

Γεώργιος Π. Κολέτσης

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083 ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (FSP). ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΕ ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ.

Διπλωματική Εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών». Εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, με επιβλέποντα τον Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή Ε.Μ.Π.

2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083 ΚΑΙ
ΚΑΘΑΡΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ
ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ (FSP). ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ
ΚΑΤΕΡΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΕ ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Π. ΚΟΛΕΤΣΗ

Διπλωματούχου Μεταλλειολόγου-Μεταλλουργού Μηχανικού
Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2020

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας (ΜΔΕ), θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου σ' αυτή την προσπάθεια και με βοήθησαν να τη φέρω εις πέρας.

Καταρχάς ευχαριστώ τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. που μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση του παρόντος θέματος και ως επιβλέπων είχε τη γενική εποπτεία του. Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Διονύσιο Μουζάκη για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε με τη μεσολάβησή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης στο Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για την συνεργασία και τη συνεχή στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, τον κ. Πέτρο Τσακιρίδη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για τη βοήθειά του σε κάποιες ερμηνείες αποτελεσμάτων της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης, καθώς και όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για τη βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Ιωάννη Ζαφειράτο, Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Μεταλλευτικών, Ενεργειακών και Βιομηχανικών Ορυκτών του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας, καθώς και στη κα. Νίκη Ντατσοπούλου, Προϊστάμενη του Τμήματος Διαχείρισης Μεταλλευτικών Δικαιωμάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος & Ενέργειας, για τις σημαντικές διευκολύνσεις που μου παρείχαν ώστε να ολοκληρώσω την παρούσα ΜΔΕ.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης ΜΔΕ ήταν η μελέτη συγκόλλησης ανόμοιων κραμάτων με τη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης με επικάλυψη. Τα ανόμοια ελάσματα στα οποία επιχειρήθηκε ο ανωτέρω τρόπος συγκόλλησης, ήταν το κράμα αλουμινίου AA5083 και ο καθαρός χαλκός. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μελέτη της μικροδομής της συγκόλλησης με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, καθώς και της συμπεριφοράς των παραχθέντων δοκιμίων σε ψυχρή έλαση, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται εκτενώς στο πειραματικό μέρος της παρούσης ΜΔΕ.

Abstract

The aim of the present Master Thesis was the study of Friction Stir Welding (FSW) of dissimilar alloys. This paper investigates the weldability between aluminum AA5083 and pure copper sheets. All welds were produced by FSW, were made in lap joint configuration. Thereinafter, was conducted a study to characterize the microstructure of the produced welds using optical and electron microscopy, as well as to observe their behavior in the cold rolling process. The full results are presented extensively in the experimental part of this paper.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1°	
Συγκολλήσεις Στερεάς Κατάστασης (Solid State Welding)	7
1.1	Εισαγωγή
1.2	Συγκόλληση δια τριβής (Friction Welding).....
1.3	Γενικά περί της μεθόδου συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης
1.4	Αρχή της μεθόδου συγκόλλησης FSW.....
1.5	Δημιουργία ζωνών συγκόλλησης
1.6	Παράμετροι της μεθόδου
1.7	Συγκολλήσιμες γεωμετρίες.....
1.8	Ροή υλικού
1.9	Ατέλειες δομής και αστοχίες κατά τη συγκόλληση ανόμοιων μεταλλικών ελασμάτων με χρήση FSW
1.10	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....
Κεφάλαιο 2°	
Το αλουμίνιο και ο Χαλκός	28
2.1	Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου
2.1.1	Γενικά.....
2.1.2	Ονοματολογία.....
2.1.3	Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία
2.1.4	Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία
2.1.5	Κράμα αλουμινίου AA5083.....
2.2	Χαλκός και κράματα χαλκού.....
2.2.1	Γενικά.....
2.2.2	Κύριες κατηγορίες κραμάτων χαλκού - Ονοματολογία
Κεφάλαιο 3°	
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	39
3.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθόδου FSW σε κράματα αλουμινίου και χαλκού
3.2	Ο σχηματισμός διμεταλλικών ενώσεων και ατελειών στις συγκολλήσεις αλουμινίου – χαλκού με τη μέθοδο FSW.....

Κεφάλαιο 4°	
Μηχανικές Κατεργασίες Διαμόρφωσης των Μετάλλων	48
4.1	Εισαγωγή48
4.2	Βασικά χαρακτηριστικά των μηχανικών κατεργασιών διαμόρφωσης49
4.3	Περιγραφή της ψυχρής έλασης50
Κεφάλαιο 5°	
Περιγραφή της Πειραματικής Διαδικασίας και του Εξοπλισμού.....	52
5.1	Εισαγωγή52
5.2	Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....53
5.3	Μηχανή συγκόλλησης54
5.4	Χρησιμοποιηθέντα ελάσματα56
5.5	Κατεργασία των δοκιμίων56
5.5.1	Κοπή δοκιμίων56
5.5.2	Εγκιβωτισμός57
5.5.3	Λείανση, στίλβωση & καθαρισμός58
5.6	Μικροσκοπία59
5.7	Μικροσκληρομετρήσεις60
5.8	Η εργαλειομηχανή της έλασης.....61
Κεφάλαιο 6°	
Αποτελέσματα & Αξιολόγηση.....	64
6.1	Μεταλλογραφική παρατήρηση.....64
6.1.1	Μελέτη συγκολλήσεων με οπτικό μικροσκόπιο64
6.1.2	Μελέτη συγκολλήσεων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....71
6.2	Κατανομή μικροσκληρότητας79
6.3	Δοκιμές ψυχρής έλασης81
6.3.1	Αποτελέσματα μετρήσεων.....81
6.3.2	Μακροσκοπική παρατήρηση86
6.3.3	Μικροσκοπική παρατήρηση91
Κεφάλαιο 7°	
Σύνοψη Συμπερασμάτων & Προτάσεις για Έρευνα.....	94
Βιβλιογραφία.....	96

Copyright © Γεώργιος Κολέτσης, 2020

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. *All rights reserved.*

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται στο παρόν εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κεφάλαιο 1^ο

Συγκολλήσεις Στερεάς Κατάστασης (Solid State Welding)

1.1 Εισαγωγή [1,2,3,4]

Για την κατασκευή ενός σύνθετου μεταλλικού αντικειμένου, είναι απαραίτητη η σύνδεση διάφορων τεμαχίων. Η σύνδεση αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε μηχανικά (μέσω κοχλιώσεων, ιλώσεων), είτε με κάποια κολλητική ουσία, είτε μεταλλουργικά. Ο μεταλλουργικός τρόπος σύνδεσης των διάφορων μεταλλικών τεμαχίων με στόχο τη κατασκευή ενός νέου αντικειμένου καλείται συγκόλληση. Τα διάφορα μεταλλικά τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν, μπορεί να είναι από το ίδιο ή από διαφορετικό υλικό, με την τελευταία επιλογή να παρουσιάζει αυξανόμενη τάση σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Κλάδοι όπως ο ενεργειακός, ο πετροχημικός, η αεροδιαστημική, η ναυπηγική, η ηλεκτρονική, απαιτούν τη χρήση τέτοιων ανόμοιων συγκολλημένων μεταλλικών υλικών για εξειδικευμένες χρήσεις.

Ωστόσο, η συγκόλληση ανόμοιων μεταλλικών τεμαχίων είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί πάντοτε με επιτυχία από τις συμβατικές μεθόδους, όπως οι συγκολλήσεις τήξης (Fusion Weldings) για δύο λόγους: (α) οι διαφορετικές μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες των προς συγκόλληση υλικών, δημιουργούν ασθενείς συνδέσεις μεταξύ τους και (β) σχηματίζονται ψαθυρές διμεταλλικές/ενδομεταλλικές ενώσεις (Intermetallic Compounds ή IMCs) στη δομή της συγκόλλησης. Ο κύριος τρόπος μεταλλουργικής σύνδεσης τέτοιων υλικών είναι οι συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης όπου δεν λαμβάνει χώρα η τήξη των μετάλλων, αλλά η πλαστική παραμόρφωση με άσκηση πίεσης σε θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου τήξης των προς συγκόλληση υλικών. Μερικοί χαρακτηριστικοί τρόποι τέτοιων συνδέσεων είναι η συγκόλληση με τριβή, η συγκόλληση με υπερήχους, η συγκόλληση με έλαση, η εκρηκτική συγκόλληση, καθώς και η συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης είναι η απουσία τήξης, με αποτέλεσμα, το μικρό θερμοκρασιακό εύρος που αναπτύσσεται να διαταράσσει ελάχιστα τη μικροδομή των υλικών. Επομένως, δεν υπάρχει ζώνη τήξης και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι αρκετά μικρή. Ωστόσο, τα εργαλεία και γενικά ο

εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την επίτευξη τέτοιου είδους συγκολλήσεων είναι εξιδεικευμένα, γεγονός που τις καθιστούν πρακτικά αδύνατες για ευρεία βιομηχανική χρήση. Επίσης, η επιθεώρηση της ποιότητας των συνδέσεων είναι δύσκολη, ενώ η επιδιόρθωση των ελαττωμάτων είναι πολλές φορές αδύνατη.

Στη παρούσα διατριβή, θα γίνει εκτενής αναφορά στη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding / FSW) και ιδιαίτερα στη σύνδεση ανόμοιων μετάλλων αλουμινίου και χαλκού. Πιο συγκεκριμένα, θα επιχειρηθεί η συγκόλληση ελασμάτων από κράμα αλουμινίου AA5083 και χαλκού καθαρότητας 99,99%. Στη συνέχεια, τα δοκίμια θα υποβληθούν σε μηχανική κατεργασία ψυχρής έλασης.

1.2 Συγκόλληση δια τριβής (Friction Welding) ^[4]

Κατά τη συγκόλληση μέσω τριβής, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της τριβής, μαλακοποιεί τις προς συγκόλληση επιφάνειες και στη συνέχεια η άσκηση δύναμης ολοκληρώνει τη συγκόλληση. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη ραφή δεν ξεπερνούν το σημείο τήξης των υλικών, άρα πρόκειται για μια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης. Τα είδη συγκολλήσεων δια τριβής είναι τα παρακάτω:

- > Συγκόλληση 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).
- > Συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding).
- > Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction/Vibration Welding).
- > Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά (Orbital Friction Welding).
- > Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή (Radial Friction Welding).

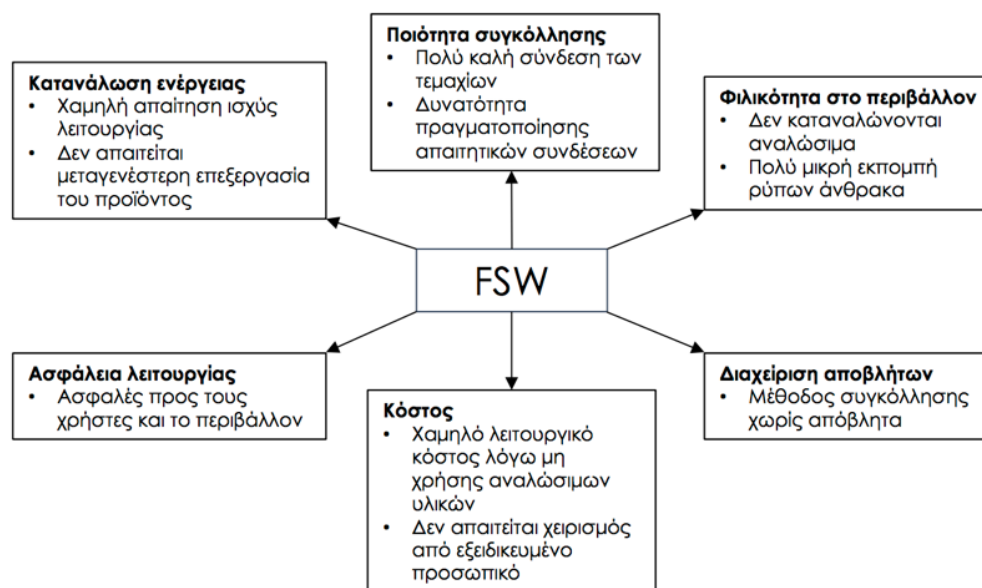
1.3 Γενικά περί της μεθόδου συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης ^[4,5]

Η συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης (FSW) είναι μια καινοτόμος τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, η οποία ανακαλύφθηκε και κατοχυρώθηκε από

τον W. M. Thomas και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute – TWI). Η τεχνική αρχικά αναπτύχθηκε για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής (2xxx, 7xxx), όμως στη συνέχεια επεκτάθηκε και στη συγκόλληση κραμάτων μαγνησίου, χαλκού καθώς και σιδηρούχων ή μη κραμάτων.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που παράγεται από την τριβή μεταξύ του περιστρεφόμενου εργαλείου και των καλά συγκρατημένων τεμαχίων προς συγκόλληση και σε συνδυασμό με τη μηχανική ανάδευση, επιτυγχάνεται τοπική μαλακοποίηση των τεμαχίων, με αποτέλεσμα την πλαστική σύνδεση-συγκόλληση. Καθώς η κόλληση που προκύπτει δεν είναι προϊόν τήξης των προς συγκόλληση τεμαχίων, δεν παρουσιάζονται οι συνήθεις αστοχίες που σχετίζονται με τη στερεοποίηση των μετάλλων, όπως συχνά συμβαίνει με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

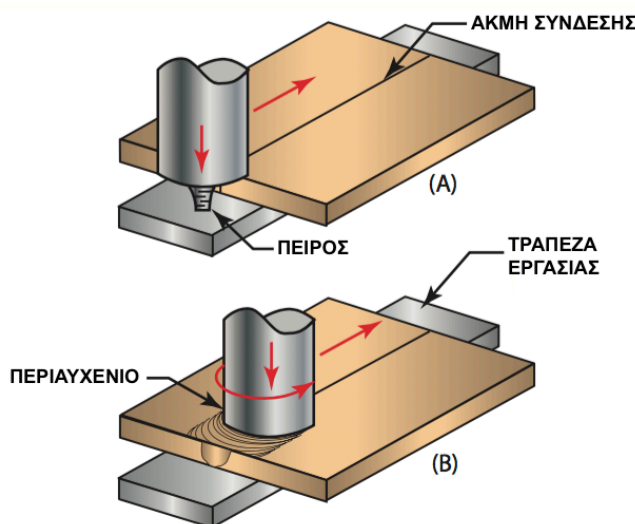
Η τεχνική FSW έχει πλέον καθιερωθεί ως μια αξιολογη και αποτελεσματική διαδικασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης. Η χρήση της δεν απαιτεί επιπλέον αναλώσιμα υλικά (προστατευτικά αέρια ή μέταλλο προς τήξη), δεν παράγονται επιβλαβείς ουσίες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον (ρύποι, ακτινοβολίες) και ως εκ τούτου θεωρείται μια πολύ φιλική τεχνική συγκόλλησης. Επιπλέον, σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης, η FSW καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια και μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές γεωμετρίες συγκολλήσεων, είτε επίπεδες, είτε γωνιακές.



Εικόνα 1.1: Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της μεθόδου FSW έναντι των παραδοσιακών μεθόδων συγκόλλησης

1.4 Αρχή της μεθόδου συγκόλλησης FSW [4,6,7]

Κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης, ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο, με ειδικά σχεδιασμένο πείρο και κατάλληλο περιαιχένιο, βυθίζεται στις επαπτόμενες ακμές των καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων έπειτα από την κατάλληλη κάθετη αξονική δύναμη και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής σύνδεσης. Η πάκτωση των τεμαχίων πάνω στην τράπεζα εργασίας είναι τέτοια ώστε να αποτρέπεται η αμοιβαία απώθησή τους από τις δυνάμεις που παράγονται κατά τη συγκόλληση. Επιπλέον, το μήκος του πείρου πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων, καθώς επίσης και το περιαιχένιο πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή επαφή με την επιφάνειά τους έτσι ώστε λόγω της τριβής να αναπτύσσεται επαρκής θερμότητα και τελικά η επιθυμητή πλαστικοποίηση.



Εικόνα 1.2: Σκαρίφημα της μεθόδου FSW

Το περιστρεφόμενο εργαλείο της διάταξης συντελεί δύο βασικές λειτουργίες: (α) τη θέρμανση των προς συγκόλληση τεμαχίων και (β) την ανάδευση του πλαστικοποιημένου υλικού που θα οδηγήσει στη τελική μεταλλουργική ένωση, δηλαδή τη συγκόλληση. Η θερμότητα που παράγεται από το περιστρεφόμενο εργαλείο, μαλακώνει το υλικό γύρω από την περιοχή του πείρου και σε συνδυασμό με την περιστροφή του, το πλαστικοποιημένο υλικό προωθείται από την περιοχή μπροστά από τον πείρο στη περιοχή πίσω από αυτόν. Επισημαίνεται πως η συνολική θερμότητα που παράγεται, δεν ξεπερνά το σημείο τήξης των τεμαχίων συγκόλλησης. Με αυτό τον

τρόπο δημιουργούνται δύο διαφορετικές πλευρές στο συγκολλημένο υλικό: η προωθούμενη (Advancing Side) και η υποχωρούσα (Retreating Side) πλευρά. Η προωθούμενη πλευρά είναι εκείνη στην οποία η φορά της ταχύτητας συγκόλλησης ή πρόωσης είναι ομόρροπη με την ταχύτητα περιστροφής, ενώ η υποχωρούσα πλευρά είναι εκείνη στην οποία η φορά της ταχύτητας πρόωσης είναι αντίρροπη της ταχύτητας περιστροφής. Στη συνέχεια, το εργαλείο αρχίζει να κινείται κατά μήκος της ακμής σύνδεσης, πραγματοποιώντας την τελική συγκόλληση (Εικόνα 1.2).

Η συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η ταχύτητα συγκόλλησης, η ταχύτητα περιστροφής, η κάθετη αξονική δύναμη, το εργαλείο συγκόλλησης και η κλίση του, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες. Η συνέργεια αυτών των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα το πλαστικοποιημένο υλικό να ακολουθεί μια συγκεκριμένη ροή και τη δημιουργία διαφόρων ζωνών μετά το πέρας της απόψυξης.

1.5 Δημιουργία ζωνών συγκόλλησης [7,8,9]

Η συμβολή της εκτεταμένης πλαστικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με την θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της τριβής στη ραφή της συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα την ανακρυστάλλωση των κόκκων με την ανάπτυξη νέας δομής εντός της ζώνης ανάδευσης, καθώς επίσης και την επαναδημιουργία λεπτομερών κατακρημνισμάτων εντός και περιφερειακά της ζώνης ανάδευσης. Ανάλογα με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά και την έκταση αυτών στη περιοχή κοντά στη συγκόλληση, διακρίνονται οι ακόλουθες ζώνες που έχουν διαφορετική σύσταση από το μέταλλο βάσης. Οι ζώνες αυτές είναι:

> Ζώνη ανάδευσης ή πυρήνας συγκόλλησης (ZA) – Stir/Nugget Zone (SZ)

Η περιοχή της ζώνης ανάδευσης εντοπίζεται στη θέση όπου εφαρμόζεται ο πείρος συγκόλλησης. Στην περιοχή αυτή, η πλαστική παραμόρφωση σε συνδυασμό με τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω της τριβής, έχει σαν αποτέλεσμα τη δυναμική ανακρυστάλλωση των κόκκων και τη δημιουργία μιας λεπτόκοκκης μικροδομής στο εσωτερικό της ζώνης. Η ζώνη αυτή συχνά αναφέρεται και ως «πυρήνας συγκόλλησης» ή «δυναμικά ανακρυσταλλωμένη ζώνη». Το μέγιστο πλάτος της ζώνης στην άνω επιφάνεια της συγκόλλησης είναι ίσο με τη διάμετρο του περιαιχενίου και το μέγιστο ύψος της περίπου ίσο με το μήκος του πείρου. Η ζώνη αυτή είναι ευδιάκριτη στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης, σε αντίθεση με την υποχωρούσα πλευρά.

Επιπροσθέτως, χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της περιοχής είναι η εμφάνιση μιας «δακτυλιοειδούς δομής» (onion ring structure) αποτελούμενης από παραμορφωμένους ομόκεντρους κύκλους, χωρίς ωστόσο να συμβαίνει σε κάθε συγκόλληση. Παράμετροι όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η χημική σύσταση των προς συγκόλληση τεμαχίων, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται, η πίεση που ασκεί το εργαλείο κατά τη διείδυση, η ροή του υλικού καθώς και ο ρυθμός ψύξης του τελικού τεμαχίου, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική μικροδομή μετά τη συγκόλληση.

> **Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ) – Thermo-Mechanical Affected Zone (TMAZ)**

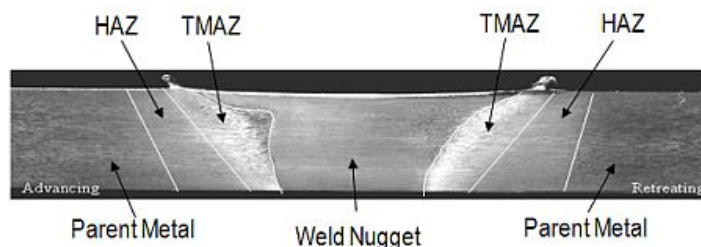
Εκατέρωθεν της ζώνης ανάδευσης, δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη που ονομάζεται θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Είναι αποτέλεσμα τόσο των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στη ζώνη ανάδευσης όσο και της παραμόρφωσης στην οποία υφίσταται το υλικό. Οι σχετικά μικρού μεγέθους κόκκοι του μετάλλου επιμηκύνονται ακολουθώντας μια ροή ανοδικής φοράς η οποία περιβάλλει τη ζώνη συγκόλλησης. Αν και πάντοτε σε αυτή την περιοχή παρατηρείται παραμόρφωση, δεν συμβαίνει πάντοτε ανακρυστάλλωση των κόκκων λόγω της ελλιπούς τάσης παραμόρφωσης. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή, προκαλεί τη διάλυση ενός ποσοστού κατακρυσμωμάτων, το οποίο είναι ανάλογο του θερμικού κύκλου στον οποίο υποβάλλεται η ζώνη.

> **Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) – Heat Affected Zone (HAZ)**

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη βρίσκεται αμέσως μετά από την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Εμφανίζεται σε όλες τις συγκολλήσεις, με τη διαφορά ότι κατά την μέθοδο FSW έχει αρκετά καλύτερες ιδιότητες λόγω των χαμηλών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Στην περιοχή αυτή λαμβάνουν χώρα θερμικοί κύκλοι οι οποίοι συνήθως δεν οδηγούν σε ανακρυστάλλωση κόκκων και σε παραμόρφωση του υλικού. Ωστόσο, είναι πιθανό να συμβεί στατική ανακρυστάλλωση ή μεγέθυνση των κόκκων λόγω διάχυσης. Για τα κράματα αλουμινίου, η θερμοκρασία αυτής της περιοχής ξεπερνά τους 250 °C. Επιπλέον, η μικροδομή της περιοχής αυτής δεν διαφέρει από το υπόλοιπο βασικό μέταλλο, με τη μόνη διαφορά ότι επηρεάζεται η δομή και ο βαθμός αναδιάταξης των κατακρυσμωμάτων, λόγω των θερμοκρασιών που έχουν αναπτυχθεί.

> Βασικό/Μητρικό Μέταλλο (BM) – Base/Parent Metal (PM)

Η περιοχή αυτή αποτελείται από το υλικό που βρίσκεται μακριά από τη συγκόλληση και παραμένει ανεπηρέαστο, τόσο μικροσκοπικά όσο και μηχανικά.



Εικόνα 1.3: Τομή δοκιμίου με διακριτές τις ζώνες συγκόλλησης

1.6 Παράμετροι της μεθόδου

Οι ιδιότητες του περιστροφικού εργαλείου της μεθόδου σε συνδυασμό με τις εκάστοτε συνθήκες που πραγματοποιείται η συγκόλληση, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της συγκόλλησης.

Το περιστροφικό εργαλείο είναι «η καρδιά» όλης της διαδικασίας. Η κύρια λειτουργία του είναι η παροχή θερμότητας μέσω της παραγόμενης τριβής, για τη μαλακοποίηση των προς συγκόλληση μετάλλων. Επίσης, παρέχει την απαιτούμενη κατακόρυφη και περιμετρική ανάδευση των υλικών, με αποτέλεσμα την μεταλλουργική τους σύνδεση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη της συγκόλλησης:

> Το υλικό του περιστροφικού εργαλείου [10]

Το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί το περιστροφικό εργαλείο, παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάρκεια ζωής του, καθώς επίσης και στην επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου. Προκειμένου λοιπόν να παραχθεί μια ποιοτική συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης, θα πρέπει το υλικό κατασκευής να πληροί τα παρακάτω κριτήρια:

- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες σε ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Ομοιομορφία στη μικροδομή
- Αντίσταση στη φθορά
- Αντοχή στη θράση
- Μηχανική κατεργασιμότητα

Στον ακόλουθο Πίνακα 1.1, παρουσιάζονται τα διαφορετικά περιστροφικά εργαλεία FSW, ανάλογα με τα υλικά των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Υλικό τεμαχίου προς συγκόλληση	Πάχος (mm)	Υλικό κατασκευής εργαλείου FSW
Αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου	<12 <26	Χάλυβας, WC-Co ¹ MP159 ²
Κράματα μαγνησίου	<6	Χάλυβας, WC, κράμα νικελίου
Χαλκός ή Κράματα χαλκού	<50 <11	PCBN ³ , κράματα καρβιδίων Χάλυβας
Κράματα τιτανίου	<6	Κράματα καρβιδίων
Ανοξειδωτος χάλυβας	<6	PCBN, κράματα καρβιδίων
Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες	<10	WC, PCBN
Κράματα νικελίου	<6	PCBN

Πίνακας 1.1: Χρησιμοποιούμενα περιστροφικά εργαλεία ανάλογα με τα προς συγκόλληση τεμάχια

Όσον αφορά τις συγκολλήσεις αλουμινίου με χαλκό με τη μελετούμενη μέθοδο, πλήθος ερευνητών έχει καταλήξει στο συμπέρασμα πως οι χάλυβες HSS (ισχυρά κραματωμένοι) με σκληρότητα μεταξύ 45 και 62 στην κλίμακα HRC, είναι η ιδανικότερη επιλογή. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί πως η τριβή που αναπτύσσεται λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου μέσα στο στερεό μείγμα μετάλλων, διαβρώνει και τελικά φθείρει σε μεγάλο βαθμό το εργαλείο.

> **Ο σχεδιασμός και η γεωμετρία του περιστροφικού εργαλείου ^[6]**

Κρίσιμο παράγοντα που διαδραματίζει καίριο ρόλο κατά την εξελικτική πορεία της μεθόδου FWS, καθώς και στην ποιότητα της παραγόμενης συγκόλλησης είναι η γεωμετρία του εργαλείου. Ο σχεδιασμός του φέρει καθοριστικό ρόλο ως προς τη ροή του υλικού και διέπει το ρυθμό διεξαγωγής της συγκόλλησης, άρα και της συνολικής παραγωγικότητας της διαδικασίας.

Ανάλογα με τη γεωμετρία του πείρου και του περιαιχηνίου, αναπτύσσονται διακυμαινόμενα πεδία προσδιδόμενης θερμότητας, με άμεσο αποτέλεσμα η γεωμετρία και τα διαστατικά πρότυπα αυτών να αποτελούν καθοριστικό σχεδιαστικό παράγοντα. Η διάμετρος του περιαιχηνίου, θέτει το χωρικό περιορισμό ως προς τον όγκο του υλικού που θερμαίνεται και εμποδίζει το πλαστικοποιημένο υλικό να διαφύγει από το τεμάχιο εργασίας. Επιπλέον, ο λόγος των διαμέτρων περιαιχηνίου/πείρου θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη θερμότητα πλαστικοποίησης του όγκου

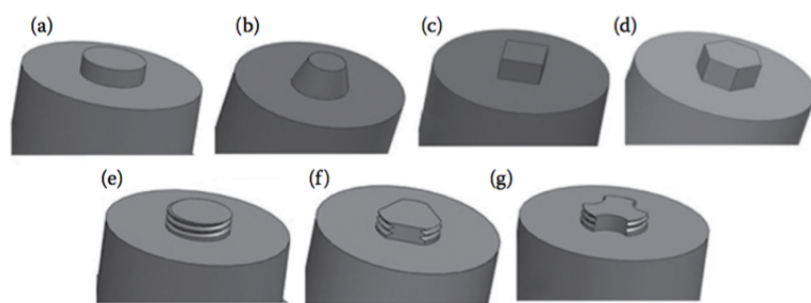
¹ Καρβίδιο βολφραμίου - κοβαλτίου

² Κράμα νικελίου - κοβαλτίου

³ Πολυκρυσταλλικό κυβικό νιτρίδιο του βορίου

του υλικού που τίθεται προς ανάδευση από τον πείρο. Σε αντίθετη περίπτωση, αναμένεται η εμφάνιση ατελειών στη συγκόλληση, καθώς οι μεγάλοι λόγοι διαμέτρων περιαιχηνίου/πείρου, υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των θερμικά επηρεασμένων περιοχών των συγκολλήσεων.

Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται επίπεδα περιαιχηνία με διάφορα είδη πείρων. Αυτοί μπορεί να είναι: κυλινδρικοί, κυλινδρικοί με σπείρωμα, τετραγωνικοί, τριγωνικοί, κ.α. (Εικόνα 1.4). Το μήκος του πείρου είναι ανάλογο του πάχους των προς συγκόλληση τεμαχίων. Συνήθως, το μήκος αυτό μπορεί να είναι 0,2 mm μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων.



Εικόνα 1.4: Κατανομή εργαλείων συγκόλλησης FSW με διάφορα είδη πείρων

Όσον αφορά τις συνθήκες-παραμέτρους που επηρεάζουν τη συγκόλληση με την εφαρμογή της μεθόδου FSW, αναλύονται παρακάτω και αφορούν τόσο τη συγκόλληση όμοιων τεμαχίων, όσο και τεμαχίων από διαφορετικά μέταλλα.

> **Η ταχύτητα πρόωσης (Welding Speed / Travel Speed) [10]**

Η ταχύτητα πρόωσης ή συγκόλλησης, είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το περιστροφικό εργαλείο κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης ή αντίστοιχα η τράπεζα εργασίας προς το περιστροφικό εργαλείο. Αυτή η διαμήκης κίνηση προωθεί το πλαστικοποιημένο υλικό μπροστά και γύρο από τον πείρο. Η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στη μικροδομή και στην ποιότητα της παραγόμενης συγκόλλησης είναι μεγάλη και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την επιλογή της κατάλληλης τιμής. Η εφαρμογή διαφορετικών ταχυτήτων πρόωσης, στην ίδια γραμμή συγκόλλησης, θα είχε σαν αποτέλεσμα μιας αμφιβόλου ποιότητας μεταλλουργική ένωση, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων που πιθανώς αναπτύσσονταν στη περιοχή. Η σωστή επιλογή ταχύτητας, πρέπει να λάβει υπόψη διαφορετικούς παράγοντες όπως:

(a) τα προς συγκόλληση υλικά.

- (β) τον επιθυμητό τύπο αρμού (τη γεωμετρία της συγκόλλησης).
- (γ) την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου.
- (δ) το βάθος διείσδυσης του περιστροφικού εργαλείου.

Επιπλέον, όσον αφορά τις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων με τη μέθοδο FSW, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάπτυξη των διαφορετικών τάσεων ροής του υλικού, καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εμφάνιση αστοχιών στη συγκόλληση. Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως ο καθορισμός της βέλτιστης ταχύτητας πρόωσης, αποτελεί βασική προτεραιότητα για την αποτροπή τυχόν ελαττωμάτων στη συγκόλληση.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την εφαρμογή της FSW, εξαρτάται από την ταχύτητα πρόωσης και την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, όπου εν συνεχεία αυτές επηρεάζουν τον σχηματισμό ή όχι διμεταλλικών ενώσεων (IMCs) καθώς και τις τελικές ιδιότητες του παραγόμενου κράματος. Συνεπώς, ο συνδυασμός των βέλτιστων τιμών των αναφερθέντων ταχυτήτων είναι σκόπιμος, έτσι ώστε να είναι ελεγχόμενη η εισροή της παραγόμενης θερμότητας και κατ' επέκταση ο σχηματισμός των IMCs.

Πειραματικές εφαρμογές της μεθόδου σε κράματα Al-Cu έχουν δείξει ότι μειώνοντας την ταχύτητα πρόωσης και διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, αυξάνεται η εισροή θερμότητας στη ζώνη συγκόλλησης με αποτέλεσμα να παράγονται μεγάλες ποσότητες IMCs. Αυτό συμβαίνει καθώς στη ροή του πλαστικοποιημένου υλικού, που αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από Al, υπάρχουν διάσπαρτα σωματίδια Cu. Οι διμεταλλικές ενώσεις που σχηματίζονται στις διεπιφάνειες των Al-Cu είναι αρκετά σκληρές και επιρρεπείς στο σχηματισμό ρωγμών, με αποτέλεσμα να μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.

> **Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (Rotational Speed) [10]**

Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου της μεθόδου FSW, ονομάζεται ταχύτητα περιστροφής και είναι άλλη μια παράμετρος που επηρεάζει καταλυτικά την ποιότητα της συγκόλλησης που δημιουργείται. Αυτή η περιστροφή είναι η αιτία ανάμιξης των συγκολλούμενων υλικών γύρω από τον πείρο. Η συνεισφορά της περιστροφικής κίνησης του εργαλείου, στη συνολική διεργασία της συγκόλλησης, υπολογίζεται στο 40% κατά τη συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων Al-Cu. Η ταχύτητα περιστροφής κατά την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να επηρεάσει:

- (α) το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης λόγω της παραγόμενης θερμοκρασίας τριβής.

(β) τη ροή του υλικού, το μέγεθος της ζώνης ανάδευσης, την εμφάνιση ελαττωμάτων, το σχηματισμό IMCs, τη φθορά του περιστροφικού εργαλείου.

