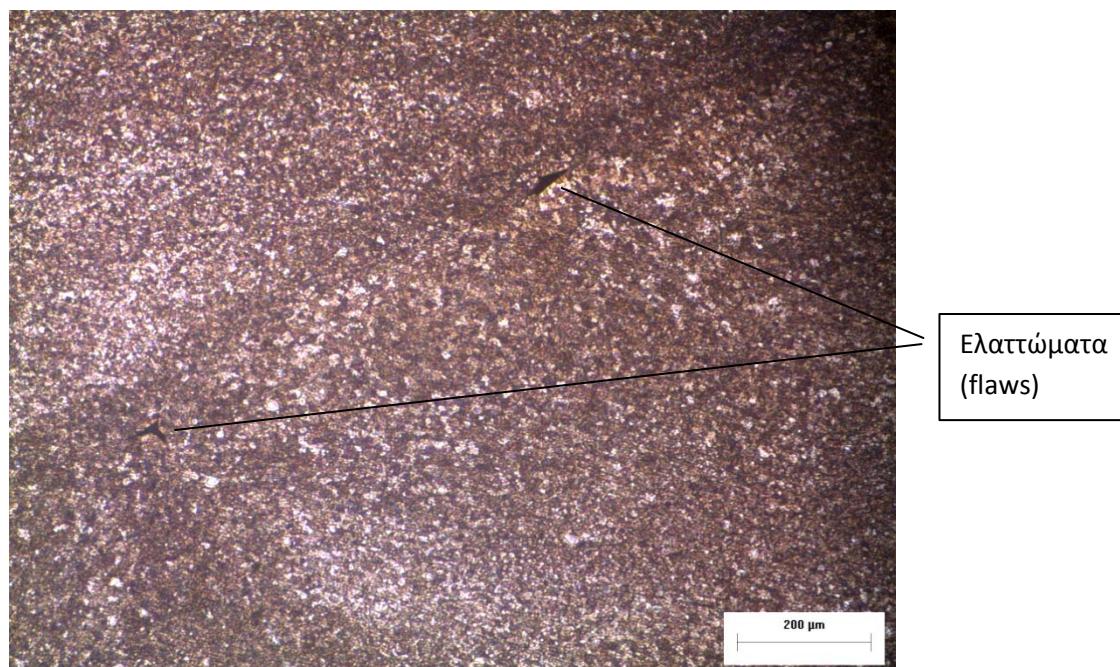
Εικόνα 6.19: Μικροσκοπική παρατήρηση του μεγέθους των κόκκων μεταξύ (α) ΘΜΕΖ και (β) πυρήνα συγκόλλησης.

Για την έκτη δοκιμή (αρ.7 βλ. πίνακα 6.1) επιλέχθηκαν οι ακόλουθες λειτουργικές παράμετροι:

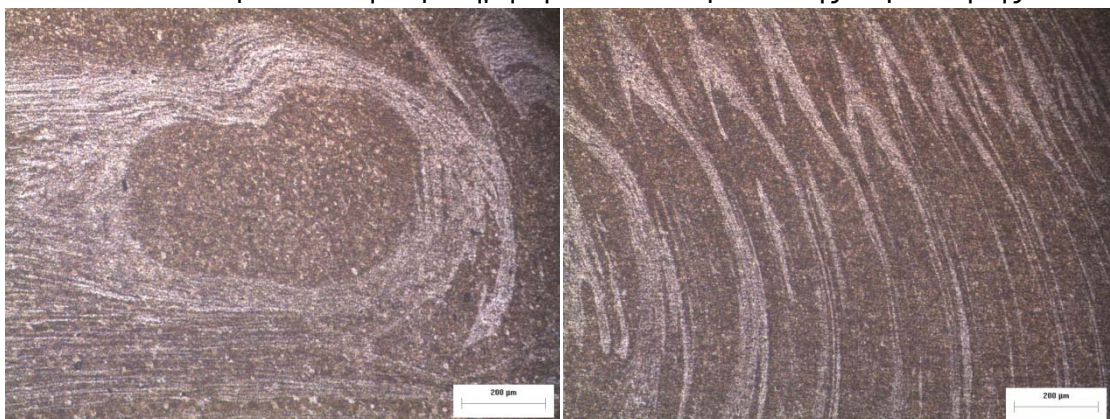
Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Σπείρωμα

Στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 2° . Στην παρούσα συγκόλληση δεν παρατηρούνται ατέλειες αλλά ελαττώματα, τα οποία φαίνονται μόνο στη μικροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

Επιπρόσθετα, διακρίνεται η δακτυλιοειδής δομή, ως αποτέλεσμα της χρήσης του εργαλείου συγκόλλησης που φέρει σπείρωμα. Παρατηρείται ότι η δακτυλιοειδής δομή εμφανίζεται μόνο όταν γίνεται χρήση του εργαλείου αυτού.



Εικόνα 6.20: Μικροσκοπική παρατήρηση των ελαττωμάτων της συγκόλλησης.

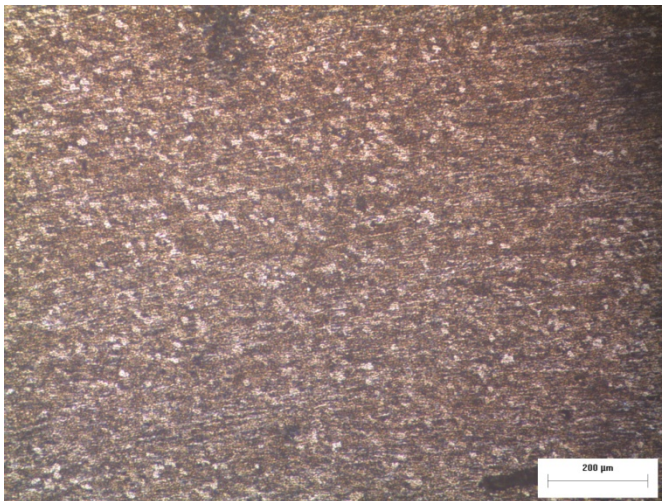


(α)

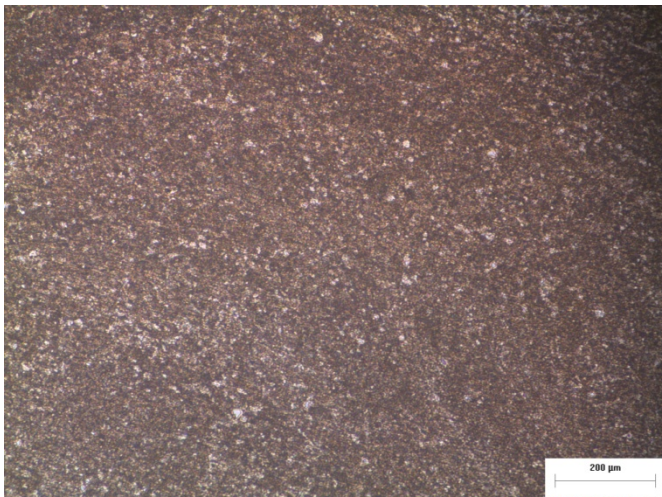
(β)

Εικόνα 6.21: Μικροσκοπική παρατήρηση της δακτυλιοειδούς δομής.

Τέλος, στις παρακάτω μικρογραφίες, παρουσιάζονται οι κόκκοι της άνω και της κάτω περιοχής του πυρήνα συγκόλλησης. Οι κόκκοι της κατώτερης περιοχής είναι εμφανώς μικρότεροι από τους κόκκους της ανώτερης. Η διαφορά του μεγέθους οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο περιοχών εξαιτίας της διαφορετικής θερμικής παροχής. Η θερμική παροχή είναι μεγαλύτερη στην ανώτερη περιοχή αφού είναι πιο κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης που έρχεται σε επαφή με το περιαιχένιο.



Εικόνα 6.22: Ανώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.



Εικόνα 6.23: Κατώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.

6.1.2 Μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA5083-H111

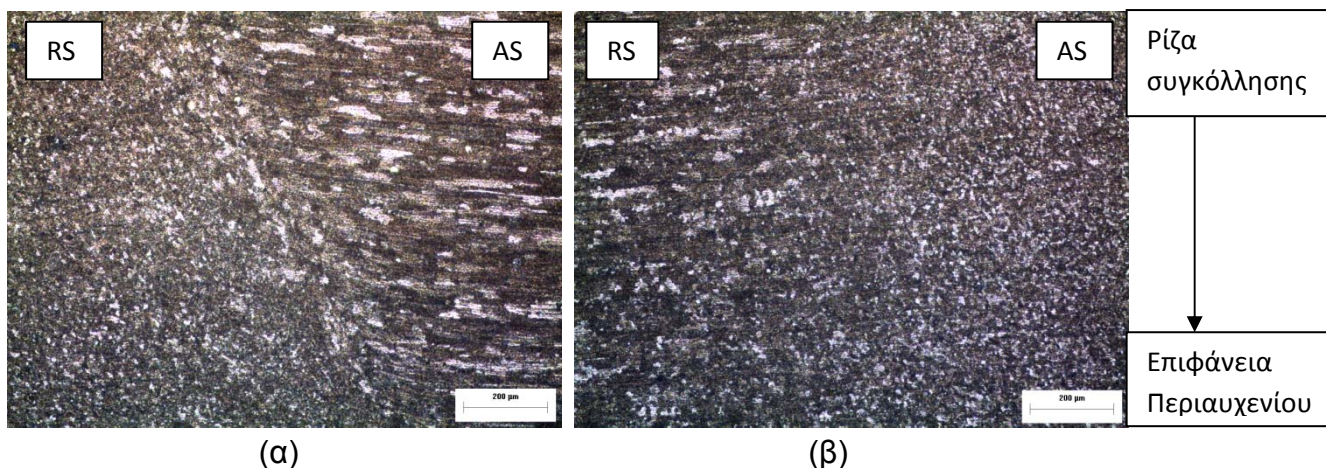
Η έβδομη δοκιμή (αρ.6 βλ. πίνακα 6.1) πραγματοποιήθηκε με παραμέτρους οι οποίες αποτελούν τις βέλτιστες και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Κωνικός

Στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 2° . Επιπρόσθετα η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με διεύθυνση συγκόλλησης κάθετη στη διεύθυνση της έλασης του κράματος.

Στην παρούσα δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε πέρασμα σε πλάκα, αλλά συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση του κράματος αλουμινίου 5083-H111 (πάχους 5,4mm). Το δοκίμιο δεν παρουσιάζει κανένα είδος ατέλειας.

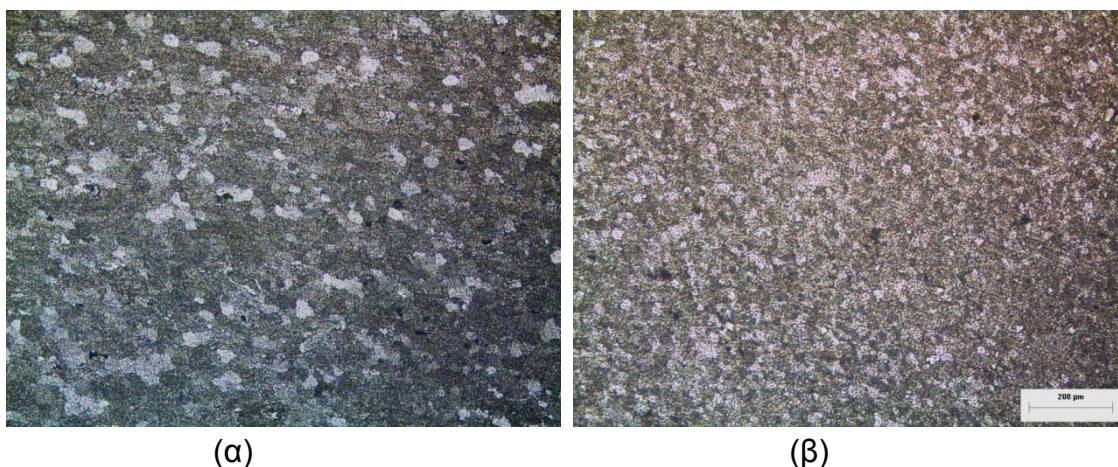
Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται οι περιοχές διαχωρισμού μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης, της ΘΜΕΖ της προωθούμενης πλευράς (AS) και της ΘΜΕΖ της υποχωρούσας (RS) πλευράς.



Εικόνα 6.24: Μικροσκοπική παρατήρηση του διαχωρισμού μεταξύ (α) πυρήνα συγκόλλησης και ΘΜΕΖ στην προωθούμενη πλευρά και (β) πυρήνα συγκόλλησης και ΘΜΕΖ στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.

Ο διαχωρισμός μεταξύ των δυο ζωνών είναι εμφανέστατος στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης εξαιτίας των έντονα προσανατολισμένων κόκκων της ΘΜΕΖ. Αντίθετα, στην υποχωρούσα πλευρά, ο διαχωρισμός δεν είναι ευδιάκριτος, αλλά μπορεί να φανεί στη μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου, παρατηρώντας τις έντονες διαφορές μεταξύ των μεγεθών των κόκκων των δύο ζωνών.

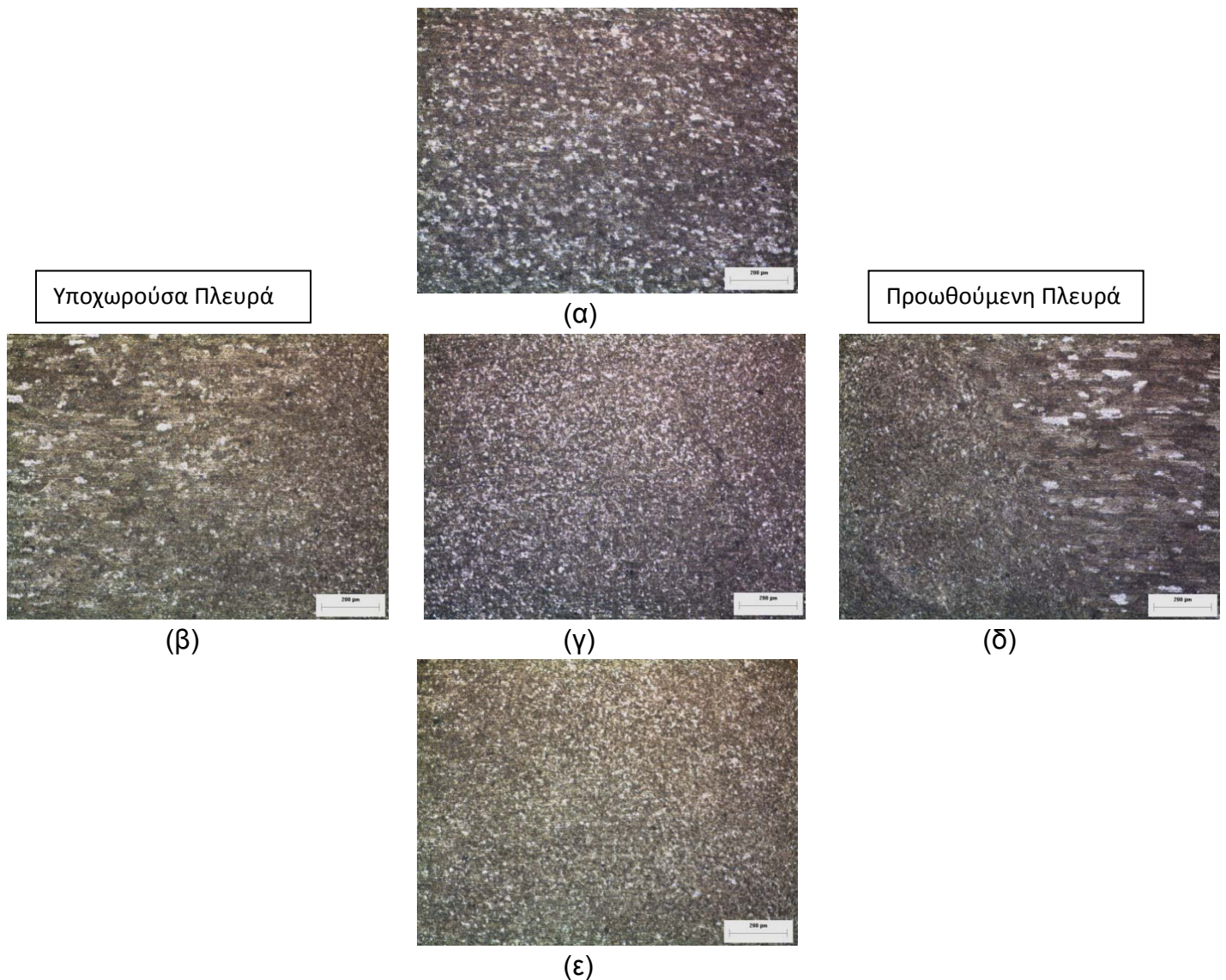
Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται η μεγάλη διαφορά του μεγέθους των κόκκων στην ανώτερη και την κατώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.



Εικόνα 6.25: Μικρογραφίες: (α) της ανώτερης και (β) της κατώτερης περιοχής του πυρήνα συγκόλλησης.

Τέλος, παρουσιάζεται ολοκληρωμένα η δομή της συγκόλλησης που αποτελείται από τις εξής ζώνες: πυρήνας συγκόλλησης, ΘΜΕΖ και ΘΕΖ στην προωθούμενη πλευρά καθώς και ΘΜΕΖ και ΘΕΖ στην υποχωρούσα πλευρά.

