



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αλληλεπικαλυπτόμενων
ελασμάτων αλουμινίου 5754/7075



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Κωνσταντίνος Μπαλντούκας

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Dr. - Ing Σπύρος Παπαευθυμίου

ΑΘΗΝΑ, 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση επικαλυπτόμενων ελασμάτων
αλουμινίου 5754/7075**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Κωνσταντίνος Μπαλντούκας

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Dr. - Ing Σπύρος Παπαευθυμίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 11/03/2022

Σπ. Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής (Υπογραφή)

Α. Ξενίδης, Καθηγητής (Υπογραφή)

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, 2022

Ευχαριστίες

Η Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε σε δύο εργαστήρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που διατηρούν χρόνια μια άριστη συνεργασία με σκοπό την ανταλλαγή παροχής εξοπλισμού και γνώσεων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Σ. Παπαευθυμίου για την ανάθεση της εργασίας και την εμπιστοσύνη του για την υλοποίησή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. κ. Δ. Μανωλάκο για την παραχώρηση του εξοπλισμού και την αμέτρητη συμπαράστασή του.

Η πειραματική διαδικασία της Εργασίας πραγματοποιήθηκε στον τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη και την καθοδήγηση του Διδάκτορα Ι. Παπαντωνίου, τον οποίο τον ευχαριστώ ιδιαίτερος για την άριστη συνεργασία μας.

Τέλος, ευχαριστώ εγκάρδιως τους Υπ. Διδάκτορες Β. Λουκαδάκη και Σ. Χασκή για την συνεχόμενη βοήθειά τους τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μέρος της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding-FSW) είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος συγκόλλησης, η οποία αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) το 1991. Πρόκειται για μια μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κατά την οποία δεν υπάρχει τήξη των προς συγκόλληση υλικών, παρά μόνο μερική παραμόρφωση αυτών. Αναπτύχθηκε αρχικά για τη συγκόλληση όμοιων και ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, καθώς και για τη συγκόλληση μεταξύ κραμάτων αλουμινίου και χάλυβα, συγκολλήσεις οι οποίες ήταν δύσκολες (π.χ. συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου σειράς 7XXX) ή και αδύνατο, αντίστοιχα, να πραγματοποιηθούν με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης υψηλών θερμοκρασιών. Λόγω, της απουσίας τήξης και συνεπώς της μειωμένης θερμικής παροχής, οι συγκολλήσεις της μεθόδου (FSW), εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και αναβαθμισμένη μηχανικά, θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Θ.Ε.Ζ.), σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιέρωσαν την εφαρμογή της μεθόδου FSW σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, όπως στη ναυπηγική και στην αεροδιαστημική βιομηχανία, στις σιδηροδρομικές μεταφορές καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου. Τα κράματα αλουμινίου που συγκολλήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι AA5754 και AA7075. Ύστερα από σειράς πειραμάτων, καταλήξαμε στις βέλτιστες παραμέτρους συγκόλλησης, ως προς την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα πρόωσης (1.000 rpm & 13 mm/min, 590 rpm & 13 mm/min και 590 rpm & 32 mm/min).

Όλες οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με γωνία κλίσης του εργαλείου 2° (tool tilt angle), και μελετήθηκαν στο οπτικό στερεοσκόπιο και μικροσκόπιο του εργαστηρίου στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας και Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας, της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από την παρατήρηση της ανάμιξης των δύο υλικών στο πυρήνα συγκόλλησης, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα ως προς την ανομοιογένεια που κυριαρχεί σε αυτή τη ζώνη.

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new welding method developed by the British Welding Institute (TWI) in 1991. It is a solid-state welding method in which there is no melting of the welded joint materials, except for a partial deformation thereof. Initially developed for the welding of similar and dissimilar aluminum alloys, as well as for welding between aluminum and steel alloys, welding which was difficult (eg. welding of 7XXX series aluminum alloys) or impossible, respectively, to be performed with conventional high temperature welding. Due to the absence of melting and consequently the reduced heat supply, the welds of the method (FSW), show improved mechanical properties and upgraded mechanically, heat affected zone (HEZ), compared to conventional welding methods. These characteristics have established the application of the FSW method in many industrial sectors, such as the shipbuilding and aerospace industries, rail transport and the automotive industry.

The purpose of this dissertation is to optimize friction welding between dissimilar aluminum alloys. The aluminum alloys welded in the present dissertation are AA5754 and AA7075. After a series of experiments, we came up with the optimal welding parameters, in terms of rotation speed and propulsion speed (1.000 rpm & 13 mm/min, 590 rpm & 13 mm/min and 590 rpm & 32 mm/min).

All welds were performed with tool tilt angle 2° , and were studied under the optical stereoscope and microscope of the laboratory at the Laboratory of Metallurgy and Electron Microscopy, School of Mining and Metallurgical Engineering at National Technical University of Athens. From the observation of the mixing of the two materials in the welding core, important conclusions were drawn regarding the heterogeneity that prevails in this zone.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	VII
Περίληψη	IX
Abstract.....	XI
Περιεχόμενα.....	XIII
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Αντικείμενο και στόχοι.....	1
Δομή της εργασίας	1
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	2
1.1. Ιστορική Αναδρομή FSW	2
1.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας της FSW.....	6
1.3. Μικροδομή της Ζώνης Συγκόλλησης στην FSW	10
1.4. Παράμετροι Συγκόλλησης FSW	12
1.4.1. Γεωμετρία του εργαλείου.....	12
1.4.2. Γωνία κλίσης, βάθος διείδυσης και δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο εργαλείο συγκόλλησης.....	15
1.4.3. Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής.....	17
1.4.4. Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης	18
1.4.5. Επίδραση του λόγου των ταχυτήτων συγκόλλησης	19
1.5. Μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί και ατέλειες της FSW.....	21
1.5.1. Φαινόμενα Δυναμικής Ανακρυστάλλωσης.....	21
1.5.2. Ατέλειες στην Συγκόλληση Δια Τριβής Μέσω Ανάδευσης.....	26
1.6. Τυποποίηση του αλουμινίου	28
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	34
2.1. Πειραματική διαδικασία	34
2.2. Εξοπλισμός συγκόλλησης και γεωμετρία εργαλείου	35
2.3. Υλικά (χημική σύσταση, διαστάσεις).....	36
2.4. Παράμετροι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν	37
2.5. Μεταλλογραφική προετοιμασία (κοπή, λείανση-στίλβωση, χημική προσβολή)	37
2.5.1. Κοπή	37
2.5.2. Λείανση.....	38

2.5.3. Στίλβωση	39
2.5.4. Χημική προσβολή.....	40
2.5.5. Οπτικό μικροσκόπιο	41
2.5.6. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (S.E.M.).....	41
3. Αποτελέσματα και Συζήτηση	43
3.1. Σειρά Δοκιμών A (1000 rpm)	44
3.1.1. Δοκίμιο A1	44
3.1.2. Δοκίμιο A	46
3.1.3. Δοκίμιο A3	48
3.1.4. Δοκίμιο A4	50
3.2. Σειρά Δοκιμών B (590 rpm)	52
3.2.1. Δοκίμιο B1	52
3.2.2. Δοκίμιο B2	54
3.2.3. Δοκίμιο B3	56
3.2.4. Δοκίμιο B4	58
4. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	60
5. Πίνακας Εικόνων	61
6. Πίνακας Γραφημάτων	63
7. Βιβλιογραφία	64

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η ταξινόμηση και η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση FSW, με στόχο τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης FSW για τη μετωπική σύνδεση (lap joint) επικαλυπτόμενων ελασμάτων δύο διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου των σειρών 5XXX και 7XXX.

Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται ιστορική-βιβλιογραφική αναδρομή της συγκόλλησης FSW, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές εφαρμογής της και αναλύονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα και τη μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης. Επίσης, συγκρίνεται η μέθοδος FSW με άλλες μεθόδους συγκόλλησης και ταξινομούνται τα τυποποιημένα κράματα αλουμινίου. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση αντικριστής (Butt) και επικαλυπτόμενης (Lap) συγκόλλησης FSW. Τέλος, περιγράφεται το πρόβλημα που θα γίνει προσπάθεια να επιλυθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, ο εξοπλισμός και η γεωμετρία του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται τα υλικά των δοκιμών και οι διαστάσεις τους, καθώς και οι παράμετροι συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν για το συγκεκριμένο πείραμα. Αναλύεται η διαδικασία της μεταλλογραφικής προετοιμασίας των δοκιμών μετά την συγκόλληση και οι μέθοδοι μικροσκοπίας που χρησιμοποιήθηκαν για την παρατήρησή τους. Τέλος, μετά από την ταξινόμηση και τον σχολιασμό των πειραματικών αποτελεσμάτων που συλλέχθηκαν, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας που εξήχθησαν από τις παρατηρήσεις.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1. Ιστορική Αναδρομή FSW

Η μέθοδος της Συγκόλλησης Δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding) είναι γενικά μία νέα μέθοδος συγκόλλησης σε σύγκριση με την πλειονότητα των συμβατικών μεθόδων. Επινοήθηκε το Δεκέμβριο του 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (The Welding Institute, - TWI). Η μέθοδος κατοχυρώθηκε με την κατάθεση διεθνούς διπλώματος ευρεσιτεχνίας. Στις πρώτες παρουσιάσεις της μεθόδου χρησιμοποιούνταν ο όρος “Friction Stir Butt Welding” καθώς αρχικά εφαρμόστηκε σε μετωπικές συμβολές συγκόλλησης. Στη συνέχεια ωστόσο η μέθοδος επεκτάθηκε και σε άλλους τύπους συμβολών συγκόλλησης και έτσι καθιερώθηκε η σημερινή της ονομασία παγκοσμίως ως “Friction Stir Welding - FSW” [1].

Αν και νέα σχετικά μέθοδος, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει καθιερωθεί σε αρκετές εφαρμογές στη βιομηχανία, καθώς εκτός από τη δυνατότητα για συγκόλληση αρκετών κατηγοριών ανομοιογενών μετάλλων όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης δια τριβής, προσφέρει και αρκετά ικανοποιητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone). Στο εμπόριο υπάρχουν πλέον διαθέσιμες αρκετές μηχανές FSW και σε δεκάδες επιχειρήσεις και οργανισμούς έχουν παραχωρηθεί δικαιώματα χρήσης της μεθόδου από το TWI [2].

Η ναυπηγική βιομηχανία ήταν από τους πρώτους τομείς όπου εισήχθηκε η μέθοδος στην παραγωγική διαδικασία, κυρίως στις συγκολλήσεις υπερκατασκευών από αλουμίνιο. Το αλουμίνιο είναι ίσως το υλικό που έχει την καλύτερη συμπεριφορά στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση για αυτό και οι συγκολλήσεις αλουμινίου κατέχουν ένα μεγάλο μερίδιο στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Άλλοι τομείς που ακολούθησαν στην υιοθέτηση της μεθόδου σε εφαρμογές τους είναι η αεροδιαστημική βιομηχανία, η αεροναυπηγική βιομηχανία, η σιδηροδρομική βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία ιατρικών μηχανημάτων και εργαλείων, και πολλές άλλες κατά περίπτωση [2].

Στις μέρες μας, όλο και περισσότεροι μελετητές, σχεδιαστές και άνθρωποι της βιομηχανίας έρχονται σε επαφή με την FSW καθώς εξελίσσεται και αναβαθμίζεται συνεχώς. Έτσι, αυτή η μέθοδος συγκόλλησης συναντάται σε περισσότερες εφαρμογές καθώς γίνονται περισσότερο προφανή τα πλεονεκτήματά της, τα οποία αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Εκτός των ανωτέρων, η εφαρμογή της FSW για τη συγκόλληση αλουμινίου και ειδικότερα κραμάτων αλουμινίου Al 5xxx & 7xxx παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά, τεχνολογικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. έναντι άλλων μεθόδων συγκόλλησης.

Αναλυτικότερα τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση είναι τα ακόλουθα [3]:

- Ως διαδικασία στερεάς κατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα κύρια κράματα αλουμινίου αποφεύγοντας τα προβλήματα της θερμής ρηγμάτωσης, του πορώδους και των ακαθαρσιών, τα οποία εμφανίζονται σε όλες τις υπόλοιπες συγκολλήσεις τήξης των αλουμινίων
- Ως αυτοματοποιημένη διαδικασία, η FSW δεν απαιτεί εξειδικευμένες δεξιότητες συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, η χειροκίνητη παρέμβαση σπανίως απαιτείται
- Δεν απαιτείται αέριο προστασίας ή ηλεκτρόδιο πλήρωσης για τα κράματα αλουμινίου
- Η διαδικασία είναι αξιοσημείωτα ανεκτική σε χαμηλή προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση ελασμάτων. Γεωμετρικές ανωμαλίες στις ακμές των προς συγκόλλησης ελασμάτων, της τάξης του 20% του πάχους της πλάκας, γίνονται αποδεκτές αν και το γεγονός αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε μείωση του τοπικού πάχους καθώς δεν υπάρχει προσθήκη υλικού πλήρωσης
- Η απουσία τήξης αποφεύγει ένα μεγάλο μέρος της θερμικής διαστολής που σχετίζεται με τη στερεοποίηση και την ψύξη, οδηγώντας σε σημαντικές μειώσεις της παραμόρφωσης. Ωστόσο, δεν αποτελεί μια τεχνική συγκόλλησης μηδενικής παραμόρφωσης
- Πρόκειται για μία πολύ ευέλικτη τεχνική συγκόλλησης, εφόσον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση σε μία, δύο ή και τρεις διαστάσεις με δυνατότητα ένωσης συνεχών, σημειακών και επικαλυπτόμενων γεωμετριών. Τέλος η συγκόλληση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε θέση
- Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, συγκρίσιμες με τις βέλτιστες τιμές άλλων συγκολλήσεων
- Φιλική προς το περιβάλλον εφόσον δεν υπάρχει υπεριώδης ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω της απουσίας ηλεκτρικού τόξου από τη διεργασία, ενώ είναι λιγότερο θορυβώδης από μία αντίστοιχη φρεζομηχανή παρόμοιας ισχύος. Η συγκολλήσεις FSW παράγουν ουσιαστικά μηδενικά αέρια και άλλους ρύπους
- Η ενέργεια που απαιτείται για τις συγκολλήσεις FSW βρίσκεται μεταξύ της συγκόλλησης Laser (η οποία τυπικά απαιτεί τη λιγότερη ενέργεια) και της συγκόλλησης μετάλλων με αδρανή αέρια (MIG) (η οποία συνήθως χρειάζεται περισσότερη ενέργεια)
- Υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και ρυθμοί ολοκλήρωσης των συγκολλήσεων. Σε συγκολλήσεις μονού πάσου λεπτών υλικών (πάχους μικρότερου των 0,5 mm), η FSW

ανταγωνίζεται τις ταχύτητες συγκόλλησης των συγκολλήσεων τήξης. Σε παχύτερα υλικά, η FSW μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική συγκόλληση με ένα μόνο πάσο, ενώ οι υπόλοιπες συγκολλήσεις τήξης να χρειάζονται πολλαπλά περάσματα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην δημιουργία συγκολλήσεων σε μικρότερο χρόνο, παρόλο που οι ταχύτητες συγκόλλησης της FSW μπορεί να είναι χαμηλότερες.