Όπως και στην ταχύτητα πρόωσης που αναφέρθηκε προηγουμένως, έτσι και στην ταχύτητα περιστροφής, είναι απαραίτητος ο βέλτιστος προσδιορισμός της τιμής της, καθώς τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, οδηγούν σε συγκολλήσεις με φτωχές μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες.

Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μικρών θερμικών φορτίων λόγω τριβής, δημιουργώντας ανεπαρκείς θερμοκρασιακές συνθήκες για την ιδανική μαλακοποίηση/πλαστικοποίηση του υλικού στη ζώνη ανάδευσης. Ως εκ τούτου, σε αυτές τις συνθήκες συγκόλλησης είναι σύνηθες φαινόμενο η εμφάνιση ελαττωμάτων όπως μικρορωγμές. Αντίθετα, σε περιπτώσεις που η ταχύτητα περιστροφής είναι υψηλή, η μεγάλη θερμοκρασία λόγω τριβής που αναπτύσσεται στη ζώνη ανάδευσης, ευνοεί την πλαστικοποίηση άφθονου υλικού. Ωστόσο, οι συνθήκες που δημιουργεί η υπερβολική ανάδευση του εργαλείου, προκαλούν εκτός από την τάχιστη φθορά του, και την αποσύνδεση μεγάλου αριθμού σωματιδίων Cu από το αντίστοιχο έλασμα, οδηγώντας σε ανομοιόμορφη κατανομή τους στη ζώνη ανάδευσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός τον υπερβολικό σχηματισμό ψαθυρών διμεταλλικών ενώσεων στην διεπιφάνεια της συγκόλλησης και αφετέρου τη δημιουργία ατελειών στη μικροδομή της συγκόλλησης, καθιστώντας τη ποιοτικά μη αποδεκτή αλλά και μηχανικά ευάλωτη.

> **Ο λόγος ταχυτήτων συγκόλλησης**

Ο λόγος των ταχυτήτων πρόωσης (V) και περιστροφής (ω) αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο της μεθόδου. Ο Seidel και οι συνεργάτες του αναφέρουν ότι ο λόγος V/ω , ο οποίος ορίζεται ως "weld pitch", σχετίζεται με την ειδική ενέργεια συγκόλλησης. Τα δύο αυτά μεγέθη, είναι αντιστρόφως ανάλογα καθώς όταν το ένα αυξάνεται, το δεύτερο μειώνεται. Έτσι, καθίσταται δυνατή η διάκριση των συγκολλήσεων με βάση το weld pitch σε θερμές (χαμηλό weld pitch) και σε ψυχρές (υψηλό weld pitch). Δηλαδή σε μια συγκόλληση FSW με τη μείωση του weld pitch, ουσιαστικά αυξάνεται η θερμική παροχή.

Το weld pitch επηρεάζει τόσο τα μικροδομικά χαρακτηριστικά όσο και τις συνολικές ιδιότητες της συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, καθώς επιδρά επί της ροής υλικού, της παρουσίας ατελειών αλλά και επί των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης. Ο Abbasi Gharacheh και οι συνεργάτες του μελέτησαν τον αντίστροφο λόγο του weld pitch, δηλαδή το ω/V , ο οποίος εκφράζει τις περιστροφές του εργαλείου

ανά mm πρόωσης. Κατά συνέπεια, αύξηση του λόγου ω/V εκφράζει την αύξηση της θερμικής παροχής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μικρή μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης με ταυτόχρονη υποβάθμιση της σκληρότητας στις αντίστοιχες περιοχές. Επιπλέον, η αύξηση του λόγου αυτού σχετίζεται με το σχηματισμό ενός μεγαλύτερου πυρήνα συγκόλλησης, καθώς το θερμικό φορτίο είναι μεγαλύτερο και το υλικό ρέει ευκολότερα. Τέλος, η αύξηση του λόγου ω/V έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες πιθανότητες σχηματισμού ατελούς διείσδυσης.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι παρά την ιδιαίτερη σημασία του weld pitch ως κυρίαρχη παραμέτρου μελέτης επί της συνολικής συγκόλλησης FSW, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψη και οι μεμονωμένες τιμές των ταχυτήτων κατά την επιλογή των συνθηκών συγκόλλησης, καθώς συγκολλήσεις με το ίδιο weld pitch μπορεί να χαρακτηρίζονται από διαφορετική παροχή ενέργειας.

> **Η θέση των προς συγκόλληση τεμαχίων ^[1,10]**

Όταν η μέθοδος FSW εφαρμόζεται σε τεμάχια από όμοιο υλικό, δεν έχει σημασία η θέση με την οποία θα τοποθετηθούν ώστε να συγκολληθούν, σε αντίθεση με όταν πρόκειται να συγκολληθούν ανόμοια μέταλλα. Η ροή του υλικού στη περιοχή της συγκόλλησης, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την προωθούμενη και την υποχωρούσα πλευρά. Για παράδειγμα, όταν πρόκειται να συγκολληθούν μετωπικά (butt joint) αλουμίνιο και χαλκός, τότε σύμφωνα με το κινηματικό μοντέλο του Nune, πρέπει να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε το αλουμίνιο να αντιστοιχεί στην υποχωρούσα πλευρά και ο χαλκός στην προωθούμενη. Ένας γενικός κανόνας που εφαρμόζεται για τη μετωπική συγκόλληση διαφορετικών κραμάτων είναι το πιο μαλακό υλικό να τοποθετείται στην υποχωρούσα πλευρά και το σκληρότερο στην προωθούμενη πλευρά. Έτσι, με την περιστροφή του εργαλείου επιτυγχάνεται ομαλή και ομοιόμορφη πλαστικοποίηση στη ζώνη ανάδευσης.

Διαφορετικά, όταν πρόκειται να γίνει συγκόλληση με επικάλυψη (lap joint), σύμφωνα με τους Akbari et al., το αλουμίνιο τοποθετείται στη κορυφή και ο χαλκός στην κάτω πλευρά. Με αυτό τον τρόπο, οι συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχίας λόγω των λιγότερων ελαττωμάτων, καθώς το ποσό θερμότητας που αναπτύσσεται λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του αλουμινίου, οδηγεί σε ομαλή ροή του υλικού εντός της ζώνη ανάδευσης. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι το αποτέλεσμα μιας επιτυχούς συγκόλλησης, είναι συνδυασμός πολλών παραγόντων.

> **Η γωνία κλίσης του εργαλείου (Tool Tilt Angle) ^[1]**

Ως γωνία κλίσης του εργαλείου, ορίζεται η γωνία με την οποία είναι τοποθετημένο το εργαλείο της μεθόδου FSW, σε σχέση με την επιφάνεια των τεμαχίων προς συγκόλληση. Η σωστή επιλογή της γωνίας κλίσης, θα εξασφαλίσει την ομαλή κατακόρυφη και διαμήκη ροή του υλικού, λόγω της περιστροφής του εργαλείου. Επιπλέον, η κλίση που έχει το εργαλείο, βοηθά και στη συμπίεση του πλαστικοποιημένου υλικού.

Έπειτα από έρευνες της ομάδας του Mehta, για συγκόλληση κράματος αλουμινίου με χαλκό, προτείνεται γωνία κλίσης από 2° έως 4°. Όσο μεγαλύτερη γωνία κλίσης εφαρμοστεί εντός του προτεινόμενου εύρους, τόσο δίνεται η δυνατότητα διόρθωσης πιθανών ελαττωμάτων μέσω της κάθετης πίεσης που ασκεί το εργαλείο στην πλαστικοποιημένη περιοχή (ως ένα είδος σφυρηλάτησης). Ταυτόχρονα μειώνεται και η διαρροή υλικού περιφερειακά της συγκόλλησης με τη μορφή γρεζιού (flash). Επιπλέον, η μεγαλύτερη αξονική δύναμη που ασκείται στο τεμάχιο, βοηθά στη καλύτερη μεταλλουργική σύνδεση, καθώς η διασπορά των σωματιδίων χαλκού εντός του αλουμινίου γίνεται ομαλότερα. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται στη ζώνη ανάδευσης με τις μεγαλύτερες γωνίες κλίσης, προκαλεί αύξηση του ποσοστού και των διαφορετικών τύπων διμεταλλικών ενώσεων. Έτσι, η ραφή της συγκόλλησης αποκτά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με τη χρήση του συγκολλημένου τεμαχίου.

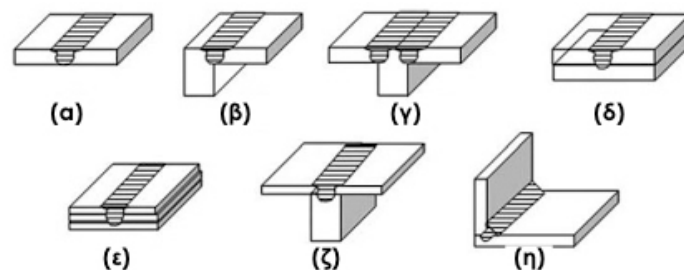
> **Η κάθετη δύναμη του εργαλείου (Downward Force / Plunge Force / Axial Force) ^[10]**

Ως κάθετη/αξονική δύναμη ή δύναμη βύθισης, καλείται η κατακόρυφη δύναμη που ασκεί το περιστροφικό εργαλείο στα προς συγκόλληση τεμάχια κατά την εφαρμογή της μεθόδου FSW. Η τιμή της είναι καθοριστική για την ποιότητα της συγκόλλησης που θα προκύψει. Επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους όπως η γεωμετρία του περιαιχενίου, η ταχύτητα πρόωσης και η γωνία κλίσης του εργαλείου. Η εφαρμογή μη κατάλληλης τιμής της κάθετης δύναμης, έχει σαν αποτέλεσμα είτε την ανομοιόμορφη ανάμιξη του πλαστικοποιημένου υλικού στη ζώνη ανάδευσης (μικρή δύναμη βύθισης), είτε τη δημιουργία μιας τραχιάς επιφάνειας στη διεπαφή εργαλείου-τεμαχίου, λόγω του σχηματισμού «γρεζιού» (flash) από την περιστροφική ανάδευση (μεγάλη δύναμη βύθισης).

Στις περιπτώσεις συγκόλλησης τεμαχίων αλουμινίου με χαλκό, σύμφωνα με τις υπάρχουσες πειραματικές μελέτες και τη βιβλιογραφία, απαιτείται μια αρκετά μεγάλη δύναμη βύθισης, της τάξης των 6kN, λόγω της μεγάλης σκληρότητας του χαλκού συγκριτικά με το αλουμίνιο.

1.7 Συγκολλησιμες γεωμετρίες [9]

Σε μια συγκολλητή κατασκευή, τα φορτία μεταφέρονται από το ένα μέλος στο άλλο διαμέσου των συγκολλήσεων που έχουν γίνει στις συνδέσεις των μελών. Στα παρακάτω σκαριφήματα (Εικόνα 1.5) παρουσιάζονται διάφορες γεωμετρίες συναρμογών που μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης. Σημειώνεται ότι δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία των επιφανειών πριν από τη συγκόλληση.



Εικόνα 1.5: (α) Μετωπική/Square butt joint, (β)&(η) Γωνιακή/Corner joint, (γ)&(ζ) Αυχενική ή τύπου Ταφ/ fillet weld or Tee joint, (δ) Με μονή επικάλυψη/Single lap joint, (ε) Με πολλαπλές επικαλύψεις/Multiple lap joint

1.8 Ροή υλικού [4,8,11]

Η συνολική μεταφορά του πλαστικοποιημένου υλικού περιγράφεται από τρεις τύπους ροής, ως αποτέλεσμα της κίνησης του περιστροφικού εργαλείου. Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.4, κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης FSW, παρατηρούνται δύο πλευρές εκατέρωθεν της ραφής: η προωθούμενη πλευρά (Advancing Side) και η υποχωρούσα πλευρά (Retreating Side).

Ο πρώτος τύπος ροής επηρεάζεται από τον πείρο του εργαλείου. Καθώς το εργαλείο της συγκόλλησης κινείται κατά μήκος της ραφής, το μπροστινό μέρος του πείρου αναγκάζει το πλαστικοποιημένο υλικό να κινηθεί, σε διεύθυνση κάθετη προς τη γραμμή συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό, είναι η αιτία δημιουργίας των δύο διαφορετικών πλευρών στο συγκολλημένο υλικό. Στην προωθούμενη πλευρά, το υλικό ακολουθεί την κίνηση του πείρου και καθώς στροβιλίζεται, ανέρχεται στην επιφάνεια.

Στην υποχωρούσα πλευρά, το υλικό παρασύρεται από την διαμήκη κίνηση του εργαλείου και κατ' αυτό τον τρόπο γεμίζουν τα κενά σημεία που δημιουργούνται εξαιτίας της περιστροφής του εργαλείου.

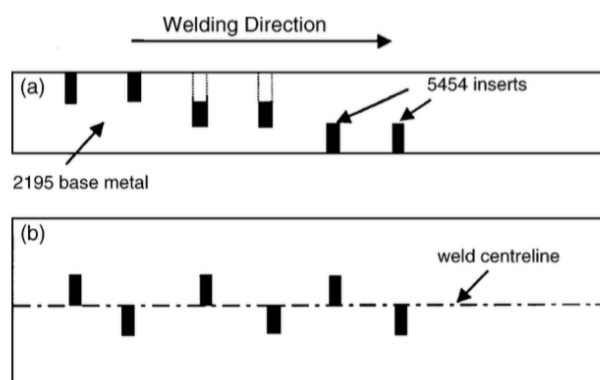
Ο δεύτερος τύπος ροής, αναφέρεται στη ροή που προκαλείται από το περιουχένιο του εργαλείου. Αφορά στην κίνηση του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης, κοντά στο εργαλείο, και είναι αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου αλλά και της περιστροφής του εργαλείου.

Ο τρίτος τύπος ροής αφορά στη σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου συγκόλλησης και του δοκιμίου.

Μια χαρακτηριστική δομή που εμφανίζεται στη ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης, εξαιτίας του στροβιλισμού του υλικού, είναι το λεγόμενο flow arm. Πρόκειται για μητρικό υλικό το οποίο μεταφέρεται από την υποχωρούσα πλευρά στη ζώνη ανάδευσης και εκχέεται προς την προωθούμενη πλευρά.

Η ροή του υλικού κατά την εφαρμογή της μεθόδου FSW είναι αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (γεωμετρία περιστροφικού εργαλείου, υλικά προς συγκόλληση, παράμετροι της διαδικασίας συγκόλλησης). Μέσα από την κατανόηση της κίνησης του πλαστικοποιημένου υλικού, θα προκύψει μια ποιοτικότερη και αποδοτικότερη κατεργασία, ως αποτέλεσμα επιλογής ιδανικότερων παραγόντων, όπως αυτοί προαναφέρθηκαν. Έτσι, αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη ροή του υλικού κατά την εφαρμογή της μεθόδου FSW, αναπτύσσοντας υπολογιστικές μεθόδους για τη μοντελοποίηση της όλης διαδικασίας.

Η έρευνα των Reynolds et al. αφορούσε τη μελέτη ροής του κράματος αλουμινίου 2195Al-T8, το οποίο είχε εμβολιαστεί με το κράμα αλουμινίου 5454Al-H32 και λειτουργούσε ως δείκτης σήμανσης εντός του βασικού μετάλλου (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση του πειράματος του Reynolds

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων κατέληξαν ότι όλες οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά ροής. Επιπλέον συμπεραίνεται ότι η ροή δεν αναδιαμορφώνεται σε συμμετρικά πεδία γύρω από την κεντρική ραφή συγκόλλησης. Το μεγαλύτερο μέρος του «υλικού-δείκτη» μετακινείται σε μια τελική θέση πιο πίσω από την αρχική του θέση και μόνο μια μικρή ποσότητα του υλικού της προωθούμενης πλευράς μεταφέρεται σε μια τελική θέση μπροστά από την αρχική του. Η προς τα πίσω κίνηση του υλικού περιορίζεται σε ένα μήκος όσο η διάμετρος του πείρου, πίσω από την αρχική του θέση. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μια πολύ καλά καθορισμένη διεπιφάνεια προσαρμογής μεταξύ της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς, γεγονός που αποδεικνύει ότι το υλικό δεν αναδύεται εγκαρσίως της διεπαφής κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Επιπρόσθετα, το υλικό ωθείται προς τα κάτω σχετικά με την προωθούμενη πλευρά, ενώ αντίθετα κινείται προς την κορυφή στην υποχωρούσα πλευρά κατά τη διάμετρο του πείρου. Το παραπάνω συμπέρασμα, σχετίζεται με τον δεύτερο τύπο ροής που αναφέρθηκε προηγουμένως, δηλαδή ότι η ανάδευση του υλικού πραγματοποιείται μόνο στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης λόγω της τριβής του περιαιχενίου στο υλικό. Διαπιστώνεται επίσης ότι η ποσότητα του υλικού που μετατοπίζεται κάθετα στην υποχωρούσα πλευρά, είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ρυθμό συγκόλλησης. Τέλος, η μεταφορά υλικού εγκαρσίως της κεντρικής γραμμής συγκόλλησης, γίνεται εντονότερη με την αύξηση της διαμέτρου του πείρου, όταν ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης παραμένουν σταθερές.

Η αντίστοιχη έρευνα του Arbegast, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προκύπτουσα μικροδομή και τα χαρακτηριστικά ροής του μετάλλου κατά την εφαρμογή της μεθόδου FSW, είναι όμοια με εκείνα της θερμής διέλασης και σφυρηλάτησης. Επομένως, η διαδικασία της συγκόλλησης με FSW μπορεί να μοντελοποιηθεί διακρίνοντας τις παρακάτω πέντε συμβατικές ζώνες:

- (α) Ζώνη προθέρμανσης (Preheat zone).
- (β) Ζώνη αρχικής παραμόρφωσης (Initial deformation zone).
- (γ) Ζώνη διέλασης (Extrusion zone).
- (δ) Ζώνη σφυρηλάτησης (Forging zone).
- (ε) Ζώνη μεταθέρμανσης / απόψυξης (Post heat / cold zone).

Στη ζώνη προθέρμανσης, η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της παραγόμενης τριβής μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου. Η θερμότητα που αναπτύσσεται, καθορίζεται από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού και την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου. Έπειτα,

καθώς το εργαλείο κινείται κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης, αρχίζει να σχηματίζεται μια αρχική ζώνη παραμόρφωσης. Το υλικό σε αυτή τη ζώνη ωθείται τόσο προς τα πάνω (δηλαδή προς την περιοχή του περιαιχενίου) όσο και προς τα κάτω (δηλαδή στη ζώνη εξώθησης). Μια μικρή ποσότητα του υλικού παραμένει στη ζώνη στροβιλισμού κάτω από τον πείρο.

Στη ζώνη διέλασης, το υλικό στροβιλίζεται γύρω από τον πείρο. Μια κρίσιμη καμπύλη ισόθερμης σε κάθε πλευρά του εργαλείου ορίζει το πλάτος της παρούσας ζώνης. Πέρα από τα όρια αυτής της ζώνης, τα μεγέθη των τιμών τάσης και θερμοκρασίας, δεν επιτρέπουν τη ροή του μετάλλου, οπότε ακολουθεί η ζώνη σφυρηλάτησης. Εκεί το υλικό που βρίσκεται στη μπροστινή μεριά του εργαλείου, συμπιέζεται στην κοιλότητα που προκύπτει από τη μετατόπιση του πείρου, υπό συνθήκες υδροστατικής πίεσης κατά την πρόωση του εργαλείου. Το περιαιχένιο του εργαλείου περιορίζει το υλικό σε αυτή τη κοιλότητα και εφαρμόζει μια κάθετη δύναμη σφυρηλάτησης. Έτσι, υλικό από τη ζώνη του περιαιχενίου μεταφέρεται από την υποχωρούσα προς την προωθούμενη πλευρά. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ζώνη θέρμανσης / ψύξης, όπου το υλικό ψύχεται υπό παθητικές ή εξαναγκαστικές συνθήκες ψύξης.

Συνοψίζοντας, η ροή του υλικού κατά την εφαρμογή της συγκόλλησης FSW, απαιτεί μια πολύπλοκη και παραμετρική διαδικασία προσέγγισης. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη ροή του υλικού. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν:

- > Τη γεωμετρία και την αναλογία διαστάσεων πείρου και περιαιχενίου.
- > Τις παραμέτρους συγκόλλησης (ταχύτητα περιστροφής, δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κατεύθυνση, ταχύτητα πρόωσης, βάθος διείσδυσης, γωνία συγκόλλησης).
- > Το είδος του υλικού.
- > Τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο προς συγκόλληση τεμάχιο.

1.9 Ατέλειες δομής και αστοχίες κατά τη συγκόλληση ανόμοιων μεταλλικών ελασμάτων με χρήση FSW [1,8,10]

Ως ατέλεια δομής ή αστοχία ή ελάττωμα καλείται οποιαδήποτε ανωμαλία στη μικροδομή ή τη γεωμετρία της συγκόλλησης η οποία είναι δυνατόν να επηρεάσει την εμφάνιση, τη μορφή ή τη λειτουργικότητά της. Επιπλέον, οι ατέλειες δύναται να επηρεάσουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες, την αντοχή στη διάβρωση και τη

συνολική κατεργασιμότητα του υλικού. Τα τέσσερα είδη ατελειών που εμφανίζονται συνήθως είναι: τα κενά, τα υπολείμματα υλικού (κατακερματισμός), οι ρωγμές και το επιφανειακό γρέζι. Η ανίχνευση των κενών είναι μια σχετικά απλή διαδικασία σε αντίθεση με τα άλλα δύο είδη ατελειών που μπορεί να εμφανιστούν.

Στη μέθοδο FSW, εμφανίζονται ατέλειες που διαφοροποιούνται τόσο μορφολογικά, όσο και ως προς το μηχανισμό δημιουργίας τους σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης τήξης. Τα ελαττώματα μπορεί να σχετίζονται με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση, τις ροοστατικές ζώνες ακολουθίας του υλικού, καθώς και τη γεωμετρία της συγκόλλησης. Οι δύο πρώτες παράμετροι εξαρτώνται από τις επιβαλλόμενες συνθήκες της συγκόλλησης (ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης, τύπος περιστροφικού εργαλείου, κ.α.), ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης σχετίζονται με την τοπολογία και τον τρόπο τοποθέτησης των προς συγκόλληση τεμαχίων σε σχέση με το εργαλείο της συγκόλλησης (κλίση εργαλείου, θέση των συγκολλούμενων τεμαχίων).

Όσον αφορά τη συγκόλληση ανόμοιων ελασμάτων Al-Cu με τη μέθοδο FSW, οι πιο συχνές ατέλειες που εμφανίζονται, κατηγοριοποιούνται παρακάτω:

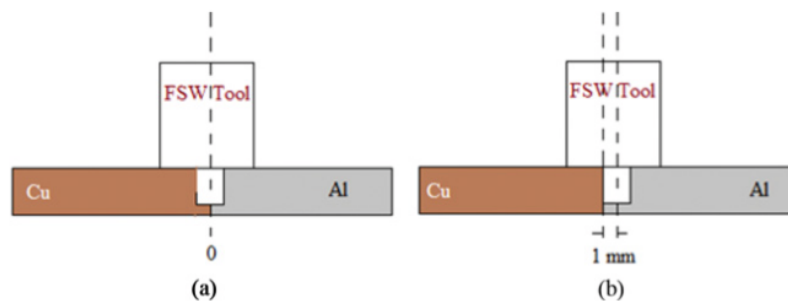
> **Κενά και ατέλειες τύπου τούνελ (Cavity/voids and tunnel)**

Τα κενά είναι περιοχές εντός της συγκόλλησης που δεν περιέχουν υλικό και εμφανίζονται συνήθως κατά μήκος της προωθούμενης πλευράς. Σχηματίζονται όταν η θερμότητα που αναπτύσσεται και η πίεση που ασκείται δεν επαρκούν για να αναδευτεί σωστά το πλαστικοποιημένο υλικό, αφήνοντας κενές κοιλότητες στο χώρο πίσω και κάτω από το περιστροφικό εργαλείο. Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτού του τύπου την αστοχία είναι είτε η πολύ υψηλή ταχύτητα πρόωσης, είτε η πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, είτε η μικρή κάθετη δύναμη που ασκεί το εργαλείο στα τεμάχια, ή και συνδυασμός αυτών.

Στις μετωπικές συγκολλήσεις ελασμάτων (Butt joint) Al-Cu, η επιλεγμένη θέση διείσδυσης του πείρο (Tool pin offset) αλλά και η θέση που θα τοποθετηθούν τα ελάσματα σε σχέση με το εργαλείο, είναι καθοριστικής σημασίας. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ο χαλκός πρέπει να τοποθετείται στην προωθούμενη πλευρά, το αλουμίνιο στην υποχωρούσα πλευρά ενώ το περιστροφικό εργαλείο δεν τοποθετείται ποτέ ακριβώς πάνω στην ένωση των τεμαχίων (Εικόνα 1.7). Λόγω του διαφορετικού σημείου τήξης και της διαφορετικής θερμικής αγωγιμότητας που έχουν το αλουμίνιο και ο χαλκός, είναι αδύνατον να γίνει ομοιόμορφη ανάδευση του πλαστικοποιημένου υλικού, καθώς ο χαλκός που μεταφέρεται στην υποχωρούσα

πλευρά δημιουργεί μεγάλα κενά κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Επίσης, αν επιλεγεί πείρος κωνικής γεωμετρίας ή περιαιχένιο με μικρή διάμετρο, είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθούν κενά εντός της ζώνης ανάδευσης, λόγω της ανομοιόμορφης ανάμιξης. Όταν η παρουσία αυτών των κενών περιοχών είναι συνεχής καθ' όλη τη διαδρομή της συγκόλλησης, τότε η ατέλεια ονομάζεται αστοχία τύπου τούνελ.

Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων, πρέπει να επιλέγονται οι κατάλληλες συνθήκες για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, όπως η χαμηλή ταχύτητα πρόωσης και η υψηλή ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου.



Εικόνα 1.7: Βέλτιστη θέση εισδοχής του περιστροφικού εργαλείου σε μεταωπικές συγκολλήσεις Al-Cu

> Ρωγμές (Macrocrack and Microcrack)

Ο σχηματισμός των ρωγμών είναι μια ατέλεια η οποία μπορεί να είναι ορατή στην επιφάνεια της συγκόλλησης. Ως αίτια σχηματισμού των ρωγμών αποδίδονται: η ανεπαρκής διείσδυση του πείρου κατά τη συγκόλληση, η λανθασμένη γεωμετρία του περιστροφικού εργαλείου, η λάθος θέση για τη διείσδυση του πείρου, καθώς και η λανθασμένη τοποθέτηση των προς συγκόλληση τεμαχίων αλουμινίου και χαλκού. Όλοι οι παραπάνω λόγοι έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία IMCs εντός της ζώνης ανάδευσης. Η ψαθυρή και εύθραυστη φύση των IMCs, αυξάνει την ευαλωτότητα της ζώνης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών.

Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, πρέπει να επιλέγεται χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, συνδυασμένη με σωστή θέση τοποθέτησης του πείρου.

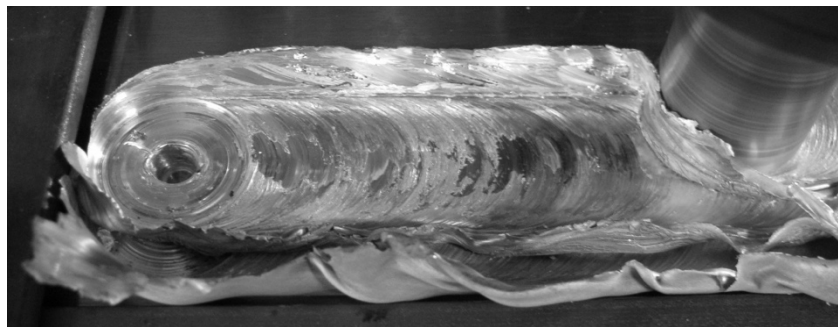
> Κατακερματισμός του υλικού (Fragmented defects)

Ο κατακερματισμός του υλικού συναντάται αποκλειστικά στη συγκόλληση ανόμοιων ελασμάτων με τη μέθοδο FSW, και ιδιαίτερα στις συγκολλήσεις Al-Cu. Τα

αποκολλημένα τεμάχια του χαλκού που βρίσκονται εντός της μήτρας του αλουμινίου, ως αποτέλεσμα της ανομοιογενούς ροής του πλαστικοποιημένου υλικού, λόγω της μεγαλύτερης σκληρότητάς τους και των αιχμηρών κορυφών που δημιουργούν, σχηματίζουν κενά και μικρορωγμές εντός της ζώνης ανάδευσης.

> **Υπερχείλιση υλικού ή επιφανειακό γρέζι (flash defect)**

Ελαττώματα τύπου flash, δημιουργούνται στην περίπτωση που η κατακόρυφη δύναμη που ασκεί το περιστροφικό εργαλείο, είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης, αριστερά και δεξιά, συμβαίνει εκροή του υλικού (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Ελάττωμα τύπου flash ή γρέζι ή διαρροή υλικού

1.10 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου [9]

> **Πλεονεκτήματα**

Η μέθοδος FSW πλεονεκτεί έναντι των υπόλοιπων κλασικών μεθόδων συγκόλλησης, τόσο ερευνητικά όσο και τεχνολογικά. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται τόσο η αντοχή των συγκολλούμενων υλικών σε εφελκυσμό και κάμψη, όσο και η βελτίωση των ιδιοτήτων κόπωσης. Τα τελικά προϊόντα της μεθόδου είναι πολύ πιο σταθερά στο σημείο της ραφής της συγκόλλησης και ταυτόχρονα λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση του περιβάλλοντος. Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου και ο σχετικά μικρός θερμικός κύκλος, οδηγούν σε συγκολλήσεις με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά:

- με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη αλλά και κόπωση.
- με ελάχιστο πορώδες.
- με δυναμικό εφαρμογής σε όλες τις θέσεις και τις δυνατές γεωμετρίες

σύνδεσης.

- με βελτιωμένη εμφάνιση ραφής.
- χωρίς στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις.
- χωρίς οξειδία στη συγκόλληση.
- με απουσία χρήσης καταναλισκόμενων στοιχείων.
- χωρίς χρήση προστατευτικού αερίου (εκτός του τιτανίου και των χαλύβων μαρτενγήρανσης).
- με δυνατότητα συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου διαφορετικής σειράς.
- με πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδο εφαρμογής.

> **Μειονεκτήματα**

Το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής συγκόλλησης είναι ότι στις προς συγκόλληση πλάκες πρέπει να εφαρμόζεται ισχυρή δύναμη συγκράτησης, γεγονός που δημιουργεί αρκετές δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, καθώς οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας φέρουν καθοριστικό ρόλο. Επίσης, το γεγονός πως πρόκειται για μια καινούρια μέθοδο, εξηγεί την έλλειψη του απαραίτητου εξοπλισμού και την καθιστά σε επίπεδο βιομηχανικής κλίμακας μια λιγότερο ευέλικτη διαδικασία. Ωστόσο, προβλήματα όπως το παραπάνω, καθώς και το υψηλό κόστος του ως τώρα υπάρχοντος εξοπλισμού, ενδέχεται να ξεπεραστούν λόγω της αυξανόμενης δημοφιλίας της μεθόδου. Επιπρόσθετα, η μικρή ταχύτητα συγκόλλησης για μαζικές παραγωγές, ο μικρότερος χρόνος ζωής και η σχετική αναξιοπιστία των εργαλείων συγκόλλησης (λόγω των ισχυρών πεδίων μηχανικής επιφόρτισης), αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες οι οποίοι πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν την εφαρμογή της μεθόδου σε μαζικές απαιτήσεις καίριων τεχνολογικών κλάδων.

Κεφάλαιο 2^ο

Το αλουμίνιο και ο Χαλκός

2.1 Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου [12]

2.1.1 Γενικά



Εικόνα 2.1: Τεμάχια αλουμινίου

Το αργίλιο ή αλουμίνιο είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της γης και η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του είναι ο βωξίτης. Ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων με πυκνότητα $2,7\text{g/cm}^3$. Τόσο το ίδιο το αλουμίνιο όσο και τα κράματά του, χρησιμοποιούνται ευρέως στη κατασκευαστική βιομηχανία λόγω του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας (E/ρ) και της υψηλής μηχανικής αντοχής (σ_{TS}/ρ) που παρουσιάζουν συγκριτικά με άλλα μέταλλα και κράματα.

Οι ιδιότητες που καθιστούν το αλουμίνιο τόσο σημαντικό στη βιομηχανία είναι το χαμηλό ειδικό βάρος του, η εξαιρετική αντοχή του σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και η πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητά του. Όσον αφορά τις μηχανικές του ιδιότητες χαρακτηρίζεται ως πολύ όλκιμο μέταλλο, ωστόσο, πέραν της καθαρότητας του, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισούται με το 75% αυτής του χαλκού, όμως λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός. Επιπλέον, έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο με αποτέλεσμα την ταχεία οξείδωσή του λόγω της

εμφάνισης ενός λεπτού και συνεχούς στρώματος Al_2O_3 , που προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία.

Τα κράματα του αλουμινίου, διακρίνονται σε κράματα διαμορφώσεις και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών, υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ψευδάργυρος. Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.1.

Προσθήκη	Επίδραση στις ιδιότητες του αλουμινίου
Χαλκός	Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμιση.
Σίδηρος	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή, τη σκληρότητα και ταυτόχρονα μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
Μαγνήσιο	Βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμιση.
Πυρίτιο	Βελτιώνει τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μειώνει τη χυτευσιμότητα αλλά σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

Πίνακας 2.1: Επίδραση των κραματικών προσθηκών στο τελικό προϊόν αλουμινίου

2.1.2 Ονοματολογία

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

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

(α) Στα κράματα διαμόρφωσης, ο πρώτος αριθμός δηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος αριθμός χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, ο τρίτος και ο τέταρτος αριθμός, στην περίπτωση του της σειράς 1XXX, υποδηλώνουν τα δεκαδικά

ποσοστά για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας της οικείας ομάδας.

