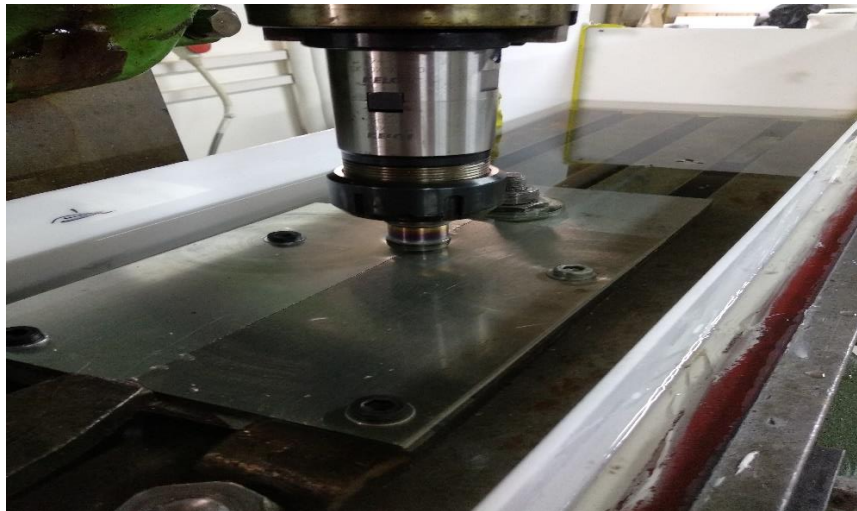




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
**Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-
Μεταλλουργών**

Κατεύθυνση Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΑ6082-
ΑΑ5083 ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ FRICTION STIR WELDING
ΚΑΙ UNDERWATER FRICTION STIR WELDING**



Αντώνης Τζωρτζόπουλος

Επίβλεψη
Σπύρος Παπαευθυμίου,
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Φεβρουάριος 2020

Τριμελή Επιτροπή:

ΣΠΥΡΟΣ ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ Ε.Μ.Π.

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ Ε.Μ.Π.

ΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε παράλληλα σε δύο εργαστήρια του ΕΜΠ και στην εταιρία ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. Στο ΕΜΠ εκπονήθηκαν οι συγκολλήσεις τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding) στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών εκπονήθηκε ο έλεγχος της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων .

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Σπύρο Παπαευθυμίου για την ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγηση του και, κυρίως, για την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο μου για την υλοποίηση της μελέτης .

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω των κ. Ευάγγελο Γαβαλά, ο οποίος εργάζεται στην εταιρία ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. για την απεριόριστη βοήθεια του και τις καθοριστικές για την ολοκλήρωση της πτυχιακής συμβουλές του.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγητή κ. Δημήτρη Μανωλάκο για την παραχώρηση του μηχανημάτων του εργαστηρίου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, αλλά και τον υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για την βοήθεια του στην πραγματοποίηση των πειραμάτων FSW.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών κ. Αναστασία Αλεξανδράτου, κ. Αλέξανδρο Μπάνη και κ. Σταύρο Δεληγιάννη για τη πολύτιμη βοήθεια τους.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πέτρο Τσακιρίδη για την άριστη συνεργασία στις δοκιμές εφελκυσμού, αλλά και τα μέλη της 3μελούς συμβουλευτικής επιτροπής για τις συμβουλές τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που στάθηκε αρωγός σε όλη την προσπάθεια μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding - FSW) είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος συγκόλλησης, η οποία αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI). Πρόκειται για μια μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, αφού δεν υπάρχει τήξη των προς συγκόλληση υλικών, παρά μόνο μερική πλαστικοποίηση τους. Λόγω, της απουσίας τήξης και συνεπώς της μειωμένης θερμικής παροχής, οι συγκολλήσεις της μεθόδου (FSW), εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αναβαθμισμένη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.), σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιέρωσαν την εφαρμογή της μεθόδου FSW σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, όπως στη ναυπηγική και στην αεροδιαστημική βιομηχανία, στις σιδηροδρομικές μεταφορές καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι ερευνητές στην προσπάθεια τους να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της συγκόλλησης προσπάθησαν να βρουν έξυπνα συστήματα ψύξης. Η ανακάλυψη της υποβρύχιας συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης (Underwater Friction Stir Welding - UFSW) έχει τη δυνατότητα της συνεχούς και ομοιόμορφης ψύξης των δοκιμών καθ' όλη την διάρκεια της συγκόλλησης. Σε αυτή την Διπλωματική μελετήθηκε η μέθοδος υποβρύχιας συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου AA5083 και AA6082. Πραγματοποιήθηκε συγκόλληση με διαφορετικές παραμέτρους (ταχύτητα και ταχύτητα περιστροφής). Τα παραχθέντα δοκίμια αξιολογήθηκαν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες μέσω δοκιμών εφελκυσμού και σκληρομετρήσεων καθώς και εξετάστηκαν με οπτική μικροσκοπία και με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Έγινε σύγκριση με τις ίδιες παραμέτρους των αποτελεσμάτων με δοκίμια που προήλθαν από συγκόλληση με τριβή και ανάδευση εκτός νερού. Από τα αποτελέσματα γίνεται κατανοητό ότι στα δοκίμια που η συγκόλληση έχει πραγματοποιηθεί υποβρύχια, υπάρχει περιορισμένη θερμικώς επηρεασμένη ζώνη, οι μηχανικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και επίσης παρουσιάζεται εκλέπτυνση των κόκκων σε σύγκριση με εκείνα που πραγματοποιήθηκε εκτός νερού.

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new method of welding, which was initially developed by The Welding Institute (TWI). This is a method used for welding solid-state materials as there is no melting of the workpieces and only a minor amount of plastification occurring on them. Due to the lack of melting and consecutively of the reduced thermal input, Friction Stir Welding methods show increased mechanical properties and upgraded heat affected zone (HAZ), compared to conventional welding methods. These advantages established the application of the Friction Stir Welding method in a variety of industrial sectors such as, shipbuilding, aerospace, motor and even in the railway industry. Researchers aiming to improve the results of the method utilized smart cooling solutions. The invention of the Underwater Friction Stir Welding (UFSW) has the ability to continuously and uniformly cool the workpieces throughout the whole welding process. The study performed examines the Underwater Friction Stir Welding between the AA5083 and AA6082 aluminum alloys. The tests carried out varied in both speed and revolution speed. The workpieces were evaluated for their mechanical properties with the aid of tensile stress test and hardness measurements as well as assessed using optical and scanning electron microscopy. The results were compared with workpieces derived from classic Friction Stir Welding, without water cooling, with the same parameters. The final results clearly indicate that the workpieces obtained by the Underwater Friction Stir Welding have reduced heat affected zone, improved mechanical properties and grain refinement compared with the ones obtained with the Friction Stir Welding Method.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ.....	9
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	11
Συγκολλήσεις Στερεάς Κατάστασης	11
Συγκολλήσεις δια Τριβής.....	11
Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (FSW)	12
Υποβρύχια Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (UFSW)	14
Ταχύτητα Πρόωσης και Ταχύτητα Περιστροφής	15
Γωνία Κλίσης και Βάθος Διείσδυσης του Εργαλείου	16
Γεωμετρία του Εργαλείου	17
Ζώνες Συγκόλλησης.....	22
Ατέλειες που Δημιουργούνται κατά τη Συγκόλληση.....	24
Υπολογισμός Παραγόμενης Θερμότητας	26
Αλουμίνιο και Κράματα Αλουμινίου	28
Κράματα Αλουμινίου	29
Ονομασία των Κραμάτων Αλουμινίου	30
Κραματικά Στοιχεία των Κραμάτων Αλουμινίου	32
Κράματα Αλουμινίου Σειράς 5000	34
Κράματα Αλουμινίου Σειράς 6000	36
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	39
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	50
Μέταλλα Βάσης	50
Εξοπλισμός και Συνθήκες Συγκόλλησης	53
Εργαλείο Συγκόλλησης.....	54
Προετοιμασία Ελασμάτων	56
Κοπή Δοκιμών.....	58

Εγκιβωτισμός.....	59
Χημική Προσβολή	62
Δοκιμή Εφελκυσμού	64
Μικροσκληρομέτρηση	66
Οπτική Μικροσκοπία	68
Ηλεκτρική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM).....	69
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	73
Μακροσκοπική Μελέτη Δοκιμίων	73
Αποτελέσματα Δοκιμών Εφελκυσμού	73
Αποτελέσματα Μικροσκληρομετρήσεων	76
Επιφάνειες Συγκολλήσεων	77
Μικροσκοπική μελέτη δοκιμίων.....	80
Αποτελέσματα Οπτικού Μικροσκοπίου	80
Αποτελέσματα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM)	87
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΣΚΟΠΟΣ

Τα κράματα αλουμινίου είναι υλικά που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη βιομηχανία λόγω των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων. Τομείς όπως η αεροβιομηχανία, η ναυπηγική βιομηχανία και η αυτοκινητοβιομηχανία στηρίζονται στα κράματα του αλουμινίου για τις απαιτητικές ανάγκες τους. Η ένωση των διαφόρων κραμάτων αλουμινίου είναι απαραίτητη για να σχηματιστούν σύνθετες και υψηλών προδιαγραφών εφαρμογές. Οι κλασσικές μέθοδοι τήξης (TIG, MIG) δεν έχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς είτε είναι μη εφικτές είτε υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Μια από τις λύσεις στο πρόβλημα των συγκολλήσεων είναι η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση (Friction Stir Welding). Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά πρόσφατη, ανακαλύφθηκε το 1991 στο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute – TWI) στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η διαφορά της μεθόδου FSW σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους είναι ότι κατά την συγκόλληση το μέταλλο δεν λιώνει. Αποφεύγονται με αυτό τον τρόπο π.χ. τα εγκλείσματα και οι ρωγμές στερεοποίησης που προκαλούνται κατά την τήξη.

Έχει διαπιστωθεί σε πολλές έρευνες ότι η ψύξη κατά την διάρκεια την συγκόλλησης και μετά το πέρας αυτής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα της συγκόλλησης. Οι επιστήμονες σε αυτή την προσπάθεια τους να βελτιώσουν τη μέθοδο FSW αλλάζοντας το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια δοκίμασαν να συγκολλήσουν σε υποβρύχιο περιβάλλον. Δημιουργήθηκε έτσι μια υποκατηγορία του FSW, η Υποβρύχια Συγκόλληση με Τριβή και Ανάδευση (Underwater Friction Stir Welding) η οποία αποτελεί ουσιαστικά μια συγκόλληση FSW η οποία συμβαίνει εντός του νερού, με σκοπό την συνεχή και ομοιόμορφη ψύξη της συγκόλλησης καθόλα τη διάρκεια της. Η μέθοδος αυτή έχει διερευνηθεί λίγο όσον αφορά την επίδραση της στα τεχνικά χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων αλλά και στην σύγκριση της με το FSW. Η συγκόλληση με FSW μεταξύ διαφορετικών τύπων αλουμινίου έχει πραγματοποιηθεί και στο παρελθόν και έχουν αποδειχθεί ότι είναι εφικτές. Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια της βελτίωσης του FSW σε διαφορετικά κράματα αλουμινίου έχει οδηγήσει στην διερεύνηση του UFSW σε αυτού του τύπου της συγκολλήσεις. Παρόλα αυτά παράμετροι της συγκόλλησης, οι

μηχανικές ιδιότητες, η ροή του υλικού, το μέγεθος των κόκκων, οι παραμένουσες τάσεις αλλά και άλλα χαρακτηριστικά του USFSW, έχουν πολύ λίγο μελετηθεί.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθεί η συγκόλληση με τη μέθοδο UFSW μεταξύ των κραμάτων AA5083-H111 και AA6082-T6 αλλά και να συγκριθεί με την ένωση των ίδιων κραμάτων υπό τις ίδιες παραμέτρους με την μέθοδο FSW. Οι ποιότητα των συγκολλήσεων διερευνήθηκε μέσω μεθόδων εφελκυσμού, μεθόδων μικροσκληρομέτρησης, οπτικού μικροσκοπίου και οπτικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Συγκολλήσεις Στερεάς Κατάστασης

Η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση της οποίας υποκατηγορία αποτελεί και η υποβρύχια συγκόλληση με τριβή και ανάδευση είναι μέρος των συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης. Η κατηγορία αυτή των συγκολλήσεων πετυχαίνει την κρυσταλλική και μεταλλουργική σύνδεση των προς ένωση υλικών κυρίως με την πλαστική παραμόρφωση τους και χωρίς την τήξη τους^[1,2]

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των μεθόδων Στερεάς Κατάστασης.^[3]

Συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απουσία τήξης	Απαιτητική προετοιμασία των προς συγκόλληση υλικών
Μικρή διαταραχή της μικροδομής	Εξειδικευμένος εξοπλισμός
Χαμηλές θερμοκρασίες	Μη φορητός εξοπλισμός
Μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη	Δύσκολη επιθεώρηση της ποιότητας των συγκολλήσεων
Απουσία ζώνης τήξης	Δύσκολη έως αδύνατη η επιδιόρθωση τυχών λάθους

Πίνακας 1.0

Συγκολλήσεις δια Τριβής

Οι συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης περιλαμβάνουν και την κατηγορία των συγκολλήσεων με τριβή.



Εικόνα 1 Συγκόλληση δια Τριβής με Περιστροφή.

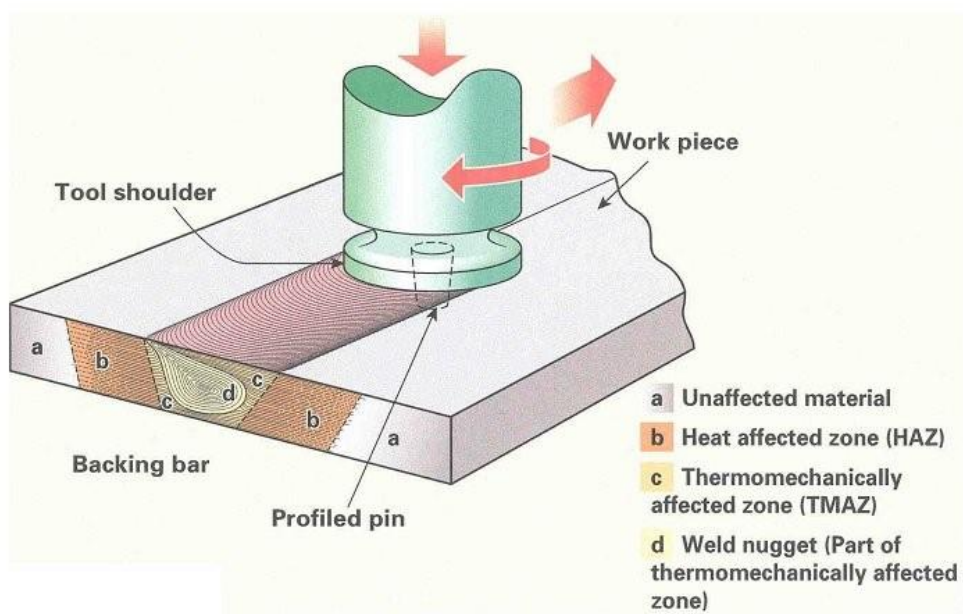
Στις συγκολλήσεις με τριβή, μέσω της τριβής παράγεται θερμότητα που πλαστικοποιεί τις επιφάνειες που είναι προς ένωση και σε συνδυασμό με την άσκηση δύναμης ολοκληρώνεται η συγκόλληση. Κοινό χαρακτηριστικό σε όλες τις συγκολλήσεις με τριβής αποτελεί η απουσία τήξης των προς συγκόλληση υλικών.^[4,5,6]

Κατηγορίες^[1,7]:

- I. Συγκολλήσεις δια Τριβής με Περιστροφή
 - Μέθοδος Συνεχούς Οδήγησης (Direct Drive Friction Welding)
 - Μέθοδος μέσω Αδράνειας ή Συσσωρευμένης Ενέργειας (Inertia Friction Welding)
 - Υβριδική Μέθοδος (Hybrid Friction Welding)
- II. Συγκόλληση δια Τριβής με Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Friction Welding)
- III. Συγκολλήσεις δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding)
- IV. Συγκόλληση δια Τριβής με Κίνηση σε Τροχιά (Orbital Friction Welding)
- V. Συγκόλληση δια Τριβής με Τοξοειδή Περιστροφή (Radial Friction Welding)

Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (FSW)

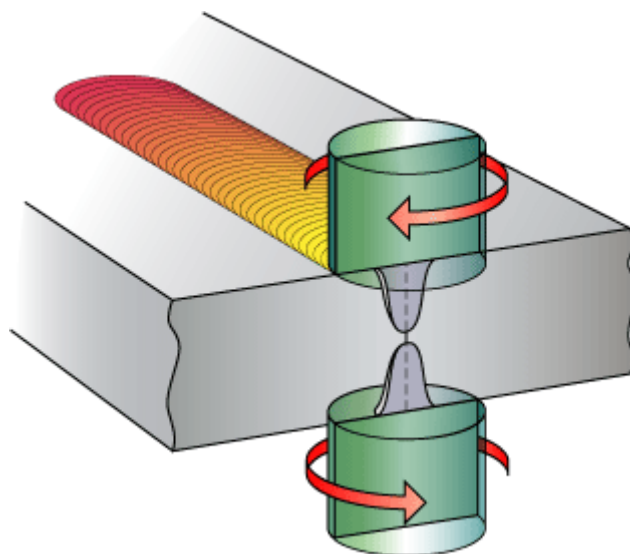
Σε αυτή την τεχνική συγκόλλησης ένα μη καταναλισκόμενο Εργαλείο (Tool) το οποίο αποτελείτε από το Περιαιχένιο (Shoulder) και το Πείρο (Pin), περιστρέφεται κατά μήκος των επιφανειών που είναι να συγκολληθούν.



Εικόνα 2 Απεικόνιση των ζωνών FSW.

Η ένωση πραγματοποιείται από την θερμότητα που παράγεται από την τριβή μεταξύ του εργαλείου και των προς συγκόλληση υλικών και την δύναμη που ασκεί το εργαλείο στη συγκόλληση.^[8,9]

Εκτός της βασικής μεθόδου με το πέρασμα των χρόνων έχουν αναπτυχθεί και έχουν δημιουργηθεί διαφορετικές τροποποιήσεις π.χ. διπλό εργαλείο (double-sided friction stir welding)



Εικόνα 3 Απεικόνιση της μεθόδου FSW με τη χρήση δύο εργαλείων ταυτόχρονα.

Η μέθοδος FSW αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης λόγω των εξαιρετικών αποτελεσμάτων της.^[10,11]

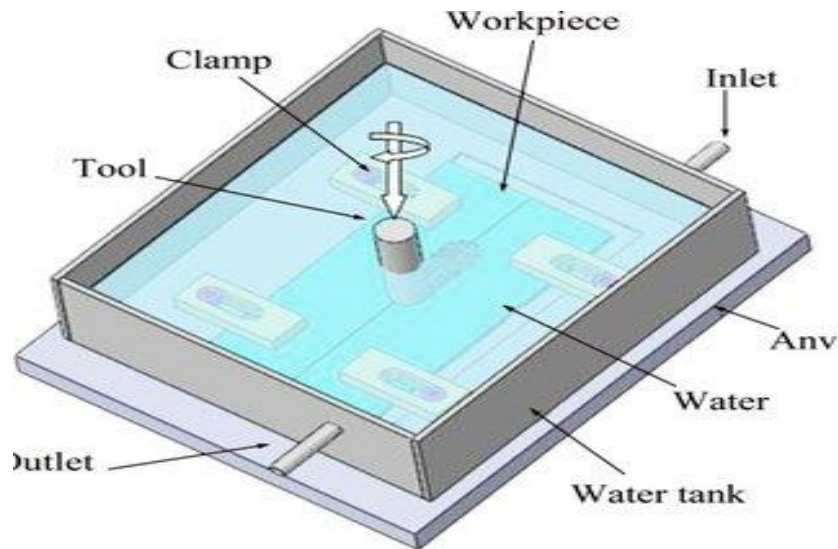
Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της μεθόδου FSW.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ol style="list-style-type: none"> 1. Ευκολία χειρισμού 2. Ακριβής εξωτερικός έλεγχος 3. Υψηλή επαναληψιμότητα 4. Εξαιρετικές μεταλλουργικές ιδιότητες στην περιοχή της συγκόλλησης 5. Λεπτόκοκκη δομή 6. Καμία απώλεια υλικού 7. Δεν υπάρχει ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση 8. Καλή σταθερότητα διαστάσεων και επαναληψιμότητα 9. Μειωμένη στρέβλωση του δοκιμίου 10. Δεν χρησιμοποιούνται αέρια προστασίας, διαλύτες 11. Δεν απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας 12. Ελάχιστη ρύπανση 13. Απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας (ενδεικτικά, μόνο το 2,5% της απαιτούμενης ενέργειας για συγκόλληση με laser) 14. Δίνει τη δυνατότητα για μείωση του βάρους των κατασκευών καθώς δίνει τη δυνατότητα για συγκόλληση διαφορετικών παχών 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ανάγκη ισχυρών πακτώσεων 2. Ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων 3. Υψηλός ρυθμός φθοράς εργαλείου συγκόλλησης

Πίνακας 1.1

Υποβρύχια Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (UFSW)

Το UFSW όπως προαναφέρθηκε αποτελεί μια υποκατηγορία του FSW, η μόνη διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι στο UFSW η συγκόλληση συμβαίνει εντός του νερού. Επομένως ο τρόπος που λειτουργούν είναι κοινός.^[6,12,13,14]



Εικόνα 4 Απεικόνιση μεθόδους UFSW (Underwater Friction Stir Welding)

Ταχύτητα Πρόωσης και Ταχύτητα Περιστροφής

Στη συγκόλληση FSW, οι δύο πιο βασικοί παράγοντες που τη καθορίζουν είναι η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου κατά μήκος της συγκόλλησης (mm/min) και η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (rpm).^[15,16]

Με την περιστροφή του πείρου το υλικό αναδεύεται και αναμιγνύεται γύρω από αυτόν ενώ η κίνηση του εργαλείου κατά μήκος της συγκόλλησης μεταφέρει το υλικό από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου. Η σύνθετη αυτή κίνηση παράγει την κατάλληλη θερμοκρασία αλλά και μηχανική καταπόνηση έτσι ώστε να ενωθούν τα υλικά.^[17,18,19]

Αναλύοντας τη κάθε κίνηση ξεχωριστά: η ταχύτητα πρόωσης καθορίζει κυρίως το ιξώδες καθώς και τον χρόνο έκθεσης στις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται από την τριβή.

Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζει την θερμοκρασία (η θερμοκρασία παράγεται κυρίως από την τριβή λόγω επαφής του περιανυχενίου με το υλικό προς συγκόλληση) που αναπτύσσεται αλλά και το ποσοστό ανάδευσης και ανάμειξης του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται και η θερμοκρασία λόγω της εντονότερης τριβής που οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάδευση και

ανάμειξη. Επίσης, το πλάτος και το ύψος της ανάδευσης τείνουν να αυξηθούν καθώς το εργαλείο περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Επιπροσθέτως η ταχύτητα πρόωσης καθορίζεται έτσι ώστε να αποδοθεί η κατάλληλη θερμότητα και επομένως επιλέγεται με βάση την ταχύτητα περιστροφής.

Οι χαμηλές ταχύτητες πρόωσης οδηγούν σε εκτεταμένη έκθεση του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε υψηλές θερμοκρασίες με αρνητικά αποτελέσματα (συσσωματώματα, αύξηση μεγέθους κόκκων).^[20,21]

Γωνία Κλίσης και Βάθος Διείσδυσης του Εργαλείου

Πολύ σημαντική παράμετρος για την δημιουργία ποιοτικών συγκολλήσεων αποτελεί η κλίση της γωνίας που δημιουργείτε μεταξύ του άξονα του εργαλείου και της επιφάνειας του τεμαχίου (η κλίση του άξονα είναι προς την οπίσθια κατεύθυνση).

