

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ
ΑΝΑΔΕΥΣΗ»**

ΣΩΚΟΥ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής : **Δ.Ι. Παντελής**

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	7
1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	7
1.2 Βασικές Τεχνικές Συγκόλλησης Μετάλλων	8
1.2.1 Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (G.T.A.W)...	8
1.2.2 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (G.M.A.W).....	10
1.2.3 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (P.A.W).....	12
1.2.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (E.B.W).....	14
1.2.5 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (L.B.W).....	15
1.3 Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (F.S.W).....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Αρχή της μεθόδου.....	18
2.3 Παράμετροι της F.S.W.....	19
2.4 Συγκολλησιμες Γεωμετρίες.....	20
2.5 Ζώνες Συγκόλλησης.....	21
2.6 Ροή Υλικού.....	23
2.7 Συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων.....	24
2.8 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδου.....	24
2.9 Εφαρμογές συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ.....	27
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	27
3.2 Ιδιότητες Αλουμινίου.....	27
3.3 Εφαρμογές Αλουμινίου.....	28
3.4 Τα Κράματα του Αλουμινίου.....	29
3.4.1 Κράματα Διαμόρφωσης του Αλουμινίου.....	31
3.4.2 Κράματα Χύτευσης του Αλουμινίου.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΡΟΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ).....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	48
5.1 Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός.....	48
5.1.1 Εξοπλισμός Συγκόλλησης.....	48

5.1.2 Κοπή Δοκιμίων.....	50
5.1.3 Λείανση – Στίλβωση.....	50
5.1.4 Χημική Προσβολή.....	51
5.1.5 Εξοπλισμός Μακροσκοπικής Παρατήρησης.....	52
5.1.6 Εξοπλισμός Μικροσκοπικής Παρατήρησης.....	52
5.1.7 Εξοπλισμός Μικροσκληρομετρήσεων.....	53
5.2 Χρησιμοποιηθέν Υλικό.....	54
5.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	59
6.1 Μεταλλογραφική Παρατήρηση και Κατανομή Μικροσκληρότητας.....	59
6.1.1 Μεταλλογραφική Παρατήρηση.....	59
6.1.2 Κατανομή Μικροσκληρότητας.....	61
6.2 Παρατήρηση της Ροής του Υλικού κατά τη FSW.....	62
6.3 Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων συγκόλλησης στη ροή του υλικού.....	90
6.3.1 Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στη ροή του υλικού.....	90
6.3.2 Επίδραση της γεωμετρίας του πείρου στη ροή του υλικού.....	92
6.3.3 Επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης και της ταχύτητας περιστροφής στη ροή του υλικού	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΥΛΙΚΟΥ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ FSW.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	115

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της εργασίας είναι η μελέτη της ροής του υλικού κατά τη διαδικασία της Συγκόλλησης δια Τριβής με Ανάδευση.

Πρόκειται για μια νέα σχετικά τεχνική συγκόλλησης όπου στα δύο προς συγκόλληση τεμάχια αναπτύσσεται θερμότητα μέσω τριβής, με ταυτόχρονη μηχανική παραμόρφωση. Η παρακάτω έρευνα εστιάζει στη ροή του υλικού κατά την εφαρμογή της σε κράματα αλουμινίου.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, χρειάστηκε η συμβολή ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους ευχαριστώ θερμά. Καταρχάς ευχαριστώ τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Παντελή, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, ο οποίος είχε τη γενική εποπτεία της εργασίας και μου παρείχε όλες τις απαραίτητες τεχνικές γνώσεις. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Νικόλαο Δανιόλο, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, χάρη στον οποίο είχα πρόσβαση σε όλο τον απαιτούμενο για την εργασία εξοπλισμό και ο οποίος με βοήθησε στη συγγραφή και επιμέλεια της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (F.S.W), ως μία καινοτομική «στερεάς κατάστασης» μέθοδος συγκόλλησης, θεωρείται μία από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους συγκόλλησης της τελευταίας δεκαετίας. Κατά τη διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται πλαστικοποίηση του προς συγκόλληση υλικού και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται φθάνουν περίπου το 0,8 του σημείου τήξης των προς συγκόλληση υλικών. Ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς μελέτης που αφορούν στην F.S.W είναι η παρατήρηση της ροής του υλικού κατά την πραγματοποίησή της .

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση με χρήση διαφόρων παραμέτρων, με σκοπό την παρατήρηση και τη μελέτη της ροής του υλικού. Για την πραγματοποίηση της μελέτης αυτής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εισαγωγής υλικού σήμανσης (MIT, Marker Insert Technique). Η ροή του υλικού παρατηρήθηκε σε δοκίμια AA5083 – H111 πάχους 6 mm, στα οποία τοποθετήθηκαν σύρματα χαλκού. Παρατηρήθηκε η μικροδομή ενός δοκιμίου αναφοράς και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η παρατήρηση της διασποράς της ροής του υλικού με τη χρήση στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου. Ύστερα, έγινε σύνθεση και παράχθηκε από τα αποτελέσματα το φυσικό μοντέλο της ροής. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία θεωρητική προσέγγιση της ροής του υλικού και τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με τις πειραματικές μετρήσεις.

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW), as a solid state joining process, is considered to be one of the most advanced methods of welding of the last decade. During this process, plastic deformation of welded material takes place and the values of temperature can reach above 0.8 of the melting point of the material to be welded. One of the most important aspect of FSW is the observation of material flow during this process.

Within the scope of this study, in order to observe material flow during FSW, joining is applied using different parameters of the process. Material flow is observed using Marker Insert Technique (MIT). For this reason, workpieces of AA5083 – H111 with thickness of 6 mm were used and wires of copper were inserted in specific holes which were created in the workpieces. Afterwards, microstructure and microhardness of a reference workpiece were observed as well as material flow using optical stereoscopy and microscopy. Then, the results were combined to produce a physical model. Finally, a theoretical approach of material flow during FSW is proposed and the results of this approach are compared with experimental values.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

1.1 Ιστορικά Στοιχεία [1]

Με τον όρο συγκόλληση εννοούμε γενικά την τοπική σύνδεση μετάλλων. Η ένωση αυτή, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μεταξύ όμοιων και ανόμοιων μετάλλων και με τη χρήση ή όχι υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Η διεργασία αυτή έχει συνήθως σαν αποτέλεσμα την παραγωγή αντικειμένων με πολύ χαμηλότερο κόστος από τη χύτευση και με καλύτερη γενικά ποιότητα κατασκευής, μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, κ.α. Με τον τρόπο αυτό, τα προϊόντα της συγκόλλησης είναι πολλές φορές έτοιμα για χρήση, χωρίς να χρειάζονται επιπλέον μηχανουργικές κατεργασίες.

- Σύντομη ιστορική ανασκόπηση :

- 1881 : Πρώτη χρήση ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα για τήξη μετάλλων, από Moissan (Γαλλία)
- 1885 : έκδοση Γερμανικού διπλώματος ευρεσιτεχνίας για συγκόλληση με ηλεκτρόδιο άνθρακα, στο όνομα Bernardos (Ρωσία)
- 1892 : Πειράματα συγκόλλησης με μεταλλικά ηλεκτρόδια, από Slavianoff (Ρωσία)
- 1895 : Ανακάλυψη καυστήρα οξυγόνου – ασετυλίνης, από Le Chatellier (Γαλλία)
- 1907 : Πρώτη χρήση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, από Kjellberg (Σουηδία)
- 1930 : - Συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Η.Π.Α)
- Συγκόλληση με προστασία αερίου και ηλεκτρόδιο βολφραμίου, Hobart και Dever (Η.Π.Α)
- 1946 : Συγκόλληση, με προστασία αερίου και μεταλλικό ηλεκτρόδιο, GMAW (Η.Π.Α)
- 1950 : Αυτόματη κατακόρυφη συγκόλληση electroslag (Ρωσία)
- 1955 : Κοπή με τόξο πλάσματος (Η.Π.Α)

1.2 Βασικές Τεχνικές Συγκόλλησης Μετάλλων [1]

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις των μετάλλων, είναι:

- Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (G.T.A.W)
- Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (G.M.A.W)
- Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (P.A.W)
- Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (E.B.W)
- Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (L.B.W)
- Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (F.S.W)

1.2.1 Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (G.T.A.W) [1]

Είναι η μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Το χρησιμοποιούμενο μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο είναι από βολφράμιο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προστιθέμενο μέταλλο.

Αέρια προστασίας

1. Αργό (ατομικό βάρος 40) :

- Είναι το συνηθέστερο λόγω χαμηλής τιμής
- Απαιτείται μικρή σχετικά παροχή επειδή είναι 1,33 φορές βαρύτερο του αέρα

2. Ήλιο (ατομικό βάρος 4) :

- Χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α
- Απαιτεί μεγάλη τάση τόξου και προκαλεί μεγαλύτερη διείδυση, για αυτό χρησιμοποιείται σε παχιά ελάσματα

Τύποι ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε :

1. καθαρού βολφραμίου

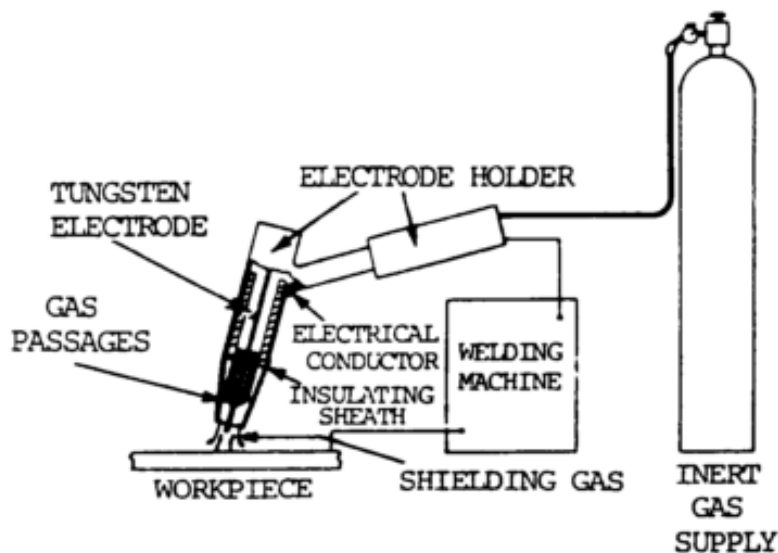
2. βολφραμίου με 1 – 2 % θόριο
3. βολφραμίου με 0.15 – 0.40 % ζirkόνιο
4. καθαρού βολφραμίου με εξωτερικό λεπτό κέλυφος από κράμα βολφραμίου με 1 – 2 % θορίου

Τα ηλεκτρόδια αυτά διατίθενται συνήθως σε διαμέτρους που κυμαίνονται από 0.25 μέχρι 6.35 mm και σε μήκη από 76 μέχρι 610 mm.

Μηχανή συγκόλλησης

Κατά τη G.T.A.W η μηχανή συγκόλλησης είναι συνήθως σταθερού ρεύματος.

Σε ημιαυτόματες συγκολλήσεις σωληνώσεων με τη χρήση G.T.A.W έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας (αρνητικό ηλεκτρόδιο) σε παλμούς. Με τον τρόπο αυτό, η περιμετρική συγκόλληση μπορεί να γίνει χωρίς τη συνεχή ρύθμιση των παραμέτρων συγκόλλησης που θα γινόταν με διαφορετικό τρόπο, καθώς το τόξο θα περνούσε κατά την κίνησή του από την οριζόντια στην κατακόρυφη και μετά στην οροφιαία θέση.



Εικόνα 1.1 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου G.T.A.W. [1]

1.2.2 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (G.M.A.W)[1]

Η GMAW είναι η μέθοδος συγκόλλησης στην οποία χρησιμοποιείται προστασία αερίου και η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Η μέθοδος αυτή όταν πρωτοεμφανίστηκε εθεωρείτο σαν μια μέθοδος υψηλής πυκνότητας ρεύματος, με γυμνά μεταλλικά ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου και με προστασία που δινόταν από παροχή αδρανών αερίων. Βασικός της σκοπός ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Στη συνέχεια, η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε και σε άλλα μέταλλα με προστασία τηγμένου μετάλλου και με ενεργά αέρια (κυρίως CO₂).

Αέρια προστασίας

Παρακάτω αναφέρονται τα διάφορα προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται για τις συγκολλήσεις διαφόρων μετάλλων ή κραμάτων :

1. Αλουμίνιο
 - a. Αργό για μικρά πάχη (μέχρι 25 mm)
 - b. Μίγμα 75% He + 25% Ar για πάχη από 25 μέχρι 76 mm
 - c. 90% He + 10% Ar για πολύ μικρά πάχη

2. Μαλακός χάλυβας
 - a. Μίγμα Ar + 5% O₂
 - b. Για μεταφορά με βύθιση Ar + 25% CO₂ για πάχη μικρότερα από 3.2 mm, Ar + 50% CO₂ για μεγαλύτερα πάχη, ή σκέτο CO₂ για μεγαλύτερη διείσδυση

3. Ανοξειδωτος χάλυβας
 - a. Μίγμα αργού με 1 – 2 % O₂
 - b. Για μεταφορά με βύθιση μίγμα 90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO₂

Τύποι ηλεκτροδίων

Τα συμπαγή ηλεκτρόδια, για συγκόλληση τέτοιου είδους, με προστασία αδρανούς αερίου έχουν συνήθως την ίδια περίπου χημική σύσταση με το προς συγκόλληση μέταλλο. Όταν όμως το χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ενεργό, τότε είναι απαραίτητη η προσθήκη αποξειδωτικών στο κράμα ηλεκτροδίου.

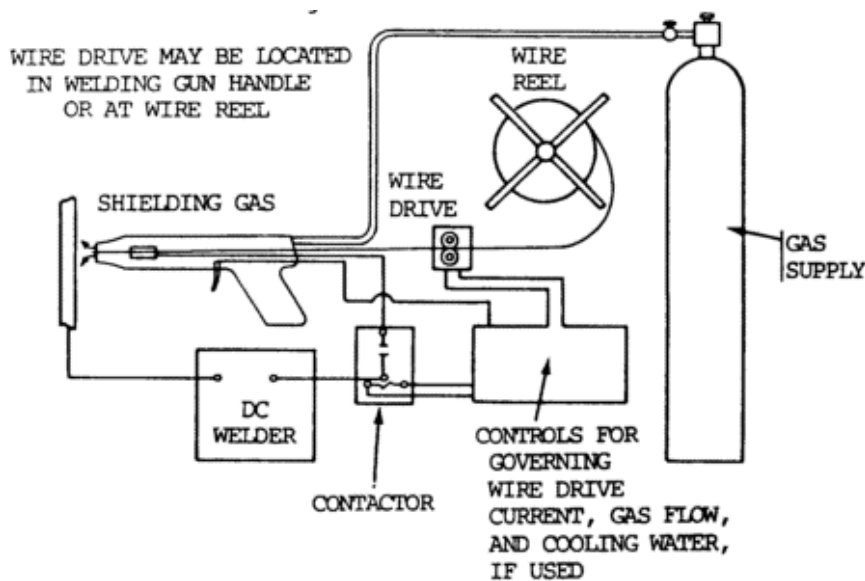
Οι πιο συνηθισμένες χρησιμοποιούμενες διαμέτροι ηλεκτροδίων κυμαίνονται μεταξύ 1.02 και 1.59 mm, αλλά υπάρχουν και ηλεκτρόδια μικρότερων (μέχρι 0.5 mm) και μεγαλύτερων (μέχρι 3.18 mm) διαμέτρων.

Μηχανή συγκόλλησης

Η G.M.A.W είναι μέθοδος συγκόλλησης με πολύ υψηλή πυκνότητα έντασης ρεύματος. Για το λόγο αυτό απαιτεί μηχανή συγκόλλησης σταθερής ή ελαφρά ανερχόμενης τάσης.

Ας σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με G.M.A.W, το συνεχές ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα.

Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα μηχανών συγκόλλησης G.M.A.W είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος. Οι μηχανές αυτές παρέχουν δυο επίπεδα έντασης ρεύματος : ένα σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης, που δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηκόμενου υλικού σε σταγονίδια, και ένα ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπό μορφή παλμών, που υπερτίθεται στο πρώτο.



Εικόνα 1.2 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου G.M.A.W. [1]

1.2.3 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος (P.A.W) [2]

Η συγκόλληση με τόξο πλάσματος αποτελεί εξέλιξη της συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου. Η ένωση στην 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. Για περισσότερη προστασία χρησιμοποιείται συνήθως και βοηθητικό αέριο (αδρανές ή μίγμα αερίων). Ακόμη, είναι δυνατή η χρήση προστιθέμενου μετάλλου.

Η μέθοδος συγκόλλησης με τόξο πλάσματος μοιάζει με την κλασική μέθοδο G.T.A.W, με εξαίρεση το ηλεκτρικό κύκλωμα έναυσης τόξου και το ακροφύσιο στένωσης. Και στις δύο μεθόδους το ηλεκτρόδιο είναι από το ίδιο υλικό, μόνο που στη μέθοδο P.A.W η άκρη του μπορεί να βρίσκεται και εντός του ακροφυσίου στένωσης.

Τύποι τόξου

Υπάρχουν τρεις τύποι : το μεταφερόμενο, το μη μεταφερόμενο και το ημιμεταφερόμενο τόξο πλάσματος. Στο μεταφερόμενο τόξο, το μέταλλο βάσης αποτελεί μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος που δημιουργεί το τόξο. Στο μη μεταφερόμενο τόξο, το μέταλλο βάσης δεν αποτελεί μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος. Το τόξο δημιουργείται μεταξύ του ηλεκτροδίου που είναι συνδεδεμένο με τον αρνητικό πόλο της πηγής και του ακροφυσίου που είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής. Τέλος, στο ημιμεταφερόμενο τόξο, το ηλεκτρόδιο βρίσκεται μέσα στο κέλυφος του ακροφυσίου με αποτέλεσμα η έναυση του τόξου να μην είναι εφικτή πλησιάζοντας απλά το ηλεκτρόδιο στο μέταλλο βάσης.

Χρησιμοποιούμενα αέρια

Το Αργό είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο αέριο ιονισμού και προστασίας, κυρίως για συγκολλήσεις χαμηλής έντασης ρεύματος, λόγω του χαμηλού δυναμικού ιονισμού του. Προσθήκη χαμηλής ποσότητας υδρογόνου σε αργό προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του τόξου πλάσματος, με αποτέλεσμα η μετάδοση θερμότητας στα προς συγκόλληση ελάσματα να γίνεται πιο αποδοτικά.

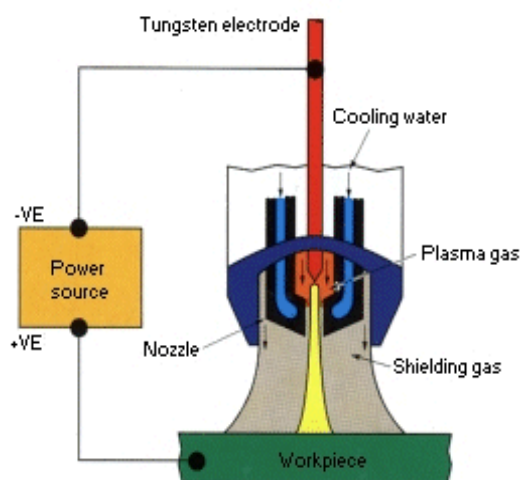
Επειδή όμως υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας πόρων και ρωγμών στο μέταλλο συγκόλλησης από το υδρογόνο, το μίγμα αργού – υδρογόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συγκόλληση με χρήση της τεχνικής «keyhole» ανοξείδωτου χάλυβα, καθώς και κραμάτων του νικελίου και χαλκού – νικελίου.

Μίγματα Αργού – Ηλίου χρησιμοποιούνται για συγκόλληση «keyhole» σε παχιά ελάσματα κραμάτων τιτανίου.

Μηχανή συγκόλλησης

Στη συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης, το τόξο διέρχεται δια μέσου μιας μικρής τρύπας ενός χάλκινου υδρόψυκτου στομίου. Επειδή η άμεση επαφή με το τόξο έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του στομίου, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η ροή του αερίου πλάσματος και η θέση του ηλεκτροδίου σε σχέση με το στόμιο είναι τέτοιες, ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη ενός λεπτού στρώματος ψυχρού αερίου ανάμεσα στο τόξο πλάσματος και το στόμιο. Με αυτόν τον τρόπο, η διατομή του τόξου πλάσματος μπορεί να μειωθεί στο 20 – 50% της διατομής του στομίου.

Η ύπαρξη λεπτού κρύου στρώματος αερίου γύρω από το τόξο πλάσματος προκαλεί θερμική συστολή του τόξου πλάσματος. Η απώλεια θερμότητας από το εξωτερικό μέρος του πυρήνα περιορίζει την περιοχή μέσω της οποίας μπορεί να διέλθει το ηλεκτρικό ρεύμα. Ακόμη, η μόνωση που παρέχει το λεπτό κρύο στρώμα αερίου γύρω από το θερμό πυρήνα εμποδίζει το σχηματισμό δευτερεύοντος τόξου, που θα κατέστρεφε πολύ γρήγορα το στόμιο με τοπική τήξη, μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του και επομένως τη διεύθυνση του τόξου πλάσματος.



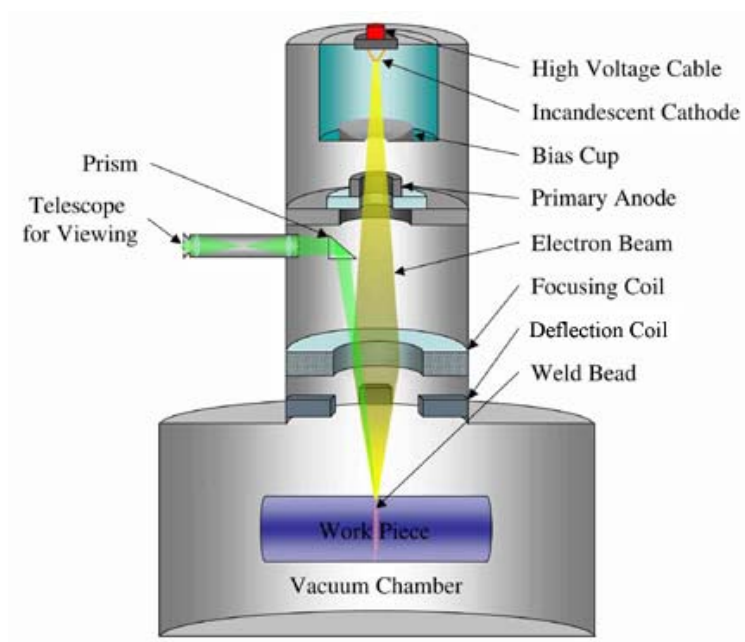
Εικόνα 1.3 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου P.A.W. [2]

1.2.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (E.B.W) [3]

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.

Χαρακτηριστικά E.B.W

- Μετατροπή κινητικής ενέργειας ηλεκτρονίων σε θερμότητα
- Χρήση κενού για την εστίαση της δέσμης
- Ισχύς < 100 kW
- Λόγος βάθους προς πλάτος συγκόλλησης : 1:3
- Ταχύτητα : 12 m/min
- Αυτοματοποίηση μέσω servo
- Πάχη ελάσματος : από «φύλλο» έως 150 mm
- Ελάχιστη παραμόρφωση
- Καλή ποιότητα



Εικόνα 1.4 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου E.B.W. [3]

1.2.5 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (L.B.W) [4]

Η συγκόλληση με δέσμη λέιζερ γίνεται με τη βοήθεια θερμότητας από μια ισχυρή δέσμη φωτονίων που προσκρούει πάνω στις επιφάνειες των υπό συγκόλληση μετάλλων. Με αυτό το είδος συγκόλλησης γίνεται εφικτή η εστίαση σε μικρή περιοχή.

Ιδιότητες

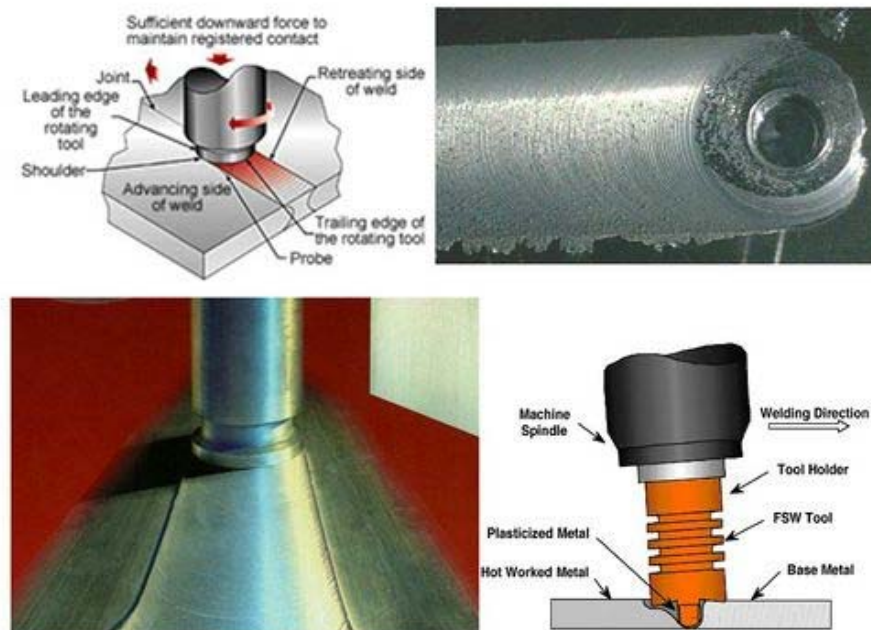
- Καλή ποιότητα
- Μικρή παραμόρφωση
- Ολκιμότητα
- Μικρό πορώδες
- Πολύ στενή θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Χαρακτηριστικά L.B.W

- Δυνατότητα αυτοματοποίησης
- Δυνατότητα πρόσβασης σε δύσκολα σημεία
- Πάχη 25 mm
- Υλικά : Al, Ti, St, Cu, υπερκράματα
- Ταχύτητα 2.5-8 m/min ανάλογα με το πάχος

1.3 Συγκόλληση δια Τριβής με ανάδευση(F.S.W) [2]

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μια καινοτομική μέθοδο συγκόλλησης, στερεάς κατάστασης, η οποία πρόσφατα (1991) επινοήθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute – T.W.I). Κατά τη συγκόλληση αυτή, πραγματοποιείται πλαστικοποίηση του προς συγκόλληση υλικού και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται φθάνουν περίπου το 0,8 του σημείου τήξης των προς συγκόλληση υλικών. Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αναπτύσσεται εκτενώς στο κεφάλαιο 2.

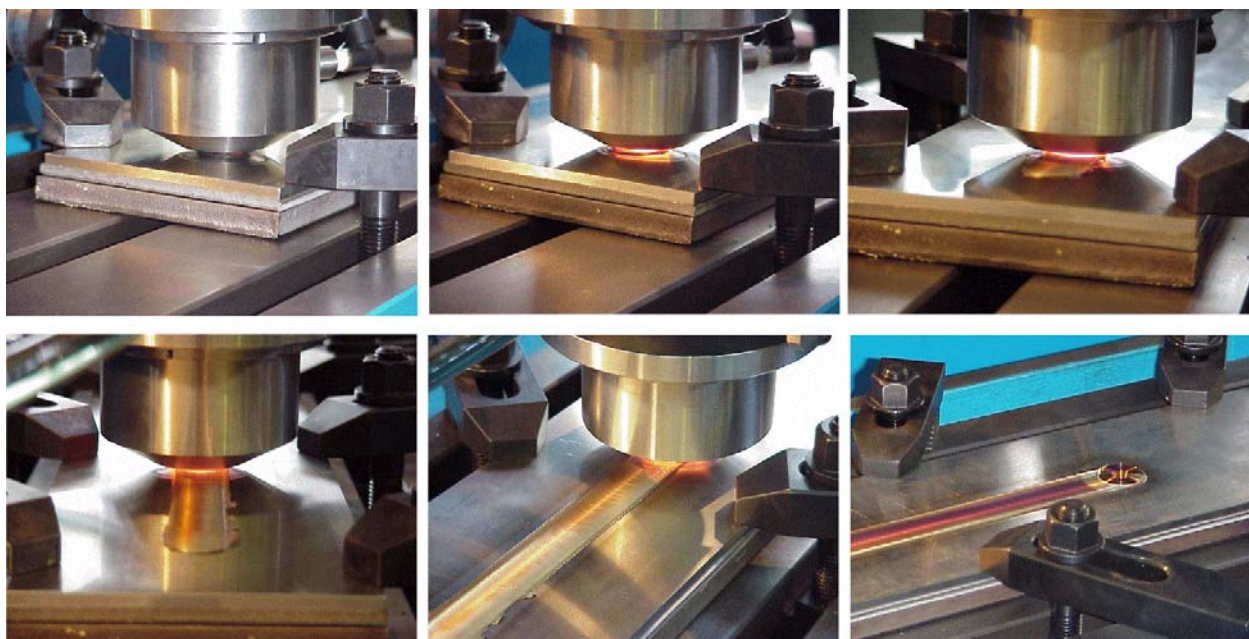


Εικόνα 1.5 : Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου F.S.W. [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

2.1 Εισαγωγή [6]

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, F.S.W), επινοήθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, TWI), το 1991, ως μια καινούρια «στερεάς κατάστασης» μέθοδος συγκόλλησης. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη συγκόλληση αλουμινίου, αλλά και άλλων μεταλλικών κραμάτων που είναι δύσκολο να συγκολληθούν με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Η F.S.W. θεωρείται μια από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους συγκόλλησης της τελευταίας δεκαετίας.



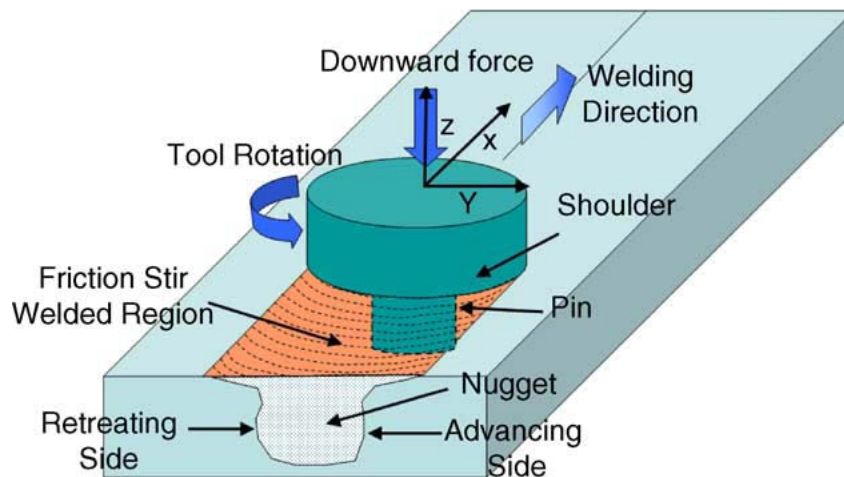
Εικόνα 2.1 : Βήματα μεθόδου συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης. [6]

2.2 Αρχή της μεθόδου [2]

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι η ακόλουθη : ένα κυλινδρικό εργαλείο με ειδικά σχεδιασμένο περιουχένιο, το οποίο καταλήγει σε ένα πείρο, καθώς περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, βυθίζεται στην επαφή των ακμών των προς συγκόλληση πλακών και διέρχεται κατά μήκος αυτών. Τα προς συγκόλληση υλικά συγκρατούνται ισχυρά πάνω στην τράπεζα εργασίας με τέτοιο τρόπο, ώστε λόγω των δυνάμεων που δέχονται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης να παραμένουν σταθερά και να αποτρέπεται η αμοιβαία απώθηση. Το μήκος του πείρου συνήθως πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων και το περιουχένιο να εφάπτεται με την επιφάνειά τους, για την ανάπτυξη επαρκούς θερμότητας που οδηγεί στην πλαστικοποίηση του υλικού.

Με το περιστρεφόμενο εργαλείο της μηχανής συντελούνται δυο βασικές λειτουργίες : α) η θέρμανση του δοκιμίου και β) η ανάδευση του υλικού που οδηγεί στη συγκόλληση των δοκιμίων. Κύριες πηγές θερμότητας της συγκόλλησης αποτελούν η θερμότητα λόγω τριβής μεταξύ του περιουχενίου και των προς συγκόλληση υλικών, καθώς και η θερμότητα λόγω ανάδευσης . Αυτή η συνολική θερμότητα μαλακώνει το υλικό γύρω από την περιοχή του πείρου και σε συνδυασμό με την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης, το πλαστικοποιημένο υλικό προωθείται από την περιοχή μπροστά από τον πείρο στην περιοχή πίσω από αυτόν. Γι αυτό το λόγο η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης θεωρείται συγκόλληση «στερεάς κατάστασης».

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, καλείται και «πράσινη» μέθοδος λόγω του ότι είναι φιλική προς το περιβάλλον, αφού κατά τη λειτουργία της δεν εκπέμπεται ακτινοβολία και δεν παράγονται ρύποι. Σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης η F.S.W. καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια και μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις γεωμετρίες συγκολλήσεων, όπως επίπεδες συγκολλήσεις, γωνιακές συγκολλήσεις κ.λπ.



Εικόνα 2.2 : Αρχή μεθόδου Συγκόλλησης δια Τριβής μέσω Ανάδευσης. [7]

2.3 Παράμετροι της F.S.W. [7]

Οι βασικές παράμετροι της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα συγκόλλησης (ή ταχύτητα πρόωσης) και η γεωμετρία του εργαλείου :

➤ Ταχύτητα περιστροφής – Ταχύτητα συγκόλλησης (ταχύτητα πρόωσης)

Κατά την τεχνική της F.S.W. το εργαλείο συγκόλλησης εκτελεί δύο κινήσεις. Περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα κινείται κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης.

Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου προκαλεί την ανάδευση και ανάμιξη των προς συγκόλληση υλικών γύρω από τον πείρο που περιστρέφεται. Η ευθύγραμμη κίνηση του εργαλείου προωθεί το πλαστικοποιημένο υλικό από μπροστά προς τα πίσω σε σχέση με τον πείρο, ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της συγκόλλησης. Μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα σε συνδυασμό με χαμηλότερη ταχύτητα πρόωσης, προκαλεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών λόγω τριβής που με τη σειρά της οδηγεί σε καλύτερη ανάδευση των υλικών.

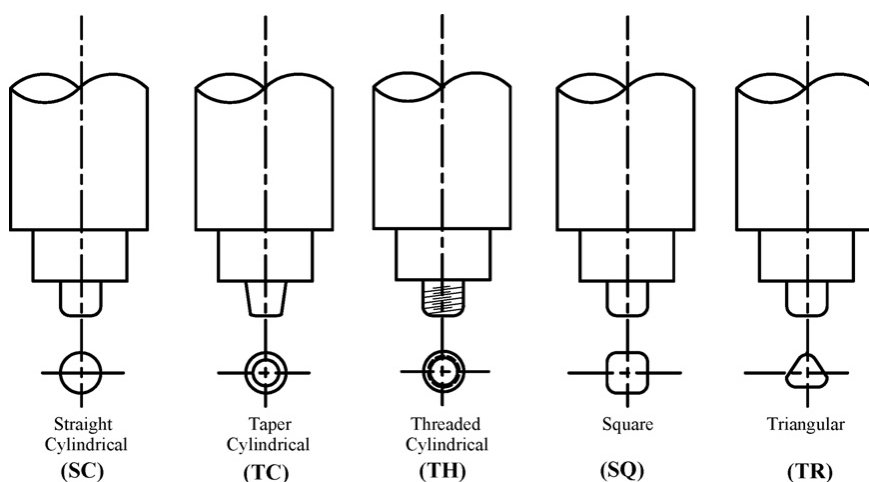
➤ Γεωμετρία εργαλείου

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η καλή ποιότητα της συγκόλλησης, όσο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Το εργαλείο της FSW αποτελείται από το περιαιχένιο και

τον πείρο συγκόλλησης. Όπως προαναφέρθηκε το εργαλείο εκτελεί δυο βασικές διεργασίες :

1. αναπτύσσει τη θερμότητα λόγω τριβής και
2. αναδεύει τα υλικά

Αρχικά το εργαλείο εισχωρεί στο σημείο που εφάπτονται οι ακμές των δύο πλακών και επομένως αναπτύσσεται θερμότητα λόγω της τριβής μεταξύ του περιανυχένιου και των προς συγκόλληση δοκιμίων. Το εργαλείο εισχωρεί μέχρι το περιανυχένιο να εφάπτεται με τις πλάκες. Η δεύτερη διεργασία που πραγματοποιείται είναι εξίσου σημαντική καθώς αναμιγνύει τα υλικά προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο τη συγκόλλησή τους. Οι ιδιότητες που αποκτούν τα υλικά μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη γεωμετρία των εργαλείων αυτών. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται επίπεδο περιανυχένιο με κοχλιωτό πείρο.