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

Πίνακας 2.2

(β) Στα κράματα χύτευσης, ο πρώτος αριθμός δηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους προηγούμενους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Η μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

Κωδικός	Κύρια Προσθήκη
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και χαλκός ή μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Πίνακας 2.3

> 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. Για παράδειγμα το 1060-H12 είναι αλουμίνιο καθαρότητας 99,60%, το οποίο έχει υποστεί μόνο ενδοτράχυνση, η οποία έχει οδηγήσει σε αύξηση της σκληρότητάς του κατά 25%.

2.1.3 Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 1000, 3000, 5000. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εκγλεισμάτων ή διμεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως, με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

> Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000

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

> Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000

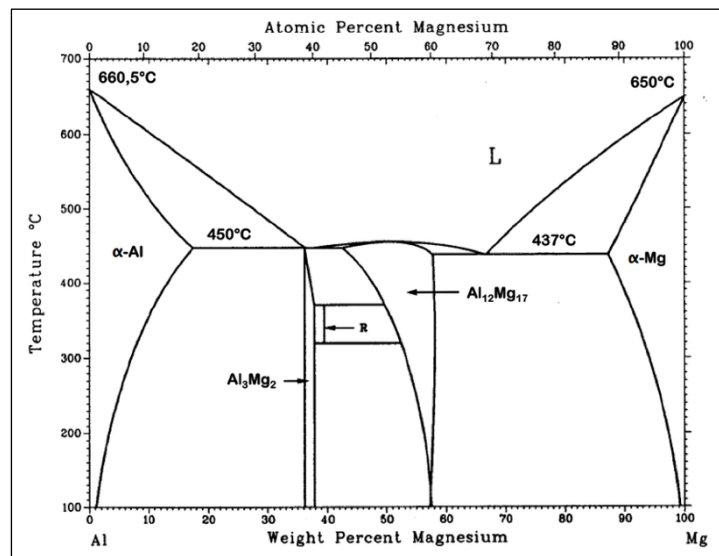
Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγγάνιο (Mn). Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al που είναι 1.8% στους 659 °C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία. Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη διμεταλλική ένωση Al_6Mn . Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1.5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία της Al_6Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0.12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής (κράμα 3003). Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1.2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος (κράμα 3004).

Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000 σε

εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευχέρεια διαμόρφωσης του υλικού και όχι υψηλή αντοχή.

> Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

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



Εικόνα 2.2: Διφασικό διάγραμμα Al-Mg

Τα κράματα της σειράς 5000 παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος της ολκιμότητάς τους. Όταν βρίσκονται στην μεταλλουργική κατάσταση O, μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ ή εν θερμώ. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική με κυριότερους εκπροσώπους τα 5052, 5083, 5086, 5454 και 5456.

2.1.4 Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000.

> Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2.6-6.3%, και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το ποσοστό μαγνησίου κυμαίνεται μεταξύ 0.5% και 1.5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl_2 και CuMgAl_2 , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0.8% (κράμα 2014), ευνοεί το σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία του Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Ωστόσο εάν προστεθεί συγχρόνως και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230 °C.

Τα κράματα της σειράς αυτής, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα, καθώς η περιοχή γύρω από τη συγκόλληση υφίσταται ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

> Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000

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

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0.8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0.3%. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0.5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση. Τα κράματα αυτά μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, ενώ ταυτόχρονα

παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, με τη χρήση τους να περιορίζεται μέχρι τους 150 °C. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

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

> **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000**

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

Το ποσοστό του Zn μεταβάλλεται από 4% έως 8% και αυτό του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο, η παρουσία του χαλκού μειώνει την εμβαπτότητα, την συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0.3%, βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητά τους.

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

2.1.5 Κράμα αλουμινίου AA5083 [13]

Το κράμα αλουμινίου AA5083 αποτελείται κυρίως από μαγνήσιο, όπως υποδηλώνει και ο πρώτος αριθμός της ονοματολογίας του. Ο δεύτερος αριθμός δηλώνει τροποποιήσεις των ορίων των περιεκτικότητων των ακαθαρσιών και οι δυο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

Το H111 υποδηλώνει ότι το κράμα έχει υποστεί ενδοτράχυνση και είναι κράμα ελάχιστης σκληρότητας.

Ελαφρύ αλλά μεγάλης αντοχής, το αλουμίνιο 5083 ανθίσταται στη διάβρωση, ειδικά στο θαλάσσιο περιβάλλον και διατηρεί το σχήμα του σε ακραίες χαμηλές θερμοκρασίες. Διαθέτει καλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλή ευφλεκτότητα. Λόγω

αυτών των ιδιοτήτων, το συγκεκριμένο κράμα αποτελεί βασικό στοιχείο εξοπλισμού ή οχημάτων που πρέπει να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις κατά τη λειτουργία τους, όπως αεροπλάνα ή γεωτρύπανα.

Το αλουμίνιο 5083 προορίζεται κυρίως για τον εξοπλισμό κρυογονικών εφαρμογών και για οχήματα, όπως αεροπλάνα, πυραύλους και υποβρύχια, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το αλουμίνιο 5083 μπορεί να διατηρήσει το σχήμα και την αντοχή του έως τους -165°C , χωρίς να γίνεται ψαθυρό. Διαθέτει καλή συγκολλησιμότητα και όταν απαιτείται ηλεκτρόδιο, θα πρέπει να είναι από το ίδιο κράμα αλουμινίου 5083. Τέλος, δεν υφίσταται θερμική κατεργασία, ενώ η ενδοτράχυνση είναι εφικτή μόνο με κατεργασία εν ψυχρώ. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά του κράματος αλουμινίου 5083-H111.

Φυσικές Ιδιότητες AA5083-H111									
Πυκνότητα (g/cm ³)	Ειδικό Βάρος	Σημείο Τήξης ($^{\circ}\text{C}$)	Λόγος Poisson	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Μέτρο Διάτμησης G (GPa)				
2,652	2,66	576,67	0,33	70,3	26,2				
Μηχανικές Ιδιότητες AA5083-H111									
Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)	Αντοχή σε Κόπωση (MPa)		Σκληρότητα (HV 0,1 Kg)					
315	230	160		85					
Χημική Σύσταση AA5083-H111									
Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
% κ.β.	0,344	0,224	0,078	0,622	4,573	0,097	0,112	0,014	υπόλοιπο

Πίνακας 2.4: Βασικά χαρακτηριστικά του κράματος αλουμινίου 5083-H111

2.2 Χαλκός και κράματα χαλκού [12]

2.2.1 Γενικά



Εικόνα 2.3: Τεμάχια χαλκού

Ο χαλκός ήταν το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο, σε καθαρή μορφή ή υπό μορφή κράματος. Παρουσιάζει εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, γι' αυτό και η μισή περίπου παγκόσμια παραγωγή του χρησιμοποιείται στη κατασκευή αγωγών, μετασχηματιστών, γεννητριών, ηλεκτρικών εξαρτημάτων, κ.λπ. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα και είναι μέταλλο με μεγάλη κατεργασιμότητα.

2.2.2 Κύριες κατηγορίες κραμάτων χαλκού - Ονοματολογία

Ως προς τα μετέχοντα στο κράμα στοιχεία, οι κύριες κατηγορίες κραμάτων χαλκού είναι:

- > τα κράματα Cu-Zn, τα οποία ονομάζονται ορείχαλκοι
- > τα κράματα Cu-Sn, τα οποία ονομάζονται μπρούτζοι
- > το κράμα Cu-Al, το οποίο ονομάζεται χαλκοαλουμίνιο
- > το κράμα Cu-Ni, το οποίο ονομάζεται χαλκονικέλιο
- > τα κράματα Cu-Zn-Ni, τα οποία ονομάζονται Maillechorts
- > το κράμα Cu-Be, το οποίο ονομάζεται χαλκοβηρύλλιο
- > το κράμα Cu-Si, το οποίο ονομάζεται χαλκοπυρίτιο

Ως προς τη μέθοδο μορφοποίησης, τα κράματα χαλκού διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης.

Ως προς τη σκληρότητά τους, τα κράματα διαμόρφωσης χαρακτηρίζονται από το ποσοστό της επιτυγχανόμενης ενδοτράχυνσης κατά την πλαστική τους παραμόρφωση.

Χαρακτηρισμός	Ενδοτράχυνση (%)	
	Ελάσματα	Σύρματα
Ακατέργαστο (O)	0	0
Σκληρυμένο κατά 1/4	11	21
Σκληρυμένο κατά 1/2	21	37
Σκληρυμένο κατά 3/4	30	50
Σκληρό (4/4)	37	60
Υπέρσκληρο	50	75
Ελατήριο (R)	60	84
Υπέρσκληρο Ελατήριο	69	90

Πίνακας 2.5

Για την τυποποίηση των κραμάτων χαλκού, ο αμερικάνικος οργανισμός CDA (Copper Development Association), χρησιμοποιεί το γράμμα C, ακολουθούμενο από τρεις αριθμούς, εκ των οποίων ο πρώτος αναφέρεται στην κατηγορία του κράματος (κύρια στοιχεία που μετέχουν σ' αυτό), ενώ οι δύο επόμενοι (XX) στην υποκατηγορία του κράματος (Πίνακας 2.6).

Κωδικός Κράματος	Κατηγορία Κράματος
Κράματα διαμόρφωσης	
C1XX	Καθαρός χαλκός (min. 99,3% Cu) και κράματα χαλκού με 96-99,3% Cu
C2XX	Κράματα Cu-Zn (ορείχαλκοι)
C3XX	Κράματα Cu-Zn-Pb (ορείχαλκοι με μόλυβδο)
C4XX	Κράματα Cu-Zn-Sn (ορείχαλκοι με κασσίτερο)
C5XX	Κράματα Cu-Sn (μπρούτζοι)
C6XX	Κράματα Cu-Al (χαλκοαλουμίνιο) και κράματα Cu-Si (χαλκοπυρίτιο)
C7XX	Κράματα Cu-Ni (χαλκονικέλιο) και κράματα Cu-Ni-Zn (Maillechorts)
Κράματα χύτευσης	
C8XX	Χυτός χαλκός, κράματα χαλκού με μικρά ποσοστά προσθηκών, ορείχαλκοι διαφόρων τύπων, μπρούτζοι με Mn και κράματα Cu-Zn-Si
C9XX	Χυτά κράματα Cu-Sn, Cu-Sn-Pb, Cu-Sn-Ni, Cu-Al-Fe, Cu-Ni-Fe, Cu-Ni-Zn

Πίνακας 2.6

Φυσικές Ιδιότητες Καθαρού Χαλκού C101				
Πυκνότητα (g/cm ³)	Σημείο Τήξης (°C)	Λόγος Poisson	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Μέτρο Διάτμησης G (GPa)
8,96	1084,6	0,34	118	48
	Μηχανικές Ιδιότητες Καθαρού Χαλκού C101			
	Αντοχή σε Εφελκυσμό (MPa)	Όριο Διαρροής (MPa)	Σκληρότητα (HV 0,1 Kg)	
Ακατέργαστος	220	70	40	
Σκληρός	455	365	110	

Πίνακας 2.7: Βασικά χαρακτηριστικά του καθαρού χαλκού C101

Κεφάλαιο 3^ο

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθόδου FSW σε κράματα αλουμινίου και χαλκού [14]

Η συνεχής έρευνα και οι πειραματικές μελέτες των συγκολλήσεων τριβής σε διαφορετικά υλικά και από πλήθος ερευνητών, έχουν συμβάλλει ώστε η μέθοδος FSW να αποκτήσει χρήση στη βιομηχανία, ανταγωνιζόμενη της παραδοσιακές συγκολλήσεις τήξης. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις σημαντικότερες εργασίες που έχουν δημοσιευθεί για τη συγκόλληση αλουμινίου και χαλκού.

Ο Liu και οι συνεργάτες του παρατήρησαν ότι κατά τη συγκόλληση κράματος Al (AA5A05) και Cu με FSW, πραγματοποιείται πλαστική παραμόρφωση στη ζώνη ανάδευσης με εμφανή τα όρια των δύο υλικών. Η μορφή αυτής, όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν, είχε το σχήμα δακτυλίου κρεμμυδιού (onion ring structure) και είχε μια ομαλή ροή. Επιπλέον, περιφερειακά της ζώνης ανάδευσης, τόσο από τη μεριά του χαλκού, όσο και του αλουμινίου, παρατήρησαν διάφορες σύνθετες δομές τις οποίες και απέδωσαν είτε στις συνθήκες συγκόλλησης, είτε στη θερμική αγωγιμότητα των δύο υλικών. Ωστόσο, η περαιτέρω ανάλυση της συγκόλλησης με διάθλαση ακτίνων X (XRD) δεν έδειξε την ύπαρξη νέων διμεταλλικών στοιχείων εντός της ζώνης ανάδευσης.

Αντίστοιχα, ο Xue και οι συνεργάτες του κατά την ανάλυση XRD συγκολλημένου κράματος αλουμινίου AA1060 και καθαρού χαλκού, παρατήρησαν την ύπαρξη χαρακτηριστικών κορυφών περίθλασης Al_2Cu και Al_4Cu_9 . Πιο συγκεκριμένα, εντόπισαν τις διμεταλλικές αυτές ενώσεις γύρω από τα μεγάλο μεγέθους αποκολλημένα τεμαχίδια χαλκού, ενώ τα μικρότερα τεμαχίδια χαλκού είχαν μετασχηματιστεί σε IMCs. Τα τεμαχίδια χαλκού στο σύνολό τους είχαν ακανόνιστο σχήμα και ήταν διάσπαρτα μέσα στη μήτρα αλουμινίου εντός της ζώνης ανάδευσης. Ωστόσο, παρατήρησαν αυξημένο αριθμό τεμαχιδίων χαλκού στον πυθμένα τις κόλλησης. Το φαινόμενο της αποκόλλησης τεμαχιδίων χαλκού και εμφάνισής τους στη ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης, την απέδωσαν στην περιστροφική κίνηση του εργαλείου και ιδιαίτερα του πείρου, ο οποίος λόγω της έντονης τριβής του, τα απέσπασε.

Στη συνέχεια, ο Bisadi και οι συνεργάτες του κατά τη συγκόλληση Al (AA5083) και καθαρού χαλκού, παρατήρησαν ότι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη συγκόλληση ήταν δυνατό να οδηγήσουν σε ατέλειες τύπου τούνελ στη διεπιφάνεια των

δύο υλικών, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ατελειών με μορφή κοιλοτήτων, καθώς επίσης και την αποκόλληση πολλών τεμαχιδίων χαλκού και ανάμειξής τους εντός της μήτρας αλουμινίου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία διμεταλλικών ενώσεων γύρω από τα τεμαχίδια χαλκού και την εμφάνιση μεγάλου αριθμού μικρορωγμών.

Έπειτα, ο Xue και οι συνεργάτες του επανέλαβαν τα πειράματά τους στη συγκόλληση AA1060 – Cu. Διαπίστωσαν ότι σε χαμηλές ταχύτητες πρόωσης, μεταξύ των 400 rpm, παρουσιάζονταν πολλά ελαττώματα στη ζώνη ανάδευσης, σε αντίθεση με τη συγκόλληση σε υψηλότερες ταχύτητες (800-1000 rpm) όπου φαινόταν να δημιουργείται μία ποιοτική μεταλλουργική ένωση μεταξύ των δύο υλικών. Επίσης, παρατήρησαν ότι τα περισσότερα ελαττώματα εμφανίζονταν όταν το έλασμα αλουμινίου, κατά τη μετωπική συγκόλληση, τοποθετούνταν στην προωθούμενη πλευρά (advancing side).

Ο Esmaeili και οι συνεργάτες του επιχείρησαν τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου AA1050 και ορείχαλκου (70% Cu – 30% Zn). Τα αποτελέσματα των μελετών τους έδειξαν ότι η ζώνη ανάδευσης εμπεριέχει μια σύνθετη δομή που περιλαμβάνει διμεταλλικές ενώσεις καθώς και τεμαχίδια ορείχαλκου, κυρίως στο άνω μέρος της συγκόλλησης. Επιπλέον, σε ταχύτητες περιστροφής μεγαλύτερες των 450 rpm παρατήρησαν τη δημιουργία μιας πολυμεταλλικής δομής στη διεπιφάνεια των δύο υλικών, αποτελούμενη από CuZn, CuAl₂, Cu₉Al₄. Και σε αυτή την πειραματική μελέτη, τα αποκολλημένα τεμαχίδια ορείχαλκου είχαν ακαθόριστη μορφή και σχήμα εντός της μήτρας αλουμινίου στη ζώνη ανάδευσης.

Ο Ouyang και η ομάδα του διεξήγαγαν συγκολλήσεις FSW μεταξύ αλουμινίου AA6061 και χαλκού, παρατηρώντας τη δυσκολία σύνδεσης λόγω των σχηματιζόμενων IMCs στον πυρήνα συγκόλλησης. Οι κυριότερες διμεταλλικές ενώσεις που σχηματίστηκαν ήταν οι CuAl, CuAl₂, Cu₉Al₄ σε συνδυασμό με μικρές εμφανίσεις της φάσης α-Al στο στερεό διάλυμα χαλκού.

Ομοίως με την ομάδα του Xue, ο Abdollah-Zadeh και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη συγκόλληση του κράματος AA1060 και Cu. Τα αποτελέσματα τους ήταν κοινά ως προς την εμφάνιση των IMCs: CuAl, CuAl₂, Cu₉Al₄ στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Επισημάναν επίσης το γεγονός ότι από τη συγκεκριμένη περιοχή ξεκινά η εμφάνιση μικρορωγμών οι οποίες μπορεί να ενταθούν σε περιπτώσεις δοκιμών εφελκυσμού. Επιπλέον παρατήρησαν ότι σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής σχηματίζεται μεγάλος αριθμός IMCs στη διεπιφάνεια των μετάλλων, ενώ σε χαμηλές

ταχύτητες περιστροφής παράγονται ποιοτικά ανεπαρκείς συγκολλήσεις. Αντίστοιχα η μελέτη του Saeid στις συγκολλήσεις ίδιων κραμάτων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το υλικό που πλαστικοποιείται στο κέντρο της συγκόλλησης, μεταφέρεται στο κάτω μέρος αυτής λόγω του σπειρώματος του πείρου και της περιστροφής του. Σε υψηλές ταχύτητες πρόωσης παρατηρείται λιγότερη κατακόρυφη μεταφορά υλικού στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side).

Ο Akinlabi και η ομάδα του, ασχολήθηκαν εκτενώς με τη μελέτη της μικροδομής σε συγκολλήσεις αλουμινίου AA5754 και χαλκού C11000, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η πλαστικοποίηση των δύο υλικών δημιουργεί μια αρκετά καλή μεταλλουργική σύνδεση. Η ανάλυση XRD έδειξε και το σχηματισμό IMCs (CuAl_2 , Cu_9Al_4), αλλά σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Επιπλέον, επισήμαναν πως με ταχύτητα περιστροφής 600 rpm και ταχύτητα πρόωσης 50-150 mm/min πραγματοποιείται μια πολύ καλή ανάμειξη και πλαστικοποίηση των υλικών με ταυτόχρονη μικρή ελάττωση του πάχους της συγκόλλησης λόγω του επιφανειακού γρεζιού (flash defect) που δημιουργείται. Επίσης παρατήρησαν ότι σε μικρές ταχύτητες πρόωσης οι παραγόμενες συγκολλήσεις είχαν καλή ομοιογένεια στην πλαστικοποίηση των υλικών, λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών συνθηκών. Σε αντίστροφες συνθήκες, το αποτέλεσμα ήταν συγκολλήσεις με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά λόγω των ατελειών εντός της μικροδομής τους. Σε συνέχεια αυτών των αποτελεσμάτων, ο Galinao προσέθεσε ότι με αύξηση της εισροής θερμότητας και χαμηλό λόγο ω/v , προκύπτουν συγκολλήσεις με μεγάλες ζώνες ανάδευσης καθώς και υψηλή ομοιογένεια. Επιπλέον τόνισε ότι η μορφολογία της ζώνης ανάδευσης καθώς και ο τύπος και η ποσότητα των IMCs εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους συγκόλλησης.

Έπειτα, η ομάδα του Galinao επιχείρησε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου AA 5083-H111 και χαλκού χωρίς οξυγόνο αλλά με υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο (Cu-DHP, R240). Παρατηρήθηκε ότι όταν το έλασμα του αλουμινίου τοποθετούνταν στη προωθούμενη πλευρά του περιστροφικού εργαλείου, οι παραγόμενες συγκολλήσεις ήταν μορφολογικά ακανόνιστες και σημαντικά λεπτότερες λόγω του σχηματισμού γρεζιού (flash) στην επιφάνεια. Όμως, όταν το αλουμίνιο τοποθετούνταν στην υποχωρούσα πλευρά, τότε η περιστροφή του πείρου το ωθούσε προς την προωθούμενη πλευρά.

Η θέση που θα τοποθετηθεί το περιστροφικό εργαλείο και συγκεκριμένα ο πείρος (pin offset), είναι καθοριστικής σημασίας. Αυτό ήταν και το συμπέρασμα του Agarwal κατά τη συγκόλληση Al (AA6063) και Cu, όπου τόνισε ότι όσο αυξάνει η

απόσταση της νοητής γραμμής της συγκόλλησης από την ευθεία της διεπαφής των δύο μετάλλων, τόσο οι παραγόμενες συγκολλήσεις θα περιέχουν ελαττώματα από την ανεπαρκή ανάμειξη και ομοιογένεια της πλαστικοποιημένης περιοχής.

Ο Singh και οι συνεργάτες του μελέτησαν τις διαφορετικές μικροδομές στις διαφορετικές ζώνες συγκόλλησης. Στη ζώνη ανάδευσης παρατήρησαν την ανάμειξη αλουμινίου και χαλκού με μικρά σωματίδια και των δύο υλικών εκατέρωθεν των ορίων της ζώνης. Παρατήρησαν επίσης την σαφή ύπαρξη θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης (TMAZ) στο χαλκό αλλά την απουσία αυτής από το αλουμίνιο. Επίσης, όσον αφορά την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) δεν ήταν ξεκάθαρη σε κανένα εκ των δύο μητρικών υλικών.

Σε επιπλέον πειράματα που πραγματοποίησε ο Xue και η ομάδα του σε συγκολλήσεις επικάλυψης μεταξύ Al (AA1061) και Cu, διαπίστωσαν ότι η διασύνδεση των δύο υλικών χαρακτηρίζονταν από ένα λεπτό ομοιόμορφο διμεταλλικό στρώμα το οποίο σε συνδυασμό με τα τεμαχίδια χαλκού εντός της μήτρας αλουμινίου στη ζώνη ανάδευσης και των διμεταλλικών ενώσεων που τα ακολουθούν, παρήγαγαν μια ικανοποιητική μεταλλουργική σύνδεση.

Συνοψίζοντας, πλήθος μελετών που έχουν δημοσιευθεί καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι αν κατά την πραγματοποίηση συγκολλήσεων FSW με ελάσματα Al-Cu, ο χαλκός τοποθετηθεί στην προωθούμενη πλευρά της περιστροφής όσον αφορά τις μετωπικές συγκολλήσεις ή αν τοποθετηθεί στο κάτω μέρος σε συγκολλήσεις επικάλυψης, τότε θα παραχθεί μια συγκόλληση με ικανοποιητικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Επίσης, οι περισσότερες μελέτες διαπιστώνουν το σχηματισμό διμεταλλικών ενώσεων εντός της ζώνης ανάδευσης γεγονός που καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάλυσή τους για την επίδραση τους συνολικά στην παραγόμενη συγκόλληση.

3.2 Ο σχηματισμός διμεταλλικών ενώσεων και ατελειών στις συγκολλήσεις αλουμινίου – χαλκού με τη μέθοδο FSW [15]

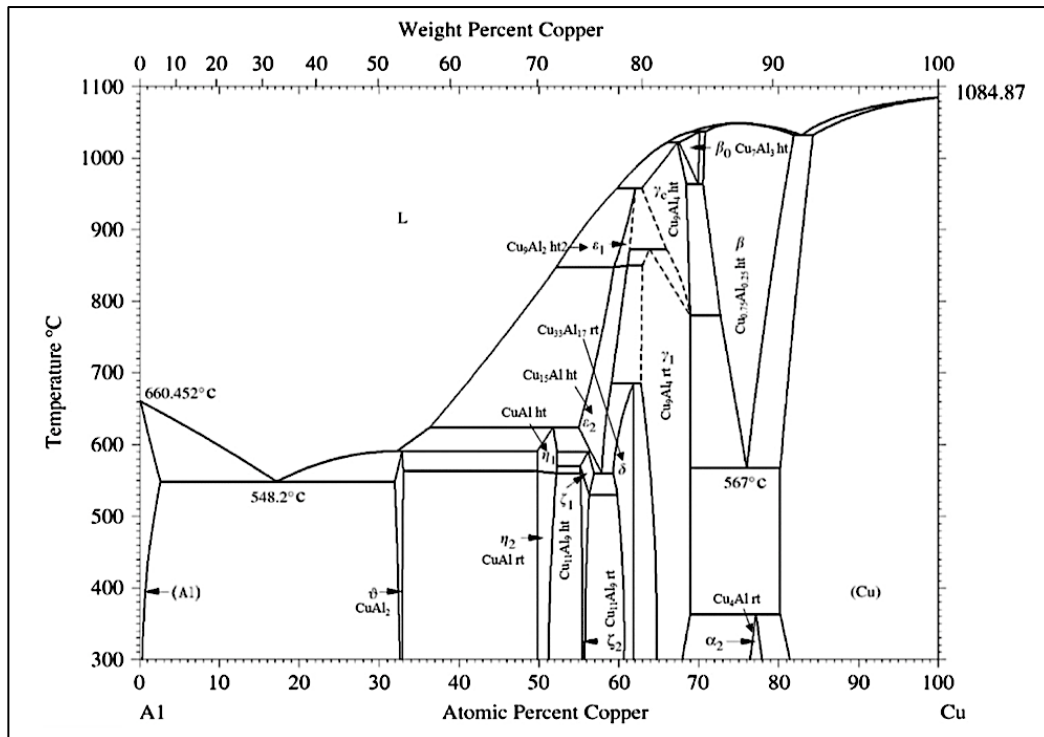
Η διάχυση μεταξύ δύο ουσιών διαφορετικής χημικής σύστασης μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό μιας ή περισσότερων ενδιάμεσων ενώσεων (διμεταλλικές ενώσεις, οξείδια, κλπ.). Αυτές οι ενώσεις έχουν τη μορφή στρώματος και σχηματίζονται στη διεπιφάνεια των διαφορετικών ουσιών που αλληλοεπιδρούν. Μπορεί να σχηματιστούν από την αλληλεπίδραση μεταξύ στερεών, ή στερεών και αερίων, ή ανάμεσα σε τηγμένα στερεά.

Φαινόμενα σαν το παραπάνω συναντώνται και στις συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων όπως αυτές του αλουμινίου με το χαλκό. Η συγκολλησιμότητα τέτοιων μετάλλων έχει βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα βιομηχανικών χρήσεων καθώς παρουσιάζουν αντοχή στη διάβρωση και έχουν μεγάλη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Οι πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για την βελτιστοποίηση παραγόμενων συγκολλήσεων, έχουν δείξει πως ο σχηματισμός των διμεταλλικών ενώσεων (IMCs) είναι αναπόφευκτος. Οι ενώσεις αυτές ανάλογα με το ποσοστό εμφάνισής τους, καθώς και τον τρόπο δημιουργίας τους (λόγω μεθόδου συγκόλλησης) οδηγούν σε συγκολλήσεις με τροποποιημένες μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες σε σύγκριση με αυτές των βασικών τους μετάλλων. Έτσι, οι παραγόμενες μεταλλουργικές ενώσεις μπορεί είτε να αναβαθμιστούν είτε να υποβαθμιστούν ποιοτικά.

Παρακάτω, θα γίνει αναφορά στους παράγοντες που επηρεάζουν την δημιουργία αλλά και το είδος των διμεταλλικών ενώσεων που δύναται να παρουσιαστούν στις συγκολλήσεις Al-Cu με τη μέθοδο FSW, καθώς και πως αυτοί επιδρούν ποιοτικά στην παραγόμενη κόλληση.

> **Επίδραση της αραιώσης μεταξύ των βασικών μετάλλων**

Η διαλυτότητα μεταξύ των συγκολλούμενων μετάλλων, επηρεάζει τη μικροδομή των σχηματισμών που πρόκειται να δημιουργηθούν και επομένως επιδρά στις τελικές μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Σύμφωνα με το διάγραμμα φάσεων Al-Cu (Εικόνα 3.1), η μέγιστη διαλυτότητα του χαλκού στο αλουμίνιο σε ένα στερεό διάλυμα είναι μόλις 5,65 wt%. Συνεπώς, μια συγκόλληση με τη μέθοδο FSW μπορεί να περιέχει εύθραυστες διμεταλλικές ενώσεις κατά μήκος της ζώνης ανάδευσης, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών της ιδιοτήτων.



Εικόνα 3.1: Διαφαστικό διάγραμμα φάσεων Al-Cu

> Επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των βασικών μετάλλων

Η μεγάλη ανομοιογένεια μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων των προς συγκόλληση μετάλλων όπως στην περίπτωση του αλουμινίου και του χαλκού, έχει σαν αποτέλεσμα είτε το σχηματισμό εύθραυστων διμεταλλικών δομών, είτε τη δημιουργία ελαττωμάτων, τόσο σε συγκολλήσεις σύντηξης όσο και σε στερεάς κατάστασης.

- Θερμοκρασία τήξης

Σε μια συγκόλληση FSW αλουμινίου και χαλκού, το αλουμίνιο μαλακοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τον χαλκό, λόγω της μικρότερης θερμοκρασίας τήξης. Οι έρευνες των Bisadī και των συνεργατών του κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όταν συγκολλώνται μέταλλα με μεγάλες διαφορές στις θερμοκρασίες τήξης τους, η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται προς όφελος του ενός μετάλλου αλλά εις βάρος του δεύτερου, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων εντός της γραμμής συγκόλλησης και ιδιαίτερα στη διεπαφή τους. Επιπλέον, αυτή η μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά, επηρεάζει και την εμφάνιση της επιφάνειας συγκόλλησης. Άλλες έρευνες των Song-bai, Οuyang, Sahin, έδειξαν ότι τα διαφορετικά σημεία τήξης των συγκολλούμενων μετάλλων οδηγούν στο σχηματισμό ψαθυρών διμεταλλικών ενώσεων με μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Συνεπώς, η διαφορά στη

Θερμοκρασία τήξης των βασικών μετάλλων παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση ατελειών, στην υφή της συγκόλλησης και ως εκ τούτου στις μηχανικές και ηλεκτρικές της ιδιότητες.

- **Θερμική αγωγιμότητα**

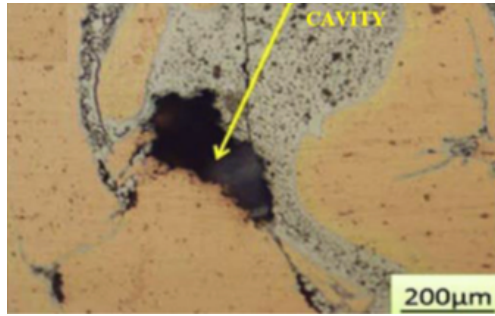
Η μεγάλη διαφορά στις τιμές θερμικής αγωγιμότητας στις συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων, έχει ως αποτέλεσμα το μέταλλο με την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα να απορροφά μεγαλύτερα ποσά θερμότητας. Έτσι, δημιουργείται μια άνιση κατανομή της θερμότητας που παράγεται από το περιστροφικό εργαλείο καθώς και φαινόμενα τοπικής τήξης του μετάλλου, οδηγώντας σε προβληματικές και ποιοτικά υποβαθμισμένες συγκολλήσεις. Σύμφωνα με την έρευνα του Sahin, στη συγκόλληση Al-Cu με FSW, η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα του χαλκού (390 W/mK) σε σχέση με το αλουμίνιο (226 W/mK) προσδίδει στο χαλκό υψηλές τιμές σκληρότητας με αποτέλεσμα την πιθανή δημιουργία εύθραυστων περιοχών γύρω από το χαλκό. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχει παρατηρηθεί πως η διαφορά στη θερμική αγωγιμότητα των προς συγκόλληση μετάλλων, δεν έχει πάντοτε αρνητικό αντίκτυπο στο τελικό αποτέλεσμα. Οι έρευνες των Saringhad, Moghaddam και της ομάδας τους σε αντίστοιχα μέταλλα και με την ίδια μέθοδο, έδειξαν πως ο υψηλός ρυθμός απορρόφησης της θερμότητας που παρουσιάζει ο χαλκός, δεν οδηγεί στη δημιουργία θερμικά επηρεασμένων ζωνών εντός της συγκόλλησης.

Συνοψίζοντας, οι παραπάνω μελέτες έδειξαν ότι η διαφορετική θερμική αγωγιμότητα των βασικών μετάλλων μπορεί να επιδράσει είτε θετικά είτε αρνητικά στην τελική συγκόλληση. Όμως, αυτή η διαφορά δεν επηρεάζει τις διμεταλλικές ενώσεις που εμφανίζονται στη μικροδομή της συγκόλλησης.

- **Συντελεστής Θερμικής Διαστολής**

Η επίδραση του συντελεστή θερμικής διαστολής των συγκολλούμενων μετάλλων θεωρείται ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς είναι η αιτία σχηματισμού πιθανών ασυνεχειών στη ραφή της συγκόλλησης. Η έρευνα του Bisadi και της ομάδας του, απέδειξε την ύπαρξη κοιλοτήτων (Εικόνα 3.2) στη μικροδομή της συγκόλλησης λόγω των διαφορετικών θερμικών συντελεστών διαστολής του αλουμινίου ($24 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}10^{-6}$) και του χαλκού ($17 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}10^{-6}$), με αποτέλεσμα τα σωματίδια του αλουμινίου ωθούνται προς τον χαλκό δημιουργώντας ατέλειες υπό τη μορφή κενών.