- Διάφορες μηχανικές και θερμικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν κατά τη διαδικασία των συγκολλήσεων FSW προκειμένου να καθοριστεί στο ποσοστό των παραμενουσών τάσεων στη συγκόλληση.

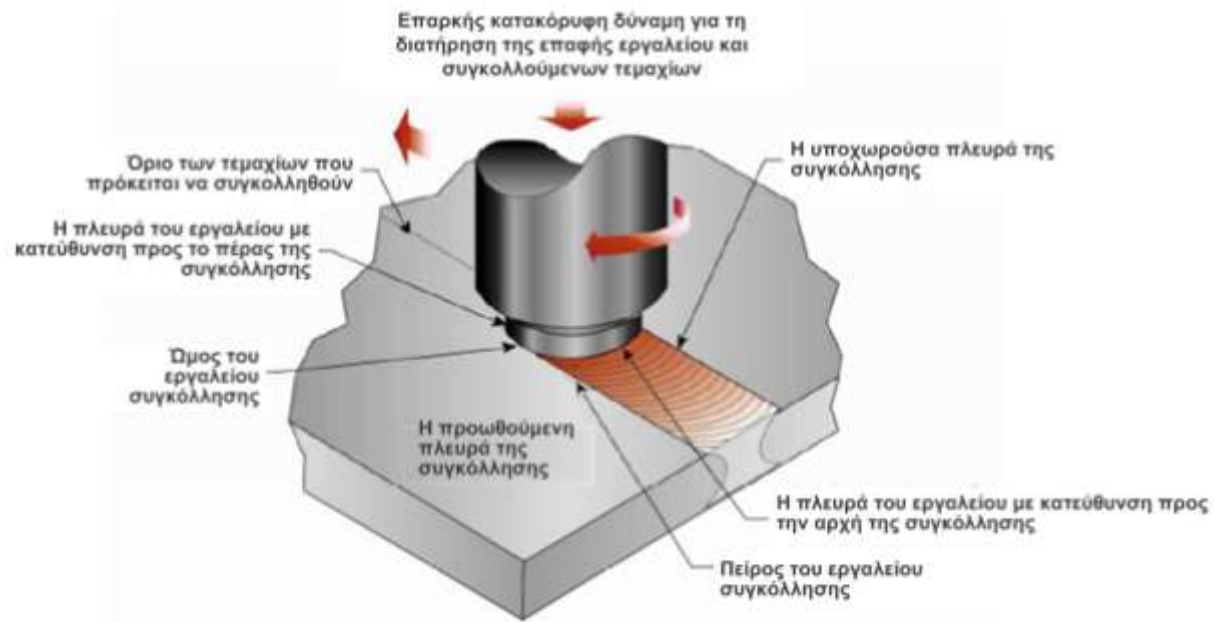
Ωστόσο στις συγκολλήσεις FSW υπάρχουν και πολλά μειονεκτήματα. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν πιο πάνω συνοδεύονται με ορισμένους περιορισμούς αναλόγως τις απαιτήσεις της κάθε συγκόλλησης.

- Η απουσία υλικού πλήρωσης σημαίνει ότι η διαδικασία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για τη συγκόλληση τεμαχίων που βρίσκονται σε σχετική γωνία μεταξύ τους (fillet welds)
- Η πλήρως μηχανοποιημένη φύση της συγκόλλησης εμποδίζει τη χρήση της σε εφαρμογές όπου η πρόσβαση ή η πολύπλοκη γεωμετρία της συγκόλλησης απαιτούν χειροκίνητη διεργασία
- Η παρουσία μίας οπής στο άκρο της συγκόλλησης από την οποία αποσύρθηκε το εργαλείο συγκόλλησης καθώς και η εξώθηση υλικού (πλευρικό φλας) αποτελούν δύο ακόμα μειονεκτήματα
- Τα προς συγκόλληση ελάσματα πρέπει επίσης να συγκρατούνται από καλά σχεδιασμένα εργαλεία συγκράτησης, τα οποία να αντισταθμίσουν τις εφαρμοζόμενες από τη μηχανή συγκόλλησης δυνάμεις και να αποτρέψουν την απομάκρυνση των τεμαχίων
- Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις, παρατηρείται μείωση του πάχους της ραφής συγκόλλησης, λόγω του πλευρικού φλάς όπως προαναφέρθηκε υποβαθμίζοντας τη ποιότητα της συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποφευχθεί, εάν κρίνεται απαραίτητο, με το κατάλληλο σχεδιασμό της ένωσης, όπως για παράδειγμα με την τοπική αύξηση του πάχους, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις δεν γίνονται τέτοιες μορφοποιήσεις.

Τα κόστη της διεργασίας θεωρούνται γενικά ευνοϊκά, αλλά δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δημοσιευμένα δεδομένα. Ωστόσο είναι γνωστό ότι η διαδικασία FSW μειώνει δραστικά τα κόστη της προετοιμασίας των προς συγκόλλησης ελασμάτων, της πρόσληψης εξειδικευμένου τεχνίτη και των απαιτούμενων επισκευών. Η αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται

από τη σχέση μεταξύ της μηχανής συγκόλλησης και του αριθμού των πραγματοποιούμενων συγκολλήσεων, εάν και αυτό δεν είναι πάντα απόλυτο.

1.2. Βασικές Αρχές Λειτουργίας της FSW



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης με ανάδευση FSW [4]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, η βασική αρχή της FSW είναι απλή. Ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο που στο κάτω άκρο του έχει μία ειδικά σχεδιασμένη προεξοχή (πείρος probe), εισέρχεται μεταξύ των δύο επιφανειών προς συγκόλληση, οι οποίες σημειώνεται ότι δεν έχουν διάκενο μεταξύ τους, και ενώ αυτό περιστρέφεται, κινείται γραμμικά κατά μήκος της συμβολής συγκόλλησης «ανακατεύοντας» εκατέρωθεν το υλικό. Έτσι, από το τελευταίο προέκυψε και ο όρος «Stir» της ονομασίας της μεθόδου. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, όπως άλλωστε και σε όλες τις μεθόδους συγκόλλησης δια τριβής, εφαρμόζεται αξονική δύναμη, αυτή τη φορά όμως σε διαφορετική διεύθυνση ως προς τα δοκίμια. Το τελευταίο βέβαια έχει να κάνει γενικά και με τη γεωμετρία των δοκιμίων αλλά και με τη γεωμετρία της συμβολής συγκόλλησης (μετωπική, αυχενική κτλ).

Οι διεθνείς (αγγλικές) αντίστοιχες ορολογίες, οι οποίες αφορούν στο εργαλείο συγκόλλησης και στα δοκίμια συγκόλλησης, έχουν ως ακολούθως:

- Advancing Side of weld: η προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης
- Retreating Side of weld: η υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης
- Leading Edge of the Rotating Tool: η πλευρά του εργαλείου με κατεύθυνση προς το πέρας της συγκόλλησης
- Trailing Edge of the Rotating Tool: η πλευρά του εργαλείου με κατεύθυνση προς την αρχή της συγκόλλησης
- Shoulder: Περιαυχένιο (ώμος) του εργαλείου συγκόλλησης

- Probe ή Pin: Πείρος του εργαλείου (βρίσκεται βυθισμένος στη συμβολή συγκόλλησης)
- Download Force: Η αξονική σταθερή δύναμη που εφαρμόζεται για να διατηρηθεί η επαφή εργαλείου και συγκολλούμενων τεμαχίων

Οι όροι «προωθούμενη πλευρά» και «υποχωρούσα πλευρά» απαιτούν γνώση της φοράς περιστροφής του εργαλείου και της φοράς της κίνησής του (travel direction). Στην Εικόνα 1, το εργαλείο περιστρέφεται με ωρολογιακή φορά, ενώ κινείται από δεξιά προς τα αριστερά. Με δεδομένα τα παραπάνω η προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης ορίζεται ως η πλευρά στην οποία η φορά περιστροφής του εργαλείου είναι ομόρροπη στιγμιαία με τη φορά κατεύθυνσής του. Στην εν λόγω Εικόνα 1, η πλευρά αυτή βρίσκεται εξ' αριστερών του εργαλείου, αναφορικά πάντα με τη διεύθυνση της συμβολής συγκόλλησης (joint). Αντίστοιχα η υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης (retreating side) βρίσκεται εκ δεξιών του εργαλείου, δηλαδή από τον ορισμό στην πλευρά όπου η φορά περιστροφής του εργαλείου είναι αντίρροπη με τη φορά κατεύθυνσής του [4].

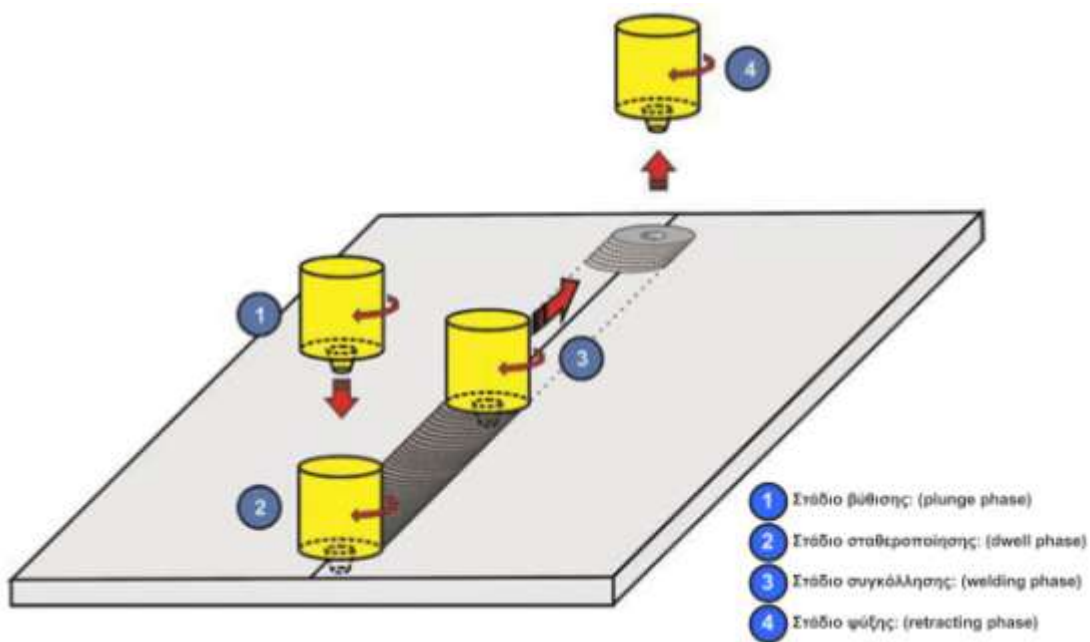
Το εργαλείο συγκόλλησης έχει τρεις συνολικά λειτουργίες που συντελούν στη συγκόλληση των ελασμάτων, οι οποίες είναι η πρόσδοση θερμότητας, η κίνηση του υλικού για να επιτευχθεί η συγκόλληση και η «συγκράτηση» της θερμότητας που παράγεται κάτω των ορίων της επιφάνειας του περιανυχένιου.

Η θερμότητα που προσδίδεται στη διεπιφάνεια παράγεται [5]:

- 1. Δια τριβής από την περιστροφή του πείρου** ο οποίος βρίσκεται βυθισμένος στη συμβολή συγκόλλησης.
- 2. Δια τριβής από την περιστροφική κίνηση του περιανυχένιου** του εργαλείου συγκόλλησης επάνω στην επιφάνεια των ελασμάτων, σε συνδυασμό με την αξονική δύναμη που εφαρμόζεται προς αυτά.
- 3. Ως αποτέλεσμα της σημαντικής πλαστικής παραμόρφωσης** στην οποία υπόκειται το υλικό. Η τοπική άνοδος της θερμοκρασίας μαλακώνει το υλικό γύρω από τον πείρο και σε συνδυασμό με την περιστροφή του εργαλείου επιτυγχάνεται κίνηση του υλικού από το εμπρός (leading edge of the rotating tool) προς το πίσω (trailing edge of the rotating tool) μέρος του εργαλείου. Αποτέλεσμα είναι να «γεμίζει» με παραμορφωμένο υλικό το ίχνος του πείρου, το οποίο δημιουργείται όπως το εργαλείο μετακινείται προς τα εμπρός. Το περιανυχένιο, το οποίο έχει πολύ μεγαλύτερη διατομή σε σχέση με τον πείρο, περιορίζει την κίνηση του υλικού κάτωθεν της επιφάνειάς του, η οποία ταυτίζεται με την άνω επιφάνεια των ελασμάτων. Το τελευταίο συντελεί και στην καλή αισθητική της παραγόμενης ραφής συγκόλλησης, για την οποία διακρίνεται η FSW.

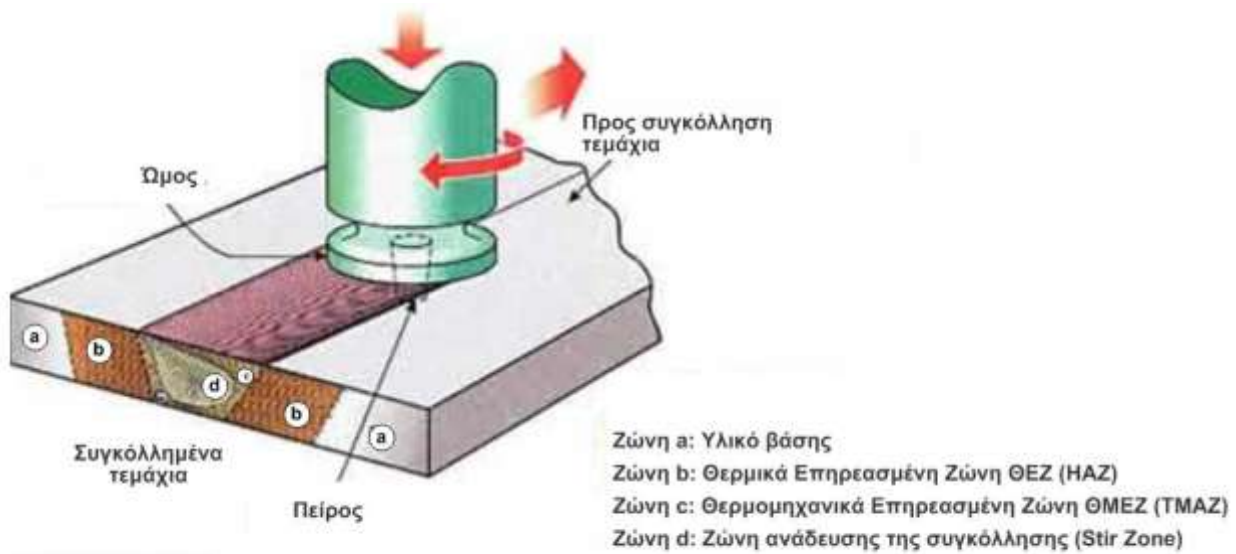
Η διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση FSW μπορεί να διακριθεί σε τέσσερα στάδια [5], τα οποία αναλύονται στη συνέχεια και παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.