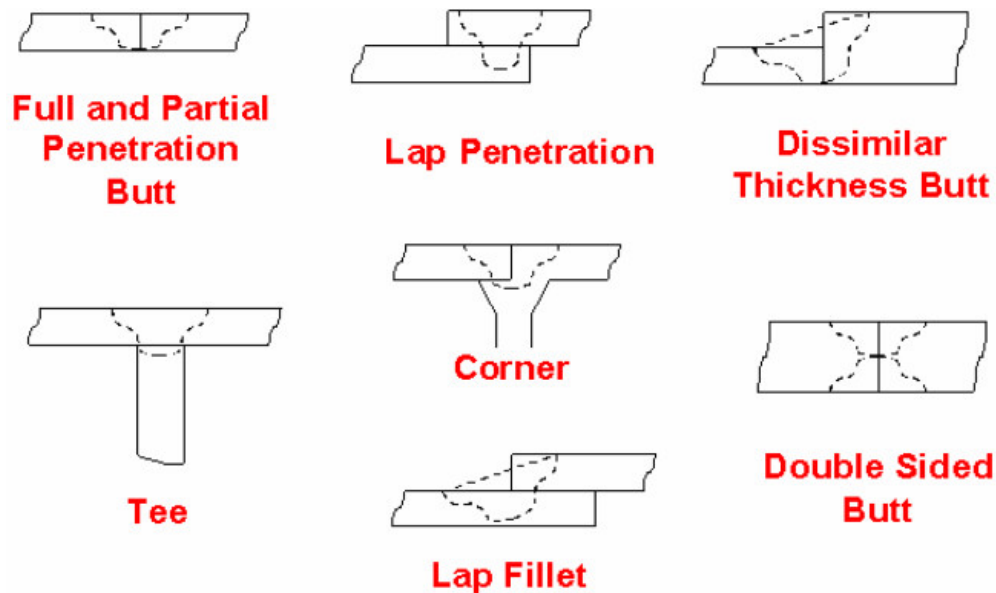
Εικόνα 2.3 : Κατατομή εργαλείων συγκόλλησης F.S.W. με διάφορα είδη πείρων. [8]

2.4 Συγκολλησιμες Γεωμετρίες [9]

Διακρίνονται πέντε βασικοί τύποι γεωμετρίας συγκόλλησης :

- Μετωπική.
- Γωνιακή σύνδεση, όπου η συγκόλληση μεταξύ των τεμαχίων πραγματοποιείται έτσι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90° .
- Σύνδεση T , όπου τα προς συγκόλληση τεμάχια είναι περίπου κάθετα μεταξύ τους.
- Σύνδεση με επικάλυψη, όπου τα δύο μέλη επικαλύπτουν το ένα το άλλο.

- Σύνδεση κατά ακμή, όπου η σύνδεση γίνεται μεταξύ των ακμών δύο ή περισσότερων παράλληλων μελών.



Εικόνα 2.4 : Διάφορες γεωμετρίες που συγκολλούνται με χρήση F.S.W. Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η θέση της κεφαλής κατά τη συγκόλληση. [9]

2.5 Ζώνες Συγκόλλησης [7]

Σύμφωνα με τη μικροδομή του συγκολλημένου υλικού δημιουργούνται οι παρακάτω χαρακτηριστικές ζώνες συγκόλλησης : η ζώνη ανάδευσης ή πυρήνας συγκόλλησης (stir zone or weld nugget), η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermomechanical Affected Zone, TMAZ) και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ).

➤ Ζώνη ανάδευσης (stir zone)

Στην περιοχή της ζώνης ανάδευσης η πλαστική παραμόρφωση και η θερμότητα που αναπτύσσεται, έχει σαν αποτέλεσμα τη δυναμική ανακρυστάλλωση των κόκκων.

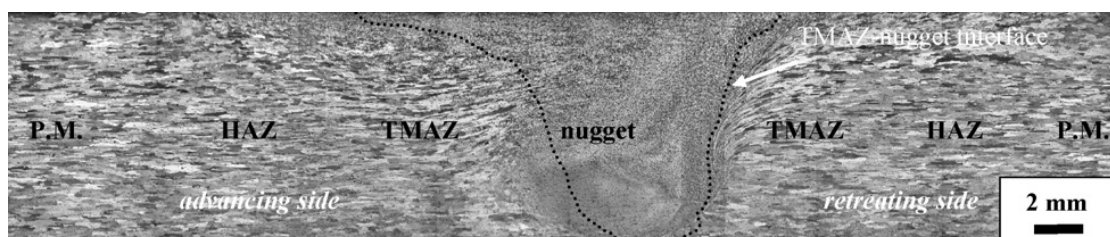
Η ανακρυστάλλωση που συντελείται κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FSW στη ζώνη ανάδευσης δημιουργεί λεπτόκοκκη μικροδομή. Παράμετροι όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η χημική σύσταση του δοκιμίου, η θερμοκρασία του, η αξονική δύναμη που ασκεί το εργαλείο κατά τη διείδυση και το πόσο γρήγορα το δοκίμιο θα ψυχθεί, επηρεάζουν άμεσα τη μικροδομή που θα έχει το υλικό μετά τη συγκόλληση.

➤ Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermomechanical Affected Zone)

Εκατέρωθεν της ζώνης ανάδευσης δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ). Είναι αποτέλεσμα τόσο της θερμότητας που αναπτύσσεται όσο και της παραμόρφωσης την οποία υφίσταται το υλικό. Παρόλο που στην περιοχή αυτή παρατηρείται έντονη πλαστική παραμόρφωση, η μικροδομή της ωστόσο δεν υφίσταται δυναμική ανακρυστάλλωση.

➤ Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone)

Πέρα από τη ΘΜΕΖ δημιουργείται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Στη ζώνη αυτή λαμβάνουν χώρα θερμικοί κύκλοι χωρίς όμως να οδηγούν σε ανακρυστάλλωση των κόκκων και σε παραμόρφωση του υλικού. Μελέτες που έγιναν σε κράματα αλουμινίου, έδειξαν ότι η διαδικασία FSW έχει μικρή επίδραση στο μέγεθος των κόκκων στην περιοχή αυτή.



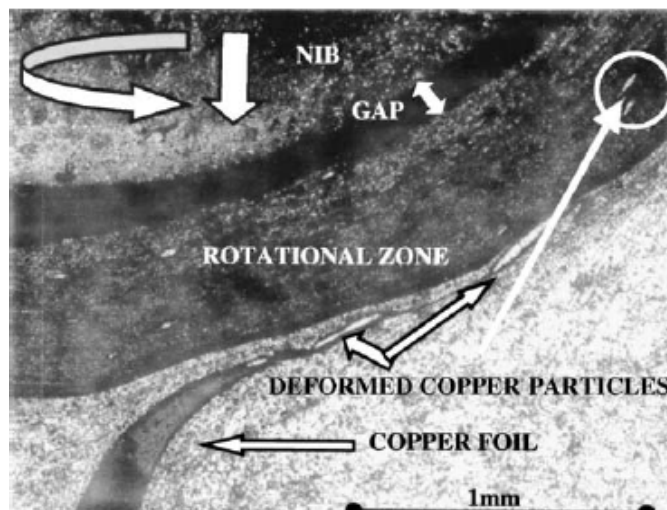
Εικόνα 2.5 : Μικρογραφία κάθετης τομής της FSW. Παρατηρείται διαφορετικό μέγεθος των κόκκων σε κάθε ζώνη, τόσο λόγω της θερμότητας που προσδόθηκε στο μέταλλο λόγω τριβής όσο και λόγω της μηχανικής παραμόρφωσης. [8]

2.6 Ροή Υλικού [10]

Αρχικά, οφείλουμε να αναφέρουμε τις δύο πλευρές που δημιουργούνται κατά τη FSW. Συγκεκριμένα, ως «προωθούμενη πλευρά» αναφέρεται η πλευρά στην οποία η περιστροφική ταχύτητα του πείρου και η ταχύτητα της συγκόλλησης έχουν την ίδια φορά, ενώ ως «υποχωρούσα πλευρά» όταν περιστροφική και ταχύτητα συγκόλλησης έχουν αντίθετη φορά.

Επομένως, κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, ένα μέρος του υλικού αναδεύεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ενώ ένα άλλο απλώς εξωθείται. Το αναδευόμενο υλικό σχηματίζει τη ζώνη ανάδευσης ενώ το εξωθούμενο υλικό εναποτίθεται γύρω από την υποχωρούσα πλευρά.

Στην προωθούμενη πλευρά, το υλικό, ακολουθώντας την κίνηση του πείρου, στροβιλίζεται και προωθείται προς ανώτερη επιφάνεια. Στην υποχωρούσα πλευρά, το υλικό παρασύρεται καθώς το εργαλείο συγκόλλησης κινείται ευθύγραμμα και γεμίζει με υλικό τις περιοχές που έχουν κενά λόγω της περιστροφής του πείρου.



Εικόνα 2.6: Περιοχή εμπρός της κεφαλής, στην οποία φαίνεται η είσοδος του φύλλου χαλκού στην ζώνη περιστροφής. Παρατηρείται ότι το φύλλο χαλκού διαλύεται σχεδόν αμέσως σε μικρά σωματίδια τα οποία διασκορπίζονται στην ζώνη περιστροφής. [10]

2.7 Συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων [7]

Η μέθοδος δια τριβής με ανάδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στη συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων. Αρκετοί ερευνητές επιχείρησαν συγκολλήσεις μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, ή και του αλουμινίου με άλλα μέταλλα. Παρατηρήθηκε ότι στη ζώνη συγκόλλησης δύο ανόμοιων μετάλλων υπήρχε διαφορετική συμπεριφορά στην κίνηση των υλικών κατά την ανάδευσή τους και άρα στις μετέπειτα ιδιότητές τους. Για παράδειγμα, θα πρέπει μέταλλα με χαμηλή αντοχή να τοποθετούνται στην προωθούμενη πλευρά αν πρόκειται να συγκολληθούν με μέταλλα υψηλής αντοχής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ανακρυστάλλωση που υφίστανται τα υλικά μετά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FSW προσδίδει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

2.8 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδου [7]

Η F.S.W. έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Τα προϊόντα είναι πολύ πιο σταθερά στο σημείο της ραφής της συγκόλλησης και είναι λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση από το περιβάλλον.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου και ο σχετικά μικρός θερμικός κύκλος, οδηγούν σε συγκολλήσεις :

- Με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη, αλλά και κόπωση.
- Με βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση.
- Χωρίς στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις.
- Με βελτιωμένη εμφάνιση ραφής.

Επιπλέον, πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν τα εξής χαρακτηριστικά :

- Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Δεν χρησιμοποιεί καταναλισκόμενα στοιχεία, οπότε δεν υπάρχει κόστος αναλώσιμων.
- Δεν χρειάζεται μηχανουργική κατεργασία για τις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.
- Δεν χρησιμοποιεί αέρα προστασίας για κράματα όπως του αλουμινίου, του χαλκού κ.τ.λ.

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μετωπικές συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων.

Παρ' όλα αυτά οφείλουμε να αναφέρουμε και ορισμένα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Αρχικά, θα πρέπει στις προς συγκόλληση πλάκες να υπάρχει ισχυρή συγκράτηση, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Προβλήματα όπως το υψηλό κόστος του ως τώρα υπάρχοντος εξοπλισμού, ενδέχεται να ξεπεραστούν, αφού η μέθοδος γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής στις συγκολλήσεις αλουμινίου, καθώς δίνει συγκολλήσεις με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις συγκολλήσεις όπου υπάρχει τήξη.

2.9 Εφαρμογές συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης [2]

Ο τομέας της ναυπηγικής είναι ο πρώτος που υιοθέτησε τη μέθοδο συγκόλλησης F.S.W. για διάφορες εφαρμογές. Αργότερα ξεκίνησε να εφαρμόζεται και σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως η διαστημική και η αεροναυπηγική, λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας της.

Αρχικά η F.S.W. εφαρμόστηκε σε κράματα αλουμινίου, καθώς το αλουμίνιο αποτελεί υλικό του οποίου οι ιδιότητες το καθιστούν κατάλληλο για να συγκολληθεί με αυτή την τεχνική.

Συγκεκριμένα εφαρμόζεται κυρίως στα εξής κράματα αλουμινίου :

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

Η κατεργασία F.S.W. γρήγορα εφαρμόστηκε στη συγκόλληση κραμάτων άλλων μετάλλων και στη συγκόλληση ανομοιογενών υλικών. Άλλα υλικά στα οποία έχει εφαρμοστεί η τεχνική αυτή είναι τα ακόλουθα :

- Χαλκός και κράματα χαλκού (έως και 50mm πάχος)
- Μόλυβδος
- Τιτάνιο και κράματα τιτανίου
- Ψευδάργυρος
- Μαλακοί και C-Mn Χάλυβες
- Ανοξειδωτοι χάλυβες (ωστενιτικοί, μαρτενσιτικοί, duplex)
- Κράματα νικελίου
- Πολυμερή

Στον τομέα της ναυπηγικής η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι κατάλληλη για τις εξής εφαρμογές :

- Ελάσματα για τα καταστρώματα, πλευρές, φρακτές και έδρες.
- Γάστρα και υπερκατασκευές.
- Πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων.
- Παράκτιες εγκαταστάσεις.
- Θαλάσσιες κατασκευές.
- Εγκαταστάσεις ψύξης.
- Κατάρτια στα ιστιοπλοϊκά πλοία.



Εικόνα 2.7 : Συγκόλληση ελασμάτων πλοίου με τη χρήση της μεθόδου FSW. [2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ [11]

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες 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 σημασία του για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη διότι παρουσιάζει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Επίσης, παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση.

13	←	Atomic Number
Al	←	Symbol
Aluminium		
26.98154	←	Atomic Weight
2 - 8 - 3	←	Electron Configuration

3.2 Ιδιότητες Αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ αργυρόχρωμο μέταλλο. Το ατομικό του βάρος είναι 26,9815, κρυσταλλώνεται σε δομή κυβικού εδροκεντρωμένου, λιώνει σε θερμοκρασία 660°C (1.220°F), εξατμίζεται σε θερμοκρασία 2.467°C (4.473°F), και έχει ειδικό βάρος 2,7(kg/m³ ή g/cm³).

Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά αντιδρόν. Στην επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό συνεχές επιφανειακό στρώμα Al₂O₃ το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό.

Επιπλέον, είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ μορφοποιείται χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Κράματα αυτού με μικρά ποσοστά χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου και πυριτίου αλλά και άλλων κραματικών στοιχείων, του προσδίδουν ιδιαίτερα ξεχωριστές και χρήσιμες ιδιότητες.

Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Έτσι, καθαρό αλουμίνιο σε ποσοστό 99,996% έχει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 49 MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

3.3 Εφαρμογές Αλουμινίου

Μια συγκεκριμένη ποσότητα μάζας αλουμινίου, ζυγίζει περίπου το 1/3 της ίδιας μάζας από σίδηρο. Ο συνδυασμός του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος με την υψηλή αντιδιαβρωτική αντοχή του, το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δομική και αρχιτεκτονική (τόσο ως δομικό όσο και ως διακοσμητικό υλικό), αλλά και στην κατασκευή αυτοκινήτων, τρένων, αεροπλάνων, πλοίων και γενικότερα σε εφαρμογές, όπου απαιτείται μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. μεταφορά εμπορευμάτων, υγρών καυσίμων κ.λ.π.).

Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς του, χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκευών μαγειρικής, ως περιτύλιγμα τροφίμων, αλλά και στην κατασκευή πιστονιών για κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Έχει το 63% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού, αλλά μόνο το μισό βάρος ενός ιδίου αγωγού. Κατά συνέπεια, ένας αγωγός αλουμινίου είναι πιο μεγάλος σε διάμετρο από έναν αντίστοιχο από χαλκό, αλλά εξακολουθεί να είναι πιο ελαφρύς και θεωρείται καταλληλότερος για μεγάλου μήκους γραμμές μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης (αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται πλέον για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχης των 700,000V ή και περισσότερο).

Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (εξαιτίας του γεγονότος ότι απορροφά σχετικά λίγα νετρόνια) και σε κρυογονικές θερμοκρασίες επειδή διατηρεί την αντοχή του και αυξάνει τη σκληρότητα του όσο μειώνεται η θερμοκρασία.

3.4 Τα Κράματα του Αλουμινίου

Όπως ακριβώς συμβαίνει και με κάθε μέταλλο, έτσι και στην περίπτωση του καθαρού αλουμινίου, η χρησιμότητά του διευρύνεται σημαντικά έπειτα από την κραμάτωσή του με άλλα στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται ‘νέα μέταλλα’ που έχουν ως βάση το αλουμίνιο και που η χρησιμότητά τους σε διάφορες εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από αυτήν του καθαρού αλουμινίου.

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό 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, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος.

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

Πίνακας 3.1: Κωδικοποίηση των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminum Association, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.

Κωδικός Κύρια Προσθήκη
1XXX Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99%
2XXX Χαλκός
3XXX Πυρίτιο και χαλκός ή μαγνήσιο
4XXX Πυρίτιο
5XXX Μαγνήσιο
6XXX Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XXX Ψευδάργυρος
8XXX Κασσίτερος
9XXX Άλλα στοιχεία

Πίνακας 3.2: Κωδικοποίηση των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminum Association, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας για τα κράματα διαμόρφωσης και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, που έχουν υποστεί. Η ανάλυση της κωδικοποίησης αυτής παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.

Κωδικός	Κατεργασία
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για κράματα διαμόρφωσης
H1X	Μόνο ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης) H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας H12: Κράμα σκληρυνόμενο κατά 25% H14: Κράμα σκληρυνόμενο κατά 50% H16: Κράμα σκληρυνόμενο κατά 75% H18: Κράμα σκληρυνόμενο κατά 100% H19: Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση T1: Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση T2: Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση T3: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση T4: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση

	<p>T5: Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη από του περιβάλλοντος</p> <p>T6: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση σε θερμοκρασία υψηλότερη από του περιβάλλοντος</p> <p>T7: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης</p> <p>T8: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση</p> <p>T9: Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ</p> <p>T10: Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση</p>
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με τη γήρανση

Πίνακας 3.3: Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminum Association, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.

3.4.1 Κράματα Διαμόρφωσης του Αλουμινίου

- Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μεσομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως, με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000

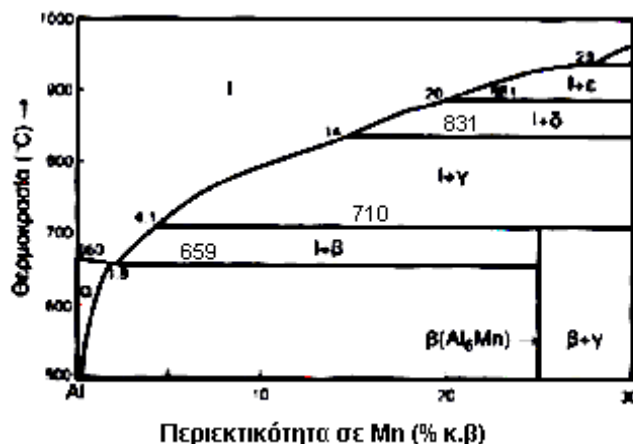
Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστο 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν άριστη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται στα κράματα αυτά είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό 1% (κράμα 1100). Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι η κατασκευή συρμάτων και αγωγών ηλεκτρικού ρεύματος, η κατασκευή θερμαντικών σωμάτων κ.α.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγγάνιο. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al, που είναι 1,8% στους 659ο 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 Al_6Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος.

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.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου- Μαγγανίου. Στον x-άξονα βρίσκεται το ποσοστό περιεκτικότητας του κράματος σε μαγγάνιο.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο, σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Σε αυτά το μεγαλύτερο μέρος του Mg βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.

Τα κράματα της σειράς 5000, παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που όμως βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως, της ολκιμότητας. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια

καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική τα πειράματα έχουν γίνει σε κράμα αλουμινίου 5083, επομένως αναφέρουμε παρακάτω ορισμένες ιδιότητες του κράματος αυτού.

Κράμα αλουμινίου 5083

Το αλουμίνιο 5083 είναι γνωστό για την αντοχή του σε δύσκολα περιβάλλοντα. Είναι ανθεκτικό σε θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και σε παρουσία χημικών. Επιπλέον, θεωρείται από τα πιο σκληρά κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου και η σκληρότητά του αυτή διατηρείται ακόμα και μετά τη συγκόλληση.

Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083 :

Στοιχείο	Σύσταση %
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 3.4 : Χημική σύσταση 5083.

Μηχανικές ιδιότητες κράματος αλουμινίου 5083 :

Temper	H32	0/H111
Proof Stress 0.2% (MPa)	240	145
Tensile Strength (MPa)	330	300
Shear Strength (MPa)	185	175
Elongation A5 (%)	17	23
Hardness Vickers (HV)	95	75

Πίνακας 3.5 : Μηχανικές ιδιότητες 5083

Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου 5083 :

Property	Value
Density	2.65 g/cm ³
Melting Point	570°C
Modulus of Elasticity	72 GPa
Electrical Resistivity	0.058x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	121 W/m.K
Thermal Expansion	25x10 ⁻⁶ /K

Πίνακας 3.6 : Φυσικές ιδιότητες 5083

Εφαρμογές κράματος αλουμινίου 5083 :

Το αλουμίνιο 5083 χρησιμοποιείται κυρίως στους παρακάτω τομείς :

- Ναυπηγική
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Εξέδρες άντλησης πετρελαίου
- Σωλήνες πίεσης
- Βαγονέτα ορυχείου

- Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000

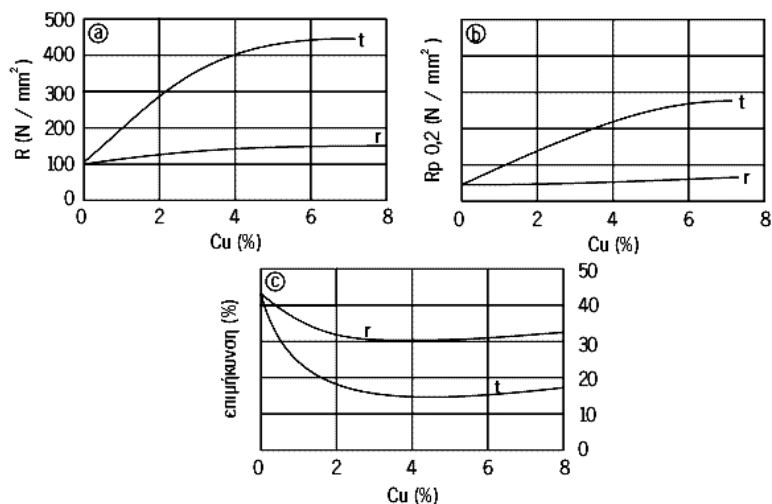
Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6 – 6,3% και για κράματα Al – Cu – Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl_2 και CuMgAl_2 , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία 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. Ωστόσο, αν προστεθεί συγχρόνως και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230° C.

Τα κράματα της σειράς 2000, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλούνται δύσκολα διότι, 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.

Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου).



Εικόνα 3.2 : Αντοχή σε εφελκυσμό, όριο ελαστικότητας και επιμήκυνση σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε χαλκό. Οι καμπύλες με το γράμμα r αναφέρονται σε κράμα που έχει υποστεί διαδικασία ανόπτησης, ενώ οι καμπύλες με το γράμμα t σε κράμα που έχει υποστεί σκλήρυνση.

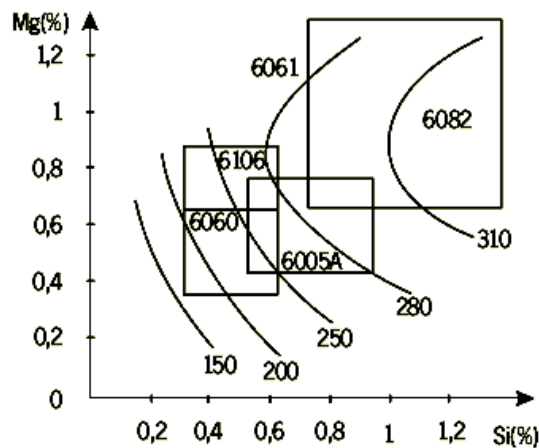
- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000

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 βελτιώνει σε μερικά κράματα της σειράς τις μηχανικές τους ιδιότητες, σε βάρος όμως της αντοχής τους σε διάβρωση.

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 παραμείνει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση που προκαλεί.

Τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως δε παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους $150^{\circ}C$. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.



Εικόνα 3.3 : Μεταβολή της μηχανικής αντοχής ανάλογα με την περιεκτικότητα σε Mg – Si .

- 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 αλουμινίου.

Το ποσοστό του Zn κυμαίνεται από 4 – 8% και αυτό του Mg από 1 – 3%. Η επιταχυνόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμιση της ένωσης $MgZn_2$. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμισης. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού, μειώνει την εμβαπτότητα, 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 η παρουσία Zn βελτιώνει τη συγκολλησιμότητα τους.

Τα κράματα της σειράς 7000 υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησης τους, της καλής τους εμβαπτότητας, ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα, και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 160°C. Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς 7000 δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλλησή τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητα τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή (έως 120°C).

Τα κράματα του αλουμινίου της σειράς 7000 χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή σε διάβρωση.

3.4.2 Κράματα Χύτευσης του Αλουμινίου

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

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι :

- ✓ η καλή χυτευσιμότητα
- ✓ η απουσία ρωγματώσεων
- ✓ η ομοιογενής κατανομή του πορώδους
- ✓ η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων
- ✓ η καλή αντοχή εν θερμώ
- ✓ η καλή αντοχή σε διάβρωση

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

- Χύτευση σε άμμο : η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων 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 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

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι τις θερμοκρασίες χύτευσης. Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα κράματα χύτευσης αλουμινίου :

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-χαλκού τα οποία χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-πυριτίου, κράματα αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου και κράματα αλουμινίου-πυριτίου-χαλκού. Αυτά περιέχουν πυρίτιο σε ποσοστό 5 έως 20%, αν και τις περισσότερες φορές προτιμώνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Προσθήκη μαγνησίου σε ποσοστό 0.3 έως 1% ή χαλκού σε ποσοστό 3-5% βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου-πυριτίου. Κράματα αλουμινίου-πυριτίου-χαλκού, η περιεκτικότητα των οποίων σε πυρίτιο είναι κοντινή της ευτηκτικής σύστασης (12.7% Si), παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-μαγνησίου. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον- στην ατμόσφαιρα ή μέσα στο θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου και κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε

διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από ένα μέχρι δύο μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης λίγο επηρεάζει τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΡΟΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ)

Για την παρατήρηση της ροής του υλικού κρίνεται αναγκαία η εισαγωγή κάποιου υλικού σήμανσης, συνήθως χαλκού, μέσα στο προς συγκόλληση δοκίμιο.



Εικόνα 4.1 : αλουμίνιο στο οποίο έχει τοποθετηθεί χαλκός για να εξεταστεί η ροή του υλικού κατά τη FSW. Οι φωτεινές περιοχές είναι χαλκός, ενώ οι σκούρες το αλουμίνιο. [10]

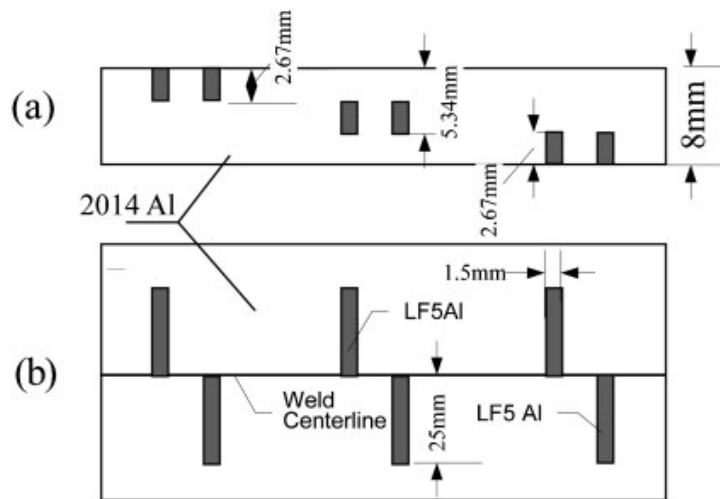
Τα περισσότερα πειράματα καταλήγουν σε κοινά συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι το υλικό μεταφέρεται με δύο διαδικασίες. Κατά την πρώτη, μέρος του υλικού από την προωθούμενη πλευρά ακολουθώντας την κίνηση του πείρου υφίσταται ελικοειδή κίνηση και καθώς βυθίζεται μαζί με τον πείρο μέσα στο υλικό προωθείται προς τα πάνω και τοποθετείται σε περιοχή πίσω από αυτόν, στην προωθούμενη περιοχή. Κατά τη δεύτερη, υλικό από την υποχωρούσα πλευρά γεμίζει τα κενά που δημιουργήθηκαν στην προωθούμενη. [12]

Η ροή του υλικού, γενικότερα, δεν είναι συμμετρική καθότι δημιουργούνται σύνθετα χαρακτηριστικά στροβιλισμού και ανάδευσης τα οποία συνθέτουν μια χαοτική – δυναμική ανάμειξη. Επίσης, η ροή του υλικού διαφέρει ανάμεσα στην προωθούμενη και την υποχωρούσα πλευρά. [13]

Διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στη ροή του υλικού ανάλογα και με το σημείο και το βάθος της ραφής της συγκόλλησης. Αναλυτικότερα, το ανώτερο μέρος της συγκόλλησης επηρεάζεται από το περιουχένιο αποκλειστικά. Σε αυτήν την περιοχή βέβαια αναπτύσσονται και μεγαλύτερες θερμότητες λόγω τριβής ανάμεσα στο περιουχένιο και το υλικό, επομένως το υλικό αναδεύεται ευκολότερα.

Συγκεκριμένα, κατά τη FSW ένα μέρος του υλικού τοποθετείται μπροστά από την αρχική του θέση (κατά τη φορά της συγκόλλησης) λόγω της κίνησης του περιανθενίου. Στις χαμηλότερες περιοχές της συγκόλλησης η επίδραση του περιανθενίου είναι μηδαμινή και η περιοχή επηρεάζεται από την κίνηση κυρίως του πείρου. Το υλικό που αναδύεται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης προέρχεται από την ανώτερη περιοχή της διαδρομής του πείρου. Βυθίζεται προς τα κάτω λόγω της κίνησης του πείρου και τοποθετείται στη ζώνη ανάδευσης. Επιπλέον, υλικό από τη ζώνη ανάδευσης απλά εξωθείται στην υποχωρούσα πλευρά και ανυψώνεται καθώς περιστρέφεται γύρω από τον πείρο. Οφείλουμε ακόμα να αναφέρουμε ότι γενικά παρατηρείται ένα στρώμα στροβιλισμού γύρω από το εργαλείο. [14]



Εικόνα 4.2 : Σχηματική απεικόνιση τοποθέτησης υλικού σήμανσης στο δοκίμιο. [14]

➤ Παλαιότερες Μελέτες

Από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με τη ροή του υλικού κατά τη διαδικασία της FSW ήταν ο Colligan [15], ο οποίος στα πειράματά του χρησιμοποίησε Al6061 και Al7075. Συγκεκριμένα, χάραζε στα δοκίμιά του αυλάκια παράλληλα στη διεύθυνση του άξονα της συγκόλλησης στα οποία τοποθετούσε μικρά σφαιρίδια χάλυβα σαν υλικό σήμανσης. Τα αυλάκια αυτά είχαν χαραχτεί σε διάφορες αποστάσεις από τον άξονα της συγκόλλησης και σε διαφορετικά βάθη, έτσι ώστε να παρατηρηθεί η ροή του υλικού σε διάφορα σημεία. Μετά τις συγκολλήσεις, η κατανομή των χαλύβδινων σφαιριδίων μελετήθηκε με τη βοήθεια ραδιογραφίας.

Ο Colligan [15] κατέληξε στα εξής συμπεράσματα :

Το υλικό από την προωθούμενη πλευρά καταλήγει συνήθως στην υποχωρούσα πλευρά πίσω από τον πείρο του εργαλείου συγκόλλησης. Τα περισσότερα σφαιρίδια έχουν μετακινηθεί σε ανώτερα σημεία κοντά στην επιφάνεια του περιανυχνίου, χωρίς όμως να παρατηρείται ιδιαίτερη κάθετη παραμόρφωση.

Ο Reynolds [16] και οι συνεργάτες του ασχολήθηκαν επίσης με τη ροή του υλικού στη συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν λεπτά ελάσματα Al5454, τα οποία τοποθέτησαν σε σχισμές που είχαν χαραχτεί πάνω σε τεμάχια Al2195. Οι σχισμές είχαν χαραχτεί στη βάση, στη μέση και στην κορυφή της συγκόλλησης και επεκτείνονταν από τον άξονα της συγκόλλησης μέχρι τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη.

Στη συνέχεια, ο M.Guerra [10] και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη ροή του υλικού χρησιμοποιώντας δύο ανόμοια μέταλλα, κράμα αλουμινίου 6061 με φύλλο καθαρού χαλκού στην επιφάνειά του, και στη συνέχεια έκαναν στοιχειομετρική ανάλυση στη συγκόλληση. Βρέθηκε ότι οι δίνες ροής που σχηματίζονται και οφείλονται στην περιστροφή του πείρου, αναμειγνύονται μεταξύ τους κάνοντας τη ροή των δύο μετάλλων κατά τη συγκόλληση αρκετά πολύπλοκη.

Κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα :

Υλικό από την προωθούμενη πλευρά εισέρχεται στη ζώνη στροβιλισμού. Υλικό από την υποχωρούσα πλευρά παρασύρεται με την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης και γεμίζει με υλικό περιοχές στις οποίες έχουν προκύψει κενά λόγω του στροβιλισμού που υφίσταται το υλικό. Το υλικό που μεταφέρεται με κάθε μία από αυτές τις δύο διεργασίες έχει υποστεί πολύ διαφορετική θερμομηχανική καταπόνηση.

Ο Ying Li [13] και οι συνεργάτες του παρατήρησαν τη ροή υλικού κατά τη συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων Al2024 με Al 6061. Τα προς παρατήρηση δοκίμια αργότερα κόπηκαν έτσι ώστε να μελετηθεί η ροή του υλικού και ύστερα έγινε χημική προσβολή με το χημικό αντιδραστήριο Keller's για να καταστεί δυνατή η μεταλλογραφική παρατήρηση σε οπτικό μικροσκόπιο.

Παρατήρησαν ότι η ροή του υλικού επηρεάζεται από την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και τη γεωμετρία του. Επίσης στα μέταλλα μετά τη συγκόλληση, παρατηρούνται σύνθετα χαρακτηριστικά στροβιλισμού και ανάδευσης, τα οποία είναι χαρακτηριστικά μίας χαοτικής – δυναμικής ανάμειξης.

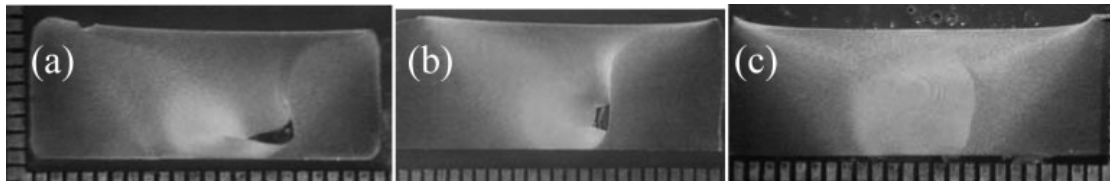
Επίσης, ο J.Schneider [17] και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν σύρματα βολφραμίου και μολύβδου πάνω στη γραμμή συγκόλλησης ελασμάτων αλουμινίου, για να παρακολουθήσουν τη διασπορά των δύο αυτών μετάλλων μέσα στο μητρικό μέταλλο μετά τη χρήση FSW .