Ωστόσο, αυτή η διαφορά δεν επηρεάζει το σχηματισμό διμεταλλικών ενώσεων στη συγκόλληση.



Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστική κοιλότητα (ατέλεια) κατά την ανάμειξη Al-Cu

> **Επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης**

Πλήθος μελετών κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε μεταλλουργικές συνδέσεις στερεάς κατάστασης κράματος αλουμινίου με χαλκό, οι ιδιότητές της μπορούν να βελτιωθούν αν επιλεγθούν οι ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης. Η αραιώση των μετάλλων, η ταχύτητα πρόωσης, η παραγόμενη θερμότητα, η θέση εισδοχής του πείρου αλλά και η γεωμετρία του περιστροφικού εργαλείου, επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της κόλλησης καθώς ευνοούν ή δυσχεραίνουν το σχηματισμό διμεταλλικών ενώσεων ή ατελειών. Για παράδειγμα, ο Sahin απέδειξε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό μιας συγκόλλησης με χρήση FWS μπορεί να παραμετροποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση της δύναμης βύθισης και του χρόνου τριβής (δηλαδή μικρή ταχύτητα πρόωσης), είναι δυνατή η σταδιακή μείωση του ορίου αντοχής σε εφελκυσμό. Αυτό οφείλεται στη διάχυση της θερμότητας και στο σχηματισμό ενός γκριζου εύθραυστου διμεταλλικού στρώματος στη διεπιφάνεια του πλαστικοποιημένου υλικού με το βασικό μέταλλο.

Άλλες μελέτες των Jariyaboon και Krishnan δείχνουν ότι τα συγκολλημένα ελάσματα με τη μέθοδο FSW έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Akinlabi, όπου αναλύοντας τα αποτελέσματα της διάβρωσης σε συγκολλήσεις FSW, παρατήρησε ότι όσο αυξάνονταν η ταχύτητα περιστροφής, μειώνονταν αντίστοιχα ο ρυθμός διάβρωσης.

Αντίστοιχες μελέτες των Galnao, Moghaddam, Xue, κατέληξαν στο γενικό συμπέρασμα ότι η γεωμετρία του περιστροφικού εργαλείου μπορεί να επηρεάσει το ποσοστό εμφάνισης των διμεταλλικών ενώσεων καθώς και την ύπαρξη ελαττωμάτων εντός της συγκόλλησης.

Όσον αφορά τις μετωπικές συγκολλήσεις Al-Cu, ο Xue πρότεινε ότι αν η θέση εισδοχής του πείρου μετατοπιστεί ελαφρώς προς το αλουμίνιο, τότε μπορεί να

μειωθεί το ποσοστό σχηματισμού διμεταλλικών ενώσεων και οι ατέλειες με ταυτόχρονη βελτίωση των ιδιοτήτων κάμψης και εφελκυσμού. Επίσης η μελέτη έδειξε ότι το λεπτό, ομοιόμορφο και συνεχές στρώμα IMCs βελτίωσε την αντοχή της συγκόλλησης.

Συνεπώς, η σωστή επιλογή εργαλείων, ταχυτήτων καθώς και η θέση τοποθέτησης των προς συγκόλληση μετάλλων (δηλαδή η πλευρά προώθησης και υποχώρησης), κλπ, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της τελικής κόλλησης ως προς την εμφάνιση ατελειών ή διμεταλλικών ενώσεων.

> **Επίδραση της θερμικής επεξεργασίας**

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η θερμική επεξεργασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί στο ένα μέταλλο της συγκόλλησης, να έχει αρνητική επίδραση το άλλο βασικό μέταλλο με αποτέλεσμα το σχηματισμό ελαττωμάτων στη συγκόλληση. Στην πειραματική τους μελέτη ο Wonbae και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι οι συγκολλήσεις τριβής με μεγάλους χρόνους ανόπτησης και υψηλή θερμοκρασία, εμφάνιζαν αύξηση του πάχους των διμεταλλικών τους ενώσεων, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων της συγκόλλησης.

> **Τα είδη διμεταλλικών ενώσεων κατά τη συγκόλληση Al-Cu**

Κατά την παρατήρηση της μικροδομής μιας συγκόλλησης Al-Cu με FSW, εντός της ζώνης ανάδευσης βρίσκονται ακανόνιστου μεγέθους και σχήματος τεμαχίδια Cu εντός του Al. Περιμετρικά των τεμαχιδίων Cu, παρατηρείται ο σχηματισμός κάποιων διμεταλλικών ενώσεων. Οι ενώσεις αυτές μπορεί να είναι: CuAl_2 , Cu_9Al_4 , Cu_2Al_3 , Cu_3Al , CuAl και οι οποίες χαρακτηρίζονται ως πολύ σκληρές και εύθραυστες.

Η δημιουργία τέτοιων σύνθετων ενώσεων οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο υλικά που συγκολλώνται διαφέρουν σημαντικά ως προς τα σημεία τήξης, τη χημική τους σύνθεση κ.λπ. Επιπλέον, καθώς η διαδικασία FSW δεν φτάνει στις θερμοκρασίες τήξης των βασικών μετάλλων, δεν είναι δυνατή η δημιουργία μιας ξεχωριστής ζώνης σχηματισμού, παράλληλα με τις υπάρχουσες. Έτσι, η έντονη ανάδευση και η ακραία παραμόρφωση που υφίσταται το υλικό εντός της ζώνης ανάδευσης, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται, έχουν σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό τέτοιων κραματικών συστημάτων.

Μικροσκοπικά, οι διμεταλλικές ενώσεις εμφανίζονται υπό τη μορφή λεπτού γκρι στρώματος είτε γύρω από τα τεμαχίδια χαλκού όπως προαναφέρθηκε είτε στη διεπιφάνεια αλουμινίου – χαλκού.

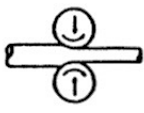
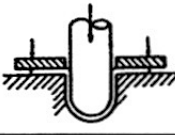
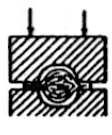

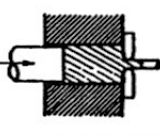

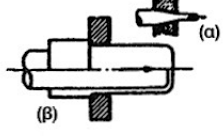


Κεφάλαιο 4^ο

Μηχανικές Κατεργασίες Διαμόρφωσης των Μετάλλων

4.1 Εισαγωγή [12]

Προκειμένου τα μέταλλα ή τα κράματα να αποκτήσουν τις κατάλληλες ιδιότητες και τα επιθυμητά σχήματα συγκεκριμένων διαστάσεων, είτε χυτεύονται κατευθείαν σε καλούπια με τις διαστάσεις του τελικού προϊόντος, είτε υφίστανται περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης, με πρόσδοση μηχανικού έργου, για τη λήψη τελικών προϊόντων όπως πλάκες, φύλλα, σύρματα, σωλήνες, κ.λπ.

Οι διάφορες μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης που πραγματοποιούνται στη βιομηχανία, διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 4.1.

ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ		ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ	
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ
Ελαση		Βαθεία κοίλανση	
Σφυρηλάτηση		Διαμόρφωση με έκταση	
Διέλαση		Κάμψη	
Συρματοποίηση και σωληνοποίηση		Διαμόρφωση φλάντζας	(α) κοίλη 
			(β) κυρτή 

Εικόνα 4.1

4.2 Βασικά χαρακτηριστικά των μηχανικών κατεργασιών διαμόρφωσης [12]

Η μηχανική κατεργασία βασίζεται στην ιδιότητα των μετάλλων ή των κραμάτων να αλλάζουν σχήμα με την πρόσδοση μηχανικού έργου, γεγονός που σε μικροσκοπική κλίμακα οδηγεί στο να επιμηκύνονται οι κρυσταλλίτες τους κατά τη διεύθυνση της κατεργασίας. Η ικανότητα αυτή των μετάλλων να παραμορφώνονται πλαστικά και να παίρνουν διάφορα σχήματα και διαστάσεις, είναι γνωστή ως κατεργασιμότητα. Άρα η κατεργασιμότητα εν ψυχρώ είναι συνώνυμη των εννοιών της πλαστικότητας ή ολκιμότητας των μετάλλων σε χαμηλές θερμοκρασίες.

> Κατά την επιμήκυνση των κόκκων, οι νέες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις που δημιουργούνται στη μάζα του υλικού, δεν κατανέμονται τυχαία αλλά έχουν κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό που εξαρτάται από τον αρχικό προσανατολισμό, καθώς και από το πλήθος των ενεργών συστημάτων ολίσθησης. Συνήθως, ο νέος προσανατολισμός των κόκκων είναι ίδιος με τη διεύθυνση της κατεργασίας και ονομάζεται ιστός. Γενικά, ο ιστός εξαρτάται από το κρυσταλλογραφικό σύστημα του μετάλλου, το είδος της κατεργασίας, καθώς και από ένα μεγάλο αριθμό πειραματικών παραμέτρων που επηρεάζουν την έντασή του.

> Έπειτα από μια εν ψυχρώ μηχανική κατεργασία ενδοτράχυνσης, παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο της σκλήρυνσης και της αύξησης της μηχανικής αντοχής του υλικού.

> Η ολκιμότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντοχή στη διάβρωση μειώνεται μετά από ψυχρή κατεργασία. Ωστόσο, η μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συμβαίνει σε μικρότερο βαθμό από ότι η μέθοδος σκλήρυνσης με προσθήκη διαλυόμενου στοιχείου.

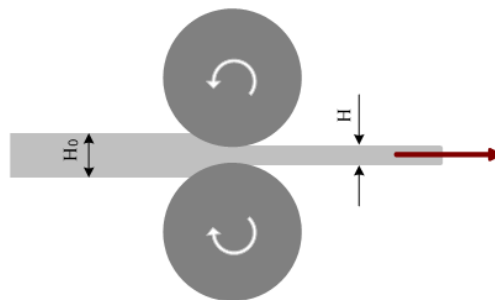
> Η ψυχρή κατεργασία διαμορφώνει εξαιρετικής γεωμετρικής ποιότητας τελικές επιφάνειες. Επιπλέον είναι μια φθηνή μέθοδος για την παραγωγή μεγάλου αριθμού προϊόντων σε μικρές διαστάσεις. Σε αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων η χρήση περιορίζεται. Εάν πρόκειται να πραγματοποιηθεί μεγάλης έκτασης πλαστική παραμόρφωση, το αντικείμενο ενδεχομένως να σπάσει. Γι' αυτό το λόγο, η επιθυμητή πλαστική παραμόρφωση επιτυγχάνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες μέσω των θερμών κατεργασιών διαμόρφωσης.

> Έχει αποδειχθεί ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι αποτέλεσμα της μετακίνησης των διαταραχών. Άρα, εφόσον απαιτούνται ολοένα και μεγαλύτερες δυνάμεις ώστε να επιτευχθεί ή ίδια παραμόρφωση, αυτό θα πρέπει να οφείλεται κατά

κάποιον τρόπο στη μείωση της κινητικότητας των διαταραχών, λόγω ενδοτράχυνσης που υπέστη το υλικό κατά την ψυχρή του κατεργασία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνήθης πυκνότητα των διαταραχών ($10^6 - 10^7 \text{ cm}^{-2}$) δεν δικαιολογεί την αύξηση της απαιτούμενης τάσης για επιπλέον πλαστική παραμόρφωση. Η έντονη όμως ψυχρή κατεργασία δημιουργεί πολλαπλάσια πυκνότητα διαταραχών της τάξης των $10 - 12 \text{ cm}^{-2}$, με αποτέλεσμα την αγκύρωση και δυσκολία μετακίνησης τους. Πράγματι η ύπαρξη πολλών διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ των κρυστάλλων εμποδίζει την κίνηση των διαταραχών. Για τον ίδιο λόγο τα μέταλλα με μικρούς κρυστάλλους, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από μέταλλα που αποτελούνται από μεγάλους κρυστάλλους.

4.3 Περιγραφή της ψυχρής έλασης [7]

Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές διαμόρφωσης μεταλλικών υλικών είναι αυτή της έλασης. Η αρχή λειτουργίας της συνίσταται στην παραμόρφωση ενός μετάλλου που υποχρεώνεται να περάσει μεταξύ δύο κυλίνδρων, που η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη από το αρχικό πάχος του μετάλλου (Εικόνα 4.2). Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι η παραγωγή προϊόντων με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος.



Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση της έλασης

Η έλαση διακρίνεται σε:

- > Έλαση μπιγέτας (billet), όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος (πέραν του μήκους), γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading).
- > Έλαση πλάκας (slab), κατά την οποία δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, παρά μόνο στο μήκος.

Όταν το τεμάχιο της έλασης είναι πλάκα, δηλαδή το πάχος του είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις του, τότε παρατηρείται επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι σε μία από τις τρεις διαστάσεις του τεμαχίου, δεν παρατηρείται αλλαγή (το πλάτος του τεμαχίου παραμένει σταθερό και αυξάνεται το μήκος του). Αντίθετα, όταν το τεμάχιο της έλασης είναι μπιγέτα με διαστάσεις της ίδιας τάξης μεγέθους, τότε δεν ισχύει η επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η τρισδιάστατη παραμορφωσιακή κατάσταση, με αποτέλεσμα όλες οι διαστάσεις του τεμαχίου να μεταβληθούν. Αν είναι μικρή η μείωση του πάχους της μπιγέτας, η πλαστική παραμόρφωση θα περιοριστεί στα δύο άκρα της, αν όμως η μείωση του πάχους είναι μεγάλη, τότε η πλαστική παραμόρφωση θα επεκταθεί σε όλη τη μάζα της μπιγέτας.

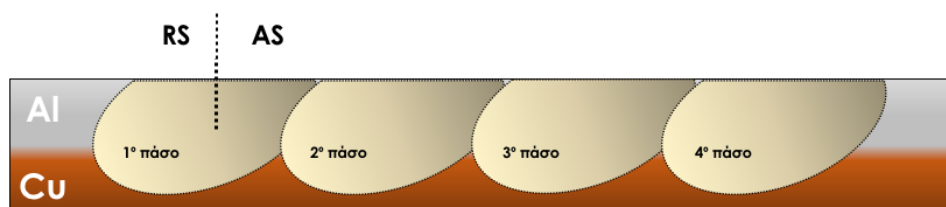
Καθώς το τεμάχιο της έλασης παραμορφώνεται πλαστικά, οι κόκκοι του αποκτούν μια κατευθυντικότητα. Έτσι, οι αρχικοί ισοκυττατικοί κόκκοι του τεμαχίου, γίνονται επιμήκεις και αποκτούν μια κοινή διεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται εργοσκλήρυνση και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των υλικών είναι η «δομή ιστού» που έχουν οι κόκκοι καθώς παίρνουν την ίδια φορά. Ωστόσο, το φαινόμενο της εργοσκλήρυνσης δεν είναι επιθυμητό σε όλες τις κατεργασίες. Όταν ένα υλικό πρέπει να υποστεί δευτερογενή κατεργασία (πχ. δημιουργία ελάσματος), η εργοσκλήρυνση που έχει υποστεί (και σε μικρότερο βαθμό η ανισοτροπία), θα το κάνει να αστοχεί ευκολότερα, με αποτέλεσμα να είναι ανίκανο να υποστεί περαιτέρω παραμορφώσεις.

Κεφάλαιο 5^ο

Περιγραφή της Πειραματικής Διαδικασίας και του Εξοπλισμού

5.1 Εισαγωγή

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας ήταν η πραγματοποίηση συγκόλλησης του κράματος αλουμινίου AA5083 με χαλκό καθαρότητας 99,99%, με χρήση της μεθόδου FSW με επικάλυψη (lap joint) (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Σκαρίφημα τομής συγκολλημένου δοκιμίου

Προκειμένου να παραχθεί επιτυχώς μία διμεταλλική συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων μέσω της διαδικασίας FSP, θα πρέπει να πληρούνται τα εξής:

- > Πρώτον, η παραγόμενη συγκόλληση να μην εμφανίζει ατέλειες και αστοχίες, τόσο μακροσκοπικά, όσο και μικροσκοπικά.
- > Δεύτερον, η πλαστικοποίηση των δύο υλικών να έχει γίνει όσο το δυνατόν ομοιόμορφα στη ζώνη ανάδευσης
- > Τρίτον, το ποσοστό των σχηματιζόμενων διμεταλλικών ενώσεων στη μικροδομή να είναι τέτοιο ώστε να μην υποβαθμίζεται ποιοτικά η συγκόλληση.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναλυτική περιγραφή όλης της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση των πειραμάτων της έρευνας. Αυτή περιλάμβανε την συγκόλληση των δοκιμίων, την επεξεργασία τους για περαιτέρω ανάλυση της μικροδομής τους, καθώς και μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, καθώς επίσης και στο Ίδρυμα Εθνικών Ερευνών.

5.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Κατά τη διενέργεια των πειραμάτων συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW, αποφασίστηκε η δημιουργία δοκιμίων με διαφορετικές συνθήκες ώστε στο τέλος να επιλεγεί αυτό με τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για περαιτέρω εξέταση. Η γεωμετρία συγκόλλησης που επιλέχθηκε ήταν η επικάλυψη των ελασμάτων (lap joint), με το αλουμίνιο να βρίσκεται στο άνω μέρος και ο χαλκός από κάτω. Οι διαφορές των συνθηκών εντοπιζόνταν είτε στο διαφορετικό αριθμό περασμάτων για το ίδιο πάσο, είτε στο περιστροφικό εργαλείο. Η ταχύτητα πρόωσης, η δύναμη βύθισης, η ταχύτητα περιστροφής και η κλίση του εργαλείου παρέμειναν σταθερά για όλα τα δοκίμια.

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται όλες οι παράμετροι που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Αριθμός δοκιμίου	Περιστροφικό εργαλείο	Κλίση	Ταχύτητα πρόωσης	Ταχύτητα περιστροφής	Αριθμός περασμάτων
No1	"A"	3°	13 mm/min	1000 rpm	1
No2	"A"	3°	13 mm/min	1000 rpm	2
No3	"A"	3°	13 mm/min	1000 rpm	2
No4	"B"	3°	13 mm/min	1000 rpm	1

Πίνακας 5.2

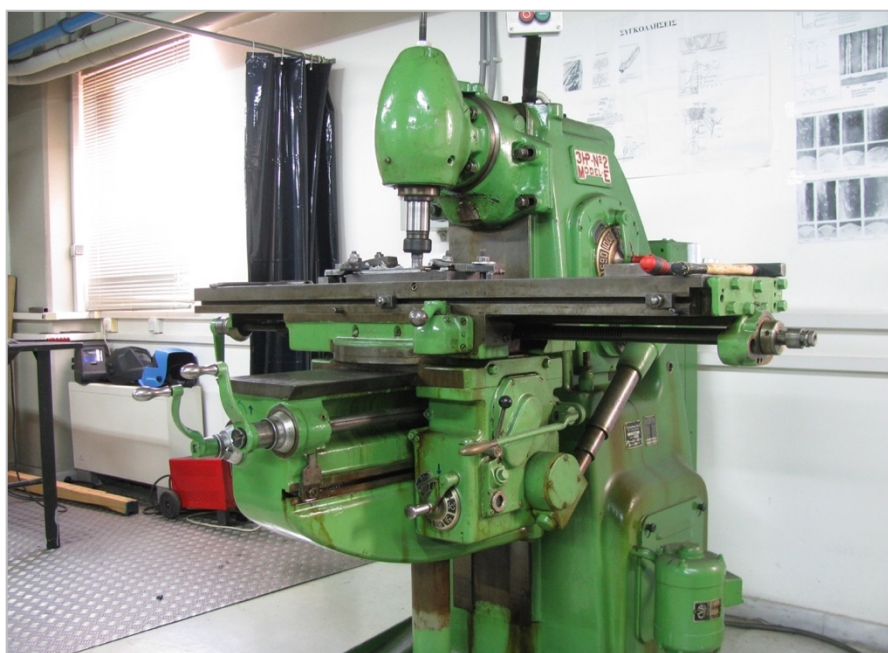
Σε όλα τα δοκίμια έγιναν τέσσερις ραφές συγκόλλησης με απόσταση 8 mm μεταξύ τους. Στα δοκίμια No2 και No3 που έγιναν δύο περάσματα ανά πάσο, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

> **Για το δοκίμιο No2:** Αφού πραγματοποιήθηκαν τα τέσσερα διαδοχικά πάσα συγκόλλησης (πρώτο πέραςμα), η διαδικασία επαναλήφθηκε με όμοιο τρόπο ώστε τα καινούρια περάσματα να γίνουν πάνω από τα προηγούμενα, με τις ίδιες αποστάσεις και την ίδια σειρά.

> **Για το δοκίμιο No3:** Κάθε ένα πάσο που ολοκληρώνονταν, το επόμενο πέραςμα γίνονταν αμέσως από πάνω.

5.3 Μηχανή συγκόλλησης

Για την εκτέλεση των πειραμάτων με τη μέθοδο FSW, χρησιμοποιήθηκε η κατάλληλα τροποποιημένη φρεζομηχανή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. (Εικόνα 5.2) της κατασκευάστριας βρετανικής εταιρίας C.V.A. Jigs Moulds & Tools LTD. Οι δυνατές ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου συγκόλλησης καθώς και οι δυνατές ταχύτητες συγκόλλησης της μηχανής, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2.



Εικόνα 5.2: Τροποποιημένη φρεζομηχανή Εργαστηρίου

Ταχύτητα Περιστροφής ω (RPM)	25	42	72	121	206	348	590	1000
Ταχύτητα Πρόωσης V (mm/min)	13	21	32	51	83	127	203	318

Πίνακας 5.3: Προδιαγραφές φρεζομηχανής Εργαστηρίου

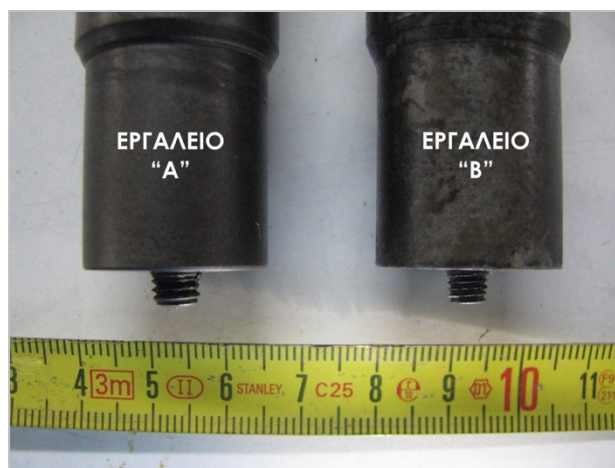
Η γεωμετρία του εργαλείου FSP αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της μεθόδου. Τα περιστροφικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 5.3), ήταν κυλινδρικού πείρου με σπείρωμα και είχαν τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

> **Εργαλείο "Α"**

- διάμετρος περιαιχενίου: 22 mm
- εξωτερική διάμετρος πείρου: 6 mm
- εσωτερική διάμετρος πείρου: 5.37 mm
- βήμα σπειρώματος: 1 mm
- ύψους πείρου: 4.5 mm

> **Εργαλείο "Β"**

- διάμετρος περιαιχενίου: 19.8 mm
- εξωτερική διάμετρος πείρου: 5.08 mm
- εσωτερική διάμετρος πείρου: 4.4 mm
- βήμα σπειρώματος: 1 mm
- ύψους πείρου: 4.05 mm



Εικόνα 5.3: Περιστροφικά εργαλεία της μεθόδου FSW

Η κλίση του εργαλείου που επιλέχθηκε, έπειτα από βιβλιογραφική επισκόπηση, ήταν οι 3°. Η βέλτιστη επιλογή της κλίσης του εργαλείου συμβάλει στη συγκράτηση του αναδευόμενου υλικού καθώς και στη μεταφορά του από το εμπρός προς το πίσω μέρος του πείρου.

Όσον αφορά τη συγκράτηση των ελασμάτων, χρησιμοποιήθηκαν οι ειδικές ενσωματωμένες αρπάγες της φρεζομηχανής, σε συνδυασμό με κάποια πρόσθετα χαλύβδινα ελάσματα που τοποθετήθηκαν περιμετρικά των δοκιμίων. Η επιπλέον συγκράτηση των δοκιμίων διασφαλίζει αφενός τη σταθερότητα της θέσης τους κατά τη συγκόλληση και αφετέρου προσφέρει την απαιτούμενη κάθετη δύναμη για την

αποφυγή τυχόν παραμορφώσεων (λυγισμός) λόγω των θερμοκρασιών και των δυνάμεων που αναπτύσσονται.

5.4 Χρησιμοποιηθέντα ελάσματα

Τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των δοκιμών της συγκόλλησης ήταν το κράμα αλουμινίου AA5083 και χαλκός καθαρότητας 99,99%. Οι αρχικές διαστάσεις των ελασμάτων ήταν 200 mm x 100 mm x 3mm.

5.5 Κατεργασία των δοκιμών

5.5.1 Κοπή δοκιμών

Προκειμένου να γίνει εφικτή η μελέτη των δοκιμών, ήταν απαραίτητη η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων έτσι ώστε να αποκαλυφθεί η μικροδομή της συγκόλλησης. Η κοπή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου και συγκεκριμένα με το αυτόματο πριόνι CY350 της Rich Young (Εικόνα 5.4α), καθώς και με τον δισκοτόμο Struers Discotom-2 (Εικόνα 5.4β). Και οι δύο μηχανές κοπής ήταν εξοπλισμένες με κατάλληλο σύστημα ψύξης-λίπανσης, ώστε να μην αλλοιωθεί σε μεγάλο βαθμό η μικροδομή του ελάσματος. Τα δοκίμια κόπηκαν σε συγκεκριμένα σημεία και εγκάρσια ως προς τη διεύθυνση της συγκόλλησης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω μελέτη των ζωνών συγκόλλησης.



Εικόνα 5.4: (α) Rich Young CY350, (β) Discotom-2

5.5.2 Εγκιβωτισμός

Αφού έχει προηγηθεί η δειγματοληψία και η κοπή των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος, ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους (Εικόνα 5.5α). Για τον εγκιβωτισμό, επιλέγεται ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από την πίεση και τη θερμοκρασία. Συνήθως χρησιμοποιούνται εποξικά υλικά όπως οι ρητίνες, οι οποίες παρουσιάζουν τη μικρότερη συρρίκνωση κατά τον ψυχρό εγκιβωτισμό. Επιπλέον, παρουσιάζουν σχετικά μεγάλο χρόνο στερεοποίησης και έχουν εξαιρετική πρόσφυση με τα περισσότερα υλικά. Μετά τη σκλήρυνσή τους γίνονται ντουροπλαστικά, γεγονός που τους προσδίδει αντοχή σε μέτριες θερμοκρασίες και χημικές προσβολές.

Έπειτα, το δοκίμιο τοποθετείται στο ειδικό καλούπι και προστίθεται η ρητίνη. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, έγινε χρήση της ρητίνης EpoFix Resin και του σκληρυντή EpoFix Hardener της εταιρίας Struers σε αναλογία 15:2 κατ' όγκο (Εικόνα 5.5β). Για τη στερεοποίηση του μίγματος που παρασκευάστηκε, κρίθηκε απαραίτητο η διαδικασία να ολοκληρωθεί εντός του απαγωγού αερίων καθώς ο πολυμερισμός της ρητίνης είναι μια εξώθερμη αντίδραση με αποτέλεσμα να παράγονται αναθυμιάσεις. Μετά το πέρας 24 ωρών, αφαιρείται το καλούπι από το δοκίμιο και πλέον μπορεί να υποστεί περεταίρω διεργασίες.

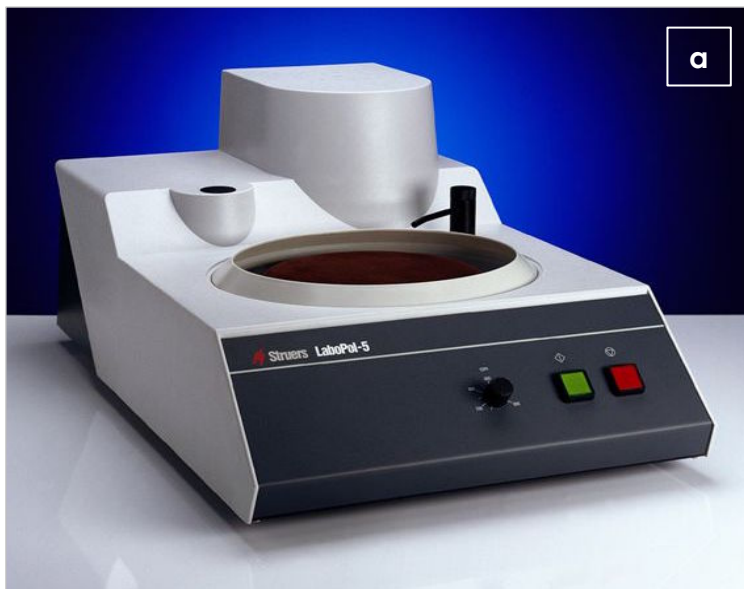


Εικόνα 5.5: (α) Εγκιβωτισμένα δοκίμια, (β) Struers EpoFix Resin & Hardener

5.5.3 Λείανση, στίλβωση & καθαρισμός

Για να γίνει η οπτική ανάλυση των δοκιμίων, είναι απαραίτητη η λείανσή τους. Λόγω της κοπής η επιφάνειά τους αλλοιώνεται σε κάποιο βαθμό, τουλάχιστον μικροσκοπικά. Προκειμένου λοιπόν να αφαιρεθεί το κατεστραμμένο επιφανειακό στρώμα, γίνεται χρήση των συσκευών λείανσης. Το Εργαστήριο διαθέτει τη συσκευή LaboPol-5 της Struers (Εικόνα 5.6α). Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 100 έως 500 στροφές ανά λεπτό, η οποία είναι εφικτή μέσω ενός ηλεκτρονικού σερβοσυστήματος που διασφαλίζει τη σταθερή ταχύτητα ανεξαρτήτως πίεσης. Για την ψύξη των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της λείανσης, χρησιμοποιείται η ενσωματωμένη παροχή νερού. Όσον αφορά τα λειαντικά χαρτιά με επίστρωση SiC που καταναλώθηκαν, είχαν μέγεθος κόκκων 120, 360, 500, 800, 1000, 2000, 4000 grit (dots/in²), και χρησιμοποιήθηκαν κατά αύξουσα σειρά.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της στίλβωσης, η οποία πραγματοποιείται στην ίδια συσκευή με τη διαφορά ότι στον περιστροφικό δίσκο τοποθετείται ειδικό βελούδινο χαρτί. Επιπλέον, κατά τη στίλβωση του δοκιμίου, προστίθεται και μικρή ποσότητα διαλύματος πυριτίας OP-U Suspension της Struers, με μέγεθος κόκκων 0,04 μm (Εικόνα 5.6β). Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η στίλβωση, το δοκίμιο βυθίζεται στο λουτρό υπερήχων ώστε να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες από την επιφάνειά του. Έπειτα διαβρέχεται με διάλυμα ακετόνης και στεγνώνεται με ρεύμα θερμού αέρα. Πλέον, το δοκίμιο είναι έτοιμο για παρατήρηση σε μικροσκόπιο.



Εικόνα 5.6: (α) Struers LaboPol-5, (β) Struers OP-U Suspension

5.6 Μικροσκοπία

Στη μικροσκοπία χρησιμοποιούνται τόσο τα οπτικά όσο και ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Αυτά τα όργανα είναι απαραίτητα ώστε να γίνει εφικτή η παρατήρηση των χαρακτηριστικών της μικροδομής για όλους τους τύπους των υλικών. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιούν και φωτογραφικό εξοπλισμό παράλληλα με το μικροσκόπιο.

5.6.1 Οπτικό μικροσκόπιο

Με τον όρο οπτική μικροσκοπία αναφερόμαστε στη μέθοδο παρατήρησης της μικροδομής ενός δοκιμίου. Η προς εξέταση επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου, μπορεί να γίνει είτε αμέσως μετά το στάδιο της στίλβωσης, είτε έπειτα από χημική προσβολή.

Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, δεν επιλέχθηκε να γίνει χημική προσβολή στα δοκίμια, καθώς το ενδιαφέρον εστιάστηκε στον τρόπο ανάμιξης των δύο υλικών αλλά και στις ατέλειες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση.

Το Εργαστήριο του Τομέα Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, διαθέτει το οπτικό μικροσκόπιο LEICA DMR (Εικόνα 5.7) το οποίο είναι κατάλληλα τροποποιημένο ώστε οι παρατηρούμενες τομές να προβάλλονται ταυτόχρονα και σε Η/Υ. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς εστίασης: x10, x20, x50, x100, καθώς επίσης και τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 5.7: Οπτικό Μικροσκόπιο LEICA DMR

5.6.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM)

Η σημαντικότερη ίσως τεχνική προσδιορισμού των δομικών χαρακτηριστικών των μετάλλων και της μορφολογίας της επιφάνειάς τους, είναι η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Η εικόνα που λαμβάνεται από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, σχηματίζεται από μία ηλεκτρονική δέσμη μικρού μήκους κύματος η οποία αλληλοεπιδρά με τα άτομα του προς μελέτη δοκιμίου, σαρώνοντας την επιφάνειά του. Έπειτα, η δέσμη συλλέγεται και στη συνέχεια εμφανίζεται με τον ίδιο ρυθμό σάρωσης σε μια ψηφιακή οθόνη ενός Η/Υ. Η εικόνα αυτή, αναπαριστά τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και μπορεί να μελετηθεί σε βάθος καθώς υπάρχει η δυνατότητα φωτογράφισής της.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μικροσκοπίας είναι μη καταστροφική και η μοναδική προϋπόθεση είναι το υλικό να είναι ή να καταστεί αγωγίμο. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνονται μεγεθύνσεις οι οποίες κυμαίνονται από 5 έως και 3×10^5 φορές, ανάλογα με τη δυναμική του οργάνου.