- 1. Στάδιο βύθισης (plunge phase):** Το εργαλείο που περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, βυθίζεται, αφού πρώτα έχει ευθυγραμμιστεί με τη γραμμή σύνδεσης των τεμαχίων εργασίας, υπό την επίδραση μίας κατακόρυφης προς τα κάτω αξονικής δύναμης έως ότου το περιαιχένιο αγγίξει την επιφάνεια του τεμαχίου προς κατεργασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2(1). Σε αυτό το στάδιο ξεκινά η διαδικασία της παραμόρφωσης.
- 2. Στάδιο σταθεροποίησης (dwell phase):** Το περιστρεφόμενο εργαλείο, υπό την επίδραση της αξονικής δύναμης και με το περιαιχένιο να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του τεμαχίου, περιστρέφεται για 5-10 δευτερόλεπτα ανάλογα με το υλικό και το πάχος (Εικόνα 2(2)). Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται επαρκής θερμότητα τριβής στη διεπιφάνεια εργαλείου-τεμαχίου η οποία προκαλεί πλαστικοποίηση των προς συγκόλληση ελασμάτων, δημιουργώντας περισσότερη θερμότητα από πλαστική παραμόρφωση. Το πλαστικοποιημένο υλικό που βρίσκεται μπροστά από το εργαλείο εξασφαλίζει την ομαλή μετατόπιση του εργαλείου κατά τη διάρκεια του επόμενου σταδίου συγκόλλησης.
- 3. Στάδιο συγκόλλησης (welding phase):** Το περιστρεφόμενο εργαλείο, υπό την επίδραση του αξονικού φορτίου και με το περιαιχένιο, που περικλείει τον πλαστικοποιημένο όγκο, μετατοπίζεται με σταθερή ταχύτητα κατά μήκος της επιθυμητής γραμμής σύνδεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2(3). Η περιστροφή του εργαλείου συνεχίζει να παράγει θερμότητα λόγω τριβής και παραμόρφωσης. Μια άλλη σημαντική λειτουργία της περιστροφής του εργαλείου είναι η ανάδευση και η ροή του υλικού. Οι κινήσεις περιστροφής και μετακίνησης του εργαλείου προκαλούν την ροή του πλαστικοποιημένου υλικού κοντά στον πείρο του εργαλείου από την προωθούμενη πλευρά προς το πίσω μέρος του πείρου. Το περιαιχένιο εφαρμόζει μια δύναμη σφυρηλασίας στο υλικό πίσω από τον πείρο, γεμίζοντας ουσιαστικά την κοιλότητα που σχηματίζεται από την προς τα εμπρός κίνηση του πείρου. Αυτό προκαλεί ανάμιξη των υλικών με τη μορφή ατομικής διάχυσης ή διάλυσης ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκόλλησης στο πίσω μέρος του εργαλείου.
- 4. Στάδιο ψύξης (retracting phase):** Κατά την άφιξη στο άκρο συγκόλλησης, το εργαλείο αποσύρεται από το τεμάχιο εργασίας, αφήνοντας πίσω μία οπή εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Χρησιμοποιούνται διάφορες διαδικασίες για την αποφυγή της οπής εξόδου σε αυτό το είδος συγκολλήσεων. Αυτές περιλαμβάνουν την αναπλήρωση της οπής εξόδου ή τη χρήση μεγαλύτερου μήκους συγκόλλησης από το προβλεπόμενο μήκος.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων χαρακτηριστικών σταδίων της συγκόλλησης διά τριβής με ανάδευση FSW [5]

1.3. Μικροδομή της Ζώνης Συγκόλλησης στην FSW



Εικόνα 3: Μικροδομή της Ζώνης Συγκόλλησης στη FSW [6]

Όπως και σε κάθε νέα τεχνολογία που προκύπτει, απαιτείται πρόσθετη νέα ορολογία από τους ερευνητές προκειμένου για την καταγραφή, μελέτη και σύγκριση των παρατηρήσεών τους.

Σχετικά με τη μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, ο P.L. Threadgill [6] ήταν ο πρώτος ο οποίος εισήγαγε τις ορολογίες που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Το σύστημα κατηγοριοποιεί τη ζώνη συγκόλλησης σε τέσσερις ξεχωριστές κατηγορίες.

Παρατηρώντας και την Εικόνα 3, όπου φαίνεται και υπό κλίμακα η διάμετρος του πείρου συγκόλλησης σαν μέγεθος, βλέπουμε τις διαφορετικές ζώνες με τις αγγλικές ονοματολογίες που έχουν επικρατήσει:

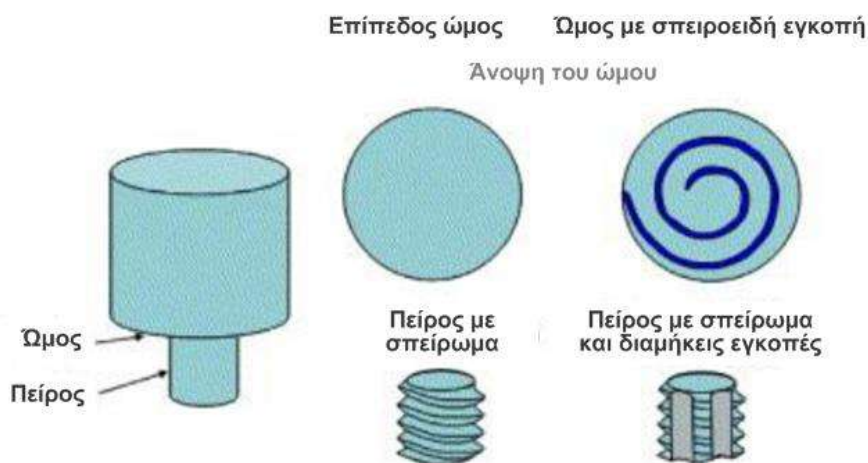
- 1. Ζώνη A (Parent Metal Unaffected by Weld):** Είναι το υλικό βάσης (base ή parent metal) το οποίο είναι σχετικά απομακρυσμένο από το νοητό άξονα της συγκόλλησης (joint) και το οποίο παρά τη θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή του, έχει μείνει ανεπηρέαστη τόσο η κρυσταλλική του δομή όσο και οι μηχανικές του ιδιότητες, μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης.
- 2. Ζώνη B (Heat Affected Zone/HAZ):** Στην περιοχή της Θερμικά Επηρασμένης Ζώνης (ΘΕΖ) το υλικό έχει υποστεί τέτοια θερμική κατεργασία (thermal cycle) που έχει τροποποιηθεί η μικροδομή του ή/και οι μηχανικές του ιδιότητες σε σχέση με τη ζώνη A. Ωστόσο, το υλικό σε αυτή τη ζώνη δεν έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Το μέγεθος των κόκκων είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από αυτό του υλικού στις ζώνες C & D.

- 3. Ζώνη C (Part of Thermomechanically Affected Zone/TMAZ):** Στο τμήμα αυτό της Θερμομηχανικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΜΕΖ), η οποία συντίθεται από τις ζώνες C & D, το εργαλείο συγκόλλησης έχει παραμορφώσει πλαστικά το υλικό και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται έχει επιφέρει αλλαγές στη δομή και τις ιδιότητες του υλικού. Στην περίπτωση των κραμάτων αλουμινίου είναι δυνατό να υπάρχει σημαντική πλαστική παραμόρφωση χωρίς ανακρυστάλλωση εντός της περιοχής αυτής. Εντούτοις, μελέτες σε άλλα υλικά έδειξαν ότι το αλουμίνιο συμπεριφέρεται κατά τρόπο διαφορετικό, δεδομένου ότι μπορεί να υποστεί πλήρη μεταλλουργικό μετασχηματισμό σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς ανακρυστάλλωση. Σε άλλα υλικά φαίνεται ότι ολόκληρη η ΘΜΕΖ έχει υποστεί ανακρυστάλλωση. Σε υλικά όπως στους φερριτικούς χάλυβες και στα διφασικά κράματα $\alpha+\beta$ του τιτανίου η κατανόηση της μικροδομής λόγω και του θερμικά προκαλούμενου μετασχηματισμού φάσεως, αλλά ακόμη και τα όρια των ΘΕΖ/ΘΜΕΖ, είναι δυσδιάκριτα.
- 4. Ζώνη D (Weld nugget or Stir Zone):** Πρόκειται για τον πυρήνα ή αλλιώς ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης όπου το υλικό είναι δυναμικά ανακρυσταλλωμένο. Το μέγιστο εύρος/πλάτος που μπορεί να έχει ο πυρήνας συγκόλλησης δε μπορεί να ξεπεράσει τη διάμετρο του ώμου (αλλιώς περιαιχένιο) του εργαλείου συγκόλλησης. Ο διαχωρισμός της ζώνης D και της ζώνης C είναι περισσότερο ευδιάκριτος στην προελαύνουσα πλευρά της συγκόλλησης (advancing side) σε σχέση με την υποχωρούσα (retreating).

1.4. Παράμετροι Συγκόλλησης FSW

1.4.1. Γεωμετρία του εργαλείου

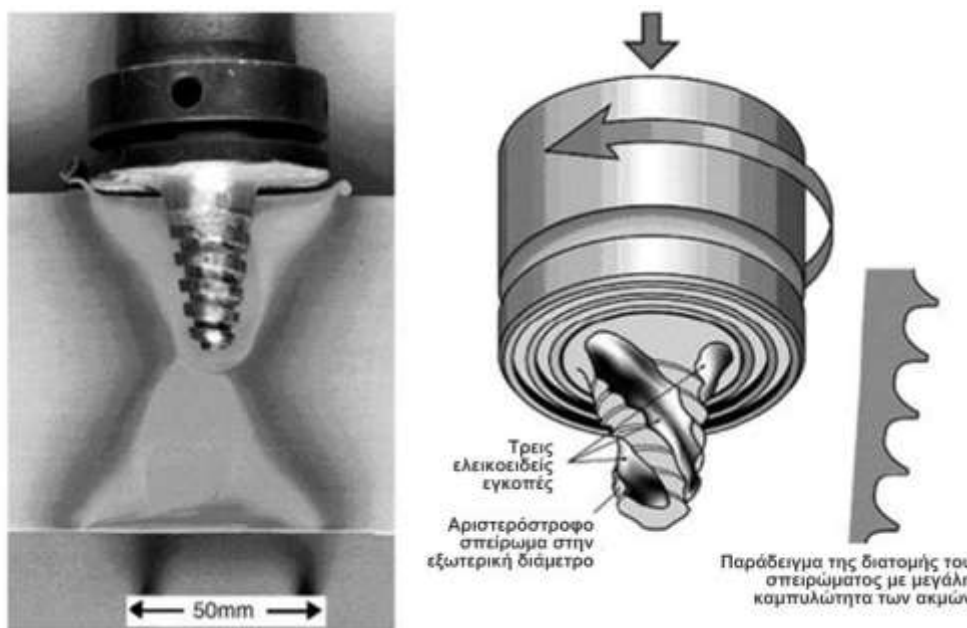
Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ο σημαντικότερος παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή στη διεργασία της συγκόλλησης [5]. Η γεωμετρία του εργαλείου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη ροή υλικού και με τη σειρά του ρυθμίζει την ταχύτητα μετατόπισης με την οποία μπορεί να διεξαχθεί μία συγκόλληση FSW. Ένα εργαλείο FSW αποτελείται από ένα περιαιχένιο και έναν πείρο όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 4. Το εργαλείο έχει δύο κύριες λειτουργίες: (α) τοπική πρόσδοση θερμότητας και (β) ανάδευση του υλικού. Στο αρχικό στάδιο βύθισης του εργαλείου, η θερμότητα προκύπτει κυρίως από την τριβή μεταξύ του πείρου και του τεμαχίου εργασίας. Κάποια επιπλέον παροχή θερμότητας προκύπτει από την παραμόρφωση του υλικού. Το εργαλείο βυθίζεται μέχρι το περιαιχένιο να αγγίζει τα προς συγκόλληση τεμάχια. Η τριβή μεταξύ του ώμου και των προς συγκόλληση ελασμάτων ευθύνεται για τη μεγαλύτερη παροχή θερμότητας. Όσον αφορά τη θερμική παροχή, το σχετικό μέγεθος του πείρου και του περιαιχενίου είναι το πιο σημαντικό μέγεθος καθιστώντας τα υπόλοιπα μορφολογικά χαρακτηριστικά του εργαλείου λιγότερο κρίσιμα. Το περιαιχένιο καθορίζει τον θερμαινόμενο όγκο του υλικού. Η δεύτερη λειτουργία του εργαλείου είναι η «ανάδευση» και η «κίνηση» του υλικού. Η ομοιομορφία της μικροδομής και των ιδιοτήτων καθώς και τα αξονικά φορτία κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (FSW) καθορίζονται από τη σχεδίαση του εργαλείου. Τις περισσότερες φορές κατά τη συγκόλληση αλουμινίου χρησιμοποιείται λείο περιαιχένιο και κυλινδρικοί πείροι με σπείρωμα.



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιείται κατά τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW)

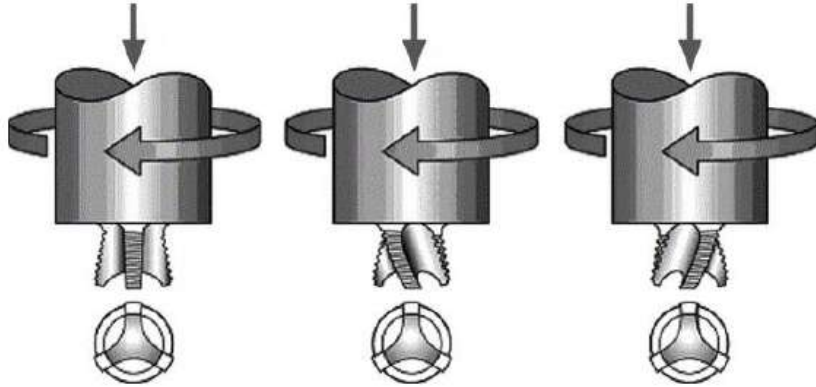
Με την αυξανόμενη γνώση και κατανόηση της ροής υλικού, η γεωμετρία του εργαλείου έχει εξελιχθεί σημαντικά. Έχουν προστεθεί πολύπλοκα χαρακτηριστικά για να μεταβάλλουν τη ροή υλικού, και να μειώνουν τα φορτία κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Για παράδειγμα, τα

εργαλεία Whorl™ και MX Triflute™ που αναπτύχθηκαν από το Βρετανικό Ινστιτούτο συγκολλήσεων (TWI) παρουσιάζονται στην Εικόνα 5. Στην ερευνά του ο Thomas και οι συνεργάτες του [7], επεσήμαναν ότι οι πείροι και για τα δύο εργαλεία Whorl™ και MX Triflute™, μετατοπίζουν λιγότερο υλικό από ένα κυλινδρικό εργαλείο με την ίδια διάμετρο πείρου. Συνήθως, το Whorl™ μειώνει τον όγκο εκτοπίσματος κατά περίπου 60%, ενώ το MX Triflute™ κατά περίπου 70%. Τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του Whorl™ και του MX Triflute™ πιστεύεται ότι (α) μειώνουν τη δύναμη συγκόλλησης, (β) επιτρέπουν ευκολότερη ροή πλαστικοποιημένου υλικού, (γ) διευκολύνουν την προς τα κάτω ροή τροφοδοσίας υλικού και (δ) αυξάνουν τη διεπαφή μεταξύ του πείρου και του πλαστικοποιημένου υλικού, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή θερμότητας. Έχει αποδειχθεί ότι πλάκες αλουμινίου με πάχος μέχρι 50 mm μπορούν να συγκολλούνται επιτυχώς με FSW σε ένα πάσο χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο εργαλεία. Μια συγκόλληση 6082Al-T6 FSW πάχους 75 mm., έγινε με τη χρήση εργαλείου Whorl™ σε δύο περάσματα, που το καθένα έδωσε περίπου 38 mm διείδυση. Κατά τον Thomas [7], ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την ανωτερότητα των πείρων Whorl™ και MX Triflute™ σχετικά με τους συμβατικούς κυλινδρικούς πείρους είναι η αναλογία του όγκου σάρωσης κατά τη διάρκεια της περιστροφής προς τον όγκο του ίδιου του πείρου. Δηλαδή μία αναλογία του "δυναμικού όγκου προς τον στατικό όγκο" η οποία είναι απαραίτητη για την παροχή επαρκούς ροής κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Συνήθως, αυτή η αναλογία για πείρους με παρόμοιες διαμέτρους και μήκος είναι 1,1: 1 για συμβατικό κυλινδρικό πείρο, 1,8: 1 για το Whorl™ και 2,6: 1 για τον πείρο MX Triflute™ (όταν πρόκειται για συγκόλληση πλάκας πάχους 25 mm).