Στην έρευνα των Rudolf Zettler [18] και των συνεργατών του χρησιμοποιείται μικροτομογράφος ακτίνων X για την πραγματοποίηση της μελέτης της ροής υλικού. Το υλικό που χρησιμοποιείται για τα πειράματα είναι Al2024 T351 πάχους 4 mm. Για την παρατήρηση της ροής του υλικού εισάγεται στο υλικό πούδρα Ti, η οποία τοποθετείται σε σχισμές πάχους 1,25 mm, μήκους 10 mm και σε βάθος 2,5 mm από την επιφάνεια του υλικού. Οι σχισμές αυτές καλύπτονται από πλακίδιο φτιαγμένο από το αρχικό υλικό. Η διασπορά της παρατηρείται με τεχνικές τομογραφίας και μεταλλογραφίας. Το κύριο συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν, ήταν η διαφορετικότητα της διασποράς της πούδρας Ti, η οποία οφείλεται στη χρήση διαφορετικών πείρων συγκόλλησης και στην τοποθέτηση της πούδρας στην προωθούμενη ή στην υποχωρούσα πλευρά. Επίσης, μετά τη συγκόλληση η πούδρα που ήταν αρχικά τοποθετημένη στην προωθούμενη πλευρά αναδιανέμεται σε μικρούς κόκκους, ενώ εκείνη που ήταν τοποθετημένη στην υποχωρούσα πλευρά εμφανίζεται σε μεγαλύτερα και πιο συμπαγή κομμάτια.

Τέλος, υπάρχουν παράμετροι που προκαλούν ορισμένες διαφοροποιήσεις στη ροή του υλικού, όπως είναι η γεωμετρία του πείρου. Οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στην κατακόρυφη ροή του υλικού, η οποία παρατηρείται κατά την εφαρμογή της FSW.

Ο Zhao, Lin και συνεργάτες [14] παρατήρησαν ότι όταν χρησιμοποιείται κωνικός πείρος αυτή η ροή δεν είναι αρκετά εμφανής σε σχέση με την περίπτωση, όπου χρησιμοποιείται πείρος με σπείρωμα. Επίσης, στην περίπτωση του κωνικού

πείρου, στο πάνω μέρος της συγκόλλησης παρατηρείται προώθηση του υλικού προς τα κάτω, ενώ στη μέση και το κάτω μέρος της συγκόλλησης παρατηρείται ελάχιστη κάθετη μετατόπιση. Από την άλλη, όταν χρησιμοποιείται πείρος με σπείρωμα το υλικό στην προωθούμενη πλευρά προωθείται προς τα κάτω και ύστερα καταλήγει προς το άνω μέρος της υποχωρούσας πλευράς ακολουθώντας την κίνηση του πείρου. Μια επίσης σημαντική διαφορά είναι η ύπαρξη μιας μικρής τρύπας που δημιουργείται στην περίπτωση του κωνικού πείρου στο κατώτερο μέρος της προωθούμενης πλευράς της συγκόλλησης. Πιστεύεται ενδεχομένως να μην είναι επαρκής η ροή του υλικού κατά τη FSW όταν χρησιμοποιείται κωνικός πείρος. Στην πραγματικότητα υπάρχει ένα ελάττωμα στην περιοχή όπου γίνεται η συγκόλληση όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3 :



Εικόνα 4.3 : (a) συγκόλληση με κωνικό πείρο, (b) συγκόλληση με πείρο οβάλ χωρίς σπείρωμα , (c) συγκόλληση με πείρο με σπείρωμα. [14]

Ο πείρος με σπείρωμα παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ραφής της συγκόλλησης. Κάτω από τις ίδιες προϋποθέσεις, ο πείρος με σπείρωμα παράγει μεγαλύτερη θερμότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες γεωμετρίες πείρων και αυτό βοηθά στην πλαστικοποίηση και ανάδευση του υλικού. Επιπλέον, στην πρώτη περίπτωση (συγκόλληση με κωνικό πείρο) ασκείται και μια επιπλέον δύναμη, η οποία ενεργεί ευεργετικά στη ροή του πλαστικοποιημένου υλικού. [14]

➤ Μοντελοποίηση Ροής Υλικού – Παλαιότερες Μελέτες

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει προκειμένου να βρεθεί ένα μοντέλο που να προβλέπει τη ροή του υλικού κατά τη FSW. Από τους πρώτους που το προσπάθησαν υπήρξε ο Xu [19], ο οποίος ανέπτυξε ένα αριθμητικό μοντέλο για να μελετήσει τα κυρίως θερμομηχανικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν κατά τη FSW.

Ο Zhang και Chen [20], ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο για να εξετάσουν τη ροή του υλικού κάτω από διαφορετικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η ροή του υλικού προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τεχνική πεπερασμένων στοιχείων βασισμένη στη μη γραμμική συνεχή σειρά μηχανικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής τάσης συσχετίζεται με την κατανομή των ζωνών μικροδομής στη συγκόλληση. Παρατηρείται επίσης, ότι υπάρχει σχέση ανάμεσα στη μεταβολή του αξονικού φορτίου του περιανυχνίου και της μεταβολής της ισοδύναμης πλαστικής τάσης. Η ροή του υλικού επιταχύνεται με την αύξηση της μεταφορικής και γωνιακής ταχύτητας του πείρου. Υπάρχει στροβιλισμός στην προωθούμενη πλευρά, ο οποίος αυξάνεται με την αύξηση της μεταφορικής ταχύτητας.

Ο Colegrove και Shercliff [21] μοντελοποίησαν τη ροή του υλικού κατά τη FSW γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο CFD κώδικα. Κατέληξαν στο ότι η ροή του υλικού αλλάζει όταν αλλάζει το σχήμα του πείρου. Επίσης, η περιοχή όπου το μέταλλο πλαστικοποιείται είναι πολύ μικρότερη στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης απ' ό,τι στην υποχωρούσα. Τέλος, το υλικό ακολουθώντας την κίνηση του πείρου εξωθείται στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.

Ο Smith και Bendzsak [22] ανέπτυξαν ένα μοντέλο θερμομηχανικής ροής αναπτύσσοντας τις αρχές της μηχανικής των ρευστών. Χρησιμοποιεί σαν δεδομένα τη γεωμετρία του πείρου, τον τύπο του κράματος, την ταχύτητα περιστροφής και πρόωσης και σαν αποτέλεσμα δίνει το προφίλ της ροής του υλικού και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Το μοντέλο δείχνει ότι δημιουργούνται τρεις περιοχές κάτω από το περιανυχνίο: α) μία περιοχή περιστροφής κάτω ακριβώς από το περιανυχνίο με τη διεύθυνση του εργαλείου συγκόλλησης, β) μία περιοχή όπου το υλικό εξωθείται από την κίνηση του πείρου και γ) μία μεταβατική περιοχή ανάμεσα στις δύο παραπάνω, όπου η ροή του υλικού έχει χαοτική συμπεριφορά.

Ο Arbegast [23] προτείνει ένα μοντέλο για να περιγράψει τις προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες δημιουργούνται ατέλειες κατά την FSW. Το μοντέλο προβλέπει μια κρίσιμη ποσότητα μάζας υλικού, η οποία είναι απαραίτητη για να είναι η ροή πιο ομαλή χωρίς τη δημιουργία ατελειών. Στη μελέτη αυτή προκειμένου να καταλήξουν σε αποτελέσματα, έχουν εισάγει ένα παράγοντα, ο οποίος αναπαριστά το ποσοστό της ατέλειας, καθώς επίσης και τον παράγοντα υλικού, ο οποίος περιγράφει τη ροή του υλικού, λόγω των συνθηκών θερμοκρασίας και τάσεων, κάτω από το περιανχένιο και γύρω από τον πείρο.

Μία άλλη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι η προσομοίωση της ροής του υλικού χρησιμοποιώντας πλαστελίνη [24]. Για να μελετηθεί η ροή του υλικού χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χρώματα πλαστελίνης. Παρατηρήθηκε ότι το υλικό στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης τοποθετείται σε απόσταση περίπου ίση με την ακτίνα του πείρου από τον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης και περίπου στο μέσο του ύψους του πείρου. Το υλικό τοποθετείται στην προωθούμενη περιοχή με χαοτικό τρόπο. Υλικό που δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τον πείρο, ρέει ομαλά γύρω από αυτόν και τοποθετείται στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

5.1.1 Εξοπλισμός Συγκόλλησης

Για να πραγματοποιηθεί η συγκόλλησης τριβής με ανάδευση χρησιμοποιήθηκε φρέζα (εικόνα 5.1) που έχει τροποποιηθεί κατάλληλα για να είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου FSW και βρίσκεται στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Η τράπεζα της φρέζας έχει δυνατότητα μετατόπισης κατά τους άξονες x, y και z. Επιπλέον, είναι δυνατό να δοθεί κλίση στο εργαλείο συγκόλλησης διαφορετική από τις 90°, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία της FSW.

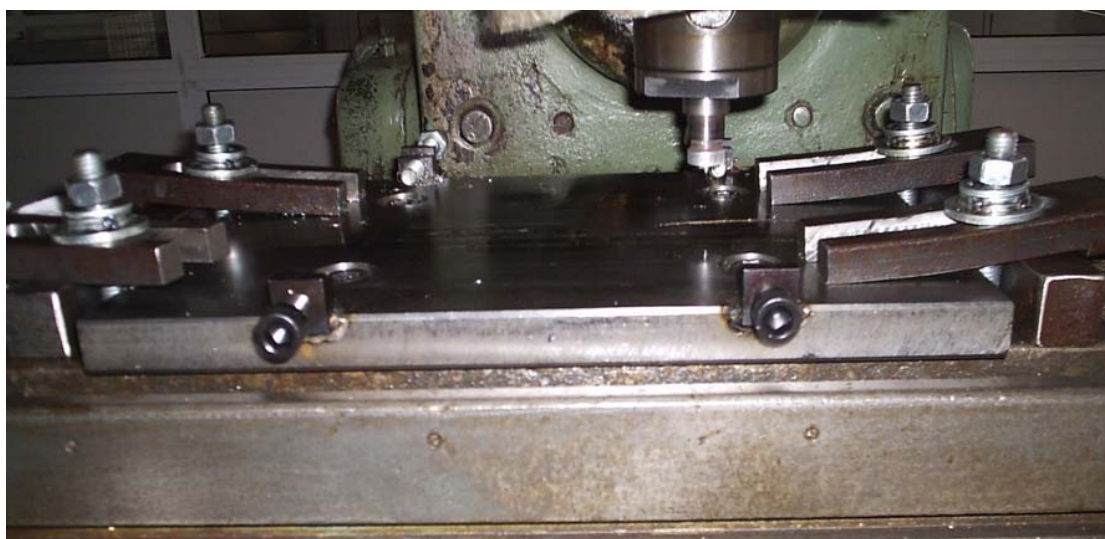


Εικόνα 5.1 : Διάταξη μηχανής συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων τα δοκίμια τοποθετούνται στην τράπεζα της μηχανής και συγκρατούνται ισχυρά από το σύστημα συγκράτησης που φαίνεται

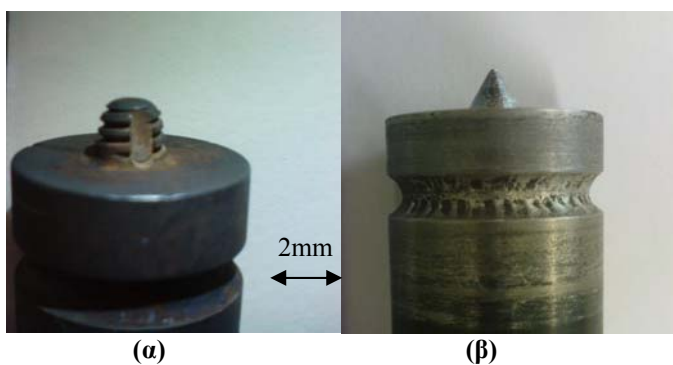
στην εικόνα 5.2. Στη συνέχεια επιλέγονται οι κατάλληλες παράμετροι όπως η ταχύτητα πρόωσης και περιστροφής. Ύστερα, με ειδικούς μοχλούς μετακινείται η τράπεζα κατακόρυφα προς το εργαλείο συγκόλλησης, καθώς και δεξιά ή αριστερά από αυτό, ώστε να εισχωρήσει το εργαλείο στο μέταλλο και να ξεκινήσει η συγκόλληση.

Το εργαλείο συγκόλλησης περιστρέφεται με ταχύτητες περιστροφής από 30 rpm έως 1500 rpm και κινείται με ταχύτητες πρόωσης από 19 mm/min έως 950 mm/min. Σε κάθε κύκλο πειραμάτων χρησιμοποιείται μία ταχύτητα περιστροφής και μία ταχύτητα πρόωσης.



Εικόνα 5.2: Διάταξη συγκράτησης των υπό συγκόλληση στοιχείων στην τράπεζα της μηχανής συγκόλλησης.

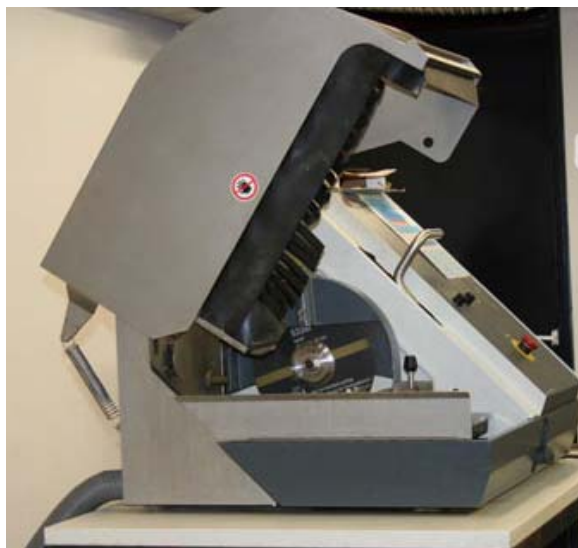
Ο πείρος είναι κωνικού σχήματος (\varnothing : 3,8mm) με ύψος 5,2mm και καταλήγει σε περιανχένιο σχήματος δακτυλίου (\varnothing : 22,9 mm). Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε πείρος με σπείρωμα (\varnothing : 3,4mm) βήματος 0,1 mm με ύψος 4,4 mm και περιανχένιο διαμέτρου 22,4 mm.



Εικόνα 5.3: Χρησιμοποιούμενα εργαλεία συγκόλλησης : (α) πείρος με σπείρωμα και (β) πείρος κωνικού σχήματος.

5.1.2 Κοπή Δοκιμίων

Αφού γίνει η συγκόλληση ακολουθεί η κοπή των δοκιμίων σε διάφορα σημεία που ενδιαφέρουν για περαιτέρω μελέτη. Τα δοκίμια κόπηκαν εγκάρσια στη ραφή σε δισκοτόμο Struers τύπου Discotom 50 (εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4 : Δισκοτόμος Struers τύπου Discotom 50.

5.1.3 Λείανση – Στίλβωση

Για τη μεταλλογραφική παρατήρηση των δειγμάτων απαραίτητη είναι η προετοιμασία της επιφάνειας των προς παρατήρηση δοκιμίων με λείανση και στίλβωση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι η συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers (εικόνα 5.5). Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό. Για την ψύξη του δοκιμίου κατά τη λείανση χρησιμοποιείται σύστημα παροχής νερού.

Για τη διαδικασία της λείανσης ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια : Αρχικά προσαρμόζεται το κατάλληλο χαρτί SiC στη βάση της συσκευής. Χρησιμοποιήθηκαν γυαλόχαρτα μεγέθους 220, 500, 1000, 1200, 2400 και 4000 grit. Έπειτα το δοκίμιο προσαρμόζεται στο σύστημα συγκράτησης δοκιμίων της συσκευής και επιλέγεται η κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 5.5 : Εξοπλισμός λείανσης-στίλβωσης (Struers LaboPol-5) των δοκιμίων στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Αφού το στάδιο της λείανσης ολοκληρωθεί, ακολουθεί η διαδικασία της στίλβωσης. Σε αυτό το στάδιο, χρησιμοποιείται περιστρεφόμενος δίσκος στον οποίο έχει τοποθετηθεί βελούδινο ύφασμα. Ύστερα, εφόσον τα δοκίμια προσαρμοστούν στο σύστημα συγκράτησης του εξοπλισμού, ξεκινά η διαδικασία. Για τη στίλβωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πάστα αλούμινας κοκκομετρίας 1 μ m και 0.1 μ m. Στη συνέχεια, τα δοκίμια ξεπλένονται με νερό και ακετόνη (ή αιθανόλη) και στεγνώνονται με ζεστό αέρα.

5.1.4 Χημική Προσβολή

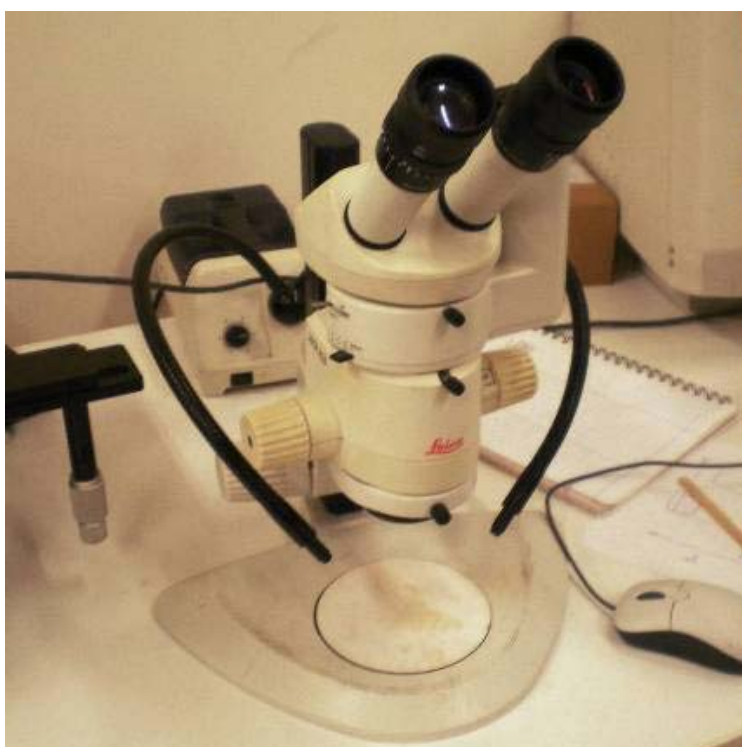
Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στη μεταλλογραφία για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρησή του στο οπτικό μικροσκόπιο.

Για την προσβολή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένο χημικό αντιδραστήριο Poulton's. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν για 4 δευτερόλεπτα στο αντιδραστήριο, του οποίου η χημική σύσταση είναι η παρακάτω :

- 20 ml Poulton's (12 ml HCl, 6 ml HNO₃, 1 ml HF και 1ml H₂O)
- 10 ml HNO₃
- 16 ml διαλύματος 3g Cr₂O₃/10ml H₂O (12ml H₂O+4g Cr₂O₃)

5.1.5 Εξοπλισμός Μακροσκοπικής Παρατήρησης

Για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο LEICA MZ6, 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). Κατά τη διάρκεια της μακροσκοπικής ανάλυσης, υπήρχε η δυνατότητα λήψης φωτογραφιών. Για τη λήψη των φωτογραφιών, τόσο από το στερεοσκόπιο όσο και από το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιήθηκε κάμερα και πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας (Image Pro Plus Image Analysis).



Εικόνα 5.6 : Οπτικό στερεοσκόπιο για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

5.1.6 Εξοπλισμός Μικροσκοπικής Παρατήρησης

Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο LEICA DM ILM (εικόνα 5.7) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς 10x, 20x, 50x και 100x και προσοφθάλμιο φακό

10x. Επίσης, διαθέτει ενσωματωμένες θέσεις για τοποθέτηση οπτικών φίλτρων, τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας (x,y, α-περιστροφή) με δυνατότητα στήριξης φορτίου έως 8kg και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.



Εικόνα 5.7 : Οπτικό μικροσκόπιο για τη μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμών στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

5.1.7 Εξοπλισμός Μικροσκληρομετρήσεων

Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο Wolpert Wilson Instruments Model 402MVD του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι μέτρηση σκληρότητας κατά Vickers. Στη μέθοδο αυτή ο διεισδυτής είναι μια αδαμάντινη πυραμίδα, τετραγωνικής βάσης, της οποίας η γωνία κορυφής είναι 136° .

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

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

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

5.2 Χρησιμοποιηθέν Υλικό

Όλες οι συγκολλήσεις έγιναν σε δοκίμια κράματος αλουμινίου 5083 – H111 πάχους 6mm στα οποία τοποθετήθηκαν σύρματα χαλκού για την παρατήρηση της ροής του υλικού. Σε μία συγκόλληση τοποθετήθηκε σκόνη καρβιδίων βολφραμίου, στην οποία όμως, λόγω της σκληρότητας των καρβιδίων, δεν κατέσται δυνατή η παρατήρηση της ροής του υλικού. Η χημική του σύσταση του AA5083-H111 φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083 :

Στοιχείο	Σύσταση %
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 : Χημική σύσταση του AA5083.

5.3 Σχεδιασμός Πειραμάτων

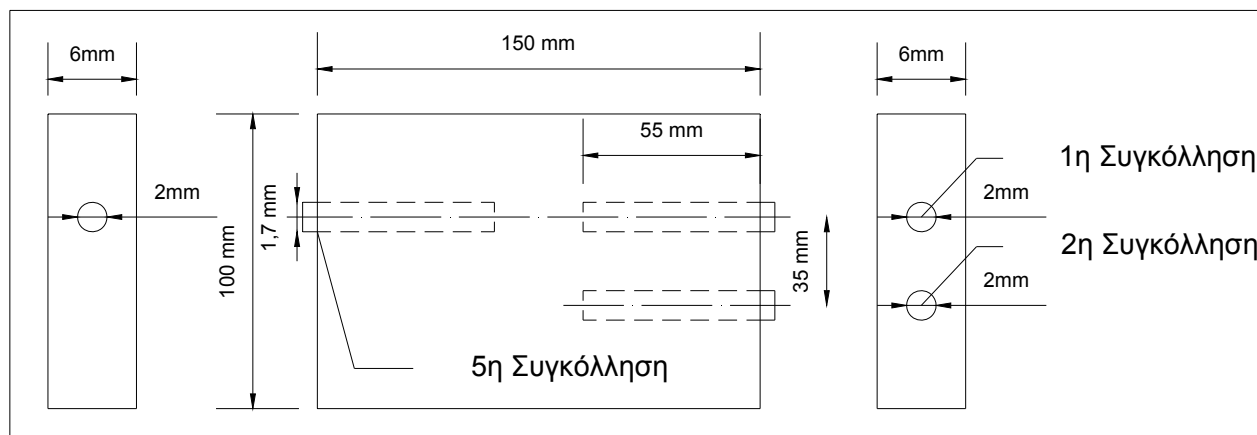
Συνολικά έγιναν έξι περάσματα (βλ. Πίνακα 5.2) πάνω σε πλάκα με τη χρήση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW). Στις τέσσερις συγκολλήσεις χρησιμοποιήθηκε σαν υλικό σήμανσης, για την παρατήρηση της ροής του υλικού κατά την FSW, σύρμα χαλκού διαμέτρου 1,7 mm , ενώ στην πέμπτη σκόνη καρβιδίων βολφραμίου. Το έκτο πέρασμα σε πλάκα, έγινε στο δοκίμιο R, στο οποίο δεν τοποθετήθηκε υλικό σήμανσης και χρησιμοποιήθηκε ως συγκόλλησης αναφοράς για τον έλεγχο της μικροσκληρότητας και τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Οι συγκολλήσεις έγιναν πάνω σε δοκίμια κράματος αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6mm στα οποία ανοίχτηκαν με τρυπάνι οπές διαμέτρου 2mm κατά το διάμηκες και στο μέσο πάχος, ώστε να τοποθετηθεί το υλικό – σήμανση, όπως φαίνεται και στις

εικόνες 5.8 και 5.9. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι των συγκολλήσεων.

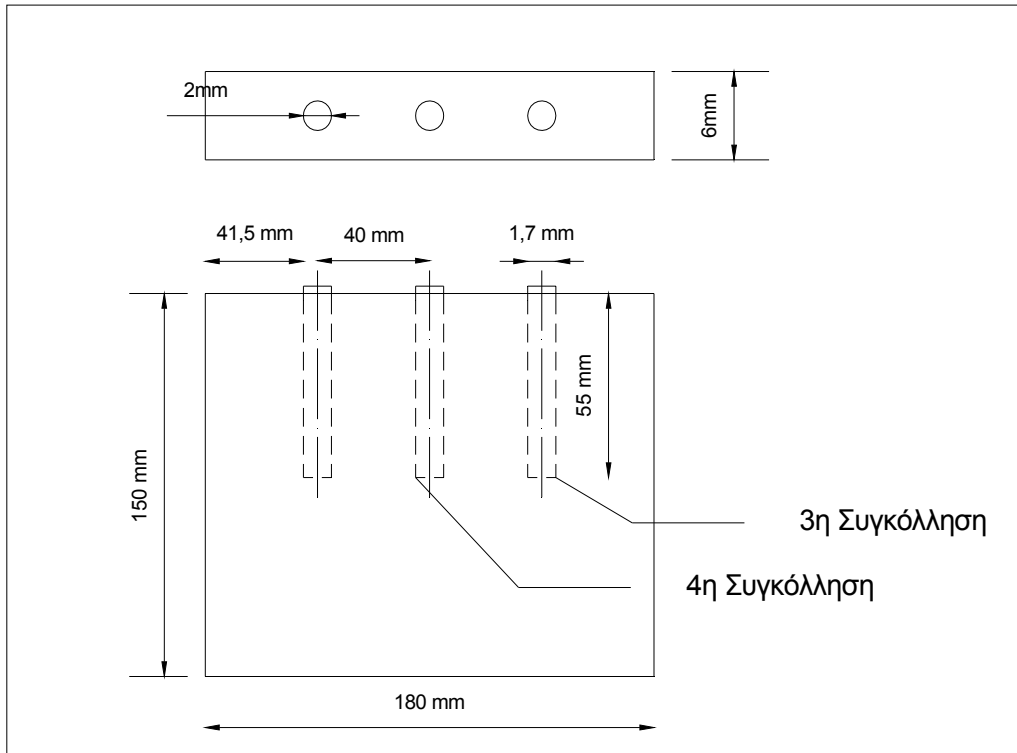
Πίνακας 5.2 : Παράμετροι συγκολλήσεων.

Συγκόλληση	Υλικό Σήμανσης	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)	Ταχύτητα Περιστροφής (RPM)	Γεωμετρία πείρου	Κλίση εργαλείου συγκόλλησης
R	-	85	600	conical	2 μοίρες
1	Cu	75	475	conical	χωρίς
2	Cu	85	475	conical	χωρίς
3	Cu	85	600	conical	2 μοίρες
4	Cu	85	600	screw	2 μοίρες
5	WC	85	475	conical	χωρίς

Οι δύο πρώτες συγκολλήσεις με χαλκό και η συγκόλληση με τα καρβίδια βολφραμίου (5), έγιναν με διεύθυνση κάθετη σε αυτήν της έλασης των δοκιμίων (εικόνα 5.8). Οι συγκολλήσεις 3 και 4 με χαλκό, έγιναν με διεύθυνση παράλληλη σε αυτήν της έλασης των δοκιμίων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.9.

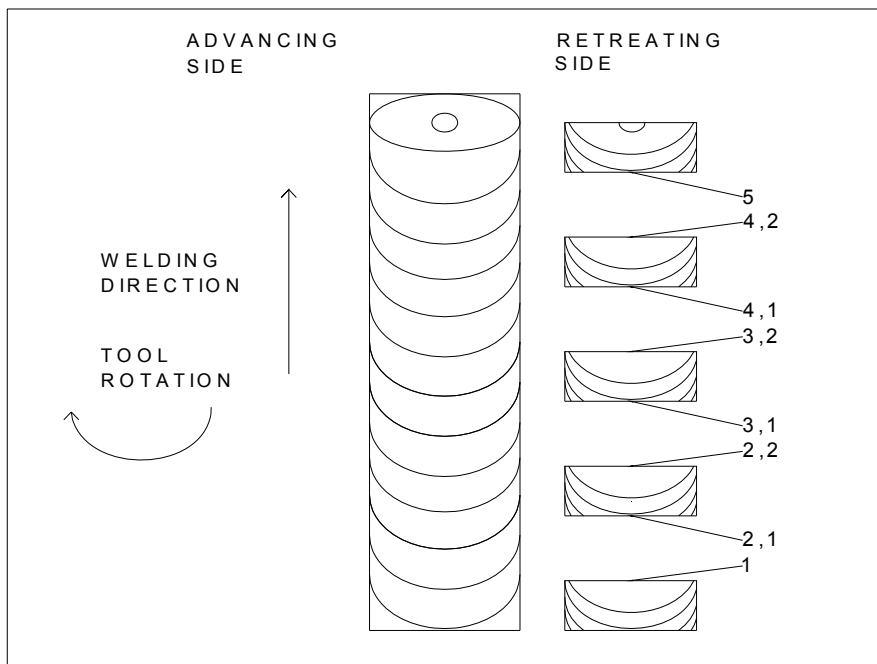


Εικόνα 5.8 : Συγκολλήσεις που έγιναν με διεύθυνση κάθετη σε αυτήν της έλασης των δοκιμίων.



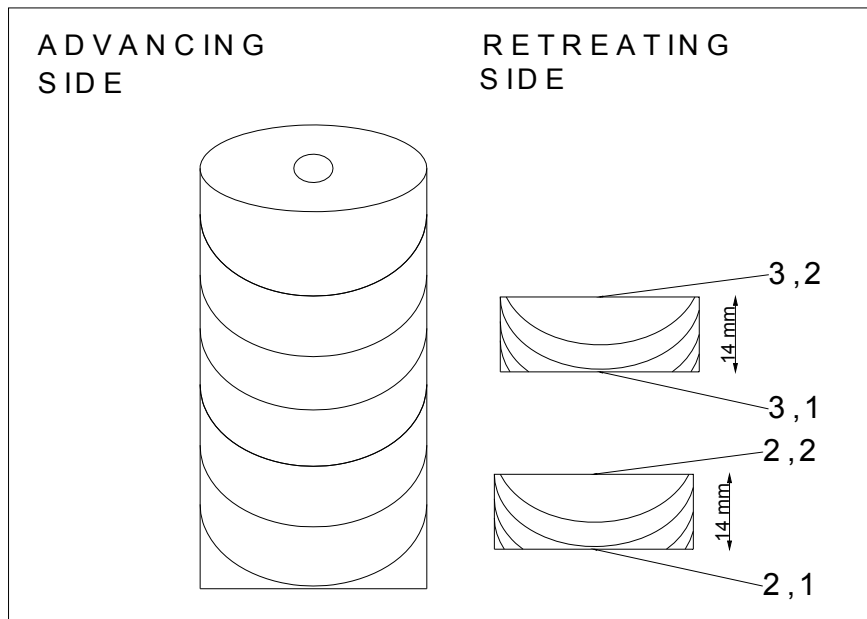
Εικόνα 5.9 : Συγκολλήσεις που έγιναν με διεύθυνση παράλληλη σε αυτήν της έλασης των δοκιμίων.

Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζεται ο τρόπος που επιλέχθηκε για την ονοματολογία των δοκιμίων, ενώ στα σχήματα των εικόνων 5.11, 5.12 και 5.13, παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της δειγματοληψίας των δοκιμίων :



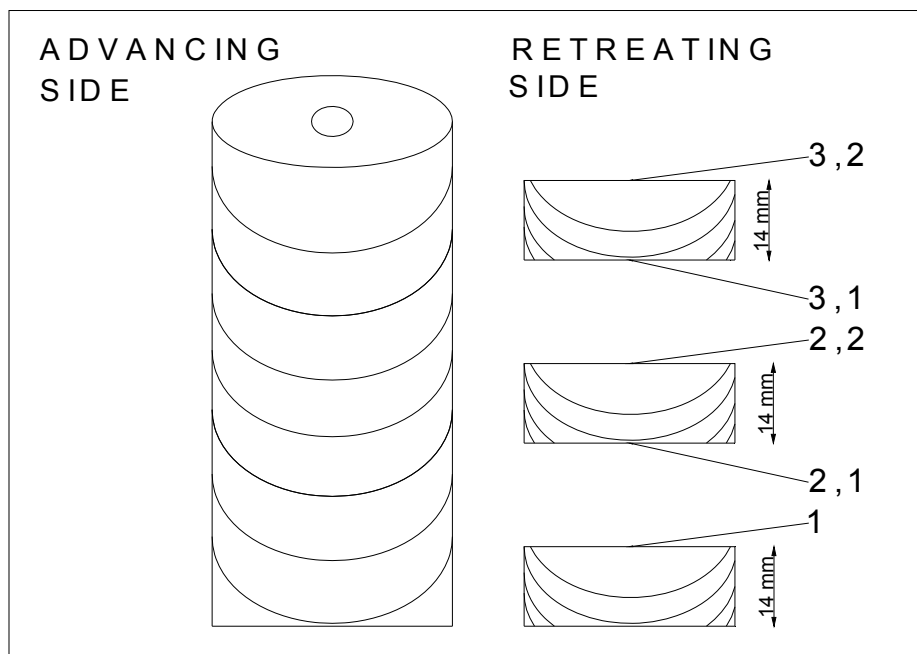
Εικόνα 5.10 : Ονοματολογία δοκιμίων μεταλλογραφίας σύμφωνα με τον τρόπο κοπής τους.

Αναλυτικότερα, για τη συγκόλληση 1, η ονοματολογία των δοκιμών φαίνεται στην εικόνα 5.11 :



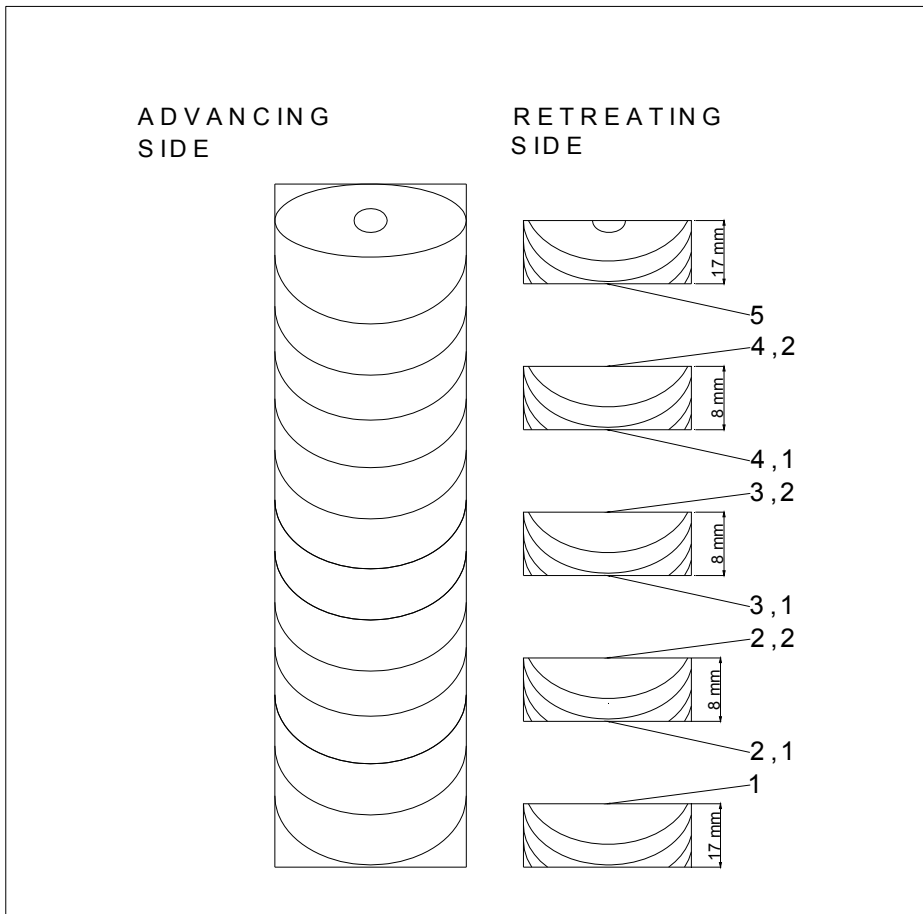
Εικόνα 5.11 : Ονοματολογία δοκιμών μεταλλογραφίας 1^{ης} συγκόλλησης.