Ο πυρήνας συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από ισοαξονικούς, χωρίς συγκεκριμένο προσανατολισμό και μικρού μεγέθους κόκκους. Το μέγεθος των κόκκων ελαττώνεται με κατεύθυνση προς την επιφάνεια συγκράτησης, όπως φαίνεται και στις μικρογραφίες (α) και (ε) της εικόνας 6.26. Η ΘΜΕΖ αποτελείται από παραμορφωμένους κόκκους που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τους κόκκους του πυρήνα συγκόλλησης και μικρότερο από αυτό των κόκκων της ΘΕΖ (εικόνα 6.26: (β), (δ)).

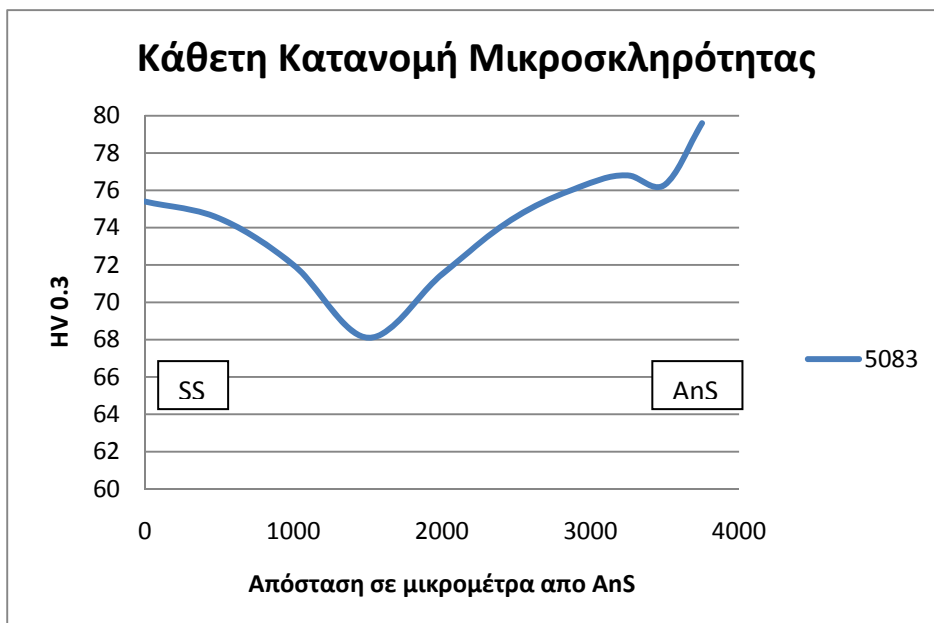


Εικόνα 6.26: Μικροσκοπική παρατήρηση των ζωνών της συγκόλλησης: (α) άνω μέρος πυρήνα συγκόλλησης, (β) ΘEZ (αριστερά) και ΘMEZ (κέντρο) στην υποχωρούσα πλευρά, (γ) πυρήνας συγκόλλησης, (δ) ΘEZ (δεξιά) και ΘMEZ (κέντρο) στην προωθούμενη πλευρά, (ε) κάτω μέρος πυρήνα συγκόλλησης.

6.1.3 Κατανομή μικροσκληρότητας των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων AA5083-H111

Στο γράφημα 6.1 παρουσιάζεται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας της τομής του συγκολλημένου δοκιμίου. Οι μετρήσεις λήφθηκαν με φορά από την επιφάνεια περιαιχενίου (shoulder surface, SS) προς την επιφάνεια συγκράτησης (anvil surface, AnS). Φαίνεται πως υπάρχει σχετική άνοδος των τιμών καθώς

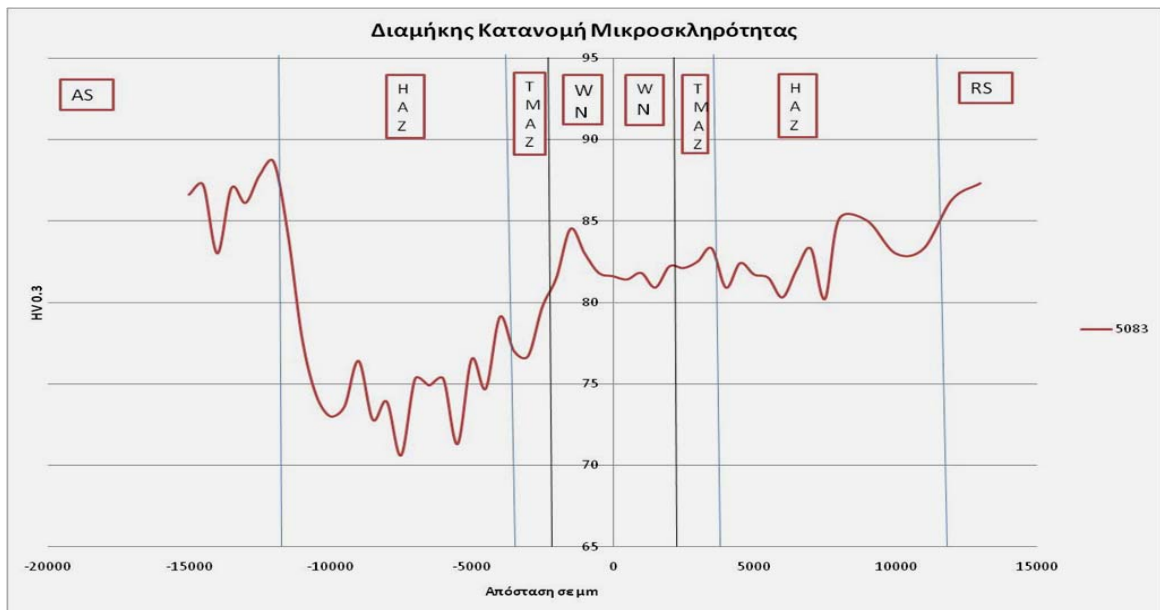
κατευθυνόμαστε προς την επιφάνεια συγκράτησης, αφού εκεί συναντώνται οι κόκκοι που έχουν το μικρότερο μέγεθος.



Γράφημα 6.1: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

Η μείωση που παρατηρείται από την αρχή (επιφάνεια περιαιχενίου, SS) έως περίπου τα 1500μm οφείλεται στο ότι η περιοχή αυτή είναι εκείνη στην οποία ασκεί το περιαιχένιο την επίδρασή του [8]. Οπότε, παρατηρείται μια περιοχή (0-1500μm), η οποία επηρεάζεται από το περιαιχένιο και μια δεύτερη (1500μm-AnS), η οποία επηρεάζεται από τον πείρο συγκόλλησης. Η μικρότερη τιμή στην κάθετη κατανομή παρουσιάζεται περίπου στο σημείο διαχωρισμού των δύο περιοχών. Η μείωση που παρατηρείται έως τα 1500μm οφείλεται στο μεγαλύτερο μέγεθος των κόκκων του WN που βρίσκονται κοντά στην SS. Η διαφορά στην τιμή μικροσκληρότητας στα 0μm και στα 1500μm οφείλεται στο ότι στα πλησιέστερα προς την SS σημεία (στα 0μm) το υλικό υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση από το περιαιχένιο. Η διαφορά τιμής από τα 1500μm έως την επιφάνεια συγκράτησης οφείλεται στη διαφορά του μεγέθους των κόκκων.

Στο γράφημα 6.2 παρατηρείται η διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου που μετρήθηκε σε απόσταση 1500μm από την επιφάνεια συγκράτησης. Παρατηρείται ότι οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, κυρίως της υποχωρούσας πλευράς, λόγω της αύξησης του μεγέθους των κόκκων. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι οι τιμές μικροσκληρότητας των διάφορων ζωνών της συγκόλλησης παρουσιάζουν πτώση σε σχέση με αυτές του μητρικού υλικού. Τέλος, οι τιμές μικροσκληρότητας του πυρήνα συγκόλλησης, δεν παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τις τιμές της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Ο πιθανότερος λόγος είναι η δυναμική ανακρυστάλλωση, που μπορεί να μειώνει το μέγεθος των κόκκων, αλλά μειώνει και τις διαταραχές που υπάρχουν στα όριά τους.

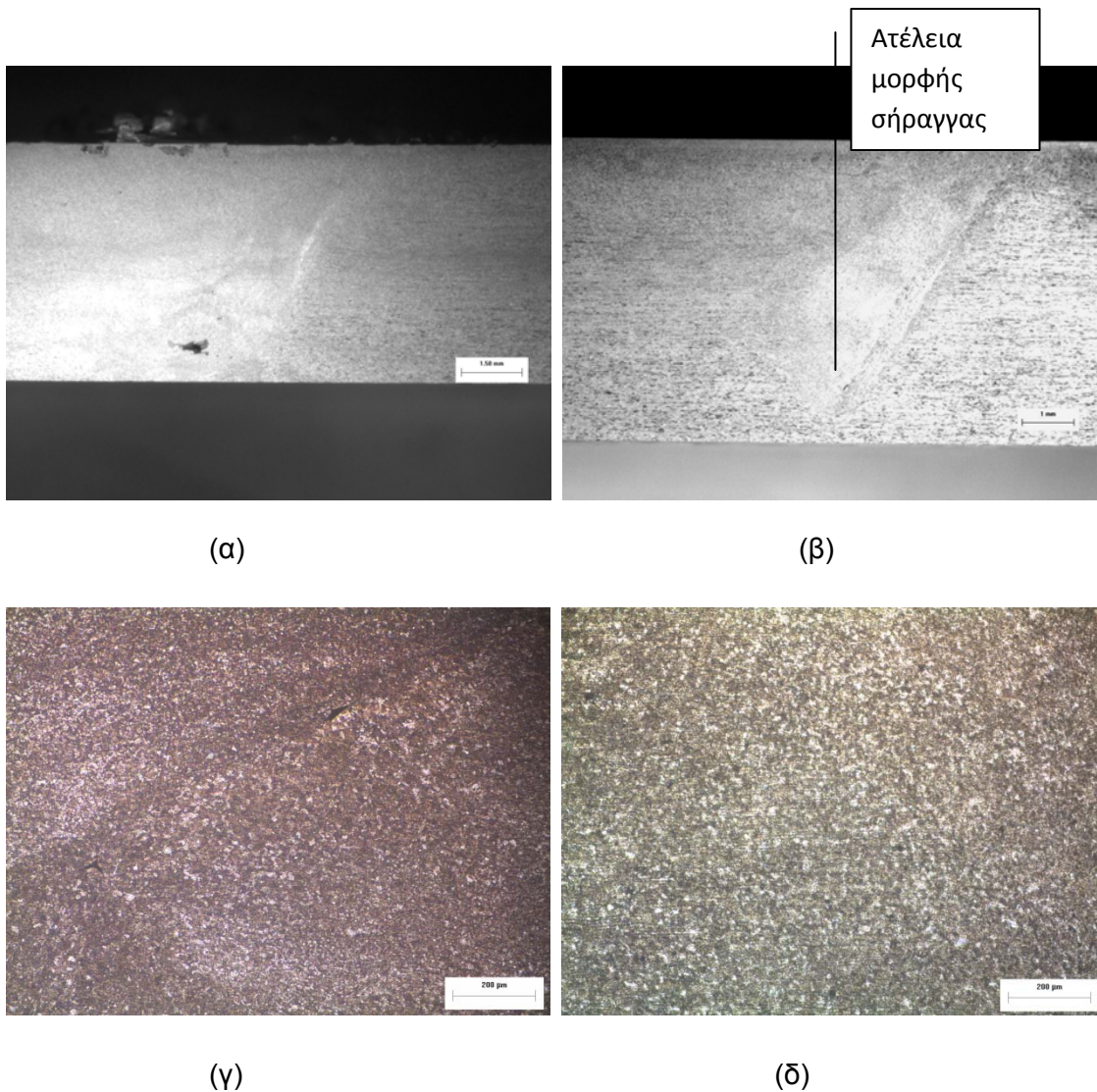


Γράφημα 6.2: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

6.1.4 Επίδραση των παραμέτρων στις συγκολλήσεις

- Επίδραση του πείρου συγκόλλησης

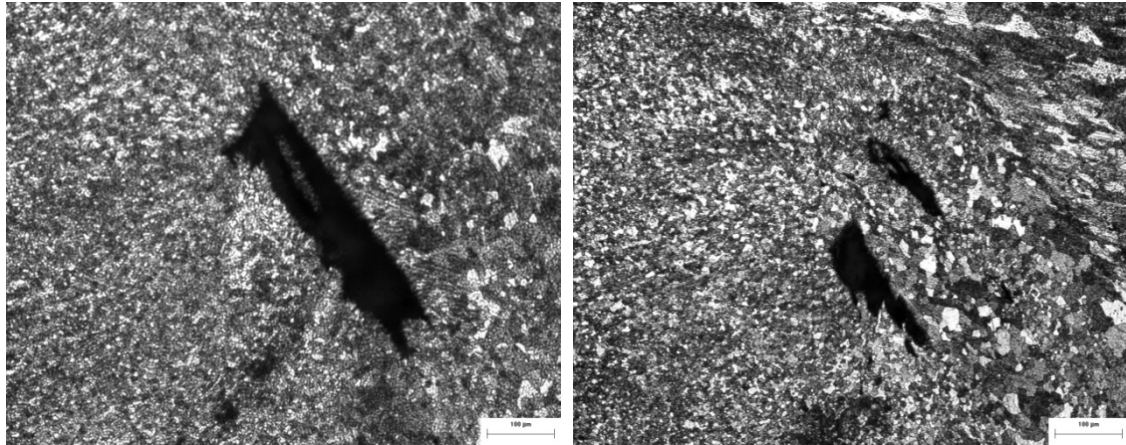
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των ραφών συγκόλλησης α) αρ.1 και αρ.5 καθώς και β) αρ.6 και αρ.7 (βλ. πίνακα 6.1), παρατηρείται ότι το εργαλείο συγκόλλησης που φέρει κωνικό πείρο παρουσιάζει πολύ καλύτερα αποτελέσματα, από απόψεως μεγέθους των ατελειών, από το εργαλείο που φέρει το σπείρωμα (εικόνα 6.27). Ο πείρος συγκόλλησης επιδρά και στο μέγεθος των ζωνών συγκόλλησης, αφού στις σχηματιζόμενες ζώνες κατά την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων με χρήση του πείρου που φέρει σπείρωμα, οι ζώνες συγκόλλησης έχουν μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τις ζώνες που σχηματίζονται κατά τη συγκόλληση που πραγματοποιείται με τον κωνικό πείρο χωρίς σπείρωμα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας τον πείρο που φέρει σπείρωμα είναι εφικτή η συγκόλληση πλακών λίγο μεγαλύτερου πάχους, λόγω της γεωμετρίας του, σε σχέση με συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον κωνικό πείρο χωρίς σπείρωμα. Άρα, η γεωμετρία του πείρου συγκόλλησης ασκεί σημαντική επίδραση στην ποιότητα της συγκόλλησης.



Εικόνα 6.27: (α) Μακρογραφίες της συγκόλλησης αρ.5 και (β) της συγκόλληση αρ.1. Μικρογραφίες του πυρήνα συγκόλλησης της συγκόλλησης (γ) αρ. 7 και (δ) αρ.6 (βλ. πίνακα 6.1).

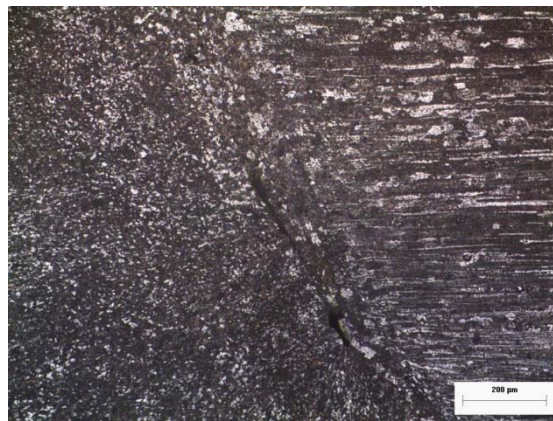
- Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

Για τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των ραφών συγκόλλησης αρ.1, αρ.2 και αρ.3 (βλ. πίνακα 6.1). Παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, το μέγεθος των εμφανιζόμενων ατελειών μειώνεται (εικόνα 6.28). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί στην αύξηση της θερμικής παροχής. Έτσι έχουμε σωστότερη ανάδευση του μετάλλου και αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση του μεγέθους των δημιουργούμενων ατελειών.



(α)

(β)

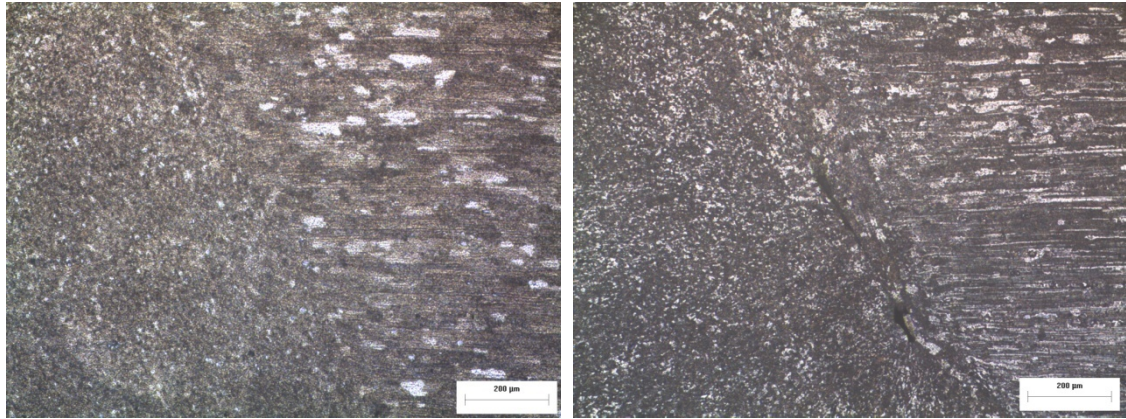


(γ)

Εικόνα 6.28: Μικρογραφίες των ατελειών των ραφών συγκόλλησης (α) αρ.1, (β) αρ.2 και (γ) αρ.3 (βλ. πίνακα 6.1).

- Επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης

Για τον καθορισμό της επίδρασης της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης εξετάζονται οι ραφές συγκόλλησης αρ.3 και αρ.6 (βλ. πίνακα 6.1). Η κατάλληλη επιλογή κλίσης βοηθάει ώστε το περιαιχένιο του εργαλείου συγκόλλησης να συγκρατεί το αναδευόμενο υλικό και να μεταφέρει το υλικό που αναδεύεται, από το μπροστινό προς το πίσω μέρος του πείρου συγκόλλησης [10]. Έτσι, η συγκόλληση υπ' αριθμόν 6 (βλ. πίνακα 6.1) (δεν παρουσιάζει καμία ατέλεια), η οποία έγινε με κλίση του εργαλείου 2° , παρουσιάζει σαφώς πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τη συγκόλληση με αριθμό 3, που έγινε χωρίς κλίση του εργαλείου συγκόλλησης. Άρα, η επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης είναι εμφανής.



(α)

(β)

Εικόνα 6.29: Μικρογραφίες στις οποίες παρουσιάζεται ο διαχωρισμός του WN και της TMAZ των συγκολλήσεων (α) αρ.6 και (β) αρ.3, καθώς και οι σχηματιζόμενες ατέλειες στη συγκόλληση (β) αρ.3 (βλ. πίνακα 6.1).

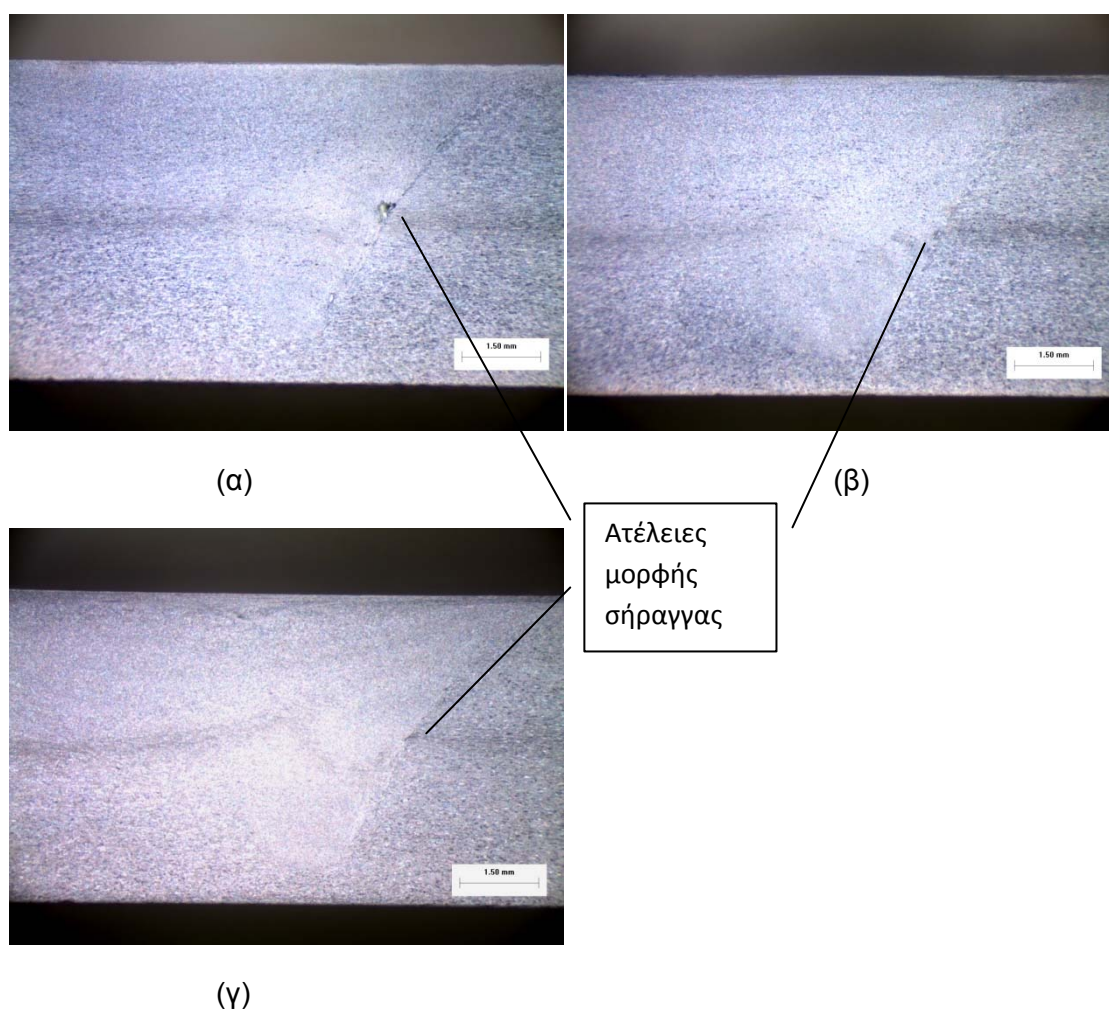
6.1.5 Επίδραση Ομόρροπων Πολλαπλών Περασμάτων

Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με εφαρμογή πολλαπλών (τριών) ομόρροπων περασμάτων του εργαλείου συγκόλλησης πάνω από την ίδια ραφή. Ο σκοπός ήταν η μελέτη της επίδρασης του κάθε περάσματος στη μικροδομή, το είδος και το μέγεθος των ατελειών και στη μικροσκληρότητα των συγκολλήσεων.

Οι λειτουργικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκολλήσεις είναι:

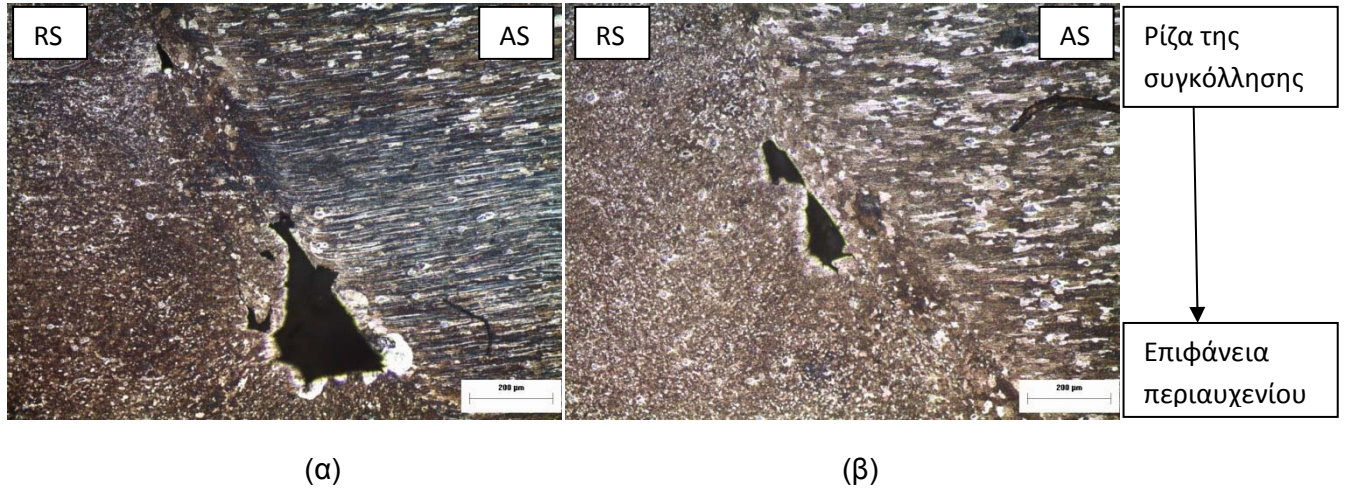
Ταχύτητα Περιστροφής	Ταχύτητα Πρόωσης	Τύπος Πείρου	Αριθμός Περασμάτων
475 rpm	75 mm/min	Κωνικός	3

Στις μακρογραφίες της εικόνας 6.30 παρουσιάζεται η μακροσκοπική μελέτη του δοκιμίου μετά από κάθε πέρασμα του εργαλείου συγκόλλησης.

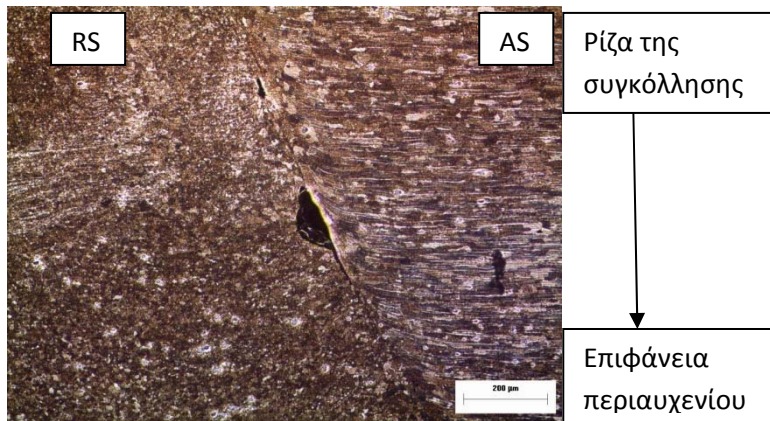


Εικόνα 6.30: Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου μετά (α) το πρώτο, (β) το δεύτερο και (γ) το τρίτο πέρασμα.

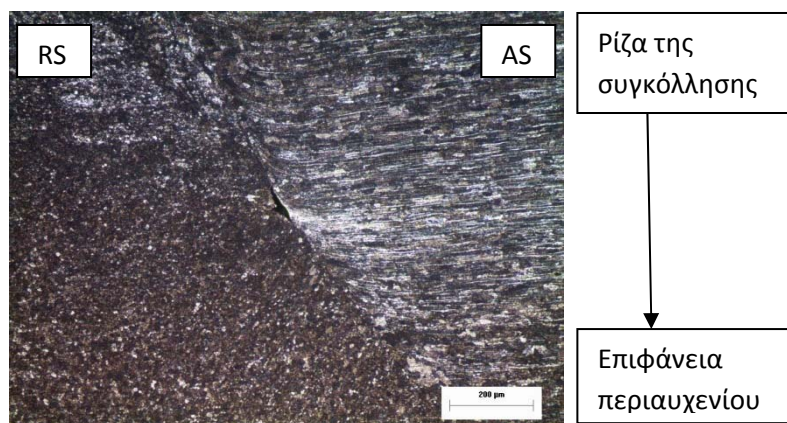
Γίνεται εμφανές ότι μετά από κάθε πέρασμα το μέγεθος των ατελειών μειώνεται αισθητά, ενώ άλλες ατέλειες απαλείφονται. Σε κάθε πέρασμα εφαρμόστηκε μεγαλύτερη κάθετη δύναμη από ότι στο προηγούμενο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μικροσκοπική παρατήρηση των εμφανιζόμενων ατελειών.



Εικόνα 6.31: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το πρώτο πέρασμα.



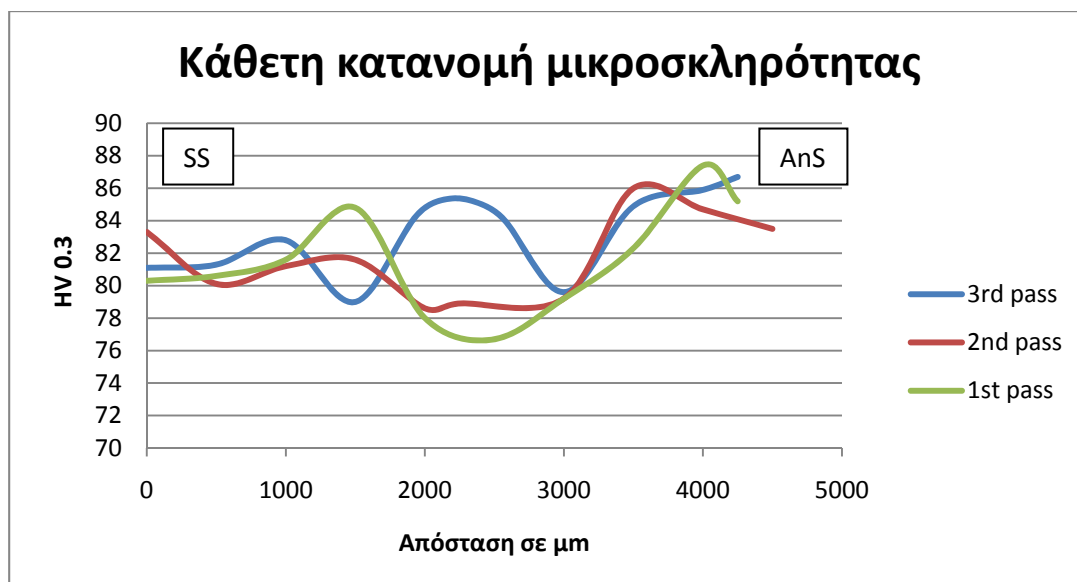
Εικόνα 6.32: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το δεύτερο πέρασμα.



Εικόνα 6.33: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το τρίτο πέρασμα.

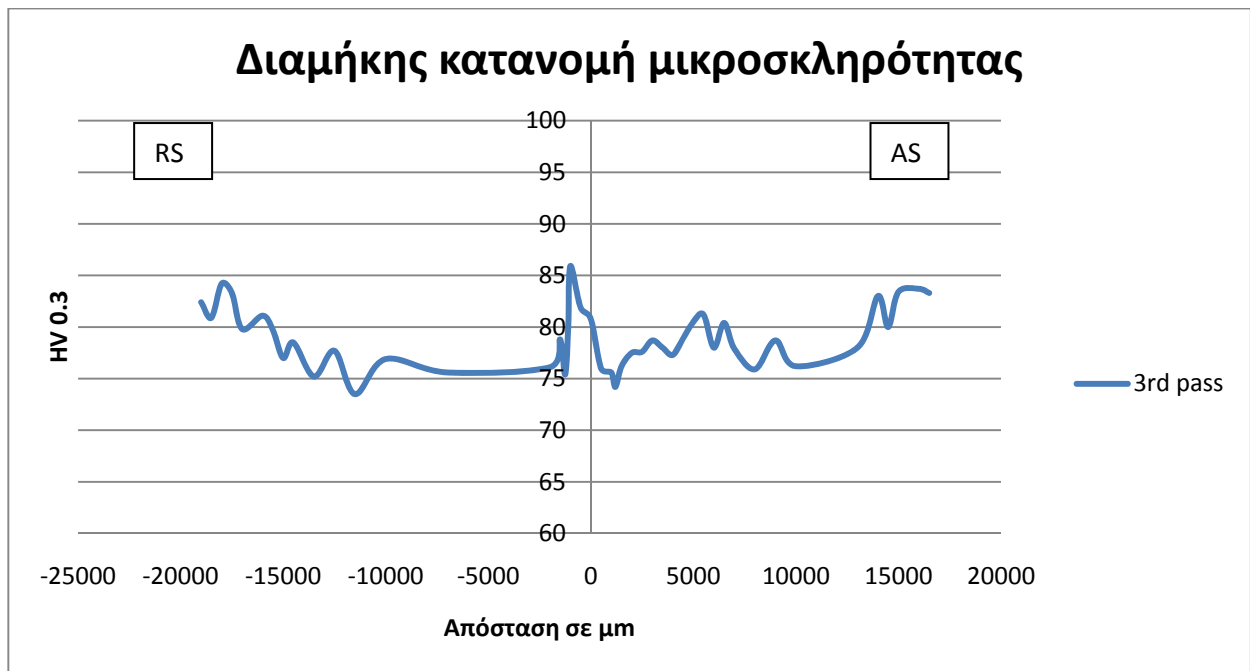
Όσον αφορά στη μικροδομή, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές πριν και μετά το κάθε πέρασμα. Τόσο η δομή των ζωνών, όσο και τα μεγέθη των κόκκων τους παραμένουν αμετάβλητα.

Στο επόμενο σχήμα παρατηρείται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας για κάθε πέρασμα. Φαίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μικροσκληροτήτων μετά από κάθε πέρασμα, έτσι συμπεραίνεται ότι τα ομόρροπα περάσματα δεν επηρεάζουν σημαντικά τη μικροσκληρότητα του υλικού. Υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας, κατά μέσο όρο, παρατηρούνται στο μέσο του πυρήνα συγκόλλησης μετά το τρίτο πέρασμα. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι καθώς προχωράμε προς τη ρίζα της συγκόλλησης υπάρχει άνοδος στην τιμή των μικροσκληροτήτων λόγω της μείωσης του μεγέθους των κόκκων, γεγονός που ισχύει για κάθε πέρασμα.



Γράφημα 6.3: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας (shoulder surface-SS, anvil surface-AnS).

Το γράφημα 6.4 δείχνει τη διαμήκη κατανομή της μικροσκληρότητας του δοκιμίου μετά το τρίτο πέρασμα.



Γράφημα 6.4: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας μετά το τρίτο πέρασμα.

Η υψηλότερη τιμή μικροσκληρότητας παρατηρείται στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη της υποχωρούσας πλευράς. Επιπρόσθετα φαίνεται ότι οι τιμές της μικροσκληρότητας του πυρήνα συγκόλλησης είναι υψηλότερες από το μέσο όρο των τιμών των υπόλοιπων ζωνών, εξαιτίας του μικρού μεγέθους των κόκκων.