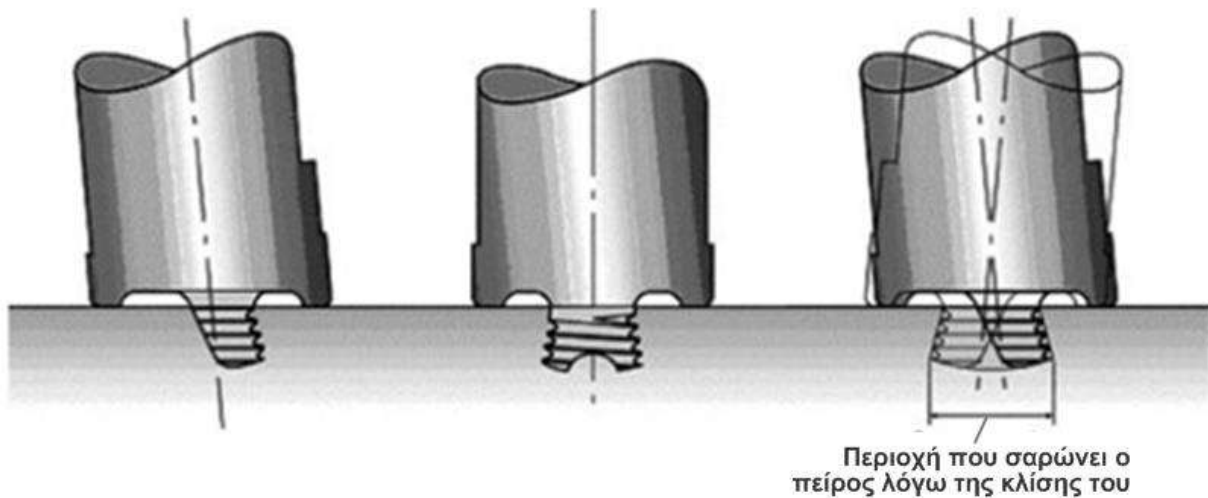


Εικόνα 5: Εργαλεία συγκόλλησης Whorl™ (αριστερά) και MX Triflute™ (δεξιά) που αναπτύχθηκαν από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW)

Για την FSW με επικάλυψη, ο συμβατικός κυλινδρικός-κοχλιοειδής πείρος είχε ως αποτέλεσμα την υπερβολική αραίωση του άνω φύλλου, οδηγώντας σε σημαντικά μειωμένη αντοχή σε κάμψη [8]. Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν δύο νέες γεωμετρίες πείρων, το Flared-Trifute™ με τρία χαρακτηριστικά πτερύγια τα οποία φέρουν επάνω τους ραβδώσεις (Εικόνα 6) και το A-skew™ με τον άξονα του πείρου ελαφρώς κεκλιμένο προς τον άξονα της ατράκτου της μηχανής (Εικόνα 7), οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα των συγκολλήσεων με επικάλυψη [8].



Εικόνα 6: Εργαλείο συγκόλλησης Flared-Trifute™ που αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) με επικάλυψη πλακών.(α) με ουδέτερα πτερύγια, (β) με αριστερόστροφα πτερύγια και (γ) με δεξιόστροφα πτερύγια [8]

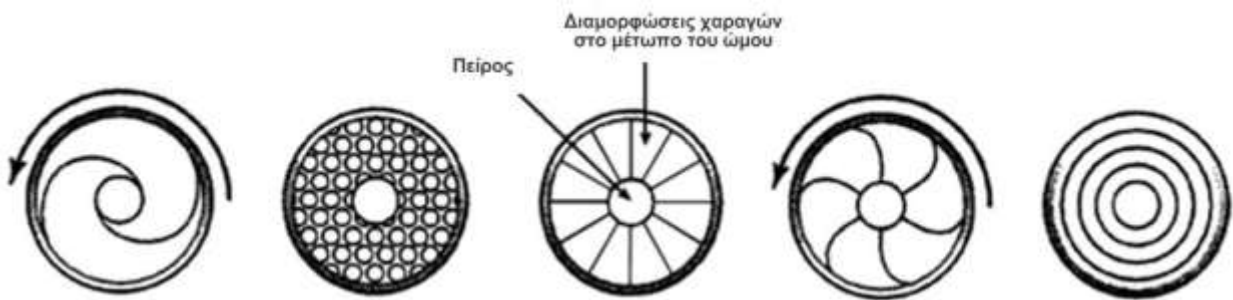


Εικόνα 7: Εργαλείο συγκόλλησης A-skew™ που αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) με επικάλυψη πλακών [8]

Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης του Flared-Trifute™ και του A-skew™ πιστεύεται ότι: (α) αυξάνουν την αναλογία μεταξύ του όγκου σάρωσης και του στατικού όγκου του πείρου, βελτιώνοντας έτσι τη ροή γύρω και κάτω από τον πείρο, (β) διευρύνουν την περιοχή συγκόλλησης εξαιτίας του αυξημένου όγκου πλαστικοποιημένου υλικού που εκτοπίζεται λόγω των πτερυγίων του Flared-Trifute™ και λόγω της εκκεντρότητας στον πείρο A-skew™ (γ) παρέχουν βελτιωμένη ανάμειξη όσον αφορά τη διάλυση και διασπορά των οξειδίων στη

επιφάνεια διεπαφής (δ) λόγω της τροχιακής κίνησης, παρέχει μια επιπρόσθετη ανάδευση του υλικού στη βάση της συγκόλλησης, εξαιτίας της εκκεντρότητας του πείρου A-skew™, βελτιώνοντας την ποιότητα συγκόλλησης στην περιοχή αυτή. Σε σύγκριση με τον συμβατικό σπειροειδή πείρο, οι πείροι Flared-Trifute™ και A-skew™ είχαν ως αποτέλεσμα: (α) τη βελτίωση πάνω από 100% στην ταχύτητα συγκόλλησης, (β) τη μείωση της αξονικής δύναμης κατά 20%, (γ) τη σημαντική διεύρυνση της περιοχής συγκόλλησης (190-195% του πάχους της πλάκας για τους πείρους Flared-Trifute™ και A-skew™ και 110%.

Περαιτέρω, διάφορα προφίλ περιαιχενίων σχεδιάστηκαν από το TWI προκειμένου να είναι συμβατά σε διάφορα υλικά και συνθήκες συγκόλλησης. Αυτά τα προφίλ ώμων βελτιώνουν τη σύζευξη μεταξύ του περιαιχενίου του εργαλείου και των τεμαχίων εργασίας, εγκλωβίζοντας το πλαστικοποιημένο υλικό κάτω από την περιοχή του περιαιχενίου λόγω φαινομένων επανακυκλοφορίας του υλικού, τα οποία οφείλονται στις γεωμετρίες των περιαιχενίων-ώμων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.



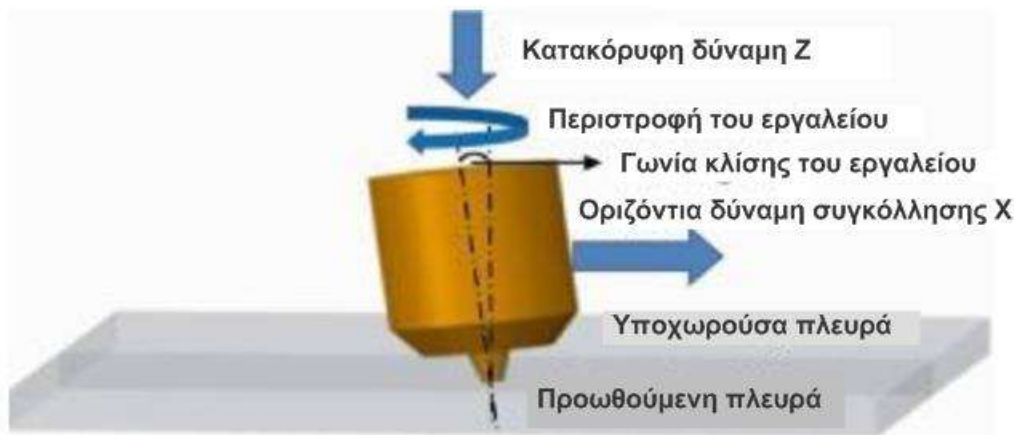
Εικόνα 8: Γεωμετρίες ώμων που αναπτύχθηκαν από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) για συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) [8]

Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική επίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου στη ροή του μετάλλου, η θεμελιώδης συσχέτιση μεταξύ της ροής του υλικού και της προκύπτουσας μικροδομής των συγκολλήσεων ποικίλλει ανάλογα με το κάθε εργαλείο. Μια κρίσιμη ανάγκη είναι να αναπτυχθεί ένα συστηματικό πλαίσιο για το σχεδιασμό εργαλείων. Υπολογιστικά εργαλεία, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση της ροής του υλικού και τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων.

1.4.2. Γωνία κλίσης, βάθος διείδυσης και δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο εργαλείο συγκόλλησης

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, στη διεπαφή του εργαλείου συγκόλλησης με τα προς συγκόλληση τεμάχια αναπτύσσονται δύο διαφορετικές δυνάμεις (Εικόνα 9). Το εργαλείο συγκόλλησης υφίσταται μία κατακόρυφη δύναμη Z καθώς εκείνο διεισδύει στο τεμάχιο εργασίας και μία οριζόντια δύναμη X, γνωστή ως δύναμη συγκόλλησης,

καθώς μετατοπίζεται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης λόγω της αντίστασης του υλικού στη ροή γύρω από τον πείρο του εργαλείου. Η επαρκής κατακόρυφη δύναμη είναι μία σημαντική προϋπόθεση δεδομένου ότι προάγει την παραγωγή θερμότητας και την κατάλληλη ροή του πλαστικοποιημένου υλικού στην οπίσθια ακμή του εργαλείου. Σημαντικό ρόλο επίσης στη ροή του υλικού έχει και η κλίση του εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια του τεμαχίου. Δίνοντας μια μικρή κλίση στον άξονα του εργαλείου προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν της συγκόλλησης, εξασφαλίζουμε ότι το περιαιχένιο μεταφέρει το αναδεδυμένο υλικό αποδοτικά από το εμπρός προς το πίσω μέρος του πείρου (tilt angle στην Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) με κλίση του άξονα του εργαλείου προς τα πίσω [5]

Η γωνία κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης προσδίδει μία πιο σύνθετη και έντονη ανάδευση στη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης (Weld nugget) [5]. Ο Chen και οι συνεργάτες του στην ερευνά τους [9], διαπίστωσαν ότι η γωνία κλίσης του εργαλείου επηρεάζει την παραγωγή θερμότητας οδηγώντας στη παραγωγή συγκολλήσεων χωρίς ατέλειες. Ο Z. Barlas [10] συμπέρανε πειραματικά ότι η κλίση 2° του εργαλείου συγκόλλησης, σε συνδυασμό με τις κατάλληλες παραμέτρους (ταχύτητα συγκόλλησης και ταχύτητα πρόωσης) οδηγεί σε αναβαθμισμένες συγκολλήσεις από άποψη μικροδομής.

Ο Abhijit Banik και οι συνεργάτες του [11], ανέλυσαν την επίδραση των γωνιών κλίσης με δύο διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείων συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι καθώς αυξάνεται η γωνία κλίσης, αυξάνεται η ροπή και οι δυνάμεις συγκόλλησης που παράγονται στη διεπαφή εργαλείου-τεμαχίου. Σε γωνία κλίσης 0° επιτυγχάνεται ομαλή κατανομή της ροπής και των άλλων δυνάμεων. Η δύναμη Z αυξάνεται επίσης με την κλίση λόγω του αυξημένου βάθους βύθισης στην πίσω άκρη.

Το βάθος διείδυσης του πείρου στο υλικό είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας χωρίς ατέλειες. Βάθος διείδυσης ορίζεται η απόσταση του χαμηλότερου σημείου του πείρου από την άνω επιφάνεια των υπό συγκόλληση

τεμαχίων. Όταν το βάθος διείδυσης είναι πολύ μικρό, το περιουχένιο δε βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του τεμαχίου και δεν μπορεί να συνεισφέρει στη διαδικασία ούτε θερμικά, ούτε κινητικά αλλά ούτε και στον περιορισμό του υλικού στη ζώνη ανάδευσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκολλήσεων με ατέλειες όπως εσωτερικά ή επιφανειακά κενά. Αντίθετα όταν το βάθος διείδυσης είναι πολύ μεγάλο, το περιουχένιο διειδύει σε τέτοιο βαθμό εντός του τεμαχίου που παρατηρείται η δημιουργία γρεζιού (flash). Στην περίπτωση αυτή, παράγεται μια σημαντικά κοίλη συγκόλληση, γεγονός το οποίο οδηγεί στην εκλέπτυνση των συγκολλημένων τεμαχίων.