Ονοματολογία δοκιμών συγκόλλησης 2 (εικόνα 5.12) :



Εικόνα 5.12 : Ονοματολογία δοκιμών μεταλλογραφίας 2^{ης} συγκόλλησης.

Ονοματολογία δοκιμών συγκόλλησης 3 και 4 (εικόνα 5.13) :



Εικόνα 5.13 : Ονοματολογία δοκιμών μεταλλογραφίας 3^{ης} και 4^{ης} συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

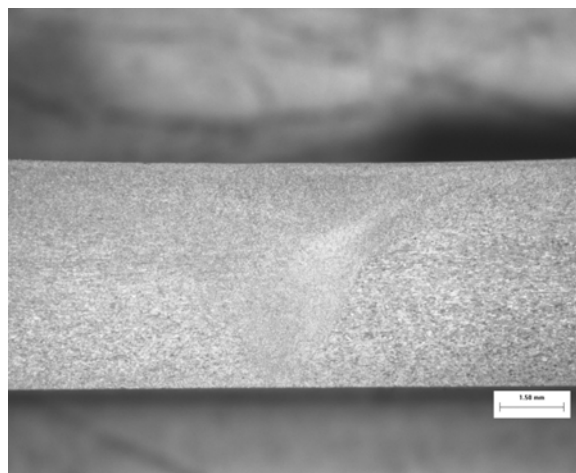
6.1 Μεταλλογραφική Παρατήρηση και Κατανομή Μικροσκληρότητας

Για τη μεταλλογραφική παρατήρηση και την κατανομή μικροσκληρότητας, πραγματοποιήθηκε και πέρασμα σε πλάκα κατά την FSW σε δοκίμιο R, χωρίς υλικό – σήμανσης, ως συγκόλληση αναφοράς, και κάτω από τις βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.2.

6.1.1 Μεταλλογραφική Παρατήρηση

Από τη μακρογραφία του δοκιμίου (εικόνα 6.1.1.1) , παρατηρείται μια περιοχή στο κέντρο της συγκόλλησης, όπου το υλικό είναι πολύ λεπτόκοκκο, η οποία είναι η ζώνη ανάδευσης. Η ζώνη ανάδευσης στις εικόνες του στερεοσκοπίου φαίνεται σαν μια περιοχή πιο φωτεινή σε σχέση με το μητρικό υλικό. Το μέγιστο βάθος και πλάτος της ζώνης ανάδευσης ανταποκρίνονται στις διαστάσεις του εργαλείου συγκόλλησης, γεγονός που αποδεικνύει ότι η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης επηρεάζει αυτή τη ζώνη.

Εκατέρωθεν της ζώνης ανάδευσης, υπάρχει η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ), στην οποία το υλικό έχει κοκκομετρία μεγαλύτερη από εκείνη της ζώνης ανάδευσης και παρουσιάζει έντονη πλαστική παραμόρφωση. Η ΘΜΕΖ της προωθούμενης πλευράς είναι μικρότερη σε έκταση, με σαφή όρια, σε αντίθεση με την ΘΜΕΖ της υποχωρούσας πλευράς. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) βρίσκεται μεταξύ μετάλλου βάσης και της ΘΜΕΖ. Πρόκειται για την περιοχή η οποία επηρεάζεται από τη θερμότητα της συγκόλλησης, καθώς αυτή διαχέεται στο υλικό. Στη ζώνη αυτή, το μέγεθος των κόκκων είναι αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο της ΘΜΕΖ και μικρότερο από εκείνο του μετάλλου βάσης. Τα όρια ανάμεσα σε ΘΕΖ και ΘΜΕΖ είναι δυσδιάκριτα.

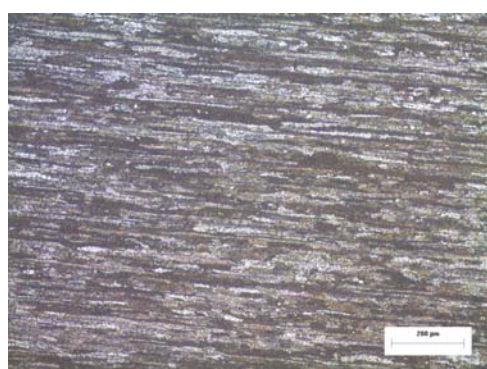


Εικόνα 6.1.1.1 : Μακρογραφία FSW σε κράμα AA5083.

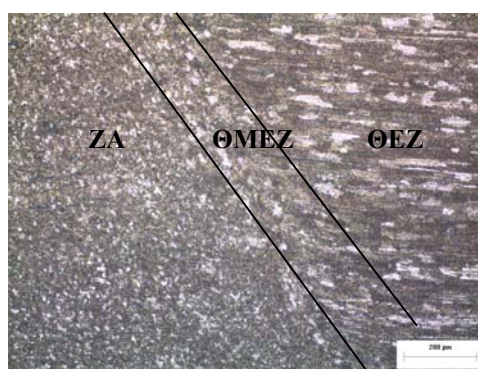
Στην πρώτη μικρογραφία της εικόνας 6.1.1.2(α), φαίνεται η μικροδομή του μετάλλου βάσης (AA5083), το οποίο αποτελείται από επιμηκυσμένους λόγω έλασης κόκκους.

Στη δεύτερη μικρογραφία (εικόνα 6.1.1.2(β)), παρατηρούνται οι εξής ζώνες συγκόλλησης : η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) στα δεξιά, η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ) στο κέντρο και η ζώνη ανάδευσης (ΖΑ) στα αριστερά.

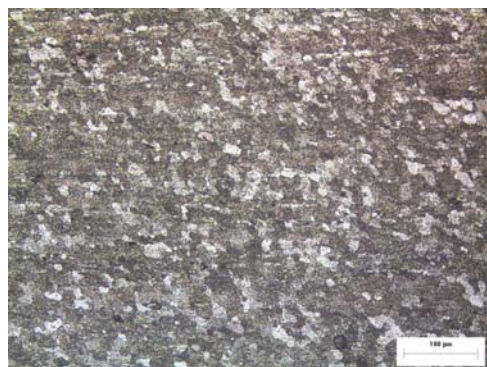
Στην τρίτη μικρογραφία (εικόνα 6.1.1.2(γ)), φαίνεται η ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης. Σε αυτή την περιοχή οι κόκκοι του μετάλλου είναι ισαξονικοί και αρκετά μικρότεροι από τους κόκκους του μετάλλου βάσης.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 6.1.1.2 : Μικροδομές FSW σε κράμα AA5083: (α) Μέταλλο βάσης, (β) ΘΕΖ στα δεξιά, ΘΜΕΖ στο κέντρο και ΖΑ στα αριστερά, (γ) ζώνη ανάδευσης συγκόλλησης.

Η πιο λεπτόκοκκη μικροδομή παρατηρείται στον πυρήνα της συγκόλλησης. Καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν την περιοχή, συναντώνται όλο και πιο μεγάλου μεγέθους κόκκοι, φτάνοντας στην περιοχή του μετάλλου βάσης, όπου και συναντώνται οι αρχικοί επιμηκυσμένοι λόγω έλασης κόκκοι.

6.1.2 Κατανομή Μικροσκληρότητας

Οι μικροσκληρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση της σκληρότητας του δοκιμίου R πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της συγκόλλησης, σε απόσταση 1,5 mm από την επιφάνεια συγκράτησης. Ακολουθεί το διάγραμμα με τις τιμές των μικροσκληρομετρήσεων που μετρήθηκαν κατά μήκος της συγκόλλησης (σχήμα 6.1.2.1). Στον x-άξονα βρίσκεται η απόσταση δεξιά και αριστερά από το κέντρο συγκόλλησης σε μm και στον y-άξονα βρίσκεται η τιμή της μικροσκληρότητας σε HV0.3. Παρατηρείται πως η τιμή των μικροσκληρομετρήσεων κυμαίνεται σε εύρος από 70-89 HV για το δοκίμιο.

Στη ζώνη ανάδευσης η μικροσκληρότητα πέφτει ελάχιστα σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Μεγαλύτερη πτώση παρατηρείται στη ΘΕΖ της AS. Το μέταλλο βάσης έχει τις αναμενόμενες τιμές (90-95 HV0.3).



Σχήμα 6.1.2.1: Σκληρότητα σε HV0.3 οριζόντια της συγκόλλησης, όπου AS προωθούμενη πλευρά και RS υποχωρούσα πλευρά.

6.2 Παρατήρηση της Ροής του Υλικού κατά τη FSW

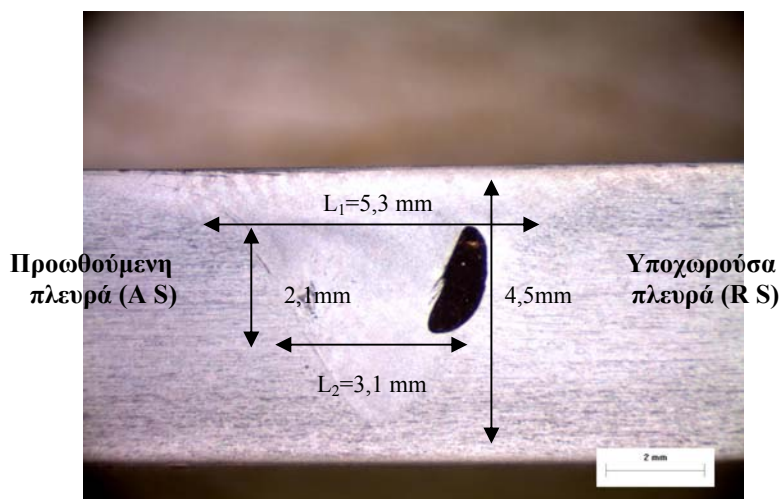
Για τη μελέτη της ροής του υλικού κατά την FSW έγινε παρατήρηση με χρήση οπτικού στερεοσκοπίου και οπτικού μικροσκοπίου, κυρίως στην περιοχή της ζώνης ανάδευσης.

Πρώτη Συγκόλληση

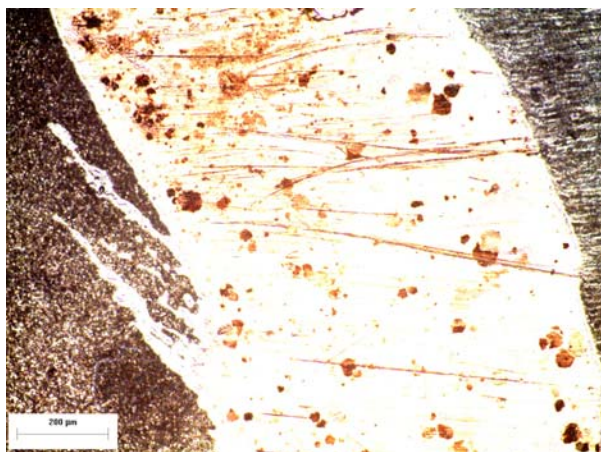
Στην πρώτη συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε κεφαλή επίπεδου περιαιχενίου με κωνικό πείρο και το εργαλείο συγκόλλησης δεν είχε κλίση. Η ταχύτητα πρόωσης ήταν 75 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής 475 RPM. Η ροή του υλικού παρατηρείται στις ακόλουθες μακρογραφίες και μικρογραφίες, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες :

Δοκίμιο 2,1

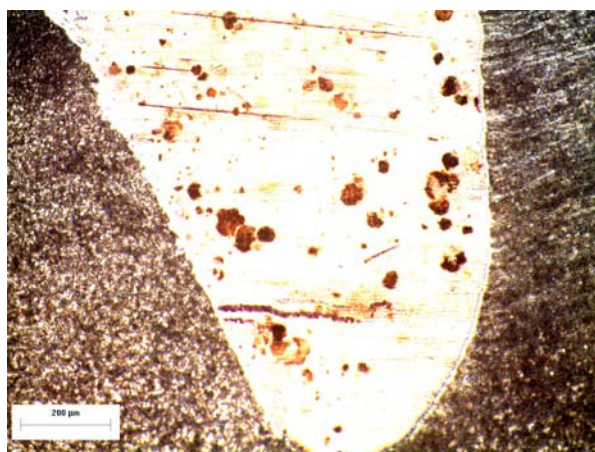
Από τη μακρογραφία του δοκιμίου 2,1 (εικόνα 6.2.1) παρατηρείται ότι ο χαλκός είναι σε τέτοιο σημείο, ώστε να επηρεάζεται αποκλειστικά από την κίνηση του πείρου. Εξετάζοντας παράλληλα και τις μικρογραφίες του δοκιμίου (εικόνα 6.2.2, 6.2.3), παρατηρείται ότι ο χαλκός έχει αποκτήσει οβάλ σχήμα, καθώς ακολουθεί την κίνηση του πείρου, ο οποίος τον εξωθεί προς την υποχωρούσα πλευρά (retreating side). Στο μέσο τμήμα του χαλκού έχουν σχηματιστεί ροϊκές γραμμές που ξεχωρίζουν από τη μάζα του χαλκού και στρέφονται προς το κάτω μέρος της συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2.2.



Εικόνα 6.2.1 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,1.



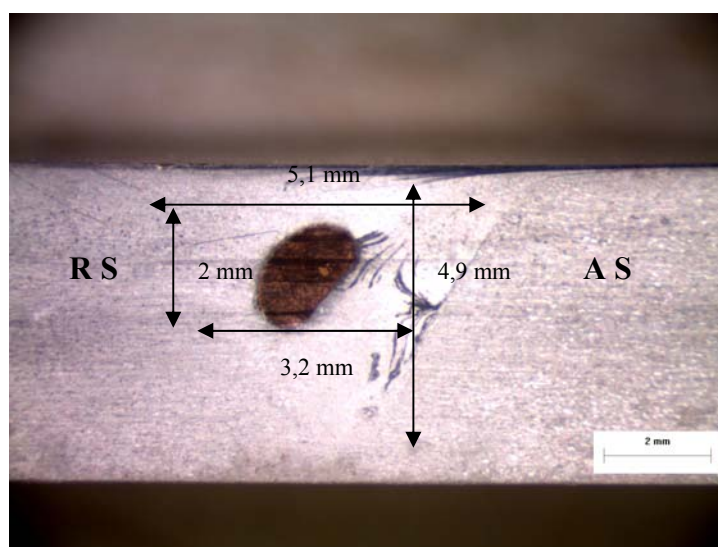
Εικόνα 6.2.2 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1 στην οποία απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



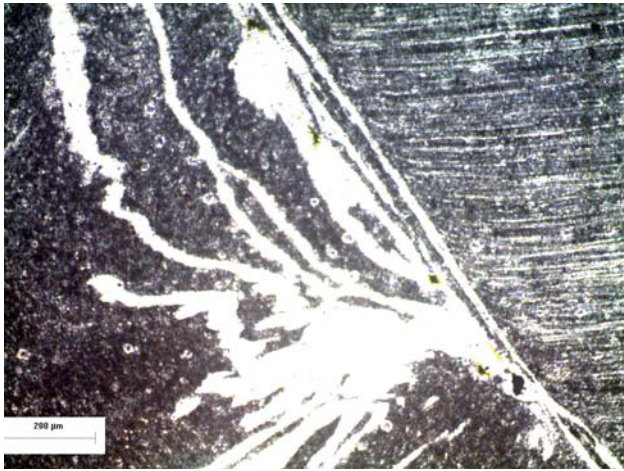
Εικόνα 6.2.3 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1 στην οποία απεικονίζεται μέρος της ροής του χαλκού.

Δοκίμιο 2,2

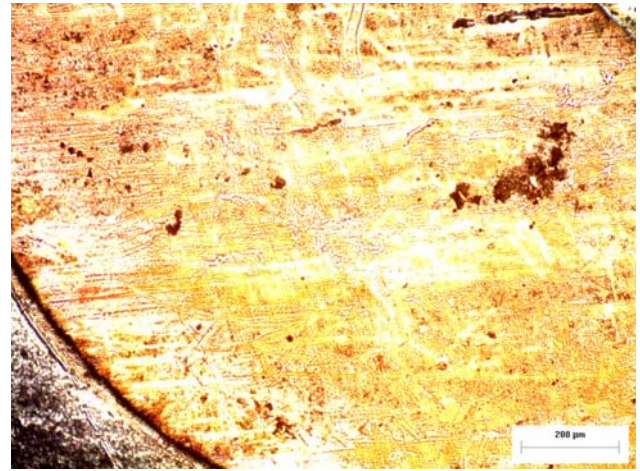
Από τη μακρογραφία του δοκιμίου 2,2 (εικόνα 6.2.4) παρατηρείται ότι ο πείρος δεν έχει επηρεάσει αρκετά το χαλκό, ο οποίος διατηρεί τη συμπαγή του μάζα (εικόνα 6.2.4,6.2.6) έχοντας μία τάση για εξώθηση στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Επιπλέον, ο πείρος καθώς κινείται αποκολλά μέρη από το χαλκό και τα εναποθέτει στην προωθούμενη πλευρά από πάνω προς τα κάτω. Τα μέρη του υλικού που εξωθούνται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης φαίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια στην εικόνα 6.2.5, όπως και η μετάβαση της ζώνης ανάδευσης (ZA) στην TMAZ στην προωθούμενη πλευρά.



Εικόνα 6.2.4 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,2.



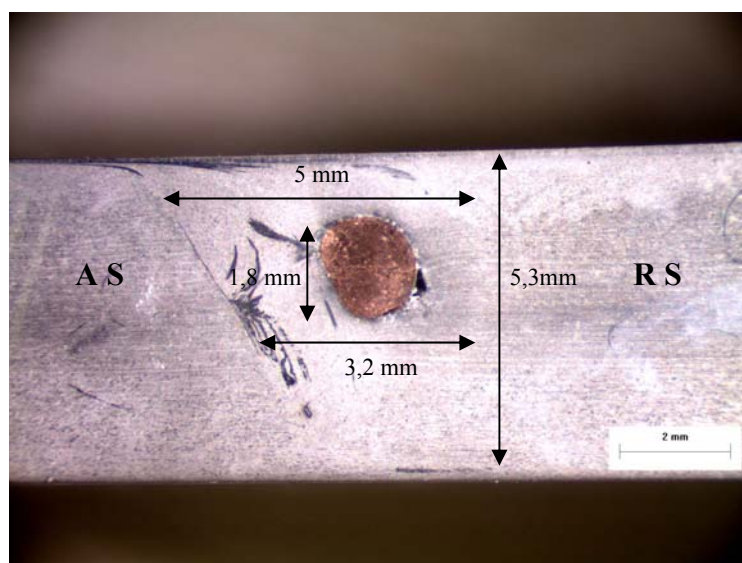
Εικόνα 6.2.5 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου καθώς και η μετάβαση από τη ΖΑ στην ΤΜΑΖ της προωθούμενης πλευράς της συγκόλλησης.



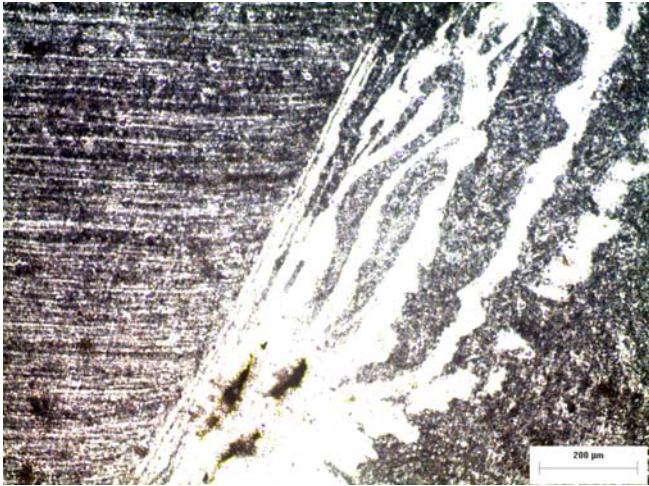
Εικόνα 6.2.6 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.

Δοκίμιο 3,1

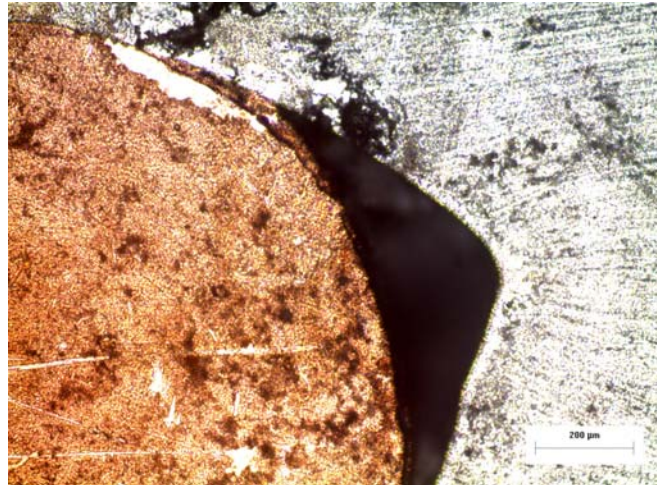
Παρόμοια ροή του υλικού με το δοκίμιο 2,2 παρατηρείται στο δοκίμιο 3,1 (εικόνα 6.2.7), όπου ο χαλκός μένει σχεδόν ακίνητος χωρίς να επηρεάζεται από την περιστροφική κίνηση. Παρ' όλα αυτά, μέρη του χαλκού αποκολλώνται με την κίνηση του πείρου και τοποθετούνται προς την προωθούμενη πλευρά σε διάφορα σημεία (εικόνα 6.2.8). Συγκεκριμένα, ο πείρος παρασύρει σωματίδια του χαλκού από την υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης και τα τοποθετεί στην προωθούμενη ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω ολοκληρώνοντας μια περιστροφή.



Εικόνα 6.2.7 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,1.



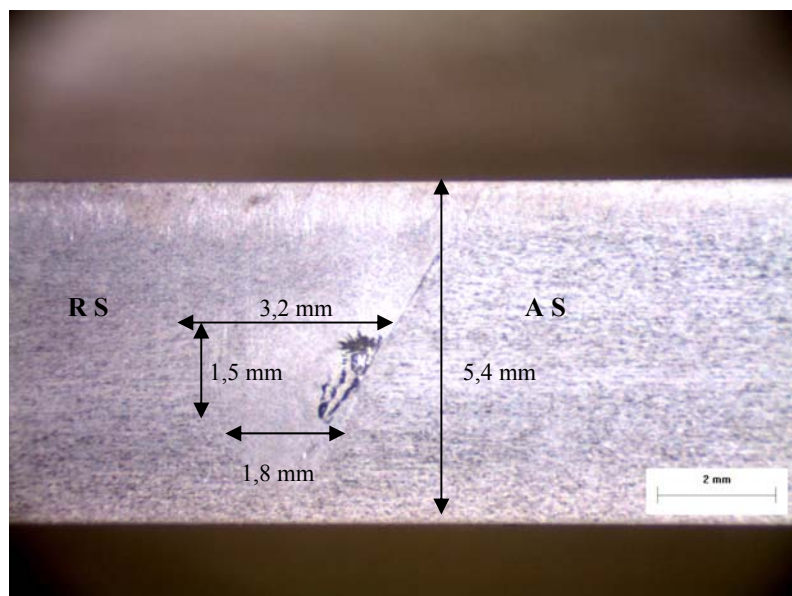
Εικόνα 6.2.8 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου καθώς και η μετάβαση από τη ΖΑ στην ΤΜΑΖ της προωθούμενης πλευράς της συγκόλλησης.



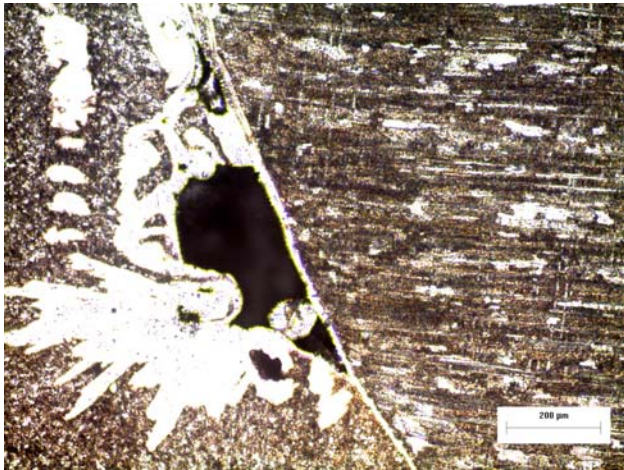
Εικόνα 6.2.9 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελάττωμα της FSW.

Δοκίμιο 3,2

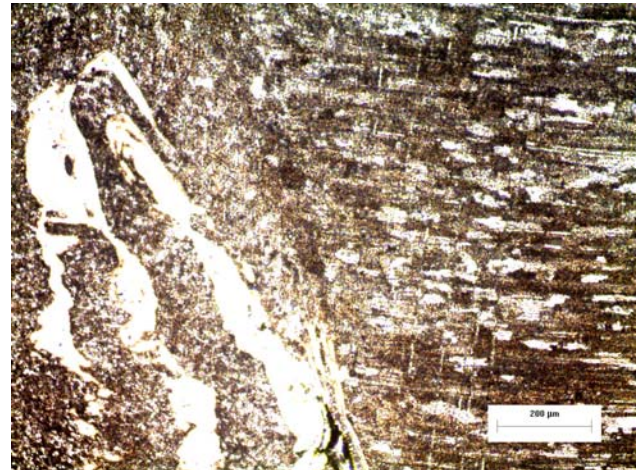
Στο δοκίμιο 3,2 (εικόνα 6.2.10) υπάρχουν υπολείμματα χαλκού τα οποία ακολουθώντας την κίνηση του πείρου εξωθούνται στην προωθούμενη πλευρά (εικόνα 6.2.12). Ακόμη, στην εικόνα 6.2.11 απεικονίζεται ατέλεια που δημιουργήθηκε κατά την FSW.



Εικόνα 6.2.10 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,2



Εικόνα 6.2.11 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελάττωμα της FSW.



Εικόνα 6.2.12 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου και μετάβαση από τη ΖΑ στην ΤΜΑΖ της προωθούμενης πλευράς.

Όπως παρατηρείται και από τα σχήματα απεικόνισης της ροής υλικού κατά την FSW. Ο χαλκός επηρεάζεται αποκλειστικά από την κίνηση του πείρου. Συγκεκριμένα, ο χαλκός αρχικά έχει αποκτήσει οβάλ σχήμα (εικόνα 6.2.1) ακολουθώντας την κίνηση του πείρου κατά τη συγκόλληση και εξωθείται προς την υποχωρούσα πλευρά. Καθώς η συγκόλληση εξελίσσεται, το σχήμα του χαλκού γίνεται πιο κυκλικό και μεταφέρεται στο κέντρο της συγκόλλησης (εικόνα 6.2.7). Επιπλέον, στα παραπάνω δοκίμια, μικρά σωματίδια έχουν αποκολληθεί από το συμπαγές τμήμα του χαλκού και έχουν αναμειχθεί με μέρος του κράματος του αλουμινίου, το οποίο αποτελεί τα σκούρα σημεία στις παραπάνω εικόνες, δίνοντας στοιχεία για τη ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση. Παρατηρείται ότι ο χαλκός με το αλουμίνιο περιστρέφονται μαζί με τον πείρο, ο οποίος τα «παρασύρει» από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης και ύστερα τα τοποθετεί σε περιοχή κατώτερη της αρχικής τους, πίσω ακριβώς από τον πείρο, καθώς αυτός ολοκληρώνει μία περιστροφή. (εικόνες 6.2.5, 6.2.8 και 6.2.12).

Στα παραπάνω δοκίμια δεν παρατηρούνται δίνες και χαοτική δυναμική ανάμειξη, σε αντίθεση με την παρατήρηση των πειραμάτων των Guerra[10] και Ying Li[13] αντίστοιχα, καθότι υπάρχουν διαφορές στις συνθήκες συγκόλλησης. Υπάρχει συμφωνία όμως με τον Colligan[15], αναφορικά με το δοκίμιο 2,1, ο οποίος παρατηρεί εξώθηση του υλικού από την προωθούμενη πλευρά στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.

Από τις μακρογραφίες των δοκιμίων (εικόνες 6.2.1, 6.2.4 και 6.2.7) παρατηρείται ότι η διασπορά της ροής του υλικού καταλαμβάνει μεγάλη περιοχή της ζώνης ανάδευσης. Συγκεκριμένα, από μετρήσεις που έγιναν στα δοκίμια

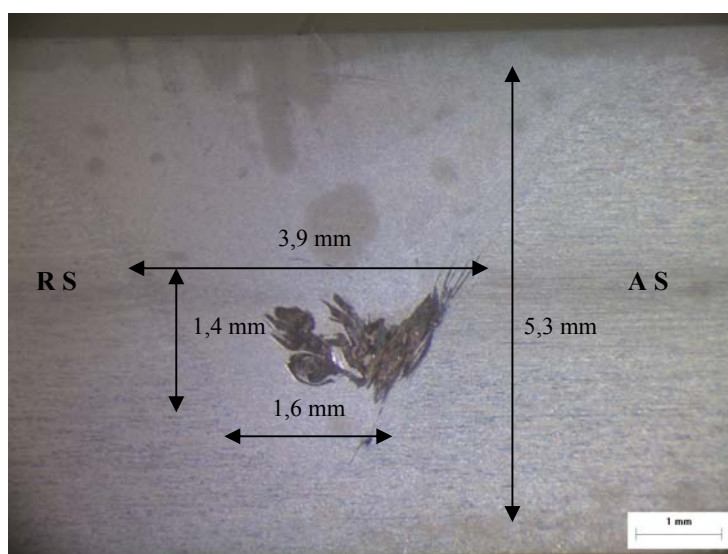
παρατηρείται ότι το εύρος του πυρήνα συγκόλλησης στο πάνω μέρος της συγκόλλησης κυμαίνεται από 5 έως 5,3 mm, ενώ στο κάτω μέρος της συγκόλλησης από 3,1 έως 3,2 mm. Το εύρος της διασποράς της ροής του υλικού καθ' ύψος κυμαίνεται από 1,8 έως 2,1 mm.

✚ Δεύτερη Συγκόλληση

Στη δεύτερη συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε πείρος κωνικής γεωμετρίας και το εργαλείο συγκόλλησης δεν είχε κλίση, ενώ η ταχύτητα πρόωσης ήταν 85 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής ήταν 475 RPM. Τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής μελέτης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες :

Δοκίμιο 1

Από τη μακρογραφία του δοκιμίου 1 (εικόνα 6.2.13) είναι εμφανές ότι ο χαλκός βρίσκεται σε τέτοιο βάθος ώστε η διασπορά του να έχει επηρεαστεί από την κίνηση του πείρου. Επομένως, καθώς ο πείρος περιστρέφεται «παρασύρει» υλικό στην υποχωρούσα πλευρά (η διασπορά σταματάει στα όρια ZA και ΘΜΕΖ). Από τις μικρογραφίες του δοκιμίου 1 (εικόνες 6.2.14 και 6.2.15), παρατηρείται η ανάμειξη του χαλκού και του αλουμινίου, η οποία συνιστά μια χαοτική δυναμική ανάμειξη. Επίσης, στις εικόνες 6.2.13 και 6.2.14 παρατηρείται η τάση του χαλκού για εξώθηση σε ανώτερα σημεία της συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά, καθώς περιστρέφεται μαζί με τον πείρο.



Εικόνα 6.2.13 : Μακρογραφία δοκιμίου 1.



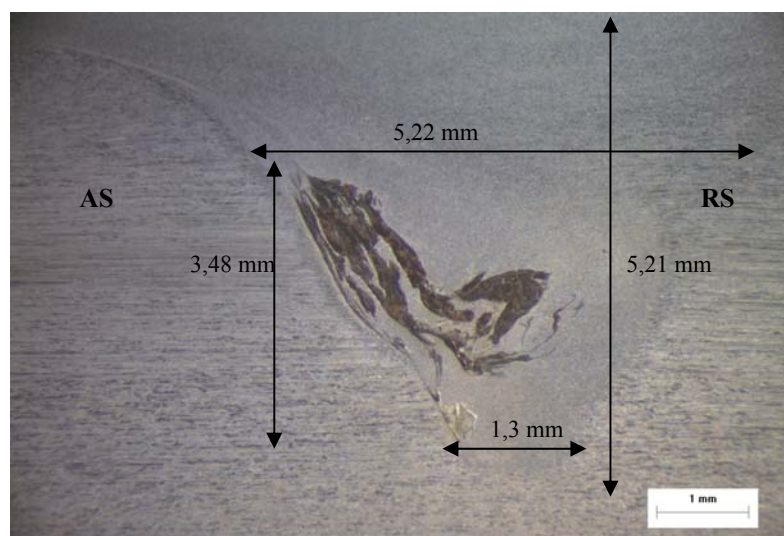
Εικόνα 6.2.14 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού καθώς και η μετάβαση από τη ΖΑ στην ΤΜΑΖ της προωθούμενης πλευράς.



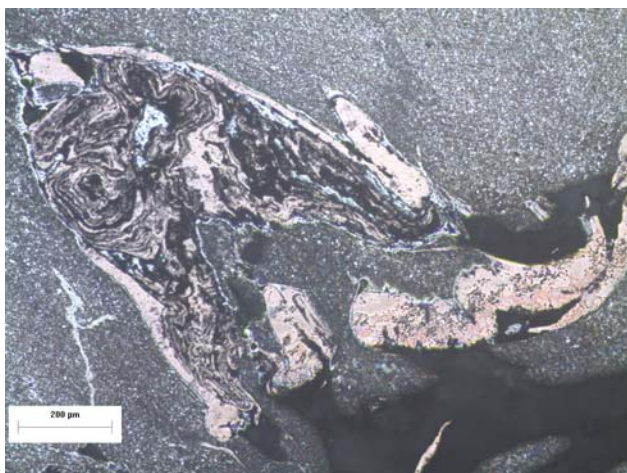
Εικόνα 6.2.15 : Μικρογραφία δοκιμίου 1 όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού που συνιστά μια χαοτική δυναμική ανάμειξη.

Δοκίμιο 2,1

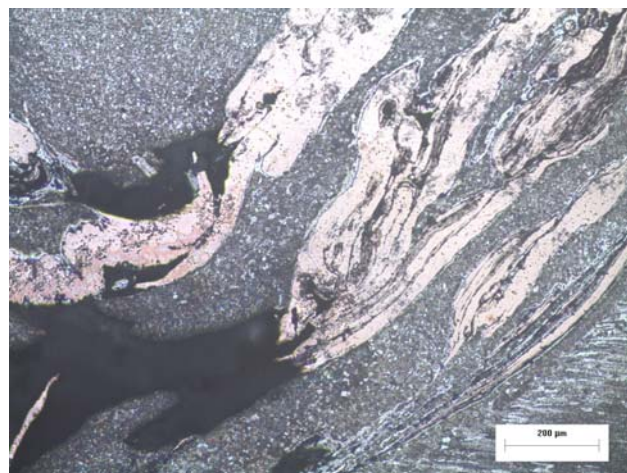
Στο δοκίμιο 2,1 (εικόνα 6.2.16) παρατηρείται μεγάλη διασπορά του χαλκού, καθώς καταλαμβάνει μεγάλο μέρος της ζώνης ανάδευσης. Με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω τριβής, η περιοχή έχει υποστεί πλαστικοποίηση και με αυτόν τον τρόπο ο πείρος, καθώς κινείται, εξωθεί το χαλκό σε ανώτερο σημείο της συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά. Από τις εικόνες 6.2.17 και 6.2.18 παρατηρείται περίπλοκη ροή του υλικού που συνιστά μια χαοτική δυναμική ανάμειξη. Επίσης, παρατηρούνται εναλλαγές χαλκού - αλουμινίου και σημεία ατελειών που απεικονίζονται με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 6.2.16 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,1.