Τα δοκίμια του πρώτου και του δεύτερου περάσματος παρουσίασαν ατέλειες μεγάλου μεγέθους (εικόνες 6.31, 6.32), καθιστώντας μη εφικτή τη μέτρηση της μικροσκληρότητάς τους.

6.2 Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA6082-T6

6.2.1 Πειράματα προς εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων

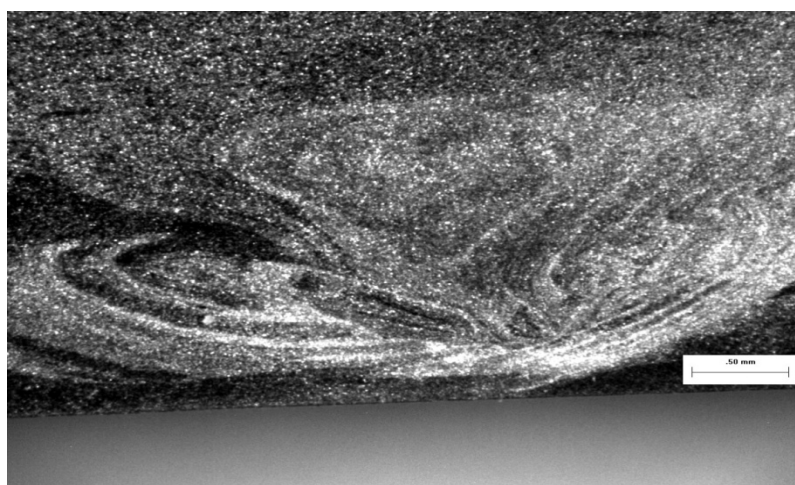
Για το κράμα αλουμινίου 6082-T6 πραγματοποιήθηκαν αρχικά περάσματα σε πλάκες με την τεχνική FSW προς εύρεση κατάλληλων λειτουργικών παραμέτρων. Έγινε συνολικά χρήση έξι διαφορετικών σετ παραμέτρων που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.2: Παράμετροι πραγματοποίησης των συγκολλήσεων.

No.	Ταχύτητα Περιστροφής (RPM)	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)	Τύπος Πείρου Συγκόλλησης	Κλίση Εργαλείου Συγκόλλησης
1	235	118	Με σπείρωμα	-
2	300	118	Με σπείρωμα	-
3	375	85	Με σπείρωμα	-
4	475	85	Κωνικός	-
5	600	85	Κωνικός	2°
6	375	85	Με σπείρωμα	2°

Στις περιπτώσεις συγκόλλησης με κλίση του εργαλείου, αυτή ήταν της τάξης των 2°.

Διαφαίνονται πολύ χαρακτηριστικά οι δακτυλιοειδείς δομές, οι οποίες εμφανίζονται στον πυρήνα της συγκόλλησης. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.



Εικόνα 6.34: Δακτυλιοειδής δομή στον πυρήνα συγκόλλησης.

Όλες οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με διεύθυνση συγκόλλησης παράλληλη στη διεύθυνση της έλασης των πλακών του κράματος AA6082-T6.

Αρχικά έγιναν πέντε δοκιμές με πέρασμα σε πλάκα (πίνακας 6.2, αρ. 1-5) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ομοειδής συγκόλληση (αρ.6, βλ. πίνακα 6.2) με χρήση των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων.

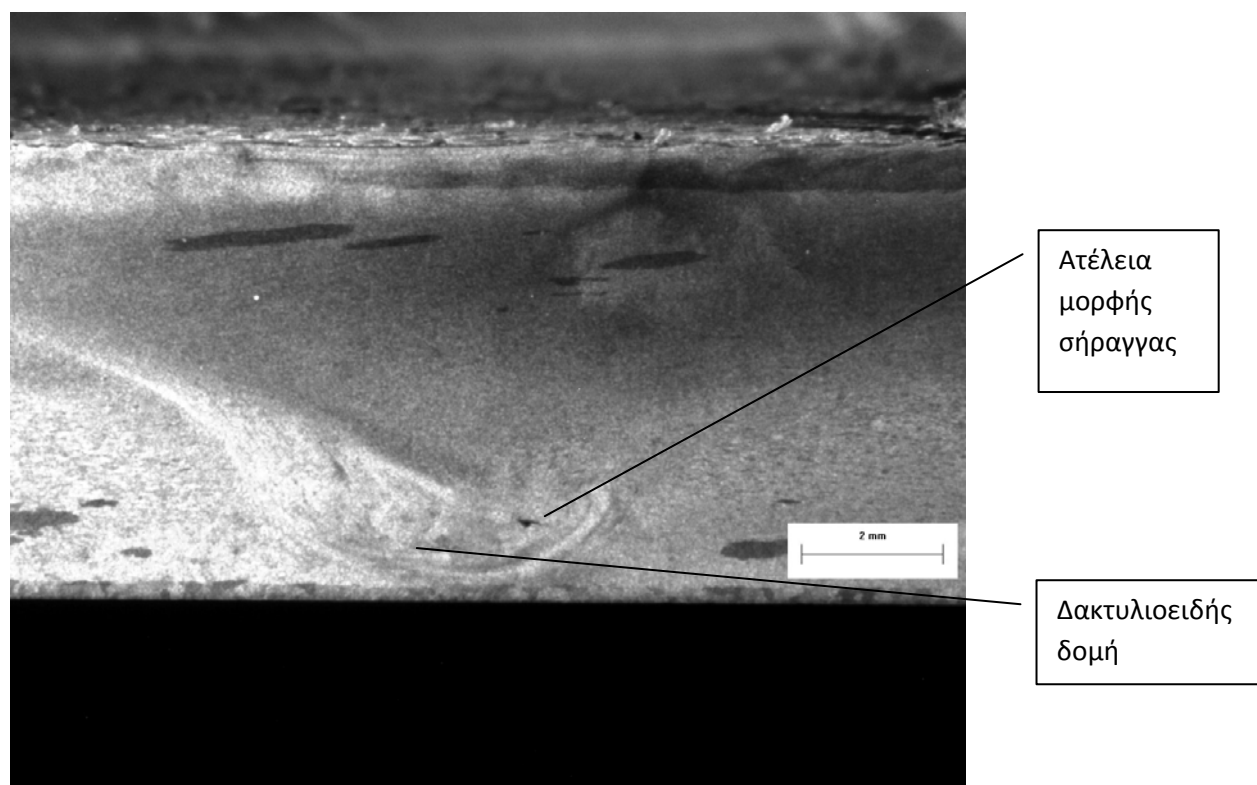
Οι συγκολλήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια ταξινομημένες, με κριτήριο το μέγεθος και το είδος των ατελειών που εμφανίζονται στις ραφές των συγκολλήσεων, κατά φθίνουσα σειρά.

Για την πρώτη συγκόλληση (αρ.1, βλ. πίνακα 6.2) του κράματος αλουμινίου 6082 χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες λειτουργικές παράμετροι:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
118 mm/sec	235 rpm	Σπείρωμα

Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το τροποποιημένο χημικό αντιδραστήριο Poulton.

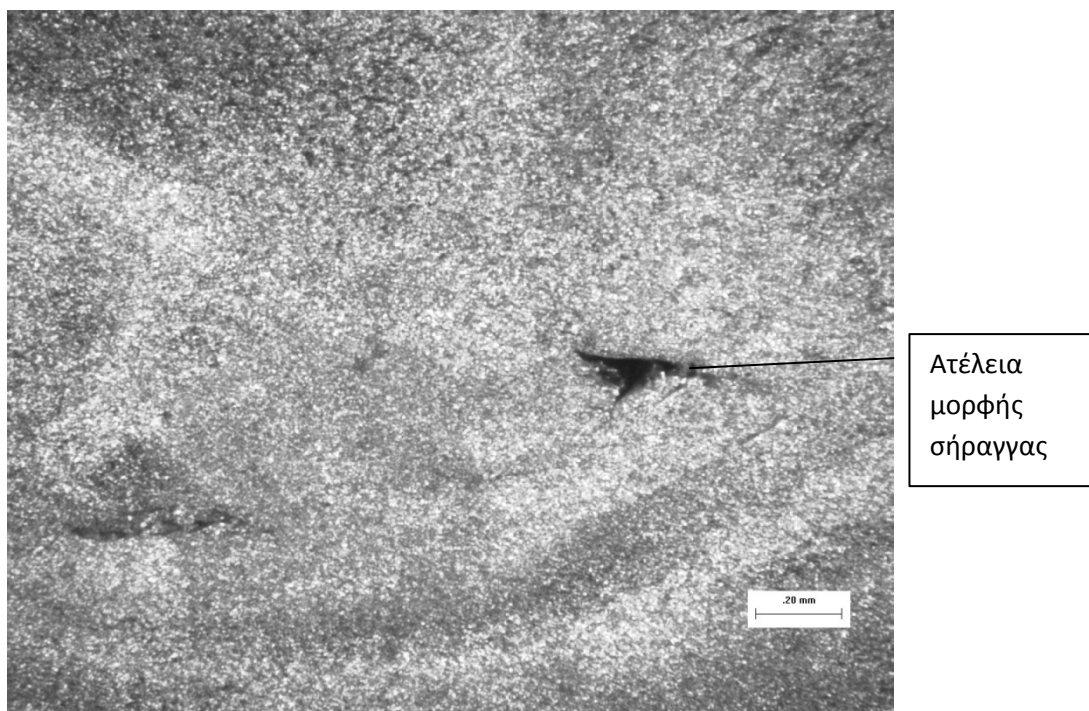
Η υψηλή ταχύτητα πρόωσης σε συνδυασμό με τη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής δεν ευνοούν τη σωστή ανάδευση του υλικού, καθώς και την ανάπτυξη ικανοποιητικής θερμοκρασίας. Έτσι, παρατηρείται ο σχηματισμός ατελειών μορφής σήραγγας, που πιθανότατα συνεχίζονται καθ'όλο το μήκος της ραφής συγκόλλησης.



Εικόνα 6.35: Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

Όπως και στις συγκολλήσεις του κράματος αλουμινίου 5083-H111, έτσι και εδώ παρατηρείται ότι οι ατέλειες σχηματίζονται στο κάτω δεξιό μέρος του πυρήνα συγκόλλησης (WN), πολύ κοντά στο όριό του με τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη.

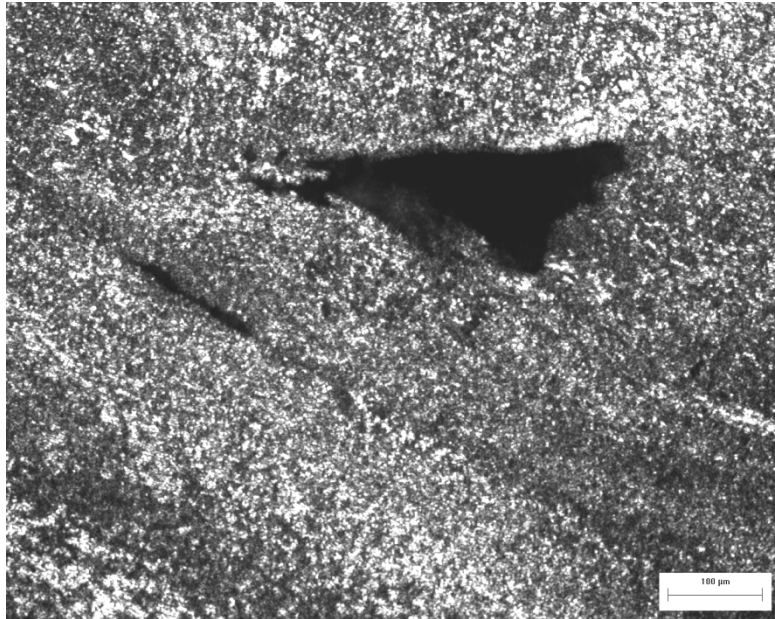
Επιπρόσθετα, φαίνεται ξεκάθαρα η δακτυλιοειδής δομή που σχηματίζεται στον πυρήνα συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με τη χρήση του εργαλείου με το σπείρωμα ευνοούν τη δημιουργία της.



Ατέλεια
μορφής
σήραγγας

Εικόνα 6.36: Στερεοσκοπική παρατήρηση της περιοχής εμφάνισης της ατέλειας.

Η δακτυλιοειδής δομή, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, εμφανίζεται στο κάτω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης και φαίνεται ότι περιβάλλει τις ατέλειες, οι οποίες βρίσκονται στην έκτασή της.



Εικόνα 6.37: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής των ατελειών (x100).

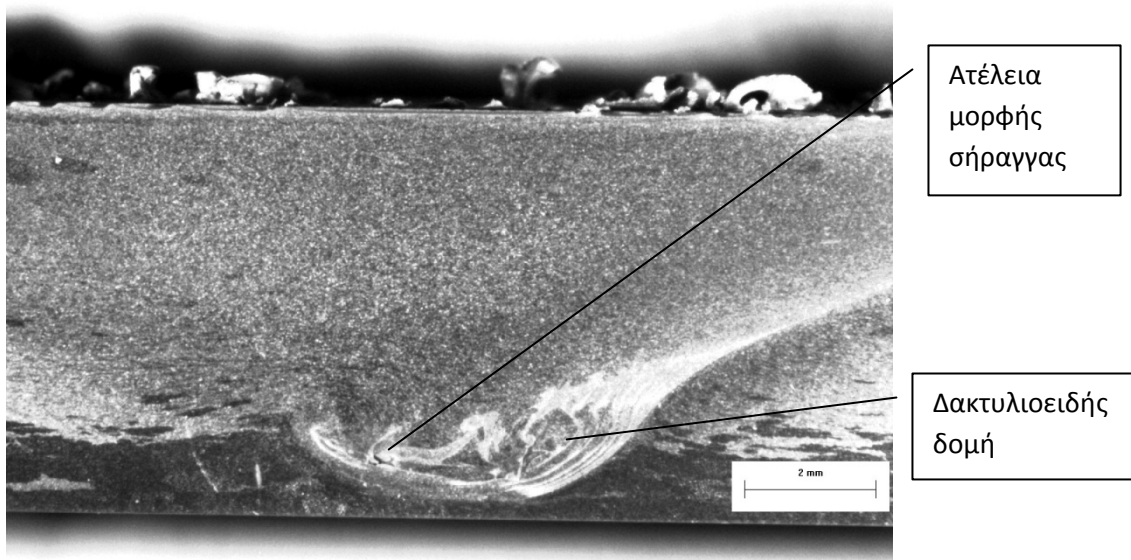
Στην παρούσα συγκόλληση παρουσιάστηκαν δυο ατέλειες, που την καθιστούν μη αποδεκτή (αναφορικά με την ποιότητά της). Η ανάπτυξη χαμηλών θερμοκρασιών συγκόλλησης, που μπορεί να οφείλεται σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου και/ή σε μεγάλες ταχύτητες πρόωσης, δεν βοηθούν την ανάδευση του μετάλλου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Αυτή είναι και η κύρια αιτία εμφάνισης των ατελειών μορφής σήραγγας.

Η δεύτερη δοκιμή (αρ.2 βλ. πίνακα 6.2) πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των ακόλουθων λειτουργικών παραμέτρων:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Εργαλείου
118 mm/sec	300 rpm	Με σπείρωμα

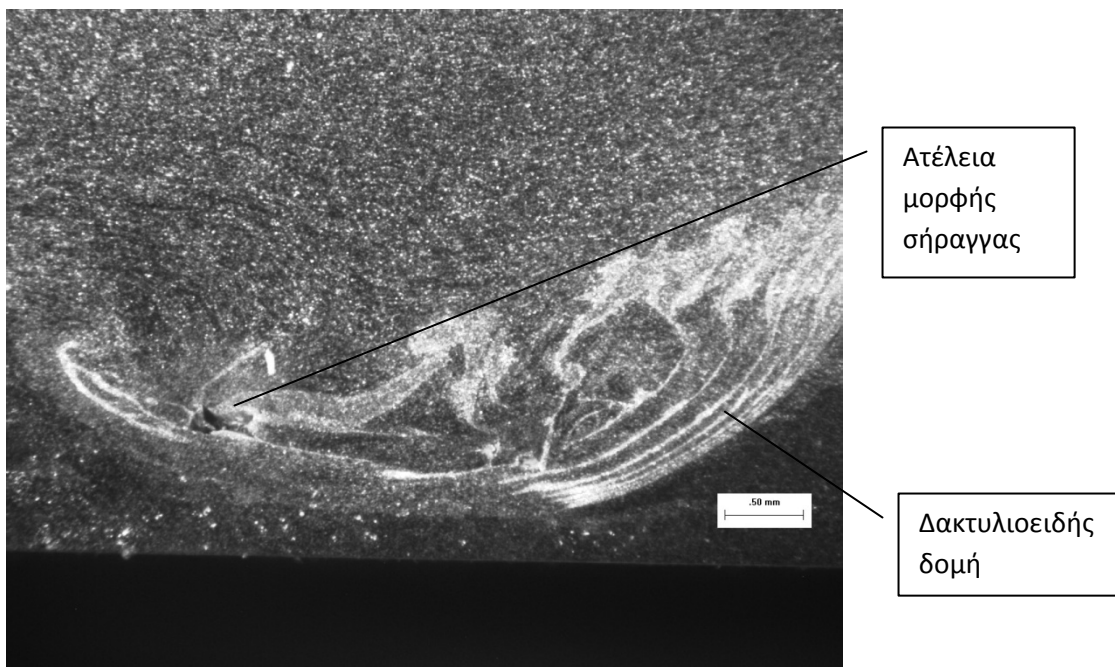
Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το χημικό αντιδραστήριο Poulton.

Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής επιδιώκεται η ανάπτυξη μεγαλύτερου ποσού θερμότητας, με σκοπό τη σωστότερη ανάδευση του υλικού.



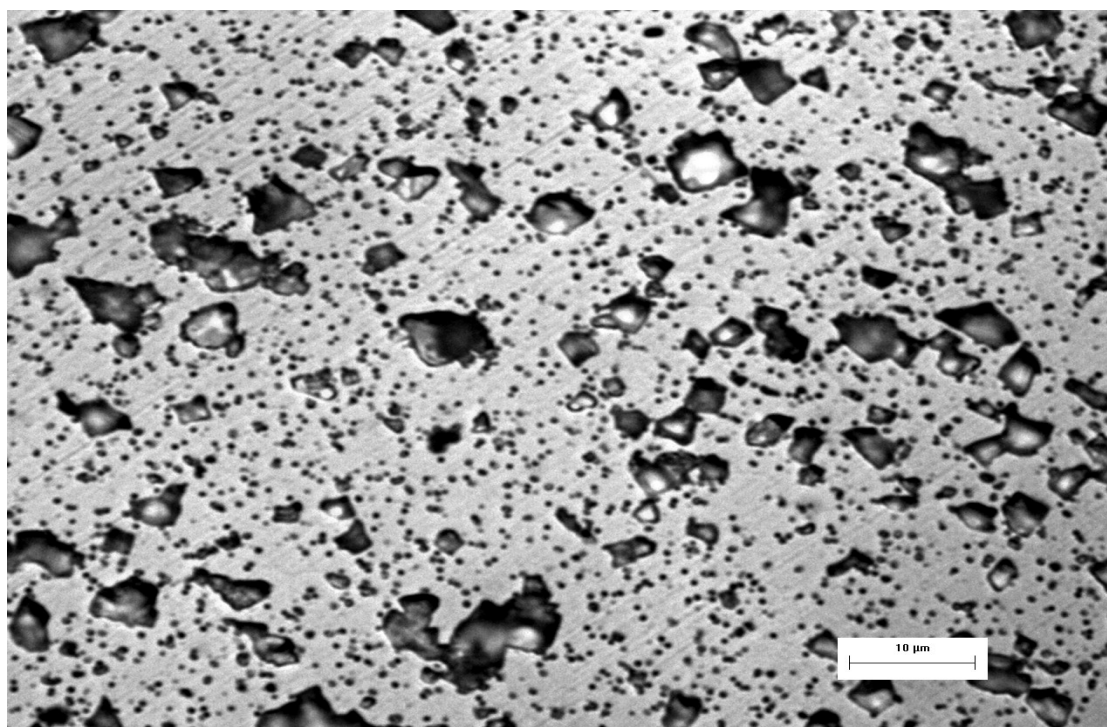
Εικόνα 6.38: Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

Οι εμφανιζόμενες ατέλειες συνεχίζουν να είναι σχετικά μεγάλου μεγέθους, έτσι οι συγκολλήσεις δεν είναι ποιοτικά αποδεκτές. Στην παρούσα δοκιμή παρατηρείται εμφάνιση της ατέλειας για πρώτη φορά στο κάτω αριστερά σημείο του πυρήνα συγκόλλησης (υποχωρούσα πλευρά).



Εικόνα 6.39: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών και της δακτυλιοειδούς δομής.

Επιπρόσθετα και εδώ είναι ευδιάκριτη η δακτυλιοειδής δομή. Οι δακτύλιοι προσανατολίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η κατάληξη του πάνω μέρους των να κατευθύνεται προς την προωθούμενη πλευρά.



Εικόνα 6.40: Μικροσκοπική παρατήρηση του πυρήνα συγκόλλησης (x1000).

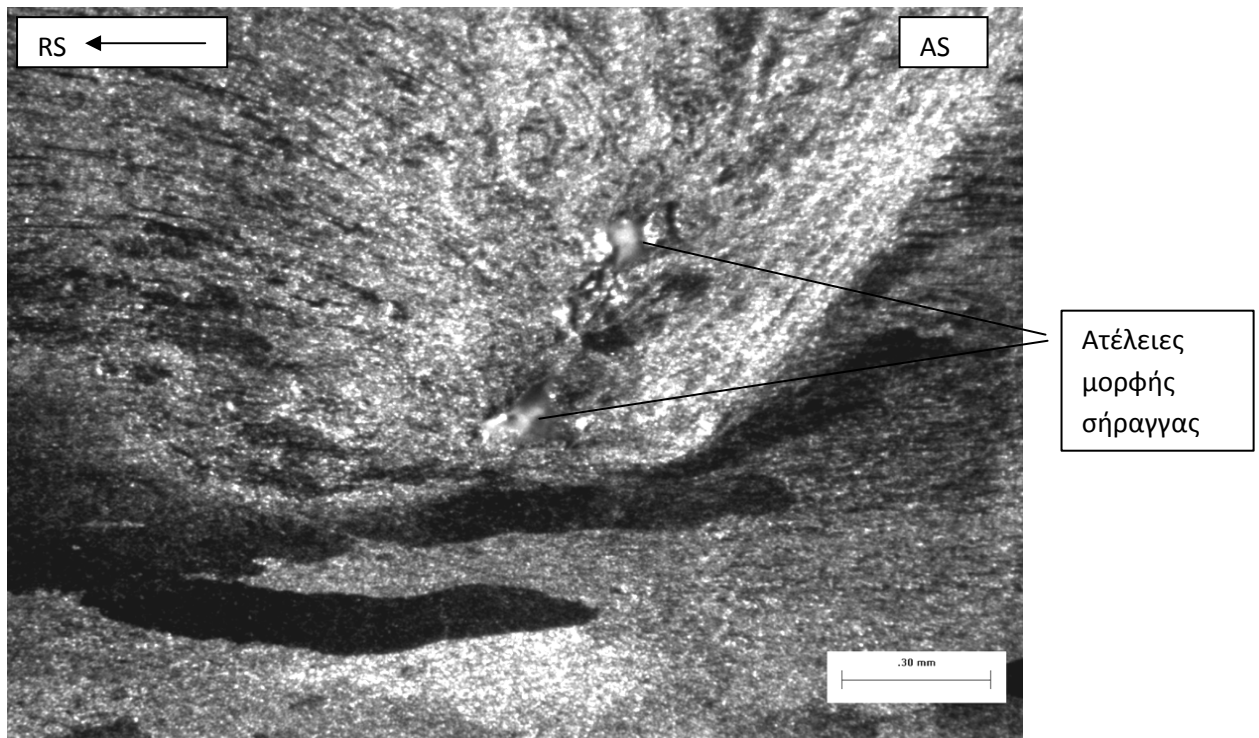
Η τρίτη συγκόλληση (αρ.4 βλ. πίνακα 6.2) πραγματοποιείται υπό τις ακόλουθες λειτουργικές παραμέτρους:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Εργαλείου
85 mm/sec	475 rpm	Κωνικός

Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το τροποποιημένο χημικό αντιδραστήριο Roulton.

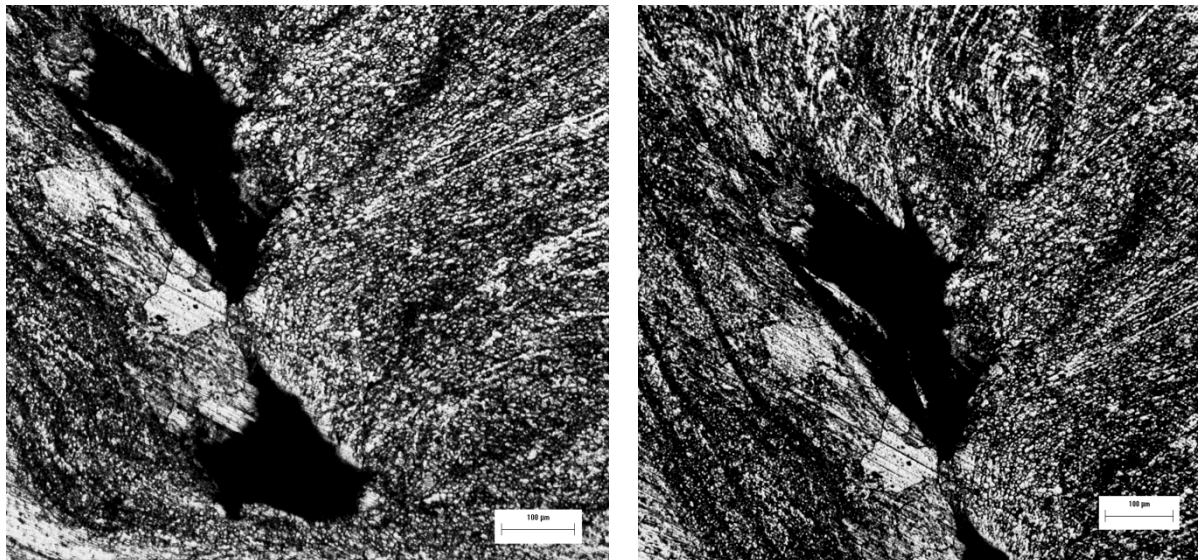
Παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και τη μείωση της ταχύτητας πρόωσης, μειώνονται αισθητά τα μεγέθη των ατελειών που εμφανίζονται στην παρούσα συγκόλληση.

Επιπρόσθετα πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η κάθετη δύναμη που ασκείται από το εργαλείο συγκόλλησης προς τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν. Όμως, η μηχανή FSW που χρησιμοποιήθηκε, δεν παρείχε τη δυνατότητα μέτρησης της κάθετης αυτής δύναμης. Η αύξηση ή μείωση αυτής γινόταν κατά προσέγγιση.



Εικόνα 6.41: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών.

Οι ατέλειες συνεχίζουν να εμφανίζονται στο κάτω δεξιά μέρος του πυρήνα συγκόλλησης, οπότε υπάρχει σύγκλιση με τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Στην εικόνα 6.41 οι ατέλειες παρατηρούνται στο ίδιο σημείο.



Εικόνα 6.42: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής και του μεγέθους των ατελειών τύπου σήραγγας.

Η μορφή και το μέγεθος των ατελειών, παρ' όλη τη μείωσή του σε σχέση με τις προηγούμενες συγκολλήσεις, δεν επιτρέπουν στην παρούσα συγκόλληση να θεωρηθεί ποιοτικά επαρκής.

Για την τέταρτη δοκιμή (αρ.5 βλ. πίνακα 6.2) επιλέχθηκαν οι παρακάτω λειτουργικές παράμετροι:

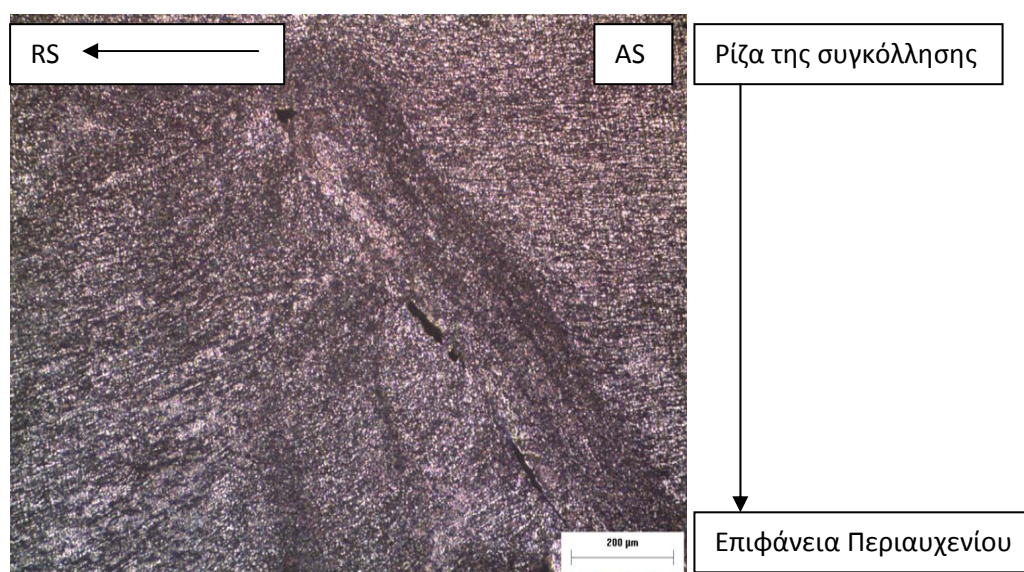
Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Κωνικός

Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το χημικό αντιδραστήριο Poulton.

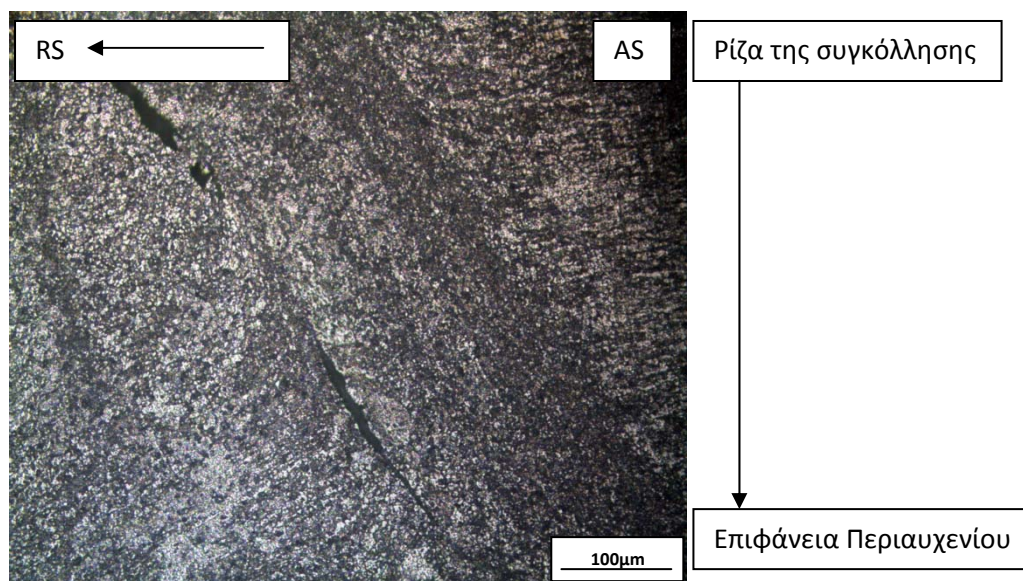
Οι προηγούμενες παρατηρήσεις περί ατελειών οδηγούν στο συμπέρασμα της περαιτέρω αύξησης της ταχύτητας περιστροφής. Επιπρόσθετα, για αυτή τη δοκιμή, δόθηκε στο εργαλείο συγκόλλησης κλίση 2°.

Η στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου, δεν αποκαλύπτει την ύπαρξη ατελειών. Συνεπώς, το επιλεγμένο ζεύγος λειτουργικών παραμέτρων σε σχέση βέβαια με τον τύπο του εργαλείου συγκόλλησης, παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία φαίνονται καλύτερα στη μικροσκοπική παρατήρηση.

Επίσης επιβεβαιώνεται η υπόθεση ότι, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί στην παροχή μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας. Η ανάδευση του υλικού γίνεται σωστότερα και έτσι μειώνεται σημαντικά το μέγεθος των ατελειών.



Εικόνα 6.43: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών της συγκόλλησης.



Εικόνα 6.44: Οι ατέλειες της συγκόλλησης υπό μεγέθυνση x200.

Στις παραπάνω μικρογραφίες φαίνεται ξεκάθαρα το μικρό μέγεθος των ατελειών. Στην προκειμένη περίπτωση, αφού το μέγεθός τους είναι τέτοιο που θα μπορούσε να τους δώσει τον χαρακτηρισμό 'επιτρεπτές', εξετάζεται το σχήμα τους. Όπως είναι γνωστό, οι έντονες γωνίες σε αντίθεση με τα στρογγυλεμένα άκρα, ευνοούν τη συγκέντρωση τάσεων. Η συγκέντρωση τάσεων, με τη σειρά της, οδηγεί στην αστοχία της συγκόλλησης. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι οι ατέλειες που εμφανίζονται εδώ δεν πληρούν αυτό το κριτήριο. Παρ' όλα αυτά το αποτέλεσμα που προέκυψε μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητικό αναφορικά με το μέγεθός τους (και όχι το σχήμα τους).