Στην παρούσα πειραματική έρευνα χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Jeol JSM-7610F. Το συγκεκριμένο μικροσκόπιο ανήκει στο Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών και παραχωρήθηκε άδεια χρήσης προκειμένου να γίνουν οι αναλύσεις.

5.7 Μικροσκληρομετρήσεις

Τα θερμικά και μηχανικά φορτία κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας, επιφέρουν αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού πολύ κοντά στην επιφάνεια, με μια από τις σημαντικότερες να είναι η σκληρότητα. Στη φυσική μεταλλουργία, ο όρος μικροσκληρομέτρηση αναφέρεται στη μέτρηση της σκληρότητας ενός σώματος μέσω της κάθετης διείσδυσης άλλου σκληρότερου σώματος και εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων στο υπό μελέτη υλικό, που κυμαίνονται από 1gr έως 1kgr. Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διάφορες γεωμετρίες διεισδυτών και κλίμακα επιβαλλόμενης φόρτισης, οι κυριότερες των οποίων είναι οι Brinell, Vickers, Rockwell C, Rockwell B.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μέτρησης σκληρότητας κατά Vickers. Στη μέθοδο αυτή εφαρμόζεται μια μικρή σταθερή δύναμη σε μια αδαμάντινη πυραμίδα, τετραγωνικής βάσης, της οποίας η γωνία κορυφής είναι

136°. Το πηλίκο της δύναμης που χρησιμοποιήθηκε προς την επιφάνεια του αποτυπώματος που προκλήθηκε από αυτή μας δίνει το μέτρο της επιφανειακής σκληρότητας. Η κλίμακα μέτρησης Vickers παίρνει τιμές από 5 έως 1000 Vickers, δίνεται σε kg/mm² και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

Όπου,

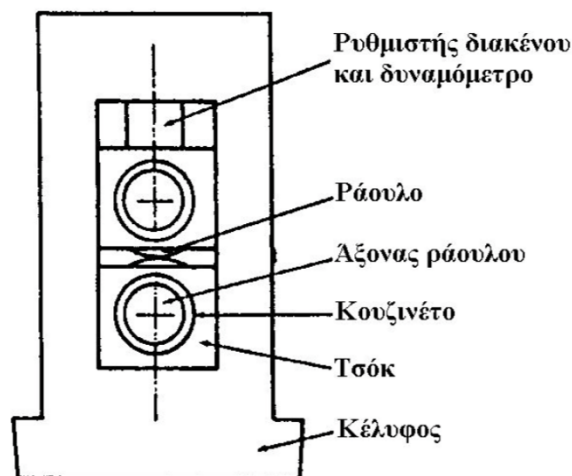
F: η εφαρμοζόμενη δύναμη

d: η μέση τιμή των διαγωνίων του αποτυπώματος

Κατά τη διενέργεια των πειραμάτων μικροσκληρομέτρησης, εφαρμόστηκε κάθετη δύναμη 305 gr για χρόνο 15 sec.

5.8 Η εργαλειομηχανή της έλασης

Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο και αποτελείται από τους κυλίνδρους (ράουλα/τύμπανα), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε ρουλεμάν και όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ένα ειδικό κέλυφος (Εικόνα 5.8)



Εικόνα 5.8: Σχηματική αναπαράσταση έλαστρου

Οι κύλινδροι (ράουλα) δημιουργούν θλιπτικές τάσεις στο υλικό λόγω της συμπίεσης αυτού ανάμεσά τους, καθώς και διατμητικές τάσεις στην επιφάνειά του, οι οποίες οφείλονται στην αναπτυσσόμενη, μεταξύ του μετάλλου και του κυλίνδρου, τριβή.

Η μείωση του πάχους του αρχικού υλικού, γίνεται είτε προοδευτικά με διαδοχικά περάσματα (πάσα) από το ίδιο έλαστρο, του οποίου το διάκενο μεταξύ των κυλίνδρων συνεχώς μειώνεται, είτε με συνεχή τρόπο, χρησιμοποιώντας συστοιχία ελαστρων.

Για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, η οποία αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα που μέσω ενός μειωτήρα, μοιράζει την κίνηση σε δύο άξονες και εν συνεχεία αυτοί οι άξονες κινούν τα ράουλα της διάταξης, πραγματοποιώντας την έλαση.



Εικόνα 5.9: Έλαστρο Εργαστηρίου

Κατά την πειραματική διαδικασία, πραγματοποιήθηκε επίπεδη εν ψυχρώ έλαση δύο διμεταλλικών δοκιμίων αλουμινίου – χαλκού που προέκυψαν από της προηγούμενες δοκιμές συγκολλήσεων με τη μέθοδο FSW. Το έλαστρο που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από δύο ράουλα διαμέτρου $D = 200 \text{ mm}$ και μήκους $L = 100 \text{ mm}$. Επίσης, στα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται ένα μηκυσιόμετρο Kistler για τη μέτρηση του φορτίου της έλασης και μια γέφυρα ηλεκτρομηκυσιομέτρων Kyowa για τη μέτρηση της ροπής στρέψης των ράουλων.

Όλη η διάταξη είναι συνδεδεμένη με σύστημα Η/Υ και η επεξεργασία των σημάτων γίνεται με το λογισμικό LabVIEW, ώστε να εξαχθούν οι πειραματικές καμπύλες φορτίου και ροπής συναρτήσεως του χρόνου, για κάθε γεωμετρία και ανά πάσο.

Για κάθε δοκίμιο, εκτελέστηκαν πέντε πάσα, μειώνοντας σε κάθε πάσο την απόσταση των ραουλων. Μετά από κάθε πάσο, μετρήθηκε με παχύμετρο το πάχος σε τρία διαφορετικά σημεία του δοκιμίου και υπολογίστηκε η μέση τιμή αυτού.

Κεφάλαιο 6^ο

Αποτελέσματα & Αξιολόγηση

6.1 Μεταλλογραφική παρατήρηση

Η οπτική μικροσκοπία χρησιμοποιήθηκε για τη λεπτομερή παρατήρηση του μικρογραφικού ιστού των συγκολλήσεων, έτσι ώστε να εντοπιστούν οι διάφορες ζώνες συγκόλλησης, οι πιθανές ατέλειες καθώς και η εμφάνιση διμεταλλικών ενώσεων.

6.1.1 Μελέτη συγκολλήσεων με οπτικό μικροσκόπιο

Παρακάτω επισυνάπτονται χαρακτηριστικές μικρογραφίες των μικροδομών όλων των δοκιμών, στα οποία παρατηρήθηκαν δομές άξιες σχολιασμού.

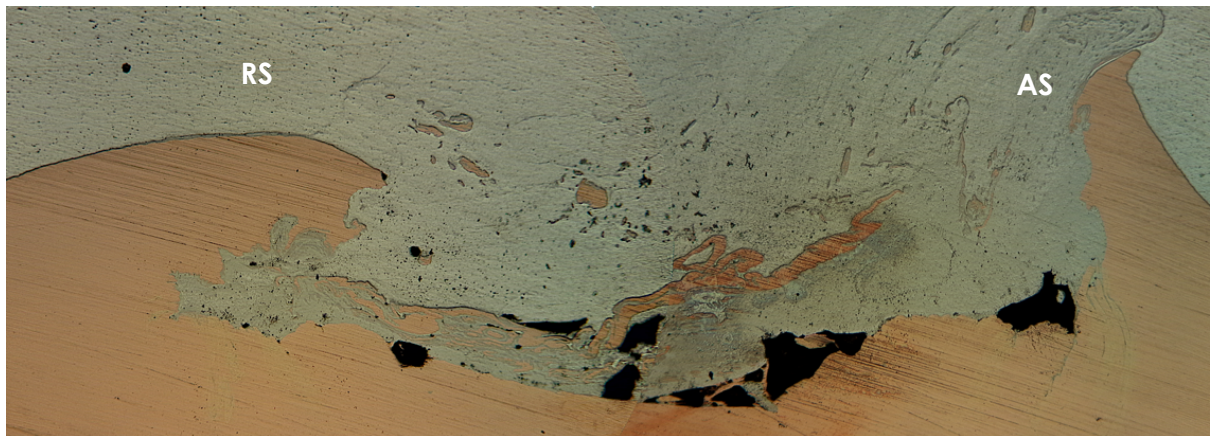
Δοκίμιο Νο1



Εικόνα 6.1: Δοκίμιο Νο1 – 1^ο πάσο, φακός x10



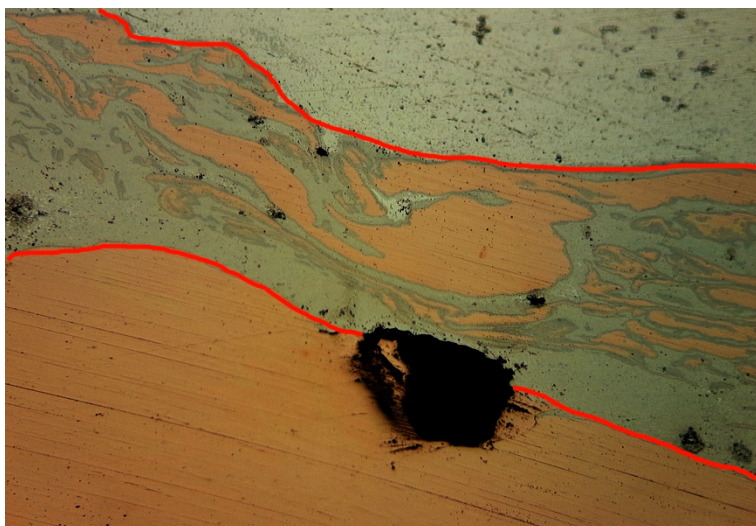
Εικόνα 6.2: Δοκίμιο Νο1 – 2^ο πάσο, φακός x10



Εικόνα 6.3: Δοκίμιο Νο1 – 4^ο πάσο, φακός x5

Από την εξέταση των μικροδομών των συγκολλήσεων του 1^{ου} δοκιμίου, παρατηρήθηκε η εμφάνιση κενών και αστοχιών τύπου τούνελ (με μαύρο χρώμα) (Εικόνες 6.1 έως 6.3). Το σύνολο αυτών των ελαττωμάτων εμφανίστηκε στον πυθμένα της συγκόλλησης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάδευση του πλαστικοποιημένου υλικού ήταν ανομοιόμορφη. Πιθανή αιτία μπορεί να ήταν η μικρή κάθετη δύναμη που ασκούσε το περιστροφικό εργαλείο κατά την συγκόλληση. Τα περισσότερα κενά εμφανίστηκαν στο 4^ο πάσο. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε συνδυασμό δύο ακόμα παραγόντων. Πρώτον, ο πείρος του περιστροφικού εργαλείου έπειτα από τη συγκόλληση των προηγούμενων πάσων είχε επικαθίσεις αλουμινίου και χαλκού στο σπείρωμά του, με αποτέλεσμα να μην διαχέει ομοιόμορφα το πλαστικοποιημένο υλικό στη ζώνη ανάδευσης. Δεύτερον, η αυξημένη θερμοκρασία του δοκιμίου ύστερα από τη συγκόλληση τριών πασών, ίσως εμπόδισε την ομαλή ροή του πλαστικοποιημένου υλικού από το πλήθος αποκολλημένων τεμαχιδίων χαλκού.

Επιπλέον, η εξέταση της μικροδομής έδειξε σε αρκετά σημεία το στρώμα μιας διαφορετικής δομής που έχει δημιουργηθεί (με σκούρο γκρι), περιβάλλοντας τα αποκολλημένα τεμαχίδια χαλκού (εντός της οριοθετημένης με κόκκινο περιοχής – Εικόνα 6.4). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αυτή η διαφορετική δομή ανήκει σε διμεταλλικές ενώσεις. Επίσης αυτή η δομή παρατηρήθηκε ως πολύ λεπτό στρώμα σε όλο το μήκος της διεπιφάνειας των δύο υλικών.



Εικόνα 6.4: Δοκίμιο Νο1 – 4^ο πάσο, φακός x20

Όσον αφορά την υπόλοιπη εικόνα του 1^{ου} δοκιμίου, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές στη μικροδομή και τα αποκολλημένα τεμαχίδια χαλκού ήταν ελάχιστα εντός των ζωνών ανάδευσης των τριών πρώτων πασών.

Σε γενικές γραμμές, η συγκολλήσεις που έγιναν με τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν ήταν ποιοτικά αποδεκτές, εξαιρώντας το 4^ο πάσο.

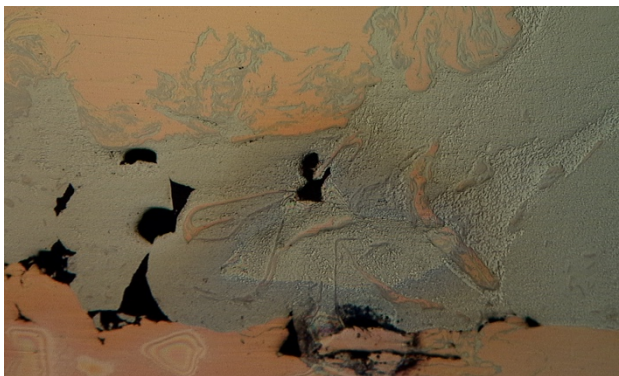
Δοκίμιο Νο2



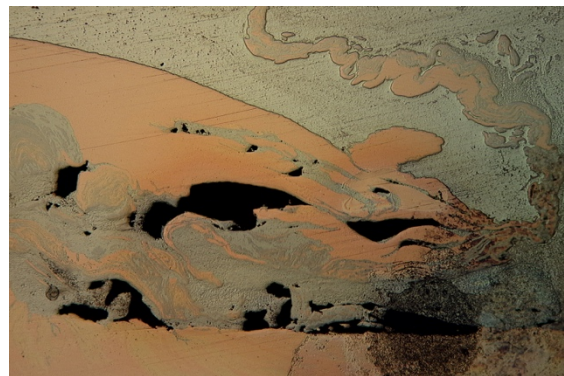
Εικόνα 6.5: Δοκίμιο Νο2 – 2^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.6: Δοκίμιο Νο2 – 4^ο πάσο, φακός x20



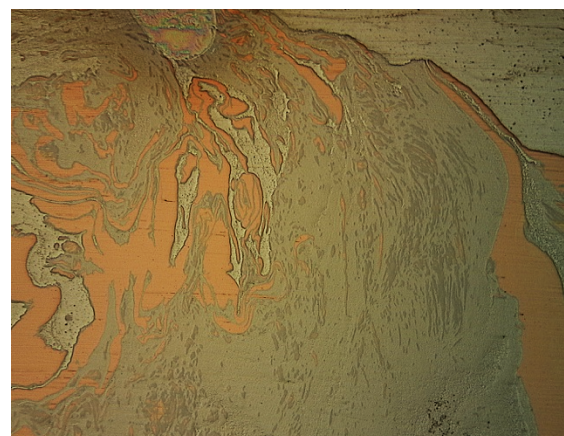
Εικόνα 6.7: Δοκίμιο Νο2 – 3^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.8: Δοκίμιο Νο2 – 4^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.9: Δοκίμιο Νο2 – 4^ο πάσο, φακός x5



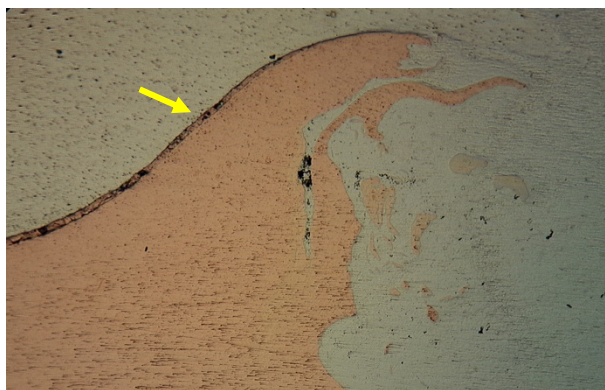
Εικόνα 6.10: Δοκίμιο Νο2 – 2^ο πάσο, φακός x5

Οι ραφές συγκόλλησης στο 2^ο δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν σε δύο στάδια. Αρχικά έγιναν οι τέσσερις ραφές και έπειτα το δοκίμιο αφέθηκε να ψυχθεί έως τη θερμοκρασία των 25°C. Στη συνέχεια, έγινε το δεύτερο ομόρροπο πέρασμα πάνω από κάθε προηγούμενη ραφή.

Από την εξέταση της μικροδομής, παρατηρήθηκε μεγάλος αριθμός κενών καθώς και αρκετές ρωγμές (Εικόνες 6.5 έως 6.9). Σε αντίθεση με τη μικροδομή του 1^{ου} δοκιμίου, τα κενά παρουσιάστηκαν σε όλα τα πάσα συγκολλήσεων. Κενά δεν δημιουργήθηκαν μόνο στη διεπιφάνεια των δύο μητρικών υλικών, αλλά και σε κεντρικά σημεία της ζώνης ανάδευσης. Επίσης τα διπλά περάσματα των συγκολλήσεων είχαν ως αποτέλεσμα να αποκολληθεί μεγάλος αριθμός τεμαχιδίων χαλκού καθώς και να δημιουργηθούν μεγάλες περιοχές διμεταλλικών ενώσεων γύρω τους και αλλά και μέσα στη ζώνη ανάδευσης (Εικόνα 6.10). Επιπλέον, η παρουσία τεμαχιδίων χαλκού διαφόρων μεγεθών εμπόδισε την ομοιόμορφη ανάμιξη του πλαστικοποιημένου υλικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένα σημεία παρατηρήθηκε, μακροσκοπικά, διαρροή χαλκού στην επιφάνεια της συγκόλλησης, γεγονός που αποδεικνύει το μεγάλο ποσοστό χαλκού που αφαιρέθηκε από το βασικό μέταλλο.

Δοκίμιο Νο3

Στο 3^ο δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δύο ομόρροπα περάσματα σε κάθε πάσο. Μετά το τέλος της κάθε ραφής συγκόλλησης, επαναλαμβανόταν η διαδικασία χωρίς να ψυχθεί το δοκίμιο. Μακροσκοπικά το δοκίμιο δεν φαινόταν να παρουσιάζει πολλά ελαττώματα, παρά μόνο τη διαρροή μητρικού χαλκού στην επιφάνεια της συγκόλλησης (Ενότητα 6.3.2 - Εικόνα 6.39) όπως και στο 2^ο δοκίμιο. Ωστόσο, μικροσκοπικά φάνηκαν κάποιες ρωγμές στις διεπιφάνειες των δύο υλικών (Εικόνες 6.11 έως 6.16), καθώς και κάποιες αστοχίες τύπου τούνελ (με μαύρο χρώμα). Στις ζώνες ανάδευσης παρατηρήθηκαν πολλά αποκολλημένα τεμαχίδια χαλκού διαφόρων μεγεθών (Εικόνα 6.12) καθώς και περιοχές διμεταλλικών ενώσεων, όμοιες με τα δύο προηγούμενα δοκίμια. Τέλος, η συνολική εικόνα των συγκολλήσεων του 3^{ου} δοκιμίου είναι αρκετά καλύτερη από του 2^{ου} δοκιμίου όσον αφορά το πλήθος των ελαττωμάτων αλλά και τη ροή του υλικού.



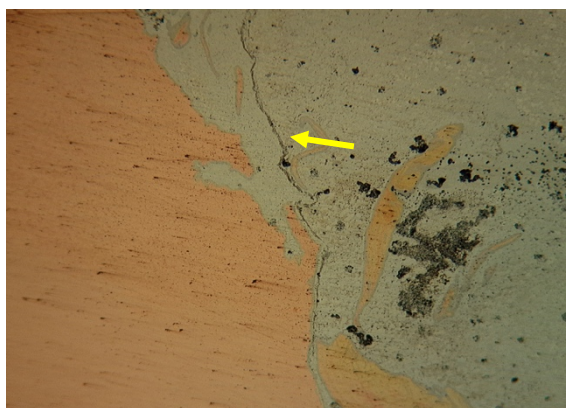
Εικόνα 6.11: Δοκίμιο Νο3 – 1^ο πάσο, φακός x5



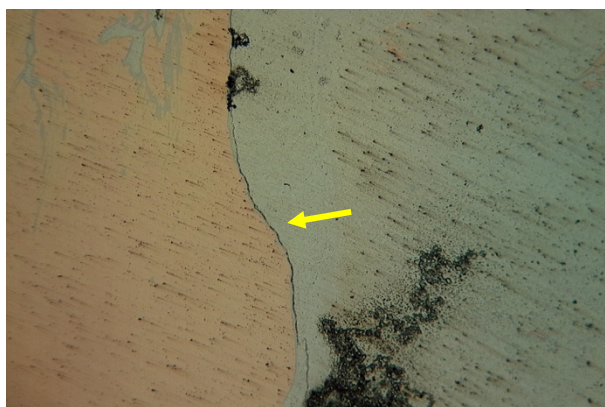
Εικόνα 6.12: Δοκίμιο Νο3 – 1^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.13: Δοκίμιο Νο3 – 1^ο πάσο, φακός x20



Εικόνα 6.14: Δοκίμιο Νο3 – 2^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.15: Δοκίμιο Νο3 – 3^ο πάσο, φακός x5

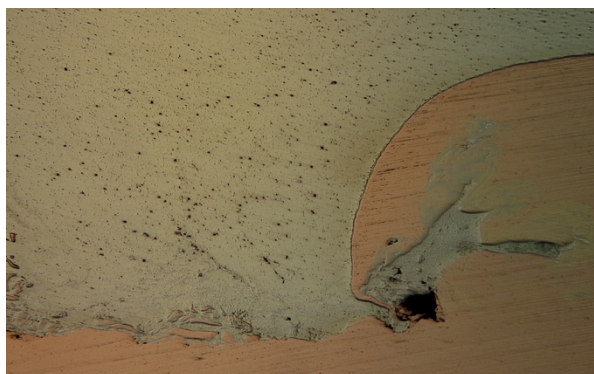


Εικόνα 6.16: Δοκίμιο Νο3 – 4^ο πάσο, φακός x5

Δοκίμιο Νο4

Όσον αφορά το 4^ο δοκίμιο, οι συγκολλήσεις του έγιναν με διαφορετικό περιστροφικό εργαλείο, μικρότερων διαστάσεων, όπως προαναφέρθηκε. Γι' αυτό το λόγο πάρθηκαν δύο δείγματα προς ανάλυση, ένα από την αρχή της συγκόλλησης και ένα από το τέλος της. Έτσι, από την παρατήρηση της μικροδομής των δύο τομών του

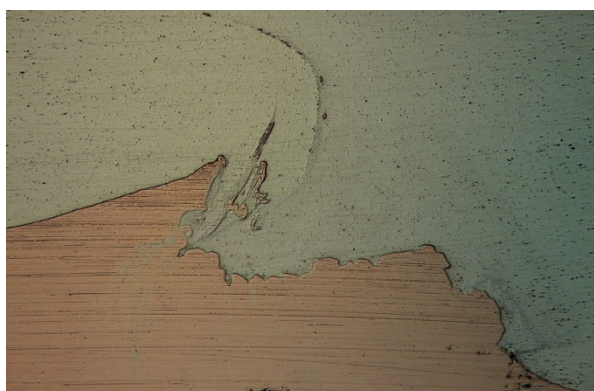
δοκιμίου, θα εξαχθούν πληρέστερα συμπεράσματα από την επίδραση του νέου περιστροφικού εργαλείου στις συγκολλήσεις.



Εικόνα 6.17: Δοκίμιο Νο4, αρχή συγκόλλησης, 1^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.18: Δοκίμιο Νο4, αρχή συγκόλλησης, 2^ο πάσο, φακός x5



Εικόνα 6.19: Δοκίμιο Νο4, αρχή συγκόλλησης, 4^ο πάσο, φακός x5



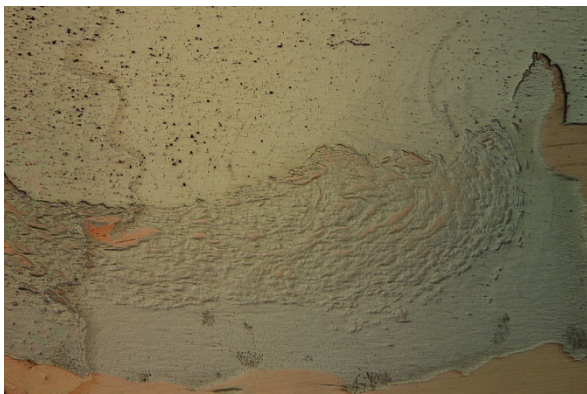
Εικόνα 6.20: Δοκίμιο Νο4, αρχή συγκόλλησης, 4^ο πάσο, φακός x5

Από την συνολική παρατήρηση της τομής του αρχικού τμήματος του 4^{ου} δοκιμίου εντοπίστηκαν ελάχιστες ατέλειες (κενά) και ομαλή ροή του πλαστικοποιημένου υλικού στη ζώνη ανάδευσης, όπως φαίνεται και στις επισυναπτόμενες μικρογραφίες (Εικόνες 6.17 έως 6.20). Το νέο περιστροφικό εργαλείο δεν έχει επηρεάσει αρκετά το χαλκό, ο οποίος διατηρεί τη συμπαγή μάζα του, με εξαίρεση λίγα αποκολλημένα τεμαχίδια εντός του κράματος αλουμινίου στη ζώνη ανάδευσης. Η παρουσία διμεταλλικών ενώσεων ήταν διακριτή, τόσο κατά μήκος της διεπιφάνειας των δύο υλικών, όσο και μέσα στη ζώνη ανάδευσης. Επιπλέον, δεν εντοπίστηκαν ρωγμές στο σύνολο της μικροδομής.

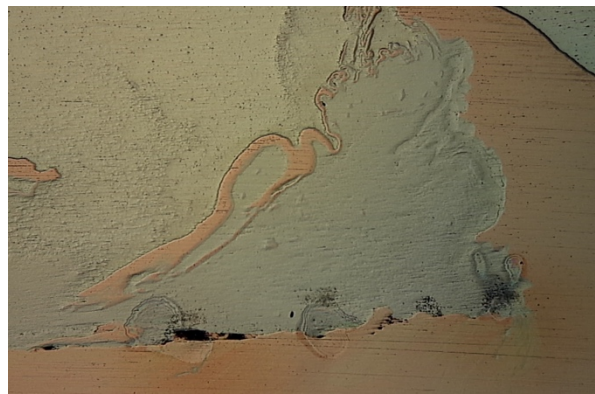
Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και η τομή του δοκιμίου από το τέλος της συγκόλλησης στις μικρογραφίες που θα ακολουθήσουν, με τη διαφορά ότι παρατηρήθηκαν περισσότερα τεμαχίδια χαλκού (Εικόνες 6.21 και 6.22). Αυτό είναι λογικό καθώς το θερμικό φορτίο που παράγεται λόγω τριβής από την περιστροφή του

εργαλείου αυξάνεται όσο εξελίσσεται η διαδικασία με αποτέλεσμα να αποκολλούνται περισσότερα τεμαχίδια.

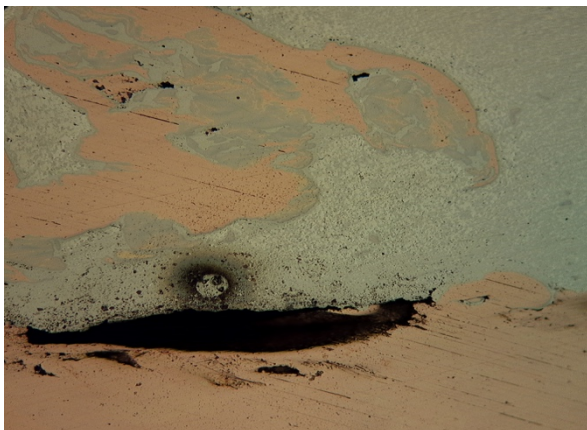
Επίσης παρατηρήθηκε σε αρκετά σημεία η χαρακτηριστική γκρι διμεταλλική ζώνη, στα όρια των δύο μητρικών μετάλλων, καθώς και περιμετρικά των αποκολλημένων τεμαχιδίων χαλκού (Εικόνες 6.21 έως 6.24). Η δημιουργία αυτής της ιδιαίτερης ζώνης, η οποία εμφανίστηκε στις συγκολλήσεις και των τεσσάρων δοκιμίων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Abdollah-Zadeh και των συνεργατών του από πειραματικές δοκιμές το 2008, οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής του περιστροφικού εργαλείου.



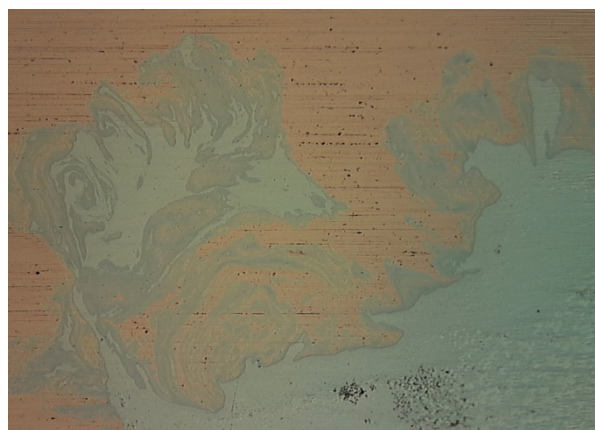
Εικόνα 6.21: Δοκίμιο Νο4, τέλος συγκόλλησης, 2^ο πάσο



Εικόνα 6.22: Δοκίμιο Νο4, τέλος συγκόλλησης, 3^ο πάσο



Εικόνα 6.23: Δοκίμιο Νο4, τέλος συγκόλλησης, 4^ο πάσο

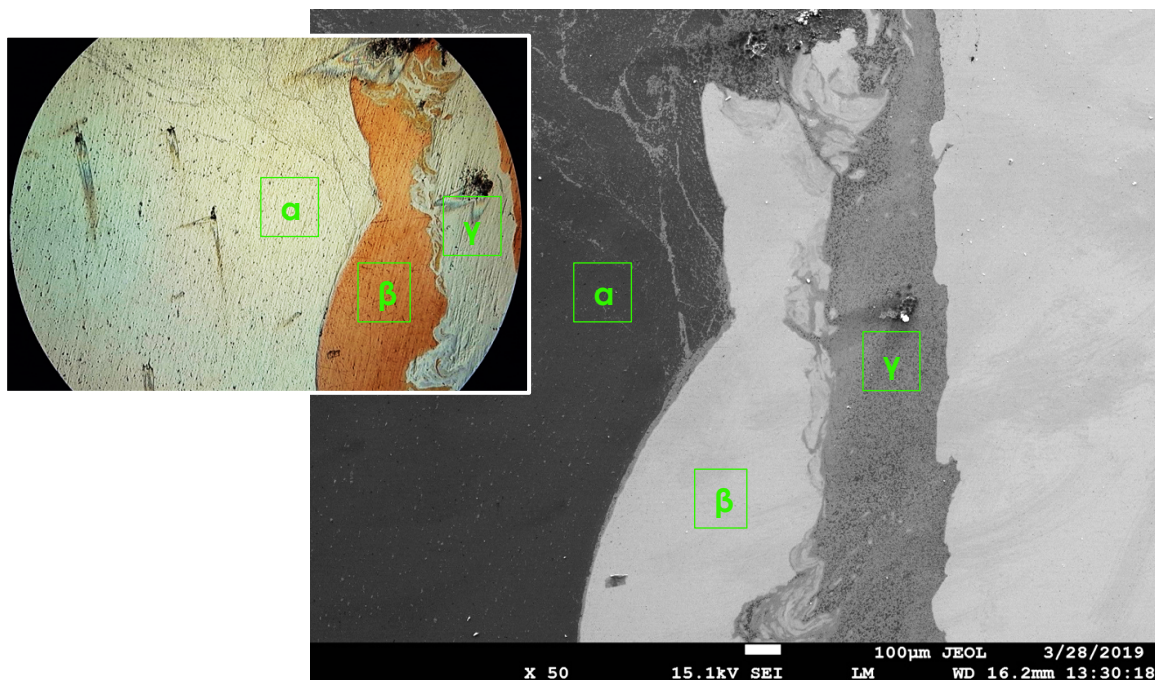


Εικόνα 6.24: Δοκίμιο Νο4, τέλος συγκόλλησης, 4^ο πάσο

Από την μεταλλογραφική παρατήρηση των τεσσάρων δοκιμίων, εκείνο που εμφάνισε τα λιγότερα ελλωτώματα και συνεπώς την ποιοτικότερη συγκόλληση των πάσων του, ήταν το 4^ο δοκίμιο. Γι' αυτό το λόγο, κρίθηκε αναγκαία η περαιτέρω μελέτη του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

6.1.2 Μελέτη συγκολλήσεων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες των εκπεμπόμενων δευτερογενών ηλεκτρονίων από τις σαρώσεις με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που αφορούν τη μικροδομή των πάσων του 4^{ου} δοκιμίου. Η διακριτοποίηση των δύο μετάλλων επιτυγχάνεται μέσω της εναλλαγής της έντασης της φωτεινότητας. Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές αντιστοιχούν στο χαλκό, οι σκουρόχρωμες στο αλουμίνιο, ενώ οι ενδιάμεσες αποχρώσεις του γκρι αντιστοιχούν σε ενδομεταλλικές φάσεις του κραματικού συστήματος Al-Cu που έχει δημιουργηθεί από μέθοδο FSW.



Εικόνα 6.25

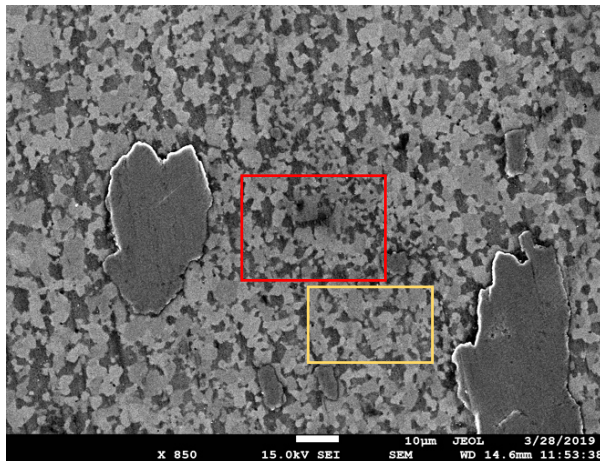
Από τις παραπάνω επισυναπτόμενες εικόνες φαίνονται ξεκάθαρα οι αποχρώσεις των βασικών μετάλλων αλλά και του διμεταλλικού στρώματος που έχει δημιουργηθεί από την ανάδευση του περιστροφικού εργαλείου. Οι περιοχές «α» και «β» αντιστοιχούν στα βασικά μέταλλα του αλουμινίου και του χαλκού, ενώ η περιοχή «γ» που έχει την ενδιάμεση απόχρωση των δύο προηγούμενων, αντιστοιχεί σε ενδομεταλλικές ενώσεις αλουμινίου και χαλκού (Εικόνα 6.25).