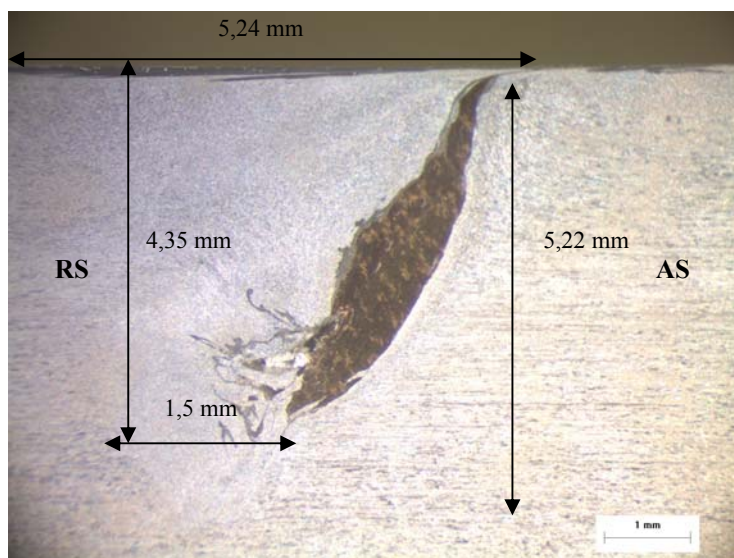
Εικόνα 6.2.17 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού η οποία, δημιουργεί μια χασοτική δυναμική ανάμειξη.



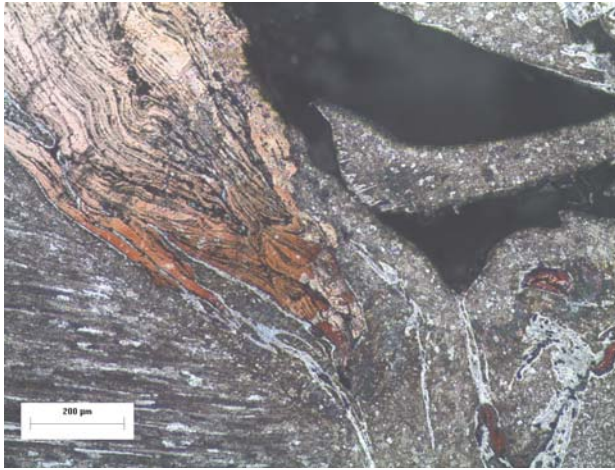
Εικόνα 6.2.18 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελαττώματα που δημιουργήθηκαν κατά τη συγκόλληση.

Δοκίμιο 2,2

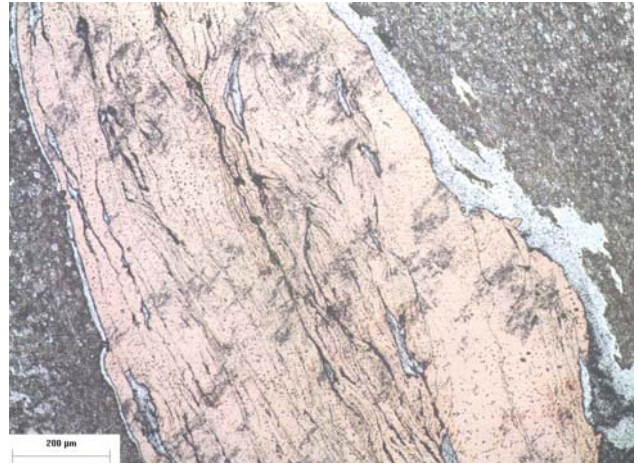
Το δοκίμιο 2,2 (εικόνα 6.2.19) βρίσκεται σε τέτοιο σημείο, ώστε να επιδρά πάνω του ο πείρος σε μεγάλο ποσοστό και το περιανυχένιο σε μικρότερο. Στο πάνω μέρος, όπου επιδρά το περιανυχένιο, παρατηρείται ένα πιο μακρόστενο σχήμα και αυτό γιατί αναδεύεται ευκολότερα, επειδή στην περιοχή ακριβώς κάτω από το περιανυχένιο αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες λόγω τριβής. Το μακρόστενο αυτό σχήμα καταλήγει σε ροϊκή γραμμή ακολουθώντας την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης, καθώς φτάνει το πάνω μέρος της συγκόλλησης. Στο κάτω μέρος επιδρά ο πείρος σχηματίζοντας γραμμές, οι οποίες κατευθύνονται προς την υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης (εικόνα 6.2.20).



Εικόνα 6.2.19 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,2.



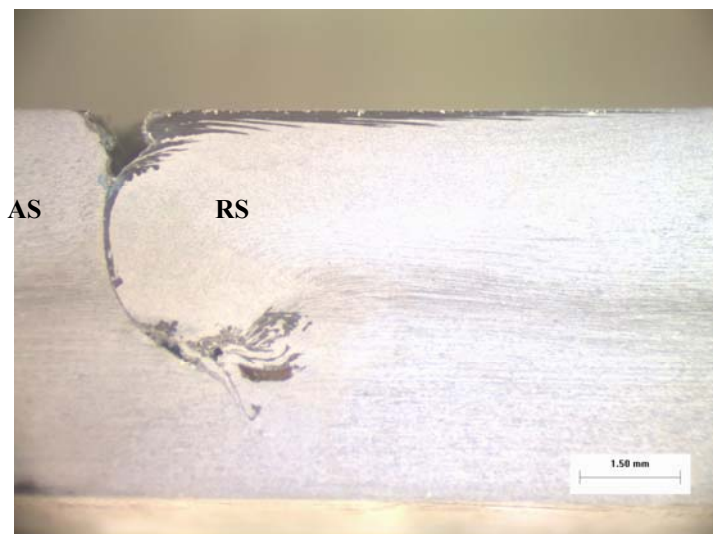
Εικόνα 6.2.20 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελαττώματα της συγκόλλησης.



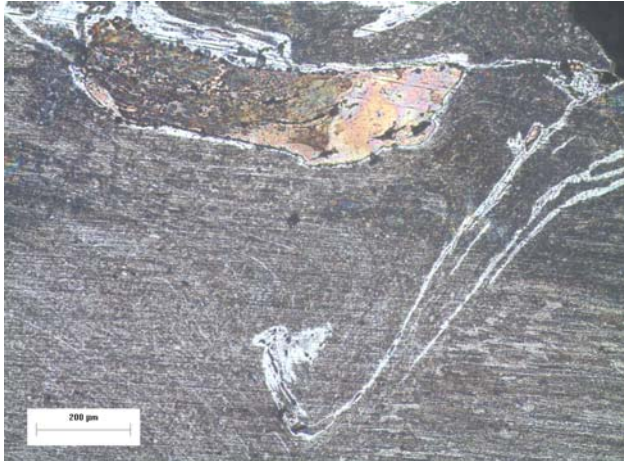
Εικόνα 6.2.21: Μικρογραφία δοκιμίου 2,2 όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.

Δοκίμιο 3,1

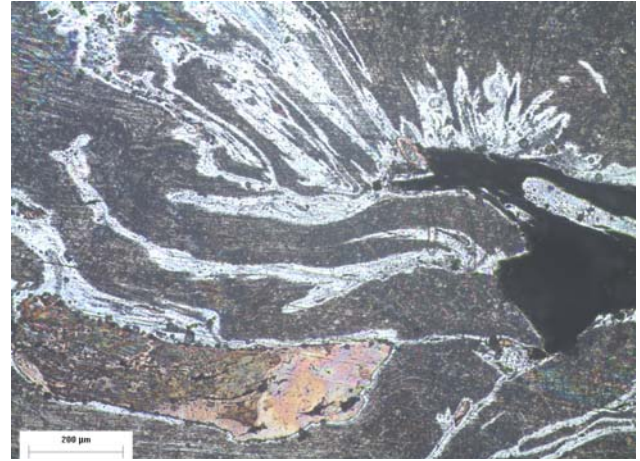
Στο δοκίμιο 3,1 παρατηρείται ατέλεια στο πάνω μέρος της συγκόλλησης (εικόνα 6.2.22) και συνεπώς δεν μπορούμε να βγάλουμε πολλά συμπεράσματα για τη ροή του υλικού. Παρ' όλα αυτά, η ροή του υλικού έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τη ροή του υλικού των παραπάνω δοκιμίων. Συγκεκριμένα, υλικό από την υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης «παρασύρεται» με την κίνηση του πείρου και τοποθετείται στην προωθούμενη πλευρά. Κάτω από το περιουχένιο παρατηρείται ότι ο χαλκός έχει την τάση να κινηθεί προς την υποχωρούσα πλευρά. Στις εικόνες 6.2.23 και 6.2.24, παρατηρούνται μικρές δίνες και γραμμές που σχηματίζονται λόγω της κίνησης του πείρου.



Εικόνα 6.2.22 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,1.



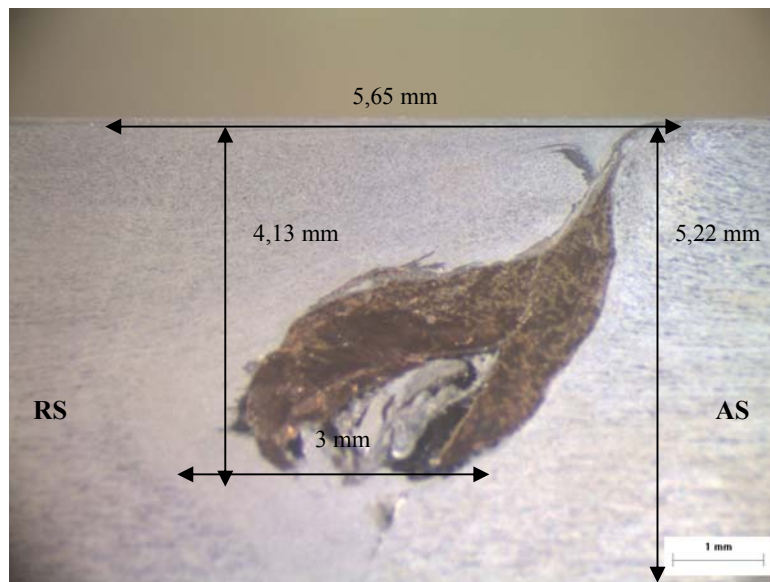
Εικόνα 6.2.23 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.24 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού – αλουμινίου, καθώς και ελαττώματα της FSW.

Δοκίμιο 3,2

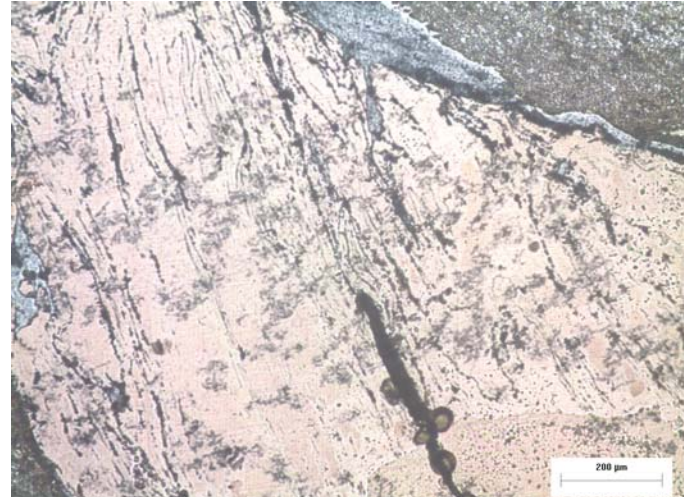
Στο δοκίμιο 3,2 (εικόνες 6.2.25, 6.2.26 και 6.2.27) η ροή του υλικού, επηρεάζεται κυρίως από την κίνηση του περιανυχνίου, έχοντας ένα κυκλικό σχήμα με κενό, το οποίο καλύπτεται από αλουμίνιο στο κάτω μέρος, ενώ στο πάνω καταλήγει σε πιο μακρόστενο σχήμα (εικόνα 6.2.26). Επίσης παρατηρείται ότι το υλικό σήμανσης διασπείρεται σε πολύ μεγάλη έκταση εντός της ζώνης ανάδευσης.



Εικόνα 6.2.25 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,2.



Εικόνα 6.2.26 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.27 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.

Συμπερασματικά, από την παρατήρηση των μακρογραφιών και μικρογραφιών των δοκιμίων, παρατηρείται ότι ο χαλκός είναι τοποθετημένος στο αλουμίνιο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να δημιουργούνται τρεις περιοχές : η κατώτερη περιοχή της συγκόλλησης (δοκίμιο 1), η μεσαία (δοκίμιο 2,1 και 2,2) και η ανώτερη (δοκίμιο 3,1 και 3,2). Αναλυτικότερα παρατηρούμε τα εξής :

- Στην κατώτερη περιοχή της συγκόλλησης (εικόνα 6.2.13), το υλικό έχει συγκεντρωθεί κυρίως στην προωθούμενη πλευρά, όπου και τείνει να απλωθεί προς ανώτερη θέση. Αντίθετα, προς την υποχωρούσα, ο χαλκός δεν έχει μεγάλη διασπορά, με μορφή που μπορεί να θεωρηθεί ως κυκλική. Επίσης, φαίνεται ότι ένα μέρος του υλικού κατευθύνεται προς την υποχωρούσα πλευρά.
- Στη μεσαία περιοχή της συγκόλλησης (εικόνα 6.2.16 και εικόνα 6.2.19), το υλικό προωθείται προς τα πάνω και έχει μετατοπιστεί προς την προωθούμενη περιοχή παίρνοντας διαδοχικά μακρόστενο και σχετικά ομοιόμορφο σχήμα. Παρατηρείται επίσης πως υπάρχουν μερικά κενά του χαλκού που καλύπτονται από το μητρικό υλικό (αλουμίνιο).
- Τέλος, στην ανώτερη περιοχή (εικόνα 6.2.22 και εικόνα 6.2.25), το υλικό έχει ημικυκλικό σχήμα με κενό το οποίο καλύπτεται από αλουμίνιο. Επίσης, η συγκέντρωση του περισσότερου υλικού παρατηρείται στην προωθούμενη πλευρά.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στη ροή του υλικού στις 3 αυτές περιοχές οφείλονται στην επίδραση που έχουν σε κάθε περιοχή ο πείρος, το περιαιχένιο και η θερμοκρασία.

Συγκεκριμένα, στο πάνω μέρος της συγκόλλησης αναπτύσσεται μεγαλύτερη θερμοκρασία λόγω τριβής ανάμεσα στο υλικό και το περιαιχένιο. Συνεπώς, το υλικό μπορεί πιο εύκολα να αναδευτεί. Στην ίδια περιοχή παρατηρείται πιο κυκλικό σχήμα γεγονός που οφείλεται στην κίνηση του περιαιχενίου. Πηγαίνοντας προς κατώτερες περιοχές, οι τιμές της θερμοκρασίας μειώνονται, γι' αυτό το λόγο παρατηρείται λιγότερη ανάδευση και η ροή του υλικού επηρεάζεται από τον πείρο και τη γεωμετρία του.

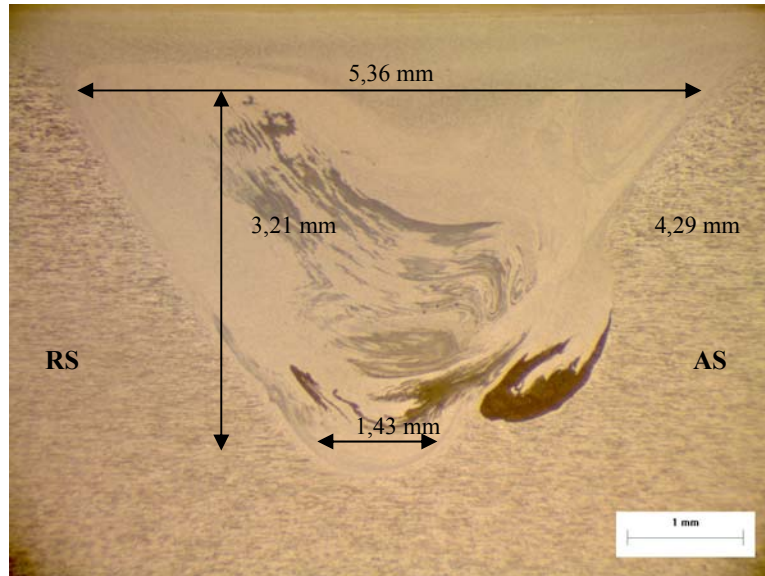
Η ροή που παρατηρήθηκε στα παραπάνω έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις μελέτες των Guerra [10] και Ying Li [13], οι οποίοι παρατηρούν περίπλοκα φαινόμενα ροής, δίνες και χαοτική δυναμική ανάμειξη, που σχηματίζονται λόγω της περιστροφής του εργαλείου συγκόλλησης. Επίσης, συμφωνία υπάρχει και με τη μελέτη των Smith και Bendzsak [22], οι οποίοι παρατηρούν τη δημιουργία τριών περιοχών κάτω από την επιφάνεια του περιαιχενίου.

Τρίτη Συγκόλληση

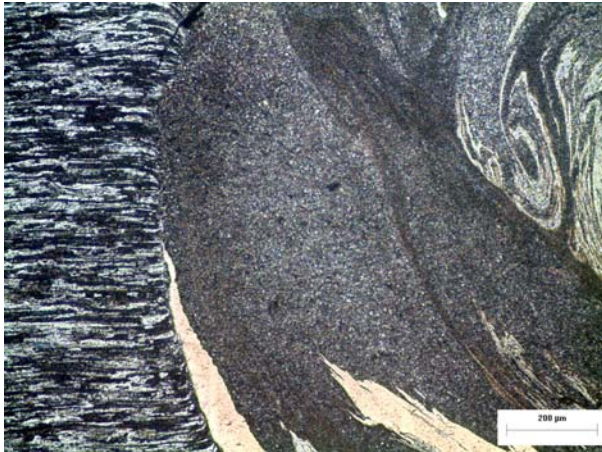
Στην τρίτη συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε πείρος κωνικής γεωμετρίας και το εργαλείο συγκόλλησης είχε κλίση 2° . Η ταχύτητα πρόωσης ήταν 85 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής 600 RPM. Τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής μελέτης παρουσιάζονται παρακάτω :

Δοκίμιο 1

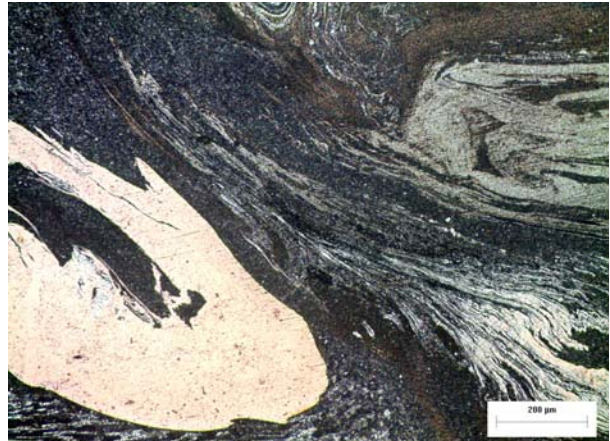
Στο δοκίμιο 1 (εικόνα 6.2.28) παρατηρείται εξώθηση του χαλκού στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Η μορφή του χαλκού στο κάτω μέρος της συγκόλλησης είναι ημικυκλική με κενά, ενώ προς το πάνω μέρος αποκτά πιο μακρόστενο σχήμα (εικόνα 6.2.29). Στη ζώνη ανάδευσης έχουν σχηματιστεί δίνες (εικόνα 6.2.29) και η ροή του υλικού τείνει να γίνει χαοτική (εικόνα 6.2.31). Η «χαοτική» αυτή ροή ξεκινάει από το ανώτερο μέρος της υποχωρούσας πλευράς και καταλήγει σε χαμηλότερα σημεία της προωθούμενης πλευράς, αλλά πάντα πιο πάνω σε σχέση με την αρχική θέση του χαλκού (εικόνα 6.2.28).



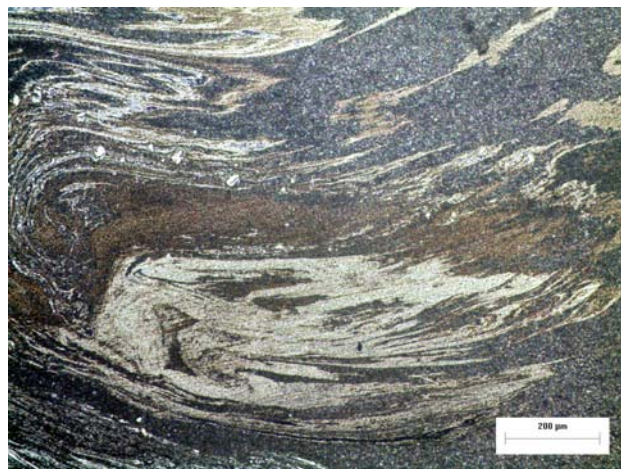
Εικόνα 6.2.28 : Μακρογραφία δοκιμίου 1.



Εικόνα 6.2.29 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου καθώς και η μετάβαση από τη ΖΑ στη ΤΜΑΖ της προωθούμενης πλευράς.



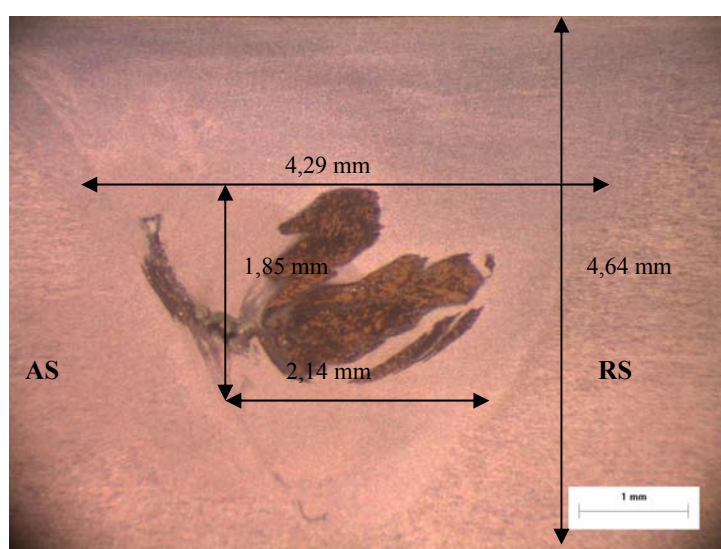
Εικόνα 6.2.30 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.31 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, στην οποία απεικονίζεται η ροή χαλκού με το αλουμίνιο.

Δοκίμιο 2,1

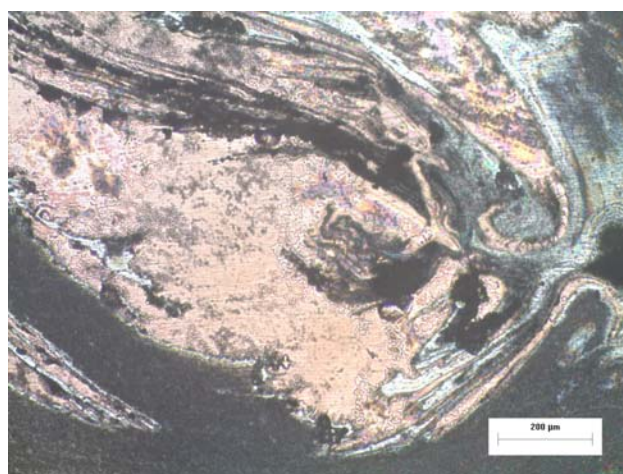
Από τη μακρογραφία του δοκιμίου 2,1 (εικόνα 6.2.32), παρατηρείται ότι ο χαλκός έχει ασύμμετρη μορφή με κενά, τα οποία αναπληρώνονται από το αλουμίνιο. Η ροή έχει κυρίως διαμήκη διασπορά και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του πλάτους της ζώνη ανάδευσης (πλάτος ΖΑ : 4,29 mm). Ο χαλκός είναι τοποθετημένος στη μέση με τάση να κατευθυνθεί στην υποχωρούσα πλευρά με χαρακτηριστικά (γραμμές) που δείχνουν και τάση ροής προς την προωθούμενη πλευρά, αλλά σε μικρότερο ποσοστό. Στις μικρογραφίες (εικόνα 6.2.33 και 6.2.34) παρατηρείται χαοτική ροή.



Εικόνα 6.2.32 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,1.



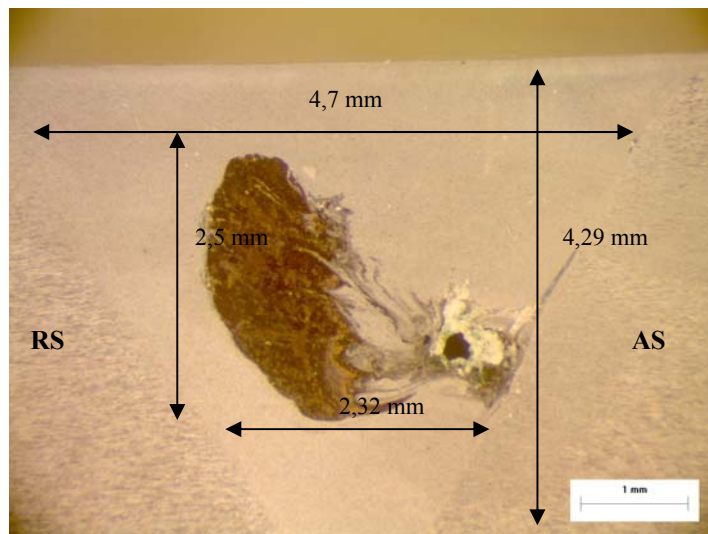
Εικόνα 6.2.33 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού με κενά που αναπληρώνονται από το αλουμίνιο.



Εικόνα 6.2.34 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η χαοτική ροή του χαλκού.

Δοκίμιο 2,2 – 3,2

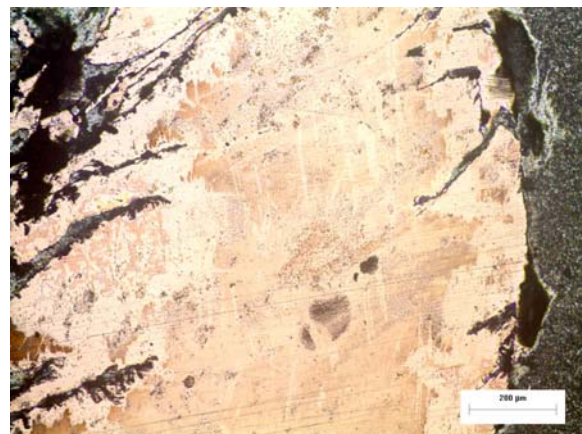
Στα δοκίμια 2,2 – 3,2 (εικόνες 6.2.35, 6.2.38 και 6.2.41) παρατηρείται η επίδραση του πείρου, ο οποίος «χαλάει» το κυκλικό σχήμα του χαλκού και καθώς περιστρέφεται, δημιουργώντας ροϊκές γραμμές στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης, γύρω από το ελάττωμα. Η περιστροφική κίνηση του πείρου συντελεί στη δημιουργία του μακρόστενου σχήματος του χαλκού. Παρατηρούνται επίσης μικρές δίνες (εικόνες 6.2.36 και 6.2.43).



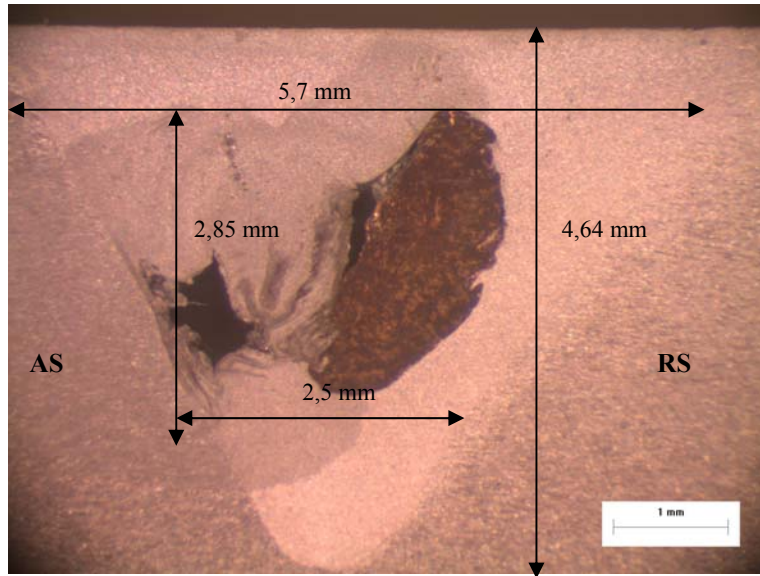
Εικόνα 6.2.35 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,2.



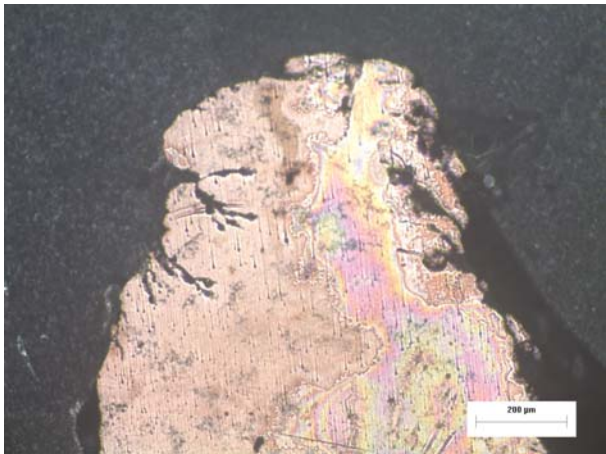
Εικόνα 6.2.36 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελαττώματα της συγκόλλησης.



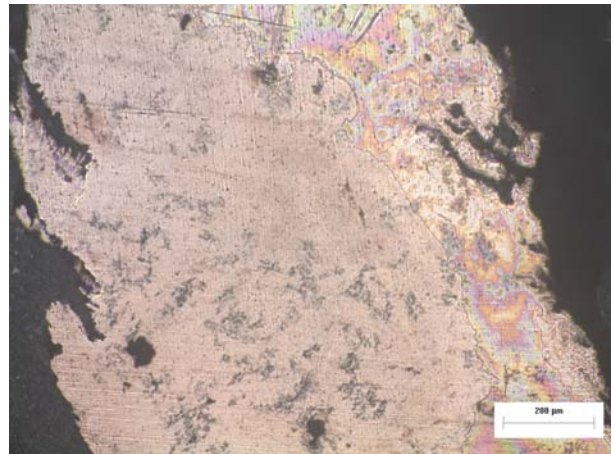
Εικόνα 6.2.37 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



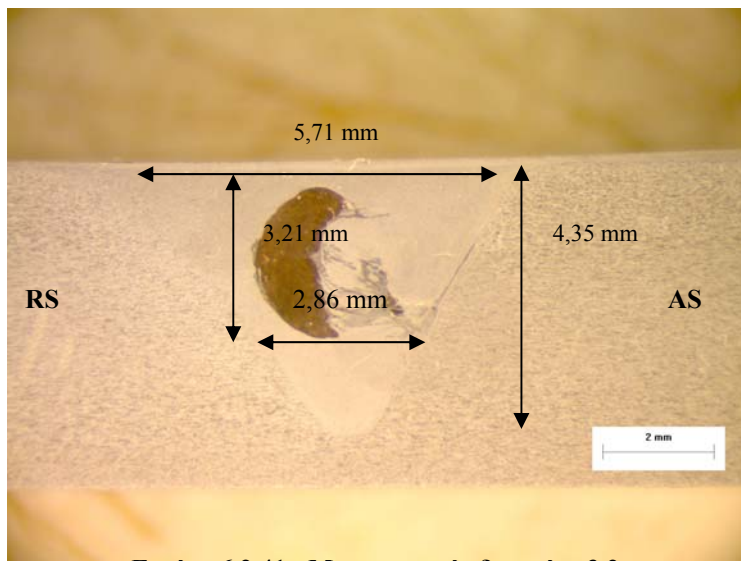
Εικόνα 6.2.38 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,1.



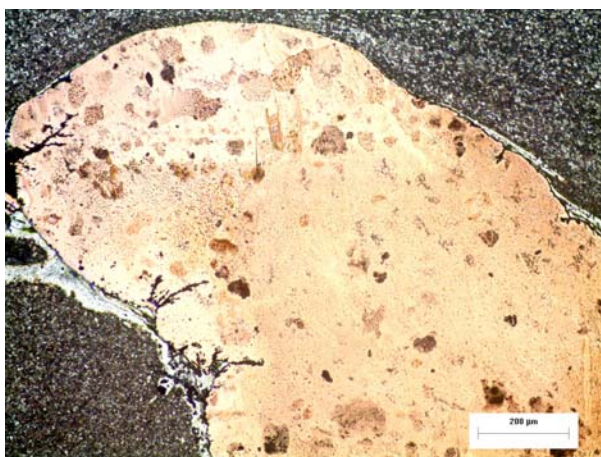
Εικόνα 6.2.39 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελαττώματα της συγκόλλησης.



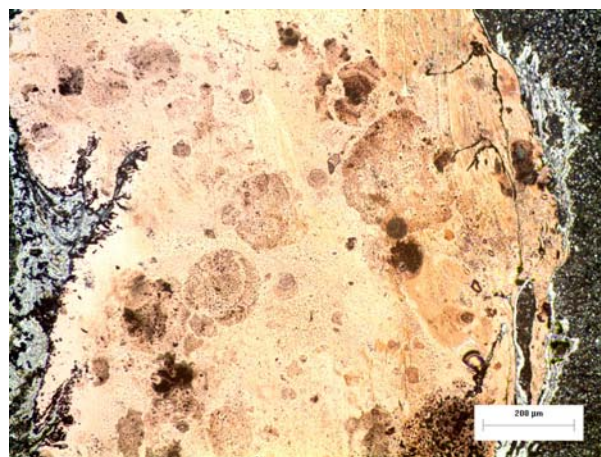
Εικόνα 6.2.40 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



Εικόνα 6.2.41 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,2.



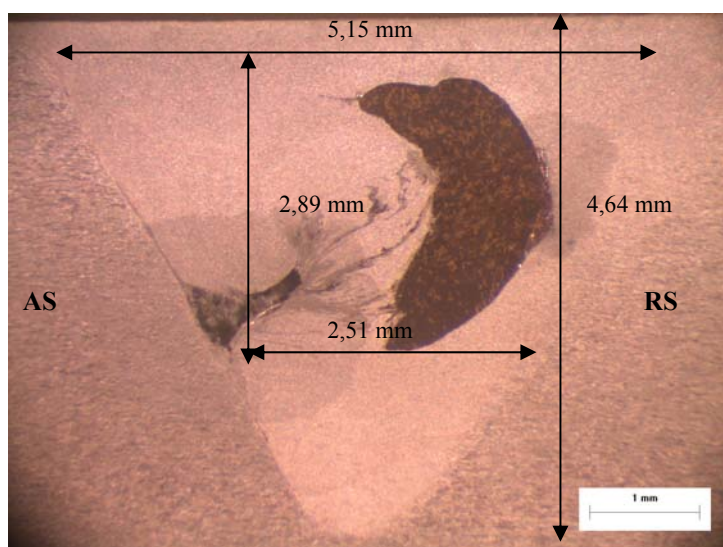
Εικόνα 6.2.42 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



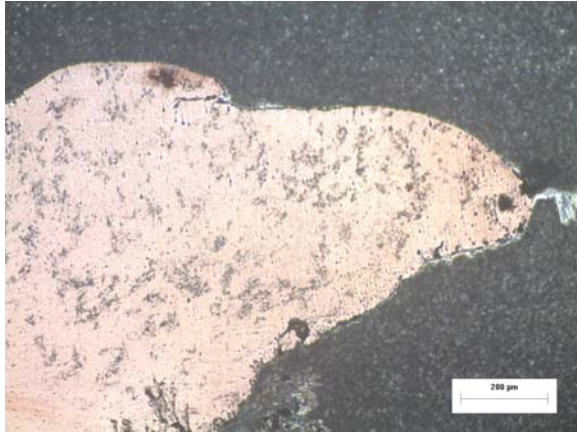
Εικόνα 6.2.43 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.