Όταν η κλίση του εργαλείου είναι η κατάλληλη επιτυγχάνεται η συγκράτηση του υλικού από το περιουχένιο και η αποτελεσματική του μεταφορά από το μπροστά στο πίσω μέρος του πείρου. Μια ακόμα παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο για να επιτευχθεί μια συγκόλληση με βέλτιστα χαρακτηριστικά είναι το βάθος διείσδυσης του εργαλείου εντός των τεμαχίων.^[1,18]

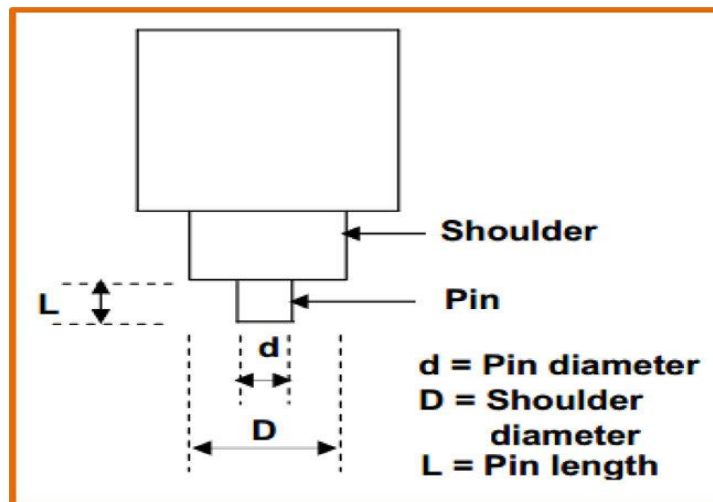
Για τον καθαρισμό του βάθους διείσδυσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το μήκος του πείρου. Το μικρό βάθος διείσδυσης έχει ως αποτέλεσμα να μην έρχεται ολόκληρη η επιφάνεια του υλικού σε επαφή με το περιουχένιο, επομένως να μην υπάρχει επαρκής ανάδευση του τεμαχίου και να δημιουργούνται ατέλειες στη συγκόλληση.

Αντιθέτως το μεγάλο βάθος διείσδυσης οδηγεί στη δημιουργία υπερβολικού γρεζιού στα άκρα της συγκόλλησης (τοπική μείωση του πάχους της συγκόλλησης) λόγω της μεγάλης εισχώρησης του περιουχενίου εντός της συγκόλλησης.^[19,22]

Γεωμετρία του Εργαλείου

Η γεωμετρία του εργαλείου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της συγκόλλησης FSW. Το εργαλείο αποτελείται από το περιουχένιο(shoulder) και τον πείρο(pin). Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γεωμετριών οι οποίες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί και την ανάδευση των υλικών.

Τα κύρια μεγέθη του εργαλείου είναι η διάμετρος του πείρου όπου καθορίζει τον όγκο του υλικού που θερμαίνεται, η διάμετρος του πείρου που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την θερμότητα που αναπτύσσεται και το μήκος του πείρου που καθορίζει το βάθος διείδυσης της συγκόλλησης.^[17,23]

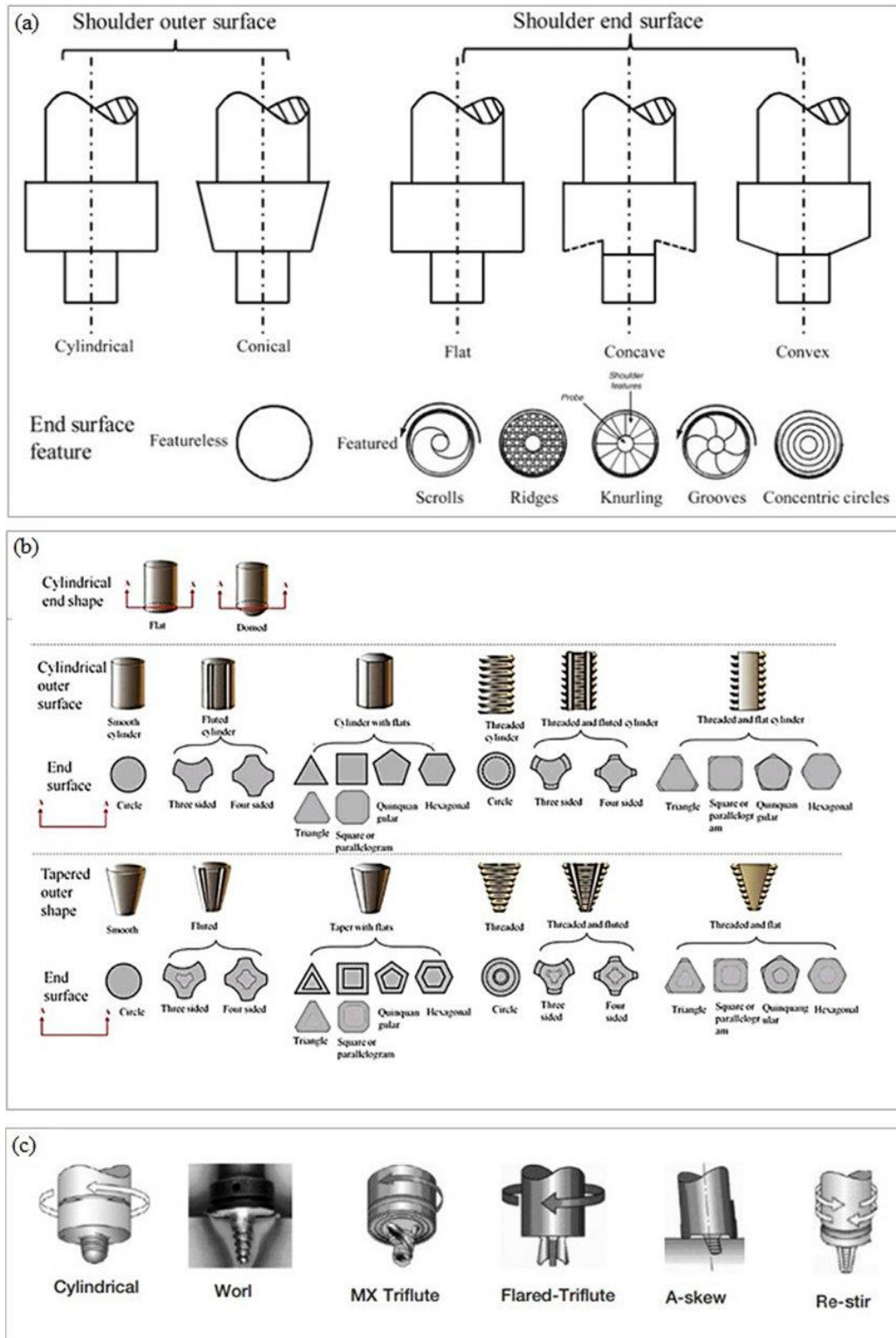


Εικόνα 5 Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλείου συγκόλλησης.

Η ανάγκη επίτευξης συγκολλήσεων καλύτερης ποιότητας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σύνθετων γεωμετριών με γνώμονα την καλύτερη ανάδευση και ανάμιξη του υλικού, αλλά και η τριβή που αναπτύσσεται να προσδίδει μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας. Μια από τις πιο σύνηθες περιπτώσεις είναι η δημιουργία σπειρώματος στον πείρο. Το σπείρωμα λόγω ότι δέχεται ομοιόμορφα τις περιμετρικές τάσεις μειώνεται η παραμόρφωση όταν χρησιμοποιείται σε επαναλαμβανόμενα πειράματα, ταυτόχρονα επιτυγχάνεται καλύτερη ροή του υλικού. Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά

είναι πολύ σημαντικά στη βιομηχανία που το ζητούμενο είναι να υπάρχει καλό αποτέλεσμα, επαναληψιμότητα και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.^[20,24]

Διάφοροι τύποι εργαλείων συγκόλλησης.



Πίνακας 1.2

Ροή του Υλικού

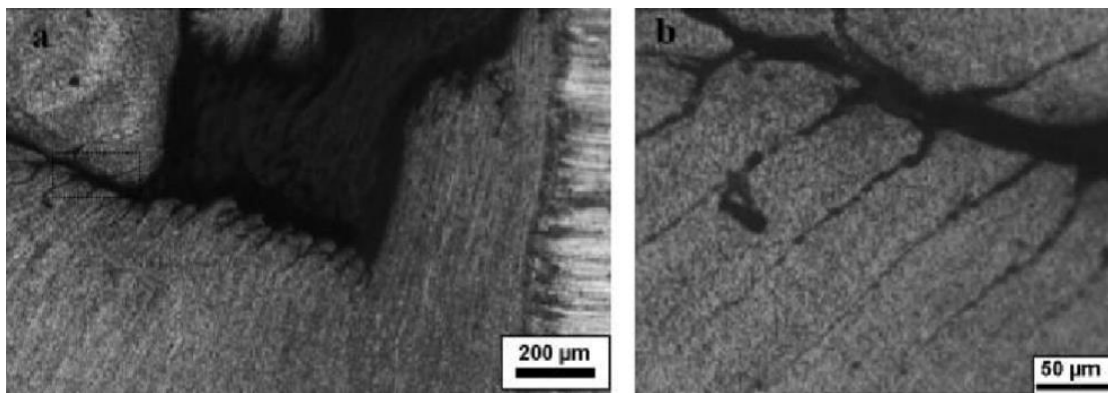
Στις συγκόλλησης FSW τα υλικά που ενώνονται χωρίζονται ανάλογα με την ροή του υλικού. Η πλευρά (υλικό) στην οποία η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης έχουν την ίδια φορά ονομάζεται προωθούμενη (advancing side), ενώ η πλευρά στην οποία η περιστροφική ταχύτητα και η ταχύτητα πρόωσης έχουν αντίθετα φορά ονομάζεται υποχωρούσα πλευρά (retreating side).

Ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη:

1. Η ροή που προκαλείται από το περιουχένιο (shoulder-driven flow) και κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά όγκο.
2. Η ροή που προκαλείται από τον πείρο (pin-driven flow), κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά στρώματα

Η ροή υλικού που οφείλεται στο πείρο λαμβάνει χώρα κατά την αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με τον πείρο του εργαλείου στη περιοχή συγκόλλησης. Η κίνηση του εργαλείου ωθεί το υλικό από το μπροστά μέρος της ακμής να μεταφερθεί μέσω της πλευράς που υποχωρεί στο πίσω μέρος της ακμής. Το πλαστικοποιημένο υλικό που ρέει προς τα πίσω διέρχεται ανάμεσα στο εργαλείο και του σχετικά πιο ψυχρού μετάλλου βάσης.^[16,25,26]

Η αντίσταση στο υλικό που μεταφέρεται κατά την περιστροφή εξαρτάται από το πλάτος του πλαστικοποιημένου υλικού που περιβάλλει τον πείρο καθώς και τον όγκο υλικού που κινείται με κάθε περιστροφή.



Εικόνα 6 Δημιουργία στρώσεων υλικού κατά την περιστροφή του εργαλείου

Στη ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης επιδρά όπως προαναφέρθηκε το περιαιχένιο, το οποίο με την περιστροφή του συμβάλλει στη ροή του υλικού από την υποχωρούσα πλευρά στην προωθούμενη.

Η μεταφορά του υλικού οφείλεται στη ολίσθηση του περιαιχενίου πάνω από το υλικό και της ταυτόχρονης περιστροφικής κίνησης του πείρου.

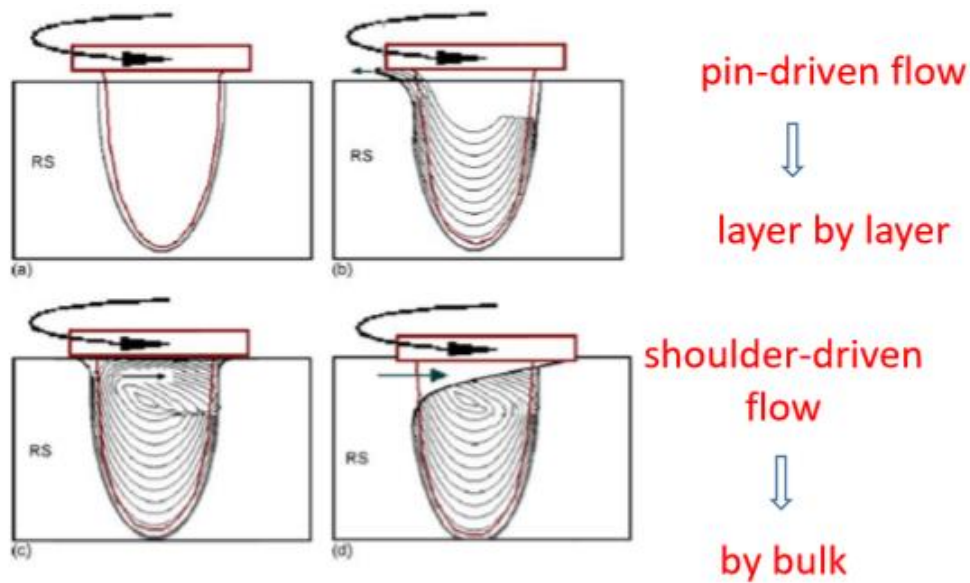
Η ροή υλικού που οφείλεται στον πείρο λαμβάνει χώρα κατά την αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με τον πείρο του εργαλείου στη περιοχή της συγκόλλησης. Καθώς ο πείρος βυθίζεται στο μέταλλο βάσης, δημιουργείται μία κοιλότητα.^[26]

Το σχήμα της κοιλότητας παίρνει τη μορφή του εξωτερικού προφίλ του πείρου. Με την κίνηση του εργαλείου, το υλικό στην πρόσθια ακμή ρέει μέσω της υποχωρούσας πλευράς (RS) προς την πίσω ακμή.

Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, το πλαστικοποιημένο υλικό ρέει μεταξύ του εργαλείου και του σχετικά ψυχρότερου μετάλλου βάσης.

Αν η αντίσταση στη ροή υλικού μεταξύ του εργαλείου και του σχετικά πιο ψυχρού μετάλλου βάσης είναι υψηλή, το υλικό θα προσπαθήσει να διαφύγει έξω από την κοιλότητα συγκόλλησης αντί να φθάσει στην προωθούμενη πλευρά.

Η αντίσταση στην ροή του υλικού στην πλευρά που υποχωρεί εξαρτάται από το πλάτος του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο και από τον όγκο του υλικού που μεταφέρεται ανά περιστροφή.^[19]



Εικόνα 7 Ροή του υλικού κατά την συγκόλληση

Πιο αναλυτικά περιστροφή του πείρου δημιουργεί την αρχική ζώνη παραμόρφωσης μέσα στην οποία το υλικό ωθείται σε ανοδική κίνηση, όταν το υλικό έρθει σε επαφή με τον πείρο που ολισθαίνει στο πάνω μέρος της επιφάνειας ωθείται ξανά προς τα κάτω στη ζώνη διέλασης.

Καθώς το εργαλείο κινείται δημιουργείτε κενό το οποίο πληρώνεται από το υλικό της ζώνης διέλασης που έρχεται σε επαφή με τον πείρο και μεταφέρεται προς το πίσω μέρος του. Η συγκόλληση ενισχύεται λόγω της σφυρηλάτησης που προκαλεί το πίσω μέρος του περιουχενίου στο υλικό που βρίσκεται στη ζώνη εξώθησης δημιουργώντας τη ζώνη σφυρηλάτησης.

Τέλος το υλικό που έχει δημιουργηθεί ψύχεται δημιουργώντας έτσι τη ζώνη απόψυξης.

Επομένως η διαδικασία FSW μπορεί να διαχωριστεί σε πέντε διαφορετικές ζώνες^[17,26]:

- Αρχική ζώνη παραμόρφωσης
- Ζώνη διέλαση
- Ζώνη σφυρηλάτησης
- Ζώνη απόψυξης

Ζώνες Συγκόλλησης

Όπως και στις παραδοσιακές συγκολλήσεις σύντηξης χωρίζουμε μια συγκόλληση FSW σε ζώνες ανάλογα με το πως έχουν επηρεαστεί από τη διεργασία της ένωσης των υλικών. Επομένως μια συγκόλληση χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ζώνες:

1. Ζώνη Ανάδευσης(Stir Zone, SZ)

Το υλικό εντός της ζώνης δέχεται έντονη πλαστική παραμόρφωση καθώς και εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω της πολύ μεγάλης τριβής που προκαλείται τόσο λόγω της κίνησης του πείρου όσο και του περιουχενίου. Επομένως δημιουργείται μια λεπτόκοκκη ανακρυσταλλωμένη μικροδομή με ισομεγέθεις κόκκους.

Έχει παρατηρηθεί ότι ο λόγος Ταχύτητα Περιστροφής / Ταχύτητα Πρόωσης επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των κόκκων εντός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Στην περίπτωση που ο λόγος αποκτά υψηλές τιμές το αποτέλεσμα είναι μια πιο χονδρόκοκκη ζώνη ανάδευσης, ενώ όταν παίρνει χαμηλές τιμές παράγεται μια πιο λεπτόκοκκη μικροδομή.

Η μικροδομή όμως διαφέρει σε μέγεθος και εντός της stir zone κυρίως λόγω του διαφορετικού θερμοκρασιακού προφίλ που παρουσιάζει κάθε περιοχή. Στα ανώτερα στρώματα το μέγεθος των κόκκων είναι μεγαλύτερο λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας που σχηματίζεται από την συνδυασμένη τριβή που προκαλείται από τον πείρο και το περιουχένιο.

Ενώ το κάτω μέρος η θερμοκρασία που σχηματίζεται αλλά και ο χρόνος που εκτίθεται το υλικό είναι μικρότερη με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μια πιο λεπτόκοκκης μικροδομής.

Όπως είναι φυσικό όσο αυξάνεται το πάχος του προς συγκόλληση μετάλλου αυξάνεται και η διαφορά στο μέγεθος των κόκκων του πάνω και κάτω μέρους της ζώνης ανάδευσης.

Ένας ακόμα χαρακτηριστικό της συγκόλλησης που αλλάζει ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής είναι το σχήμα της ζώνης. Οι υψηλές ταχύτητες παράγουν ζώνες με ελλειπτικό σχήμα ενώ οι χαμηλές ταχύτητες παράγουν γεωμετρίες σε σχήμα λεκάνης.

Εκτός του μεγέθους κόκκων και του σχήματος της stir zone σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες τις διαδραματίζουν οι κατακρημνίσεις. Η θερμοκρασία στην ζώνη ανάδευσης φθάνει σε υψηλές τιμές με αποτέλεσμα την διαλυτοποίηση των κατακρημνισμάτων και την δημιουργία λεπτότερων (coarsening).

Τέλος διαφοροποιείται η διεπιφάνεια που σχηματίζεται μεταξύ της ζώνης ανάδευσης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης ανάλογα με το αν είναι η πλευρά που υποχωρεί ή αυτή που προωθείτε. Στην πλευρά που υποχωρεί η διεπιφάνεια είναι διάχυτη, ενώ είναι πιο εμφανής στην πλευρά που προωθείτε.^[18,27]

2. Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη (Thermomechanically Affected Zone, TMAZ)

Η ζώνη που εφάπτεται της ζώνης ανάδευσης και χαρακτηρίζει την συγκόλληση τριβής και ανάδευσης είναι η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, η οποία υπόκειται σε θερμική αλλά και μηχανική καταπόνηση. Η πλαστική παραμόρφωση που δέχεται η TMAZ δεν καταφέρνει να προκαλέσει ανακρυστάλλωση, προκαλεί όμως παραμόρφωση στους κόκκους. Η κατακρημνίσεις διαλατοποιούνται σε ένα ποσοστό ανάλογα με το αν η θερμοκρασία είναι υψηλή και έχουμε έντονη πλαστική παραμόρφωση. Οι κόκκοι παραμορφώνονται με τρόπο τέτοιο ώστε να ακολουθούν μια ανοδική φορά γύρω από την ζώνη ανάδευσης.^[19]

3. Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ)

Η heat affected zone υπόκειται μόνο την επιρροή της θερμότητας που παράγεται από τη κίνηση του εργαλείου και όχι πλαστικής παραμόρφωσης. Η θερμοκρασία που δέχεται δεν επηρεάζει την δομή των κόκκων, που παραμένει ίδια με αυτή του μητρικού υλικού, επηρεάζει όμως τη δομή των κατακρημνισμάτων. Το βαθμός στον οποίο επηρεάζονται τα κατακρημνίσματα επηρεάζονται ανάλογα με τη θερμοκρασία που δέχεται η ζώνη.^[28,29]

Ατέλειες που Δημιουργούνται κατά τη Συγκόλληση

Η επιτυχία μιας συγκόλλησης τριβής και ανάδευσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι ατέλειες που μπορεί να δημιουργηθούν στην μικροδομή και στην γεωμετρία της συγκόλλησης οφείλονται στον μη σωστό συνδυασμό των παραγόντων της διεργασίας.

Οι ατέλειες είναι οι εξής:

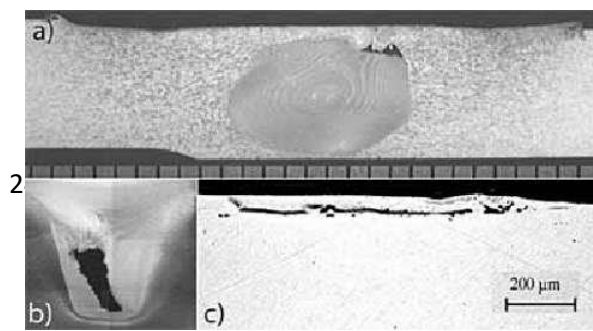
- Σήραγγα ή τούνελ (wormhole)



- Γρέζι (Ribbon Flash)

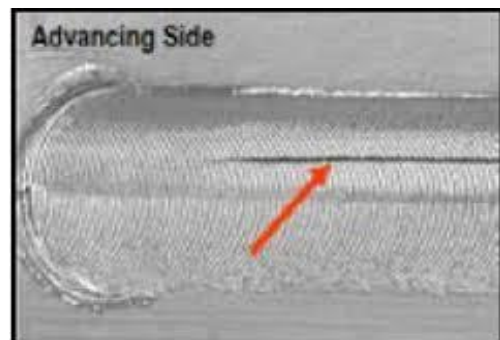


- Επιφανειακή αποκόλληση υλικού (Surface Galling)

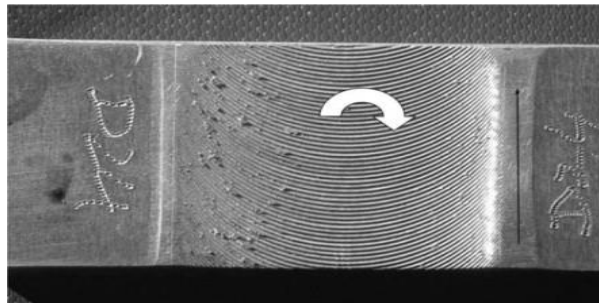


- Αποκολλήσεις υλικού, γρέζι (Chips and Lack of Fill)

- Ατέλεια μορφής αυλακιού (Surface lack of fill)



- “ Χτένισμα ” (Scalloping)



Οι ατέλειες οφείλονται σε τρεις κύριους παράγοντες που καθορίζουν και την ίδια την συγκόλληση:

1. Η θερμοκρασία της κατεργασίας
2. Τον τρόπο ροής του υλικού
3. Τη γεωμετρία της συγκόλλησης

Η θερμοκρασία της κατεργασίας και ο τρόπος ροής του υλικού καθορίζεται κυρίως από την ταχύτητα περιστροφής, την ταχύτητα πρόωσης και το εργαλείο

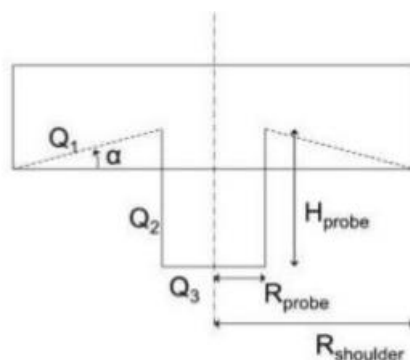
συγκόλλησης. Η γεωμετρία της συγκόλλησης καθορίζεται από τον τρόπο και τη θέση τοποθέτησης των προς συγκόλληση ελασμάτων σε σχέση με το εργαλείο συγκόλλησης.

Υπολογισμός Παραγόμενης Θερμότητας

Η παραγωγή της θερμότητας στο FSW προέρχεται από την τριβή μεταξύ των επιφανειών. Επομένως απαραίτητο είναι για να υπολογιστεί η θερμότητα, ο προσδιορισμός των επιφανειών του εργαλείου που έρχονται σε επαφή με τα δοκίμια.^[30,31]

- Επιφάνεια περιουχενίου (tool shoulder)
- Κεκλιμένη Επιφάνεια κεφαλής (curved surface of tool pin)
- Κάτω επιφάνεια της κεφαλής (bottom surface of tool pin)

Υπολογισμός της θερμότητας κάθε επιφάνειας ξεχωριστά



Εικόνα 8 Υπολογισμός των επιφανιών τριβής.

$$Q_1 = 2 \times \pi \times (1 + \tan \alpha) \times \tau_{shear} \times (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3)$$

$$Q_2 = 2 \times \pi \times \tau_{shear} \times R_{pin}^2 \times \omega$$

$$Q_3 = 2/3 \times \pi \times \tau_{shear} \times R_{pin}^3 \times \omega$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Υπολογισμός Συνολικής Θερμότητας

Παράμετροι υπολογισμού της θερμοκρασίας που παράγεται από την τριβή.