1.4.3. Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

Η ταχύτητα περιστροφής είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος συγκόλλησης, η οποία παίζει βασικό ρόλο στη ροή του υλικού και στην παραγωγή θερμότητας, επηρεάζοντας έτσι τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Ο Schneider στην ερευνά του [12], διαπίστωσε ότι η ταχύτητα περιστροφής έχει σημαντική επίδραση στο σχηματισμό της ζώνης και στην αντοχή της ραφής συγκόλλησης. Σύμφωνα με τον R.S. Mishra [5] περιστροφή του εργαλείου οδηγεί σε ανάδευση και ανάμιξη υλικού γύρω από τον περιστρεφόμενο πείρο. Οι υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου παράγουν υψηλότερη θερμοκρασία λόγω της υψηλότερης θέρμανσης με τριβή και οδηγούν σε πιο έντονη ανάδευση και ανάμιξη υλικού. Ωστόσο, η παροχή θερμότητας καθορίζεται από τη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας του περιουχένιου και των προς συγκόλληση ελασμάτων. Έτσι, δεν αναμένεται μονοσήμαντη αύξηση της θέρμανσης με αυξανόμενη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου καθώς ο συντελεστής τριβής στη διεπαφή θα αλλάξει με την αύξηση της ταχύτητα περιστροφής. Επίσης σύμφωνα με τον Li [13], το μέγεθος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων μπορεί να μειωθεί μειώνοντας την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, αλλά διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου. Με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της κατακόρυφης δύναμης, παρατηρείται αύξηση των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας και του ποσοστού παραμόρφωσης στη συγκόλληση. Ο K. Elangovan [14], στην έρευνά του αναφέρει πως η υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία και βραδύτερο ρυθμό ψύξης στο πυρήνα μετά τη συγκόλληση. Μια υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής προκαλεί υπερβολική ανάδευση των υλικών στην ανώτερη επιφάνεια, η οποία κατά συνέπεια δημιουργεί κενά στο πυρήνα συγκόλλησης. Αντιθέτως η χαμηλότερη παροχή θερμότητας λόγω της μικρότερης ταχύτητας περιστροφής είχε ως αποτέλεσμα την έλλειψη ανάδευσης. Η έκταση του πυρήνα μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου επηρεάζοντας την κατανομή της θερμοκρασίας στη περιοχή. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται, η περιοχή συγκόλλησης διευρύνεται. Αυτό σημαίνει ότι το σημείο

θραύσης της επηρεάζεται επίσης από την ταχύτητα περιστροφής [15]. Οι ιδιότητες εφελκυσμού των συγκολλήσεων που έγιναν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής για μια δεδομένη ταχύτητα πρόωσης είχαν ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής αυξήθηκε, τόσο η αντοχή όσο και η επιμήκυνση βελτιώθηκαν, φθάνοντας στο μέγιστο, πριν πέσουν ξανά λόγω ιδιαίτερα υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων. Είναι σαφές ότι, στην FSW, καθώς η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται, η εισροή θερμότητας αυξάνεται επίσης. Ωστόσο, οι υπολογισμένες μέγιστες θερμοκρασίες είναι σχεδόν ίδιες σε όλες τις ταχύτητες περιστροφής. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τους ακόλουθους δύο λόγους: πρώτον, ο συντελεστής τριβής μειώνεται όταν συμβαίνει μία τοπική τήξη υλικού και δεύτερον, σε μεγαλύτερα ποσοστά παροχής θερμότητας υπάρχουν και μεγαλύτερες απώλειες. Τέλος σε πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής τα σωματίδια δευτερευουσών φάσεων (ενίσχυσης) θα υποστούν περισσότερο θρυμματισμό και θα διαλυτοποιηθούν σε διάφορα μέρη της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης (TMAZ). Καθώς η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται και η θερμοκρασία μέσα στον πυρήνα συγκόλλησης γίνεται χαμηλότερη, το κλάσμα όγκου των χονδροειδών σωματιδίων δεύτερης φάσης αυξάνεται. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου πρέπει να βελτιστοποιηθεί ώστε να δημιουργήσει στη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης λεπτά σωματίδια δευτερευουσών φάσεων ομοιόμορφα κατανομημένα σε όλη τη μήτρα.

1.4.4. Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης

Η διαδικασία της συγκόλλησης ολοκληρώνεται με την πρόωση του εργαλείου η οποία κινεί το αναδεδυμένο υλικό από το μέτωπο προς το πίσω μέρος του πείρου. Αποτελεί συνεπώς επίσης μία παράμετρο που επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό τη θερμική παροχή καθορίζοντας τη ποιότητα, τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης [5]. Ο Krishnam και οι συνεργάτες του [16], στην ερευνά τους προσπάθησαν να προσδιορίσουν την αλληλεπίδραση της περιστροφικής ταχύτητας, της ταχύτητας πρόωσης και του κάθετου αξονικού φορτίου στην αντοχή σε εφελκυσμό, στο όριο διαρροής, στο ποσοστό της επιμήκυνσης και στη κατανομή της μικροσκληρότητας.

Έχει καταγραφεί ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου συγκόλλησης τόσο μειώνονται τα υπόλοιπα τρία χαρακτηριστικά μεγέθη. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στην μειωμένη θερμική παροχή που προδίδεται στα προς συγκόλληση τεμάχια λόγω υψηλής ταχύτητας πρόωσης, με αποτέλεσμα τη μη επαρκή ανάδευση στον πυρήνα της συγκόλλησης. Γενικότερα η ταχύτητα πρόωσης καθορίζει πολλά χαρακτηριστικά μίας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Ο Krishnam [16] προσπαθώντας να συγκεντρώσει τις επιδράσεις αυτές κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Εάν η ταχύτητα πρόωσης είναι σχετικά χαμηλή, τότε η παροχή θερμότητας στο πυρήνα συγκόλλησης είναι η ιδιαίτερα υψηλή. Η παραγόμενη θερμότητας λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους είναι επίσης υψηλή ενώ παρατηρείται η δημιουργία ευμεγεθών κόκκων.
- Εάν η ταχύτητα πρόωσης είναι σχετικά βέλτιστη, η συνεργασία εργαλείου και προς συγκόλληση ελασμάτων βελτιώνεται. Η παραγόμενη θερμότητας λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους μειώνεται ενώ υπάρχει επαρκής ροή πλαστικοποιημένου υλικού στο πυρήνα συγκόλλησης. Τέλος, η παραγόμενη μικροδομή αποτελείται από εκλεπτυσμένους κόκκους.
- Εάν η ταχύτητα πρόωσης είναι σχετικά υψηλή, παροχή θερμότητας στα προς συγκόλληση τεμάχια δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα να υπάρχει ανεπαρκής ροή πλαστικοποιημένου υλικού στο πυρήνα. Παρατηρείται μείωση του μεγέθους των κόκκων, ωστόσο το πλαστικοποιημένο υλικό βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάδευση του, προκαλώντας ατέλειες στη παραγόμενη συγκόλληση.

1.4.5. Επίδραση του λόγου των ταχυτήτων συγκόλλησης

Ο λόγος των ταχυτήτων συγκόλλησης (weld pitch) ή βήμα συγκόλλησης ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας πρόωσης προς την ταχύτητα περιστροφής (v/ω). Πρόκειται για επίσης μία πολύ σημαντική παράμετρο που συνδυάζει τις επιδράσεις και των δύο ταχυτήτων συγκόλλησης σε ένα λόγο.

Οι Seidel και Reynolds, οι οποίοι είναι και εκείνοι που πρότειναν το λόγο αυτό, αναφέρουν [17] ότι σε υψηλούς λόγους ταχυτήτων η ποσότητα της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού μειώθηκε και κατέληξαν πως η αποτελεσματικότητα της ανάδευσης ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το βήμα συγκόλλησης. Αντιθέτως σε χαμηλούς λόγους συγκόλλησης η ανεπαρκής πλαστική παραμόρφωσή ενίσχυσε το σχηματισμό στρώματος οξειδίου στην υποχωρούσα πλευρά RS κατά τη διάρκεια της FSW, όπως αναφέρθηκε από τον Afrin και τους συνεργάτες του [18]. Αυτή η πλούσια σε οξειδία περιοχή επηρέασε σημαντικά τη συμπεριφορά του κράματος Al-Mg σε εφελκυσμό και συνεπώς η αστοχία έλαβε χώρα στην RS, σε υψηλούς λόγους ταχυτήτων (v/ω) κατά τη διάρκεια δοκιμών εφελκυσμού.

Σύμφωνα με τον S.M. Chowdhury και τους συνεργάτες του [19], παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του βήματος συγκόλλησης, σε ένα μεγάλο εύρος, τόσο το όριο διαρροής όσο και οι ιδιότητες εφελκυσμού παρουσιάζουν αξιόλογη αύξηση με γραμμική. Με την αύξηση του βήματος συγκόλλησης η συνολική παραγωγή θερμότητας μειώνεται, οδηγώντας στο σχηματισμό κόκκων μικρότερου μεγέθους. Συνεπώς με αύξηση του λόγου (v/ω) παρατηρείται αύξηση της αντοχής των παραγόμενων συγκολλήσεων.

Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι παραπάνω γραμμικές σχέσεις θεωρήθηκαν έγκυρες σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα τιμών βήματος συγκόλλησης, υπάρχει ένα άνω όριο πάνω από το οποίο μπορεί να παρουσιαστεί μεγάλη ποσότητα ελαττωμάτων. Τέτοια ελαττώματα μπορεί να είναι τύπου Kissing Bond και γενικότερα ελαττώματα ανεπαρκούς σύνδεσης, δεδομένου ότι η σωστή/μεταλλουργική σύνδεση μπορεί να μην δημιουργηθεί λόγω ανεπαρκούς πλαστικοποίησης του υλικού που οφείλεται στην ανεπαρκή θερμική παροχή λόγω υψηλών βημάτων συγκόλλησης. Ένα τέτοιο ανώτερο όριο θα αναμενόταν επίσης να εξαρτάται από τα εξαρτώμενα από τη θερμοκρασία χαρακτηριστικά ροής των υλικών. Έτσι, διαφορετικά υλικά θα έχουν διαφορετικές ανώτερες οριακές τιμές. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να βρεθούν τα ανώτερα όρια του βήματος συγκόλλησης για διαφορετικά υλικά.

1.5. Μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί και ατέλειες της FSW

1.5.1. Φαινόμενα Δυναμικής Ανακρυστάλλωσης

Σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνδυασμό με την εφαρμογή παραμορφώσεων δημιουργούνται φαινόμενα αποκατάστασης και ανακρυστάλλωσης. Οι προαναφερόμενες διαδικασίες εμφανίζονται σε διάφορες διεργασίες μετάλλων, όπως και στις συγκολλήσεις. Μέσω της μείωσης του ορίου διαρροής (flow stress) του υλικού επέρχεται ευκολότερη παραμόρφωση επηρεάζοντας τον κρυσταλλογραφικό ιστό (texture) και το μέγεθος των κόκκων του [20].

Σύμφωνα με τους Huang και Loge [21], τα περισσότερα από τα μεταλλικά μέρη, κατά τη διάρκεια του κύκλου επεξεργασίας τους υπόκεινται σε θερμή παραμόρφωση, κατά την οποία συχνά λαμβάνει χώρα η δυναμική ανακρυστάλλωση (DRX). Ως ανακρυστάλλωση ορίζεται ο σχηματισμός μιας νέας δομής κόκκων, σε ένα παραμορφωμένο υλικό με το σχηματισμό και τη μετανάστευση των ορίων υψηλών γωνιών των κόκκων (HAGBs) που οφείλονται στην αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος η οποία εισάγεται με πλαστική παραμόρφωση [22]. Η τελική μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα φαινόμενα δυναμικής ανακρυστάλλωσης και ανόπτησης. Πολλοί σημαντικοί παράγοντες μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στη DRX:

- όπως τα σφάλματα επιστοιβάξης (SFE)
- οι συνθήκες θερμό-μηχανικής επεξεργασίας (TMP)
- το αρχικό μέγεθος κόκκων
- η χημεία και η μικροχημεία του υλικού όσον αφορά το επίπεδο διαλυτότητας των σωματιδίων δεύτερης φάσης κλπ., οι οποίοι είναι επίσης και οι λόγοι για τους οποίους μια τεράστια ποσότητα συναφών έργων μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία.

Κατά τη διάρκεια της θερμής παραμόρφωσης, παρατηρείται συχνά η μη συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX) για υλικά με χαμηλά σφάλματα επιστοιβάξης (SFE), όπου πραγματοποιείται η πυρηνοποίηση νέων κόκκων απαλλαγμένων από τάσεις, οι οποίοι σταδιακά μεγεθύνονται. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης σχηματίζονται κυτταρικές δομές με χαμηλές γωνίες ορίων κόκκων (LAGBs) για υλικά με υψηλό (SFE). Εξαιτίας της υψηλής δυναμικής αποκατάστασης, οι κυτταρικές δομές αποκτούν σταδιακά υψηλές γωνίες κόκκων (HAGBs) σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, μία διαδικασία γνωστή ως συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX).

Εκτός από τις DRX, DDRX και CDRX παρατηρήθηκε επίσης ένα ακόμα είδος, εκείνο της γεωμετρικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης (GDRX), κατά την παραμόρφωση του αλουμινίου σε

υψηλές θερμοκρασίες. Στη περίπτωση αυτή οι παραμορφωμένοι κόκκοι επιμηκύνονται παραμένοντας ευδιάκριτοι κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης σε μεγάλες πιέσεις.

Κατά συνέπεια, επιτυγχάνεται ουσιαστική βελτίωση των κόκκων μέσω της επιμήκυνσης και της αραίωσης των κόκκων. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει αυστηρή διαχωριστική γραμμή μεταξύ αυτών των τριών τύπων δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Επίσης αναφέρθηκε η DDRX για υψηλά σφάλματα επιστοιβάξης (SFE) σε ελάσματα υψηλής περιεκτικότητας αλουμινίου (Al). Οι CDRX και DDRX μπορούν ακόμη και να συνυπάρχουν κατά τη διάρκεια της θερμής επεξεργασίας κραμάτων αλουμινίου (Al) με μαγνήσιο (Mg) και ψευδάργυρο (Zn) καθώς και ανοξειδωτων χαλύβων. Κατά τη δημιουργία κραμάτων, η προσθήκη στοιχείων προσθήκης στο μητρικό υλικό μπορεί να τροποποιήσει το SFE και συνεπώς να αλλάξει το τρόπο ανακρυστάλλωσης. Ακόμη και για το ίδιο υλικό η αλλαγή των συνθηκών TMP [23] ή του αρχικού μεγέθους κόκκων [24] μπορεί επίσης να οδηγήσει στη μετάβαση από DDRX σε CDRX. Επιπλέον, οι CDRX και GDRX μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα. Για το λόγο αυτό δεν είναι εύκολο να ταυτοποιηθεί ποιος τύπος των τριών διεργασιών DRX λειτουργεί σε ορισμένες συνθήκες TMP, επειδή και οι τρεις διεργασίες μοιράζονται κάποιες ομοιότητες και μπορούν να λάβουν χώρα ταυτόχρονα και μεταβατικά.