Δοκίμιο 4,1 - 5

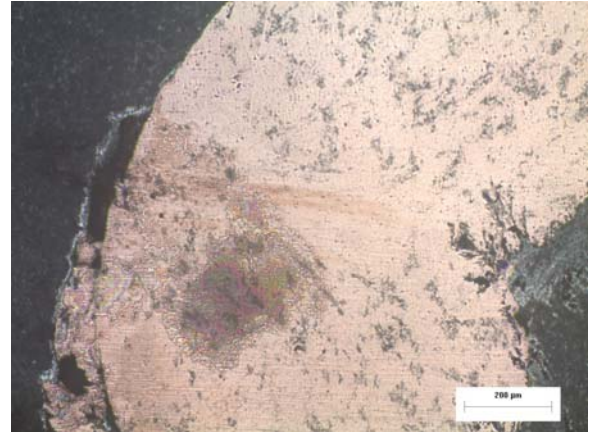
Στα δοκίμια 4,1 – 5 (εικόνες 6.2.44, 6.2.47 και 6.2.50) η ροή του υλικού είναι παρόμοια. Συγκεκριμένα, καθώς περιστρέφεται ο πείρος, ο χαλκός φαίνεται να ακολουθεί την κίνησή του και με αυτόν τον τρόπο αποκτά πιο οβάλ σχήμα, ώστε η διασπορά τελικά να πάρει σχήμα ημικυκλίου (εικόνες 6.2.47 και 6.2.50). Δίνες και ροϊκές γραμμές παρατηρούνται στις εικόνες 6.2.48, 6.2.49, 6.2.51 και 6.2.52, οι οποίες ξεκινάνε από τη συμπαγή μάζα του χαλκού και καταλήγουν στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Επίσης, παρατηρείται εξώθηση του χαλκού από την προωθούμενη πλευρά στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.



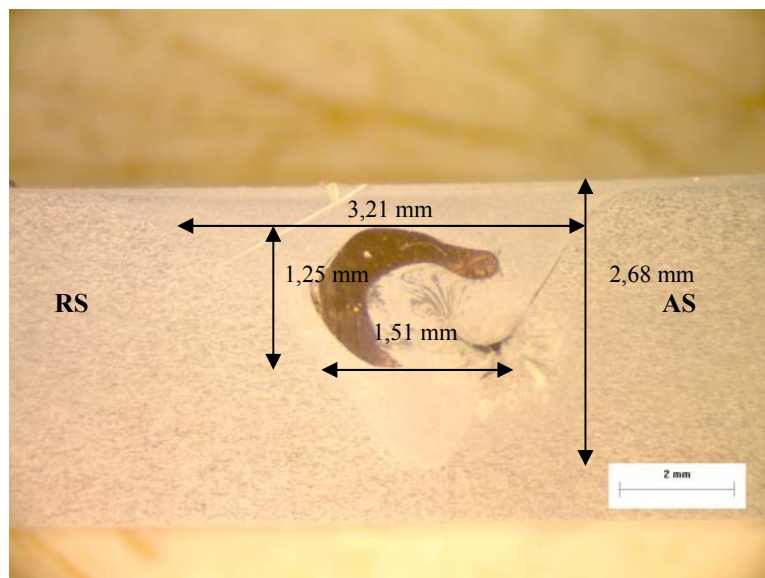
Εικόνα 6.2.44 : Μακρογραφία δοκιμίου 4,1.



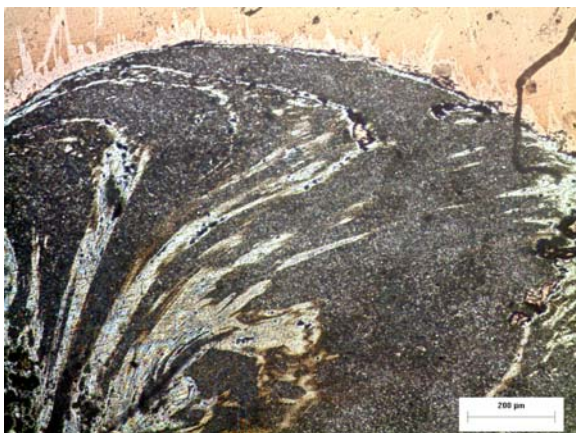
Εικόνα 6.2.45 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



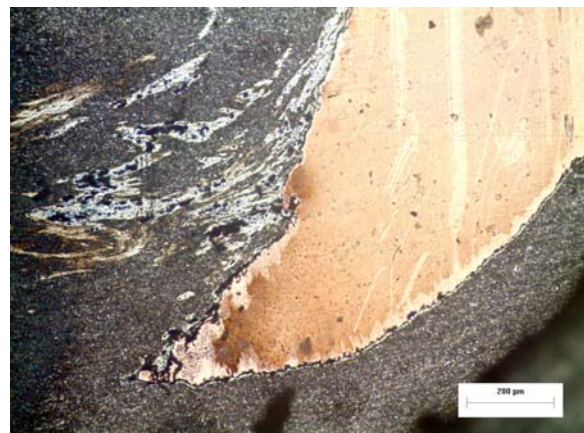
Εικόνα 6.2.46 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



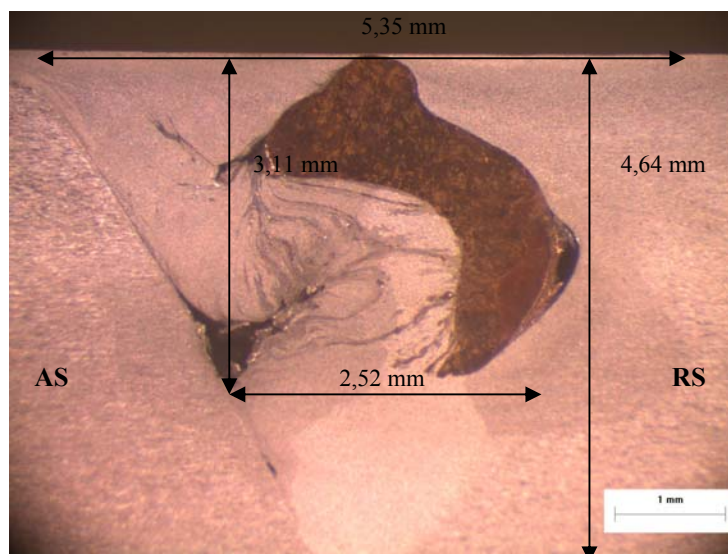
Εικόνα 6.2.47 : Μακρογραφία δοκιμίου 4,2.



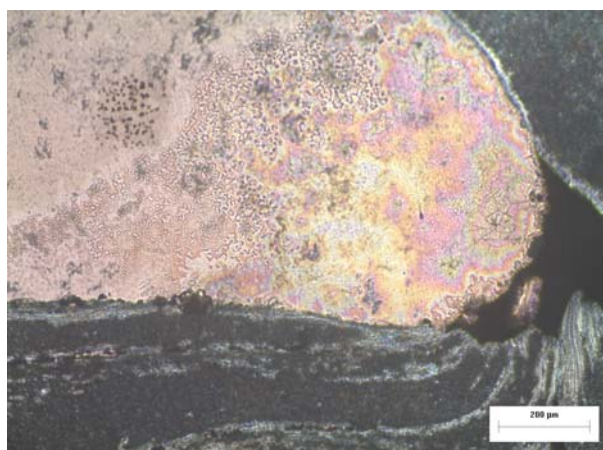
Εικόνα 6.2.48 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



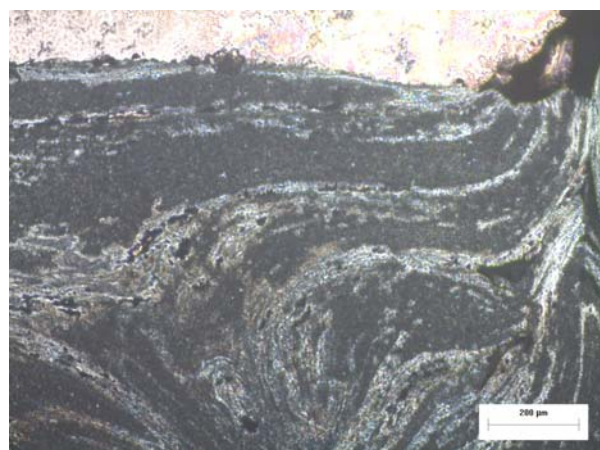
Εικόνα 6.2.49 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.50 : Μακρογραφία δοκιμίου 5.



Εικόνα 6.2.51 : Μικρογραφία δοκιμίου 5, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελάττωμα της συγκόλλησης.



Εικόνα 6.2.52 : Μικρογραφία δοκιμίου 5, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου .

Στα παραπάνω δοκίμια διακρίνουμε 3 περιοχές. Αναλυτικότερα, στα δοκίμια 1 (εικόνα 6.2.28) και 2,1 (εικόνα 6.2.32), στην αρχή της συγκόλλησης, ο χαλκός έχει πιο ομοιόμορφη κυκλική μορφή, καθώς τα παρατηρούμε μακροσκοπικά. Στο μικροσκόπιο αποκαλύπτεται μία πιο πολύπλοκη διασπορά, η οποία οφείλεται στην επίδραση του πείρου συγκόλλησης και αυτό γιατί ο χαλκός είναι τοποθετημένος σε τέτοιο βάθος ώστε να επηρεάζεται από την κίνηση του πείρου. Οι δίνες που σχηματίζονται συνθέτουν μια χαοτική – δυναμική ανάμειξη. Όσο προχωράει η συγκόλληση, ο χαλκός αποκτά πιο μακρόστενη μορφή (δοκίμια 2,2 (εικόνα 6.2.35) και 3,1 (εικόνα 6.2.38)), που τελικά καταλήγει σε ημικυκλική μορφή (δοκίμια 3,2 (εικόνα 6.2.41) – 5 (εικόνα 6.2.50)), ακολουθώντας καλύτερα την περιστροφική κίνηση του πείρου. Επίσης, παρατηρείται ότι ο χαλκός απομακρύνεται από την

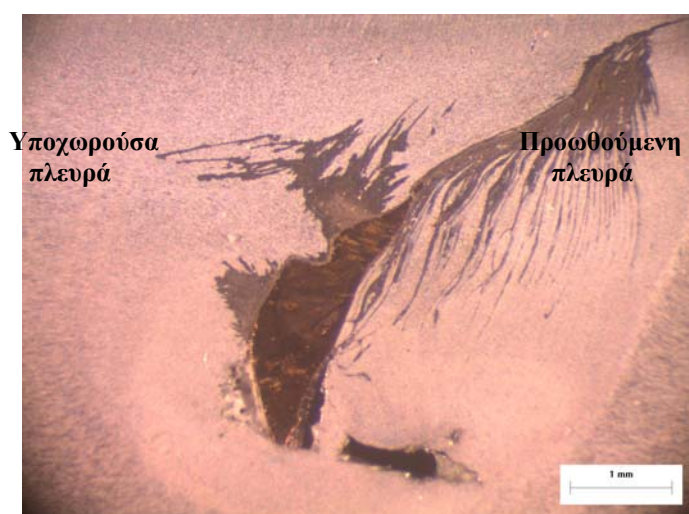
προωθούμενη πλευρά και εξωθείται στην υποχωρούσα, καθώς εξελίσσεται η διαδικασία της συγκόλλησης. Σε ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Colligan κατά τη μελέτη του [15]. Τέλος, παρατηρούνται ελαττώματα κατά τη συγκόλληση τα οποία οφείλονται στη χρήση κωνικού πείρου, όπως αναφέρουν στη μελέτη τους και οι Zhao, Li και συνεργάτες [14].

✚ Τέταρτη Συγκόλληση

Στην τέταρτη συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε πείρος με σπείρωμα και το εργαλείο συγκόλλησης είχε κλίση 2° . Η ταχύτητα πρόωσης ήταν 85 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής 600 RPM. Στόχος είναι να παρατηρηθεί η επίδραση της γεωμετρίας του πείρου συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής μελέτης παρουσιάζονται παρακάτω :

Δοκίμιο 1

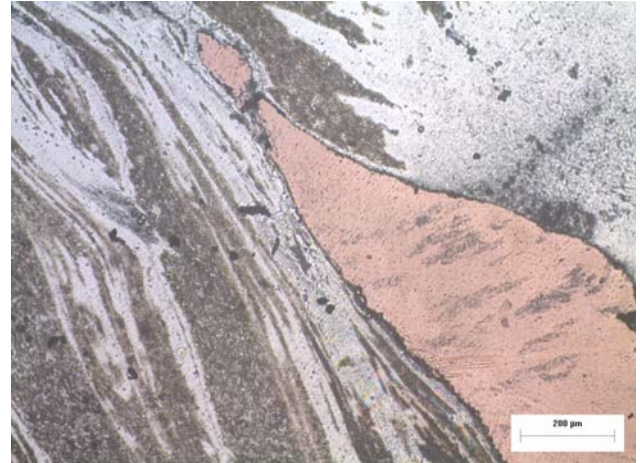
Στο δοκίμιο 1 (εικόνα 6.2.53) παρατηρείται διαφορετική ροή του υλικού λόγω του σπειρώματος του πείρου. Το σπείρωμα του πείρου δημιουργεί ροϊκές γραμμές με κατεύθυνση προς τα κάτω από τη μέση της ζώνης ανάδευσης και προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Εμφανής είναι και η μίξη των δύο υλικών, χαλκού και αλουμινίου (εικόνες 6.2.54 και 6.2.55). Συγκεκριμένα στην εικόνα 6.2.54 παρατηρούνται ελάχιστα χαρακτηριστικά χαοτικής ροής. Η κυρίως μάζα του χαλκού έχει αποκτήσει μακρόστενο σχήμα με κατεύθυνση στο πάνω μέρος της συγκόλλησης στην προωθούμενη πλευρά και τελικά καταλήγει σε λωρίδα εξαιρετικά μικρού πάχους.



Εικόνα 6.2.53 : Μακρογραφία δοκιμίου 1.



Εικόνα 6.2.54 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου με σωματίδια χαλκού.



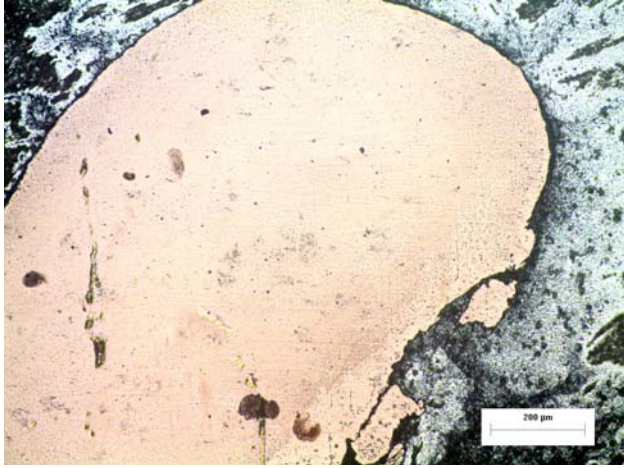
Εικόνα 6.2.55 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου .

Δοκίμιο 2,1 – 3,1

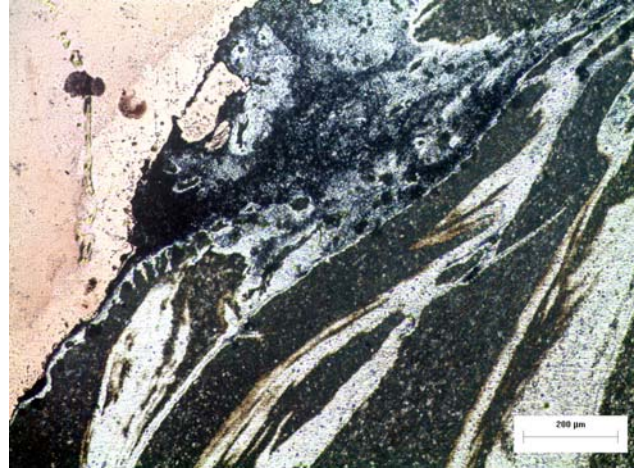
Στα δοκίμια 2,1 – 3,1 (εικόνες 6.2.56, 6.2.59 και 6.2.63) ο χαλκός έχει μακρόστενο σχήμα λόγω της κίνησης του πείρου. Το σπείρωμα του πείρου εξωθεί το υλικό από το μέσο τμήμα του χαλκού προς το πάνω μέρος της προωθούμενης πλευράς της συγκόλλησης. Ροϊκές γραμμές δημιουργούνται στην προωθούμενη πλευρά λόγω του σπειρώματος του πείρου, με κατεύθυνση προς το κάτω μέρος της συγκόλλησης (εικόνες 6.2.58, 6.2.61, 6.2.62 και 6.2.64). Εμφανής είναι και η μίξη των δύο υλικών, χαλκού και αλουμινίου όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.2.62.



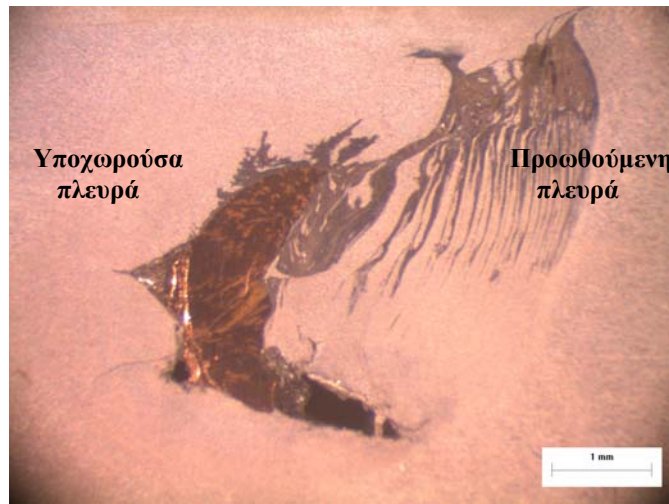
Εικόνα 6.2.56 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,1.



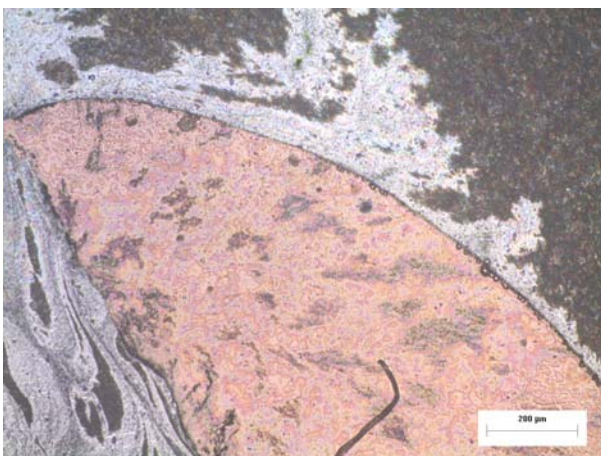
Εικόνα 6.2.57 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



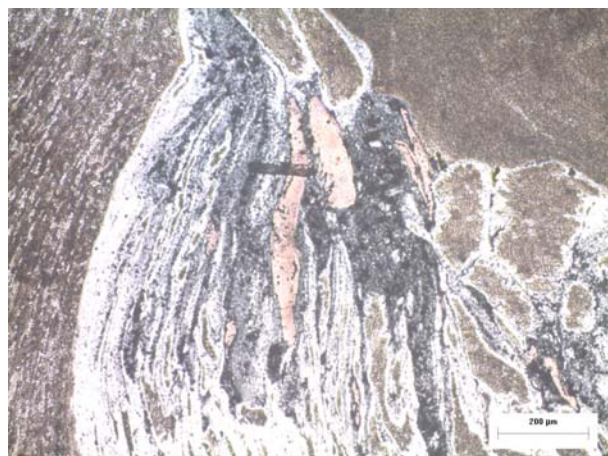
Εικόνα 6.2.58 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου με ελαττώματα της συγκόλλησης.



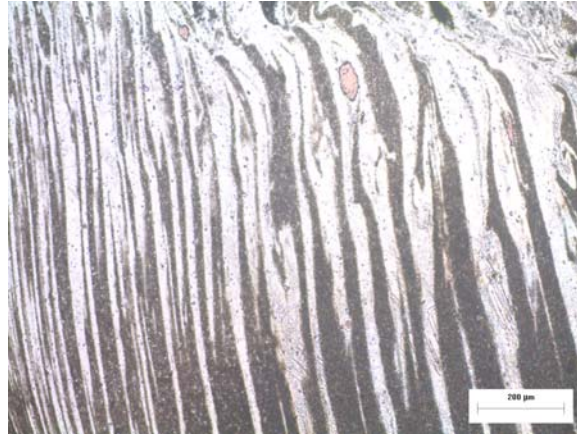
Εικόνα 6.2.59 : Μακρογραφία δοκιμίου 2,2.



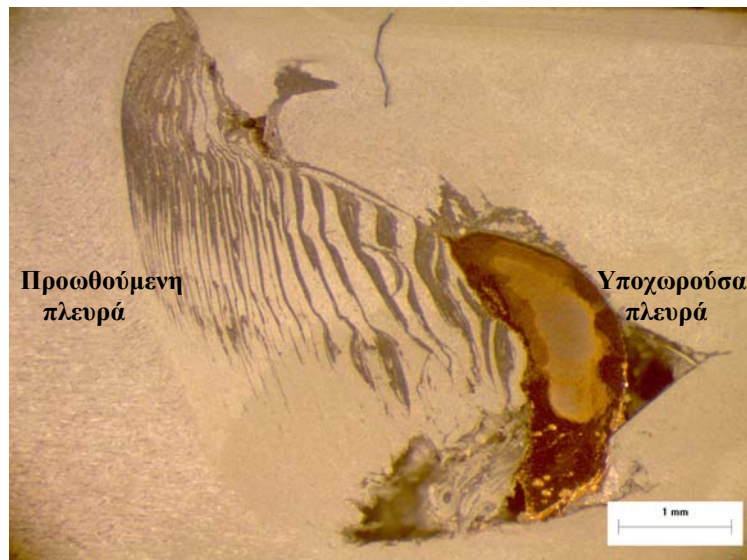
Εικόνα 6.2.60 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



Εικόνα 6.2.61 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου με σωματίδια χαλκού.



Εικόνα 6.2.62 : Μικρογραφία δοκιμίου 2,2, στην οποία απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου με σωματίδια χαλκού.



Εικόνα 6.2.63 : Μακρογραφία δοκιμίου 3,1.



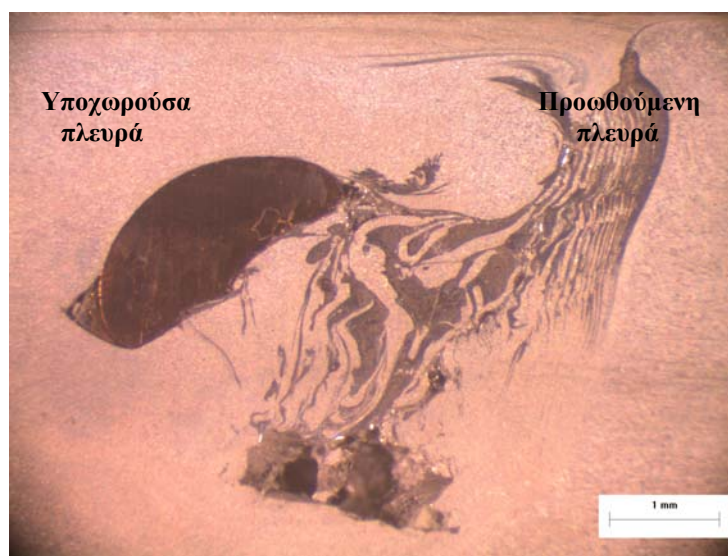
Εικόνα 6.2.64 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1 όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



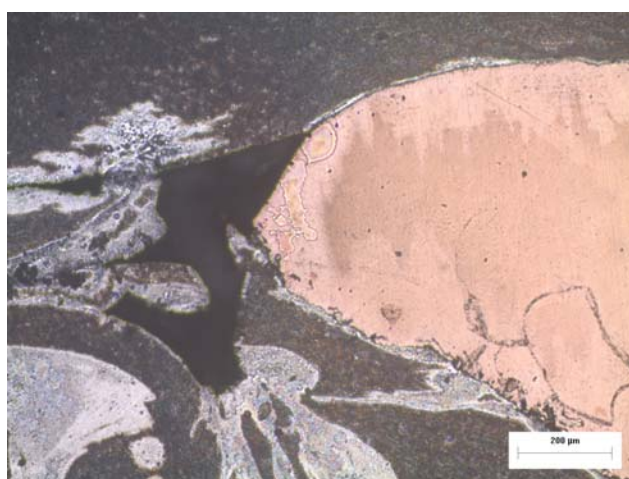
Εικόνα 6.2.65 : Μικρογραφία δοκιμίου 3,1 όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.

Δοκίμιο 3,2 – 4,1

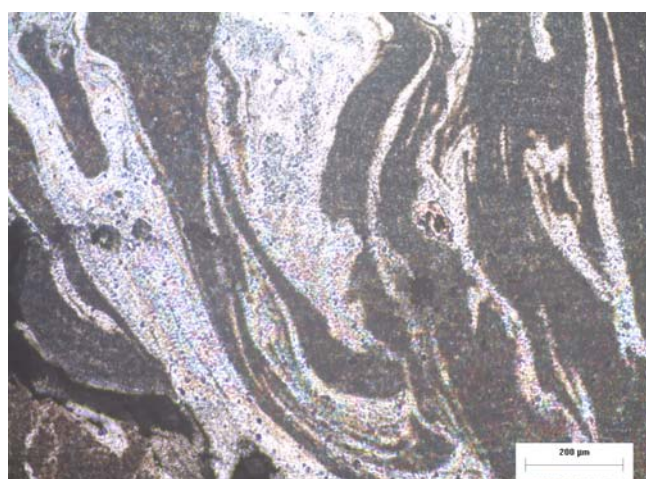
Στα δοκίμια 3,2 και 4,1 (εικόνες 6.2.66 και 6.2.69) το σπείρωμα παίρνει υλικό από το πάνω μέρος του χαλκού και το τοποθετεί στο ανώτερο μέρος της προωθούμενης πλευράς. Η εξάπλωση της μίξης του υλικού από το σπείρωμα επεκτείνεται σε μεγάλο τμήμα της ζώνης ανάδευσης. Τέλος, στις εικόνες 6.2.68 και 6.2.71 είναι εμφανής η μίξη των δύο υλικών (αλουμίνιο και χαλκός).



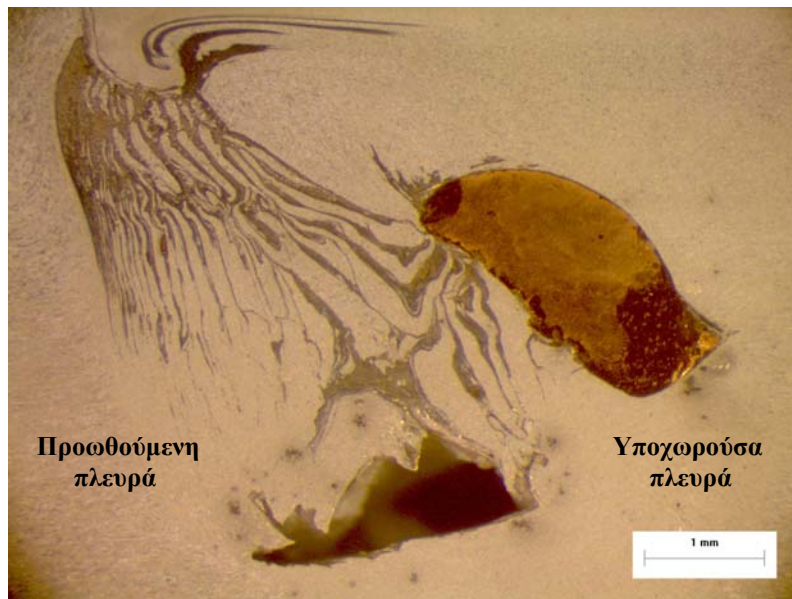
Εικόνα 6.2.66 : Μακρογραφία δοκμίου 3,2.



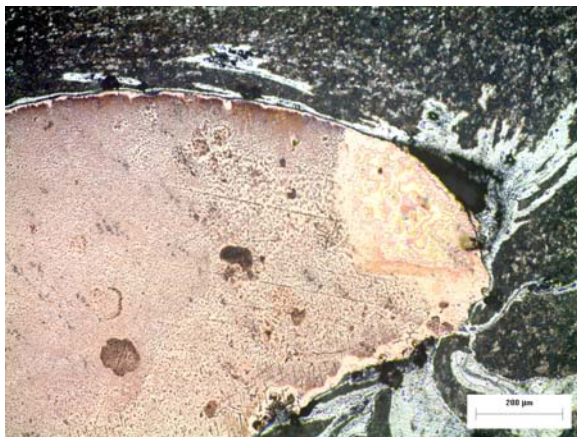
Εικόνα 6.2.67 : Μικρογραφία δοκμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



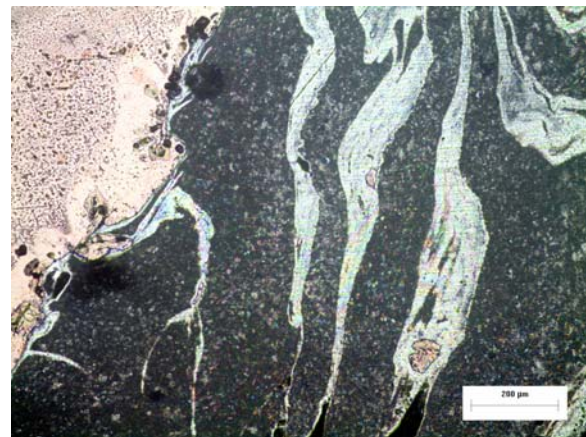
Εικόνα 6.2.68 : Μικρογραφία δοκμίου 3,2, όπου απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.69 : Μακρογραφία δοκιμίου 4,1.



Εικόνα 6.2.70 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.71 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,1, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και του αλουμινίου.

Δοκίμιο 4,2 - 5

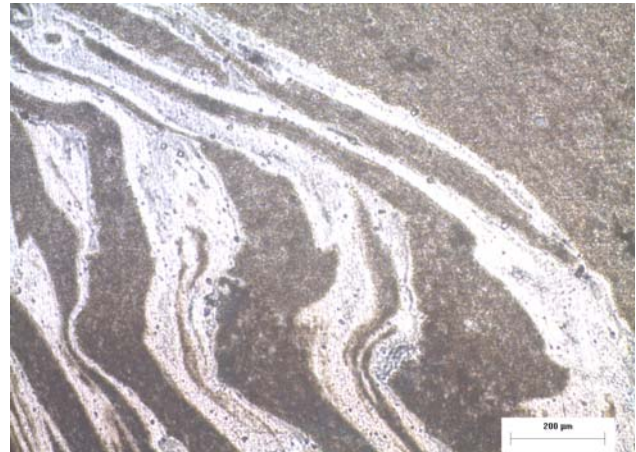
Τα δοκίμια 4,2 και 5 δεν διαφοροποιούνται πολύ από τα προηγούμενα, με τη διαφορά ότι στο δοκίμιο 4,2 (εικόνα 6.2.72) υλικό εξωθείται από το μεσαίο τμήμα του χαλκού, ενώ στο δοκίμιο 5 (εικόνα 6.2.75) το υλικό εξωθείται από το κατώτερο τμήμα της μάζας του χαλκού.



Εικόνα 6.2.72 : Μακρογραφία δοκιμίου 4,2.



Εικόνα 6.2.73 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,2, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



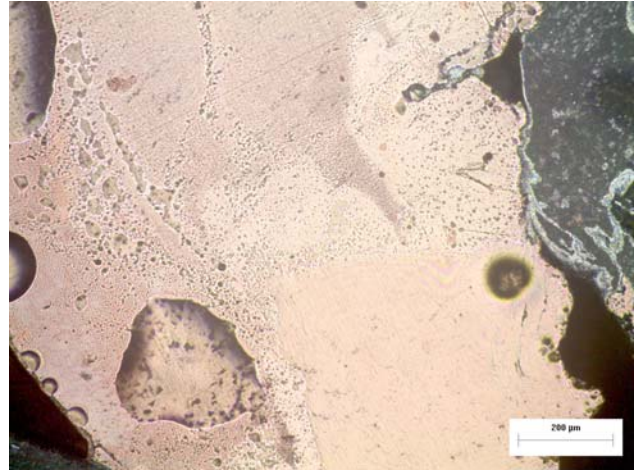
Εικόνα 6.2.74 : Μικρογραφία δοκιμίου 4,2 όπου, απεικονίζεται η ροή του αλουμινίου.



Εικόνα 6.2.75 : Μακρογραφία δοκιμίου 5.



Εικόνα 6.2.76 : Μικρογραφία δοκιμίου 5, όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού.



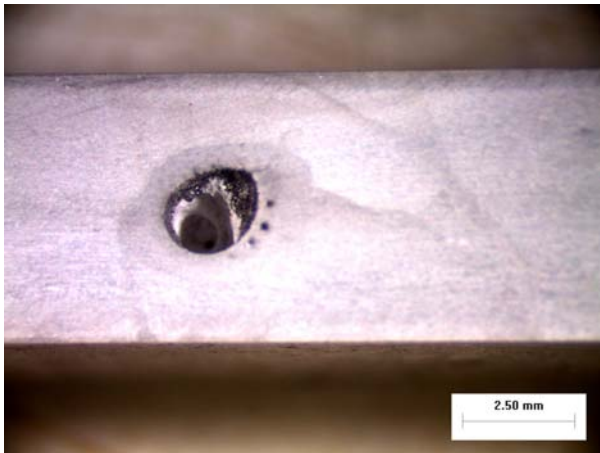
Εικόνα 6.2.77 : Μικρογραφία δοκιμίου 5 όπου απεικονίζεται η ροή του χαλκού και ελαττώματα της συγκόλλησης.

Στα δοκίμια της τέταρτης σειράς πειραμάτων, είναι ιδιαίτερα εμφανής η επίδραση του σπειρώματος του πείρου στη ροή του υλικού. Στο μικροσκόπιο παρατηρούμε, επίσης σφαιρίδια χαλκού, τα οποία έχουν αποκοπεί από την κυρίως μάζα του χαλκού και έχουν «παρασυρθεί» με την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης. Ακόμη, δημιουργείται μίξη των δύο υλικών και συνθέτουν μια χαοτική ροή προσανατολισμένη προς την προωθούσα πλευρά. Το σπείρωμα του πείρου βοηθά στην ανάδευση του υλικού, όπως έχουν παρατηρήσει οι Zhao, Lin και οι συνεργάτες τους [14], το οποίο τελικά εξωθείται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης και σε σημεία ανώτερα του αρχικού. Από την άλλη, ο χαλκός, όπως φαίνεται και στα παραπάνω δοκίμια, έχει πιο ομοιόμορφο σχήμα, με εναλλαγές μακρόστενου και κυκλικού σχήματος, και η ροή του υλικού είναι πιο ομαλή, χωρίς να παρατηρούνται δίνες. Τέλος, ο χαλκός, καθώς ακολουθεί την κίνηση του πείρου, προωθείται από την προωθούμενη στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης, όπως παρατηρεί και ο Colligan [15] στη μελέτη του .

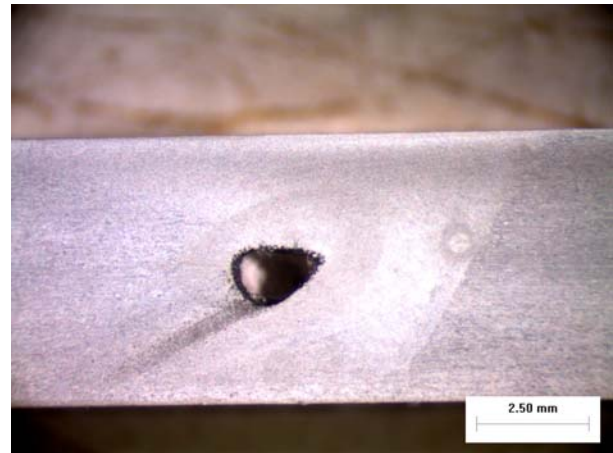
✚ Πέμπτη Συγκόλληση

Στην πέμπτη συγκόλληση τοποθετήθηκε σκόνη καρβιδίων βολφραμίου σε δημιουργημένη από τρυπάνι οπή \varnothing 2 mm, τα οποία όμως δεν οδήγησαν σε σαφή συμπεράσματα για τη ροή του υλικού κατά τη FSW, καθότι το υλικό σήμανσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ιδιαίτερα λεπτόκοκκο (<65 μ m) και η διασπορά του δεν είναι εύκολα εμφανής όπως φαίνεται στις εικόνες 6.2.88 – 6.2.91. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες :

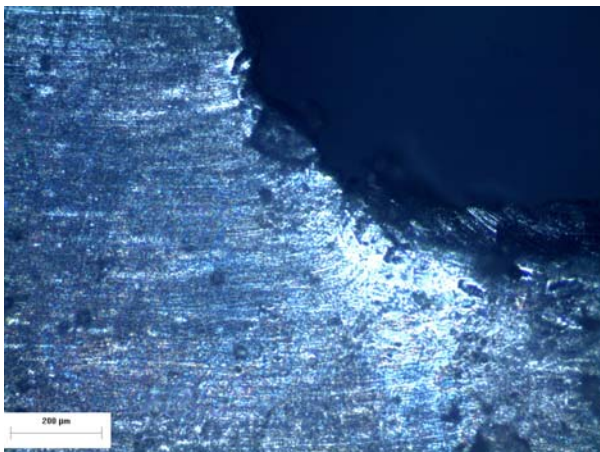
- Ταχύτητα πρόωσης : 85 mm/min
- Ταχύτητα περιστροφής : 475 RPM
- Γεωμετρία πείρου : κωνική
- Κλίση εργαλείου συγκόλλησης : χωρίς κλίση



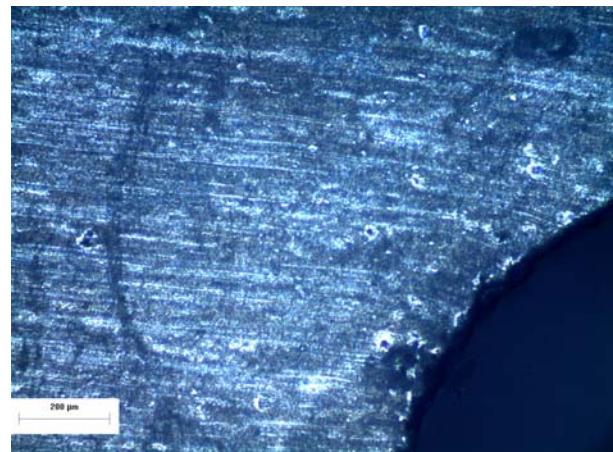
Εικόνα 6.2.88 : Μακρογραφία δοκιμίου 1, στην οποία απεικονίζεται η οπή με τα καρβίδια βολφραμίου.