Συντελεστές	
Δ	συντελεστής ολίσθησης (fractional slip)
H	μηχανικός βαθμός απόδοσης (mechanical efficiency)
P	κατακόρυφη πίεση (axial pressure)
U	ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed)
Ω	περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)
T	συντελεστής διατμητικής δύναμης (shear yield strength)
μ_f	συντελεστής τριβής (coefficient of friction)

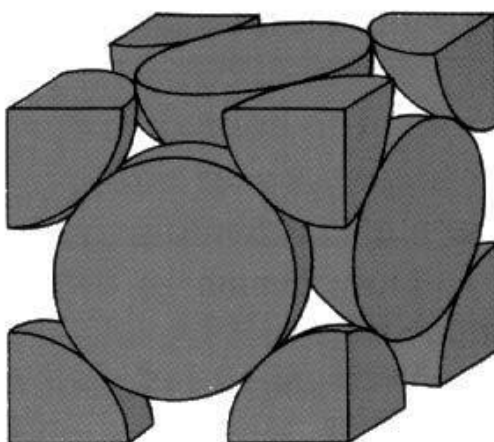
Πίνακας 1.3

Επομένως η ολικής θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο^[32,33]:

$$\bar{Q} = [(1-\delta) \times \eta \times \tau + \delta \times \mu_f \times P] \times (rd\theta r dr) \times (\omega \times r - U \times \sin \theta)$$

Αλουμίνιο και Κράματα Αλουμινίου

Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο που συμβολίζεται με Al, έχει ατομικό αριθμό 13 και ανήκει στην ομάδα IIIA του περιοδικού πίνακα. Τα κράματα του αλουμινίου όπως και το ίδιο έχουν σχετικά μικρή πυκνότητα (2.7 g/cm^3), υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, πολύ καλή ανακλαστικότητα, δεν είναι μαγνητικά και είναι 100% ανακυκλώσιμα.^[1]



Εικόνα 9 Έδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (FCC)

Εξαιτίας της μεγάλης ολκιμότητας τους, η οποία διατηρείτε ακόμα και σε αρκετές χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της έδροκεντρωμένης κυβικής κρυσταλλικής δομής (FCC), τα κράματα αλουμινίου μορφοποιούνται εύκολα.

Το χαμηλό σημείο τήξης ($635-660^\circ\text{C}$), αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτού του μετάλλου και τον κύριο περιοριστικό παράγοντα στην εφαρμογή του.

Ιδιότητες Καθαρού Αλουμινίου

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	Τιμές	Μονάδες Μέτρησης
Ατομικό Βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20°C)	2,6898	gr/cm^3
Σημείο Τήξης	660,2	$^\circ\text{C}$
Γραμμική Διαστολή ($0-100^\circ\text{C}$)	$23,5 \times 10^{-6}$	$\text{mm}/20^\circ\text{C}$

Ηλεκτρική Αντίσταση (20°C)	2,69	μΩcm
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	68,3	GPa
Μέτρο Στρέψης (G)	25,5	GPa
Συντελεστής Poisson	0,34	

Πίνακας 1.4

Η σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή του καθαρού αλουμινίου βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό με τις κραματικές προσθήκες που χρησιμοποιούνται (παράδειγμα αποτελεί το κράμα AA7050 το οποίο μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 650 MPa αντοχής σε εφελκυσμό).^[34]

Κράματα Αλουμινίου

Το αλουμίνιο έχει την δυνατότητα, με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων χημικών στοιχείων, να δημιουργεί κράματα με διαφορετικές ιδιότητες. Η δυνατότητα αυτή, καθιστά το αλουμίνιο και τα κράματά του ως την πλέον κατάλληλη πρώτη ύλη για την παραγωγή τελικών προϊόντων με ξεχωριστές ιδιότητες και ειδικές απαιτήσεις.

Η δυνατότητα που έχει το αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματοποιών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος.

Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο, επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, την μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ) που θα υποστεί.

Στα παρακάτω αναφέρονται περιληπτικά οι κατηγορίες και οι συμβολισμοί για τα διάφορα κράματα αλουμινίου, οι θερμικές επεξεργασίες που συνήθως υποβάλλονται, καθώς και η επίδραση των διαφόρων κραματοποιών στοιχείων στις ιδιότητες.

Ονομασία των Κραμάτων Αλουμινίου

Το κωδικό όνομα κάθε κράματος βάση του Aluminum Association καθορίζεται βάση κάποιον συγκεκριμένων παραγόντων.

Αποτελείται από δυο μέρη που χωρίζονται με παύλα (πχ. 5083– H111).

Πρώτο Μέρος του Κωδικού

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα Κράματα Διαμόρφωσης και τα Κράματα Χύτευσης, ανάλογα με την κατηγορία που ανήκει το κάθε κράμα, καθορίζονται και τα τέσσερα πρώτα γράμματα του κωδικού

Κράματα Διαμόρφωσης

- Ο πρώτος αριθμός καθορίζεται με βάση το κύριο κραματικό στοιχείο.
- Ο δεύτερος αριθμός καθορίζεται ανάλογα τις τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών.
- Τα δύο τελευταία στοιχεία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.
- Τα δύο τελευταία στοιχεία στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00% κατά βάρος.^[1]

Ονοματολογία κραμάτων Διαμόρφωσης.

Σειρά κραμάτων διαμόρφωσης	Κύριο κραματικό στοιχείο
1XXX	Είναι ουσιαστικά καθαρό αλουμίνιο με ελάχιστη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99% κατά βάρος
2XXX	Κράματα στα οποία ο χαλκός είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο. Η σειρά αυτή μπορεί με την κατάλληλη κατεργασία να συγκριθεί με τον χάλυβα.
3XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγγάνιο είναι το κυριότερο κραματικό

	στοιχείο. Η αντοχή τους είναι μέτρια
4XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία το πυρίτιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο
5XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο
6XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο και το πυρίτιο είναι το κυριότερα κραματικά στοιχεία
7XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία ο ψευδάργυρος είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο
8XXX	Πρόκειται για κράματα στα οποία χρησιμοποιείται κυρίως ο κασσίτερος και μερικές συνθέσεις λίθου

Πίνακας 1.5

Κράματα Χύτευσης

- Το πρώτο στοιχείο υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης.
- Το δεύτερο και το τρίτο στοιχείο δείχνουν την ιδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας.
- Το τέταρτο στοιχείο, το οποίο χωρίζεται με τελεία από τα τρία πρώτα, αφορά την μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με (O) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία , με κατευθείαν χύτευση, ενώ με (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα.

Ονοματολογία Κραμάτων Χύτευσης.

Σειρά κραμάτων Χύτευσης	Κύριο κραματικό στοιχείο
1XX.X	Είναι ουσιαστικά καθαρό αλουμίνιο με ελάχιστη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99% κατά βάρος.
2XX.X	Κράματα στα οποία ο χαλκός είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο.
3XX.X	Πρόκειται για κράματα στα οποία το πυρίτιο και ο χαλκός ή το μαγνήσιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο.
4XX.X	Πρόκειται για κράματα στα οποία το

	πυρίτιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο.
5XX.X	Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο είναι το κυριότερο κραματικό στοιχείο.
6XX.X	Δεν χρησιμοποιείτε σαν σειρά
7XX.X	Πρόκειται για κράματα στα οποία ο ψευδάργυρος είναι τα κυριότερα κραματικά στοιχεία
8XX.X	Πρόκειται για κράματα στα οποία ο κασσίτερος είναι τα κυριότερα κραματικά στοιχεία

Πίνακας 1.6

Δεύτερο Μέρος του Κωδικού

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης όσο και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί.

Η σημασία του κάθε συμβόλου

F : Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία

O: Ανόπτηση

H: Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης

T: Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση

W: Θερμοκρασή κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση

Μετά τα γράμματα ακολουθούν αριθμοί που διευκρινίζουν με πιο πολύ λεπτομέρεια την κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα.^[34]

Κραματικά Στοιχεία των Κραμάτων Αλουμινίου

Τα κραματικά στοιχεία εκτός από το να προσδιορίζουν το όνομα των κραμάτων τους προσδίδουν και κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες.

- Χαλκός

Μειώνει την αντοχή σε διάβρωση του κράματος και την ευχυτότητα. Όμως βελτιώνει την σκληρότητα, την θερμική αγωγιμότητα και την μηχανική αντοχή σε ποσοστό έως 12%.

- Μαγγάνιο

Η ύπαρξη του σε ποσοστά μεγαλύτερα του 0,5% βελτιώνει την χυτευσιμότητα και την αυξάνει την ολκιμότητα.

- Πυρίτιο

Στα περισσότερα κράματα χύτευσης, σαν κυρίαρχο κραματικό στοιχείο έχουν το πυρίτιο. Η προσθήκη πυριτίου βελτιώνει την χυτευσιμότητα και αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση. Το πυρίτιο αλλάζει το χρώμα του κράματος από ασημί σε μαύρο όταν βρίσκεται σε περιεκτικότητα πάνω από 5%.

- Μαγνήσιο.

Στα κράματα αλουμινίου-πυριτίου σε πολύ μικρά ποσοστά (0,2-0,5%), αυξάνει την μηχανική αντοχή του κράματος. Σε ποσοστά μεγαλύτερα του 6% προκαλεί σκλήρυνση και κατακρήμνιση.

- Ψευδάργυρος

Μειώνει την χυτευσιμότητα, αλλά εάν συνδυαστεί με χαλκό και μαγνήσιο αυξάνει τις μηχανικές αντοχές του κράματος με θερμική κατεργασία και φυσική γήρανση.

- Λίθιο

Σε πολύ μικρές ποσότητες έως 3%, στα διαμορφωμένα κράματα, βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως στα χυτά κράματα οι συνέπειες του είναι βλαβερές, και για αυτό συνιστάτε η περιεκτικότητά του να μην υπερβαίνει το 0,003%.

- Σίδηρος

Η κατεργασιμότητα η ολκιμότητα και η αντοχή σε κρούση μειώνονται όταν η περιεκτικότητα σιδήρου στο κράμα είναι υψηλή. Στα κράματα χύτευσης υπό πίεση τα επίπεδα σιδήρου κυμαίνονται από 0,9-1 %.

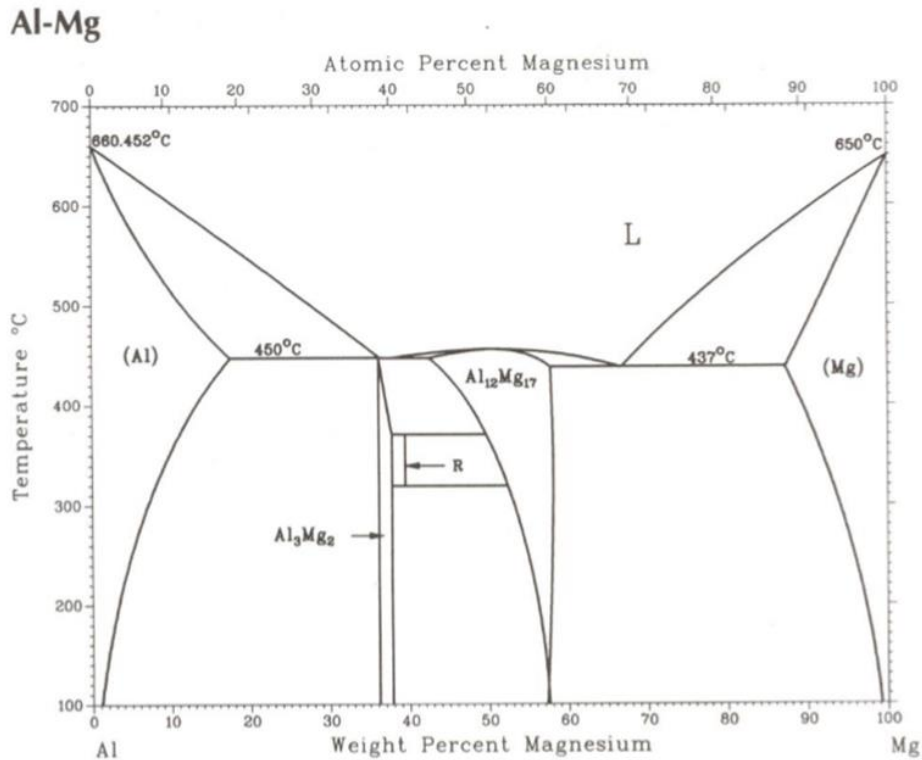
- Χαλκός – Μαγνήσιο

Στα κράματα αλουμινίου χαλκού, η προσθήκη μαγνησίου , έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του κράματος, σύμφωνα με την οποία συνοδεύεται από υψηλή ολκιμότητα, που πραγματοποιείται κατά την διάρκεια της γήρανσης σε θερμοκρασία δωματίου. ^[1,34]

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν κράματα διαμόρφωσης των σειρών 5XXX και 6XXX.

Κράματα Αλουμινίου Σειράς 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύριο στοιχείο προσθήκης το μαγνήσιο, σε μέγιστο ποσοστό το 4%. Το Μαγνήσιο βρίσκεται εντός του κράματος σε μεγαλύτερο ποσοστό στο στερεό διάλυμα (φάση α) και ένα μικρότερο ποσοστό δημιουργεί την ενδομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 (φάση β) όπου είναι σκληρή και εύθραυστη. Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυξηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0°C. ^[1,35]



Εικόνα 10 Διάγραμμα φάσεων Al-Mg

Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Επίσης μετά από λείανση και ανοδίωση παρουσιάζουν καλή ποιότητα επιφάνειας (σε περίπτωση επιφανειακών κατεργασιών είναι σημαντικό τα ποσοστά σιδήρου και πυριτίου να παραμένουν χαμηλά).

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες $-270^{\circ}C$ και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα.

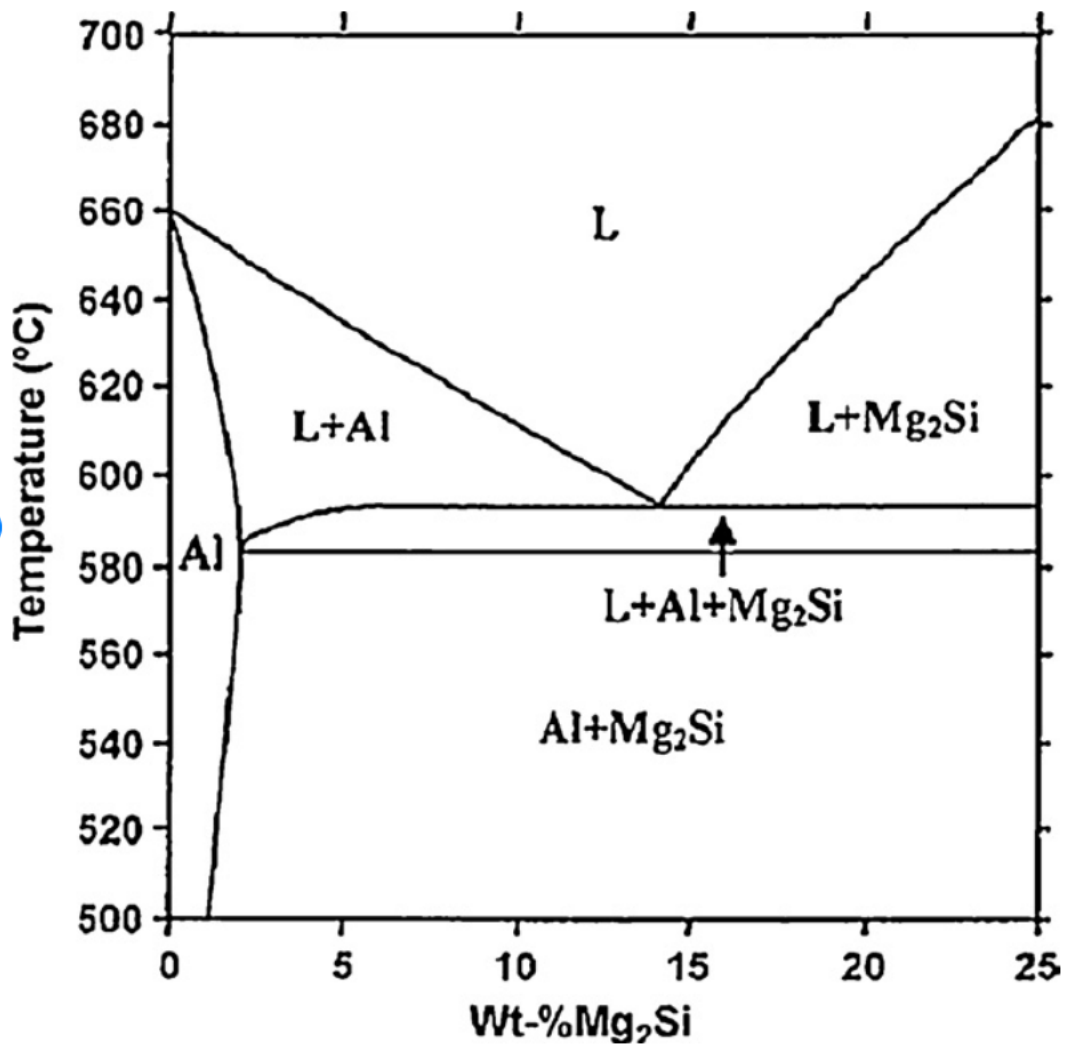


Εικόνα 11 Εφαρμογές της σειράς 5XXX.

Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανισιακές εφαρμογές (φτερά, καπό αυτοκινήτου κ.λπ.).^[36]

Κράματα Αλουμινίου Σειράς 6000

Πρόκειται για κράματα στα οποία το μαγνήσιο και το πυρίτιο είναι το κυριότερα κραματικά στοιχεία. Το εύρος της αντοχής τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από: 125-400 MPa. Τα κράματα της σειράς 6XXX δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή.^[34,37]



Εικόνα 12 Διάγραμμα φάσεων Al-Mg-Si

Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στην διέλαση για την παραγωγή προφίλ.

Γενικότερα βρίσκουν εφαρμογές στην υποδομή κτιρίων και κατασκευές, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην βιομηχανία ναυπήγησης, σε εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές κ.α..



Εικόνα 13 Εφαρμογές της σειράς 6XXX.

Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες.

Στην κατηγορία των κραμάτων που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και πυρίτιο και που σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, χρώμιο και ψευδάργυρο εξασφαλίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Χαρακτηριστικά κράματα: 6005, 6061, 6082.

Η άλλη κατηγορία αποτελείται από κράματα που περιέχουν μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και πυριτίου και προσφέρουν μεγάλες ταχύτητες διέλασης, αλλά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν καλή διακοσμηση συμπεριφορά και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως στις αρχιτεκτονικές και διακοσμησηκές εφαρμογές.

Χαρακτηριστικά κράματα: 6060,6063.^[38]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η μέθοδος FSW αν και είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος συγκόλλησης, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σύγκριση με τις μεθόδους τήξης έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες για να διερευνηθούν οι παράμετροι που διέπουν την λειτουργία της.

Για το λόγο ότι το FSW αποτελεί μια μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί για την ένωση διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου. Στην προσπάθεια να βελτιωθεί η μέθοδος, δημιουργήθηκε το UFSW που αποτελεί μια παραλλαγή του. Η βελτίωση που προσπαθούν οι επιστήμονες να πετύχουν με αυτή την καινούργια παραλλαγή στη μέθοδο είναι να υπάρχει συνεχή και ομοιόμορφη ψύξη των δοκιμίων κατά την διαδικασία, ώστε να επιτευχθούν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στο τελικό προϊόν της συγκόλλησης.

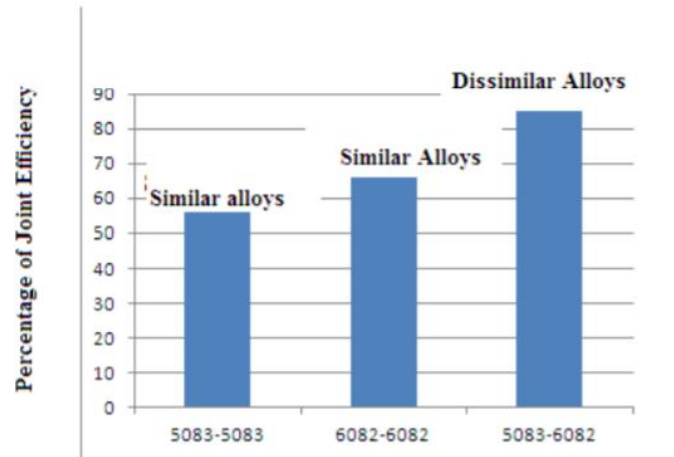
Παρόλα ότι το UFSW αποτελεί μια πολλά υποσχόμενα μέθοδο έχουν πραγματοποιηθεί ο ελάχιστες έρευνες για τη διερεύνηση της και ακόμα λιγότερες για την κόλληση διαφορετικών τύπων αλουμινίου με την μέθοδο αυτή. Παρακάτω παρουσιάζονται μελέτες οι οποίες ήταν σχετικές με το θέμα αυτής της μελέτης και από τις οποίες παρήχθησαν συμπεράσματα για την καλύτερη επεξήγηση και κατανόηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

Οι **Anil Kumar, V Venkata Ramana and Mayur Pawar** σύγκριναν τις συγκολλήσεις μεταξύ κοινών τύπων αλουμινίου (5083-5083) (6082-6082) και διαφορετικών τύπων αλουμινίου (5083 και 6082). Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν πλάκες 4mm που συγκολλήθηκαν με ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου 1200rpm και ταχύτητα προώθησης του εργαλείου 63mm/min και γωνία κλίσης 1°.

Οι συγκολλήσεις στη συνέχεια επεξεργάστηκαν και διαμορφώθηκαν σε δοκίμια στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού και μικροσκοπιομέτρησης, ώστε να εξεταστούν οι μηχανικές ιδιότητες του.

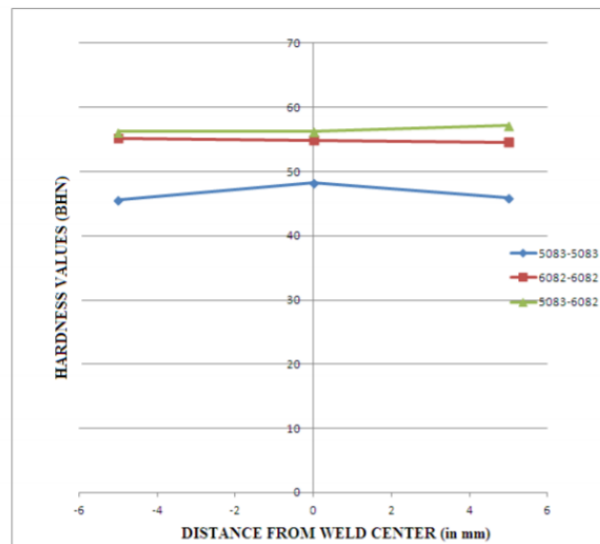
Δοκιμές Εφελκυσμού Συγκολλήσεων

Material Combination	Aluminum Alloy	Average Tensile strength (MPa)	Average Yield Stress (MPa)	Average% Elongation	Joint Efficiency
Similar	5083-5083	173.43	138.27	8.9	56%
Similar	6082-6082	195.17	168.6	5.94	66%
Dissimilar	5083-6082	157.54	112.11	4	85%



Πίνακας 1.7

Μετρήσεις Μικροσκληρομετρήσεων Συγκολλήσεων



Πίνακας 1.8

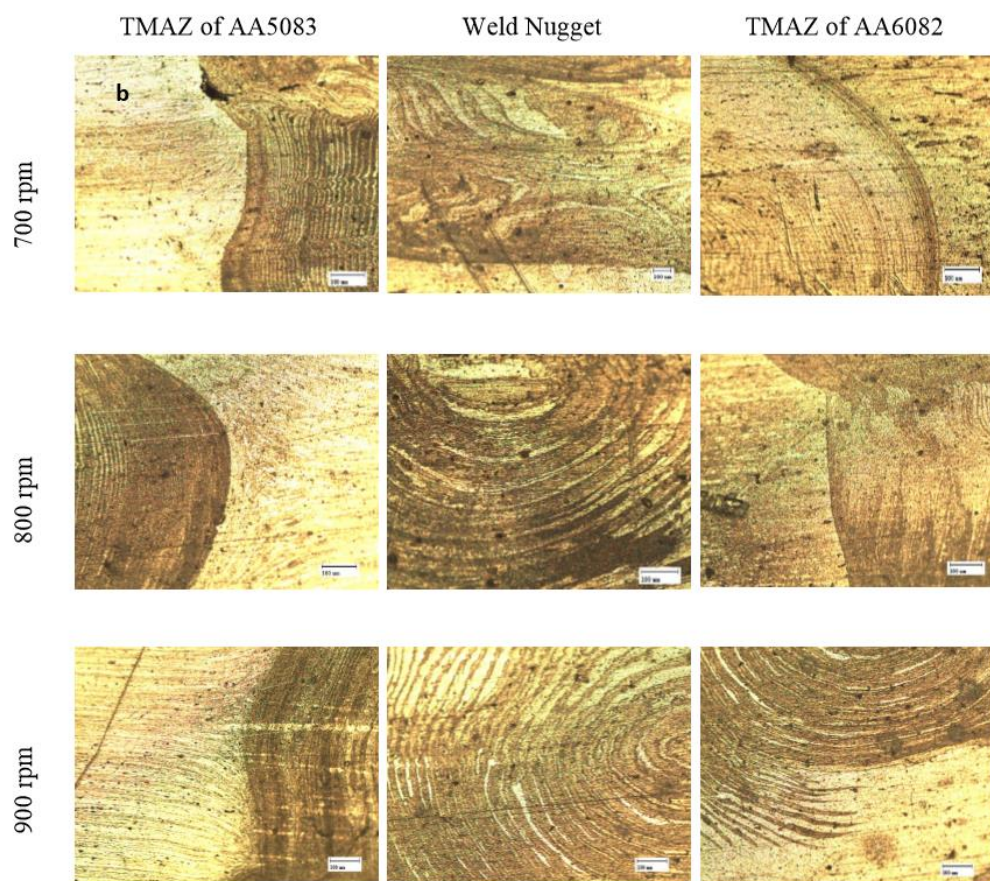
Από τα πειράματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με την ένωση αυτών των δύο διαφορετικών τύπων αλουμινίου (5083-6082) δημιουργούνται συγκολλήσεις με

καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά από τις συγκολλήσεις των κοινών τύπων αλουμινίου (5083-5083) (6082-6082).^[38]

Οι **T.Kasirajana***, **R.Ravindrana**, **T.Ramkumarb**, **M. Selvakumarc** πραγματοποίησαν πειράματα για την συγκόλληση των διαφορετικών τύπων αλουμινίου σειράς AA6082-T6 και AA5083-H111 με την μέθοδο FSW. Η συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής των 600,700 και 800 rpm διαδοχικά, με ταχύτητες πρόωσης 60 mm/min και με γωνία κλίσης 2°.