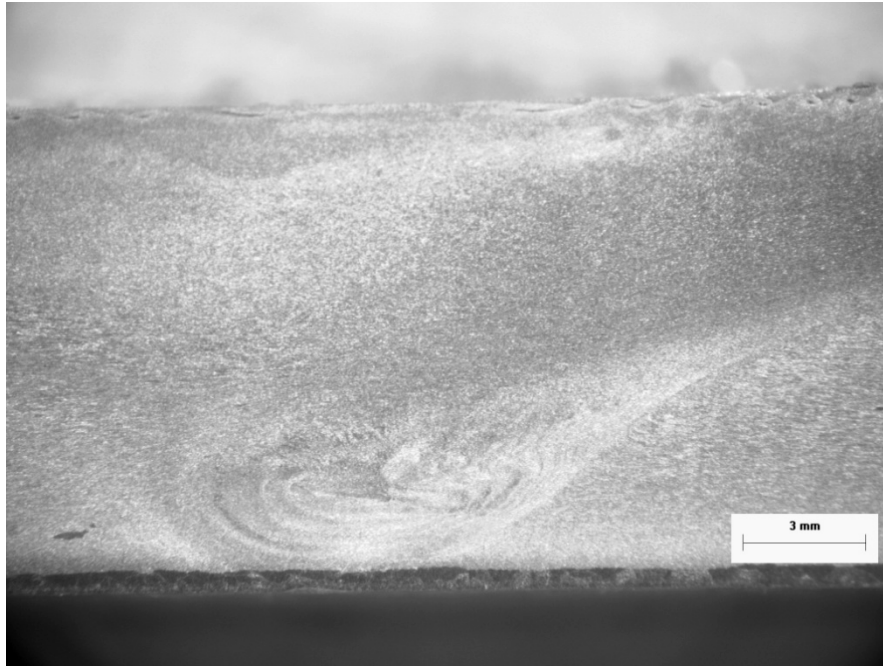
Η πέμπτη συγκόλληση (αρ.6 βλ. πίνακα 6.2) έγινε με τη χρήση λειτουργικών παραμέτρων οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	375 rpm	Με σπείρωμα

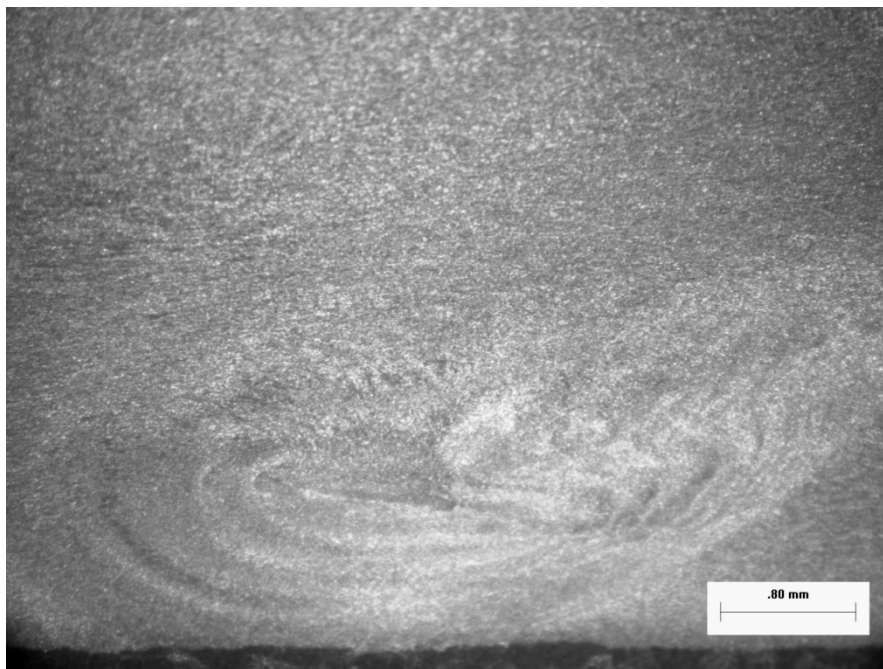
Επιπρόσθετα, στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 2° .

Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το χημικό αντιδραστήριο Barker.

Η συγκόλληση παρουσίασε ατέλεια εξαιρετικά μικρού μεγέθους η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ελάττωμα. Στις εικόνες 6.45 και 6.46 παρατηρείται μακροσκοπικά η τομή του δοκιμίου, όπου φαίνονται καθαρά τόσο η δακτυλιοειδής δομή όσο και ο διαχωρισμός του πυρήνα συγκόλλησης με τη ΘΜΕΖ της προωθούμενης πλευράς.

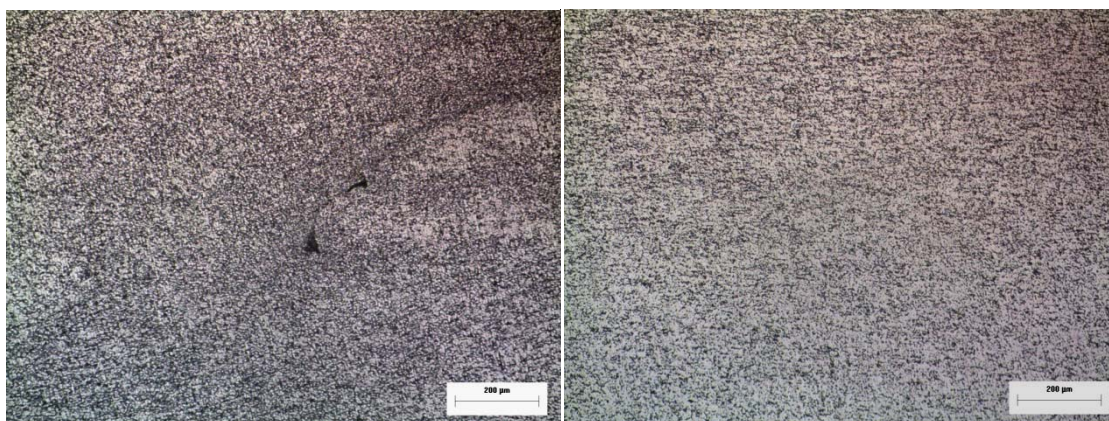


Εικόνα 6.45: Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.



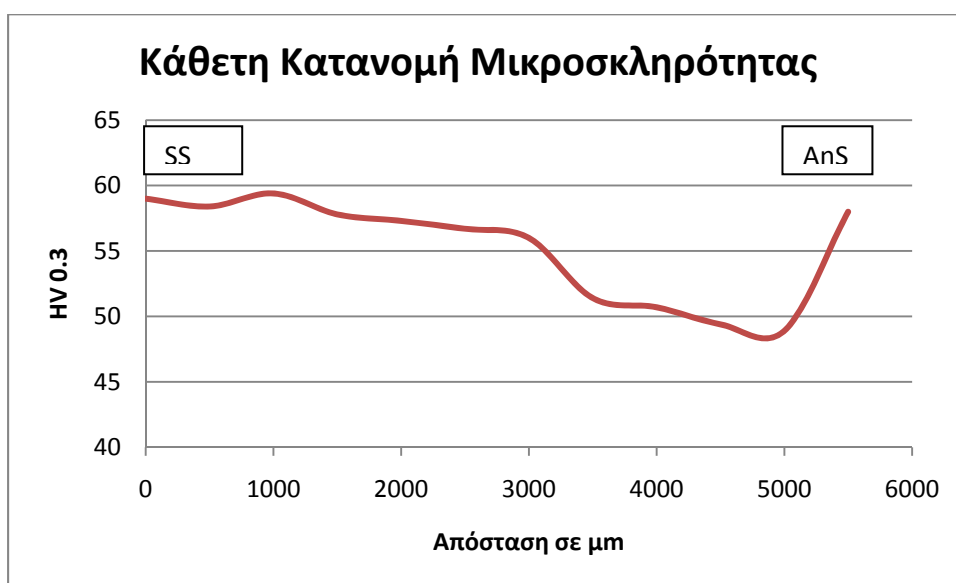
Εικόνα 6.46: Μακροσκοπική παρατήρηση της δακτυλιοειδούς δομής του πυρήνα συγκόλλησης.

Οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος τόσο από τους κόκκους του μητρικού υλικού, όσο και από τους κόκκους της θερμικά και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης, λόγω της δυναμικής ανακρυστάλλωσης.



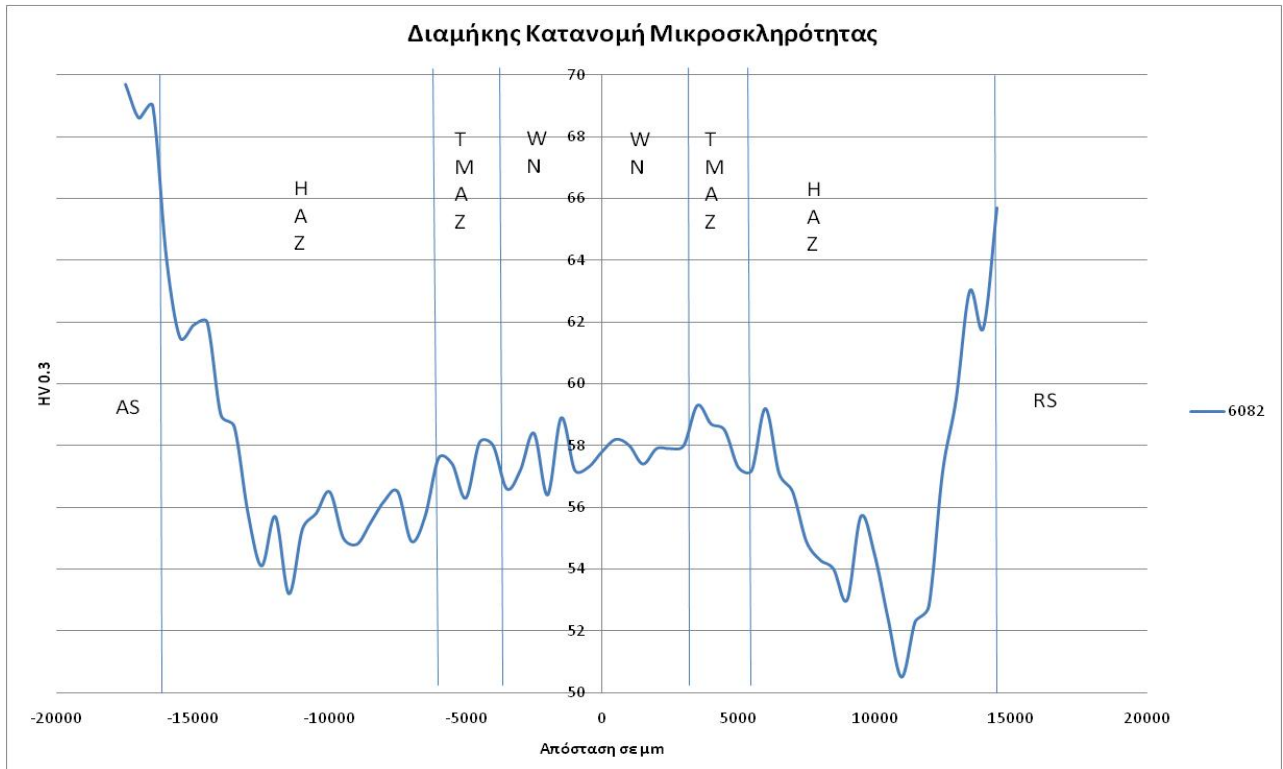
Εικόνα 6.47: Μικρογραφίες: (α) ελάττωμα στο κάτω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης, (β) άνω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης

Στο γράφημα 6.5 παρουσιάζεται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Παρατηρείται μικρή πτώση (σχεδόν αμελητέα) της μικροσκληρότητας με κατεύθυνση προς την επιφάνεια συγκράτησης. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερο ποσοστό των ελάχιστων κατακρημνισμάτων που σχηματίζονται στον πυρήνα συγκόλλησης, εμφανίζονται προς την επιφάνεια περιαιχενίου, ενώ μικρότερο ποσοστό εμφανίζεται προς την επιφάνεια συγκράτησης. Ο λόγος σχηματισμού μεγαλύτερου ποσοστού κατακρημνισμάτων στο άνω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης οφείλεται στο ότι στο μέρος αυτό αναπτύσσεται μεγαλύτερη θερμοκρασία και συνεπώς ο χρόνος απόψυξης στα σημεία αυτά είναι τόσο μεγαλύτερος ώστε να προλαβαίνουν να σχηματίζονται στο μέρος αυτό (κοντά στην SS) περισσότερα κατακρημνίσματα (από τα ελάχιστα που υπάρχουν στο WN) σε σχέση με τα σημεία προς την επιφάνεια συγκράτησης.



Γράφημα 6.5: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου (επιφάνεια περιαιχενίου- SS, επιφάνεια συγκράτησης- AnS).

Το επόμενο γράφημα παρουσιάζει τη διαμήκη κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Οι υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας παρατηρούνται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης ενώ οι χαμηλότερες τιμές της μικροσκληρότητας παρουσιάζονται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη της υποχωρούσας πλευράς.



Γράφημα 6.6: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

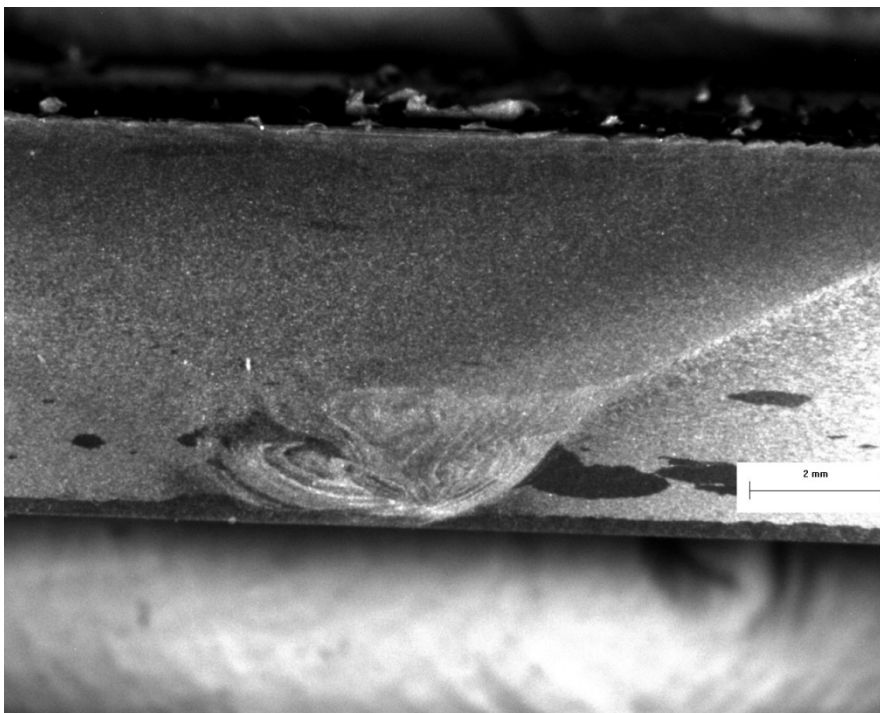
6.2.2 Μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων δοκιμίων του κράματος AA6082-T6

Η έκτη συγκόλληση (αρ.3 βλ. πίνακα 6.2) πραγματοποιήθηκε με χρήση των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων. Σε αυτήν την περίπτωση δεν έγινε πέρασμα σε πλάκα, αλλά συγκόλληση με τη μέθοδο δια τριβής με ανάδευση. Οι επιλεγμένες λειτουργικές παράμετροι παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Εργαλείου
85 mm/sec	375 rpm	Με σπείρωμα

Το δοκίμιο προσβλήθηκε με το χημικό αντιδραστήριο Poulton για τη στερεοσκοπική παρατήρηση και με το χημικό αντιδραστήριο Barker για τη μικροσκοπική παρατήρηση.

Το υπό μελέτη δοκίμιο δεν παρουσιάζει κανένος είδους ατέλεια. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η μακρογραφία του δοκιμίου, όπου διακρίνονται τόσο η δακτυλιοειδής δομή, όσο και ο διαχωρισμός μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Στη μακρογραφία 6.48 κάποιες μαύρες περιοχές που παρατηρούνται δεν είναι ατέλειες, αλλά πιθανώς δημιουργήθηκαν από τη χημική προσβολή.



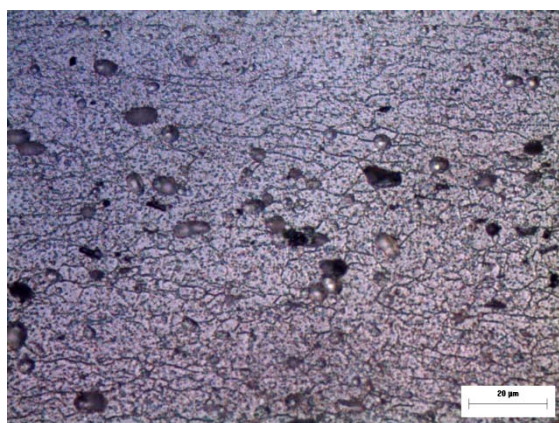
Εικόνα 6.48: Μακροσκοπική παρατήρηση της τομής του δοκιμίου.

Το μητρικό υλικό αποτελείται από μικρούς και σχετικά προσανατολισμένους κόκκους (εικόνα 6.49α).

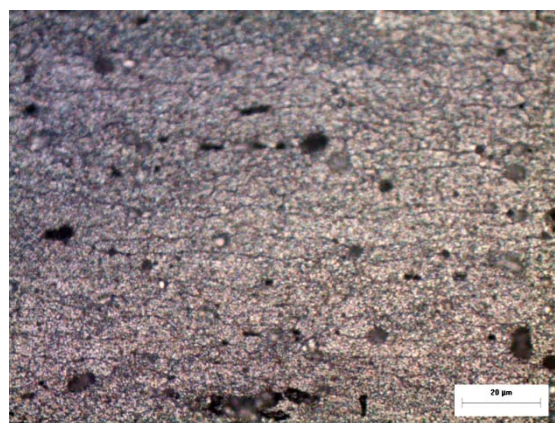
Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνα 6.49β). έχει κόκκους ελαφρά μεγεθυμένους σε σχέση με το μητρικό υλικό εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας.

Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνα 6.49γ). έχει προσανατολισμένους κόκκους με ελαφρώς μικρότερο μέγεθος από εκείνους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, λόγω της υφιστάμενης δυναμικής αποκατάστασης.