Εικόνα 6.2.89 : Μακρογραφία δοκιμίου 2.1, όπου απεικονίζεται η οπή με τα καρβίδια βολφραμίου.



Εικόνα 6.2.90 : Μικρογραφία δοκιμίου 1, στην οποία απεικονίζεται η οπή με τα καρβίδια βολφραμίου.



Εικόνα 6.2.91 : Μικρογραφία δοκιμίου 2.1, στην οποία απεικονίζεται η οπή με τα καρβίδια βολφραμίου.

6.3 Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων συγκόλλησης στη ροή του υλικού

6.3.1 Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στη ροή του υλικού

Αρχικά, συγκρίνεται η πρώτη συγκόλληση με τη δεύτερη για να παρατηρηθεί η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στη ροή του υλικού. Οι παράμετροι συγκόλλησης για την πρώτη σειρά σύγκρισης είναι οι παρακάτω :

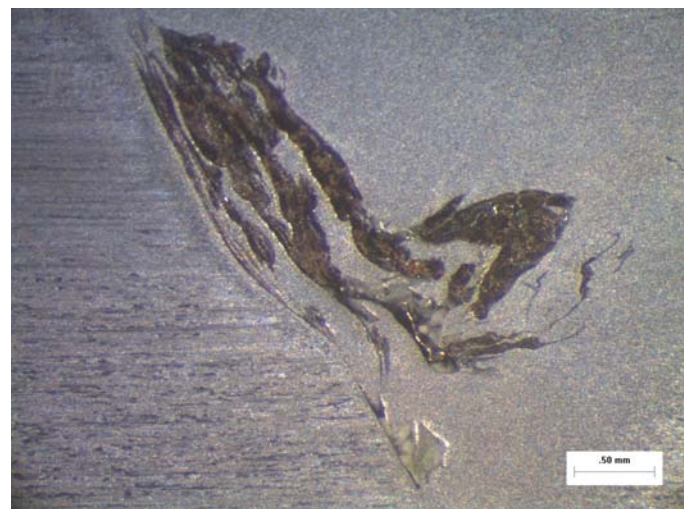
- Ταχύτητα περιστροφής : 475 RPM
- Γεωμετρία πείρου : κωνικό
- Κλίση εργαλείου συγκόλλησης : χωρίς κλίση
- Ταχύτητα πρόωσης : 75 mm/min και 85 mm/min

Δοκίμιο 2,1

Από την εικόνα 6.3.1.78 παρατηρείται ότι η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει αρκετά τη ροή του υλικού. Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο (α) η ροή είναι πιο στρωτή και ο χαλκός διατηρεί ελλειψοειδές σχήμα με μερικές ροϊκές γραμμές να εξέχουν στο μέσο τμήμα του, οι οποίες έχουν κατεύθυνση προς τα κάτω. Στο δοκίμιο (β), η ροή είναι χαοτική με δημιουργία κενών και μίξης χαλκού και αλουμινίου. Παρ' όλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις η διασπορά της ροής του υλικού είναι περίπου η ίδια και επιπλέον και στα δύο δοκίμια παρατηρείται εξώθηση του υλικού στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.



(α)

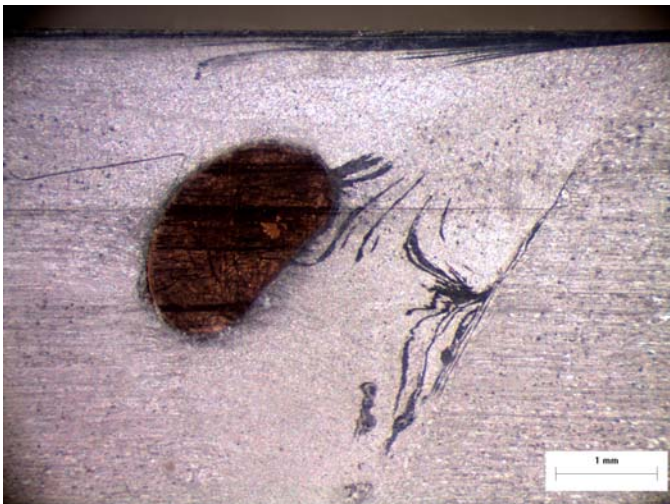


(β)

Εικόνα 6.3.1.78 : Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με ταχύτητα πρόωσης 75mm/min και μακρογραφία δοκιμίου (β) με ταχύτητα πρόωσης 85mm/min.

Δοκίμιο 2,2

Από την εικόνα 6.3.1.79 παρατηρείται ότι στο δοκίμιο (α) ο χαλκός έχει σχεδόν κρατήσει το αρχικό κυκλικό του σχήμα, ενώ παρατηρείται εξώθηση του υλικού από το άνω μέρος του χαλκού. Επίσης, παρατηρείται ροή του υλικού με σχήμα ραβδώσεων σε κατώτερα σημεία της προωθούμενης πλευράς. Στο δοκίμιο (β) ο χαλκός έχει πιο μακρόστενο σχήμα και από το βάθος στο οποίο βρίσκεται συμπεραίνεται ότι επηρεάζεται και από την κίνηση του περιαιχηνίου. Η εξάπλωση της ροής είναι πιο διασκορπισμένη καθ' ύψος σε σχέση με το δοκίμιο (α) και ο χαλκός είναι τοποθετημένος στο δεξί τμήμα της προωθούμενης πλευράς. Γραμμές που συνθέτουν τη ροή του υλικού εντοπίζονται και στα δύο δοκίμια με διαφορετική όμως κατεύθυνση.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.1.79 :Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με ταχύτητα πρόωσης 75mm/min και μακρογραφία δοκιμίου (β) με ταχύτητα πρόωσης 85mm/min.

Από τις μακρογραφίες που λήφθηκαν στο στερεοσκόπιο παρατηρείται ότι η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει αρκετά τη ροή υλικού κατά την FSW. Στα δοκίμια με ταχύτητα πρόωσης 75 mm/min, η ροή του υλικού είναι στρωτή με το χαλκό να έχει κυρίως κυκλικό σχήμα και να παραμένει στη θέση, όπου είχε αρχικά τοποθετηθεί, χωρίς να έχει επηρεαστεί ιδιαίτερα από την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης. Επίσης, δεν παρατηρείται κάθετη μετατόπιση του χαλκού, αλλά ροϊκές γραμμές του κράματος του αλουμινίου φαίνεται να ακολουθούν την περιστροφική κίνηση του πείρου και να εξωθούνται στην προωθούμενη πλευρά σε σημεία ανώτερα σε σχέση

με την αρχική του θέση. Αντίθετα, η ροή του υλικού στα δοκίμια με ταχύτητα πρόωσης 85 mm/min είναι τελείως διαφορετική. Συγκεκριμένα, η ροή είναι χαοτική με δημιουργία δινών καθώς και την ανάμειξη του χαλκού με το αλουμίνιο. Το υλικό ακολουθεί την κίνηση του πείρου, ο οποίος το αναδύει και το εξωθεί στην προωθούμενη πλευρά σε ανώτερες περιοχές της συγκόλλησης. Τέλος, και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται η δημιουργία γραμμών που ξεκινούν από τη μάζα του χαλκού και συνθέτουν τη χαοτική ροή του αλουμινίου.

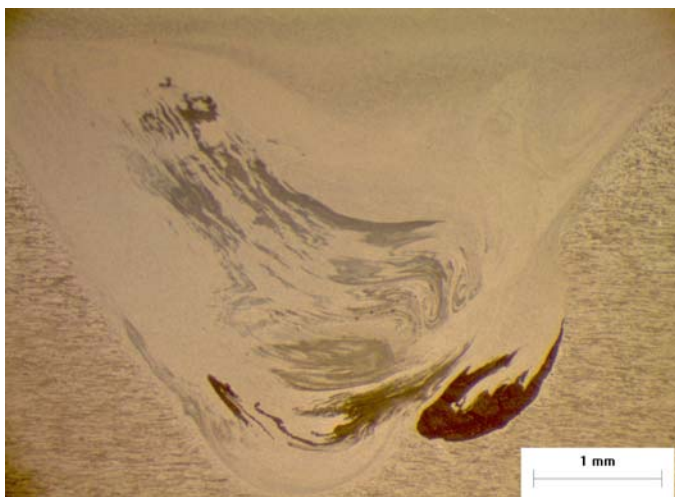
6.3.2 Επίδραση της γεωμετρίας του πείρου στη ροή του υλικού

Παρακάτω συγκρίνεται η τρίτη συγκόλληση με την τέταρτη για να εξεταστεί πως επηρεάζεται η ροή του υλικού από τη γεωμετρία του πείρου. Οι παράμετροι συγκόλλησης για τη δεύτερη σειρά σύγκρισης είναι οι παρακάτω :

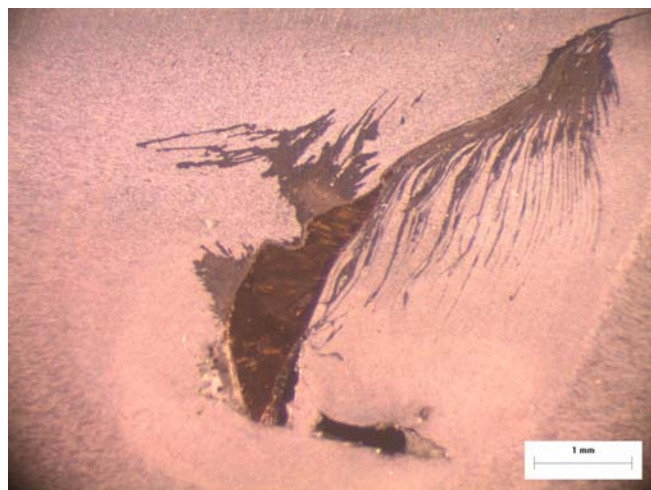
- Ταχύτητα περιστροφής : 600 RPM
- Ταχύτητα πρόωσης : 85 mm/min
- Κλίση εργαλείου συγκόλλησης : 2 °
- Πείρος συγκόλλησης : πείρος κωνικός και με σπείρωμα

Δοκίμιο 1

Από την εικόνα 6.3.2.80 παρατηρείται ότι το σπείρωμα επηρεάζει αρκετά τη ροή του υλικού. Στο δοκίμιο (α) παρατηρείται εξώθηση της μάζας του χαλκού προς την προωθούμενη πλευρά και διασπορά της μικτής ροής αλουμινίου – χαλκού στη ζώνη ανάδευσης. Στο δοκίμιο (β) ο χαλκός έχει πιο στρωτή ροή. Από κυκλικό σχήμα που είχε αρχικά τείνει προς οβάλ, ενώ υλικό (μίξη χαλκού- αλουμινίου) ακολουθώντας την κίνηση του σπειρώματος του πείρου εξωθείται από το ανώτερο μέρος του χαλκού προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Ροϊκές γραμμές έχουν δημιουργηθεί με κατεύθυνση προς το κάτω μέρος της συγκόλλησης.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.2.80 : Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με κωνικό πείρο και μακρογραφία δοκιμίου (β) με πείρο με σπείρωμα.

Δοκίμιο 2,1

Από την εικόνα 6.3.2.81 φαίνεται ότι το δοκίμιο (α) είναι τοποθετημένο στη μέση της ζώνης ανάδευσης με το χαλκό να διατηρεί σχεδόν κυκλικό σχήμα με ενδιάμεσα κενά, τα οποία έχουν καλυφθεί από αλουμίνιο. Από το μέσο τμήμα του χαλκού παρατηρείται εξώθηση του υλικού προς ανώτερα σημεία της προωθούμενης πλευράς, ενώ στο δοκίμιο (β) δεν παρατηρείται ιδιαίτερη παραμόρφωση του συμπαγούς μέρους του χαλκού. Λόγω του σπειρώματος, υλικό αναμειγνύεται και εξωθείται σε ανώτερα σημεία της προωθούμενης πλευράς.



(α)



(β)

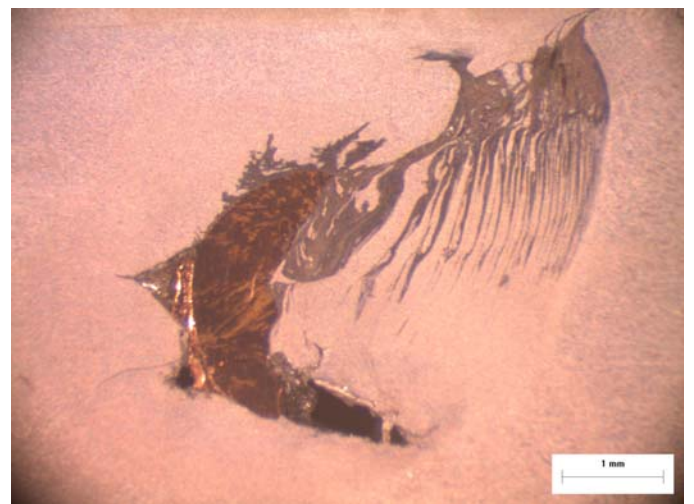
Εικόνα 6.2.81 : Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με κωνικό πείρο και μακρογραφία δοκιμίου (β) με πείρο με σπείρωμα.

Δοκίμιο 2,2 και 5

Από τις εικόνες 6.3.2.82 και 6.3.2.83 παρατηρείται ότι στο δοκίμιο (α) ο χαλκός από οβάλ σχήμα αποκτά σχεδόν ημικυκλικό σχήμα, ενώ στα δοκίμια (β) το ελλειψοειδές σχήμα τείνει προς κυκλικό. Η ροή του υλικού στα δοκίμια (α) είναι πιο στρωτή με δημιουργία ροϊκών γραμμών, οι οποίες είναι πιθανόν να προέρχονται από την ατέλεια της συγκόλλησης που παρατηρείται στο δεξί τμήμα της προωθούμενης πλευράς. Στα δοκίμια (β) παρατηρείται ανάμειξη των υλικών, αλουμινίου και χαλκού, λόγω του σπειρώματος του πείρου. Επίσης, γραμμές έχουν δημιουργηθεί με κατεύθυνση προς το ανώτερο μέρος της προωθούμενης πλευράς.

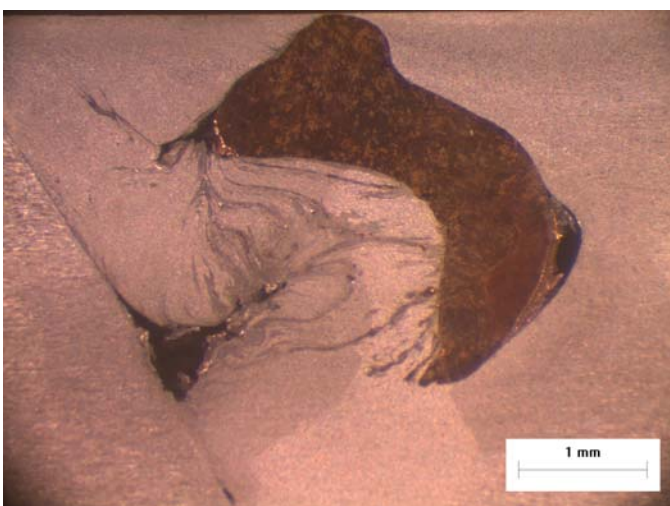


(α)

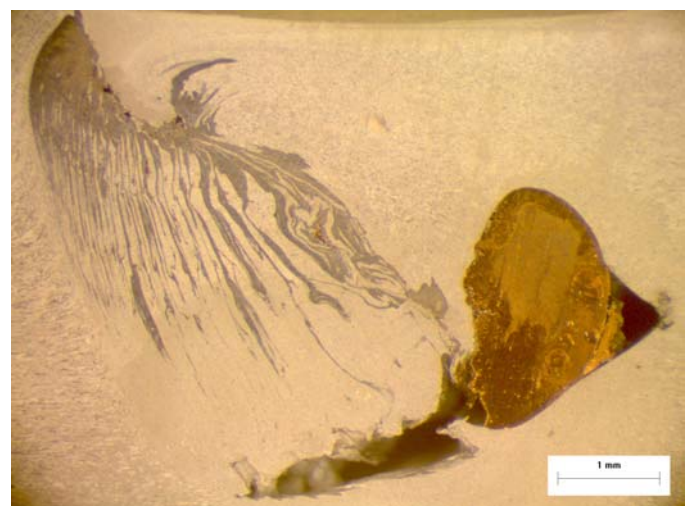


(β)

Εικόνα 6.3.2.82 : Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με κωνικό πείρο και μακρογραφία δοκιμίου (β) με πείρο με σπείρωμα.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.2.83 : Μακρογραφία του δοκιμίου (α) με κωνικό πείρο και μακρογραφία δοκιμίου (β) με πείρο με σπείρωμα.

Από τις παραπάνω μακρογραφίες των εικόνων 6.3.2.80 – 6.3.2.83 είναι εμφανές ότι η γεωμετρία του πείρου επηρεάζει αρκετά τη ροή του υλικού και ιδίως του αλουμινίου. Στη ροή του χαλκού δεν εντοπίζονται ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των δύο παραπάνω σειρών πειραμάτων. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση του κωνικού πείρου παρατηρούμε το χαλκό να αποκτά τη μορφή δακτυλίου καθώς προχωράει η συγκόλληση, ενώ στην περίπτωση του πείρου με σπείρωμα η ροή του χαλκού είναι πιο ομαλή χωρίς να παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στο σχήμα του. Από την άλλη, στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε πείρος με σπείρωμα, το υλικό έχει επηρεαστεί από την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης. Το σπείρωμα καθώς αναδύει το υλικό, το υποβάλλει σε περιστροφική κίνηση και ύστερα το εξωθεί στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης και το τοποθετεί σε σημεία ανώτερα του αρχικού. Η επιρροή που ασκεί το σπείρωμα στη ροή φαίνεται και από τη μίξη των δύο υλικών. Τέλος, παρατηρείται ότι στα δοκίμια (α) ο χαλκός, καθώς εξελίσσεται η διαδικασία της συγκόλλησης, από κυκλικό σχήμα αποκτά ελλειψοειδές σχήμα και τελικά σχήμα δακτυλίου. Ενώ, στα δοκίμια (β) υπάρχει εναλλαγή του χαλκού από κυκλικό σε ελλειψοειδές σχήμα.

6.3.3 Επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης και της ταχύτητας περιστροφής στη ροή του υλικού

Τέλος, συγκρίνεται η δεύτερη συγκόλληση με την τρίτη για να εξεταστεί η επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης και της ταχύτητας περιστροφής στη ροή του υλικού. Η αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής και ταυτόχρονα της κλίσης, έχουν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη θερμική παροχή. Οπότε, μπορεί να εξαχθεί η επίδραση της θερμικής παροχής στη ροή του υλικού. Οι παράμετροι συγκόλλησης για την τρίτη σειρά σύγκρισης είναι οι παρακάτω :

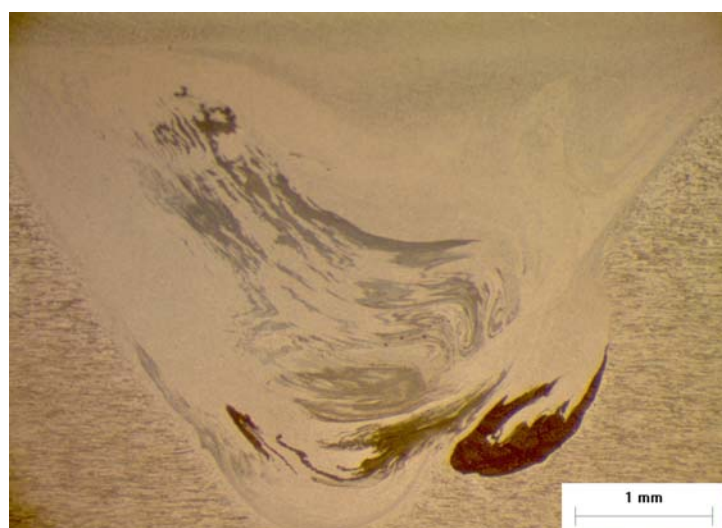
- Γεωμετρία πείρου : κωνικό
- Ταχύτητα πρόωσης : 85 mm/min
- Κλίση εργαλείου συγκόλλησης : χωρίς κλίση και κλίση 2 °
- Ταχύτητα περιστροφής : 475 RPM και 600 RPM

Δοκίμιο 1

Παρατηρώντας την εικόνα 6.3.3.84 είναι εμφανές ότι η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης και η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζουν σημαντικά τη ροή του υλικού. Αρχικά, στο δοκίμιο (α) ο χαλκός έχει αναμειχθεί με το αλουμίνιο συνθέτοντας μια χαοτική δυναμική ανάμειξη. Το υλικό εξωθείται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης, ενώ στο πάνω μέρος του χαλκού έχουν δημιουργηθεί ραβδώσεις με κατεύθυνση προς το ανώτερο μέρος της συγκόλλησης. Στο δοκίμιο (β) ο χαλκός έχει τοποθετηθεί στην προωθούμενη πλευρά, ενώ μίξη του αλουμινίου και του χαλκού παρατηρείται σε όλη σχεδόν την έκταση της ζώνης ανάδευσης.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.3.84 :Μακρογραφία του δοκιμίου (α) χωρίς κλίση εργαλείου συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM και μακρογραφία δοκιμίου (β) με κλίση εργαλείου συγκόλλησης 2° και ταχύτητα περιστροφής 600 RPM .

Δοκίμιο 2,1

Στην εικόνα 6.3.3.85 παρατηρείται στο δοκίμιο (α) εξάπλωση της ροής του υλικού καθ' ύψος και εξώθησή του στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Επιπλέον, μέρος του υλικού, (αλουμίνιο με χαλκό), κατευθύνεται προς το κέντρο της ζώνης ανάδευσης χωρίς να αποκόβεται από το γενικό σύνολο. Στο δοκίμιο (β) ο χαλκός είναι τοποθετημένος σχεδόν στο μέσο τμήμα της ζώνης ανάδευσης διατηρώντας κυκλικό σχήμα με διάκενα, το οποία αναπληρώνονται με αλουμίνιο.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.3.85 :Μακρογραφία του δοκιμίου (α) χωρίς κλίση εργαλείου συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM και μακρογραφία δοκιμίου (β) με κλίση εργαλείου συγκόλλησης 2° και ταχύτητα περιστροφής 600 RPM .

Δοκίμιο 2,2

Τα δοκίμια (α) και (β) στην εικόνα 6.3.3.86 έχουν διαφορές σχετιζόμενες με τη θέση και τη μορφή του χαλκού. Καταρχάς και στα δύο δοκίμια έχουν σχηματιστεί ροϊκές γραμμές από την κύρια μάζα του χαλκού με κατεύθυνση προς κατώτερα σημεία της συγκόλλησης. Στο δοκίμιο (α) είναι προσανατολισμένες προς την υποχωρούσα πλευρά, ενώ στο δοκίμιο (β) προς την προωθούμενη. Το σχήμα του χαλκού στο δοκίμιο (α) είναι μακρόστενο και παρατηρώντας το βάθος στο οποίο βρίσκεται, το πάνω μέρος του επηρεάζεται και από την κίνηση του περιανθενίου. Στο δοκίμιο (β) ο χαλκός είναι σχήματος περίπου ελλειψοειδές με προεξοχές στη δεξιά πλευρά του.



(α)



(β)

Εικόνα 6.2.86 :Μακρογραφία του δοκιμίου (α) χωρίς κλίση εργαλείου συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM και μακρογραφία δοκιμίου (β) με κλίση εργαλείου συγκόλλησης 2° και ταχύτητα περιστροφής 600 RPM.

Δοκίμιο 3,2

Στο δοκίμιο (α) της εικόνας 6.3.3.87 ο χαλκός έχει σχήμα που τείνει να γίνει κυκλικό με κενό στη μέση που αναπληρώνεται από το αλουμίνιο. Το πάνω μέρος του επηρεάζεται από το περιαιχένιο και αποκτά πιο μακρόστενη μορφή, όπου καταλήγει σχεδόν σε ευθεία. Στη μέση του χαλκού παρατηρείται ανάμειξη του αλουμινίου και του χαλκού κάνοντας τη ροή πιο πολύπλοκη. Στο δοκίμιο (β), ο χαλκός έχει περίπου ελλειψοειδές σχήμα γεγονός που μαρτυρά την περιστροφική κίνηση του πείρου. Τμήματα του χαλκού μαζί με το κράμα του αλουμινίου έχουν απομακρυνθεί από την κύρια μάζα τους και κατευθύνονται προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης δημιουργώντας μικρές δίνες.



(α)



(β)

Εικόνα 6.3.3.87 :Μακρογραφία του δοκιμίου (α) χωρίς κλίση εργαλείου συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM και μακρογραφία δοκιμίου (β) με κλίση εργαλείου συγκόλλησης 2° και ταχύτητα περιστροφής 600 RPM.

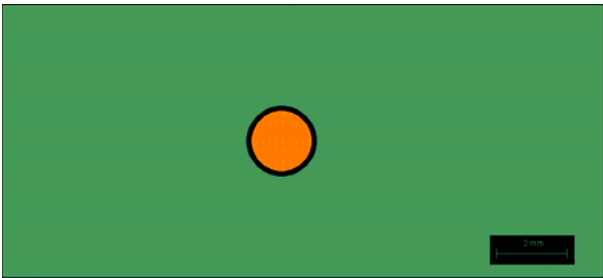
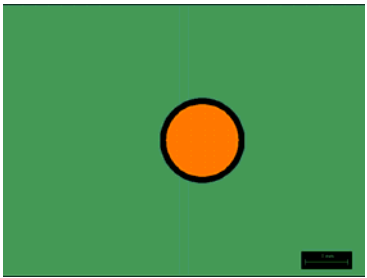
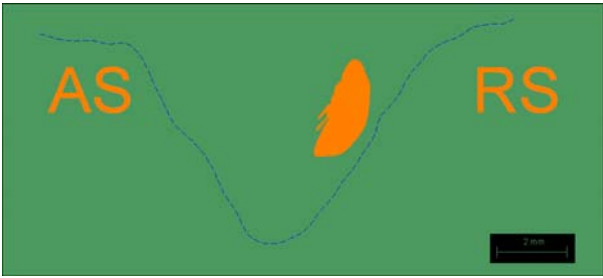
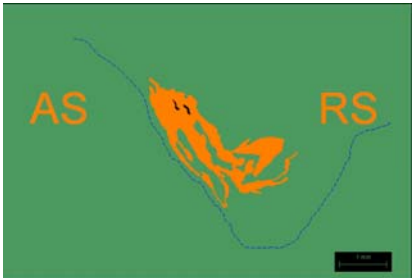
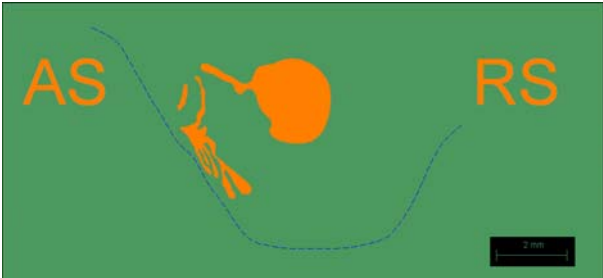
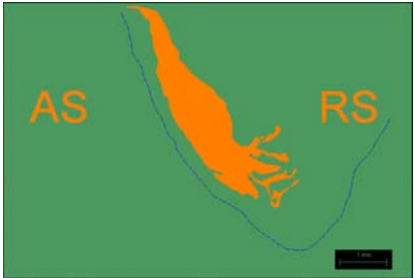
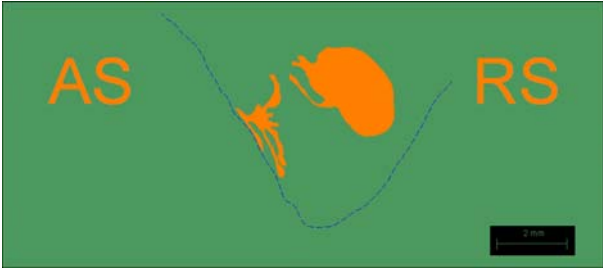
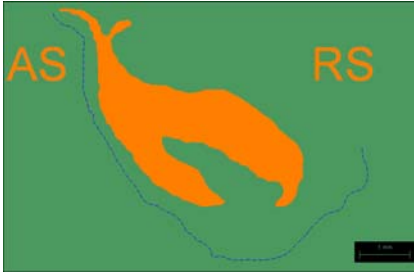
Στα παραπάνω δοκίμια παρατηρώντας τη μορφή του χαλκού καταλήγουμε στο ότι η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης, καθώς και η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζουν τη ροή του υλικού κατά την FSW. Στην πρώτη περίπτωση (χωρίς κλίση εργαλείου και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM) η ροή του υλικού είναι ανάλογη του βάθους του χαλκού. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος του χαλκού στο αλουμίνιο, τόσο αυξάνεται η επίδραση που ασκεί πάνω του ο πείρος, ενώ στα ανώτερα σημεία επηρεάζεται από την κίνηση του περιαιχενίου. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση (κλίση εργαλείου 2 ° και ταχύτητα περιστροφής 600 RPM), η ροή του χαλκού είναι πιο ομαλή. Στην αρχή της συγκόλλησης εντοπίζεται μια πιο πολύπλοκη ροή λόγω της επίδρασης του πείρου, καθώς όμως η συγκόλληση εξελίσσεται, ο χαλκός αποκτά πιο ομοιόμορφο σχήμα.

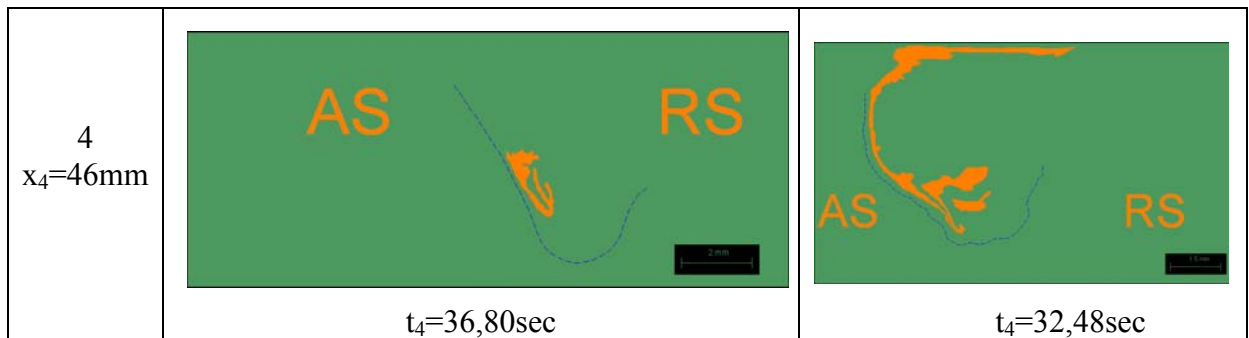
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Στο παρακάτω κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε αλληλουχία σχηματικής απεικόνισης των μακρογραφιών των δοκιμίων των παραπάνω συγκολλήσεων, έτσι ώστε να δημιουργηθεί το φυσικό μοντέλο της ροής του υλικού.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της 1^{ης} και της 2^{ης} συγκόλλησης με σκοπό να παρατηρηθεί η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στη ροή του υλικού (βλ. Πίνακα 7.1).

Πίνακας 7.1: Σχηματική απεικόνιση της ροής υλικού της 1^{ης} και 2^{ης} συγκόλλησης.