Αποτελέσματα:

Στην ζώνη ανάδευσης και τα δύο μέταλλα βάσης έχουν ανακρυσταλωθεί και το μέγεθος των κόκκων έχει μειωθεί.



Εικόνα 14 Μικροδομές που παρήχθησαν από διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

Στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA5083-H111 έχει προκληθεί σκλήρυνση λόγω της άσκησης πίεσης που δέχεται από το περιανχένιο ενώ στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082-T6 οι κόκκοι έχουν διαμορφωθεί και επιμηκυνθεί λόγω της επιρροής της πλαστικής παραμόρφωσης που προκλήθηκε από την περιστροφή του πείρου.

Για το λόγο ότι το αλουμίνιο 6082 έχει υψηλότερη θερμική διάχυση από το 5083 είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.^[39]

Οι **Jae-Hyung Cho, Sang Ho Han και Chang Gil Lee** μελέτησαν την επίπτωση που έχει η ψύξη στη μικροδομή και τις μηχανικές επίπτωσεις στη συγκόλληση FSW κράματος Al-Mg-Si.

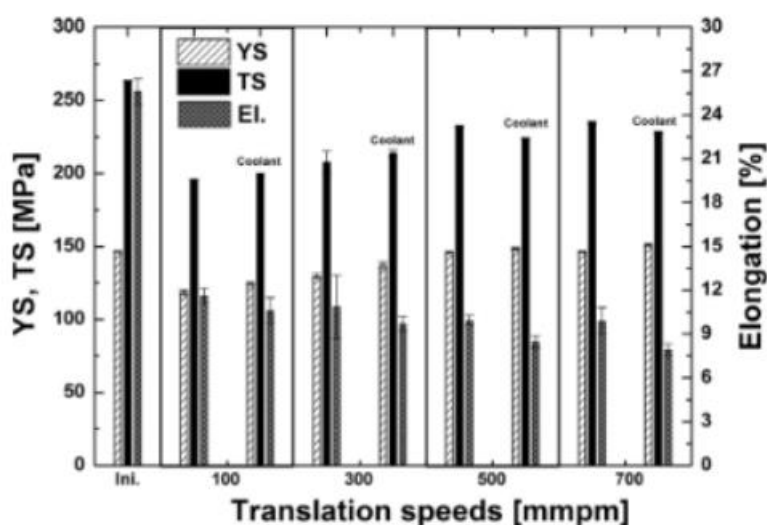
Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι: ταχύτητα περιστροφής 1500rpm και ταχύτητα πρόωσης ταχύτητα πρόωσης 100, 300, 500 700 mm/min.

Από τις δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η χαμηλή ταχύτητα πρόωσης του μηχανήματος είχε ως αποτέλεσμα πιο μεγάλους ευμεγέθους κόκκους σε σχέση με τη μικροδομή που παρατηρήθηκε όταν η ταχύτητα πρόωσης ήταν μεγαλύτερη.

Επιπλέον το μέγεθος των κόκκων των δοκιμών τα οποία είχαν ψυχθεί ήταν μικρότερο στη ζώνη ανάδευσης.

Η ταχύτητα πρόωσης και η ψύξη επηρέασε επίσης τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.

Διάγραμμα που παρουσιάζει πως επηρεάζει η ταχύτητα πρόωσης το Tensile Strength (MPa), Yield Strength (MPa) και Elongation (%)



Πίνακας 1.9

Η ψύξη είχε ως αποτέλεσμα την μείωση την επιμήκυνσης και αύξηση του yield strength. Η αύξηση της ταχύτητα πρόωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του yield strength και του tensile strength ενώ από τη άλλη προκαλεί μείωση την επιμήκυνσης.^[40]

Οι **I.M. Ikram, A. Ismail, A. Zakaria, M. Awang, M.A. Rojan, D.A. Hamid, M.F. Makhtar** μελέτησαν την συγκόλληση μεταξύ πλακών κράματος αλουμινίου σειράς AA5083-H111.

Οι συγκολλήσεις έδειξαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού κοντά στο σημείο βρασμού είχε ως αποτέλεσμα την επαρκή μεταφορά θερμότητας στα προς συγκόλληση δοκίμια ώστε να επιτευχθεί η συγκόλληση.

Παράμετροι συγκολλήσεων

Welding parameters					
Sample ID	Rotational speed (rpm)	Travel speed (mm min ⁻¹)	Tilt angle (°)	Water temperature (°C)	Dwell time (sec)
UFSW#1	1700	16	3	100	30
UFSW#2	1700	16	2	100	40
UFSW#3	1700	16	2	100	50

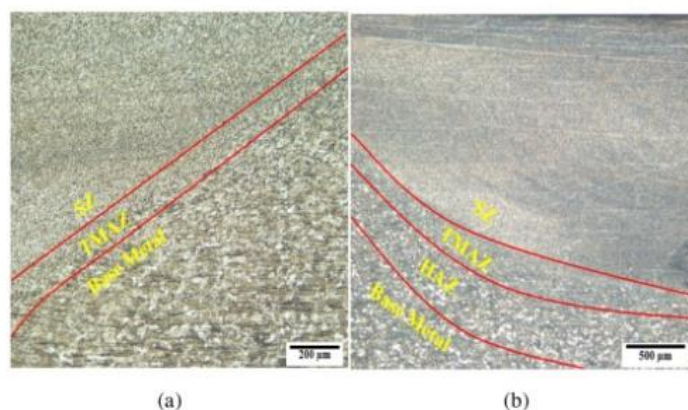
Πίνακας 1.10

Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο βρασμού όπως αποδεικνύεται από τα πειράματα επιτρέπει την επαρκή μεταφορά θερμότητας στα δοκίμια και επιπλέον βοηθάει στην ψύξη των δοκιμίων κατά την διάρκεια της ψύξης.

Η ψύξη των δοκιμίων κατά την συγκόλληση έχει ως αποτέλεσμα να περιοριστεί θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μείωση του μεγέθους των κόκκων.^[6]

Οι **Farzad Heirani, Alireza Abbasi και Mohammad Adrestani** πραγματοποίησαν δοκιμές στη συγκόλληση του κράματος αλουμινίου AA5083 με τις μεθόδους FSW και UFSW.

Από τις δοκιμές τους προέκυψε ότι κατά τη συγκόλληση UFSW η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μέθοδο FSW



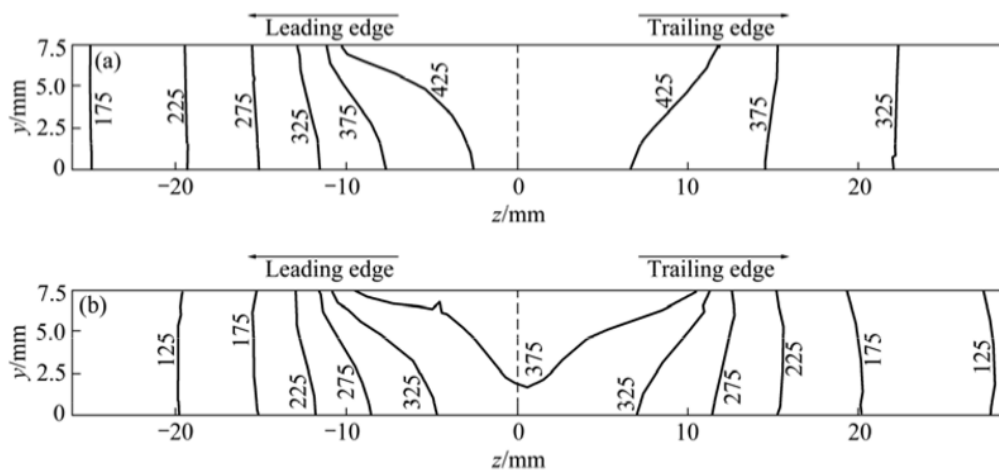
Εικόνα 15 (a) Συγκόλληση κάτω από το νερό, (b) Συγκόλληση στον αέρα

Επίσης παρατηρούν ότι η β φάση (Mg_2Al_3) παρατηρείτε κυρίως σε μεγαλύτερο ποσοστό στις συγκολλήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στον αέρα καθώς η β φάση χρειάζεται μεγάλες θερμοκρασίες για να σχηματιστεί.^[12]

Οι **Hui-jie ZHANG, Hui-jie LIU και Lei YU** μελέτησαν την μεταφορά της θερμότητας κατά τη διάρκεια του Underwater Friction Stir Welding και τη σύγκριναν με τη μεταφορά θερμότητας σε συγκολλήσεις FSW που ψύχονται στον αέρα για κράματα αλουμινίου υψηλής σκληρότητας.

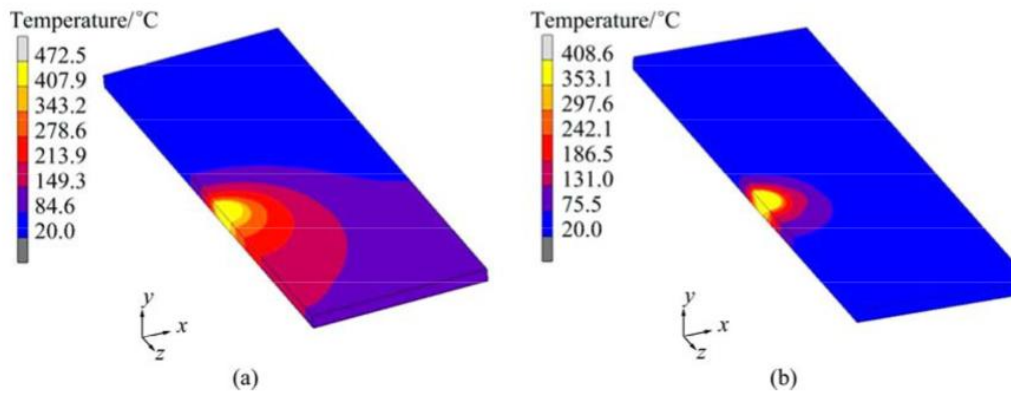
Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο βάσης το κράμα AA2219-T6. Τα δοκίμια ήταν μορφοποιημένα σε πλάκες πάχους 7,5mm. Χρησιμοποιήθηκε εργαλείο συγκόλλησης με διάμετρο περιανυχνίου 22,5mm, μήκος πείρου 7,4mm και γωνία κλίσης 2,5° μοίρες. Εφαρμόστηκε ταχύτητα περιστροφής 800 rpm και ταχύτητα πρόωσης 100 mm/min.

Η ψύξη λόγω του νερού στην περίπτωση του UFSW έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και την θερμικά επηρεασμένη ζώνη, με αποτέλεσμα να περιοριστεί το μέγεθος και των δύο.



Εικόνα 16 (α) Συγκόλληση στο νερό (β) Συγκόλληση στον αέρα

Η μείωση της θερμοκρασίας στο UFSW επηρέασε και τη ζώνη ανάδευσης, στη μέθοδο FSW η μέγιστη θερμοκρασία είναι 472,5 °C και στη μέθοδο UFSW είναι 408,6°C.



Εικόνα 17 (a) Συγκόλληση στον αέρα (b) Συγκόλληση στο νερό

Η μείωση του μεγέθους στις θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και την θερμικά επηρεασμένη ζώνη οφείλεται στην ικανότητα μεγάλης απορρόφησης της θερμότητας από το νερό σε σχέση με τον αέρα.^[32]

Οι **H.J.Zhang**, **H.J.Liu** και **L.Yu** σύγκριναν τις επιπτώσεις διαφόρων ταχυτήτων περιστροφής στη μικροδομή και τις μηχανικές επιπτώσεις στη μέθοδο Underwater Friction Stir welding σε κράματα αλουμινίου.

Χρησιμοποιήθηκε κράμα αλουμινίου AA2219-T6 και η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε σε 5 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

600 rpm

800 rpm

1000 rpm

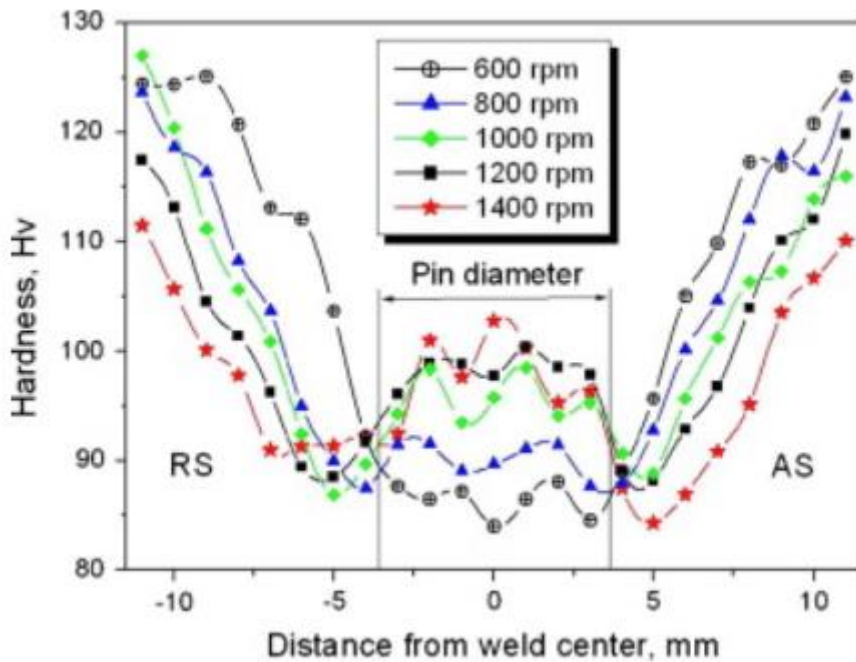
1200 rpm

1400 rpm

Τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν είχαν πάχος 7,4mm και χρησιμοποιήθηκε ταχύτητα πρόωσης 100 mm/min με γωνία 2,5° μοίρες.

Στη μικροσκληρότητα δημιουργείτε ένα γράφημα τις μορφής “W” με μικρότερη σκληρότητα στις TMAZ και HAZ.

Μικροσκληρομετρήσεις σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής (rpm)



Πίνακας 1.11

Παρατηρείτε ότι για την ταχύτητα 1400 rpm η σκληρότητα δεν είναι η ίδια και για τις δύο πλευρές της συγκόλλησης λόγω ότι στη πλευρά που υποχωρεί (RS) υπάρχει εκτός τις πλαστικής παραμόρφωσης και υπάρχει και η παραμόρφωση που προκαλεί η δύναμη που ασκεί το περιανχένιο. Όπως και στο Friction Stir Welding παρατηρείται ότι η αύξηση της περιστροφής αυξάνει την σκληρότητα στη ζώνη ανάδευσης και μειώνεται στη TMAZ και HAZ.^[18]

Οι **S.Sree Sabaria, S.Malarvizhia, V.Balasubramaniana, G.Madusudhan Reddy** μελέτησαν την μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες της μεθόδου UFSW σε κράμα AA2519-T87.

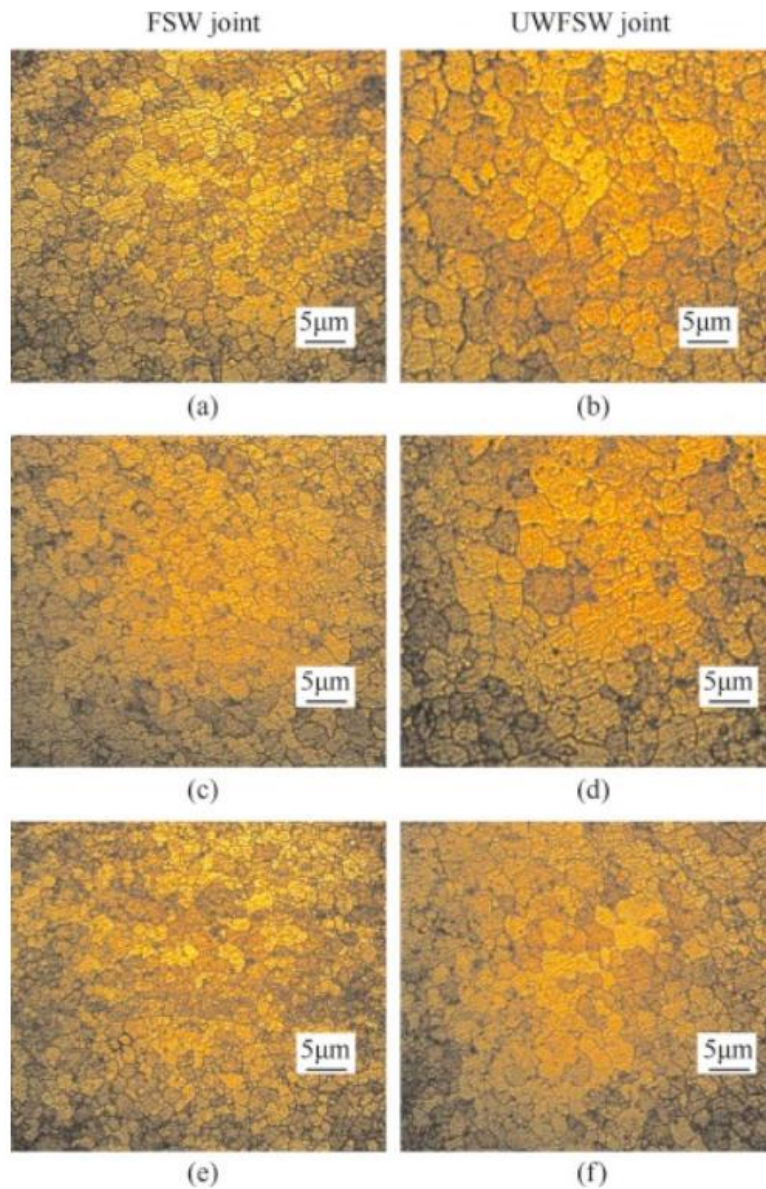
Το νερό που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της συγκόλλησης ήταν σε θερμοκρασία 60°C.

Παράμετροι Συγκολλήσεων

Process parameters	Values	
	FSW	UWFSW
Tool rotational speed/rpm	150	800
Welding speed/(mm·min ⁻¹)	7.5	10
Pin length/mm	18	18
Tool shoulder diameter/mm	30	30
Pin diameter/mm	12-6	12-6
Axial force/kN	12	14
Pin profile	Taper threaded cylindrical	
Tool material	Hardened super high speed steel	

Πίνακας 1.12

Τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν παρουσίασαν παρόμοιο μέγεθος κόκκων στη ζώνη ανάδευσης ενώ στη TMAZ και HAZ παρατηρήθηκαν ότι οι κόκκοι του UFSW ήταν μικρότεροι από αυτούς του FSW.



Εικόνα 18 Συγκολλήσεις στο νερό (α) SZ (c) TMAZ (e) HAZ , Συγκολλήσεις στον αέρα (b) SZ (d) TMAZ (f) HAZ

Η μείωση των κόκκων στις TMAZ και HAZ οφείλεται ότι το νερό περιορίζει την θερμική διάχυση με αποτέλεσμα να μην δίνεται ο χρόνος να μεγαλώσει το μέγεθος των κόκκων. Επομένως στη μέθοδος UFSW υπάρχει κυρίως μείωση του μεγέθους των κόκκων στη TMAZ και HAZ, όπου αποτελεί σημαντική βελτίωση καθώς είναι και οι δύο περιοχές όπου στο FSW παρατηρούνται και οι χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες.^[41]

Οι **Mohd.Atif.Wahid, Arshad Noor Siddiquee, Zahid A.Khan και Nidhi Sharma** πραγματοποίησαν δοκιμές στη συγκόλληση δοκιμίων AA6082-T6 με τις μεθόδους FSW και UFSW.

Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια πάχους 3mm τα οποία συγκολλήθηκαν με ταχύτητα περιστροφής 900 rpm, πρόωσης 80 mm/min και γωνία κλίσης 2°C.

Όπως αναφέρουν οι (Mohd.Atif.Wahid et al) ότι οι ζώνες GP και β'' είναι αυτές που προκαλούν κυρίως την αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας στα κράματα 6XXX.

Σε θερμοκρασίες ανώτερες των 200°C η φάση β'' αρχίζει να μετασχηματίζεται στη σταθερή β φάση η οποία έχει ως αποτέλεσμα την πτώση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος.

Στη μέθοδο UFSW και CFSW(συγκόλληση σε νερό θερμοκρασίας η θερμοκρασία στη HAZ ήταν κοντά στους 110°C επομένως παρατηρήθηκε φάση β'' στη μικροδομή. Στη μέθοδο FSW η θερμοκρασία στη HAZ έφθασε τους 300 °C επομένως υπήρχε μετασχηματισμός της β'' φάσης στη β φάση.

Αυτό είχε αποτέλεσμα στη HAZ της μέθοδο FSW να παρατηρούνται μικρότερες τιμές σκληρότητας από αυτές στη μέθοδο UFSW. Ενδεικτικά παρατηρήθηκαν τιμές κοντά 75-80HV στη μέθοδο UFSW και τιμές κοντά 60-65 HV στη μέθοδο FSW.^[30]

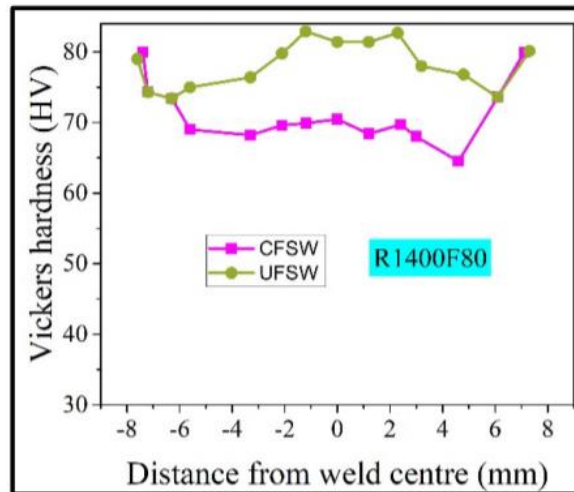
Οι **K. Tejonadha Babu, S. Muthukumaran, C. H. Bharat Kumar και C. Sathiya Narayanan** μελέτησαν τη μέθοδο UFSW για το κράμα του αλουμινίου AA5052-O. Παράμετροι:

Ταχύτητες συγκόλλησης: 700 μέχρι 1400 rpm διαδοχικά

Ταχύτητα πρόωσης: 60 μέχρι 100 mm/min διαδοχικά.

Από τις δοκιμές πρόκυψε ότι υπήρχε ανακρυστάλωση των κόκκων σε μέγεθος (2-4)μm στην μέθοδο UFSW λόγω υψηλής ταχύτητας ψύξης και χαμηλής ανώτατης θερμοκρασίας.