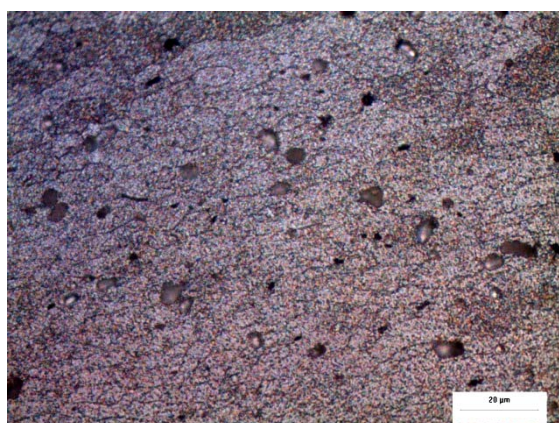
Ακόμη παρατηρείται ότι οι κόκκοι της ΘΜΕΖ είναι λίγο μεγαλύτεροι από αυτούς του πυρήνα συγκόλλησης (εικόνα 6.49δ), ο οποίος αποτελείται από ισοαξονικούς και χωρίς συγκεκριμένο προσανατολισμό και εξαιρετικά μικρού μεγέθους κόκκους



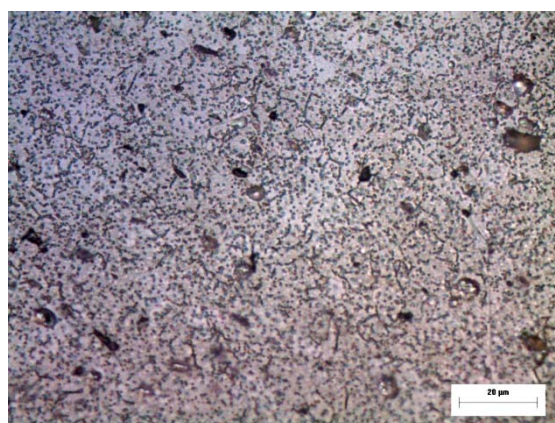
(α)



(β)



(γ)

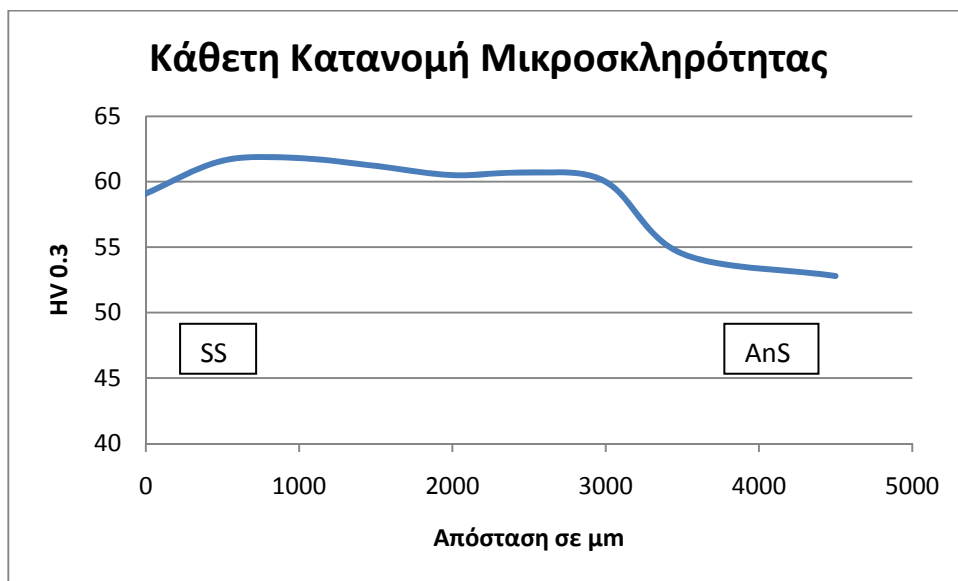


(δ)

Εικόνα 6.49: Μικροσκοπική παρατήρηση των κόκκων του: (α) μητρικού υλικού, (β) της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, (γ) της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και (δ) του πυρήνα συγκόλλησης.

6.2.3 Κατανομή μικροσκληρότητας των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων του κράματος AA6082-T6

Στο γράφημα 6.7 παρουσιάζεται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας σε τομή του συγκολλημένου δοκιμίου. Καθώς προχωράμε προς την επιφάνεια συγκράτησης παρατηρείται μικρή μείωση στην τιμή της μικροσκληρότητας του πυρήνα συγκόλλησης (βλέπε δικαιολόγηση στη σ.106).



Γράφημα 6.7: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας.

Στο επόμενο γράφημα (γράφημα 6.8) παρουσιάζεται η διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Σε όλες τις ζώνες παρατηρείται πτώση της μικροσκληρότητας σε σχέση με το μητρικό υλικό. Οι υψηλές τιμές μικροσκληρότητας του μητρικού μετάλλου οφείλονται στην ύπαρξη κατακρημνισμάτων τύπου Mg_2Si . Με την άνοδο της θερμοκρασίας στις ζώνες της συγκόλλησης, το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των κατακρημνισμάτων διαλυτοποιείται κι έτσι παρατηρείται μεγάλη πτώση στις τιμές της μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Η μερική ανάκαμψη της μικροσκληρότητας του πυρήνα συγκόλλησης οφείλεται στο μικρό μέγεθος των κόκκων του. Οι χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας φαίνεται ότι υπάρχουν στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες της συγκόλλησης.

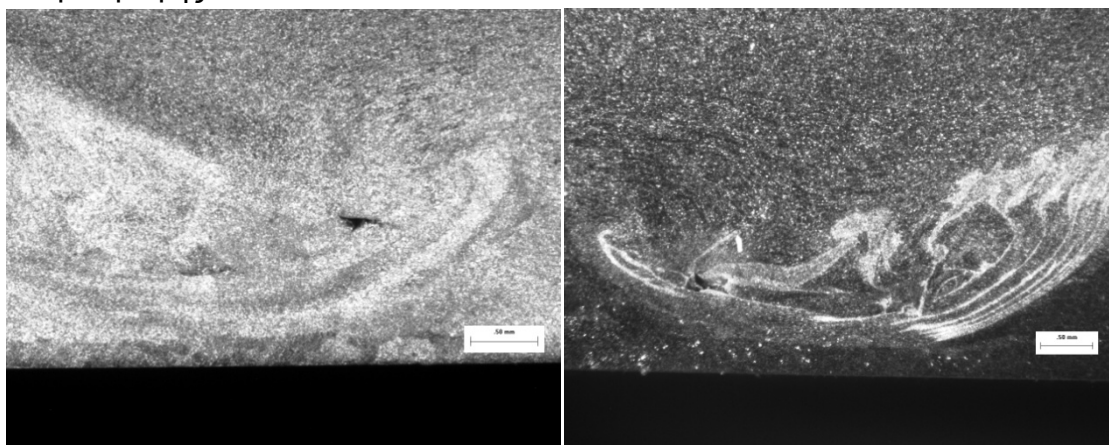


Γράφημα 6.8: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

6.2.4 Επίδραση των παραμέτρων στις συγκολλήσεις

- Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

Η σύγκριση των μακρογραφιών των ραφών συγκολλήσεων αρ.1 και αρ.2 (βλ. πίνακα 6.2) (εικόνα 6.50), αποδεικνύει ότι η υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε μεγαλύτερη θερμική παροχή, άρα και σε ικανοποιητικότερα αποτελέσματα, σχετικά με το μέγεθος των δημιουργούμενων ατελειών. Άρα, είναι εμφανής η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής.



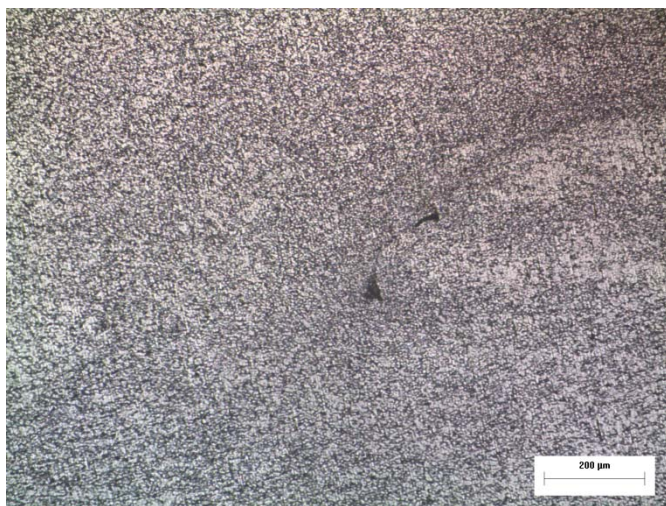
(α)

(β)

Εικόνα 6.50: Μακρογραφίες των ραφών συγκόλλησης (α) αρ.1 και (β) αρ.2 (βλ. πίνακα 6.2).

- Επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης

Αν και η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης βοηθά τόσο στη σωστότερη μεταφορά του αναδευόμενου υλικού από το μπροστά στο πίσω μέρος του πείρου συγκόλλησης, όσο και στη συγκράτηση του υλικού γύρω από τον πείρο συγκόλλησης [10], η συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα για τις συγκολλήσεις που έγιναν χωρίς κλίση του εργαλείου συγκόλλησης. Η μικρογραφία 6.51 του πυρήνα συγκόλλησης της συγκόλλησης αρ.3 (βλ. πίνακα 6.2) δείχνει ότι παρουσιάστηκαν ατέλειες πολύ μικρού μεγέθους (ελαττώματα), σε αντίθεση με τη συγκόλληση αρ.6 που δεν παρουσίασε καμιά ατέλεια. Επομένως, η εφαρμογή κλίσης σε συνδυασμό με τις κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης επιδρά στην ποιότητα της συγκόλλησης και όχι από μόνη της.



Εικόνα 6.51: Ατέλειες (ελαττώματα) της συγκόλλησης αρ.6 (βλ. πίνακα 6.2).

6.3 Προκαταρκτική μελέτη συγκόλλησης ετεροειδών κραμάτων AA5083-H111 - AA6082-T6

Πραγματοποιήθηκε μικρός αριθμός πειραμάτων ετεροειδών συγκολλήσεων σε πλάκες πάχους 6mm, των κραμάτων αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6. Η συγκόλληση που παρουσίασε το καλύτερο αποτέλεσμα από την άποψη του μεγέθους των παρουσιαζόμενων ατελειών, πραγματοποιήθηκε τοποθετώντας τη ραφή κάθετα στην έλαση του κράματος AA5083-H111 και παράλληλα στην έλαση του κράματος AA6082-T6. Ως λειτουργικές παράμετροι, επιλέχθηκαν εκείνες που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στις ομοειδείς συγκολλήσεις του κράματος AA5083-H111, όσο και στις ομοειδείς συγκολλήσεις του κράματος AA6082-T6, με τη διαφορά της παραμέτρου 'κλίση εργαλείου'.

Οι λειτουργικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Προς συγκόλληση κράμα	Ταχύτητα Περιστροφής	Ταχύτητα Πρόωσης	Τύπος Πείρου	Κλίση Εργαλείου
AA5083-AA6082	600 rpm	85mm/min	Κωνικός	3°
AA5083 (βέλτιστες)	600 rpm	85mm/min	Κωνικός	2°
AA6082 (ικανοποιητικές)	600 rpm	85mm/min	Κωνικός	2°

Στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 3°, λόγω του ότι όταν πραγματοποιήθηκε συγκόλληση με τις ίδιες συνθήκες χωρίς κλίση και με κλίση 2° εμφανίστηκαν ατέλειες μεγαλύτερου μεγέθους.

Δεδομένου ότι η σκληρότητα μεταξύ των δύο κραμάτων έχει μικρή διαφορά, στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης τοποθετήθηκε το κράμα αλουμινίου 6082-T6, ενώ στην υποχωρούσα πλευρά τοποθετήθηκε το κράμα αλουμινίου 5083-H111.

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν παρουσίασαν ατέλειες. Αιτία της εμφάνισης των ατελειών ήταν τα παρακάτω προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης.

- 1) Μη επαρκή μέσα συγκράτησης των δοκιμίων με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του ενός από το άλλο κατά την συγκόλληση.
- 2) Μεγάλη καμπυλότητα των πλάκων του κράματος AA5083-H111 με αποτέλεσμα τη μη πλήρη παραλληλία των προς συγκόλληση πλακών.

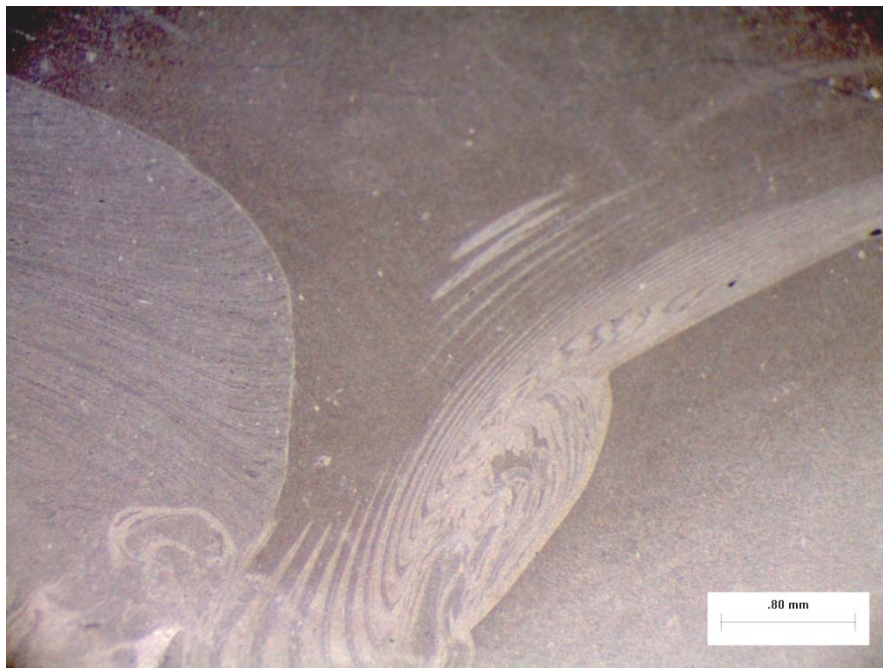
Κατά τη μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων παρατηρούνται οι μεγάλης έκτασης ατέλειες και φαίνεται καθαρά η ζώνη μετάβασης από το ένα

κράμα στο άλλο, στον πυρήνα συγκόλλησης. Επίσης, είναι ευκρινής η δακτυλιοειδής δομή, καθώς και η ανάμιξη των δυο κραμάτων.



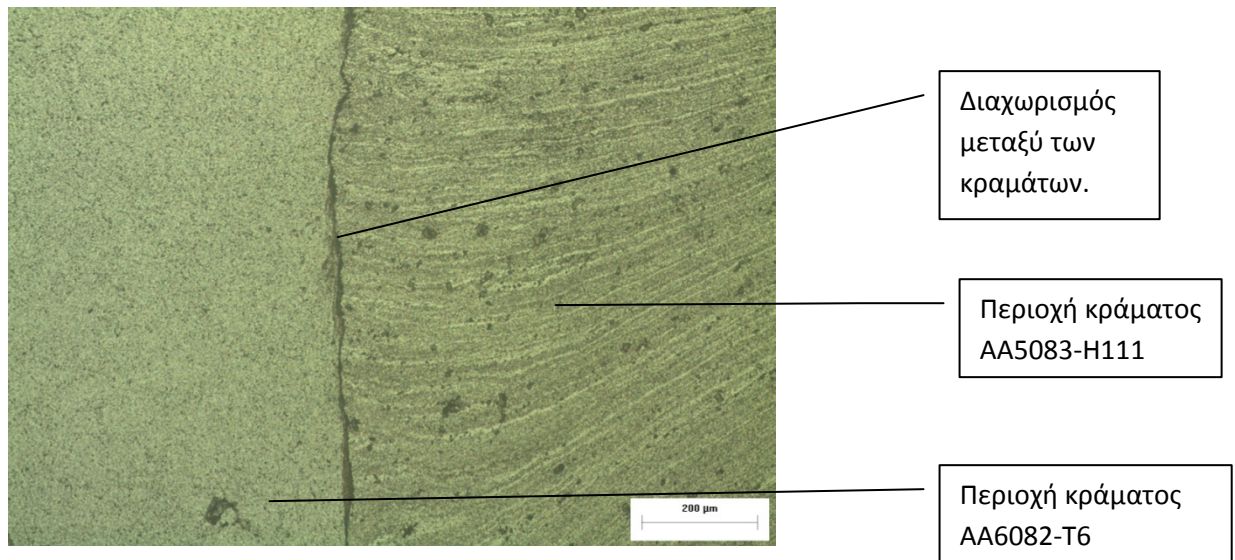
Εικόνα 6.52: Μακροσκοπική παρατήρηση της τομής του δοκιμίου.

Η δακτυλιοειδής δομή (εικόνες 6.52, 6.53) αποτελείται από εναλλασσόμενους δακτύλιους και των δυο κραμάτων και εμφανίζεται κυρίως στο δεξιό άκρο του πυρήνα συγκόλλησης, αλλά και γύρω από τις ατέλειες.