Τα ελαττώματα όπως τα διάκενα αυξάνονται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, γεγονός που καθιστά το υλικό θερμοδυναμικά ασταθές. Όταν υπάρχει παραμόρφωση μετάλλου σε υψηλές θερμοκρασίες, οι θερμικά ενεργοποιούμενες διεργασίες τείνουν να απομακρύνουν τις ατέλειες προκειμένου να μειωθεί η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος. Η μικροδομή καθώς και οι ιδιότητες μπορούν να αποκατασταθούν μερικώς στις αρχικές τους τιμές πριν την παραμόρφωση μέσω τις απαλοιφής και της αναδιάταξης των ατελειών. Η αποκατάσταση γενικά συνεπάγεται ομοιογενείς αλλαγές στη μικροδομή, χωρίς όμως να συνεπάγεται τη μεταβολή των HAGBs μεταξύ των παραμορφωμένων κόκκων [22]. Παρόμοιες διαδικασίες ανάκτησης μπορούν να λάβουν χώρα κατά τη διάρκεια της ανόπτησης ή κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, οι οποίες είναι γνωστές ως στατική αποκατάσταση (SRV) και δυναμική αποκατάσταση (DRV), αντίστοιχα. Η ανακρυστάλλωση μπορεί να συμβεί ετερογενώς με σαφή πυρήνωση και στάδια ανάπτυξης και σε αυτή την περίπτωση περιγράφεται ως ασυνεχής διαδικασία. Επίσης να λάβει χώρα ομοιόμορφα έτσι ώστε οι μικροδομές να εξελίσσονται σταδιακά χωρίς σαφές στάδιο πυρήνωσης και ανάπτυξης, παρουσιάζοντας συνεχή χαρακτήρα. Η στατική ανακρυστάλλωση (SRX) αναφέρεται στη διεργασία ανακρυστάλλωσης κατά την ανόπτηση, ενώ αυτή που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης σε υψηλές θερμοκρασίες ονομάζεται δυναμική ανακρυστάλλωση (DRX). Κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων ανόπτησης, σχηματίζονται λεπτοί κρυσταλλίτες από την SRV, αυτοί οι πυρήνες αναπτύσσονται σε βάρος της μήτρας, που οδηγείται από την αποθηκευμένη ενέργεια που συνδέεται με τα διάκενα και τις

υποπεριοχές της μικροδομής. Αυτή η διαδικασία είναι η πλέον μελετημένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία ανακρυστάλλωσης, η οποία μπορεί να ταξινομηθεί ως ασυνεχής στατική ανακρυστάλλωση (DSRX). Το SRX μπορεί επίσης να λάβει χώρα ομοιογενώς χωρίς καθαρό πυρήνα και στάδιο ανάπτυξης. Ένα καλό παράδειγμα είναι όταν κράματα αλουμινίου με δομή υποστρώματος σταθεροποιημένη από σωματίδια, αναδιατάσσονται σε αυξημένες θερμοκρασίες. Τα λεπτά σωματίδια κατακρημνίζονται κατά μήκος των ορίων των κόκκων και η σταδιακή ανάπτυξη υποκόκκων λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της επακόλουθης ανόπτησης ενώ οι γωνίες ορίων LAGB αυξάνονται προοδευτικά μέχρι να μετατραπούν σε HAGBs. Με τον τρόπο αυτό, μια νέα μικροδομή αναπτύσσεται ομοιόμορφα σε όλη την παραμορφωμένη μήτρα και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται ως συνεχής στατική ανακρυστάλλωση (CSRX) ή εκτεταμένη ανάκτηση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι τρεις διεργασίες της δυναμικής ανακρυστάλλωσης με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

1.5.1.1. Μη συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX)

Όταν αναφέρεται ο όρος δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX) χωρίς κάποια διευκρίνηση τότε συνήθως αναφέρεται στη συμβατική διεργασία μη συνεχούς ανακρυστάλλωσης (DDRX) με σαφή στάδια πυρήνωσης και ανάπτυξης. Η DDRX συνήθως εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της θερμής παραμόρφωσης κραμάτων, μικρών έως μεσαίων SFE. Τα κράματα που υποβάλλονται σε DDRX εμφανίζουν ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά και συνοψίζονται ως εξής:

- Μία κρίσιμη τάση ϵ_{cr} , κάπως χαμηλότερη από τη μέγιστη τάση ϵ_p , πρέπει να επιτευχθεί πριν από την εμφάνιση της DDRX [25]. Τόσο αυτή η κρίσιμη τάση όσο και η μέγιστη τάση μειώνονται με τη μείωση της παραμέτρου Zener- Hollemon [24].
- Ανάλογα με τη θερμοκρασία παραμόρφωσης, το βαθμό παραμόρφωσης και το αρχικό μέγεθος κόκκου, μπορούν να παρατηρηθούν μεμονωμένες ή πολλαπλές κορυφές στη περιοχή καταπόνησης. Η τάση συνεχούς καταπόνησης σχετίζεται με τη παράμετρο Zener-Hollemon ενώ είναι ανεξάρτητη από το αρχικό μέγεθος κόκκων [26].
- Η πυρηνοποίηση της διαδικασίας DDRX συνήθως ξεκινά από τα προ υπάρχοντα όρια κόκκων, σχηματίζοντας μία μικροδομή “περιδέριου” [27] η οποία αποτελείται από ισοαξονικούς κόκκους όταν η διαφορά μεγέθους μεταξύ των αρχικών και των ανακρυσταλλωμένων κόκκων είναι μεγάλη
- Η κινητική της ανακρυστάλλωσης επιταχύνεται με τη μείωση του αρχικού μεγέθους του κόκκου, το βαθμό καταπόνησης και την αύξηση της θερμοκρασίας παραμόρφωσης [24].
- Κατά τη διάρκεια της DDRX το μέγεθος των κόκκων εξελίσσεται πριν μία τιμή κορεσμού D_s η οποία στη συνέχεια δεν αλλάζει καθώς η ανακρυστάλλωση προχωράει. Η

μεγέθυνση καθώς και η εκλέπτυνση των κόκκων λαμβάνουν χώρα ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες παραμόρφωσης και μεγέθους των κόκκων [28].

- Τέλος παρατηρείται μία σχέση μεταξύ του μεγέθους των κόκκων και της παραμέτρου Zener-Holomon, παρόλο που παρατηρήθηκε απόκλιση σε υψηλές τιμές της παραμέτρου Z.

1.5.1.2. Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX)

Όταν η μικροδομή εξελίσσεται σχετικά ομοιογενώς σε όλο το υλικό, χωρίς σαφή όρια πυρήνωσης και ανάπτυξης των ανακρυσταλλωμένων κόκκων, λαμβάνει χώρα η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX) [20]. Η διεργασία της CDRX έχει εξεταστεί πολύ λιγότερο σε σχέση με την DDRX, δεδομένου ότι έχει μακρά υποστηριχθεί ότι η διεργασία δυναμικής αποκατάστασης DRV είναι ο μόνος μηχανισμός εκλέπτυνσης της μικροδομής σε μέταλλα με υψηλά σφάλματα επιστοιβάξης (SFE). Τα κύρια χαρακτηριστικά της διεργασίας CDRX κατά τη διαδικασία της θερμής παραμόρφωσης συνοψίζονται παρακάτω [20], [29] και [23]:

- Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης αυξάνεται με την ένταση ενώ σε μεγάλες καταπονήσεις αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας παραμόρφωσης και την αύξηση του ρυθμού καταπόνησης [30], ενώ είναι ανεξάρτητη από το αρχικό μέγεθος των κόκκων.
- Η αύξηση της τάσης προκάλεσε αύξηση της γωνίας των ορίων των υποκόκκων. Οι χαμηλότεροι ρυθμοί αύξησης της τάσης επιταχύνουν αυτή τη διαδικασία [31], ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν είτε να αυξήσουν είτε να μειώσουν το μέγεθος των κόκκων ανάλογα με τη θερμοκρασία παραμόρφωσης και το ποσοστό των στοιχείων κραμάτωσης. Ωστόσο υπάρχουν κάποιιοι σταθεροί προσανατολισμοί, για τους οποίους η αύξηση της γωνίας των ορίων των κόκκων δεν επαρκεί για να μετατραπούν και να χαρακτηριστούν ως HAGBs [32].
- Ο μετασχηματισμός των LAGBs σε HAGBs οφείλεται στην ομοιογενή αύξηση της γωνίας προσανατολισμού των LAGBs σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, στην προοδευτική περιστροφή του πλέγματος κοντά στα όρια των κόκκων (LRGBs) καθώς και στο σχηματισμό ζωνών διάσπασης (MSBs) σε αυξημένες τάσεις. Αναφέρεται επίσης, ότι στα πρώτα στάδια της παραμόρφωσης, η υποδιαίρεση των κόκκων κατά τη διάρκεια της θερμής παραμόρφωσης, επηρεάζεται έντονα από τον προσανατολισμό των κόκκων [31].
- Το μέσο μέγεθος κρυσταλλίτη μειώνεται με τη παραμόρφωση και φθάνει μία “σταθερή τιμή” σε αυξημένες τάσεις [32]. Μία μείωση του αρχικού μεγέθους των κόκκων μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την κινητική της εκλέπτυνσης των κόκκων υπό την επίδραση

μίας μεγάλης τάσης παραμόρφωσης [33]. Ωστόσο η ακολουθία της παραμόρφωσης έχει μικρή επίδραση στη κινητική της διεργασίας συνεχούς ανακρυστάλλωσης CDRX [32].

- Σε μεγάλες καταπονήσεις παρατηρείται ο σχηματισμός μίας ισχυρής κρυσταλλογραφικής υφής.

1.5.1.3. Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (GDRX)

Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση έχει αναφερθεί σε πολλά υλικά όπως εκείνα με υψηλή καθαρότητα αλουμινίου [34] αλλά και κράματα αλουμινίου με στοιχεία προσθήκης όπως ο χαλκός (Cu) [35], το μαγνήσιο (Mg) [36] και ο ψευδάργυρος (Zn). Η GDRX θεωρήθηκε ως ένας τύπος CDRX από τους Humphreys και Hatherley [20], ωστόσο υπάρχουν κάποιες βασικές διαφορές μεταξύ των δύο διεργασιών οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια:

- Η GDRX παρατηρείται κυρίως για υλικά με υψηλό SFE που παραμορφώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες με χαμηλές ταχύτητες καταπόνησης. Η DRV κυριαρχεί σε χαμηλές θερμοκρασίες παραμόρφωσης, καθώς η κινητικότητα των HAGBs είναι πολύ χαμηλή προκειμένου να μεταναστεύσουν, ενώ η ανάπτυξη των κόκκων λαμβάνει χώρα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες παραμόρφωσης [37] και [36].
- Όσον αφορά την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, η τάση αρχικά αυξάνεται έως μία σχετικά μεγάλη τιμή και εν συνεχεία μειώνεται, πιθανότατα λόγω μαλάκυνσης της υφής, σε μια συγκεκριμένη τιμή η οποία ωστόσο παραμένει υψηλή.
- Οι νέοι κόκκοι ξεκινούν τη δημιουργία τους μετά από μια κρίσιμη παραμόρφωση, αρχικά κοντά στα HAGBs [36]. Οι υποκόκκοι παραμένουν ισοαξονικοί και σταθεροί σε μέγεθος. Το σταθερό αυτό μέγεθος τους μειώνεται με την αύξηση της παραμέτρου Zener-Holomon [38].
- Σε αντίθεση με την διεργασία CDRX, η γωνία προσανατολισμού των ορίων των κόκκων, προωθείται από διαδικασίες εξάρθρωσης στις περίπου 2. Οι ζώνες παραμόρφωσης συνήθως σχηματίζονται με χονδροειδές αρχικό μέγεθος κόκκων ενώ τα αρχικά HAGBs δεν λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της μέσης (χαμηλής) γωνίας προσανατολισμού των ορίων των υποκόκκων. Επομένως, υπάρχει πάντα μία διτροπική κατανομή της γωνίας προσανατολισμού κατά τη διάρκεια της γεωμετρικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης (GDRX) εάν ληφθούν υπόψη όλα τα όρια των κόκκων [36].
- Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας όσον αφορά το ποσοστό των HAGBs κατά τη διάρκεια της GDRX είναι συγκεχυμένα. Από τη μία πλευρά, αναφέρθηκε ότι υπάρχει, σχετικά με το αρχικό μέγεθος κόκκου, μεταξύ 1/6 και 1/3 του ποσοστού του υποκόκκου, HAGBs που προϋπήρχαν στον κόκκο, δηλαδή που δεν είναι αποτέλεσμα της διεργασίας CDRX ή DDRX. [39] Από την άλλη πλευρά το ποσοστό των HAGBs φαίνεται να

αυξάνεται με τη πίεση και τη θερμοκρασία παραμόρφωσης και μπορεί να φτάσει περισσότερο από 80% [38]. Στην τελευταία περίπτωση, οι γωνίες προσανατολισμού οι οποίες είναι μικρότερες από 1,5 ή 2ο αγνοήθηκαν (με την τεχνική EBSD), οι οποίες μπορεί να αποτελούν το λόγο για το μεγάλο ποσοστό των HAGBs.

- Σε αντίθεση με την DDRX, η κρυσταλλογραφική υφή κατά τη διάρκεια της GDRX παραμένει σε μεγάλο βαθμό αναλλοίωτη, όπως η ισχυρή κυλινδρική υφή κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης, εφόσον λαμβάνει χώρα μικρό ποσοστό μετανάστευσης των HAGBs. Το μαλάκωμα της υφής, ωστόσο, θεωρείται υπεύθυνο για τη μείωση της τάσης μετά τη πρώτη κορυφή [39].
- Όταν λαμβάνει χώρα η διαλυτοποίηση και η κατακρήμνιση των διαμεταλλικών σωματιδίων, η κρίσιμη τάση σχηματισμού νέων υποκόκκων και η αύξηση του ποσοστού των HAGBs, με την ταυτόχρονη μείωση του σταθερού μεγέθους των υποκόκκων, απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διεργασίας GDRX. Γεγονός που προϋποθέτει μεγάλη παραμόρφωση.

1.5.2. Ατέλειες στην Συγκόλληση Δια Τριβής Μέσω Ανάδευσης

Στο συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης εμφανίζονται 3 (τρεις) πιθανοί τύποι ατελειών και οφείλονται σε μη ικανοποιητικό συνδυασμό των βασικών παραμέτρων, (ταχύτητα συγκόλλησης, ταχύτητα περιστροφής και κάθετη δύναμη). Οι τύποι ατελειών που εμφανίζονται είναι:

1.5.2.1. Εκβολή μάζας μετάλλου εκτός της περιοχής της ραφής (γρέζι, flash)

Ο συγκεκριμένος τύπος ατέλειας οφείλεται σε υψηλή πρόσδοση θερμότητα. Η υψηλή πρόσδοση θερμότητας οφείλεται σε υψηλή ταχύτητα περιστροφής και χαμηλή ταχύτητα πρόωσης. Η εκβολή του υλικού οφείλεται στην πλαστικοποίηση του λόγω της μεγάλης παραγόμενης θερμότητας. Αρκετές φορές η άκρη του εργαλείου συγκόλλησης έρχεται σε επαφή με την πλάκα υποστήριξης των προς συγκόλληση τεμαχίων [40].

1.5.2.2. Ατέλειες τύπου «αυλάκι» (groove-like defects)

Αντίστοιχα, ο συγκεκριμένος τύπος ατέλειας οφείλεται στην ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας και προκύπτει από τις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα πρόωσης. Ο συγκεκριμένος τύπος ατέλειας έχει την μορφή τούνελ ή κοιλοτήτων. Τέλος αναφέρεται ότι υπό την αύξηση της κάθετης δύναμης μειώνεται το μέγεθος των συγκεκριμένων ατελειών [41], [40].

1.5.2.3. Ατέλειες που ως αιτία έχουν την μη ομαλή ανάδευση του μετάλλου

Η μη ομαλή ανάδευση οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της υψηλότερης περιοχής κοντά στην επιφάνεια και της χαμηλότερης περιοχής. Οι ατέλειες αυτές έχουν μεγάλη ομοιότητα με τις ατέλειες που σχετίζονται με την ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας, όμως υπάρχουν δυο χαρακτηριστικές διαφορές. Το άνω μέρος της ζώνης ανάδευσης στην προωθούμενη πλευρά είναι εντελώς διαφορετικό από αυτό μιας τυπικής συγκόλλησης. Η διαφορετικότητα αυτή οφείλεται στο ότι η ροή του υλικού είναι ασυνεχής. Επιπρόσθετα, η επίδραση της κάθετης δύναμης είναι πάρα πολύ μικρή, αν και παρατηρείται κάποια μείωση του μεγέθους των ατελειών με την αύξησή της [40].

1.6. Τυποποίηση του αλουμινίου

Οι τυποποιημένες εμπορικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminum Association (A.A.), αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέλος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράματα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης:

(α) Στην πρώτη περίπτωση (κράματα διαμόρφωσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99%, ενώ στη περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

Πίνακας 1: Κράματα Διαμόρφωσης

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

(β) Στη δεύτερη περίπτωση (κράματα χύτευσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, επίσης, 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 τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από το κωδικό.