Δοκιμές μικροσκληρομέτρησης για τις μεθόδους FSW και UFSW



Πίνακας 1.13

Η σκληρότητα είναι υψηλότερη στη μέθοδο UFSW λόγω ότι ελέγχετε η θερμοκρασία και επόμενος και το μέγεθος των κόκκων.^[42]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Μέταλλα Βάσης

Στη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μέταλλα βάσης. Το AA5083-H111 και το AA6082-T6 τα οποία ήταν και τα δύο σε μορφή πλακών με διαστάσεις μήκος: 200mm, πλάτος: 100mm και πάχος: 4mm.

Τυπικές Χημικές Συστάσεις Μετάλλων Βάσεις

Οι τυπικές χημικές συστάσεις παρουσιάζουν με μεγάλη προσέγγιση το ποσοστό κατά βάρος του κάθε κραματικού στοιχείου.

Τυπικές χημικές συστάσεις μετάλλων βάσης (AA5083-H111/AA6082-T6)

	Βάρος (%)										
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Other Each	Others Total
AA5083 min	92.4	-	-	-	0.4	0.05	4.0	-	-	-	-
AA5083 max	95.6	0.4	0.4	0.1	1.0	0.25	4.9	0.15	0.25	0.05	0.15
AA6082 max	98.3	0.7	-	-	0.4	-	0.6	-	-	-	-
AA6082 max	95.1	1.3	0.5	0.1	1.0	0.2	1.2	0.1	0.2	0.05	0.15

Πίνακας 1.14

Κατεργασία των Μετάλλων Βάσης- Δεύτερο Μέρος του Κωδικού

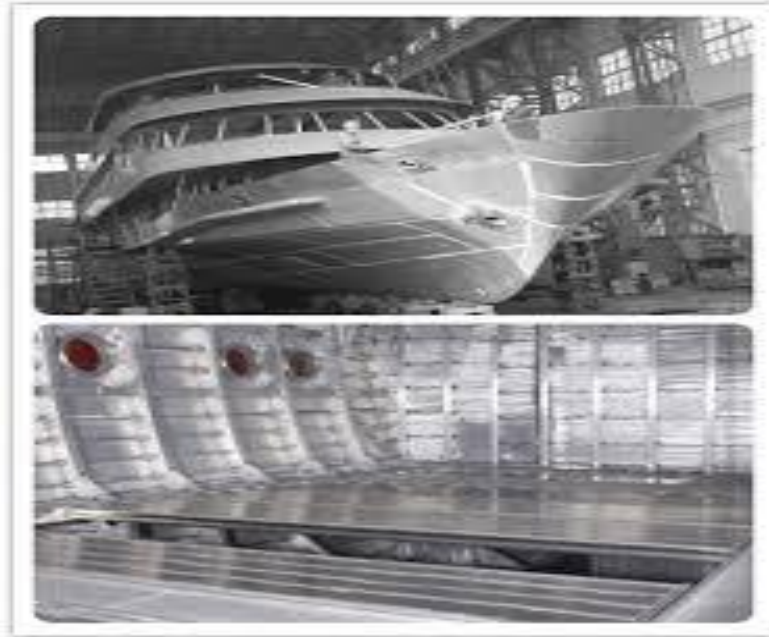
Το κάθε μέταλλο βάσης έχει δεχθεί κάποια διαφορετική κατεργασία.

H111: Κράμα αλουμινίου ενδοτραχυμένο κατά 10%

T6: Κράμα αλουμινίου στο έχει γίνει Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος

AA5083-H111

Το κράμα αλουμινίου AA5083 έχει ως κύριο κραματικό στοιχείο το μαγνήσιο και εμπεριέχει και στοιχεία από μαγγάνιο και χρώμιο. Η υψηλή αναλογία της ισχύος προς το βάρος, η καλή αντοχή στη διάβρωση και η υπέρ-ελαστικότητα, έχουν οδηγήσει το κράμα αλουμινίου AA5083 να χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς, όπως η ναυπηγική βιομηχανία, η αεροβιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία και μεταλλευτική βιομηχανία.



Εικόνα 19 Κατασκευή πλοίου με τη χρήση AA5083-H111

AA6082-T6

Το κράμα αλουμινίου AA6082-T6 έχει ως κύρια κραματικά στοιχεία το πυρίτιο και το μαγνήσιο και εμπεριέχει και στοιχεία από μαγγάνιο και σίδηρο. Αποτελεί ένα κράμα μέσης αντοχής και σκληρότητας με εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Το κράμα AA6082 χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς όπως στη ναυπηγική βιομηχανία, στην κατασκευαστική οικονομία κ.α..



Εικόνα 20 Ράβδοι από AA6082

Εξοπλισμός και Συνθήκες Συγκόλλησης

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων συγκόλλησης με την τεχνική Friction Stir Welding χρησιμοποιήθηκε φρεζομηχανή κατάλληλα τροποποιημένη του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Εικόνα 21 Μηχανή συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης τροποποιημένη με πισίνα για την πραγματοποίηση της μεθόδου UFSW

Η ταχύτητα πρόωσης αλλά και ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου καθορίζονταν ανάλογα με τις επιτρεπόμενες τιμές που διέθετε ως επιλογές η φρεζομηχανή.



Εικόνα 23 Το εργαλείο συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε κατά την συγκόλληση και διαθέτει σπείρωμα για την καλύτερη ροή του υλικού.

Το υλικό από το οποίο αποτελείτε το εργαλείο, θα πρέπει να διαθέτει τα τεχνικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από την θερμοκρασία και τις μηχανικές καταπονήσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.



Εικόνα 24 Το Εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την συγκόλληση.

Το Εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την συγκόλληση διαθέτει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Διάμετρος Περιουχενίου: 22.3 mm

Διάμετρος Πείρου(κυλινδρικός): 6mm

Μήκος πείρου: 3.7mm

Ο πείρος διαθέτει σπείρωμα έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ροή του μετάλλου.

Το εργαλείο είναι κατασκευασμένο από θερμικά κατεργασμένο χάλυβα SVERKER 21 σκληρότητας 61 HRC. Ο συγκεκριμένος χάλυβας εξασφαλίζει ότι η γεωμετρία του εργαλείου δεν θα αλλάξει όταν αυτό εκτεθεί σε επαναλαμβανόμενους κύκλους των θερμοκρασιών που σχηματίζονται κατά τη συγκόλληση, αλλά και της μηχανικής καταπόνησης που δέχεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Γωνία Κλίσης Συγκόλλησης

Επιλέχθηκε γωνία κλίσης 2° μοιρών ανάμεσα στον άξονα του υλικού που συγκολλάται και του εργαλείου. Η γωνία αυτή επιλέχθηκε βάση βιβλιογραφικής αναζήτησης που ανέδειξε ότι είναι επαρκής για την μεταφορά του υλικού από το μπροστά στο πίσω μέρος του πείρου. Επιπλέον οι έρευνες έχουν αναδείξει ότι με αυτή τη κλίση παράγεται μια καλή επιφάνεια στη συγκόλληση.

Προετοιμασία Ελασμάτων

Η προετοιμασία των δοκιμίων ξεκίνησε με την κοπή των μετάλλων στις κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στην τράπεζα της φρεζομηχανής. Κατά την κοπή των μετάλλων χρησιμοποιήθηκε δισκοτόμος ο οποίος διέθετε ψύξη έτσι ώστε να μην επηρεαστούν θερμικά τα υλικά. Οι πλάκες έχουν κοπεί με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε η φορά έλασης να είναι παράλληλη με τη φορά της συγκόλλησης. Στη συνέχεια στις πλάκες ανοίχτηκαν από δύο τρύπες στη κάθε μια, διαμέτρου 11 mm.



Εικόνα 25 Ευθυγράμμιση του εργαλείου με τα δοκίμια ώστε να διέρχεται ακριβώς πάνω από την ένωση.

Έπειτα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω στην τράπεζα της φρεζομηχανής και ευθυγραμμίστηκαν, ώστε να μην υπάρχει κενό ανάμεσα τους και ταυτόχρονα ο πείρος να περνάει ακριβώς πάνω στο σημείο συγκόλλησης σε όλο το μήκος της συγκόλλησης.

Προετοιμασία Συγκόλλησης στον ατμοσφαιρικό αέρα

Τα ελάσματα τοποθετήθηκαν πάνω στη τράπεζα της φρεζομήχανής ώστε να εφάπτονται μεταξύ τους. Για την συγκράτηση τους κατά την διάρκεια της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκαν βίδες, που περάστηκαν μέσα από τις τρύπες των ελασμάτων και εδραιώθηκαν πάνω στη τράπεζα. Η πλάκα του αλουμινίου σειράς AA6082 τοποθετήθηκε στην πλευρά όπου κατά την συγκόλληση είναι αυτή που προωθείται, ενώ το αλουμίνιο σειράς AA5083 στη πλευρά που οπισθοχωρεί.

Προετοιμασία Συγκόλλησης κάτω από την επιφάνεια του νερού

Για τη συγκόλληση underwater friction stir welding κατασκευάστηκε πιπίνα μέσα στην οποία πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση. Η κατασκευή διέθετε ως τοιχώματα πλεξιγκλάς και ως πάτο την τράπεζα της φρεζομηχανής.



Εικόνα 26 Προετοιμασία της μεθόδου UFSW

Για να επιτευχθεί η σταθερότητα και η στεγανοποίηση της όλης κατασκευής χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη. Η απορροή του νερού πραγματοποιήθηκε από τάπα του κάτω μέρους της τράπεζας. Η διαδικασία στήριξης των πλακών είναι κοινή με αυτή της συγκόλλησης στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η θερμοκρασία του νερού κατά την συγκόλληση ήταν στους 80°C για το λόγο ότι σε αυτή τη θερμοκρασία η μηχανή συγκόλλησης που ήταν διαθέσιμη μπορούσε να επιτύχει πλαστικοποίηση των υλικών.

Κοπή Δοκιμίων

Για την κοπή των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος και σχήμα ώστε να μελετηθούν χρησιμοποιήθηκε δισκοτόμος Struers Discotom 50.



Εικόνα 27 Δισκοτόμος Struers Discotom 50.

Κατά τη διάρκεια της κοπής για να αποφευχθεί η υψηλή θερμοκρασία που θα επηρέαζε

την μικροδομή, υπάρχει ψύξη του δίσκου και του δοκιμίου.

Εγκιβωτισμός

Τα δοκίμια εγκιβωτίζονται με κατάλληλη ρητίνη ώστε να είναι πιο εύκολη η μετέπειτα διεργασία τους. Τοποθετούνται εντός καλουπιού το οποίο γεμίζει με ρητίνη και σκληρυντή σε ανάλογια 10 προς 1.



Εικόνα 28 Δοκίμια που είναι εγκιβωτισμένα

Λείανση – Στίλβωση

Για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου πριν την χημική προσβολή του είναι αναγκαία η λείανση του και στη συνέχεια η στίλβωση του. Η λείανση έχει ως σκοπό να λειάνει όσο το δυνατόν περισσότερο την επιφάνεια του δοκιμίου.



Εικόνα 29 Υδρόψυκτη διάταξη τύπου “Stuers, LaboPol-5” του Εργαστηρίου Μεταλλικών υλικών

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε υδρόψυκτη διάταξη τύπου Stuers, LaboPol-5 .Ο περιστρεφόμενος δίσκος έχει εύρος ταχύτητας περιστροφής από 50 έως 500 rpm. Η ταχύτητα που επιλέγεται πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με την πορεία της διαδικασίας.

Τα χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν για την λείανση αποτελούνται από καρβίδια του πυριτίου και είχα παραχθεί από την Stuers.



Εικόνα 30 Χαρτιά λείανσης Stuers

Η κοκκομετρία των χαρτιών που χρησιμοποιήθηκαν για να προετοιμάσουν την επιφάνεια είναι τα εξής:

- 400 grit
- 800 grit
- 1200 grit
- 2000 grit
- 4000 grit

και χρησιμοποιήθηκαν από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη. Υπάρχει καταιονισμός νερού στην τράπεζα έτσι ώστε να ψύχονται τα δοκίμια και να απομακρύνεται οποιαδήποτε σωματίδια από την τράπεζα που θα μπορούσαν να χαράξουν τα δοκίμια.

Μετά το πέρας της λείανσης και όταν έχει ελεγχθεί ότι το αποτέλεσμα είναι το επιθυμητό ακολουθεί η στίλβωση. Στην στίλβωση χρησιμοποιείται περιστρεφόμενος δίσκος, όπου τοποθετείται βελούδο και πάνω του πάστα. Στα συγκεκριμένα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε ειδικό βελούδο DPNA και πάστα αλουμίνας 1 μm και 0,1 μm . Τα δοκίμια αποκτούν μια στιλπνή και λαμπερή επιφάνεια, καθώς απομακρύνονται τυχόν γραμμές που μπορεί να υπάρχουν μετά την λείανση. Ένα δοκίμιο όπου έχει επιτευχθεί

η στίλβωση πρέπει να αντανακλά κάθετα όλες της ακτίνες που πέφτουν στην επιφάνεια του.

Όταν ολοκληρωθούν και οι δύο διαδικασίες τα δοκίμια ξεπλένονται με νερό και διάλυμα αιθανόλης. Στο τέλος στεγνώνονται με ζεστό αέρα.

Χημική Προσβολή

Για την εμφάνιση της μικροδομής τους τα δοκίμια προσβάλλονται χημικά. Κατά την διαδικασία αυτή η επιφάνεια των δοκιμίων διαβρώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα τα όρια των κόκκων να προσβάλλονται περισσότερο και να γίνονται εμφανή.

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου.

Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια, από υλικό ελεύθερο από τις αλλαγές που μπορεί να προκλήθηκαν από επιφανειακή παραμόρφωση, από ροή των υλικών ή από γρατσουνιές.

Παρ' ότι μερικές πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν από το γυαλισμένο δοκίμιο, η μικροδομή συνήθως αποκαλύπτεται (γίνεται ορατή) μόνο μετά από χημική προσβολή.

Η προσβολή είναι κατά κύριο λόγο μια ελεγχόμενη διαδικασία διάβρωσης η οποία είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρολυτικής αντίδρασης ανάμεσα σε επιφάνειες του δοκιμίου με διαφορετικό δυναμικό.

Τα χημικά διαλύματα προσβολής παράγουν μεταλλογραφική αντίθεση με δύο τρόπους. Είτε διαμέσου των κρυσταλλικών εδρών (δηλαδή τα όρια προσβάλλονται με μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω των διαφοροποιήσεων στον κρυσταλλογραφικό τους προσανατολισμό), με αποτέλεσμα την δημιουργία βαθμίδων στα όρια των κόκκων και διαφορών αντανακλαστικότητας είτε με την προσβολή ορίων κόκκων ή ορίων φάσεων, η οποία προκαλεί αυλακώσεις.^[59]

Με τα καθαρά μέταλλα και τα μονοφασικά κράματα, διαφορά δυναμικού παράγεται ανάμεσα στους κόκκους που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό, ανάμεσα στα όρια

των κόκκων και το εσωτερικό τους, ανάμεσα στις ακαθαρσίες και την μητρική φάση ή ανάμεσα σε βαθμίδες συγκέντρωσης στα μονοφασικά κράματα.

Στην περίπτωση των δι-φασικών ή πολύ-φασικών κραμάτων, οι διαφορές δυναμικού παρουσιάζονται επίσης ανάμεσα σε φάσεις με διαφορετική σύσταση.

Αυτές οι διαφορές δυναμικού χρησιμοποιούνται για να παράγουν ελεγχόμενη διαλυτοποίηση. Η μικροδομή αποκαλύπτεται με την επιλεκτική διαλυτοποίηση της δομής, ξεκινώντας από την επιφάνεια και συνεχίζοντας προς το εσωτερικό.

Οι διαφορές στον ρυθμό προσβολής αποκαλύπτουν την δομή. Κατά την διάρκεια της προσβολής, προσβάλλεται η περισσότερο ηλεκτροθετική ανοδική φάση, ενώ η ηλεκτροαρνητική δεν προσβάλλεται σχεδόν καθόλου. Καθώς η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο φάσεις μεγαλώνει, ο χρόνος προσβολής πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά, για να μην υπάρξουν φαινόμενα υπερβολικής διάβρωσης (over-etching). Εξαιτίας του μεγέθους του δυναμικού, ανάμεσα σε διαφορετικές φάσεις, τα διπλά κράματα συνήθως προσβάλλονται πιο γρήγορα απ' ό,τι τα καθαρά μέταλλα και τα μονοφασικά κράματα.

Η απρόσβλητη καθοδική φάση είναι υπερυψωμένη και φαίνεται φωτεινή, ειδικά αν έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος. Η ανοδική φάση έχει υποχωρήσει κάτω από το αρχικό επίπεδο της γυαλισμένης επιφάνειας και φαίνεται να έχει τραχιά επιφάνεια ανάλογα με το διάλυμα και την σύσταση του κράματος. Η επιφανειακή τραχύτητα θα παρουσιάζει το ανοδικό συστατικό σκοτεινό.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο χρόνο προσβολής. Καθώς μεγαλώνει η μεγέθυνση στο μικροσκόπιο ο βαθμός προσβολής πρέπει να μειωθεί. Οι διαφορές δυναμικού ανάμεσα στα όρια των κόκκων και στο εσωτερικό τους είναι μικρότερες και ασκούν λιγότερη επιρροή στην προσβολή. Οι ακαθαρσίες οι οποίες επικάθονται στα όρια των κόκκων μπορούν να βελτιώσουν αισθητά την απόδοση της προσβολής. Στα μονοφασικά κράματα και τα καθαρά μέταλλα ένα διάλυμα μπορεί να προσβάλλει τα όρια των κόκκων ή επιλεκτικά να διαλύσει διαφορετικά προσανατολισμένους κόκκους, το οποίο παράγει προσβολή αντίθεσης κόκκων. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το διάλυμα Nital. Η χημική του σύσταση είναι 2% νιτρικού οξέος (HNO_3) σε αιθυλική αλκοόλη ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OH}$). Τα δοκίμια αφέθηκαν για 50 δευτερόλεπτα μέσα στο Nital.^[61]

Δοκιμή Εφελκυσμού

Σε μακροκλίμακα τα δοκίμια εξετάστηκαν με δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 8M-16a.



Εικόνα 31 Μηχανή κόπωσης τύπου Instron 8800

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στην μηχανή κόπωσης της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών, η σχολή διαθέτει μηχανή κόπωσης τύπου Instron 8800. Η μηχανή αποτελεί μια υδραυλική μηχανή μηχανικών δοκιμών με μέγιστο φορτίο 100 kN και ταχύτητα παραμόρφωσης ίση με 0,5 mm/min.

Υπάρχουν κάποιοι βασικοί μηχανισμοί βάση τους οποίους ένα υλικό ισχυροποιείτε και αποκτά μεγαλύτερη αντοχή.^[38,42]

Μηχανισμοί Ισχυροποίησης

Οι διαταραχές κάτω από την επίδραση εξωτερικής διατμητικής τάσης ολισθαίνουν επάνω σε συγκεκριμένα κρυσταλλικά επίπεδα, τα οποία ονομάζονται επίπεδα ολίσθησης, με αποτέλεσμα την παραγωγή πλαστικής παραμόρφωσης στο υλικό.

Η κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης στην οποία ξεκινάει η ολίσθηση των διαταραχών είναι το όριο διαρροής μονοκρυστάλλου σε διάτμηση, τ_0 , το οποίο σχετίζεται άμεσα με το όριο διαρροής πολυκρυσταλλικού υλικού σε εφελκυσμό, σ_0 , μέγεθος που καθορίζεται εύκολα πειραματικά μέσω της δοκιμής εφελκυσμού. Η αντοχή των μμεταλλικών υλικών, δηλαδή η αντίσταση που προβάλλουν στην πλαστική παραμόρφωση, μπορεί να αυξηθεί με την παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαταραχών στους κρυστάλλους.

Παρεμπόδιση στην ολίσθηση διαταραχών μπορούν να προβάλλουν διάφορα στοιχεία της μικροδομής του υλικού, όπως το κρυσταλλικό πλέγμα (πλεγματική αντίσταση), άλλες διαταραχές (κινητές ή ακίνητες), άτομα κραματικών στοιχείων (αντικατάστασης ή παρεμβολής), τα σύνορα κόκκων, καθώς και σωματίδια δευτερευουσών φάσεων. Καθένα από τα παραπάνω στοιχεία προβάλλει μία συγκεκριμένη ειδική αντίσταση στην ολίσθηση των διαταραχών και συνιστά έναν ξεχωριστό μηχανισμό ισχυροποίησης των μμεταλλικών υλικών.^[1,48]

Οι βασικότεροι μηχανισμοί ισχυροποίησης των μεταλλικών υλικών είναι οι παρακάτω:

- I. Η πλεγματική αντίσταση, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλει το ίδιο το κρυσταλλικό πλέγμα στην ολίσθηση διαταραχών μέσα σε αυτό. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από την πυκνότητα του επιπέδου και της διεύθυνσης ολίσθησης.
- II. Η εργοσκήρυση, που οφείλεται στη ραγδαία αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το υλικό.
- III. Η ισχυροποίηση στερεού διαλύματος ή κραμάτωσης, που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των διαταραχών με άτομα παρεμβολής ή αντικατάστασης.

Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από την περιεκτικότητα του κράματος στα διάφορα κραματικά στοιχεία.

- IV. Η ισχυροποίηση από σύνορα κόκκων, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν τα σύνορα των κόκκων στην ολίσθηση των διαταραχών. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το μέγεθος των κόκκων.
- V. Ισχυροποίηση από καθίζηση και διασπορά δευτερευουσών φάσεων, που οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλουν σωματίδια άλλων φάσεων, τα οποία σχηματίζονται είτε από καθίζηση, είτε από διασπορά. Οδηγεί σε εξάρτηση του ορίου διαρροής από το κλάσμα όγκου και το μέσο μέγεθος των σωματιδίων των δευτερευουσών φάσεων.

Σε οποιοδήποτε κραματικό σύστημα είναι δυνατόν να λειτουργεί ένας ή περισσότεροι από τους παραπάνω μηχανισμούς ισχυροποίησης. Η σύγχρονη φιλοσοφία στο σχεδιασμό κραμάτων (alloy design) είναι η ταυτόχρονη χρήση διαφόρων μηχανισμών ισχυροποίησης για τη διαμόρφωση της συνολικής αντοχής του κράματος.^[36]

Μικροσκληρομέτρηση

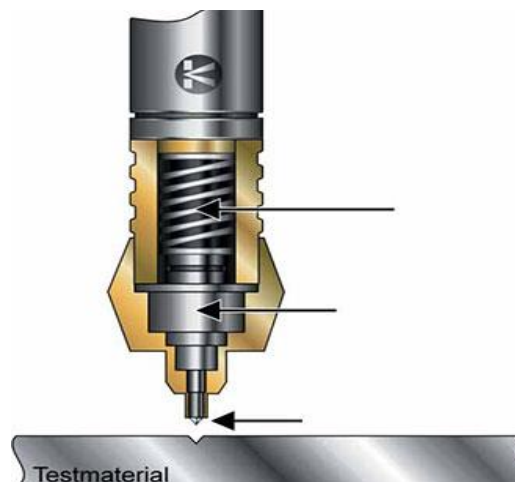
Στην συγκεκριμένη μελέτη για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Instron Wolpert 971/750 που διαθέτει το εργαστήριο της εταιρίας ΕΛΚΕΜΕ. Οι μετρήσεις έγιναν στην κλίμα Vickers σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 6507.