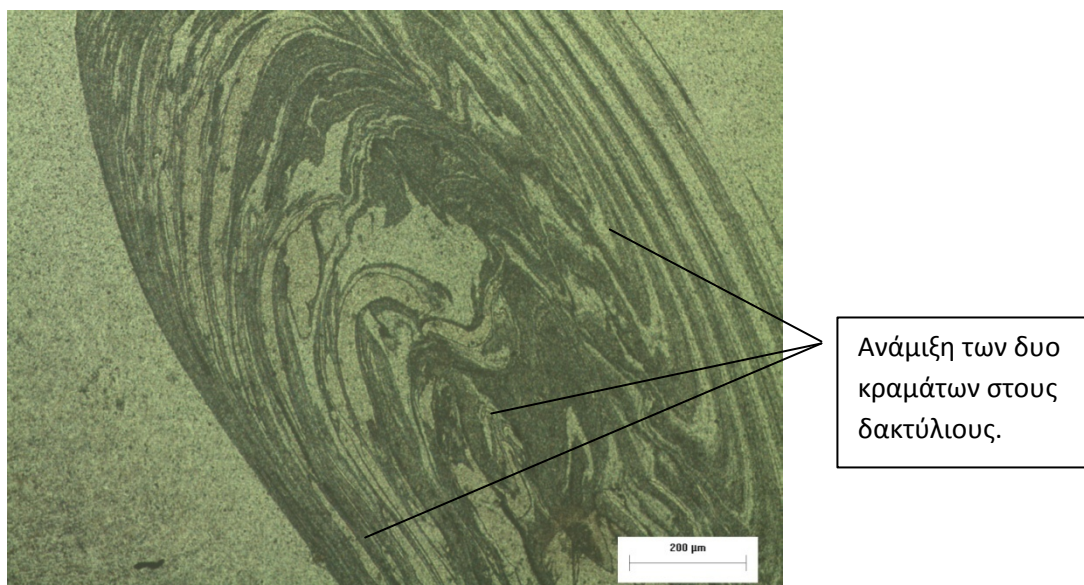
Εικόνα 6.53: Μακροσκοπική παρατήρηση της δακτυλιοειδούς δομής του πυρήνα συγκόλλησης.

Η μικροσκοπική παρατήρηση δείχνει με μεγάλη ευκρίνεια το διαχωρισμό μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου στον πυρήνα της ετεροειδούς συγκόλλησης. Στην ακόλουθη εικόνα στα δεξιά βρίσκεται το κράμα AA5083-H111 ενώ στα αριστερά βρίσκεται το κράμα AA6082-T6.



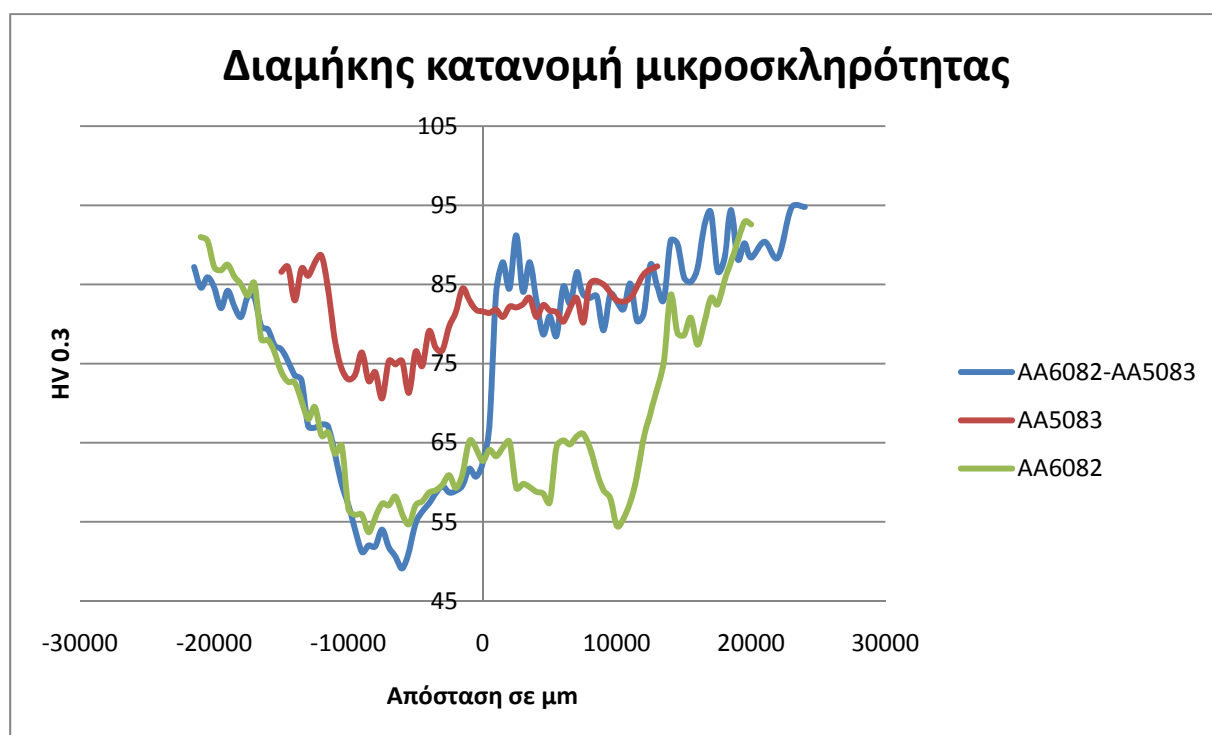
Εικόνα 6.54: Μικροσκοπική παρατήρηση του διαχωρισμού των κραμάτων αλουμινίου.

Ο σχηματισμός των δακτυλίων της δακτυλιοειδούς δομής, πραγματοποιείται έτσι ώστε το άνω τμήμα τους να κατευθύνεται προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Γίνεται εμφανές ότι οι δακτύλιοι δημιουργούνται από την ανάδευση και των δυο κραμάτων χωρίς να υπερισχύει κάποιο έναντι του άλλου.



Εικόνα 6.55: Μικροσκοπική παρατήρηση της δακτυλιοειδούς δομής.

Η κατανομή της μικροσκληρότητας της ετεροειδούς συγκόλλησης, δείχνει μεγάλες διαφορές στις τιμές των μικροσκληροτήτων του πυρήνα συγκόλλησης. Η προωθούμενη πλευρά του πυρήνα συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από μεγάλη πτώση της μικροσκληρότητας, αφού εκεί βρίσκεται το κράμα AA6082-T6 που είναι αρκετά μαλακότερο του κράματος AA5083-H111. Η υποχωρούσα πλευρά του πυρήνα συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές μικροσκληρότητας λόγω των μικρών κόκκων του κράματος AA5083-H111. Επιπρόσθετα, παρατηρείται η διαφορά στην έκταση των δημιουργούμενων ζωνών (ΘΕΖ, ΘΜΕΖ) αφού η αναπτυσσόμενη θερμότητα επηρεάζει διαφορετικά το κάθε υλικό.



Γράφημα 6.9 : Οριζόντια κατανομή μικροσκληρότητας των συγκολλημένων δοκιμίων.

Τέλος, γίνεται εμφανές ότι οι τιμές μικροσκληρότητας του δοκιμίου της ετεροειδούς συγκόλλησης, συγκλίνουν με τις τιμές μικροσκληρότητας των αντίστοιχων ομοειδών συγκολλήσεων, στα αντίστοιχα τμήματα, όπως παρατηρείται στο γράφημα 6.9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7 Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε μελέτη συγκολλησιμότητας των ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου 5083-H111 και 6082-T6 με την τεχνική της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση από όπου προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η πειραματική διερεύνηση των συνθηκών συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, του ναυπηγικού κράματος αλουμινίου 5083-H111, αποκάλυψε ότι το βέλτιστο ποιοτικό αποτέλεσμα συγκόλλησης προέκυψε από την κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου, φέρουσα κωνικό πείρο, με ταχύτητες 85mm/min – 600rpm και κλίση του εργαλείου συγκόλλησης 2°.
- Η πειραματική διερεύνηση των συνθηκών συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, του ναυπηγικού κράματος αλουμινίου 6082-T6, αποκάλυψε ότι το βέλτιστο ποιοτικό αποτέλεσμα συγκόλλησης προέκυψε από την κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου, φέρουσα πείρο με σπείρωμα και εγκοπές, με ταχύτητες 85mm/min – 375rpm.
- Η προκαταρκτική μελέτη των συνθηκών ετεροειδούς συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση των κραμάτων AA5083-H111 και AA6082-T6, αποκάλυψε ότι το ικανοποιητικότερο αποτέλεσμα συγκόλλησης προέκυψε από την κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου, φέρουσα κωνικό πείρο, με ταχύτητες 85mm/min – 600rpm και κλίση του εργαλείου συγκόλλησης 3°.
- Οι υπόλοιποι συνδυασμοί παραμέτρων, δημιούργησαν ατέλειες που εμφανίστηκαν κυρίως στο κάτω δεξί μέρος του πυρήνα συγκόλλησης προς την προωθούμενη πλευρά. Ο τύπος ατέλειας που εμφανίστηκε στα περισσότερα δοκίμια, ήταν η ασυνέχεια μορφής σήραγγας (tunnel defect), που εκτεινόταν στο μεγαλύτερο μέρος του μήκους της ραφής.
- Ο διαχωρισμός του πυρήνα συγκόλλησης από τη θερμομηχανικά και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, στην υποχωρούσα πλευρά, δεν είναι πάντα εφικτός εξαιτίας της μη ύπαρξης σαφούς ορίου.
- Η δακτυλιοειδής δομή εμφανίζεται ευκρινέστατα όταν χρησιμοποιείται το εργαλείο συγκόλλησης με επίπεδο περιαιχένιο και πείρο που φέρει

σπείρωμα και εγκοπές. Οι δακτύλιοι προσανατολίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η κατάληξη του πάνω μέρους των να κατευθύνεται προς την προωθούμενη πλευρά.

- Πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρομετρήσεις εγκάρσια και κατά μήκος της τομής των δοκιμίων συγκόλλησης. Στην περίπτωση της συγκόλλησης του κράματος AA5083-H111, ο πυρήνας συγκόλλησης παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σκληρότητας στο κάτω μέρος του από ότι στο άνω, λόγω του μικρότερου μεγέθους των κόκκων. Επιπρόσθετα, ο πυρήνας συγκόλλησης παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σκληρότητας από το βασικό μέταλλο λόγω της δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Τέλος, οι χαμηλότερες τιμές σκληρότητας παρατηρούνται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη λόγω του αυξημένου μεγέθους των κόκκων.
- Στην περίπτωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA6082-T6, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των τιμών σκληρότητας του βασικού μετάλλου και των ζωνών της συγκόλλησης, εξαιτίας της διαλυτοποίησης των κατακρημνισμάτων του, λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας. Επίσης, παρατηρείται μικρή άνοδος στις τιμές της μικροσκληρότητας του πυρήνα συγκόλλησης, που οφείλεται στο μικρό μέγεθος των κόκκων του. Τέλος, οι χαμηλότερες τιμές μικροσκληρότητας εμφανίζονται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη της συγκόλλησης.
- Από τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων συγκόλλησης στην ποιότητα της ραφής προκύπτει ότι η ταχύτητα περιστροφής, η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης και η γεωμετρία του πείρου επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα της ραφής.
- Από τη μελέτη της επίδρασης των ομόροπων πολλαπλών περασμάτων που εφαρμόστηκαν στο κράμα AA5083-H111, συμπεραίνεται ότι με κάθε επιπλέον πέρασμα υπάρχει σημαντική μείωση στο μέγεθος των παρατηρούμενων ατελειών, αλλά μικρή επίδραση τόσο στη μικροδομή των ζωνών συγκόλλησης και στα μεγέθη των κόκκων τους, όσο και στις τιμές μικροσκληρότητας.
- Στην περίπτωση της ετεροειδούς συγκόλλησης των κραμάτων AA6082-T6 και AA5083-H111, παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις τιμές των μικροσκληροτήτων του πυρήνα συγκόλλησης, αλλά και των υπόλοιπων

ζωνών, λόγω της ύπαρξης των δύο διαφορετικών υλικών. Επίσης, παρατηρήθηκε διαφορά στην έκταση των δημιουργούμενων ζωνών (ΘΕΖ, ΘΜΕΖ) της ετεροειδούς συγκόλλησης των κραμάτων AA6082-T6 και AA5083-H111, αφού η αναπτυσσόμενη θερμότητα επηρεάζει διαφορετικά το κάθε υλικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π. Σαράφογλου, ‘Μελέτη συγκολλησιμότητας ναυπηγικού κράματος ΑΙ5083 με την τεχνική συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης’, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2009.
- [2] Β.Ι. Παπάζογλου, ‘Ναυπηγική τεχνολογία (Πανεπιστημιακές σημειώσεις)’, ΕΜΠ, 1995.
- [3] The Welding Institute - <http://www.twi.co.uk>
- [4] Friction Stir Link Inc. - <http://www.frictionstirlink.com>
- [5] R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, ‘Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties’, *Progress in Materials Science* 53 (2008) 980-1023.
- [6] M. Guerra, C. Schmidt, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes, “Flow patterns during friction stir welding”, *Materials Characterization*, vol. 49 no. 2, Pages 95-101, Sept. 2002.
- [7] K. Elangovan, V. Balasubramanian, “Influences of tool pin profile and welding speed on formation of friction stir processing zone in AA 2219”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 200, no. 1-3, pp. 163-175, May 2008.
- [8] S.K. Chionopoulos, D.I. Pantelis, V.J. Papazoglou, N. Daniolos, ‘Influence of process variables and tool’s design on friction stir welding (FSW) of marine aluminum alloys’, 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. Of Mediterranean IMAM 2009, İstanbul, Turkey, 12-15 Oct. 2009.
- [9] J. Defalco, “Friction Stir Welding Vs. Fusion Welding”, *Welding Journal* vol. 85 no. 3 pp. 42-44, Mar 2006.
- [10] R.S. Mishraa, Z.Y. Mab, ‘Friction stir welding and processing’, *Materials Science and Engineering R*, vol. 50, no. pp. 1–78, 2005.
- [11] P. Cavaliere , A. De Santis , F. Panella , A. Squillace , ‘Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082–AA2024 joints produced by friction stir welding’, *Materials and Design* vol. 30 (2009), pages 609–616.
- [12] J.-Q. Su , T.W. Nelson , R. Mishra , M. Mahoney, ‘Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium’, *Acta Materialia* vol. 51 (2003) pages 713–729.
- [13] P.M.G.P. Moreira , T. Santos , S.M.O. Tavares , V. Richter-Trummer , P. Vilaça , P.M.S.T. de Castro, ‘Mechanical and metallurgical

characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials and Design* vol. 30 (2009) pages 180–187.

[14] G. Liu, L. E. Murr, C-S. Niou, J. C. McClure, F. R. Vega, **“Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum”**, *Scripta Materialia*, vol.37, no. 3, pp. 355-361, Aug. 1997.

[15] Κακάρογλου Αλέξανδρος, **‘Συγκόλληση τριβής με ανάδευση σε κράμα αλουμινίου 5083-H111 με απόθεση πολλαπλών περασμάτων’**, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ: Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, Αθήνα 2009.

[16] Y.G. Kim, H. Fujii , T. Tsumura , T. Komazaki , K. Nakata , **‘Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy’**, *Materials Science and Engineering A* 415 (2006) pages 250–254.

[17] Hua-Bin Chen, Keng Yan , Tao Lin , Shan-Ben Chen, Cheng-Yu Jiang , Yong Zhao, **‘The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds’**, *Materials Science and Engineering A* 433 (2006) pages 64–69.

[18] J. Defalco, **“Friction Stir Welding Vs. Fusion Welding”**, *Welding Journal* vol. 85 no. 3 pp. 42-44, Mar 2006.

[19] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, **‘Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών’**, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.

[20] Wikipedia – <http://el.wikipedia.org/wiki/Αλουμίνιο>

[21] ASM international, **“Aluminum and Aluminum Alloys”**, ASM handbook Desk edition.

[22] A. Scialpi , L.A.C. De Filippis a, P. Cavaliere , **‘Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy’**, *Materials and Design* 28 (2007) 1124–1129.

[23] S.T. Amancio-Filho, S. Sheikha, J.F. dos Santosa, C. Bolfarini, **‘Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4’**, *Journal of Materials Processing Technology* (2008).

[24] P. Cavaliere , A. De Santis , F. Panella , A. Squillace , **‘Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA6082–AA2024 joints produced by friction stir welding’**, *Materials and Design* 30 (2009) 609–616.

[25] A. Scialpi, M. De Giorgi, L.A.C. De Filippis, R. Nobile , F.W. Panella, **‘Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials’**, *Materials and Design* 29 (2008) 928–936.

- [26] Saad Ahmed Khodir, Toshiya Shibayanagi, '**Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys**', *Materials Science and Engineering B* 148 (2008) 82–87.
- [27] P. Cavaliere, F. Panella, '**Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding**', *Journal of Materials Processing Technology* 206 (2008) 249–255.
- [28] P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella, A. Squillace, '**Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding**', *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 588–594.
- [29] C. Leitao, R.M. Leal , D.M. Rodrigues, A. Loureiro, P. Vilac, '**Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds**', *Materials and Design* 30 (2009) 101–108.
- [30] P.M.G.P. Moreira, T. Santos, S.M.O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P.M.S.T. de Castro, '**Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6**', *Materials and Design* 30 (2009) 180–187.
- [31] Won-Bae Lee, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung, '**The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials**', *Scripta Materialia* 49 (2003) 423–428.
- [32] W. Gan, K. Okamoto, S. Hirano, K. Chung, C. Kim, R. H. Wagoner, '**Properties of Friction-Stir Welded Aluminum Alloys 6111 and 5083**', *Journal of Engineering Materials and Technology* JULY 2008, Vol. 130.
- [33] P. Bala Srinivasan, W. Dietzel, R. Zettler, J. Dos Santos and V. Sivan, '**Stress cracking behaviour of dissimilar friction stir weldment in chloride solution: dissolution assisted or hydrogen induced?**', *Corrosion Engineering, Science and Technology* 2006 VOL 41.