Πίνακας 2: Κράματα Χύτευσης

Κωδικός	Κύρια Προσθήκη
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99%
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	Άλλα στοιχεία

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.

Πίνακας 3: Κράματα - Κύρια Επεξεργασία

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

T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
T5	Βαφή σε θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης

Κράματα χύτευσης αλουμινίου

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

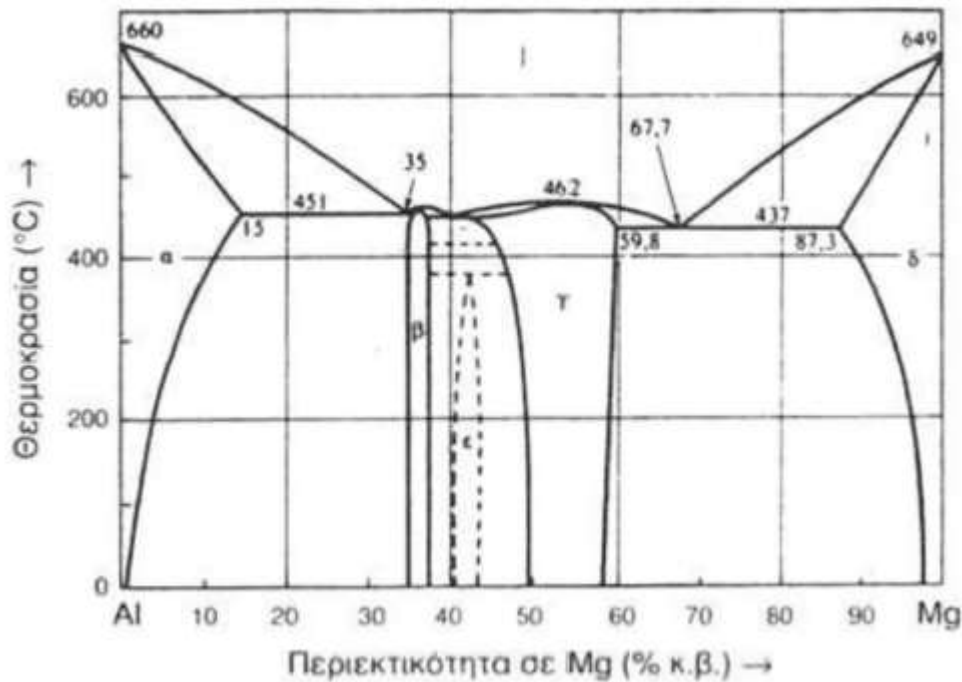
Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι:

- η ευχυτότητα
- η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιόμορφη κατανομή του πορώδους (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση)
- η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων
- η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Γενικά, οι μικροδομές και, κατ' επέκταση, οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών εξαρτώνται κυρίως, από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα και από τη μέθοδο χύτευσης. Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης, απ' ό,τι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι, τις θερμοκρασίες χύτευσης. Τα κυριότερα κράματα χύτευσης του αλουμινίου είναι:

- Κράματα αλουμινίου της σειράς 1XX.X. Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστον 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρό και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα ενώ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συρμάτων καλωδίων κ.λ.π. Οι κυριότερες ακαθαρσίες σε αυτά τα κράματα είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό έως 1%.

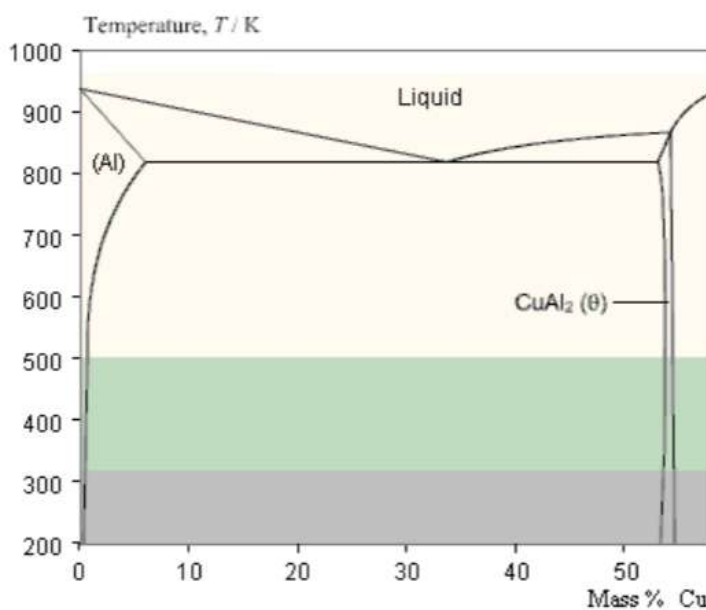
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 2XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται, πλέον, σπάνια, λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 3XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Si, κράματα Al-Si-Cu. Τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα είναι τα πρώτα. Αυτά περιέχουν πυρίτιο, σε ποσοστό 5-20%, αν και τις περισσότερες φορές προτιμώνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Προσθήκη Mg, σε ποσοστό 0,3-1% ή Cu, σε ποσοστό 3-5%, βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al-Si. Κράματα Al-Si-Cu, η περιεκτικότητα των οποίων σε Si είναι γειτονική της ευτηκτικής σύστασης (12,7% Si), παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η ρύθμιση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται με συνδυασμό διαφόρων μηχανισμών: με τη δημιουργία στερεού διαλύματος, α φάσης, με τη διασπορά φάσης β και με τη ρύθμιση των συνθηκών στερεοποίησης (επίδραση στο μέγεθος των κόκκων και στο είδος των σχηματιζόμενων ευτηκτικών).
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 5XX.X. Πρόκειται για κράματα Al με κύρια προσθήκη το Mg σε ποσοστά μικρότερα από 4%. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλασσινό περιβάλλον, στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα. Τα κράματα της σειράς 5000 παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος, όμως, της ολκιμότητας τους. Όταν βρίσκονται στη 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. Στη περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Το μεγαλύτερο μέρος του Mg βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει σε μεταλλική ένωση Mg_2Al_3 (φάση β), η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.



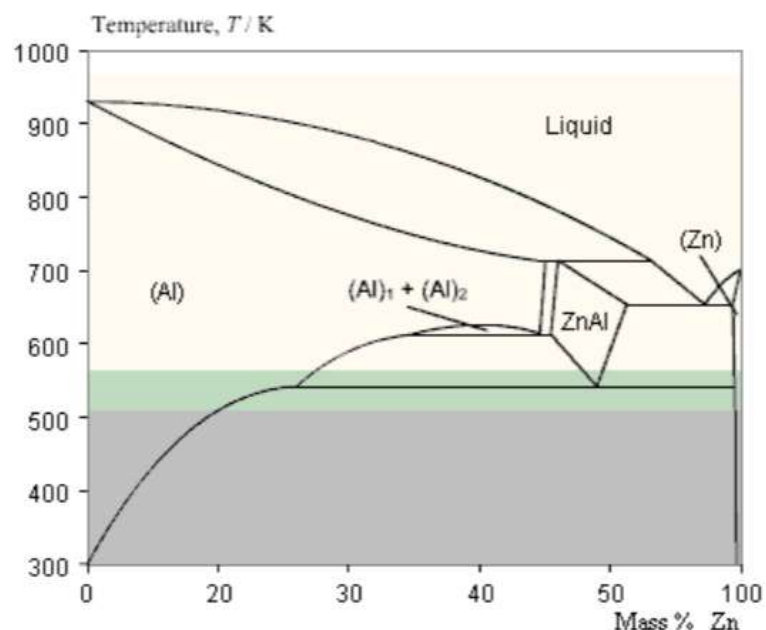
Εικόνα 10: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Mg [42]

- Κράματα αλουμινίου της σειράς 7XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Zn για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης επηρεάζει σε μικρό ποσοστό τις μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων. Τα κράματα αυτά μετά από συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες απ' όλα τα κράματα αλουμινίου. Το ποσοστό Zn μεταβάλλεται από 4% έως 8% και εκείνο του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης $MgZn_2$. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού μειώνει την εμβαπτότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%, βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητα τους. Τα κράματα της σειράς 7000 υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησης τους, της καλής τους εμβαπτότητας, (ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα) και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης (γύρω

στους 160° C). Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς 7000 δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλληση τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητα τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή (έως 120° C), καθώς η θερμοκρασία διαλυτοποίησης των ενισχυτικών ενώσεων $MgZn_2$ είναι 130° C. Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή σε διάβρωση.



Εικόνα 11: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Cu [42]



Εικόνα 12 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Zn [42]

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση επικαλυπτόμενων ελασμάτων (Lap Joint) αλουμινίου σειράς 5XXX και 7XXX. Οι αρχικές διαστάσεις των ελασμάτων ήταν 30cm x 40cm με πάχος 4mm το καθένα. Η δημιουργία οπών αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της πειραματικής διαδικασίας για την ασφαλέστερη και την καλύτερη συγκράτηση των ελασμάτων κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Με αυτό τον τρόπο, η συγκράτηση των δοκιμίων στη μηχανή συγκόλλησης είναι πιο ισχυρή και δεν παρατηρείται μετακίνηση των ελασμάτων κατά την ανάπτυξη των αξονικών και περιστροφικών δυνάμεων από τον βραχίονα συγκόλλησης.



Εικόνα 13: Δημιουργία οπών στα ελάσματα για την πάκτωσή τους στη μηχανής συγκόλλησης FSW

2.2. Εξοπλισμός συγκόλλησης και γεωμετρία εργαλείου

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγμάτωση της συγκόλλησης του πειράματος ήταν μία φρεζομηχανή του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, η οποία έχει διαμορφωθεί κατάλληλα για την πραγμάτωση πειραμάτων Συγκολλήσεων με ανάδευση δια τριβής (FSW). Στο συγκεκριμένο μηχάνημα συγκόλλησης, τα ελάσματα πακτώνονται το ένα πάνω στο άλλο (Lap Joint) ώστε να μην υπάρξει καμία μετακίνηση κατά την πραγμάτωση της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 14. Φρεζομηχανή τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ



Εικόνα 15: Σημεία πάκτωσης ελασμάτων κατά την συγκόλληση FSW

Το εργαλείο συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4: Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης

Διάμετρος περιουχενίου	Διάμετρος πείρου (κυλινδρικός)	Μήκος πείρου
22,3 mm	4 mm	3,7 mm



Εικόνα 16: Εργαλείο συγκόλλησης

2.3. Υλικά (χημική σύσταση, διαστάσεις)

Τα βασικά μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία είναι ελάσματα αλουμινίου 3mm σειράς 5754 και 7075 με τις εξής χημικές συστάσεις το καθένα:

Πίνακας 5: Χημική σύσταση μετάλλων βάσης

Στοιχεία προσθήκης (κατά βάρος %)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
AA 5754	0.11	0.29	0.04	0.27	2.96	0.02	0.007	0.03	Ισορ.
AA 7075	0.15	0.16	1.45	0.06	2.58	5.72	0.034	0.21	Ισορ.

2.4. Παράμετροι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν

Οι παράμετροι συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Πίνακας 6: Παράμετροι συγκόλλησης που υποβλήθηκαν τα δοκίμια

Δοκίμιο	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)
A1	1000	13
A2	1000	32
A3	1000	51
A4	1000	83
B1	590	13
B2	590	32
B3	590	51
B4	590	83

Οι τιμές που επιλέχθηκαν τόσο για την Ταχύτητα Περιστροφής όσο και για την Ταχύτητα Πρόωσης επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις τιμές που διέθετε η μηχανή συγκόλλησης και καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος τιμών για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού των δύο αυτών παραμέτρων.

2.5. Μεταλλογραφική προετοιμασία (κοπή, λείανση-στίλβωση, χημική προσβολή)

2.5.1. Κοπή

Αφού πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία για κάθε ζευγάρι ελασμάτων, ακολούθησε η κοπή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στον τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ με τη χρήση του αυτόματου πριονιού CY350 της Rich, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία για την υπόλοιπη διαδικασία.. Τα κόπηκαν εγκάρσια στη ραφή του FSW και πάνω σε αυτή έγινε όλη η επεξεργασία και ο χαρακτηρισμός. Στη συνέχεια, πήραν τις τελικές διαστάσεις για τη επίτευξη της υπόλοιπης μεταλλογραφικής προετοιμασίας.



Εικόνα 17: Διαδικασία κοπής δοκιμίων

Το μέγεθος των δοκιμίων μετά την κοπή των αρχικών ελασμάτων ήταν αρκετά μεγάλο (2cm x 3cm), και για αυτό το λόγω δε χρειάστηκαν τα δοκίμια να υποβληθούν σε εγκιβωτισμό για την συνέχιση της μεταλλογραφικής προετοιμασίας.

2.5.2. Λείανση

Μετά από την κοπή των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε λείανση της ζητούμενης επιφάνειας. Κατά τη διαδικασία της λείανσης, μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας του δοκιμίου και εξαφανίζονται τυχόν ατέλειες που έχουν δημιουργηθεί κατά την κοπή. Για τη λείανση χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου από #220, #360 και #600 grit. Το καρβίδιο του πυριτίου είναι ένα πολύ καλό λειαντικό μέσο, διότι είναι αδρανές, πολύ σκληρό και με ιδιαίτερα υψηλή μηχανική αντοχή. Κατά τη διάρκεια της λείανσης στον περιστροφικό δίσκο, υπήρχε κατάλληλη τροφοδοσία νερού, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αύξησης της θερμοκρασίας λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής και στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων της τριβής (υπολείμματα υλικού και κόκκων καρβιδίου του πυριτίου), που θα μπορούσαν να προκαλέσουν εγχαράξεις στην επιφάνεια των δοκιμίων.



Εικόνα 18: Χαρτιά λείανσης που χρησιμοποιήθηκαν

2.5.3. Στίλβωση

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η στίλβωση. Μετά τη λείανση το δοκίμιο είναι αρκετά λείο με αρκετά χαμηλή τραχύτητα, όμως παραμένουν σε αυτό μικρές γραμμές που προήλθαν με την απόξεση του υλικού από τους κόκκους του λειαντικού χαρτιού. Με τη στίλβωση, αυτές οι χαραγές απομακρύνονται και το δοκίμιο φαίνεται στίλπνο και λαμπερό, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγάλη ανακλαστικότητα. Για τη στίλβωση των εγκάρσιων διατομών των κατεργασμένων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε δίσκος στίλβωσης από ειδικό βελούδο DPNA με τη βοήθεια κολλοειδούς αιωρήματος αλούμινας (Al_2O_3) μεγέθους κόκκων 1 μm και 0,1 μm . Μετά από κάθε στάδιο στίλβωσης τα δοκίμια ξεπλένονταν με νερό και ακετόνη για να αποφευχθεί η οξείδωση και στεγνώνονταν με ζεστό αέρα.