Με τον όρο «σκληρότητα» ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα στην προσπάθεια διείσδυσης κάποιου άλλου σκληρότερου εισβολέα υπό φορτίο και εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου, την κρυσταλλική του δομή και τις τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας του. Ο έλεγχος της σκληρότητας των υλικών γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως η σκληρότητα σε εγχάραξη, η σκληρότητα σε λείανση, η σκληρότητα σε κρουστικά φορτία και η σκληρότητα σε διείσδυση.^[4]



Εικόνα 32 Αποτύπωμα δοκιμών μικροσκληρομέτρησης

Ο όρος μικροσκληρομέτρηση ανάγεται στη μέτρηση της σκληρότητας με χρήση πολύ μικρών φορτίων δηλαδή 1gr- 1 kgf. Ο χρησιμοποιούμενος εντυπωτής είναι η αδαμαντοπυραμίδα της μεθόδου Vickers, ο οποίος είναι ρομβοεδρική αδαμαντοπυραμίδα με βάση ρόμβο με λόγο διαγώνιων 7:1 και γωνίες κορυφής $172^{\circ} 30'$. Οι διαστάσεις του αποτυπώματος που δημιουργείται επειδή το μέγεθός του είναι πολύ μικρό μετρούνται με μικροσκόπιο. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν απαιτείται πολύ μικρό μέγεθος εντύπωσης, π.χ. σε επιφανειακά στρώματα, λεπτά υλικά, σκληρότητα μεταλλουργικών φάσεων, σκληρότητα κοντά στο άκρο κοπτικών εργαλείων.^[1,49]



Εικόνα 33 Τυπικός μηχανισμός εργαλείου μικροσκληρομέτρησης

Στην κλίμακα Vickers η σκληρότητα υπολογίζεται (όπως και στην κανονική σκληρότητα Vickers) από τον τύπο:

$$HV=1.8544\overline{P/L^2} \text{ (P το φορτίο)}$$

Για να μετρηθεί η σκληρότητα σε μια συγκόλληση FSW όπου το μέγεθος της είναι μικρό, είναι αναγκαία η χρήση της μεθόδου μικροσκληρομέτρησης. Τα δοκίμια στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος πρέπει να έχουν λειανθεί και στυλβωθεί, ώστε να μην υπάρχουν ατέλειες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη μέτρηση.

Στα δοκίμια εφαρμόστηκε η μέθοδος μέτρησης κατά Vickers.^[29]

Οπτική Μικροσκοπία

Το οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία για τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Ενώ, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ξεπερνούν δύο από τους σημαντικότερους περιορισμούς του οπτικού μικροσκοπίου-την ανάλυση και το βάθος του πεδίου-δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν την σημασία του.

Όντως, οι περιορισμοί των μικροσκοπίων TEM και SEM αποτελούν τα ισχυρά σημεία του οπτικού μικροσκοπίου και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τεχνικές οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας να είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές. Σε κάθε μελέτη υλικών, η πιο σωστή διαδικασία είναι η αρχή της εξέτασης να γίνει πρώτα σε μακροσκοπικό επίπεδο, πριν προχωρήσει σε μικροσκοπικές λεπτομέρειες.

Η απλή οπτική εξέταση, ίσως μακροσκοπικής προσβολής, πρέπει να προηγείται της μεγέθυνσης. Όλες οι παρατηρήσεις στο μικροσκόπιο πρέπει να ξεκινάνε με μια μικρή μεγέθυνση όπως αυτή των 100X, η οποία θα ακολουθηθεί σταδιακά από μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, έτσι ώστε να εκτιμηθούν ικανοποιητικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Με αυτόν τον τρόπο, τα συνήθη ή μη χαρακτηριστικά της δομής μπορούν να διακριθούν και να αναγνωρισθεί η σπουδαιότητά τους. Η οπτική μικροσκοπία έχει άπειρες εφαρμογές. Η πιο σημαντική εφαρμογή της είναι ο καθορισμός των δομικών φάσεων και η σύσταση της κύριας μάζας του μετάλλου.^[14]

Αυτές οι παρατηρήσεις είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας, επειδή η δομή και η σύσταση του υλικού, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Στην μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε προσβολή, είτε μετά από προσβολή ή και στις δύο καταστάσεις.

Συγκεκριμένα συστατικά μπορούν να παρατηρηθούν πιο εύκολα αν είναι απλώς γυαλισμένη η επιφάνεια, επειδή δεν σκιαγραφούνται με την χημική προσβολή. Εγκλείσματα, νιτρίδια, ορισμένα καρβίδια και ενδομεταλλικές φάσεις μπορούν να παρατηρηθούν και χωρίς χημική προσβολή.

Εκτός από τα εγκλείσματα, οι υπόλοιπες φάσεις μπορούν να εξεταστούν με μεγαλύτερη ευκολία αν κατά την διάρκεια το τελικού σταδίου γυαλίσματος επέλθει κάποιος βαθμός αποκατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση και μετάφραση της μικροδομής, χωρίς επιπλοκές από σφάλματα (artifacts). Τα δοκίμια τα οποία αντιδρούν στο πολωμένο φως, όπως τα υλικά με μη-κυβικές δομές, γενικά εξετάζονται χωρίς χημική προσβολή.

Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η χημική προσβολή πρέπει γίνει, για είναι δυνατή η παρατήρηση της μικροδομής. Υπάρχουν αμέτρητες μικροσκοπικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση της μικροδομής των υλικών, και αυτές οι τεχνικές παράγουν εικόνες οι οποίες έχουν την ανάλυση και την αντίθεση που είναι απαραίτητη για την παρατήρηση των μικροσκοπικών δομικών λεπτομερειών.^[1]

Ηλεκτρική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Για την μελέτη της μικροδομής χρησιμοποιήθηκε εκτός του οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy). Για την παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το Jeol6380LV του οίκου JEOL που είναι εφοδιασμένο και με σύστημα χημικής ανάλυσης SEM-EDS.



Εικόνα 34 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy) Jeol6380LV του οίκου JEOL

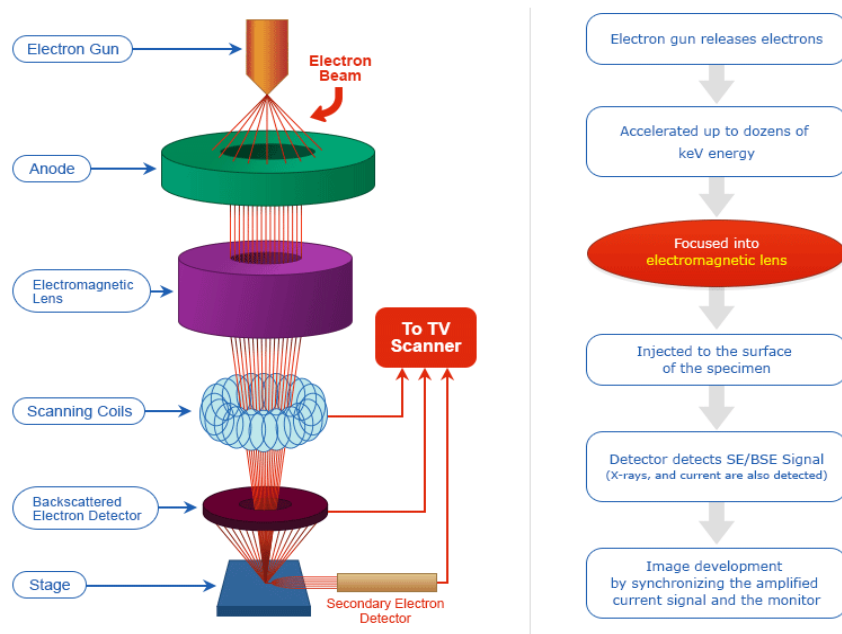
Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μία από όπως σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης όπως μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών.

Η ικανότητα των οπτικών μικροσκοπιών περιορίζεται λόγω όπως φύσης του φωτός σε επίπεδα μεγεθύνσεων έως 1000x και σε διακριτική ικανότητα έως 0.2 μm .

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα.

Τα ηλεκτρόνια λόγω όπως κυματικής όπως φύσης μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό.

Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X.^[1,35]



Εικόνα 35 Βασικές αρχές λειτουργίας του SEM

Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας.

Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτινών X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.^[35]

Οπισθοσκεδαζόμενα Ηλεκτρόνια (Backscattered Electrons)

Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης με ενέργεια πχ 30 KeV φθάσουν στην επιφάνεια του δείγματος διεισδύουν σε βάθος που εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό. Τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν προς τυχαίες κατευθύνσεις μέσα στο δείγμα και συγκρούονται με τα άτομα του δείγματος. Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται ελαστικά με τον πυρήνα του ατόμου (ειδικά σε μεγάλα άτομα) και σκεδάζονται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς σημαντική απώλεια της ενέργειάς τους (κρατούν το 50 με 80% της αρχικής ενέργειας). Εκείνα τα ηλεκτρόνια που σκεδάζονται προς τα πίσω με γωνία 180ο λέγονται οπισθοσκεδαζόμενα (Backscattered electrons, BSE). Έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος από το δείγμα. Το ποσοστό των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται οπισθοσκεδαζόμενα, εξαρτάται από τον ατομικό

αριθμό του ατόμου του δείγματος. Για τα ελαφρά στοιχεία είναι ~6% ενώ για τα βαρύτερα ~50%. Επομένως η αλλαγή του ποσοστού των BSE δίνει διαφοροποίηση στην εικόνα ανάλογα με τον ατομικό αριθμό. Οι βαρύτερες φάσεις φαίνονται λαμπρότερες από τις ελαφρύτερες. Έτσι έχουμε πληροφορίες για την σύσταση του δείγματος.

Η ανίχνευση γίνεται χρησιμοποιώντας ως ανιχνευτή τον ημιαγωγό στερεάς κατάστασης (solid state semiconductor) σχήματος donut, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στην έξοδο της κολώνας. Μετρούνται οι κτύποι των ηλεκτρονίων στον ανιχνευτή οι οποίοι μετατρέπονται σε ένταση των ψηφίδων και εμφανίζονται στον σωλήνα σχηματίζοντας την εικόνα.^[1]

Δευτερογενή Ηλεκτρόνια (Secondary Electrons)

Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια του ατόμου μερικά από τα χαλαρά συγκρατούμενα ηλεκτρόνια μπορεί να φύγουν από το άτομο και ονομάζονται δευτερογενή ηλεκτρόνια. Όπως φαίνεται στο δεξιά σχήμα (Κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο μπορεί να παράγει αρκετά δευτερογενή). Κάθε ηλεκτρόνιο που εγκαταλείπει το άτομο μετά από σύγκρουση με άλλο υψηλής ενέργειας είναι θεωρητικά ένα δευτερογενές ηλεκτρόνιο. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χαμηλής ενέργειας (50eV) και εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος αφού αυτά που εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος, απορροφούνται εύκολα από την μάζα του δείγματος. Γι' αυτό τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χρήσιμα για την απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος.

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια παράγονται με δύο κυρίως μηχανισμούς

- Καθώς η δέσμη εισέρχεται στην επιφάνεια
- Καθώς η οπισθοσκεδαζόμενη δέσμη εξέρχεται από την επιφάνεια

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι δέκα φορές πιο πιθανός από τον πρώτο. Επομένως είναι αναμενόμενο να υπάρχει μεγαλύτερη εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων εκεί που

είναι μεγάλη και η εκπομπή οπισθοσκεδαζόμενων. Γι' αυτό οι εικόνες των δευτερογενών και των οπισθοσκεδαζόμενων δεν διαφέρουν πολύ.^[1]

Ανίχνευση Δευτερογενών Ηλεκτρονίων

Η συλλογή των δευτερογενών ηλεκτρονίων γίνεται με την βοήθεια ενός «συλλέκτη» που δεν είναι άλλο από ένα πλέγμα με θετικό δυναμικό (+100V) που βρίσκεται μπροστά από τον ανιχνευτή και έλκει τα αρνητικά ηλεκτρόνια τα οποία μετρώνται από τους κτύπους που παράγουν στον ανιχνευτή. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της επιφανείας. Η διακύμανση στην ένταση των ηλεκτρονίων επηρεάζει την φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα (CRT), ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την δέσμη ηλεκτρονίων. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται η εικόνα της επιφανείας στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα.^[14]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μακροσκοπική Μελέτη Δοκιμίων

Με τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων που έχουν συγκολληθεί αποκτάται μια γενική εικόνα για την ποιότητα της συγκόλλησης, τυχών ατελειών που υπάρχουν αλλά και τη ροή που είχε το υλικό κατά τη διάρκεια της εργασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επίσης δυνατός ο διαχωρισμός των διαφόρων ζωνών συγκόλλησης από μια μακροσκοπική παρατήρηση.

Αποτελέσματα Δοκιμών Εφέλκυσμού

Τα δοκίμια χωρίζονται ανάλογα με το περιβάλλον που πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις και τις παραμέτρους της κίνησης του εργαλείου συγκόλλησης.

S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min

S2: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

S3: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min

S4: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

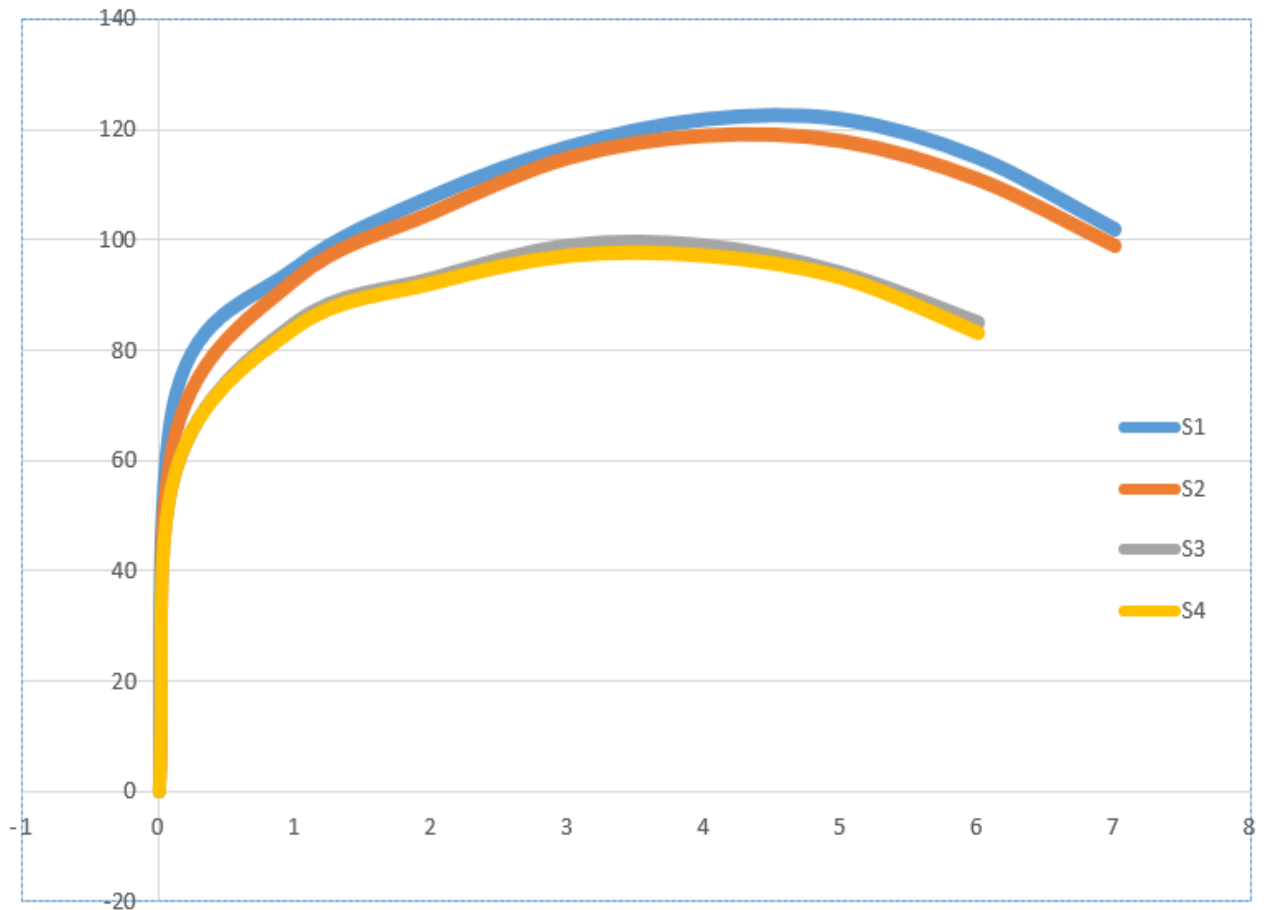
Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τις συγκολλήσεις:

Under water Friction Stir Welding

Όλα τα δοκίμια έσπασαν στην περιοχή ελάχιστης σκληρότητας, δηλαδή τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Αυτό φανερώνει καλή ανάμειξη των υλικών κατά τη συγκόλληση. Τα υλικά σπάσανε όλα στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη της πλευράς του αλουμινίου AA6082-T6 όπου αποτελεί και λογικό αποτέλεσμα λόγο ότι το μητρικό αλουμίνιο 6082 παρουσιάζει μικρότερη αντοχή από το 5083.

Friction Stir Welding

Τα δοκίμια όπως και στο UFSW έσπασαν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του AA6082 που αποτελεί φυσικό όπως προαναφέρθηκε.



Εικόνα 36 Δοκιμές Εφελκυσμού των συγκολλήσεων S1, S2, S3 και S4

Μέτρο ελαστικότητας, όριο διαρροής, μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, και ποσοστό επιμήκυνσης

	Yield Stress (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
S1	63.4±4.1	124.3±4	5.1±1.8
S2	59.6±2.3	119.5±3,6	4.9±3.2
S3	55,1±2.1	100.3±3.7	4.2±3.4
S4	53,6±3.1	98.2±1.4	4.1±4.7

Πίνακας 1.16

Από τις δοκιμές είναι εμφανές ότι τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί στο νερό παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα.

Τα δοκίμια S1 παρουσιάζουν μικρές διαφορές από τα δοκίμια S2 λόγω των μικρών διαφορών που έχουν στην ταχύτητα προώθησης. Αντιστοίχως τα δοκίμια S3 και S4

παρουσιάζουν επίσης μικρές διαφορές λόγω της μικρής τους διαφοράς στην ταχύτητα πρόωσης.

Σύμφωνα με τους (Wahid et al) η φάση β'' (Mg_5Si_6) και οι GP zones είναι τα κύρια στοιχεία που συμβάλλουν στην αντοχή των αλουμινίων σειράς 6XXX. Η μετάβαση της φάσης β'' και των GP zones στην σταθερή β φάση συμβαίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η φάση β'' παραμένει σταθερή μέχρι την θερμοκρασία των 200°C. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης UFSW στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη η θερμοκρασία φτάνει μέχρι τους 110°C. Στη μέθοδο FSW η θερμοκρασία στη θερμικά επηρεασμένη φτάνει τους 300°C, στους οποίους υπάρχει μετασχηματισμό της β'' σε β φάση η οποία έχει χαμηλότερη αντοχή.

Αποτελέσματα Μικροσκοπιομετρήσεων

Σε κάθε δοκίμιο έγιναν σε 5 διαφορετικά σημεία μικροσκοπιομετρήσεις ώστε να αναλυθεί κάθε περιοχή της συγκόλλησης.

Περιοχές:

Π1: Μητρικό υλικό αλουμινίου AA5083-H111

Π2: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη AA5083-H111

Π3: Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη AA5083-H111

Π4: Ζώνη Ανάδευσης

Π5: Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη AA6082-T6

Π6: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη AA6082-T6

Π7: Μητρικό υλικό αλουμινίου AA6082-T6

Σε κάθε περιοχή αναγράφεται ο μέσος όρος των τιμών που κατέγραψαν οι μικροσκοπιομετρήσεις που έγιναν σε αυτή τη περιοχή. Στα δύο διαφορετικά μητρικά υλικά βρέθηκαν τιμές σκληρότητας για το AA5083-H111 μετρήθηκε ~79HV0.3 και για το AA6082-T6 μετρήθηκε ~75HV0.3.

Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων

	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5	Π6	Π7
Underwater 1000rpm 56mm/min	~110HV	~83HV	~87HV	~90HV	~80HV	~73HV	~97HV
Underwater 1000rpm 32mm/min	~108HV	~84HV	~88HV	~88HV	~79HV	~74HV	~97HV
Air 1000rpm 56mm/min	~108HV	~79HV	~80HV	~84HV	~69HV	~62HV	~98HV
Air 1000rpm 32mm/min	~111HV	~77HV	~79HV	~85HV	~72HV	~61HV	~97V

Πίνακας 1.17

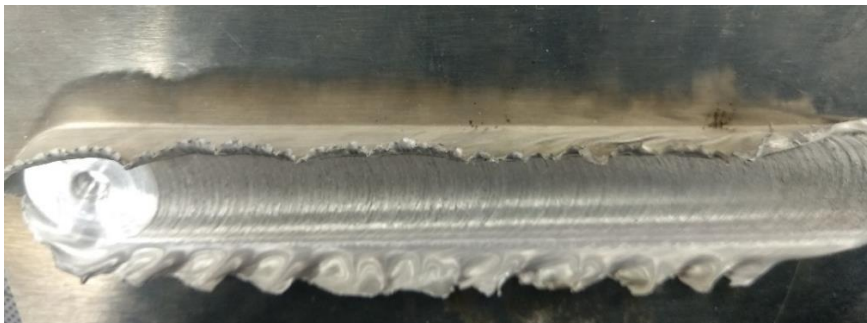
Επιφάνειες Συγκολλήσεων

Friction Stir Welding

Στις συγκολλήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί χωρίς ψύξη από το νερό, παρατηρείτε έντονο το φαινόμενο του Ribbon Flash, που αποτελεί μια από τις ατέλειες της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση. Η απομάκρυνση υλικού από τη ζώνη συγκόλλησης που προκαλείται από το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Επίσης παρατηρείτε το φαινόμενο της επιφανειακής αποκόλλησης υλικού (Surface Gallling) το οποίο ενισχύει την απομάκρυνση υλικού. Μια χαρακτηριστική ατέλεια που δημιουργείτε τις περισσότερες φορές στις συγκολλήσεις Friction Stir Welding είναι μια τρύπα στο τέλος της συγκόλλησης που υπονομεύει τις μηχανικές ιδιότητες.

Στη πρώτη φωτογραφία όπου η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή της δεύτερης φωτογραφίας το φαινόμενο του Ribbon Flash είναι εντονότερο κυρίως λόγω ότι το υλικό πλαστικοποιείτε σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα να αποβάλλεται από την περιοχή της συγκόλλησης.



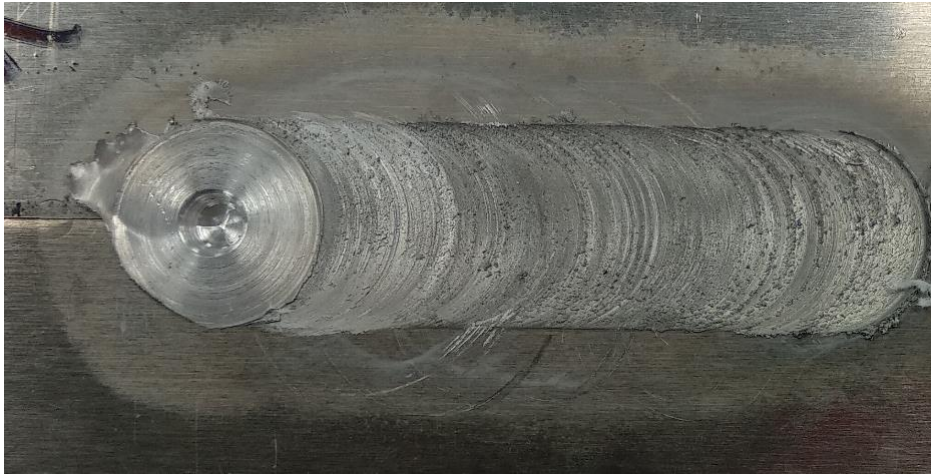
Εικόνα 37 S3: Air με ταχύτητα περιστροφής1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min



Εικόνα 38 S3: Air με ταχύτητα περιστροφής1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

Under Water Friction Stir Welding

Το κύριο χαρακτηριστικό που παρατηρείται στις υποβρύχιες συγκολλήσεις είναι ότι η δεν παρατηρείτε το φαινόμενο Ribbon Flash. Όπως και στις συγκολλήσεις στον αέρα παρατηρείτε το φαινόμενο της επιφανειακής αποκόλλησης υλικού (Surface Galling) αλλά και η τρύπα στο τέλος της συγκόλλησης.



Εικόνα 39 S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min



Εικόνα 40 S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

Μικροσκοπική μελέτη δοκιμίων

Για να μελετηθεί αναλυτικά η συγκόλληση είναι αναγκαία η σε βάθος παρατήρηση της δομής της συγκόλλησης. Για να επιτευχθεί μια επιτυχημένη μικροσκοπική μελέτη του υλικού είναι απαραίτητη η καλή προετοιμασία (μεταλλογραφική προετοιμασία και χημική προσβολή) του προς ανάλυση υλικού. Τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την μικροσκοπική μελέτη των δοκιμίων είναι το Οπτικό Μικροσκόπιο και το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM).