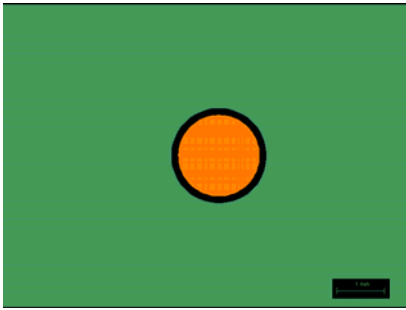
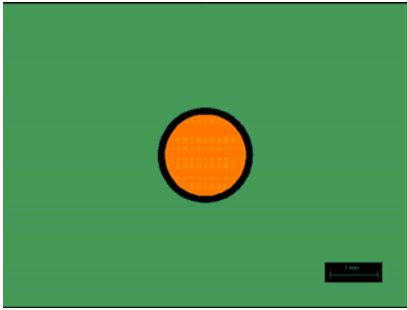
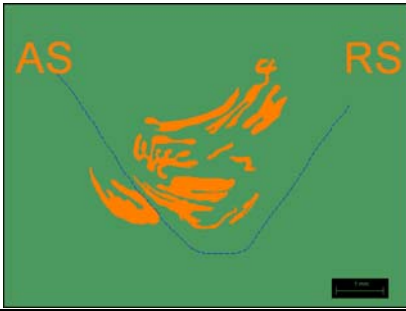
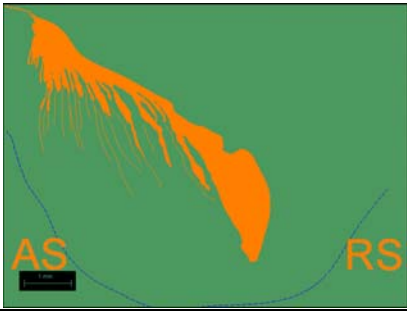
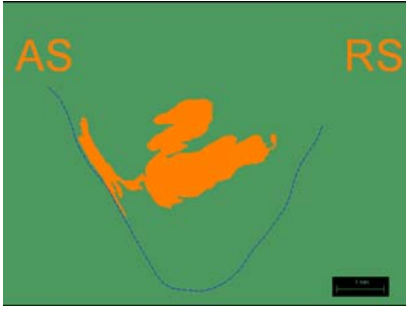
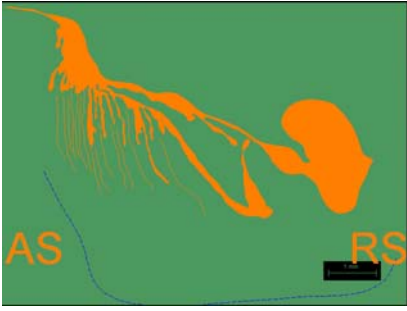
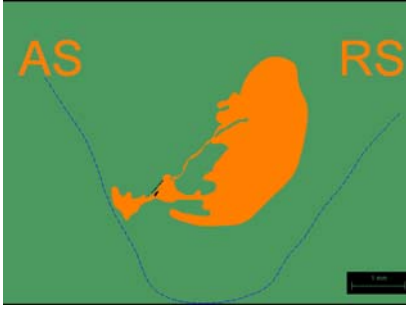
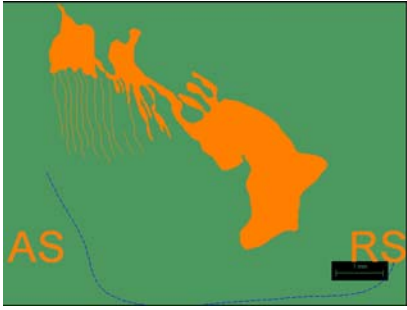
	1 ^η Συγκόλληση (75mm/min)	2 ^η Συγκόλληση(85mm/min)
0 $x_0=0\text{mm}$	 $t_0=0\text{sec}$	 $t_0=0\text{sec}$
1 $x_1=16\text{mm}$	 $t_1=12,80\text{sec}$	 $t_1=11,29\text{sec}$
2 $x_2=30\text{mm}$	 $t_2=24,00\text{sec}$	 $t_2=21,19\text{sec}$
3 $x_3=32\text{mm}$	 $t_3=25,60\text{sec}$	 $t_3=22,59\text{sec}$

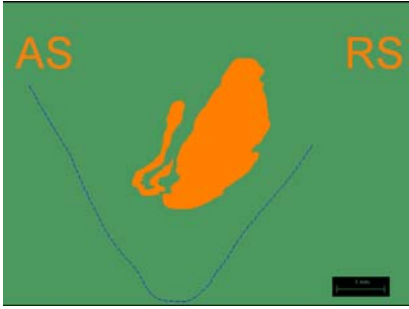
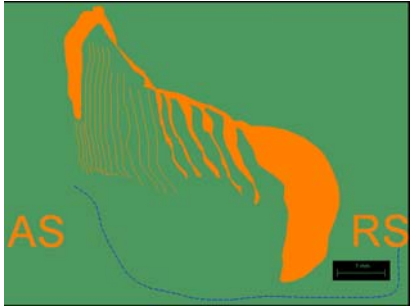
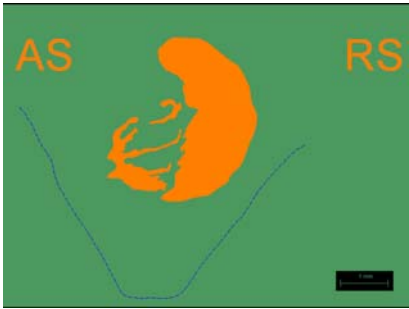

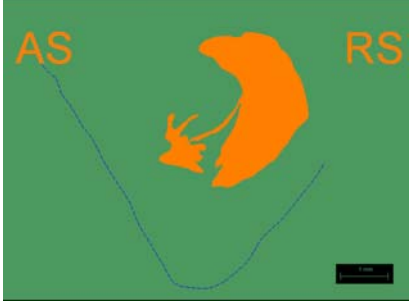
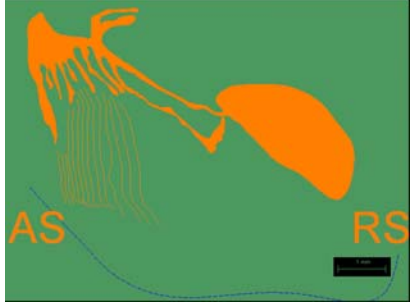
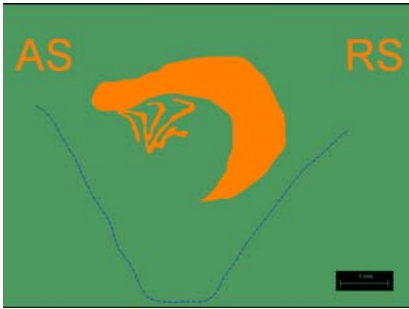
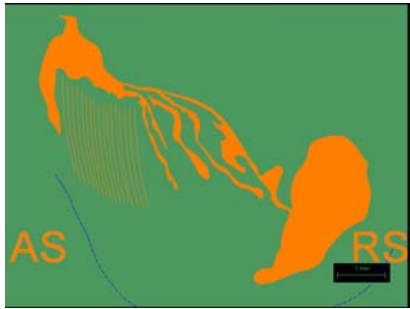
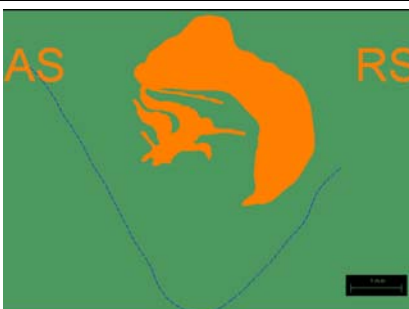
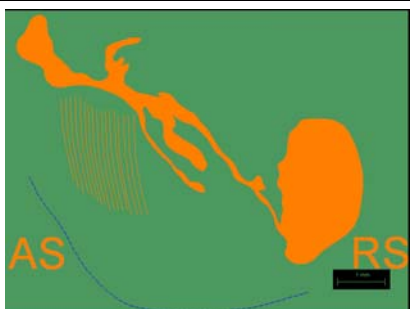


Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει αρκετά τη ροή υλικού κατά την FSW. Στα δοκίμια με ταχύτητα πρόωσης 75 mm/min, πρώτη συγκόλληση, ο χαλκός αρχικά έχει μακρόστενο σχήμα και έχει προωθηθεί στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης. Καθώς η συγκόλληση εξελίσσεται, ο χαλκός αποκτά κυκλικό σχήμα και εξωθείται στην προωθούμενη πλευρά ώσπου καταλήγει στα όρια της ζώνης ανάδευσης με την ΘΜΕΖ της προωθούμενης πλευράς. Επιπλέον, παρατηρείται μικρή διασπορά του χαλκού στη ζώνη ανάδευσης και σχεδόν καθόλου ανάμειξή του με το υλικό του κράματος, εφόσον το μεγαλύτερο μέρος του χαλκού δεν έχει αποκοπεί από την κύρια μάζα του. Αντίθετα, η ροή του υλικού στα δοκίμια με ταχύτητα πρόωσης 85 mm/min είναι τελείως διαφορετική. Συγκεκριμένα, η ροή είναι χασοτική με δημιουργία δινών και ανάμειξης του χαλκού με το κράμα του αλουμινίου. Ο χαλκός αρχικά έχει σχεδόν κυκλικό σχήμα με τάση να εξαπλωθεί προς την προωθούμενη πλευρά. Καθώς η συγκόλληση εξελίσσεται, ο χαλκός αποκτά πιο μακρόστενο σχήμα και προωθείται προς την προωθούμενη πλευρά, έχοντας εξαπλωθεί καθ' ύψος. Στο τέλος της συγκόλλησης παρατηρείται μια τάση του χαλκού να προωθηθεί προς την υποχωρούσα πλευρά. Συμπερασματικά, το υλικό από το μέσο της ζώνης ανάδευσης, προωθείται στην προωθούμενη πλευρά και εφόσον έχει μετατοπιστεί όλο προς τα εκεί, ύστερα επιστρέφει στο μέσο της ΖΑ με κατεύθυνση προς την υποχωρούσα πλευρά.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της 3^{ης} και της 4^{ης} συγκόλλησης (βλ. πίνακα 7.2), έτσι ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση της γεωμετρίας του πείρου στη ροή του υλικού.

Πίνακας 7.2 : Σχηματική απεικόνιση της ροής υλικού της 3^{ης} και 4^{ης} συγκόλλησης.

	3 ^η Συγκόλληση (κωνικός πείρος)	4 ^η Συγκόλληση (πείρος με σπείρωμα)
0 $x_0=0\text{mm}$ $t_1=0\text{sec}$		
1 $x_1=17\text{mm}$ $t_1=12,00\text{sec}$		
2 $x_2=19\text{mm}$ $t_2=13,42\text{sec}$		
3 $x_3=27\text{mm}$ $t_3=19,06\text{sec}$		

<p>4 $x_4=29\text{mm}$ $t_4=20,48\text{sec}$</p>		
<p>5 $x_5=37\text{mm}$ $t_5=26,13\text{sec}$</p>		
<p>6 $x_6=39\text{mm}$ $t_1=27,54\text{sec}$</p>		
<p>7 $x_7=47\text{mm}$ $t_7=33,19\text{sec}$</p>		
<p>8 $x_8=49\text{mm}$ $t_8=34,60\text{sec}$</p>		

Από τις παραπάνω εικόνες είναι εμφανές ότι η γεωμετρία του πείρου επηρεάζει αρκετά τη ροή του υλικού. Στην τρίτη συγκόλληση, ο χαλκός αρχικά έχει κυκλικό

σχήμα και καθώς ο πείρος κινείται και περιστρέφεται, αποκτά ημικυκλική μορφή. Η θέση του είναι στο μέσο της ζώνης ανάδευσης προς την υποχωρούσα πλευρά, με τάση εξώθησης προς την προωθούμενη πλευρά. Επίσης, τμήματα του χαλκού έχουν αποκολληθεί από την κύρια μάζα του και κατευθύνονται προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Αντίθετα, στα δοκίμια της τέταρτης συγκόλλησης, παρατηρείται η επίδραση του σπειρώματος του πείρου, κυρίως από την τάση προς δημιουργία δακτυλιοειδών μορφών. Ο χαλκός είναι τοποθετημένος στην υποχωρούσα πλευρά, ενώ τμήματά του έχουν απομακρυνθεί και έχουν τοποθετηθεί στην προωθούμενη πλευρά. Επίσης, έχουν σχηματιστεί ροϊκές γραμμές στο άνω μέρος της προωθούμενης πλευράς, με κατεύθυνση προς τα κάτω. Τέλος, υπάρχει εναλλαγή του χαλκού από κυκλικό σε ελλειψοειδές σχήμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ FSW

Εισαγωγικά

Στην παρούσα εργασία, ένα μαθηματικό μοντέλο ροής υλικού έχει δημιουργηθεί για την περιοχή της ζώνης ανάδευσης. Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε έρευνα των Carter Hamilton, Stanislaw Dymek και Marek Blicharski [25], με τη διαφορά ότι η εργασία τους αναφέρεται στην υποχωρούσα πλευρά, ενώ η παρούσα αναφέρεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.

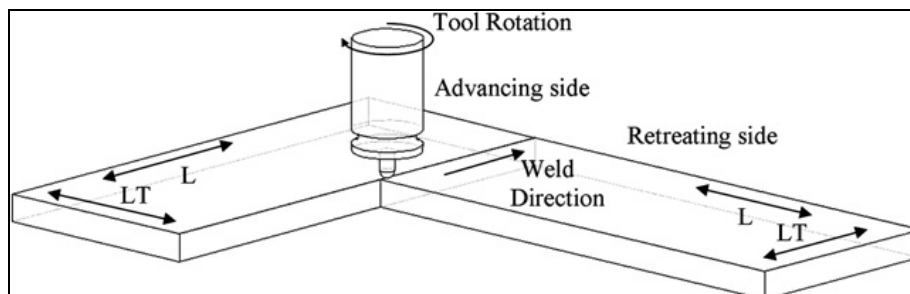
Στόχος της πραγματοποίησης της θεωρητικής προσέγγισης (μοντελοποίηση) της ροής του υλικού είναι ο θεωρητικός υπολογισμός (πρόβλεψη) του μήκους του εξωθούμενου υλικού (extruded material) και η σύγκριση της μέτρησης με την εξαγόμενη από τα πειραματικά δεδομένα τιμή. Ο υπολογισμός του μήκους του επιφανειακού υλικού (surface material), το οποίο εξωθείται στην πλαστικοποιημένη περιοχή, αποτελεί βασικό στοιχείο για την ερμηνεία της πολύπλοκης ροής υλικού κατά τη FSW. Η γνώση του μήκους του εξωθούμενου υλικού, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που εφαρμόζονται κατά τη FSW, μπορούν να δώσουν ακριβή στοιχεία για τη ροή του υλικού.

Πειραματική Διαδικασία

Ο Carter Hamilton και οι συνεργάτες του, χρησιμοποίησαν 2 δοκίμια Al 6061-T6 πάχους 6,35 mm και πλάτους 195 mm, στα οποία είχαν τοποθετήσει σύρματα κασσιτέρου πάχους 0,05 mm για να εξετάσουν τη ροή του υλικού. Η συγκόλληση μεταξύ των τεμαχίων πραγματοποιείται έτσι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90°, όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.1. Το περιανχένιο του εργαλείου συγκόλλησης είχε διάμετρο 21 mm. Η ταχύτητα περιστροφής ήταν 900 RPM και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου συγκόλλησης ήταν 5 mm/sec.

Στην παρούσα εργασία, η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τη μεταλλογραφική παρατήρηση της ροής του υλικού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο αλουμινίου διαστάσεων 190 x 150 mm και πάχους 6 mm, στο οποίο έγινε πέρασμα σε πλάκα με την τεχνική της FSW. Για να εντοπιστεί η ροή του υλικού εισάγαμε στα δοκίμια σύρματα χαλκού διαμέτρου 1,7 mm κατά τη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας πείρο με σπείρωμα, ο οποίος καταλήγει σε περιανχένιο με

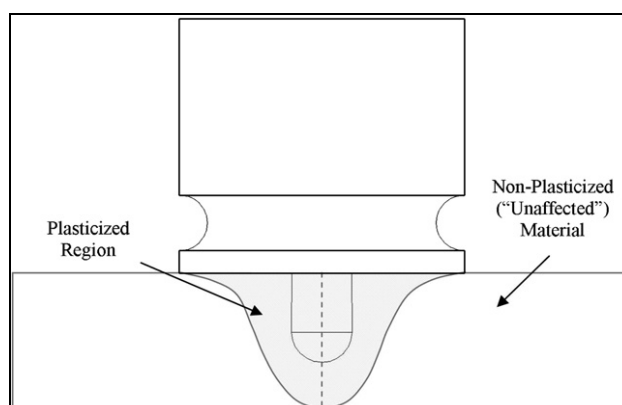
διάμετρο 22,4 mm. η ταχύτητα πρόωσης είναι 85 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής 600 RPM. Τέλος, το εργαλείο συγκόλλησης είχε κλίση 2 °.



Εικόνα 8.1 : Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης κατά τη μελέτη του Carter Hamilton. [25]

Θεωρητική προσέγγιση της ροής υλικού

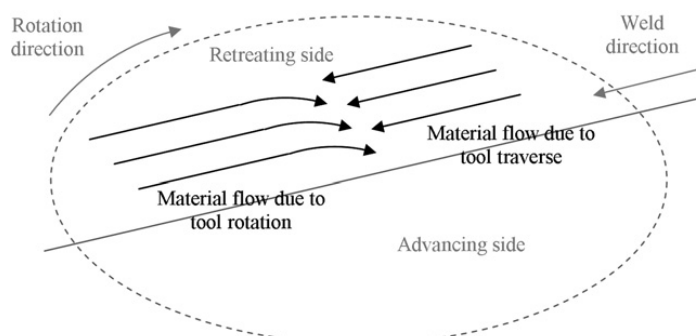
Θεωρείται ότι το περιουχένιο πλαστικοποιεί μια λεπτή, κυλινδρική περιοχή του υλικού στην επιφάνεια, ενώ ο πείρος πλαστικοποιεί περιοχή του υλικού πιο βαθιά στην ένωση, εικόνα 8.2.



Εικόνα 8.2 : Σχηματική αναπαράσταση της πλαστικοποιημένης περιοχής κατά τη FSW. [25]

Στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης η περιστροφική κίνηση του εργαλείου αντιτίθεται στην ταχύτητα πρόωσης. Λόγω των δυνάμεων τριβής που δημιουργούνται, το περιουχένιο εκτοπίζει υλικό από την επιφάνεια και το τοποθετεί κατά τη φορά της περιστροφικής κίνησης και της κίνησης πρόωσης. Επομένως, στην υποχωρούσα πλευρά, το υλικό από την επιφάνεια που περιστρέφεται με το περιουχένιο εξαναγκάζεται να ρέει κάτω από τη μετακίνηση του υλικού κατά την κατεύθυνση της συγκόλλησης, εικόνα 8.3. Ουσιαστικά, το περιουχένιο εξωθεί μέρος

του υλικού από την επιφάνεια της υποχωρούσας πλευράς και το τοποθετεί στην πλαστικοποιημένη περιοχή της ένωσης. Η διαδικασία εξώθησης δεν προκύπτει σε κάθε σημείο, αλλά σε εκείνο, όπου η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου είναι ίση και αντίθετη με την ταχύτητα πρόωσης.



Εικόνα 8.3 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας εξώθησης.[25]

Ο Heurtier [25] απέδειξε ότι υπάρχουν 3 τύποι κινήσεων κατά τη FSW :

- κυκλική (circumventing)
- στρεπτική (torsional)
- στροβιλισμού (vortex)

Η κυκλική και στρεπτική κίνηση σχετίζονται με τη ροή στην επιφάνεια του υλικού, ενώ η κίνηση στροβιλισμού σχετίζεται με τη ροή μίας λεπτής στρώσης υλικού λόγω της κίνησης του πείρου. Η παρούσα εργασία λαμβάνει υπόψη της μόνο τα δύο πρώτα είδη κινήσεων, την κυκλική, που είναι η κίνηση της επιφάνειας του υλικού γύρω από τον περιανυχένιο, και τη στρεπτική, που είναι η περιστροφική κίνηση της επιφάνειας του υλικού με την αλληλεπίδραση του στρώματος κάτω από το περιανυχένιο.

Για να υπολογίσουμε την ταχύτητα που προκύπτει από την κυκλική κίνηση χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο :

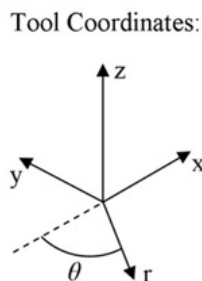
$$u_{cir} = U_w \left[1 - R^2 \frac{\cos 2\theta}{r^2} \right], (1)$$

όπου U_w είναι η ταχύτητα πρόωσης της συγκόλλησης, R η ακτίνα του περιανυχενίου, r είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο του εργαλείου και θ είναι η γωνία που σχετίζεται με τον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης (βλ. εικόνα 8.4).

Η ταχύτητα για τη στρεπτική κίνηση δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$u_{tor} = -r U_{tor} \frac{z}{t} \sin \theta, (2)$$

όπου U_{tor} είναι η περιστροφική ταχύτητα του υλικού κάτω από το περιαιχένιο, z είναι η απόσταση βύθισης του περιαιχενίου στο υλικό και t είναι το πάχος στο οποίο επιδρά το περιαιχένιο.



Εικόνα 8.4 : Σχηματική αναπαράσταση της γωνίας θ . [26]

Εξώθηση στην περιοχή της ζώνης πυρήνα συγκόλλησης προκύπτει σε απόσταση r_e , στην προωθούμενη πλευρά όπου ισχύει η ισότητα $u_{cir} = u_{tor}$:

$$U_w \left[1 - R^2 \frac{\cos 2\theta}{r^2} \right] = -r U_{tor} \frac{z}{t} \sin \theta,$$

Αν υποθέσουμε ότι $z = t$ και $\theta = -90^\circ$ τότε καταλήγουμε στο εξής :

$$r_e = \frac{U_w}{U_{tor}} \left[1 + \frac{R^2}{r_e^2} \right], (3)$$

Το μέγεθος U_{tor} εξαρτάται από την περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου συγκόλλησης, ω , την απόσταση r_e και εισάγοντας τον παράγοντα β (scaling factor β) έχουμε τη σχέση :

$$U_{tor} = \beta \omega r_e, (4)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι ο παράγοντας β υπολογίζεται ως εξής :

$$\beta = \frac{U_w}{\omega r_e^2} \left[1 + \frac{R^2}{r_e^2} \right], (5)$$

Εφαρμογή του ανωτέρω θεωρητικού μοντέλου στην περίπτωση μας

Τα δεδομένα είναι εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στην τέταρτη συγκόλλησης (βλέπε Πίνακα 5.2).

$$\text{Ταχύτητα } _ \text{πρόωσης} : U_w = 85 \text{ mm} / \text{min} \Rightarrow U_w = 1,416 \text{ mm} / \text{sec}$$

$$\text{Ταχύτητα } _ \text{περιστροφής} : \omega = 2\pi \frac{600}{60} = 62,83 \text{ rad} / \text{sec}$$

$$\text{Ακτίνα } _ \text{περιαυχενίου} : R = 11,2 \text{ mm}$$

$$\text{Ακτινική } _ \text{απόσταση } _ \text{από } _ \text{το } _ \text{κέντρο} : r_e = 3,5 \text{ mm}$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω στην εξίσωση (1) προκύπτει ότι η κυκλική ταχύτητα ισούται με :

$$u_{cir} = U_w \left[1 - R^2 \frac{\cos 2\theta}{r^2} \right] \Rightarrow$$

$$u_{cir} = 1,416 \left[1 - 11,2^2 \frac{\cos 2(-90)}{3,5^2} \right] \Rightarrow$$

$$u_{cir} = 15,92 \text{ mm} / \text{sec}$$

Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω μπορούμε να βρούμε τιμή για τον παράγοντα β , αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) :

$$\beta = \frac{U_w}{\omega r^2} \left[1 + \frac{R^2}{r^2} \right] \Rightarrow$$

$$\beta = \frac{1,416}{62,83(3,5^2)} \left[1 + \frac{11,2^2}{3,5^2} \right] \Rightarrow$$

$$\beta = 0,02$$

Υπολογίζοντας τον παράγοντα β μπορούμε να υπολογίσουμε και την ταχύτητα για τη στρεπτική κίνηση, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) :

$$u_{tor} = -rU_{tor} \frac{z}{t} \sin \theta$$

Με τα παρακάτω δεδομένα :

$$r = r_e$$

$$z = t$$

$$\theta = -90^\circ$$

$$U_{tor} = \beta \omega r_e = 0,02 \times 62,83 \times 3,5 \text{ radmm / sec}$$

$$U_{tor} = 4,39 \text{ radmm / sec}$$

$$\text{Η στρεπτική ταχύτητα ισούται με : } u_{tor} = 15,36 \text{ rad / sec}$$

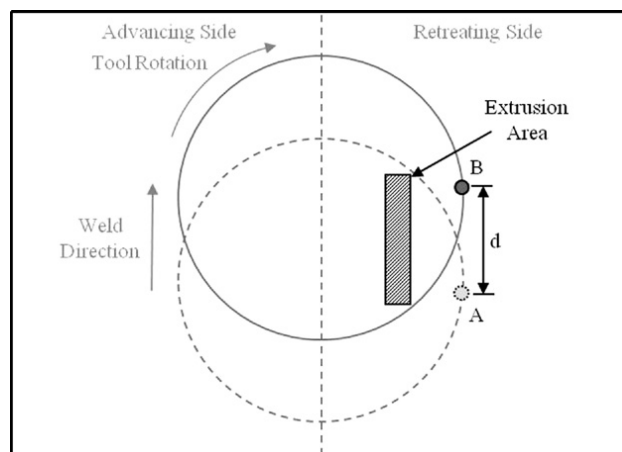
Για να υπολογιστεί ο όγκος του υλικού που εξωθείται στην πλαστικοποιημένη περιοχή, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το ποσοστό που εξωθείται ανά περιστροφή του εργαλείου συγκόλλησης. Καθώς το εργαλείο περιστρέφεται και η συγκόλληση προχωράει, ένα σημείο αν αρχικά ήταν στη θέση Α μετακινείται και τοποθετείται στο σημείο Β, το οποίο απέχει από το Α μια απόσταση d, εικόνα 8.5. Σε μία περιστροφή του εργαλείου η απόσταση αυτή δίνεται από τη σχέση :

$$d = \frac{2\pi U_w}{\omega}, (6)$$

Η περιοχή εξώθησης που δημιουργείται σε μια περιστροφή (εικόνα 8.5) μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα «άνοιγμα» στην πλαστικοποιημένη περιοχή του πάχους της ένωσης και δίνεται από τη σχέση :

$$A_{die} = \frac{2\pi U_w}{\omega} w, (7)$$

όπου w είναι το εύρος του ανοίγματος.



Εικόνα 8.5 : Σχηματική απεικόνιση περιοχής εξώθησης ανά περιστροφή εργαλείου συγκόλλησης.

Όπως έχει προαναφερθεί, το περιανχένιο πλαστικοποιεί ένα λεπτό, κυλινδρικό μέρος του υλικού και έτσι δημιουργείται ένα στρώμα αλληλεπίδρασης πάχους t . Το υλικό που εξωθείται στην προωθούμενη πλευρά προέρχεται από το στρώμα αλληλεπίδρασης και δημιουργεί δακτυλιοειδείς μορφές ομόκεντρες του περιανχενίου και σε απόσταση r_e . Αν το εύρος των δακτυλιοειδών μορφών ισούται με το εύρος του ανοίγματος τότε ο όγκος του υλικού που εξωθείται ανά περιστροφή ισούται με :

$$V_{ring} = 2\pi r_e w t, (8)$$

Αν υποθέσουμε ότι όλος ο όγκος των δακτυλιοειδών μορφών εξωθείται στην πλαστικοποιημένη περιοχή σε κάθε περιστροφή τότε το μήκος του εξωθούμενου υλικού ισούται αν συνδυάσουμε τις παραπάνω εξισώσεις (7) και (8) :

$$2\pi r_e w t = A_{die} l$$

Επομένως, το μήκος του υλικού που εξωθείται ανά περιστροφή ισούται με :

$$l = \frac{rt\omega}{U_w} \Rightarrow$$

$$l = \frac{3,5 \times 0,1 \times 62,83}{1,416} \Rightarrow$$

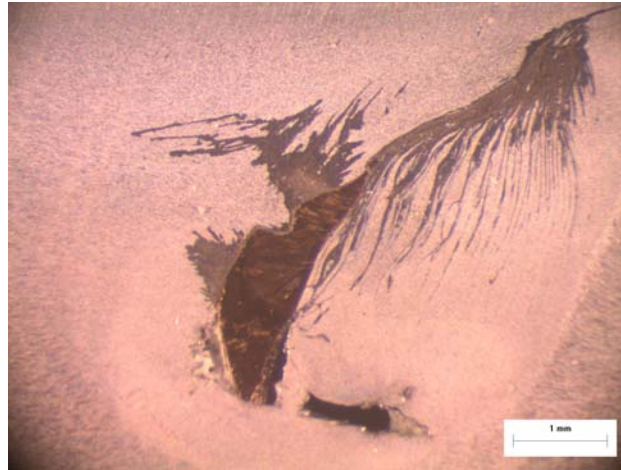
$$l = 15,53 \text{ mm / tool_revolution}$$

Σε ένα δευτερόλεπτο το εργαλείο συγκόλλησης περιστρέφεται 10 φορές επομένως το μήκος του εξωθούμενου υλικού σε ένα δευτερόλεπτο είναι :

$$l = 155,3 \text{ mm}$$

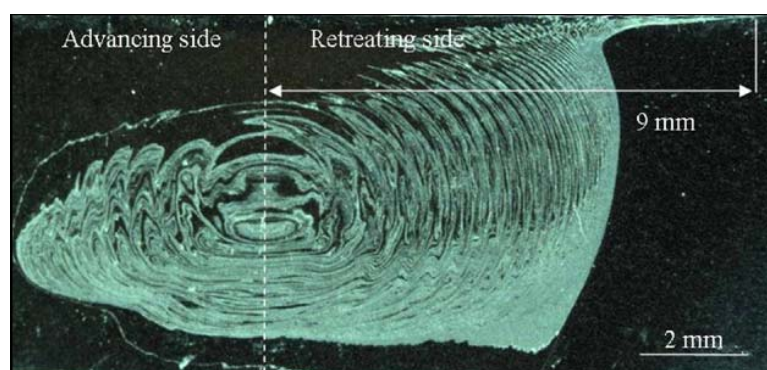
Για τη σύγκριση των θεωρητικών με τις πειραματικές τιμές, θεωρήθηκε απαραίτητη η μέτρηση του εμβαδού της εξωθούμενης περιοχής που προέκυψε στην προωθούμενη πλευρά, από τη μακρογραφία του δοκιμίου 1 (εικόνα 8.6). Το εμβαδόν ισούται με $E = 9,72 \text{ mm}^2$. Το εμβαδόν του χαλκού καταλαμβάνει το 26% του συνολικού εμβαδού, επομένως $E_{Cu} = 2,53 \text{ mm}^2$. Διαιρώντας το E_{Cu} με το εύρος του υλικού που εξωθείται ($t = 0,016 \text{ mm}$) υπολογίζεται πειραματικά ότι $l = 157,95 \text{ mm}$ ανά δευτερόλεπτο.

Τελικά, το προτεινόμενο μοντέλο προσεγγίζει πολύ καλά την πειραματική τιμή, εφόσον παρατηρείται μικρή μόνο απόκλιση και ίση με 1,67 %, που είναι αποδεκτή λόγω των σφαλμάτων στη μέτρηση των αποστάσεων, των σφαλμάτων που προέκυψαν από τη μη εισαγωγή κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης στο μοντέλο και της διακοπής του σπειρώματος.



Εικόνα 8.6 : Μακρογραφία δοκιμίου 1 της συγκόλλησης 4.

Ο Carter Hamilton και οι συνεργάτες του [25], στη μελέτη τους υπολόγισαν από το μοντέλο, ότι η τιμή του μήκους του υλικού που εξωθείται ανά δευτερόλεπτο, ισούται με 189 mm. Οι πειραματικές τους μετρήσεις έδειξαν ότι τελικά το μήκος του υλικού που εξωθείται σε ένα δευτερόλεπτο στην πλαστικοποιημένη περιοχή ισούται με 175 mm, έχοντας απόκλιση 8 %. Η μικρή διαφορά που εντοπίζεται ανάμεσα στη μελέτη του Hamilton [25] και την παρούσα, οφείλεται στις διαφορετικές παραμέτρους που εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Επίσης, οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται και στο ότι ο Hamilton [25] αναφέρεται στην υποχωρούσα πλευρά (εικόνα 8.7), ενώ η παραπάνω εργασία αναφέρεται στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.



Εικόνα 8.7 : Μικρογραφία δοκιμίου στην οποία απεικονίζεται η ζώνη ανάδευσης. Το ανώτερο άκρο δεξιά ανταποκρίνεται στην άνω επιφάνεια του εξωθούμενου υλικού, (dark field image). [25]

Αναλυτικότερα, στη δημοσίευση του Hamilton [25], η πλευρά που αναφέρεται ως υποχωρούσα όπως φαίνεται και στην εικόνα 8.7 είναι η προωθούμενη. Αυτό

ισχύει διότι η προωθούμενη πλευρά εμφανίζει το χαρακτηριστικό εξώθησης του υλικού που παρατηρείται δεξιά στο άνω μέρος της εικόνας αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ύστερα από τη μελέτη της ροής του υλικού κατά τη συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, σε δοκίμια Al 5083 – H1111 πάχους 6 mm , προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα :

- Κατά τη διαδικασία της FSW, παρατηρείται η εμφάνιση των τριών χαρακτηριστικών περιοχών μικροδομής : η ΘΕΖ, η ΘΜΕΖ και η ΖΑ.
- Η ροή του υλικού με κωνικό πείρο, ταχύτητα πρόωσης 75 mm/min και ταχύτητα περιστροφής 475 RPM, είναι ομαλή, με το χαλκό να διατηρεί κυκλικό σχήμα. Δεν παρατηρούνται δίνες και ανάμειξη του υλικού. Ο χαλκός από την υποχωρούσα, μετατοπίζεται προς την προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης.
- Αλλάζοντας την ταχύτητα πρόωσης, από 75 στα 85 mm/min, η ροή του υλικού διαφοροποιείται αρκετά. Ο πείρος αναδεύει το υλικό και το αναμειγνύει συνθέτοντας μια χαοτική δυναμική ανάμειξη. Ο χαλκός, ο οποίος είναι αρχικά τοποθετημένος στο μέσο της ζώνης ανάδευσης, «παρασύρεται» από την κίνηση του πείρου και τοποθετείται στην προωθούμενη πλευρά.
- Στην επόμενη συγκόλληση, η ταχύτητα περιστροφής αυξήθηκε στα 600 RPM και το εργαλείο συγκόλλησης απέκτησε κλίση 2 μοιρών. Ο χαλκός, στην αρχή της συγκόλλησης, έχει σχετικά κυκλικό σχήμα, και κατά τη διάρκεια της FSW, αποκτά ημικυκλικό. Επίσης, ενώ αρχικά στην προωθούμενη πλευρά, καταλήγει στην υποχωρούσα, με ροϊκές γραμμές να έχουν κατεύθυνση στην προωθούμενη πλευρά.
- Στην τελευταία συγκόλληση, τοποθετήθηκε πείρος με σπείρωμα για να παρατηρηθεί πως επηρεάζει η γεωμετρία του πείρου στη ροή του υλικού. Αυτό που παρατηρήθηκε, είναι ότι η ροή του χαλκού είναι ομαλή, με το χαλκό να εναλλάσσει το σχήμα του από κυκλικό σε ημικυκλικό και να τοποθετείται στην υποχωρούσα πλευρά. Το σπείρωμα του πείρου, αναμειγνύει το κράμα του αλουμινίου με το χαλκό, δημιουργώντας ροϊκές γραμμές και δακτυλιοειδείς μορφές στην προωθούμενη πλευρά.
- Επιπλέον, συνθέτοντας τις μικρογραφίες των δοκιμίων, δημιουργήθηκε ένα φυσικό μοντέλο στο οποίο φαίνεται σχηματικά η επίδραση της

ταχύτητας πρόωσης και η επίδραση της γεωμετρίας του πείρου συγκόλλησης στη ροή του υλικού.

- Τέλος, στο μοντέλο που προτείνεται, υπολογίστηκε το μήκος εξωθούμενου υλικού ανά δευτερόλεπτο και ισούται με $l = 155,3 \text{ mm}$, το οποίο έχει απόκλιση $1,67 \%$ από τις πειραματικές μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ι. Παπάζογλου, Γ. Παπαδημητρίου, “ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ε.Μ.Π, Αθήνα 1994.
2. The Welding Institute- www.twi.co.uk
3. www.weldingengineer.com
4. www.praxair.com
5. www.loxin2002.com
6. Department of Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge – www.msm.cam.ac.uk
7. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R, vol 50, pp 1-78, 2005.
8. 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, pp 163-175, 2008.
9. “Friction Stir Link Inc” - www.frictionstirlink.com
10. 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, pp 95-101, 2002.
11. Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, “ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.

12. "Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, H.N.B. Schmidt", T.L. Dickerson, J.H. Hattel, *Acta Materialia*, pp 1199-1209, 2005.
13. "Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum", Ying Li, L.E. Murr and J.C. McClure, *Materials Science and Engineering*, pp 213-223, 1999.
14. "Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process", Y.-H. Zhao, S.-B. Lin, F.-X. Qu and L. Wu, *Materials Science and Technology*, vol 22, no 1, pp 45-50, 2006.
15. K. Colligan, "Material flow behaviour during friction stir welding of aluminium", *Welding Journal* vol.78 no.7, pp229-237, Jul. 1999.
16. "Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction-Stir Welds Using a Marker Insert Technique", T.U.SEIDEL, A.P.REYNOLDS, *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, vol. 32A, pp 2879-2884, 2001.
17. Judy Schneider, Ronald Beshears, Arthur C. Nunes Jr. "Interfacial sticking and slipping in the friction stir welding process", *Materials Science and Engineering*, vol. 435-436, pp. 297-304, Nov. 2006.
18. "Validation of Marker Material Flow in 4 mm Thick Friction Stir Welded Al 2024 – T351 through Computer Microtomography and dedicated Metallographic Techniques", Rudolf Zettler, Tilman Donath, Jorge F. dos Santos, Felix Beckman and Daniela Lohwasser, *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, pp 68-79, 2006.
19. S.W. Xu, X.M. Deng, A.P.Reynolds, T.U. Seidel, "Finite element simulation of material flow in friction stir welding", *Sci.Technol.Weld. Joining* 6, pp 340-348, 2001.

20. H.W. Zhang, Z. Zhang, J.T. Chen, “3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters”, *Journal of Material Processing Technology*, vol. 183, no. 1, pp. 62-67, Mar. 2007.
21. Paul A. Colegrove, Hugh R. Shercliff, “3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile”, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 320–327.
22. G.J. Bendzsak, C.B. Smith, in: *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000.
23. William J. Arbegast, “A flow-partitioned deformation zone model for defect deformation during friction stir welding”, vol. 58, pp 372-376, 2007.
24. B.C. Liechty, B.W. Webb, “Flow field characterization of friction stir processing using a particle-grid method”, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, Provo, USA, pp 431–443, 2008.
25. Carter Hamilton, Stanislaw Dymek, Marek Blicharski, *Materials Characterization*, “A model of material flow during friction stir welding”, 2007.
26. C. Hamilton, S. Dymek, A. Sommers, A thermal model of friction stir welding in aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008.