Παρακάτω παρουσιάζεται μια αντιπροσωπευτική περιοχή (Εικόνες 6.27 & 6.28) από τη μικροδομή της ζώνης ανάδευσης. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται η λεπτομερής κοκκομετρία μια μικρής περιοχής της ανωτέρω ζώνης η οποία αποτελείται από αλουμίνιο και διαφορετικές φάσεις του νέου κραματικού στοιχείου Al-Cu.

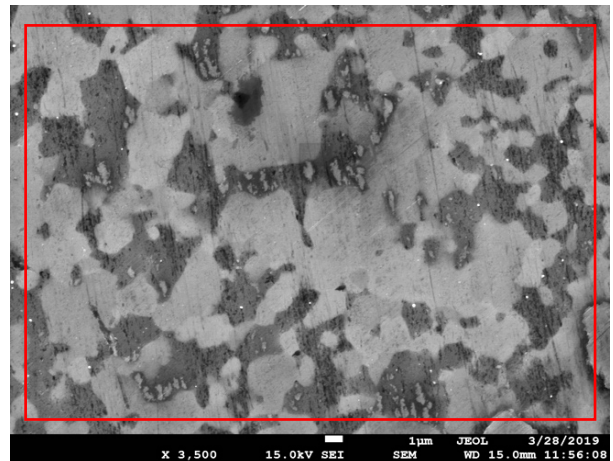
Η διάχυση των ατόμων Cu στο πλέγμα του Al, σε συνδυασμό με την έντονη διαφορά της σχετικής ατομικής μάζας τους (A_{rCu} : 63 , A_{rAl} : 29), έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή διαφορετικής ποσότητας δευτερογενών ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια της σάρωσης με SEM και ως εκ τούτου τη διαβάθμιση της φωτεινότητας.

Η μέγιστη διαλυτότητα του Cu στο Al είναι 5,65%wt, συνεπώς οι σκουρόχρωμοι κόκκοι περιέχουν Al με περιεκτικότητα τουλάχιστον 94,35%wt, ενώ οι ανοιχτόχρωμοι κόκκοι περιέχουν περισσότερο Cu σε βάρος του Al.

Σύμφωνα με το διφασικό διάγραμμα Al-Cu (Εικόνα 3.1) και τις αναλύσεις της εν λόγω περιοχής, όσο αυξάνεται η παρουσία Cu και η περιεκτικότητά του είναι έως ~33%wt, σχηματίζονται κόκκοι θ-φάσης ($CuAl_2$) παράλληλα με τους κορεσμένους από Cu κόκκους Al. Αντίστοιχα, όταν η περιεκτικότητα των κόκκων σε Cu είναι μεγάλη και έως ~60%wt, σχηματίζεται η γ1-φάση (Cu_9Al_4).

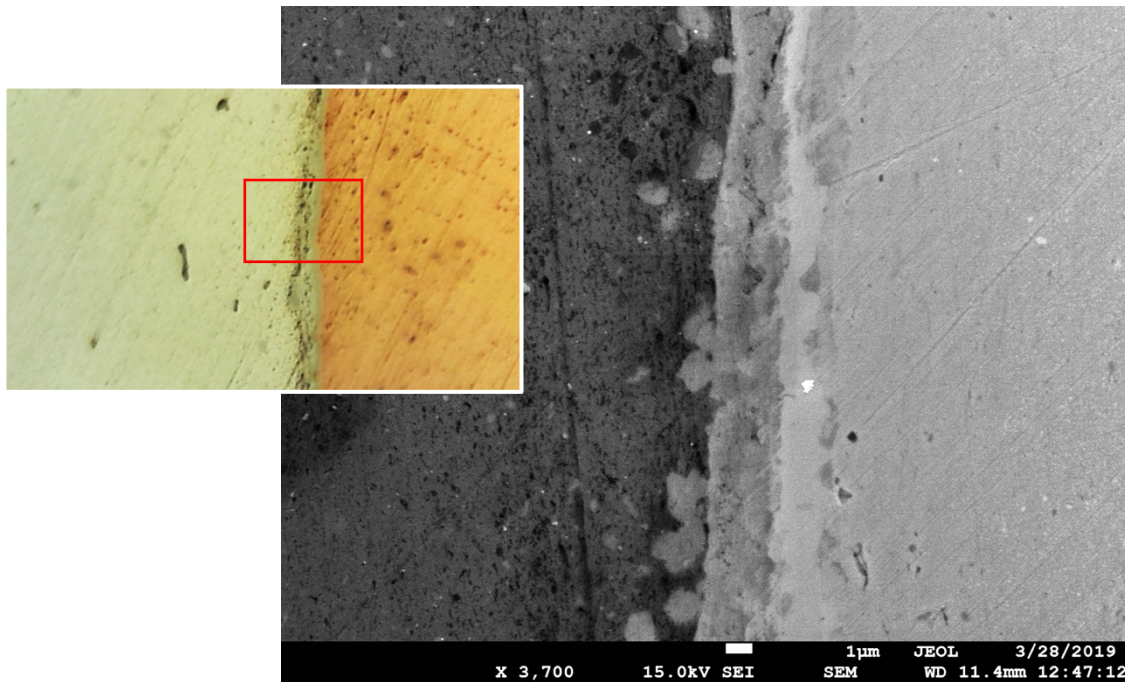


Εικόνα 6.27: Περιοχή ζώνης συγκόλλησης



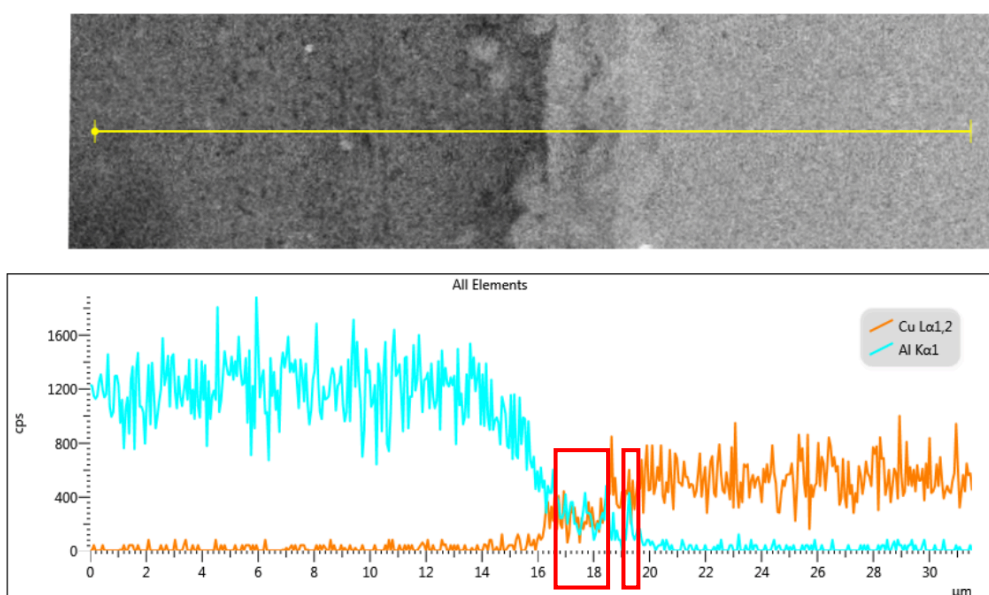
Εικόνα 6.28: Οριοθετημένη με κόκκινο περιοχή της Εικόνας 6.27

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ένα από τα σημεία που εμφανίζονταν το διμεταλλικό στρώμα, ήταν είτε κατά μήκος της διεπιφάνειας των δύο μετάλλων, είτε γύρω από τα αποκολλημένα τεμαχίδια χαλκού εντός της ζώνης ανάδευσης. Η παρατήρηση αυτών των περιοχών με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, έδειξε πως είχαν δημιουργηθεί επιμέρους ζώνες εντός του στρώματος, με διαφορετικές περιεκτικότητες αλουμινίου και χαλκού (Εικόνα 6.29).



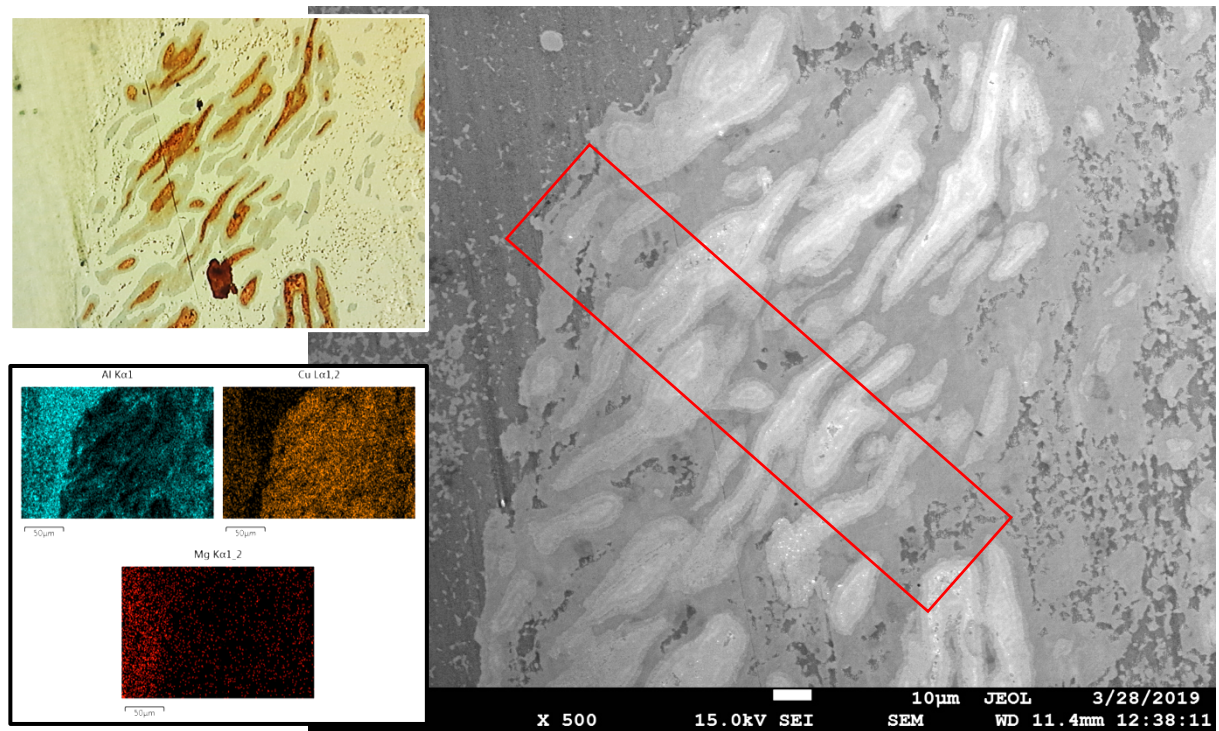
Εικόνα 6.29

Η εγκάρσια «σάρωση γραμμής» της διεπιφάνειας (line scan) που πραγματοποιήθηκε εντός της οριοθετημένης με κόκκινο περιοχής (Εικόνα 6.30), επιβεβαίωσε την αρχική εκτίμηση πως έχει επέλθει ανάμιξη των δύο βασικών μετάλλων, δημιουργώντας ένα νέο κραματικό σύστημα αλουμινίου και χαλκού. Το πάχος της νέας κραματικής ζώνης μετρήθηκε σε 2.7 µm, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

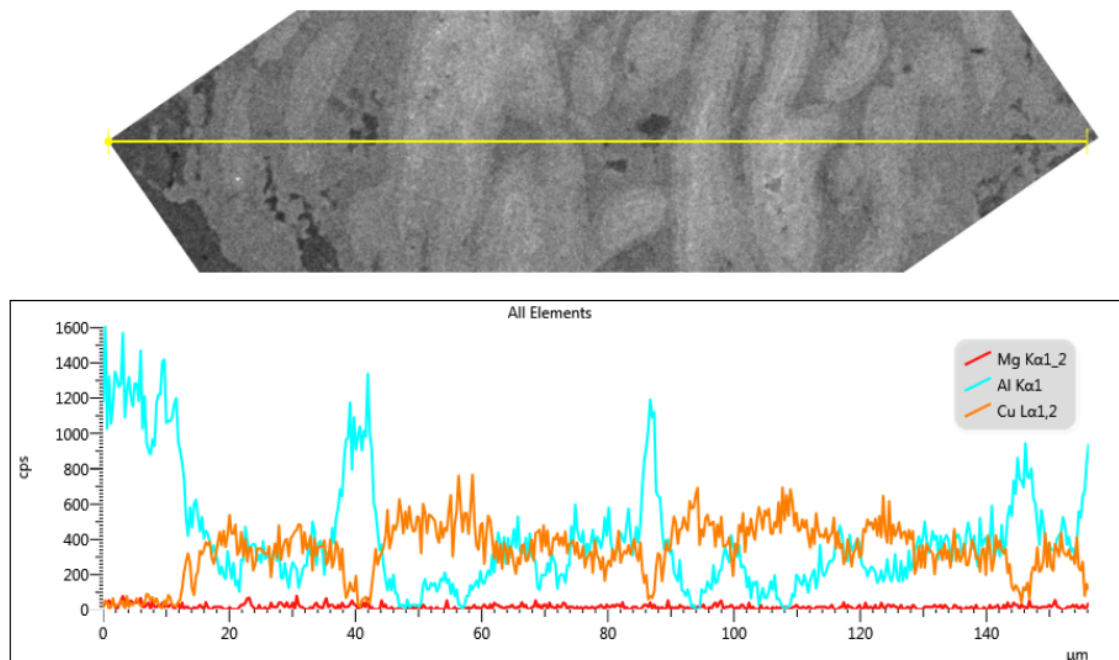


Εικόνα 6.30

Αντίστοιχη είναι και η περίπτωση των αποκολλημένων τεμαχιδίων χαλκού εντός της ζώνης ανάδευσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



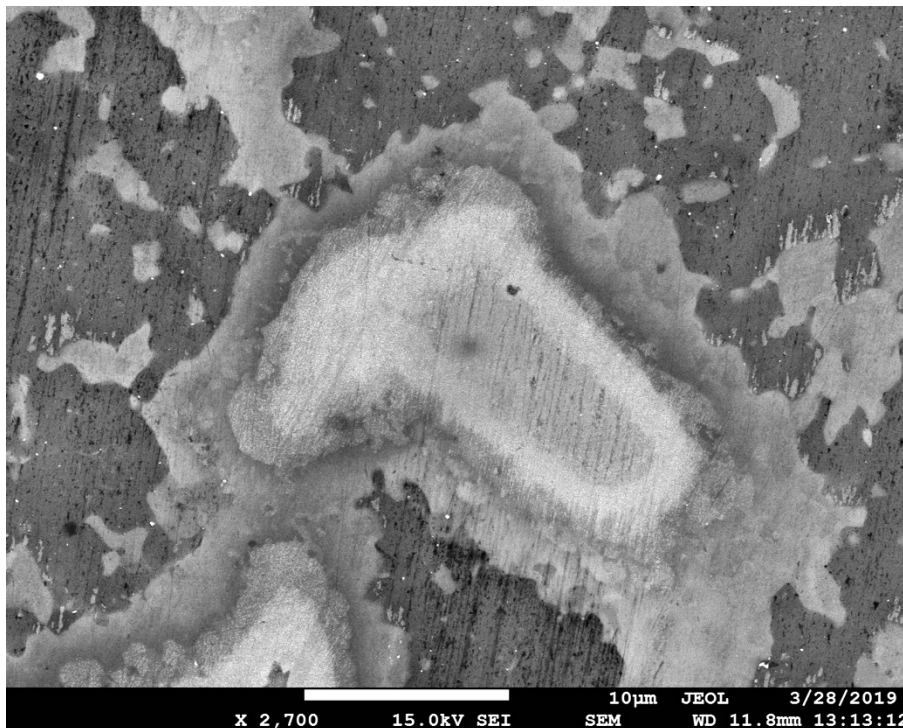
Εικόνα 6.31



Εικόνα 6.32:

Στη συγκεκριμένη «σάρωση γραμμής» (Εικόνα 6.32) φαίνεται ξεκάθαρα ο σχηματισμός του νέου κραματικού συστήματος, γύρω από τις αποκολλημένες νησίδες χαλκού. Επιπλέον παρατηρείται η πλήρης ενσωμάτωση αυτού του διμεταλλικού στρώματος στη ζώνη ανάδευσης, με την απουσία ατελειών και ελαττωμάτων.

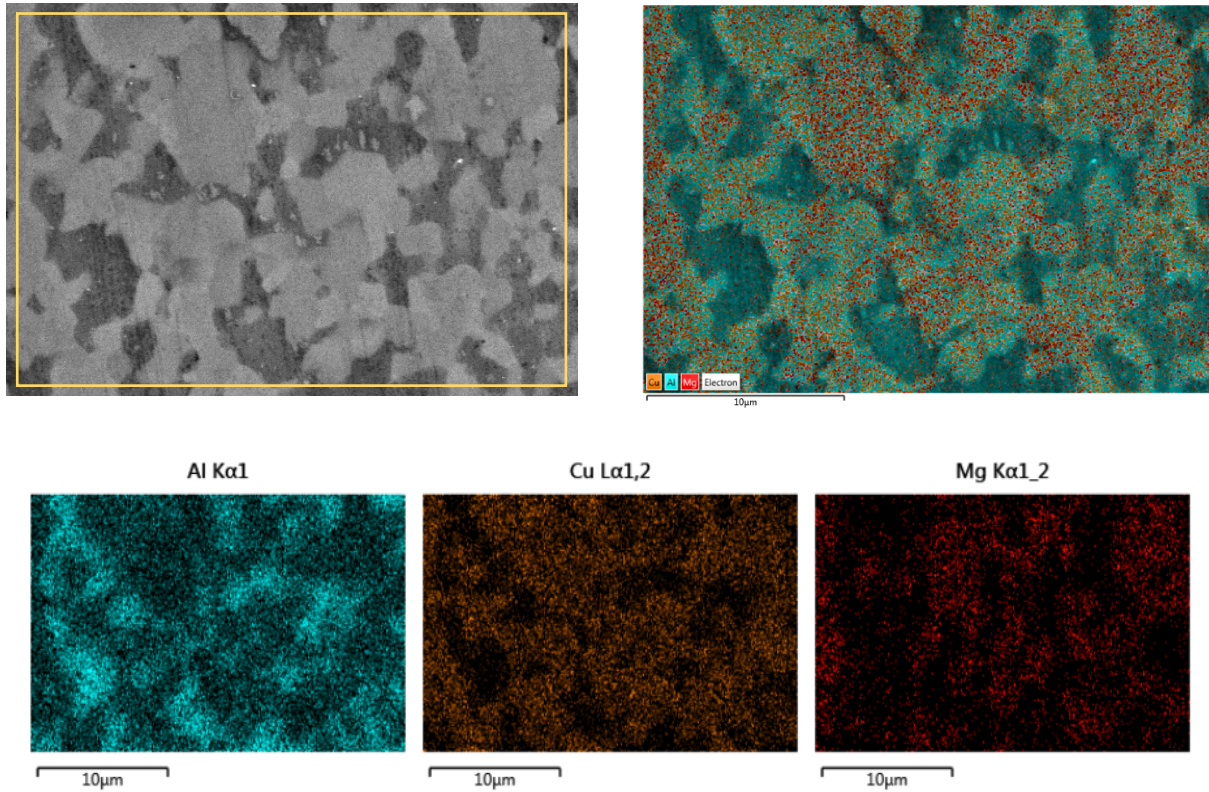
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της ενσωμάτωσης αποτελεί η ακόλουθη δομή (Εικόνα 6.33), στην οποία φαίνονται διαφορετικές φάσεις του κραματικού συστήματος Al-Cu που συνυπάρχουν. Η κεντρική νησίδα χαλκού περιβάλλεται από ζώνες ενδομεταλλικών ενώσεων, διαφορετικής περιεκτικότητας σε αλουμίνιο και χαλκό. Η διακριτοποίηση των ζωνών γίνεται από την διαφορετική ένταση της φωτεινότητας. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του χαλκού στους νέους διμεταλλικούς κόκκους της ζώνης, τόσο αυτή κερδίζει φωτεινότητα. Αντίστοιχα, η σκουρόχρωμες περιοχές αποτελούνται από κόκκους με υψηλή περιεκτικότητα αλουμινίου.



Εικόνα 6.33

Επιπρόσθετα, για να αποδοθεί μια πληρέστερη εικόνα της σύστασης της ζώνης ανάδευσης της συγκόλλησης, επισυνάπτεται μια υποπεριοχή της (Εικόνα 6.34), όπου ποσοτικοποιήθηκε (mapping) η συμμετοχή του καθενός από τα δύο βασικά μέταλλα εντός αυτής της ζώνης. Η ποσοτικοποίηση κατέστη δυνατή με τη βοήθεια του λογισμικού του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους κλασματικούς όγκους συμμετοχής των βασικών μετάλλων,

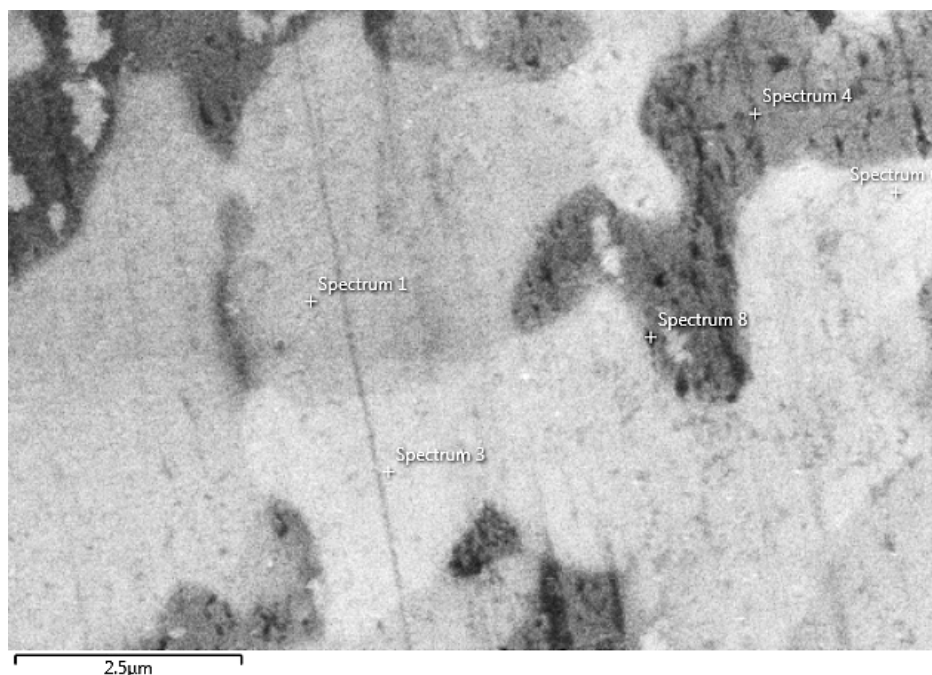
αντιστοιχούν σε 54,55% για το αλουμίνιο (γαλάζια απόχρωση) και 40,91% για τον καθαρό χαλκό (πορτοκαλί απόχρωση). Το υπόλοιπο 4,54% αντιστοιχεί σε μαγνήσιο (κόκκινη απόχρωση) και το οποίο προέρχεται από την κραματική προσθήκη στο μητρικό αλουμίνιο 5083.



Εικόνα 6.34: Mapping της οριοθετημένης με κίτρινο περιοχής της Εικόνας 6.27

Η περαιτέρω μελέτη των εν λόγω περιοχών με τη χρήση της σημειακής ανάλυσης (spot analysis) θα μπορέσει να μας δώσει μια **εκτίμηση** των ενδομεταλλικών φάσεων που έχουν σχηματιστεί, ανάλογα με το ποσοστό χαλκού και αλουμινίου που περιέχουν, και σύμφωνα με το διάγραμμα φάσεων Al-Cu . Ωστόσο, για την ακριβή ταυτοποίηση και επιβεβαίωση των νέων κραματικών συστημάτων πρέπει να γίνει και χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι στοιχειακές αναλύσεις που αφορούν μια μικρή περιοχή της ζώνης ανάδευσης (Εικόνα 6.35 & Πίνακας 6.1). Επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι οι ανοιχτόχρωμες περιοχές (κόκκοι) είναι πλούσιες σε χαλκό, σε αντίθεση με τις σκουρόχρωμες περιοχές που το ποσοστό συμμετοχής του Cu στη σύσταση των κόκκων είναι αισθητά μικρότερο.



Εικόνα 6.35

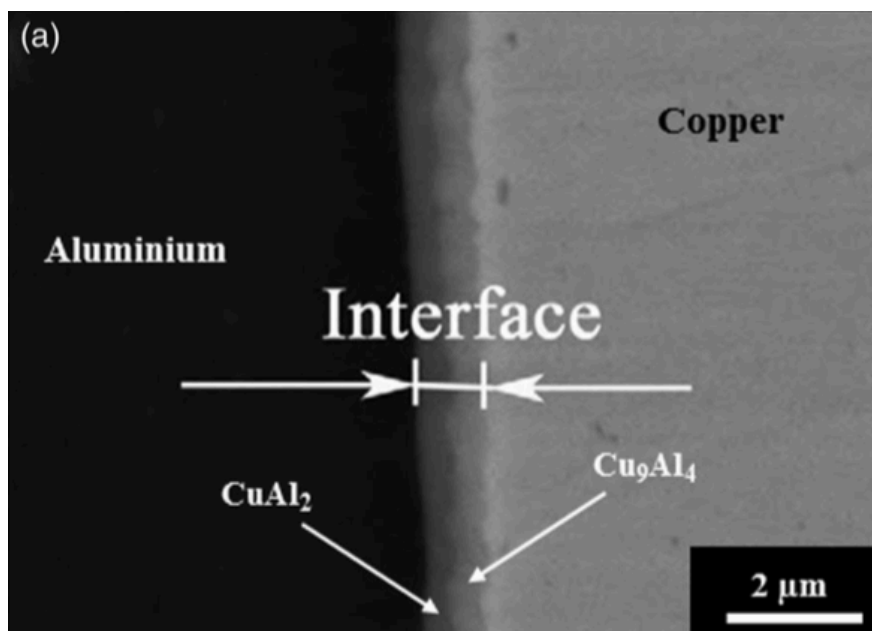
	Spectrum 1 Wt %	Spectrum 3 Wt %	Spectrum 4 Wt %	Spectrum 6 Wt %	Spectrum 8 Wt %
Al	39,13	41,30	81,58	48,08	56,00
Cu	47,83	58,70	18,42	51,92	44,00
Mg	13,04	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 6.4

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι ενδομεταλλικές φάσεις που δύνανται να σχηματιστούν κατά την εφαρμογή της μεθόδου FSW, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη, περιλαμβάνει τις φάσεις που είναι πλούσιες σε αλουμίνιο και ευνοούν το σχηματισμό της θ-φάσης (CuAl_2), ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις φάσεις που είναι πλούσιες σε χαλκό, ευνοώντας το σχηματισμό της γ_1 -φάσης (Cu_9Al_4). Και στις δύο κατηγορίες, το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα είναι η διάχυση. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση τα άτομα χαλκού, ως άτομα πρόσμιξης, υποκαθιστούν τα άτομα υποδοχής στο στερεό διάλυμα αλουμινίου. Όμοια, στη

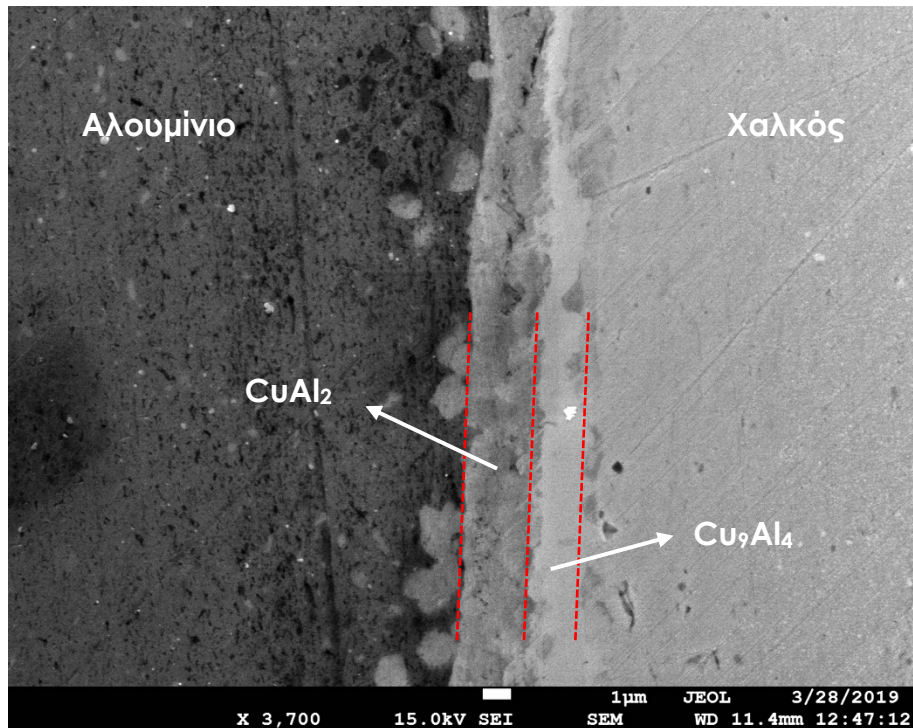
δεύτερη περίπτωση τα άτομα αλουμινίου υποκαθιστούν τα άτομα χαλκού. Καθοριστικοί παράγοντες για να συμβεί το φαινόμενο της διάχυσης είναι η έντονη πλαστική παραμόρφωση που υφίστανται τα υλικά, καθώς και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Με τις χαμηλές θερμοκρασίες ευνοείται η ανάπτυξη CuAl_2 , ενώ με υψηλότερες θερμοκρασίες ο σχηματισμός Cu_9Al_4 .

Οι ερευνητικές ομάδες των Xue (2010, 2011), Genevois (2011), Avettand-Fenoel (2012), παρατήρησαν το σχηματισμό δύο στρωμάτων διμεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια Al-Cu με τη μέθοδο FSW. Το στρώμα από τη μεριά του αλουμινίου αποτελούνταν από CuAl_2 , ενώ το στρώμα από τη μεριά του χαλκού αποτελούνταν από Cu_9Al_4 (Εικόνα 6.36).



Εικόνα 6.36: Μετωπική συγκόλληση FSW κραμάτων AA 1060/pure Cu

Με βάση τα παραπάνω και επειδή κατά την παρατήρηση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εντοπίστηκαν όμοιες δομές στο 4^ο δοκίμιο (Εικόνα 6.37), μπορεί να γίνει η εκτίμηση ότι εμφανίστηκαν οι ίδιες ενδομεταλλικές ενώσεις. Επιπλέον η ανάλυση από την εγκάρσια «σάρωση γραμμής» της διεπιφάνειας (Εικόνα 6.30), έδειξε την ύπαρξη δύο περιοχών (με κόκκινο περίγραμμα) στις οποίες αναπτύχθηκαν ενδομεταλλικές ενώσεις.



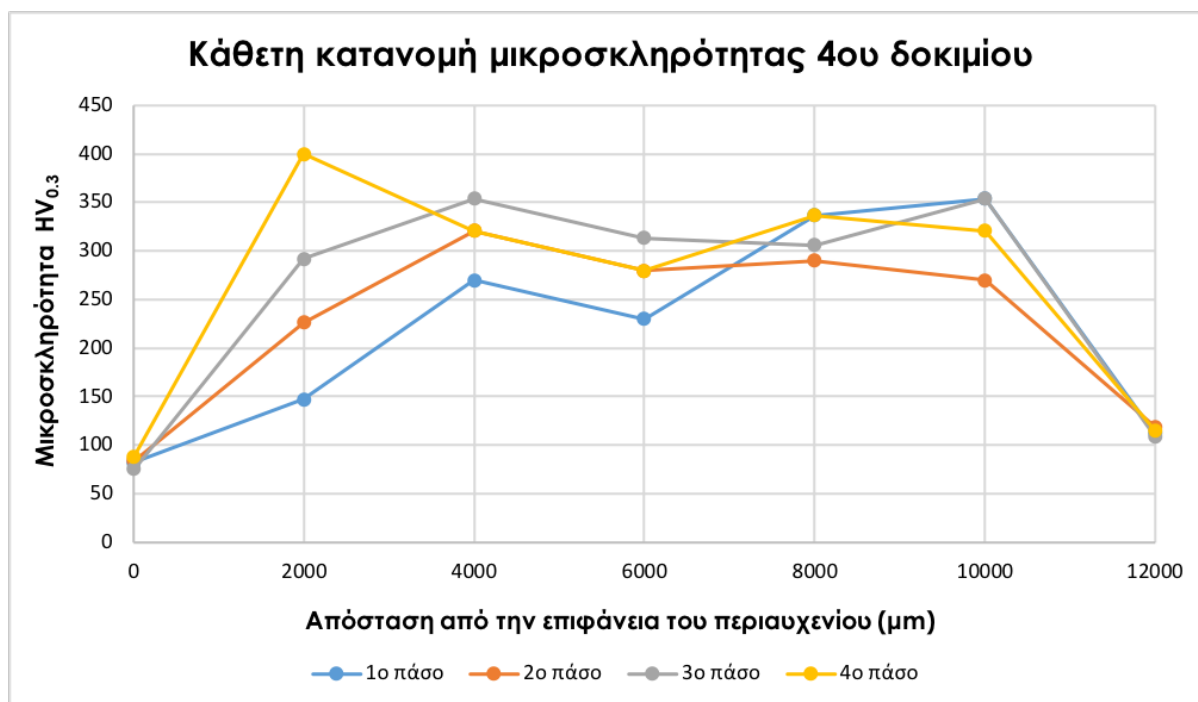
Εικόνα 6.37

Αξίζει να σημειωθεί ότι άλλοι ερευνητές όπως ο Tan (2013) και οι Muthu & Jayabalan (2015) υποστήριξαν πως στις πειραματικές τους έρευνες συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου με χαλκό με τη μέθοδο FSW, εντόπισαν ένα επιπλέον ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ των προαναφερόμενων. Ο μεν πρώτος και η ομάδα του βρήκε την ένωση Cu_3Al_2 , ενώ η ομάδα του δεύτερου εντόπισε ενδιάμεσα στρώμα της ένωσης CuAl .