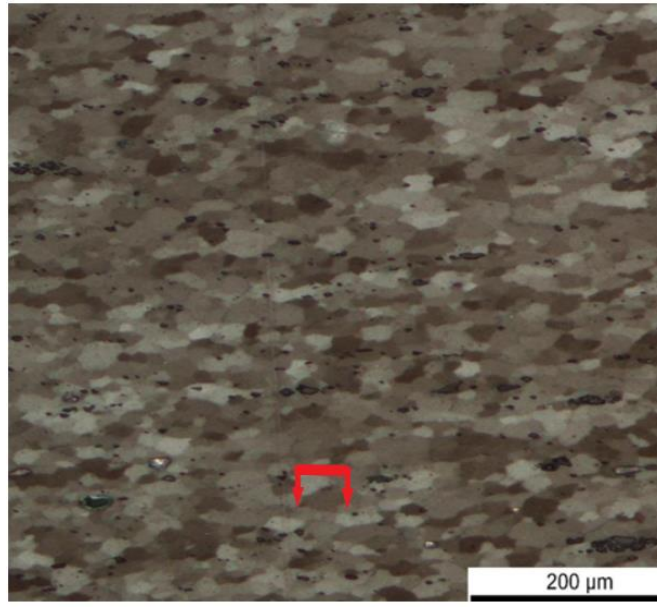
Αποτελέσματα Οπτικού Μικροσκοπίου

Είναι σημαντικό πριν γίνει η μελέτη της συγκόλλησης να παρατηρηθεί η μικροδομής του μητρικού υλικού ώστε να γίνει κατανοητό σε πιο βαθμό επηρεάστηκε το δοκίμιο μετά το πέρας της συγκόλλησης.

Μητρικό Υλικό AA5083-H111

Το μητρικό υλικό κατά τον σχηματισμό του έχει ενδοτραχυνθεί, μικροδομή του παρουσιάζει μια μικρόκοκη δομή.

Οι κόκκοι του υλικού είναι πεπλατυσμένοι με ένα μέσω μέγεθος μεταξύ 30-50 μm .



Εικόνα 41 Μικροδομή μητρικού υλικού AA5083-H111

Μητρικό Υλικό AA6082-T6

Το μητρικό υλικό παρουσιάζει πεπλατισμένους κόκκους μεγέθους 80-100 μm



Εικόνα 42 Μικροδομή μητρικού υλικού AA6082-T6

Το μέγεθος των κόκκων στις ζώνες ανάδευση όπως φαίνεται στα σχήματα 2.47 και 2.48 έχει μειωθεί πολύ σε σχέση με τα μέταλλα βάσης αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της δυναμικής ανακρυστάλλωσης που συμβαίνει στη Ζώνη Ανάδευσης.

Τα φαινόμενα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης προέρχονται από την τάση που έχει κάθε υλικό να ελατώσει την εσωτερική ενέργεια της μικροδομής του που έχει αυξηθεί επειδή οι διαταραχές συσσωρεύονται στη διογκωμένη περιοχή των ορίων των κόκκων με αποτέλεσμα την περαιτέρω σκλήρυνση του υλικού . Αυτό συμβαίνει διαμέσου της δημιουργίας νέων κόκκων με σχετικά μικρότερη πυκνότητα διαταραχών στο εσωτερικό τους.

Υπάρχουν τρία είδη δυναμικής ανακρυστάλλωσης

- Η ασυνεχής δυναμική αποκρυστάλλωση (Discontinuous dynamic recrystallization-DDRX) η οποία περιλαμβάνει το σχηματισμό πυρήνων ανακρυσταλλωμένων κόκκων και την επακόλουθη ανάπτυξη αυτών. Σε υλικά με εδροκέντρωμένη κυβική κρυσταλλική διμή και υψηλή ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης , όπως είναι το υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο, η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση περιορίζεται από τη δυναμική αποκατάσταση (dynamic recovery) χωρίς αυτό να αποκλείει το γεγονός της εμφάνισης ασυνεχούς δυναμικής ανακρυστάλλωσης σε υψηλές θερμοκρασίες και σε περιπτώσεις που το υλικό παραμορφώνεται υπό συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου Z.
- Η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Continuous dynamic recrystallization-CDRX) κατά την οποία παρατηρείται αύξηση της γωνίας αποπροσανατολισμού των υποκόκκων από το εσωτερικό του κόκκου προς τα όριά του και τελικά διακριτοποίηση των υποκόκκων μέσω δημιουργίας νέων κόκκων. Για μικρά επίπεδα παραμόρφωσης του υλικού οι διαταραχές αρχίζουν να συσσωρεύονται στα υπάρχοντα όρια των κόκκων και σε μικρότερο βαθμό σε αυτά των υποκόκκων. Καθώς η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και με το ποσοστό των διαταραχών οι οποίοι συσσωρεύονται στα όρια των υποκόκκων οι οποίοι έχουν αρχικά χαμηλή γωνία αποπροσανατολισμού. Η γωνία αποπροσανατολισμού των υποκόκκων αυξάνεται λόγω της συσσώρευσης των διαταραχών στα όρια τους και τελικά αυτοί αποσχίζονται και μετατρέπονται σε κόκκους.
- Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (Geometric dynamic recrystallization- GDRX) όπου τα αρχικά όρια των κόκκων αναπτύσσουν οδοντώσεις και τελικά διαχωρίζονται όταν το μήκος κύματος των οδοντώσεων εξισωθεί με το μέγεθος των υποκόκκων.

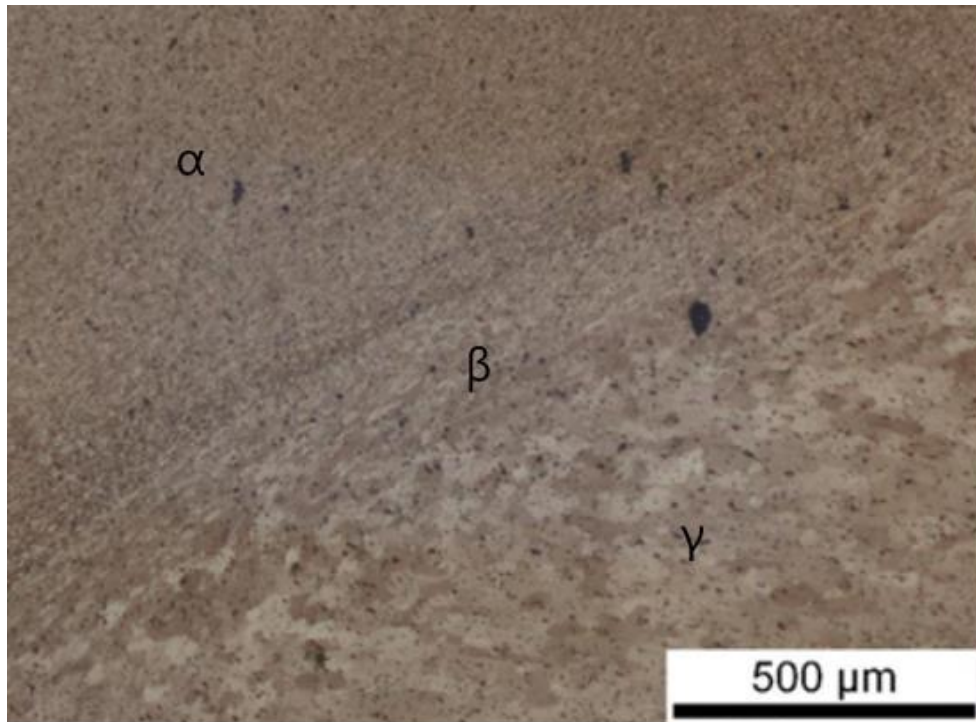
Σε ορισμένες περιπτώσεις η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση δρα συνεργατικά με τη συνεχή ή τη γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση.

Underwater Friction Stir welding

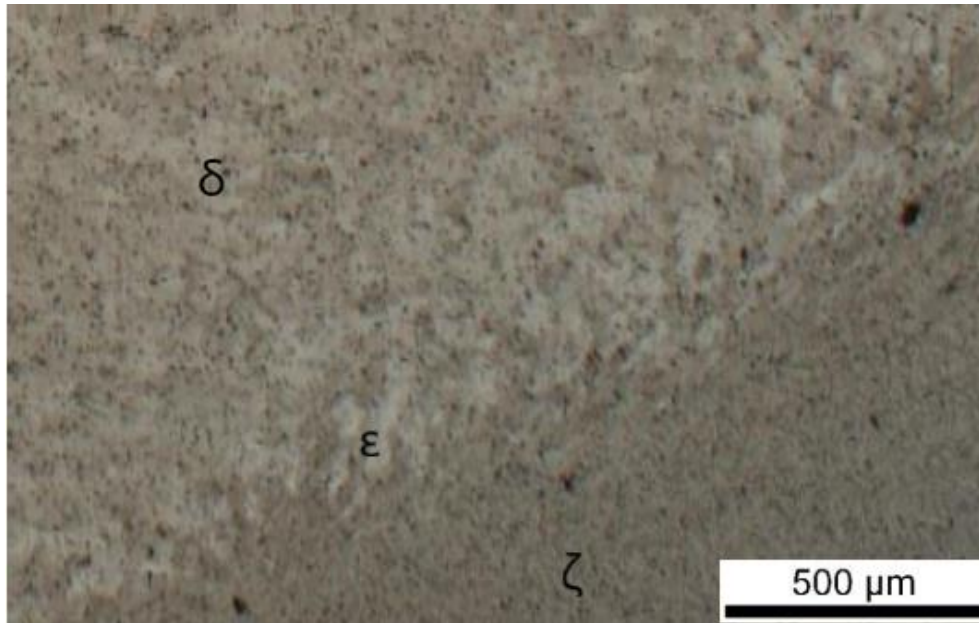
S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 56 mm/min

S2: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

Οι συγκολλήσεις S1 και S2 δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στη μικροδομή τους λόγω της μικρής διαφοράς που παρουσιάζουν στη ταχύτητα πρόωσης. Το μέγεθος των ζωνών είναι το ίδιο και δεν μπορούν παρατηρηθούν διαφορές στο μέγεθος των κόκκων στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και την ζώνη ανάδευσης.

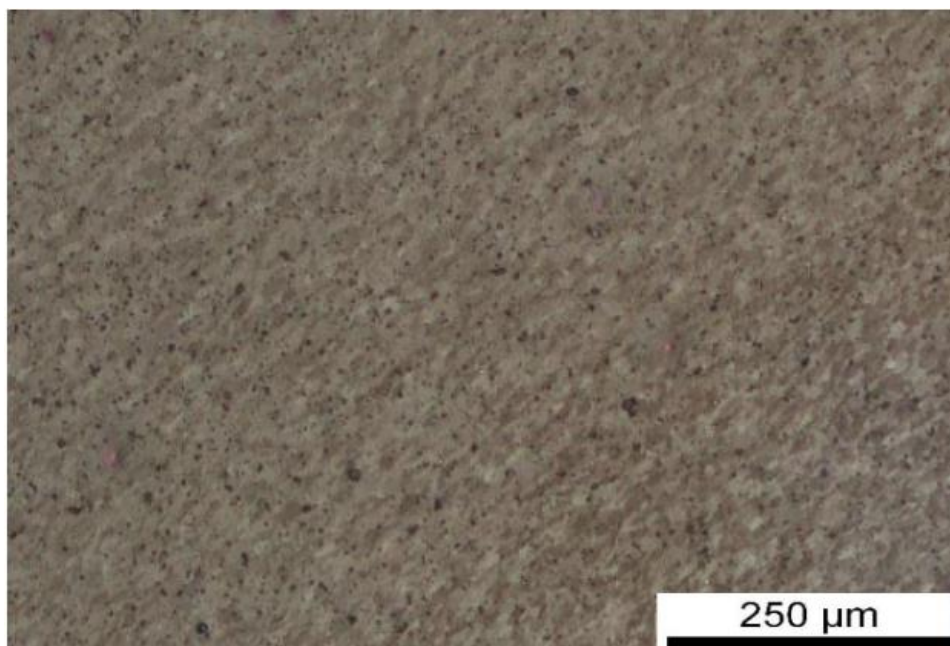


Εικόνα 43 Συγκόλληση S1, η πλευρά που προωθείτε (AA6082), (α) Ζώνη Ανάδευσης, (β) Θερμομηχανικά Επιρεααμένη Ζώνη, (γ) Θερμικά Επιρεασμένη Ζώνη



Εικόνα 44 συγκόλληση S2 η πλευρά που υποχωρεί (AA5082), (δ) Ζώνη Ανάδευσης, (ε) Θερμομηχανικά Επηρασμένη Ζώνη, (ζ) Θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Η Θερμομηχανικά Επηρασμένη Ζώνη στη πλευρά που υποχωρεί είναι πιο μεγάλη από στη πλευρά που προωθείτε από την πλευρά που υποχωρεί. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι η πλευρά που προωθείτε δέχεται κυρίως δυνάμεις εφελκυσμού.



Εικόνα 45 Συγκόλληση S2, Ζώνη Ανάδευσης

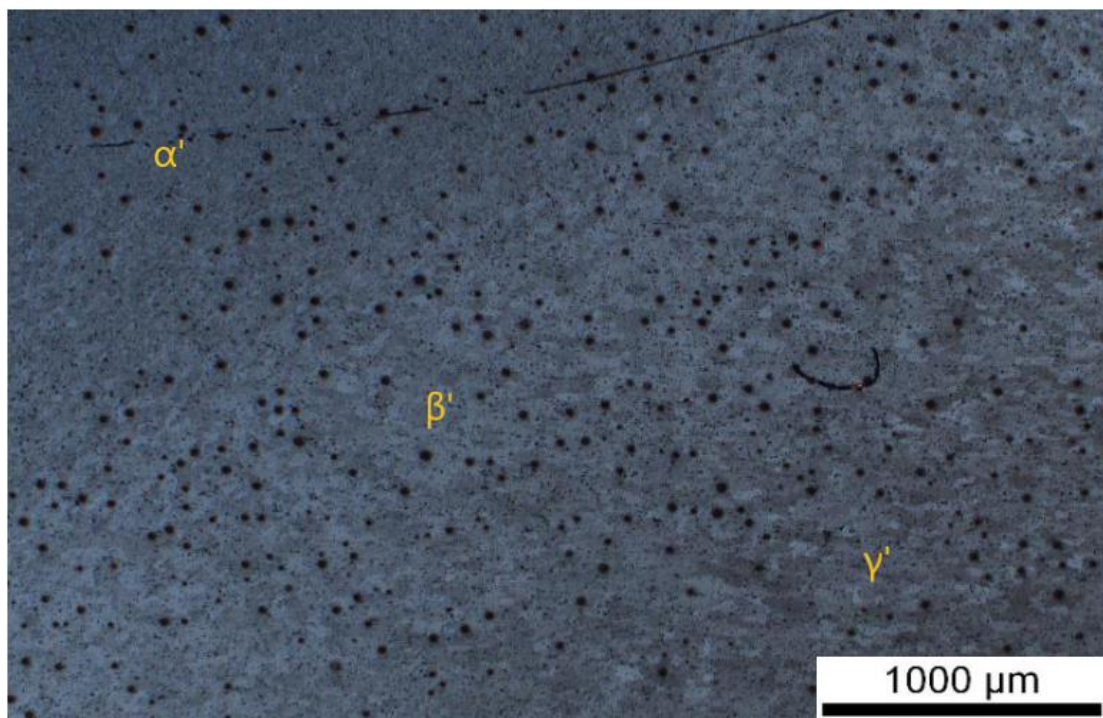
Υπάρχει πλήρης ανακρυστάλλωση των μετάλλων βάσης και έχει σχηματιστεί μια λεπτοκρυσταλική δομή με μέγεθος κόκκων 10-15 μm .

Friction Stir welding

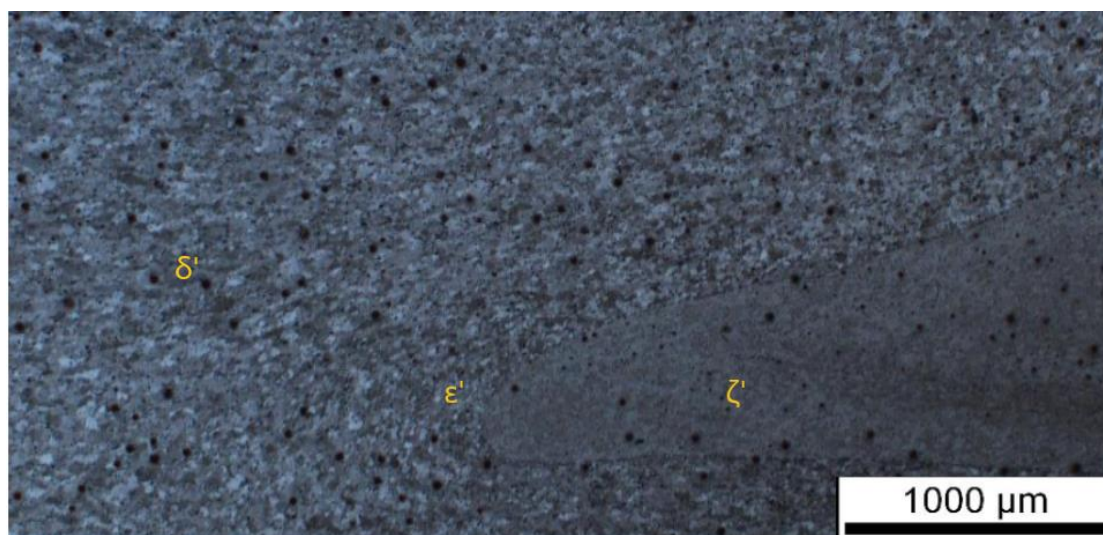
S3: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 56 mm/min

S4: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

Στις συγκόλλησης στον αέρα όπως και στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν υποβρύχια δεν παρατηρούνται διαφορές στη μικρογραφία μεταξύ των δύο διαφορετικών ταχυτήτων πρόωσης.

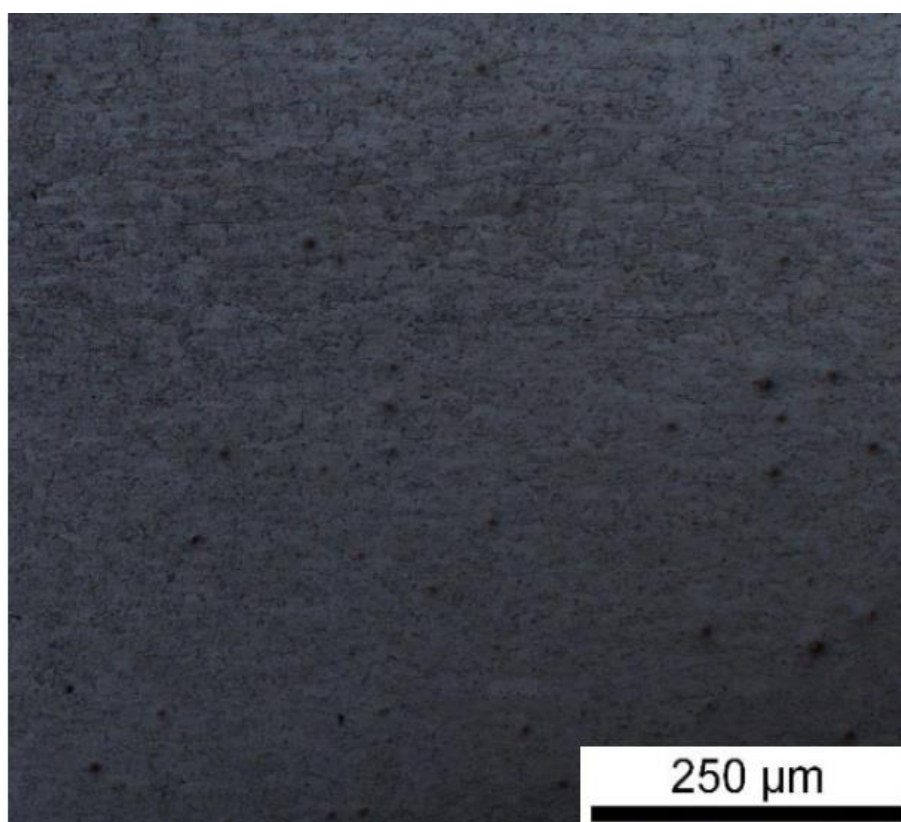


Εικόνα 46 Συγκόλληση S3 Πλευρά που προωθείται (AA6082), (α') Ζώνη Ανάδευσης, (β') Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη, (γ') Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη



Εικόνα 47 Συγκόλληση S4 Πλευρά που υποχωρεί (AA5083), (δ') Ζώνη Ανάδευσης, (ε') Θερμομηχανικά Επηρασαμένη Ζώνη, (ζ') Θερμικά Επηρασαμένη Ζώνη

Η Θερμομηχανικά Επηρασαμένη Ζώνη είναι μεγαλύτερη από την πλευρά που προωθείτε σε σύγκριση με αυτή που υποχωρεί για τους ίδιους λόγους με το UFSW.



Εικόνα 48 συγκόλληση S3 Ζώνη Ανάδευσης

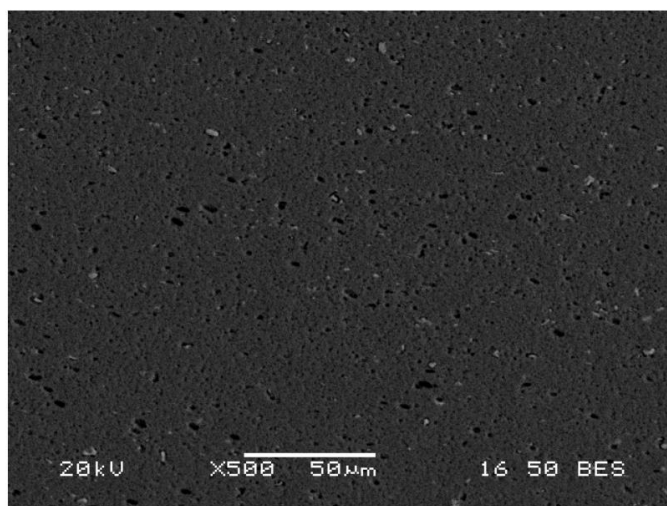
Στη ζώνη ανάδευσης έχει πραγματοποιηθεί ανακρυστάλλωση και έχει δημιουργηθεί μια μικροδομή με μέγεθος κόκκων 25-35 μm .

Αποτελέσματα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM)

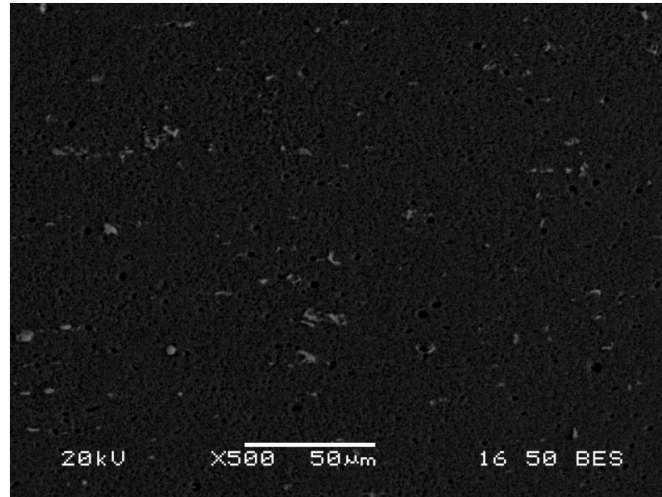
Για να κατανοηθεί σε βάθος η μικροδομή των συγκολλήσεων είναι σημαντική η περαιτέρω διερεύνηση με το SEM. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης το οποίο διαθέτει την ανάλυση EDS θα αποκαλυφθεί η χημική σύσταση των επιμέρους ζωνών της συγκόλλησης.

Στη μέθοδο UFSW δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των συγκολλήσεων με διαφορετική ταχύτητα πρόωσης στη χημική σύσταση των επιμέρους ζωνών και τη διασπορά των κατακρημνισμάτων.

Το ίδιο ισχύει και στις συγκολλήσεις FSW όπου οι διαφορές δεν είναι ουσιαστικές ανάμεσα στα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με διαφορετικές ταχύτητας πρόωσης.