6.2 Κατανομή μικροσκληρότητας

Στο ακολούθως παρατιθέμενο Διάγραμμα 6.1, παρουσιάζεται η κατανομή της μικροσκληρότητας του υπό μελέτη 4^{ου} δοκιμίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις ραφές συγκόλλησης, κατά τον κάθετο άξονα της κάθετης τομής του. Η κατανομή της μικροσκληρότητας μελετήθηκε σε απόσταση περίπου 2000 μm κάτω από την επιφάνεια του περιαιχηνίου, λαμβάνοντας μετρήσεις σε όλες τις ζώνες συγκόλλησης.

- > Ο σταθμισμένος μέσος όρος 4 μικροσκληρομετρήσεων στην επιφάνεια του κράματος αλουμινίου AA5083, έδωσε τιμή 83 HV με τυπική απόκλιση $\pm 1\%$.
- > Ο σταθμισμένος μέσος όρος 4 μικροσκληρομετρήσεων στην επιφάνεια του καθαρού χαλκού, έδωσε τιμή 114 HV με τυπική απόκλιση $\pm 1\%$.



Διάγραμμα 6.1

Στο παραπάνω Διάγραμμα 6.1 παρατηρείται η αύξηση της μικροσκληρότητας στη ζώνη ανάδευσης, σε σχέση με αυτή του αλουμινίου και του χαλκού. Επιπλέον όμως, παρατηρείται και μια σταδιακή αύξηση των τιμών ανά πάσο συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι η ζώνη ανάδευσης αποτελείται από ένα νέο κραματικό σύστημα όπου έχει επέλθει ανάμειξη μεταξύ αλουμινίου και χαλκού δημιουργώντας ένα νέο και σκληρότερο κράμα και αφετέρου στη συνεχή αύξηση της προσφερόμενης θερμότητας στο δοκίμιο, από τη δημιουργία νέων πάσων.

Στη σκλήρυνση της ζώνης ανάδευσης συνεισφέρουν περιοχές χαμηλής σκληρότητας (ζώνες υψηλής ποσοστιαίας συμμετοχής του κράματος αλουμινίου AA5083) καθώς και περιοχές μεγαλύτερης σκληρότητας (υψηλή συγκέντρωση του χαλκού), οι οποίες ανάλογα με τις συνθήκες συγκόλλησης που επικρατούν, αναδεύονται ομοιόμορφα ή μη. Το αποτέλεσμα αυτό συνάδει και με τη διεθνή βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία δημιουργούνται μεγαλύτερες ή μικρότερες περιοχές εντός της ζώνης ανάδευσης, με διαφοροποίηση στη σκληρότητα και την ευθραυστότητά τους.

6.3 Δοκιμές ψυχρής έλασης

6.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων

Από την κατεργασία της ψυχρής έλασης που υποβλήθηκαν τα συγκολλημένα δοκίμια, εξετάστηκε η μικροδομή τους καθώς και τα ελαττώματα που παρουσίασαν, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά. Επιπλέον, η έλαση ενδείκνυται ως ένας έμμεσος τρόπος ελέγχου των συγκολλήσεων.

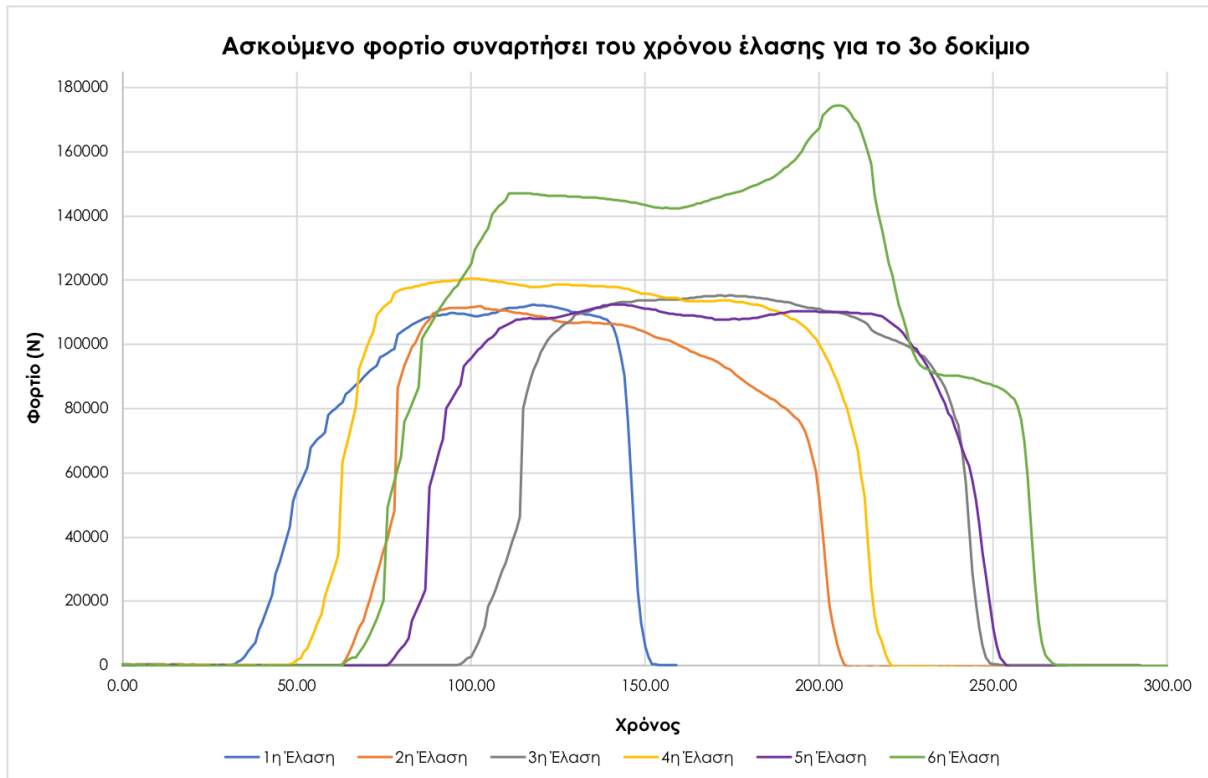
Η μείωση της διατομής των τυμπάνων ήταν 0,50 mm ανά έλαση και ανά 1,00 mm μείωσης απόστασης, λαμβάνονταν τομή από κάθε δοκίμιο για την περαιτέρω μελέτη τους στο οπτικό μικροσκόπιο.

Παρακάτω παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν τη μείωση πάχους ανά έλαση, τα φορτία και τις ροπές που μετρήθηκαν κατά την κατεργασία, ενδεικτικές φωτογραφίες της τελικής μορφής των δοκιμίων έπειτα από κάθε έλαση, καθώς και μικρογραφίες της δομής της συγκόλλησης.

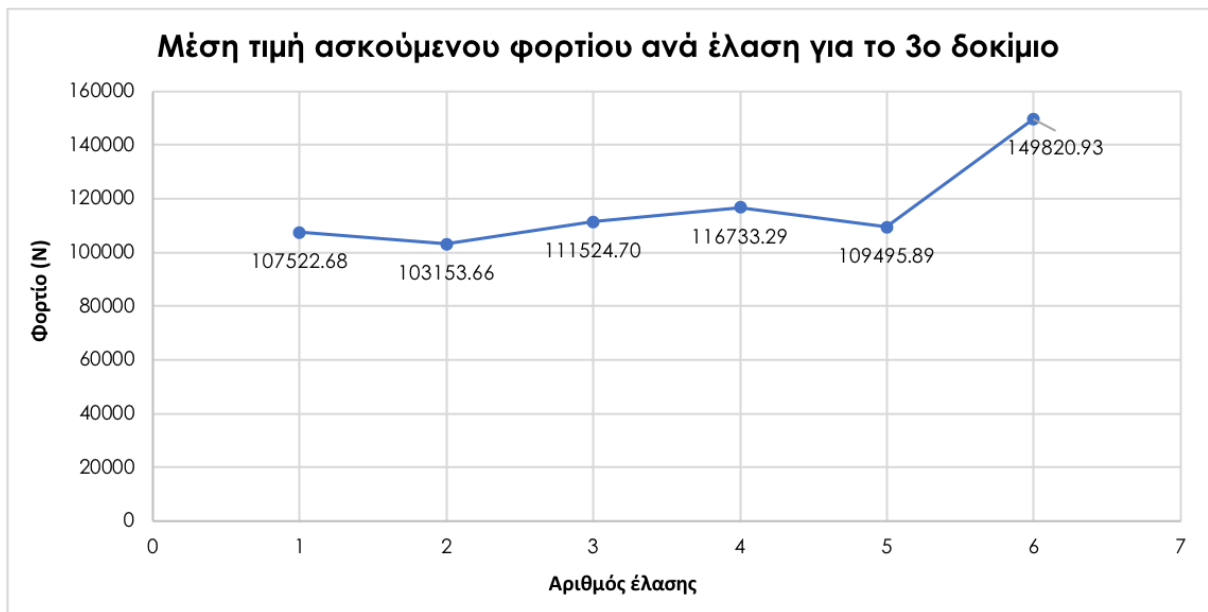
Οι μετρήσεις πάχους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2, πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρονικό παχύμετρο. Κάθε τιμή πάχους έχει προκύψει από τον μέσο όρο των τιμών που μετρήθηκαν σε κάθε δοκίμιο, έπειτα από κάθε πάσο έλασης.

	Δοκίμιο Νο3 (μέσο πάχος)	Δοκίμιο Νο4 (μέσο πάχος)	Ποσοστό μείωσης πάχους σε σχέση με το αρχικό
Αρχικό πάχος	5,00 mm	5,00 mm	-
1^η έλαση	4,42 mm	4,42 mm	11,60 %
2^η έλαση	4,00 mm	4,00 mm	20,00 %
3^η έλαση	3,46 mm	3,46 mm	30,80 %
4^η έλαση	3,02 mm	3,02 mm	39,60%
5^η έλαση	2,50 mm	2,50 mm	50,00 %
6^η έλαση	2,04 mm	2,04 mm	59,20 %

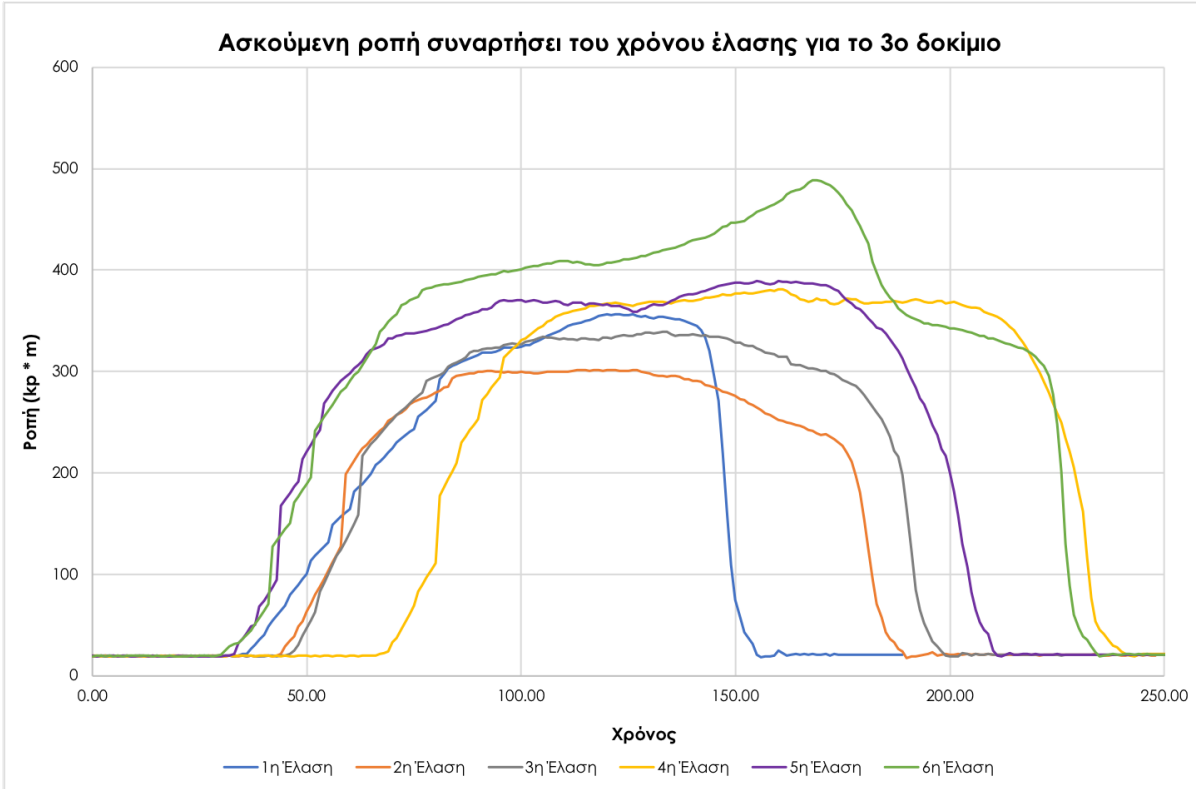
Πίνακας 6.5



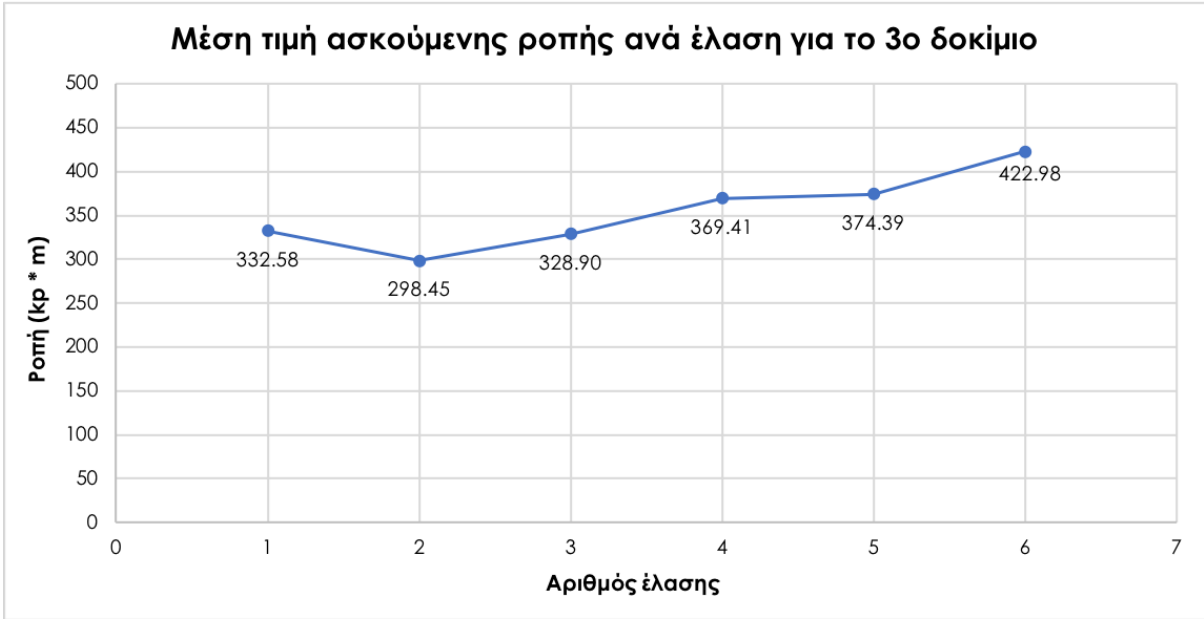
Διάγραμμα 6.2



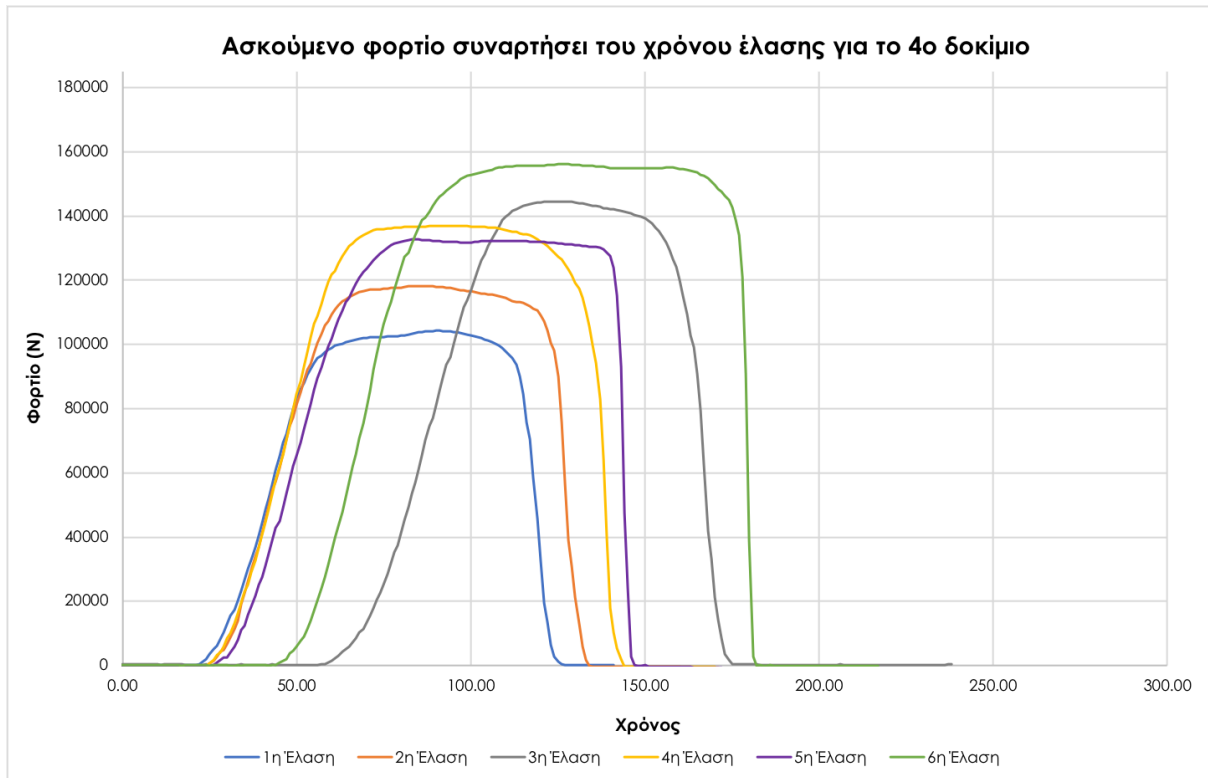
Διάγραμμα 6.3



Διάγραμμα 6.4



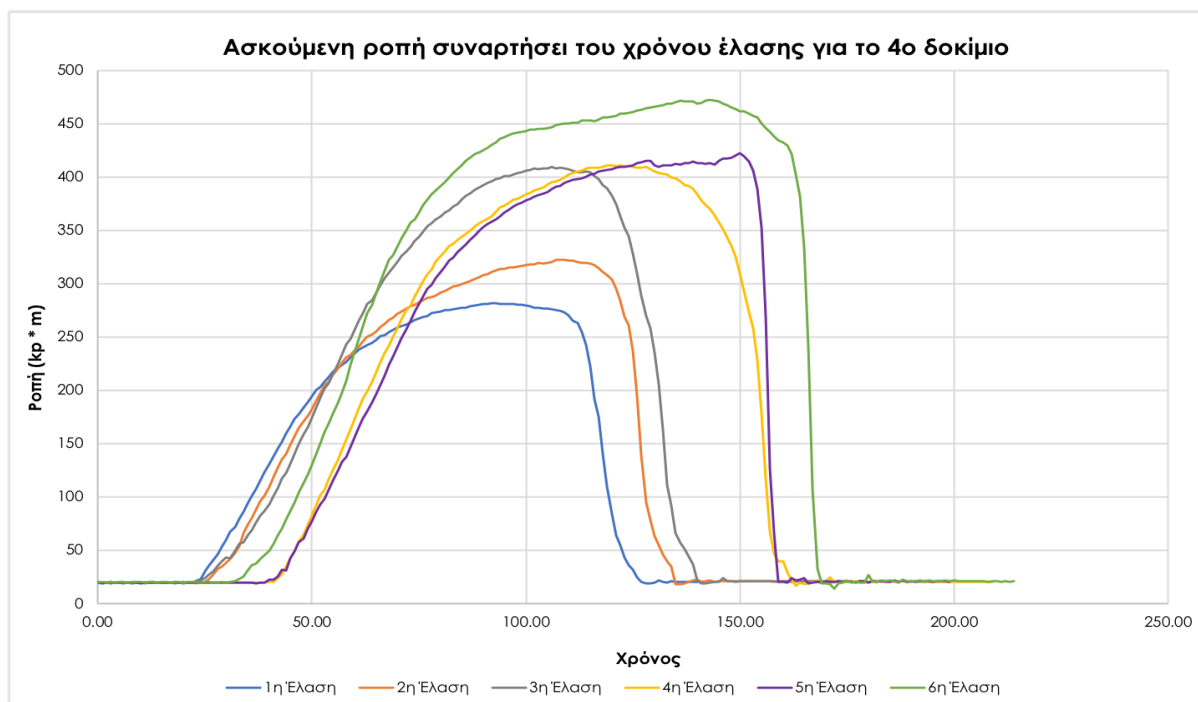
Διάγραμμα 6.5



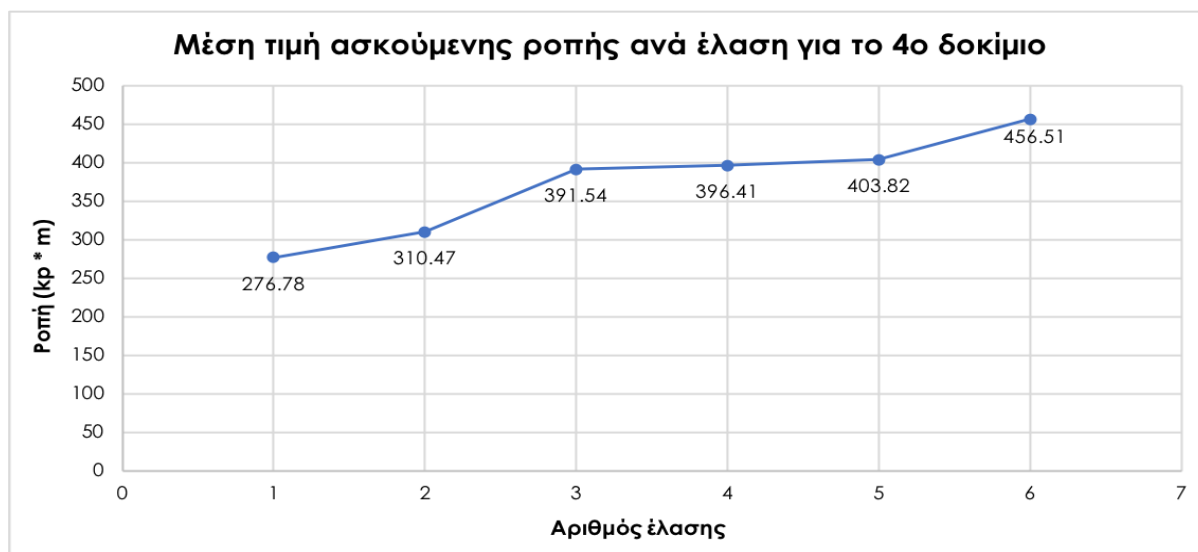
Διάγραμμα 6.6



Διάγραμμα 6.7



Διάγραμμα 6.8



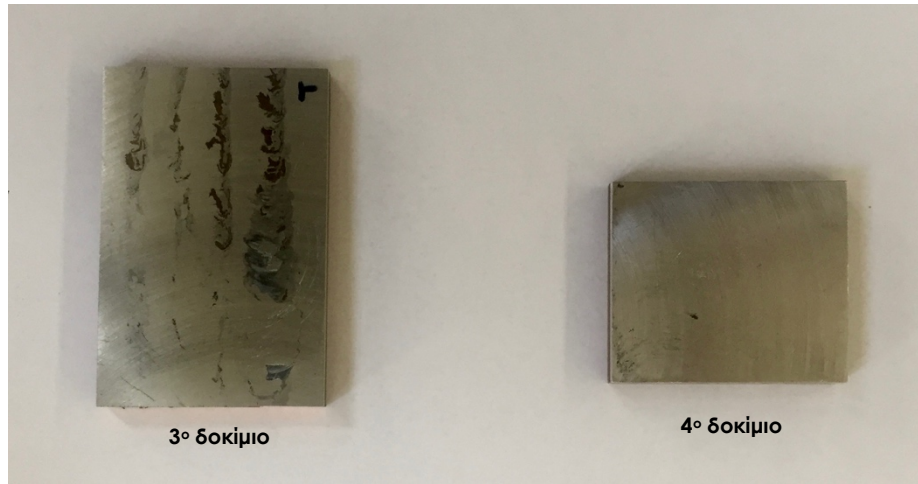
Διάγραμμα 6.9

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως οι τιμές φορτίου και ροπής και για τα δύο δοκίμια ήταν ίδιας τάξης μεγέθους. Οι μικρές διαφοροποιήσεις που εμφανίστηκαν, οφείλονται κυρίως στο τελικό πάχος του κάθε δοκιμίου, που έπειτα από κάθε έλαση δεν ήταν ακριβώς ίδιο (στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται το μέσο πάχος).

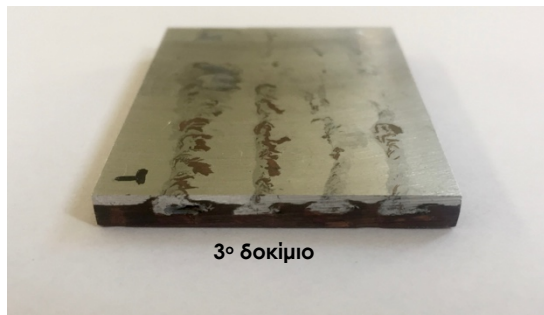
Γενικότερα, κάθε επόμενη έλαση απαιτεί μεγαλύτερα φορτία δύναμης για την επίτευξη της κατεργασίας, και αντίστοιχα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές ροπής από κάθε προηγούμενο πάσο. Τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων είναι τα αναμενόμενα.

6.3.2 Μακροσκοπική παρατήρηση

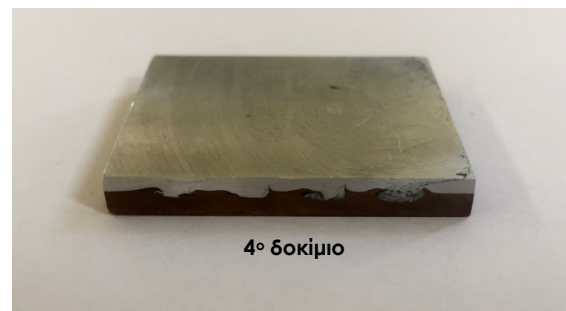
Δοκίμια προ έλασης



Εικόνα 6.38

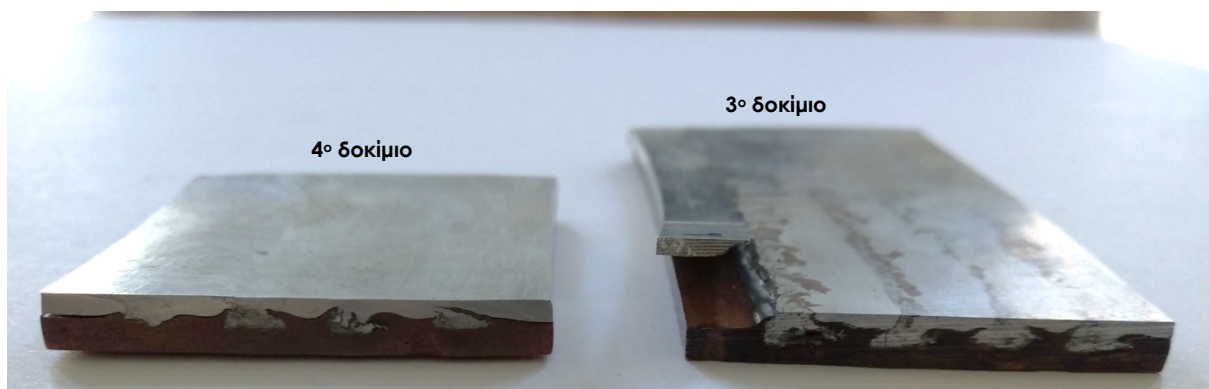


Εικόνα 6.39

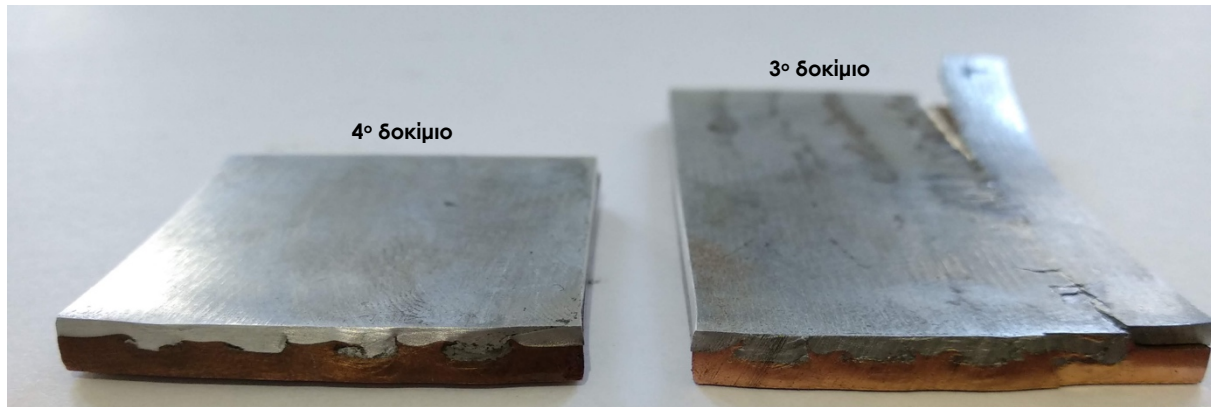


Εικόνα 6.40

1^η έλαση

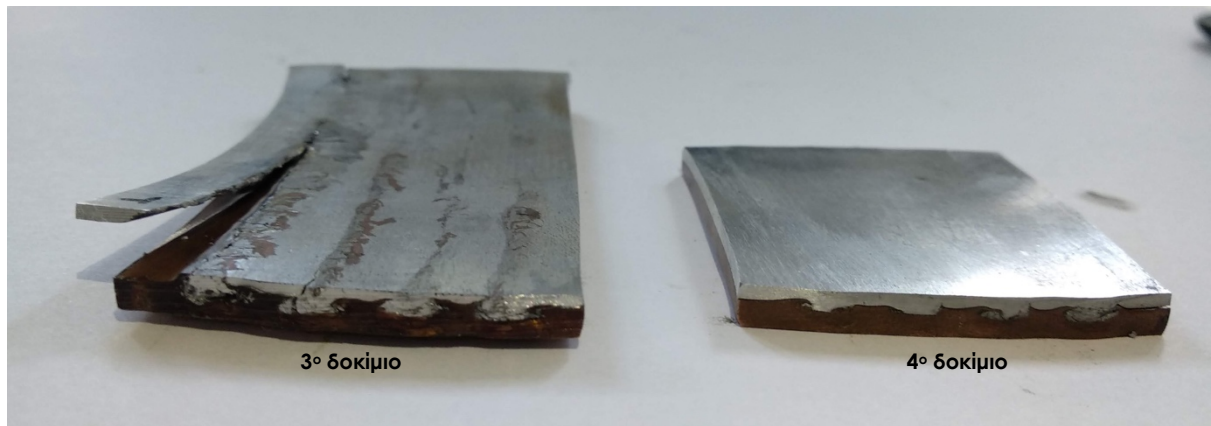


Εικόνα 6.41

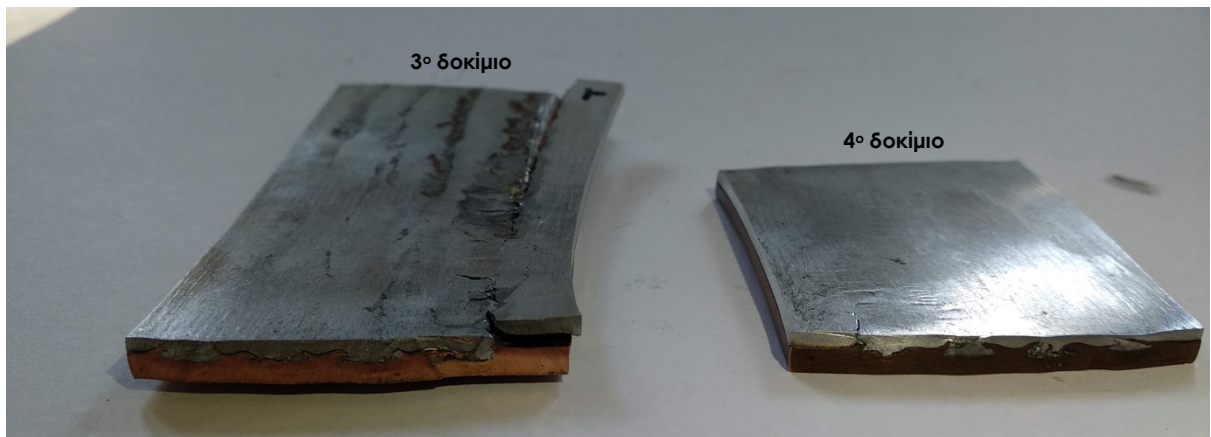


Εικόνα 6.42

2^η έλαση

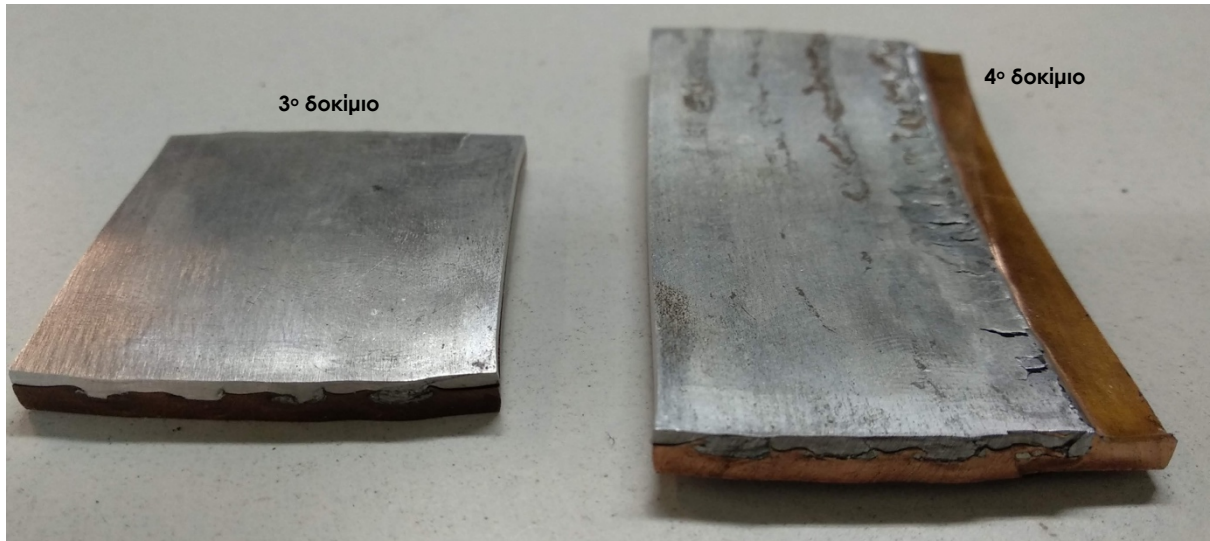


Εικόνα 6.43



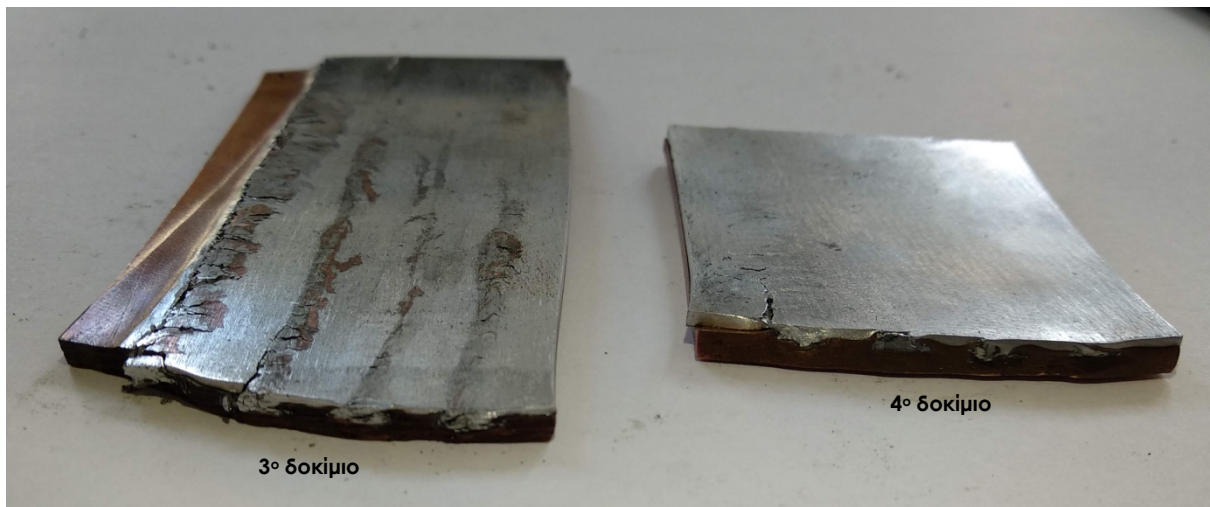
Εικόνα 6.44

3η έλαση



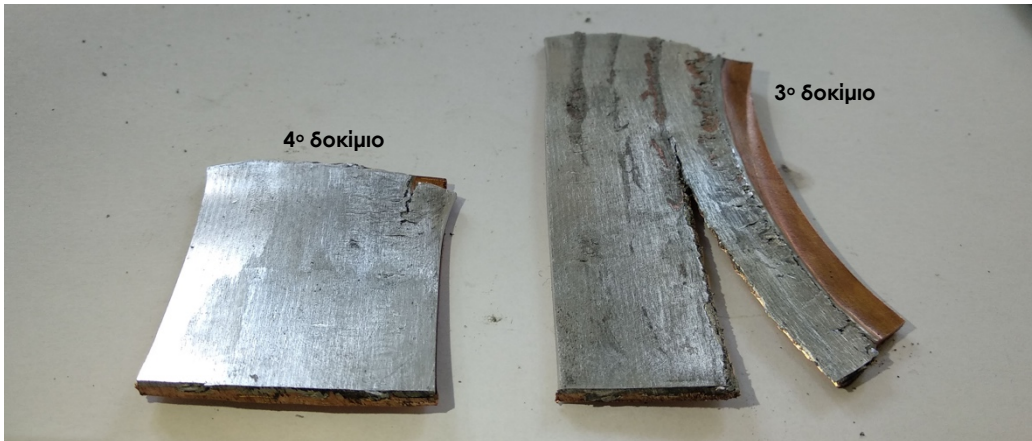
Εικόνα 6.45

4η έλαση

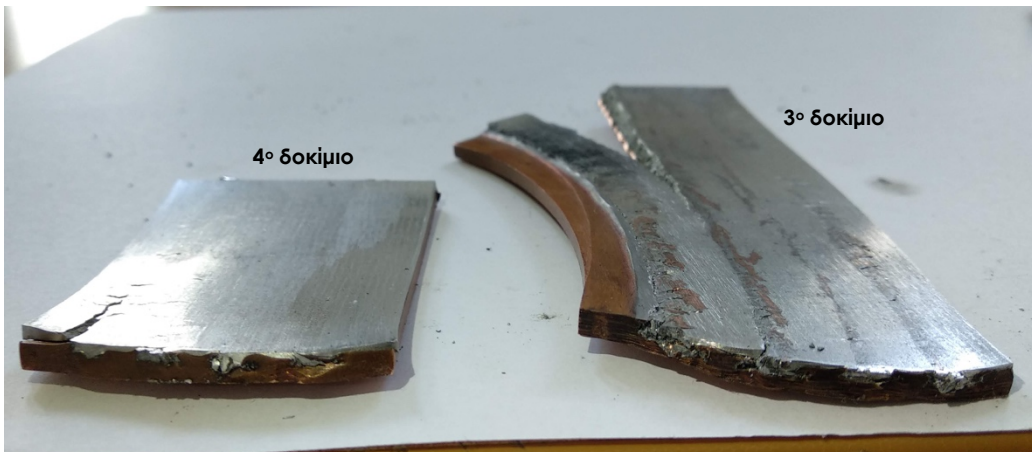


Εικόνα 6.46

5^η έλαση

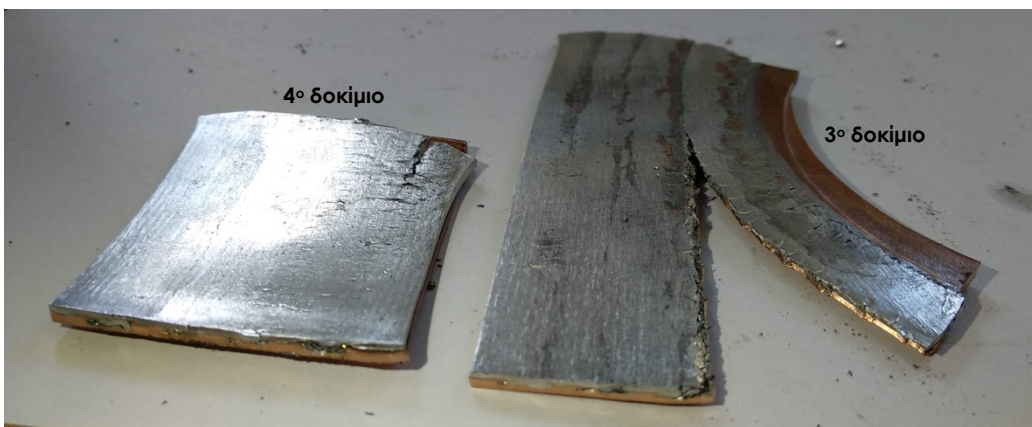


Εικόνα 6.47

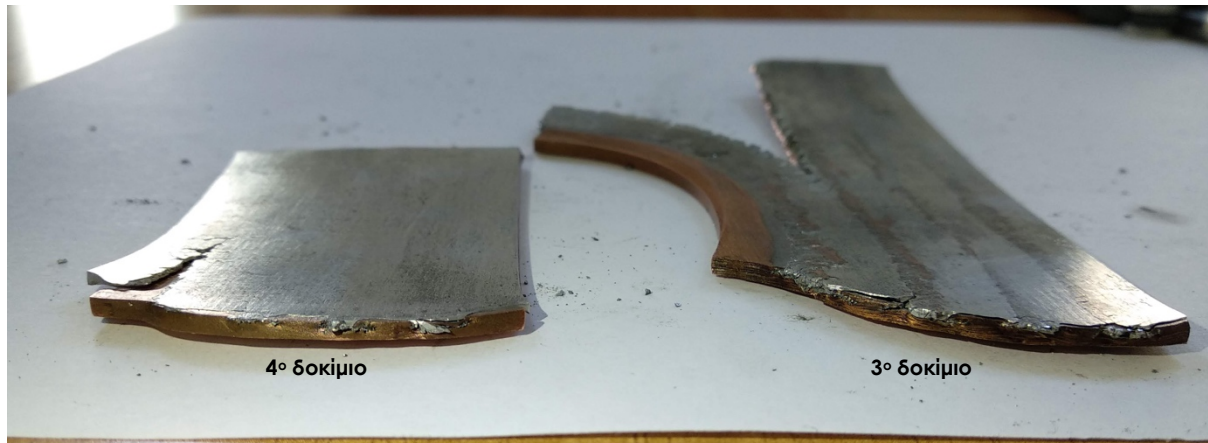


Εικόνα 6.48

6^η έλαση



Εικόνα 6.49



Εικόνα 6.50

Τα παραπάνω δοκίμια υπέστησαν συνολικά 6 ελάσεις και τα αποτελέσματα αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.2 και τα Διαγράμματα 6.1 έως 6.9. Και στα δύο δοκίμια παρατηρήθηκε αύξηση της διάστασης του μήκους από τη 2^η έλαση και έπειτα, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της μείωσης του πάχους των δοκιμίων. Επιπλέον, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των δύο υλικών, αναμένονταν η επιμήκυνση του αλουμινίου και η διαρροή του πέραν των ορίων του χαλκού, ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο.

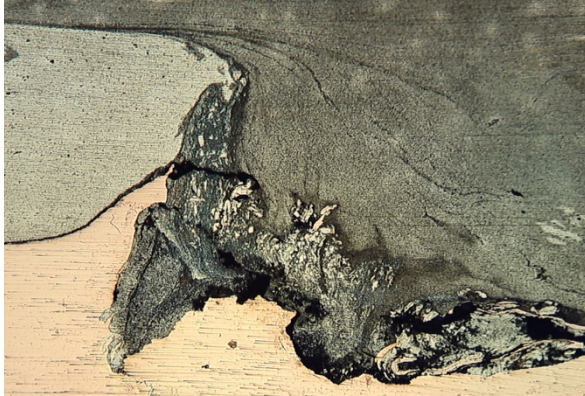
Από τις επισυναπτόμενες εικόνες φαίνεται πως το 4^ο δοκίμιο παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά στην κατεργασία της ψυχρής έλασης, σε αντίθεση με το 3^ο δοκίμιο το οποίο εμφάνισε το φαινόμενο της κροκοδειλίας από την 5^η έλαση και μετά (Εικόνες 6.47 έως 6.50). Οι τάσεις που αναπτύχθηκαν λόγω της συνεχούς μείωσης της απόστασης των ράουλων, είχαν σαν αποτέλεσμα τη διάρρηξη της συγκόλλησης μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} πάσου του 3^{ου} δοκιμίου. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως το 3^ο δοκίμιο πιθανώς ήταν πιο ευάλωτο σε αυτή τη συμπεριφορά γιατί όπως φαίνεται (Εικόνες 6.38 και 6.39) ο χαλκός είχε διαρρεύσει από την άνω επιφάνεια της συγκόλλησης, λόγω των διπλών περασμάτων, χωρίς να έχει γίνει ομοιόμορφη πλαστικοποίηση των δύο υλικών.

Η αποκόλληση του αλουμινίου που παρατηρήθηκε κατά την 1^η έλαση του 3^{ου} δοκιμίου (Εικόνες 6.41 και 6.42) και η οποία συνεχίστηκε μέχρι και την πλήρη αποκοπή ενός τμήματος αλουμινίου κατά την 3^η έλαση (Εικόνα 6.45), δεν αποτελεί αστοχία της συγκόλλησης καθώς σε εκείνο το σημείο δεν είχε επέλθει ανάμιξη των δύο μετάλλων. Αντίστοιχη περίπτωση παρουσιάστηκε και κατά την 4^η έλαση του 4^{ου} δοκιμίου (Εικόνα 6.46), όπου το τμήμα αλουμινίου που αποκόπηκε, δεν άνηκε στη συγκόλληση.

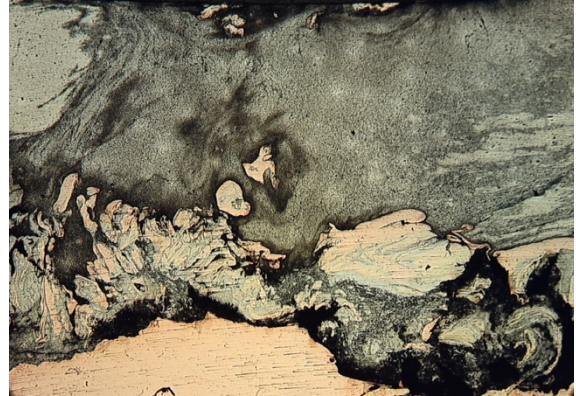
6.3.3 Μικροσκοπική παρατήρηση

Ακολουθως, παρατίθενται χαρακτηριστικές εικόνες της μικροδομής των συγκολλήσεων του 3^{ου} και 4^{ου} δοκιμίου, έπειτα από τις ελάσεις.

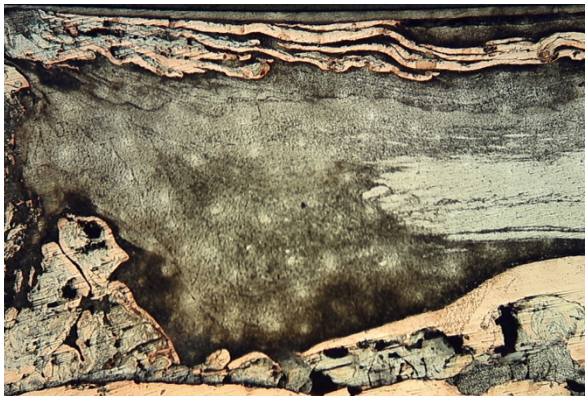
3^ο δοκίμιο



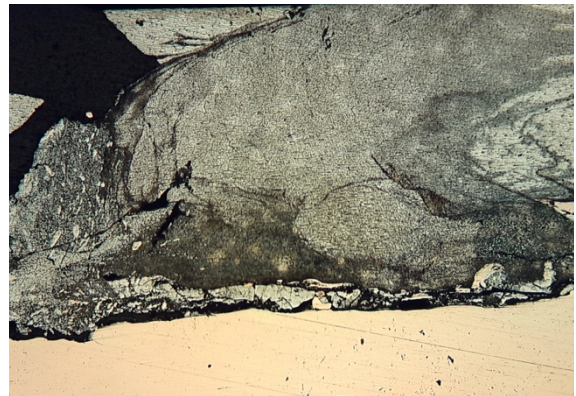
Εικόνα 6.51: 2^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.52: 2^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.53: 4^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.54: 4^η έλαση, φακός x5

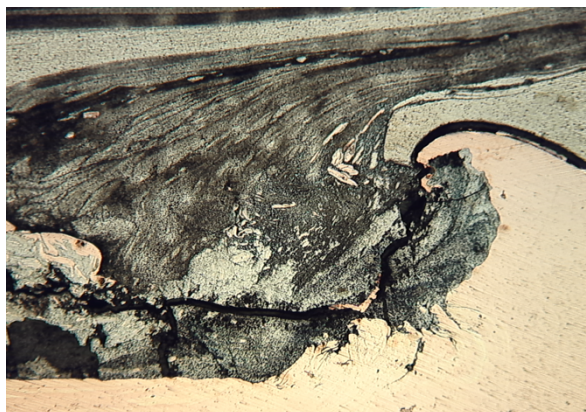


Εικόνα 6.55: 6^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.56: 6^η έλαση, φακός x5

4^ο δοκίμιο



Εικόνα 6.57: 2^η έλαση, φακός x5



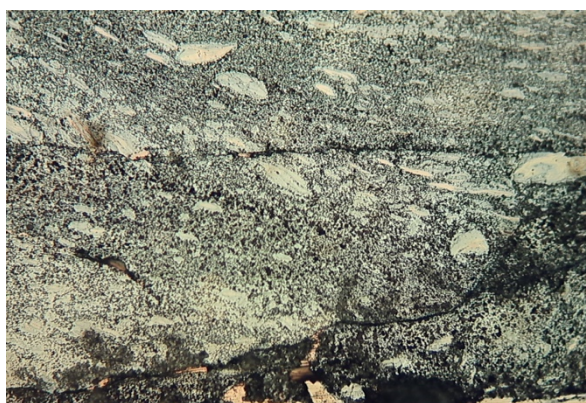
Εικόνα 6.58: 2^η έλαση, φακός x5



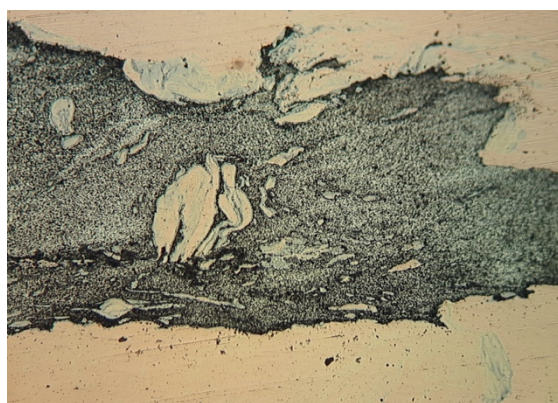
Εικόνα 6.59: 4^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.60: 4^η έλαση, φακός x5



Εικόνα 6.6: 6^η έλαση, φακός x20



Εικόνα 6.62: 6^η έλαση, φακός x20

Στις Εικόνες 6.51 έως 6.62, παρουσιάζεται η μικροδομή των υπό μελέτη δοκιμίων, όπως αυτή παρατηρήθηκε από το οπτικό μικροσκόπιο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι συνθήκες έλασης ήταν όμοιες, ωστόσο τα δοκίμια διέφεραν ως προς τις συνθήκες συγκόλλησης.

Οι αστοχίες που παρουσιάστηκαν στα ελασμένα δοκίμια, οφείλονται στην παρουσία δευτερογενών εφελκυστικών τάσεων, αλλά και σε ελαττώματα που προέκυψαν από τη μέθοδο συγκόλλησης που εφαρμόστηκε, και τα οποία επιδεινώθηκαν μέσω της έλασης. Πιο συγκεκριμένα, κατά μήκος της διεπιφάνειας και ιδιαίτερα εντός του ενδομεταλλικού σχηματισμού που υπάρχει έντονα σε εκείνο το σημείο, παρουσιάζονται μικρορωγμές και διακενώσεις που είναι ευδιάκριτες και στα δύο δοκίμια. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην απομάκρυνση κόκκων ή τεμαχιδίων του υλικού κατά τη διαδικασία της κοπής και έπειτα της λείανσης, μιας και η ενδομεταλλική ένωση είναι ιδιαίτερα ψαθυρή και εύθραυστη. Επίσης, παρατηρούνται διακοπτόμενες ενδομεταλλικές ενώσεις οι οποίες έχουν θρυμματιστεί και έχουν σχηματίσει μικροδιακενώσεις. Όσο αυξάνονται τα πάσα της έλασης και το εφαρμοζόμενο φορτίο, τόσο αυτά τα ελαττώματα πληθαίνουν. Επιπλέον, εντός της ζώνης ανάδευσης, εντοπίζονται παγιδευμένες νησίδες χαλκού που έχουν προκύψει από την επιπεδοποίηση των στροβίλων κατά την έλαση.

Όλα τα παραπάνω ελαττώματα παρουσιάζονται και στα δύο δοκίμια με τη διαφορά ότι στο 3^ο δοκίμιο ήταν σε έντονο βαθμό, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί και το φαινόμενο της κροκοδειλίας. Συνεπώς, η μικροσκοπική παρατήρηση των δύο δοκιμίων επιβεβαίωσε την μακροσκοπική, κατά την οποία το 4^ο δοκίμιο παρουσίασε καλύτερη συνολική συμπεριφορά στη κατεργασία της ψυχρής έλασης, με μικρότερης έντασης αστοχίες και πιθανώς επαρκή ακεραιότητα για περαιτέρω χρήση του.

Κεφάλαιο 7^ο

Σύνοψη Συμπερασμάτων & Προτάσεις για Έρευνα

Συνοψίζοντας τα κύρια σημεία αφενός του θεωρητικού και αφετέρου του πειραματικού μέρους της παρούσης Μεταπτυχιακής Εργασίας, παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα για τα θέματα που μελετήθηκαν:

> Ξεκινώντας από τις παραμέτρους συγκόλλησης, δημιουργήθηκαν τέσσερα δοκίμια των οποίων οι διαφορές τους εντοπίζονταν είτε στον διαφορετικό αριθμό ομόρροπων περασμάτων για το ίδιο πάσο συγκόλλησης, είτε στις διαστάσεις του περιστροφικού εργαλείου. Έπειτα από σχετική βιβλιογραφική έρευνα, η τιμή της ταχύτητας πρόωσης (13 mm/min), η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου συγκόλλησης (1000 rpm) καθώς και η κλίση του (3°), παρέμειναν σταθερά και για τα τέσσερα δοκίμια, καθώς οι τιμές τους συνοδεύονταν από μεγάλο αριθμό πετυχημένων συγκολλήσεων με την μέθοδο FSW.

> Εκ των τεσσάρων δοκιμών που δημιουργήθηκαν, και μετά από τη μεταλλογραφική παρατήρηση των τομών τους στο οπτικό μικροσκόπιο, το «δοκίμιο Νο4» ή «4^ο δοκίμιο» παρουσίασε τις λιγότερες αστοχίες, τόσο μακροσκοπικά (λιγότερο επιφανειακό γρέζι στο σημείο επαφής με τον αυχένα του περιστροφικού εργαλείου), όσο και μικροσκοπικά (μικρός αριθμός ασυνεχειών στη διεπιφάνεια των δοκιμών και μικρό πλήθος αποκολλημένων τεμαχιδίων χαλκού εντός της ζώνης ανάδευσης). Λόγω αυτών, το εν λόγω δοκίμιο επιλέχθηκε για περαιτέρω μελέτη της μικροδομής του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

> Με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, έγινε δυνατή η διακριτοποίηση των ενδομεταλλικών ενώσεων που είχαν σχηματιστεί από τη συγκόλληση. Επιπλέον κατέστη δυνατή η παρατήρηση των διαφορετικών ζωνών της συγκόλλησης, λόγω της διακριτής και διαφορετικής κοκκομετρίας τους. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν σημειακές αναλύσεις εντός κάποιων περιοχών ενδιαφέροντος, με τα αποτελέσματα αυτών να συνοψίζονται στις περιεκτικότητες των βασικών μετάλλων που περιείχαν. Το διάγραμμα φάσεων προβλέπει τη δημιουργία διμεταλλικών ενώσεων όπως: Al_2Cu , $AlCu$, Al_3Cu_4 , Al_2Cu_3 , Al_4Cu_9 . Δυστυχώς όμως, πέραν της αναγνώρισης των

ενδομεταλλικών ενώσεων ως παρουσία, δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του ακριβή τύπου τους, καθώς καμία από αυτές δεν μπόρεσε να αντιστοιχηθεί με κάποια από τις προαναφερθείσες ενώσεις του διαγράμματος φάσεων. Πιθανόν, είτε να απαιτούνται περισσότερες αναλύσεις ή να έχουν δημιουργηθεί φάσεις εκτός ισορροπίας που δεν προβλέπονται από το διάγραμμα φάσεων.

> Στη συνέχεια, οι σκληρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εντός της ζώνης ανάδευσης των συγκολλήσεων του 4^{ου} δοκιμίου, έδειξαν ότι το πλαστικοποιημένο υλικό εντός της προαναφερθείσας ζώνης, παρουσίασε αύξηση της σκληρότητας, εν συγκρίσει με αυτή των βασικών μετάλλων. Ωστόσο, οι διακυμάνσεις της σκληρότητας που παρατηρήθηκαν, εντός της ίδιας ζώνης, δικαιολογήθηκε από το γεγονός ότι στη σκλήρυνση της εν λόγω ζώνης συνεισφέρουν περιοχές χαμηλής σκληρότητας (ζώνες υψηλής ποσοστιαίας συμμετοχής του κράματος αλουμινίου AA5083) καθώς και περιοχές μεγαλύτερης σκληρότητας (υψηλή συγκέντρωση του χαλκού), οι οποίες ανάλογα με τις συνθήκες συγκόλλησης που επικρατούν, αναδύονται ομοιόμορφα ή μη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών διαφορετικής σκληρότητας, εντός της ίδιας ζώνης συγκόλλησης.

> Για την κατεργασία της ψυχρής έλασης, επιλέχθηκαν το 3^ο και το 4^ο δοκίμιο. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε έξι ελάσεις και έπειτα μελετήθηκαν τόσο μακροσκοπικά, όσο και μικροσκοπικά. Όπως ήταν αναμενόμενο, καλύτερη συμπεριφορά παρουσίασε το 4^ο δοκίμιο καθώς μακροσκοπικά δεν εμφάνισε κάποιο σοβαρό ελάττωμα (σε αντίθεση με το 3^ο δοκίμιο που παρουσίασε το φαινόμενο της κροκοδειλίας) και η επιφάνειά του ήταν ενιαία και επίπεδη. Επίσης, η μελέτη της ελασμένης μικροδομής του 4^{ου} δοκιμίου με το οπτικό μικροσκόπιο, έδειξε κάποιες διακενώσεις και μικρορωγμές, χωρίς ωστόσο να μπορεί να συγκριθεί με τον έντονο κατακερματισμό ολόκληρων ενδομεταλλικών περιοχών στο 3^ο δοκίμιο. Συνεπώς, παρά τα μικρά ελαττώματα που δημιουργήθηκαν, το 4^ο δοκίμιο παρουσίασε καλύτερη συνολική συμπεριφορά στη κατεργασία της ψυχρής έλασης, με τις συγκολλήσεις του μην αστοχούν και πιθανώς να έχει επαρκή ακεραιότητα για περαιτέρω χρήση.

Επέκταση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στο μέλλον με την περαιτέρω εξέταση των δοκιμίων με χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, ώστε να γίνει ακριβής ταυτοποίηση των ενδομεταλλικών ενώσεων της συγκόλλησης. Συμπληρωματικά, θα είχε ενδιαφέρον η υποβολή των δοκιμίων σε δοκιμή εφελκυσμού και ο έλεγχος επάρκειά τους.

Βιβλιογραφία

- [1] K. P. Mehta and V. J. Badheka, "A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 3, pp. 233–254, Feb. 2016.
- [2] M. Akbari and R. Abdi Behnagh, "Dissimilar Friction-Stir Lap Joining of 5083 Aluminum Alloy to CuZn34 Brass," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 43, no. 5, pp. 1177–1186, Oct. 2012.
- [3] A. O. Al-Roubaiy, S. M. Nabat, and A. D. L. Batako, "Experimental and Theoretical Analysis of Friction Stir Welding of Al-Cu Joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, no. 9–12, pp. 1631–1642, Apr. 2014.
- [4] Δ. Ι. Παντελής, Β. Ι. Παπάζογλου, Γ. Ν. Χαϊδομενόπουλος, "Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων", Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [5] N. Z. Khan, A. N. Siddiquee, and Z. A. Khan, *Friction Stir Welding: Dissimilar Aluminum Alloys*. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2017.
- [6] Ι. Παπαντωνίου, "Βελτιστοποίηση και Παραγωγή Σύνθετων Υλικών Αλουμινίας/Μήτρας Κράματος Αλουμινίου 5083, με Χρήση της Διαδικασίας δια Τριβής με Ανάδευση (FSP)", Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ "Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιουν. 2013
- [7] Ε. Π. Γεωργίου, "Διαμόρφωση και Τεχνολογικές Ιδιότητες του Κράματος Αλουμινίου 5083", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009

- [8] Ε.Α. Κυριακοπούλου, "Παραγωγή και Μελέτη Μεταλλικών Αφρών Σύνθετης Μεταλλικής Μήτρας με Χρήση της Διαδικασίας Ανάδευσης δια Τριβής (FSP)", Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ "Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2017
- [9] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005.
- [10] N. Sharma, Z. A. Khan, and A. N. Siddiquee, "Friction Stir Welding of Aluminum to Copper - An Overview," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, no. 10, pp. 2113–2136, Oct. 2017.
- [11] R. Nandan, T. Debroy, and H. Bhadeshia, "Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties," *Progress in Materials Science*, vol. 53, no. 6, pp. 980–1023, Aug. 2008.
- [12] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, "Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1996
- [13] Γ. Δ. Κουτσούκος, "Υβριδική Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση Υποβοηθούμενη από Τόξο υπό Προστασία Αερίου (GTAW)", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτ. 2015
- [14] S. I. Ao and International Association of Engineers, Eds., *The 2013 International Conference of Data Mining and Knowledge Engineering, the 2013 International Conference of Mechanical Engineering, the 2013 International Conference of Signal and Image Engineering*. Hong Kong: IAENG, 2013.
- [15] P. Kah, C. Vimalraj, J. Martikainen, and R. Suoranta, "Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, Dec. 2015.

Επικουρικά, για την πλήρη κατανόηση της μεθόδου συγκόλλησης αλλά και για την καθοδήγηση της παρούσης Μεταπτυχιακής Εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν και οι κάτωθι βιβλιογραφικές αναφορές:

- I. Galvão, D. Verdera, D. Gesto, A. Loureiro, and D. M. Rodrigues, "Analysing the Challenge of Aluminium to Copper FSW," p. 17.
- I. Galvão, A. Loureiro, and D. M. Rodrigues, "Critical review on friction stir welding of aluminium to copper," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 21, no. 7, pp. 523–546, Oct. 2016.
- P. Xue, D. R. Ni, D. Wang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 13–14, pp. 4683–4689, May 2011.
- G. Kerrar, N. Merah, A. N. Shuaib, F. AL-Badour, and A. Bazoune, "Experimental and Numerical Investigations of Friction Stir Welding of Aluminum to Copper," in *Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems*, T. Boukharouba, G. Pluinage, and K. Azouaoui, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 129–138.
- I. Galvão, J. Oliveira, A. Loureiro, and D. Rodrigues, "Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: influence of process parameters," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 8, pp. 681–689, Nov. 2011.
- D. I. Ólafsson, "Friction Stir Welding of Aluminum - Copper," p. 122.
- A. Mishra, "Friction Stir Welding of Dissimilar Metal: A Review," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 1551–1559, Jan. 2018.

- I. Galvão, A. Loureiro, D. Verdera, D. Gesto, and D. M. Rodrigues, "Influence of Tool Offsetting on the Structure and Morphology of Dissimilar Aluminum to Copper Friction-Stir Welds," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, no. 13, pp. 5096–5105, Dec. 2012.
- D. S. Chaudhari, "Joining of Aluminum to copper by Friction Stir Welding," *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, vol. 1, no. 8, p. 4, 2014.
- K. O. Sanusi and E. T. Akinlabi, "Material Characterization of Dissimilar Friction Stir Spot Welded Aluminium and Copper Alloy," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 225, p. 012057, Aug. 2017.
- I. Galvão, R. M. Leal, A. Loureiro, and D. M. Rodrigues, "Material flow in heterogeneous friction stir welding of aluminium and copper thin sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 8, pp. 654–660, Nov. 2010.
- A. Elrefaey, M. Takahashi, and K. Ikeuchi, "PRELIMINARY INVESTIGATION OF FRICTION STIR WELDING ALUMINIUM/COPPER LAP JOINTS," p. 9.
- G. G. Krishna, P. R. Reddy, and M. M. Hussain, "The Effect of Copper and Brass on Friction Stir Welded Dissimilar Aluminium Alloy When Used as in Thin Sheet Form," *Journal of Mechanical Engineering*, no. 2, p. 5, 2015.
- H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki, "The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 80–88, Jan. 2013.
- E. B. Hannech, N. Lamoudi, N. Benslim, and B. Makhloufi, "Intermetallic Formation in the Aluminum–Copper System," *Surface Review and Letters*, vol. 10, no. 04, pp. 677–683, Aug. 2003.