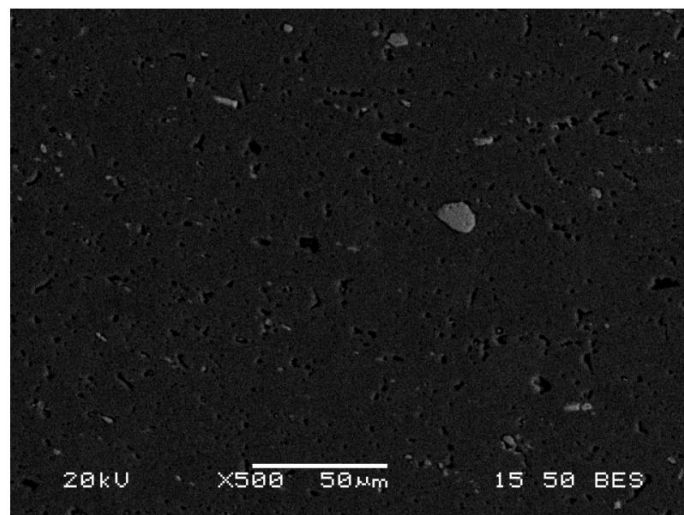


Εικόνα 49 Ζώνη Ανάδευσης S2: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

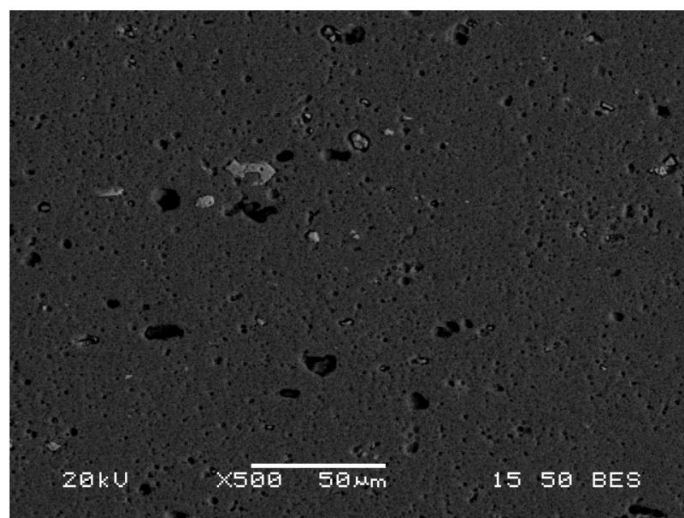


Εικόνα 50 Ζώνη Ανάδευσης S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min

Υπάρχει διασπορά των κατακρημνισμάτων σε όλη την ζώνη ανάδευσης. Τα κατακρημνίσματα έχουν παραμείνει σε μικρό μέγεθος λόγω της αυξημένης ψύξης που υπάρχει από το νερό. Το μέγεθος των δοκιμίων και στις συγκολλήσεις S1 και S2 έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος με τα κατακρημνίσματα της συγκόλλησης S1 είναι λίγο μεγαλύτερα.

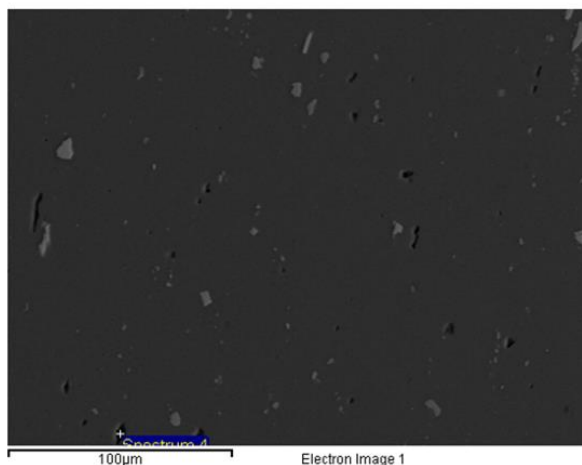


Εικόνα 51 Ζώνη Ανάδευσης S3: Air με ταχύτητα περιστροφής1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min



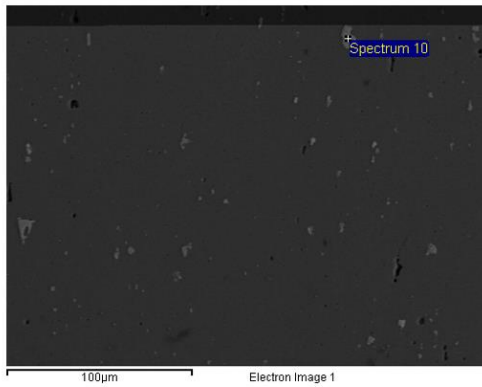
Εικόνα 52 Ζώνη Ανάδευσης S4: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min

Στην ζώνη ανάδευσης των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν στον αέρα παρατηρούνται επίσης μικροκρυσταλικά υλικά αλλά με κάποια ευμεγέθης κατακρημνίσματα λόγω της αργής ψύξης στον αέρα.



Element	Weight%	Atomic%
Mg K	11.99	11.129
Al K	70.05	71.26
Si K	17.96	17.29
Totals	100.00	

Εικόνα 53 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη S1: Underwater με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min, φάση β'' (Mg_5Si_6)



Element	Weight%	Atomic%
Mg K	17.99	19.129
Al K	71.05	70.26
Si K	11.96	10.29
Totals	100.00	

Εικόνα 54 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη S3: Air με ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm, ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min, φάση β (Mg_2Si)

Στις εικόνες από το SEM παρατηρείται ότι στα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί στον αέρα έχουν σχηματιστεί ευμεγέθη λευκά σωματίδια της β φάσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθεί η συγκόλληση μεταξύ των κραμάτων αλουμινίου AA6082-T6 και AA5083-H111 με τις μεθόδους Underwater Friction Stir Welding και Friction Stir Welding. Οι συγκολλήσεις μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων συγκρίθηκαν για τις μηχανικές τους ιδιότητες και τη μικροδομή τους.

Τα κυριότερα της εργασίας αυτής είναι:

- Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον αέρα υπάρχει το φαινόμενο Ribbon flash ενώ στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο νερό δεν υπάρχει για τις ίδιες ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης.
- Τα φαινόμενα Surface Galling αλλά και η δημιουργία τρύπας στο τέλος της συγκόλλησης παρατηρείται και στα δύο είδη συγκολλήσεων.
- Οι συγκολλήσεις που παρουσιάζουν επαναληψιμότητα και στις δύο μεθόδους καθώς τα δοκίμια έχουν κοινές τιμές στις μηχανικές δοκιμές.
- Σε όλες τις μεθόδους και τις περιπτώσεις, η θραύση σε εφελκυσμό έλαβε χώρα στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δηλαδή στο σημείο που εμφανίζεται η χαμηλότερη αντοχή της συγκόλλησης, αυτό επιβεβαιώνει την καλή ανάδευση των επιμέρους υλικών.
- Τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο Underwater Friction Stir Welding παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές εφελκυσμού.
- Τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο Underwater Friction Stir Welding παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές μικροσκληρομέτρησης.
- Τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί κάτω από το νερό παρουσιάζουν ελαφρώς μικρότερο μέγεθος κόκκων από τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί τον αέρα.
- Τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί κάτω από το νερό παρουσιάζουν μικρότερο μέγεθος θερμικά επηρεασμένης ζώνης.
- Από τα αποτελέσματα τόσο της μακροσκοπικής όσο και της μικροσκοπικής μελέτης των συγκολλήσεων προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν υποβρύχια (UFSW) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα από τις συγκολλήσεις που έγιναν στον αέρα (FSW).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pantelis, D. I., et al. “Microstructural Study and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welded AA5083-H111 and AA6082-T6 Reinforced with SiC Nanoparticles.” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 3, 12 Mar. 2015, pp. 264–274, 10.1080/10426914.2015.1019095. Accessed 10 Jan. 2020.
2. Selamat, N.F.M., et al. “Friction Stir Welding of Similar and Dissimilar Aluminium Alloys for Automotive Applications.” *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 2, 30 Sept. 2016, pp. 3401–3412, 10.15282/ijame.13.2.2016.9.0281. Accessed 10 Jan. 2020.
3. Παντελής, Ιωάννης, and Ioannis Pantelis. “Friction Stir Welding of Aluminum 5083 Plates Reinforced with Micro and Nano Particles.” *Core.Ac.Uk*, 2016, core.ac.uk/display/46568248, oai:dspace.lib.ntua.gr:123456789/43382. Accessed 13 Jan. 2020.
4. Barla, Madhavi, and Jeevan Jaidi. “Influence of Strain Hardening Behaviour in Friction Stir Welded Joints of Aluminium-Alloy Plates.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, 2018, pp. 3851–3860, 10.1016/j.matpr.2017.11.639.
5. Hosseini, M., and H. Danesh Manesh. “Immersed Friction Stir Welding of Ultrafine Grained Accumulative Roll-Bonded Al Alloy.” *Materials & Design*, vol. 31, no. 10, Dec. 2010, pp. 4786–4791, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910002888
6. Ikram, I.M., et al. “A Preliminary Experimental Study of Underwater Friction Stir Welding AA5083 Plate Butt Joint.” *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 9, no. 6, 15 Oct. 2016, pp. 462–466, docsdrive.com/pdfs/ansinet/jest/2016/462-466.pdf, 10.3923/jest.2016.462.466. Accessed 24 Jan. 2020.
7. Vairis, Achilles, et al. “A Comparison between Friction Stir Welding, Linear Friction Welding and Rotary Friction Welding.” *Advances in Manufacturing*, vol. 4, no. 4, Dec. 2016, pp. 296–304, 10.1007/s40436-016-0163-4. Accessed 22 Oct. 2019.
8. Bergmann, Jean Pierre, et al. “Advances and Potentials in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys.” *Key Engineering Materials*, vol. 710, Sept.

- 2016, pp. 137–142, 10.4028/www.scientific.net/kem.710.137. Accessed 9 Jan. 2020.
9. Rodriguez, R.I., et al. “Corrosion Effects on Fatigue Behavior of Dissimilar Friction Stir Welding of High-Strength Aluminum Alloys.” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 742, Jan. 2019, pp. 255–268, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509318315375, 10.1016/j.msea.2018.11.020.
 10. Rodriguez, R.I., et al. “Corrosion Effects on Fatigue Behavior of Dissimilar Friction Stir Welding of High-Strength Aluminum Alloys.” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 742, Jan. 2019, pp. 255–268, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509318315375, 10.1016/j.msea.2018.11.020.
 11. Sun, Guoqin, et al. “Fatigue Modeling and Life Prediction for Friction Stir Welded Joint Based on Microstructure and Mechanical Characterization.” *International Journal of Fatigue*, vol. 98, May 2017, pp. 131–141, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112317300336, 10.1016/j.ijfatigue.2017.01.025. Accessed 10 Jan. 2020.
 12. Heirani, Farzad, et al. “Effects of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Behaviors of Underwater Friction Stir Welding of Al5083 Alloy.” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, Jan. 2017, pp. 77–84, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612516301578, 10.1016/j.jmapro.2016.11.002. Accessed 24 Jan. 2020.
 13. Kishta, Emad Eldin, and Basil Darras. “Experimental Investigation of Underwater Friction-Stir Welding of 5083 Marine-Grade Aluminum Alloy.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, no. 3, 29 Oct. 2014, pp. 458–465, 10.1177/0954405414555560. Accessed 10 Jan. 2020.
 14. Tamadon, Abbas, et al. “Texture Evolution in AA6082-T6 BFSW Welds: Optical Microscopy and EBSD Characterisation.” *Materials*, vol. 12, no. 19, 1 Oct. 2019, p. 3215, 10.3390/ma12193215.
 15. Avula, Dhananjayulu, and D.K. Dwivedi. “Effect of Welding Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA 6082-T6 Al

- Alloy.” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 877, Feb. 2018, pp. 98–103, 10.4028/www.scientific.net/amm.877.98.
16. El-Sayed, M. M., et al. “Influence of the Welding Speeds and Changing the Tool Pin Profiles on the Friction Stir Welded AA5083-O Joints.” *Journal of Welding and Joining*, vol. 35, no. 3, 30 June 2017, pp. 44–51, 10.5781/jwj.2017.35.3.7.
 17. Krasnowski, K., et al. “Influence of the Tool Shape and Weld Configuration on Microstructure and Mechanical Properties of the Al 6082 Alloy FSW Joints.” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 1, Jan. 2015, pp. 133–141, 10.1016/j.acme.2014.02.001. Accessed 9 Jan. 2020.
 18. Liu, H.J., et al. “Effect of Welding Speed on Microstructures and Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219 Aluminum
 19. S. Mishra, R., and Preeti Rani. “Experimental Investigation of Joining of Aluminum Alloy 5083 by Friction Stir Welding (FSW).” *International Journal of Research in Engineering and Innovation*, vol. 3, no. 5, 2019, pp. 306–309, 10.36037/ijrei.2019.3504.
 20. Shiva chander, M., et al. “Influence of Tool Rotational Speed and Pin Profile on Mechanical and Microstructural Characterization of Friction Stir Welded 5083 Aluminium Alloy.” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, 2018, pp. 3518–3523, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317328729, 10.1016/j.matpr.2017.11.599. Accessed 10 Jan. 2020.
 21. Sree Sabari, S., et al. “Characteristics of FSW and UWFSW Joints of AA2519-T87 Aluminium Alloy: Effect of Tool Rotation Speed.” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, Apr. 2016, pp. 278–289, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612516300160, 10.1016/j.jmapro.2016.03.014. Accessed 25 Jan. 2020.
 22. Salih, Omar S., et al. “Influence of Process Parameters on the Microstructural Evolution and Mechanical Characterisations of Friction Stir Welded Al-Mg-Si Alloy.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 275, Jan. 2020, p. 116366, 10.1016/j.jmatprotec.2019.116366. Accessed 9 Jan. 2020.
 23. Chhangani, Sumit, et al. “Microstructural Evolution in Al–Mg–Sc Alloy (AA5024): Effect of Thermal Treatment, Compression Deformation and

- Friction Stir Welding.” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 772, Jan. 2020, p. 138790, 10.1016/j.msea.2019.138790.
24. Scialpi, A., et al. “Influence of Shoulder Geometry on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6082 Aluminium Alloy.” *Materials & Design*, vol. 28, no. 4, Jan. 2007, pp. 1124–1129, 10.1016/j.matdes.2006.01.031. Accessed 9 Jan. 2020.
 25. Frattura Integrità Strutturale. “Simulation of the Behavior of Aluminum Alloys Welded in Friction Stir Welding FSW (Case of AA5083 and AA 6082.” *Academia.Edu*, 2020, www.academia.edu/37687441/Simulation_of_the_behavior_of_aluminum_all_oys_welded_in_Friction_Stir_Welding_FSW_Case_of_AA5083_and_AA_6082. Accessed 10 Jan. 2020.
 26. Huang, Yongxian, et al. “Material-Flow Behavior during Friction-Stir Welding of 6082-T6 Aluminum Alloy.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 1–4, 9 Mar. 2016, pp. 1115–1123, 10.1007/s00170-016-8603-7. Accessed 9 Jan. 2020.
 27. Park, Jae-Cheul, and Seong-Jong Kim. “Optimization of Friction Stir Welding with the Various Welding Parameters for Al-Mg Alloys.” *Rare Metals*, vol. 30, no. S1, Mar. 2011, pp. 628–632, 10.1007/s12598-011-0360-z. Accessed 9 Jan. 2020.
 28. Patel, Nirav P., et al. “Numerical Modelling on Cooling Assisted Friction Stir Welding of Dissimilar Al-Cu Joint.” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 47, Nov. 2019, pp. 98–109, 10.1016/j.jmapro.2019.09.020.
 29. Peel, M., et al. “Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminium AA5083 Friction Stir Welds.” *Acta Materialia*, vol. 51, no. 16, Sept. 2003, pp. 4791–4801, 10.1016/s1359-6454(03)00319-7. Accessed 9 Jan. 2020.
 30. Wahid, Mohd Atif, et al. “Analysis of Cooling Media Effects on Microstructure and Mechanical Properties during FSW/UFSW of AA 6082-T6.” *Materials Research Express*, vol. 5, no. 4, 11 Apr. 2018, p. 046512, adsabs.harvard.edu/abs/2018MRE.....5d6512A, 10.1088/2053-1591/aab8e3. Accessed 18 Jan. 2020.
 31. Mohd Atif Wahid, Zahid A Khan, Arshad Noor Siddiquee, Rohit Shandley, Nidhi Sharma. “Analysis of Process Parameters Effects on Underwater

- Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6082-T6.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 233, no. 6, 25 July 2018, pp. 1700–1710, journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405418789982, 10.1177/0954405418789982.
32. ZHANG, Hui-jie, et al. “Thermal Modeling of Underwater Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloy.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, no. 4, Apr. 2013, pp. 1114–1122, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100363261362573X, 10.1016/s1003-6326(13)62573-x. Accessed 24 Jan. 2020.
33. Zhang, Huijie, and Huijie Liu. “Mathematical Model and Optimization for Underwater Friction Stir Welding of a Heat-Treatable Aluminum Alloy.” *Materials & Design*, vol. 45, Mar. 2013, pp. 206–211, 10.1016/j.matdes.2012.09.022.
34. *TA KPAMATA TOY AΛOYMINIOY 4.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟYMINIOY- 4.1.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)*.
35. Kalembe, Izabela, and Mateusz Kopyściański. “Electron Microscopy Characterization of Friction Stir Welded 5083-H111 and 7075-T651 Aluminum Alloys.” *Solid State Phenomena*, vol. 231, June 2015, pp. 93–99, 10.4028/www.scientific.net/ssp.231.93. Accessed 10 Jan. 2020.
36. Svoboda, Hernán Gabriel, et al. “Residual Stresses in Similar and Dissimilar Friction Stir Welds of AA5083 and AA6061.” *Key Engineering Materials*, vol. 813, July 2019, pp. 147–152, 10.4028/www.scientific.net/kem.813.147.
37. Ning, J. L., et al. “Grain Refinement in as Cast Al–Mg–Mn Alloy during High Temperature Equal Channel Angular Pressing.” *Materials Science and Technology*, vol. 25, no. 7, July 2009, pp. 820–828, 10.1179/174328408x365757.
38. Anil Kumar, H M, et al. “Experimental Study on Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminium Alloys (5083-H111 and 6082-T6) to Investigate the Mechanical Properties.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 330, Mar. 2018, p. 012076, 10.1088/1757-899x/330/1/012076. Accessed 10 Jan. 2020.

39. Kasirajan, T., et al. "Investigation of the Microstructural, Mechanical, and Thermal Evolution of Dissimilar Aluminium Alloys during Friction Stir Welding." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 14 May 2019, pp. 1–11, 10.1139/tcsme-2019-0027. Accessed 10 Jan. 2020.
40. Cho, Jae-Hyung, et al. "Cooling Effect on Microstructure and Mechanical Properties during Friction Stir Welding of Al-Mg-Si Aluminum Alloys." *Materials Letters*, vol. 180, Oct. 2016, pp. 157–161, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X16309223, 10.1016/j.matlet.2016.05.157. Accessed 24 Jan. 2020.
41. Sree Sabari, S., et al. "Experimental and Numerical Investigation on Under-Water Friction Stir Welding of Armour Grade AA2519-T87 Aluminium Alloy." *Defence Technology*, vol. 12, no. 4, Aug. 2016, pp. 324–333, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914716300046, 10.1016/j.dt.2016.02.003. Accessed 24 Jan. 2020.
42. Babu, K. Tejonadha, et al. "A Study on Influence of Underwater Friction Stir Welding on Microstructural, Mechanical Properties and Formability in 5052-O Aluminium Alloys." *Materials Science Forum*, vol. 969, Aug. 2019, pp. 27–33, www.scientific.net/MSF.969.27, 10.4028/www.scientific.net/msf.969.27. Accessed 24 Jan. 2020.
43. Buddi Manohar. "EFFECT OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED DISSIMILAR AA5083-AA6061 ALUMINIUM ALLOY JOINTS." *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 05, no. 11, 25 Nov. 2016, pp. 58–62, 10.15623/ijret.2016.0511011.
44. Ahmed, Mohamed Zaky, et al. "Crystallographic Texture Investigation of Thick Section Friction Stir Welded AA6082 and AA5083 Using EBSD." *Key Engineering Materials*, vol. 786, Oct. 2018, pp. 44–51, 10.4028/www.scientific.net/kem.786.44.
45. Chhangani, Sumit, et al. "Microstructural Evolution in Al–Mg–Sc Alloy (AA5024): Effect of Thermal Treatment, Compression Deformation and Friction Stir Welding." *Materials Science and Engineering: A*, vol. 772, Jan. 2020, p. 138790, 10.1016/j.msea.2019.138790.
46. Gungor, Beytullah, et al. "Mechanical and Microstructural Properties of Robotic Cold Metal Transfer (CMT) Welded 5083-H111 and 6082-T651

- Aluminum Alloys.” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, Feb. 2014, pp. 207–211, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913007619, 10.1016/j.matdes.2013.08.018.
47. Kumar, N., et al. “Microstructure and Mechanical Behavior of Friction Stir Processed Ultrafine Grained Al–Mg–Sc Alloy.” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 18, July 2011, pp. 5883–5887, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509311004096, 10.1016/j.msea.2011.03.109. Accessed 25 Jan. 2020.
48. Kumar, P. Vijaya, et al. “Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior of High Strength AA7075 Aluminium Alloy Friction Stir Welds – Effect of Post Weld Heat Treatment.” *Defence Technology*, vol. 11, no. 4, Dec. 2015, pp. 362–369, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914715000318, 10.1016/j.dt.2015.04.003. Accessed 29 Mar. 2019.
49. Pedapati, Srinivasa Rao, et al. “Microhardness and Microstructural Studies on Underwater Friction Stir Welding of 5052 Aluminum Alloy.” *Volume 2: Advanced Manufacturing*, 3 Nov. 2017, asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2017/58356/V002T02A086/265667, 10.1115/imece2017-71248. Accessed 10 Jan. 2020.
50. Singh, Ratnesh Kumar Raj, et al. “Cooling Environment Effect on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir-Welded Joints.” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, no. 6, 28 May 2019, pp. 3737–3747, link.springer.com/article/10.1007/s11665-019-04110-2, 10.1007/s11665-019-04110-2.
51. Ratnesh Kumar Raj Singh Rajesh Prasad Sunil Pandey Satish Kumar Sharma. “Effect of Cooling Environment and Welding Speed on Fatigue Properties of Friction Stir Welded Al-Mg-Cr Alloy.” *International Journal of Fatigue*, vol. 127, Oct. 2019, pp. 551–563, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112319302737, 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.043.
52. Svensson, L.-E., et al. “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Alloys with Special Reference to AA 5083 and AA 6082.” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 5, no. 5, Oct. 2000, pp. 285–296, 10.1179/136217100101538335. Accessed 9 Jan. 2020.

53. Tamadon, Abbas, et al. "Development of Metallographic Etchants for the Microstructure Evolution of A6082-T6 BFSW Welds." *Metals*, vol. 7, no. 10, 11 Oct. 2017, p. 423, 10.3390/met7100423.
54. Thimmaraju, PavanKumar, et al. "Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of Al 6082 Aluminum Alloy with Different Tool Profiles." *Materials Today: Proceedings*, vol. 3, no. 10, 2016, pp. 4173–4181, 10.1016/j.matpr.2016.11.092. Accessed 9 Jan. 2020.
55. Tsarkov, Andrey, et al. "The Influence of Gaps on Friction Stir Welded AA5083 Plates." *Materials Today: Proceedings*, July 2019, 10.1016/j.matpr.2019.07.030. Accessed 9 Jan. 2020.
56. "Underwater Friction Stir Welding." *Scientific.Net*, 2020, www.scientific.net/paper-keyword/underwater-friction-stir-welding.
57. Vairis, Achilles, et al. "A Comparison between Friction Stir Welding, Linear Friction Welding and Rotary Friction Welding." *Advances in Manufacturing*, vol. 4, no. 4, Dec. 2016, pp. 296–304, 10.1007/s40436-016-0163-4. Accessed 22 Oct. 2019.
58. Verma, S., et al. "Study on Temperature Distribution during Friction Stir Welding of 6082 Aluminum Alloy." *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017, pp. 1350–1356, 10.1016/j.matpr.2017.01.156. Accessed 9 Jan. 2020.
59. Zhang, Liangliang, and Xijing Wang. "Microstructure Evolution and Properties of Friction Stir Welding Joint for 6082-T6 Aluminum Alloy." *Materials Research*, vol. 21, no. 6, 20 Aug. 2018, 10.1590/1980-5373-mr-2018-0285. Accessed 9 Jan. 2020.
60. Zhang, Z., et al. "Prediction of Fatigue Life of Welding Tool in Friction Stir Welding of AA6061-T6." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 9–12, 13 Feb. 2016, pp. 3407–3415, link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-8475-x, 10.1007/s00170-016-8475-x. Accessed 9 Jan. 2020.
61. "Μέτρηση Μεγέθους Κόκκου Κράμματος Αλουμινίου Α1 6060 Με Χημική Προσβολή Και Ανοδίωση - IKEE / Aristotle University of Thessaloniki - Library." *Auth.Gr*, IKEE, 2016, ikee.lib.auth.gr/record/283458/files/. Accessed 25 Jan. 2020.
62. Παντελής, Ιωάννης, and Ioannis Pantelis. "Friction Stir Welding of Aluminum 5083 Plates Reinforced with Micro and Nano Particles." *Core.Ac.Uk*, 2016,

core.ac.uk/display/46568248, [oai:dspace.lib.ntua.gr:123456789/43382](https://oai.dspace.lib.ntua.gr/123456789/43382).

Accessed 13 Jan. 2020.