Εικόνα 19: Δίσκος λείανσης-στίλβωσης

2.5.4. Χημική προσβολή

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου. Κατά την διαδικασία αυτή η επιφάνεια των δοκιμίων διαβρώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα τα όρια των κόκκων να προσβάλλονται περισσότερο και να γίνονται εμφανή. Η προσβολή είναι κατά κύριο λόγο μια ελεγχόμενη διαδικασία διάβρωσης η οποία είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρολυτικής αντίδρασης ανάμεσα σε επιφάνειες του δοκιμίου με διαφορετικό δυναμικό. Τα χημικά διαλύματα προσβολής παράγουν μεταλλογραφική αντίθεση με δύο τρόπους. Είτε διαμέσου των κρυσταλλικών εδρών (δηλαδή τα όρια προσβάλλονται με μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω των διαφοροποιήσεων στον κρυσταλλογραφικό τους προσανατολισμό), με αποτέλεσμα την δημιουργία βαθμίδων στα όρια των κόκκων και διαφορών αντανακλαστικότητας είτε με την προσβολή ορίων κόκκων ή ορίων φάσεων, η οποία προκαλεί αυλακώσεις.

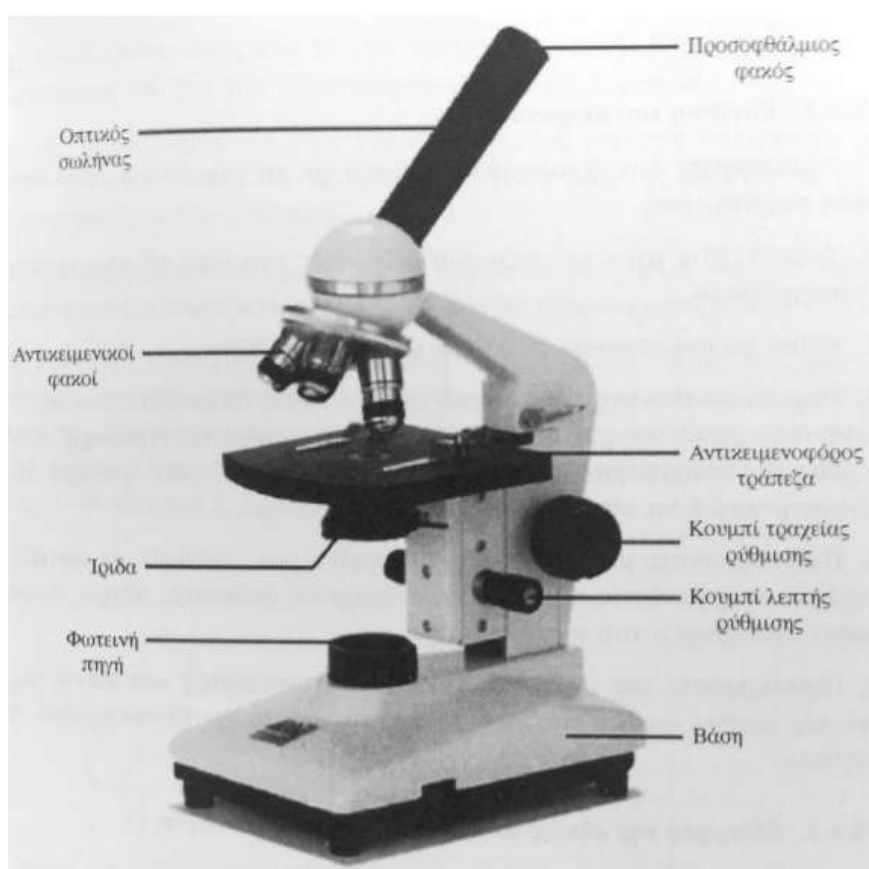
Στο πείραμα, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν για 40 δευτερόλεπτα μέσα σε δοχείο που περιείχε το χημικό Keller's (2.5mL HNO₃, 1.5mL HCl, 1mL HF, 95mL H₂O) και μετά ξεπλύθηκαν με καθαρό νερό.

2.5.5. Οπτικό μικροσκόπιο

Το οπτικό μικροσκόπιο είναι το στάδιο ελέγχου, όπου το δείγμα θα κριθεί αν παρουσιάζει ικανοποιητική ποιότητα εικόνας, ώστε να συνεχιστεί ο μεταλλογραφικός έλεγχος στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, ή αν θα πρέπει να επαναληφθεί κάποια από τις προηγούμενες διαδικασίες. Παρατήρηση στο οπτικό πραγματοποιείται μετά από κάθε διεργασία (λείανση, στίλβωση, προσβολή), αλλά και κατά τη διάρκεια της.

Επίσης, με την βοήθεια κάμερα, η οποία ήταν ειδικά προσαρμοσμένη πάνω στο μικροσκόπιο έγινε η καταγραφή των εικόνων τη ζώνης συγκόλλησης των δοκιμίων.

Τα μέρη του οπτικού μικροσκοπίου φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 20: Μέρη οπτικού μικροσκοπίου

2.5.6. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (S.E.M.)

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) χρησιμεύει για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η μελέτη με τη τεχνική αυτή στηρίζεται στη διαφορά του ατομικού αριθμού (Z) μεταξύ των στοιχείων της επιφάνειας, που περιέχονται στα κατακρημνίσματα και στη μητρική φάση. Επιπλέον, ήταν εφικτός ο ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των στοιχείων που περιέχονταν στις

ενδομεταλλικές φάσεις που κατακρημνίστηκαν, με χρήση της μικροανάλυσης ακτίνων X (EDS, Energy Dispersive System). Λήφθηκαν φωτογραφίες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI), οι οποίες παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της μελετώμενης επιφάνειας των δοκιμίων, και φωτογραφίες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES), οι οποίες έδωσαν πληροφορίες που αφορούν τη χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της επιφάνειας. Οι παρατηρήσεις των συγκεκριμένων δοκιμίων έγιναν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο JEOL6380LV της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών του ΕΜΠ.



Εικόνα 21: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών του ΕΜΠ

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μεταλλογραφικές παρατηρήσεις που έγιναν με τον εξοπλισμό που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.2. Οι παρατηρήσεις αφορούν στα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τις παραμέτρους που αναφέρονται στον Πίνακα 5 στο Κεφάλαιο 2.4. (Ταχύτητα περιστροφής πείρου: 1000 και 590 rpm – Ταχύτητα πρόωσης: 13, 32, 51 και 83 mm/min).

Επιχειρείται συγκριτική μελέτη των παρατηρήσεων των δοκιμών εστιάζοντας στα ακόλουθα σημεία:

- Εμφάνιση ασυνεχειών
- Απόσταση των ασυνεχειών από τη ζώνη συγκόλλησης
- Μορφολογία κόκκων στις ζώνες συγκόλλησης
- Ευκρίνεια ροϊκών γραμμών
- Παρουσία κατάκρημισμάτων στις ζώνες συγκόλλησης

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου A1

Η πρώτη συγκόλληση των δύο ελασμάτων πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα περιστροφής του πείρου 1.000 rpm και με ταχύτητα πρόωσης ίση με 13 mm/min. Η συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής είναι η μεγαλύτερη ενώ η ταχύτητα πρόωσης είναι η μικρότερη που δοκιμάστηκαν στη Διπλωματική Εργασία.

Αρχικά, φαίνεται ότι κατά η χημική προσβολή του δοκιμίου είχαν δημιουργηθεί κάποιες περιοχές που δε μπορούμε να παρατηρήσουμε (μαύρα στίγματα) λόγω υπερ – προσβολής (εκτεταμένης έκθεσης των δοκιμίων στο μέσο προσβολής).

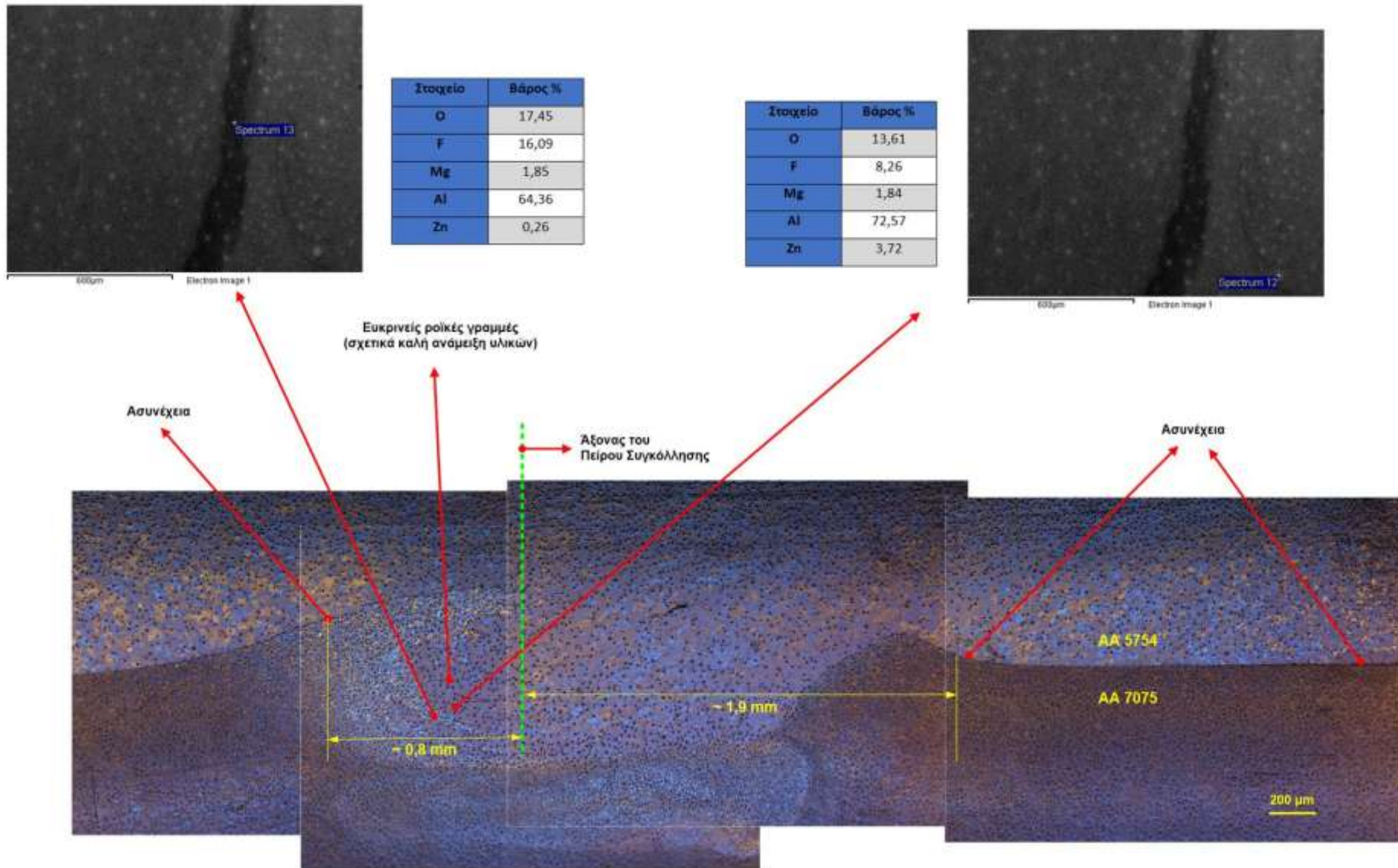
Όπως παρατηρούμε από τη σύνθεση των φωτογραφιών του οπτικού μικροσκοπίου Εικόνα 18, η ανάμειξη των δύο υλικών είναι αρκετά καλή, καθώς οι ροϊκές γραμμές που διαμορφώθηκαν κατά τη συγκόλληση ανάδευσης είναι πυκνές και σχετικά ευδιάκριτες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί, στη μεγάλη ποσότητα θερμότητας που παράγεται λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής (1.000 rpm) του πείρου συγκόλλησης. Παράλληλα, η μικρή ταχύτητα πρόωσης του βραχίονα συγκόλλησης (13 mm/min) συντελεί με τη σειρά της στη δημιουργία ομοιογενούς ζώνης συγκόλλησης που παρουσιάζεται στην Δοκίμιο A1.

Ως προς τη μορφολογία των κόκκων, αυτοί φαίνονται να είναι σημαντικά πιο πεπλατυσμένοι στη ζώνη συγκόλλησης τόσο σε σχέση με τους κόκκους στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ), όσο και με τους κόκκους στα μέταλλα βάσης (μακριά από τη Ζώνη Συγκόλλησης).

Επιπλέον, η ασυνέχεια που δημιουργείται μεταξύ των δύο ελασμάτων, με τις συγκεκριμένες παραμέτρους συγκόλλησης, εμφανίζεται αρκετά μακριά από τον άξονα εισχώρησης του πείρου συγκόλλησης (ραφή συγκόλλησης), περίπου 3,7 mm. Κατά συνέπεια, η συγκεκριμένη συγκόλληση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.

Από τις φωτογραφίες της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας και τις αναλύσεις του EDS είναι πιθανή η παρουσία κατακρημνισμάτων Fe και Mg.

Δοκίμιο A2 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
 (Παράμετροι συγκόλλησης: 1.000 rpm, 32 mm/min)



Εικόνα 23: Δοκίμιο A2

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου A2

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση στο δοκίμιο αυτό ήταν: ταχύτητα περιστροφής του πείρου 1.000 rpm και ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min. Στη συγκεκριμένη συγκόλληση διατηρήθηκε η ταχύτητα περιστροφής και παράλληλα αυξήθηκε κατά 9 μονάδες η ταχύτητα πρόωσης προκαλώντας τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Όπως και στο Δοκίμιο A1, έτσι και σε αυτό το Δοκίμιο φαίνεται ότι η χημική προσβολή των δοκιμίων έχει δημιουργήσει κάποιες περιοχές που δε μπορούμε να παρατηρήσουμε (μαύρα στίγματα) λόγω εκτεταμένης έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό υλικό.

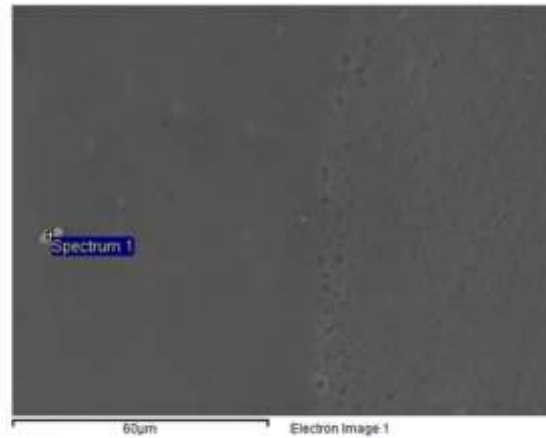
Επίσης, η σύνθεση των φωτογραφιών του οπτικού μικροσκοπίου Εικόνα 19 δε είναι αρκετά καθαρή, οπότε τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι κατά προσέγγιση. Παρατηρούνται πυκνές και σχετικά ευδιάκριτες ροϊκές γραμμές, φαινόμενο το οποίο αναδεικνύει την ανάμειξη των δύο υλικών σε έναν καλό βαθμό. Τόσο η υψηλή ταχύτητα περιστροφής του πείρου (1.000 rpm) όσο και η σχετικά χαμηλή ταχύτητα πρόωσης (32 mm/min) έχουν οδηγήσει σε μια ικανοποιητική ραφή συγκόλλησης.

Ως προς τη μορφολογία των κόκκων, αυτοί φαίνονται να είναι σημαντικά πιο πεπλατυσμένοι στη ζώνη συγκόλλησης τόσο σε σχέση με τους κόκκους στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ), όσο και με τους κόκκους στα μέταλλα βάσης (μακριά από τη Ζώνη Συγκόλλησης).

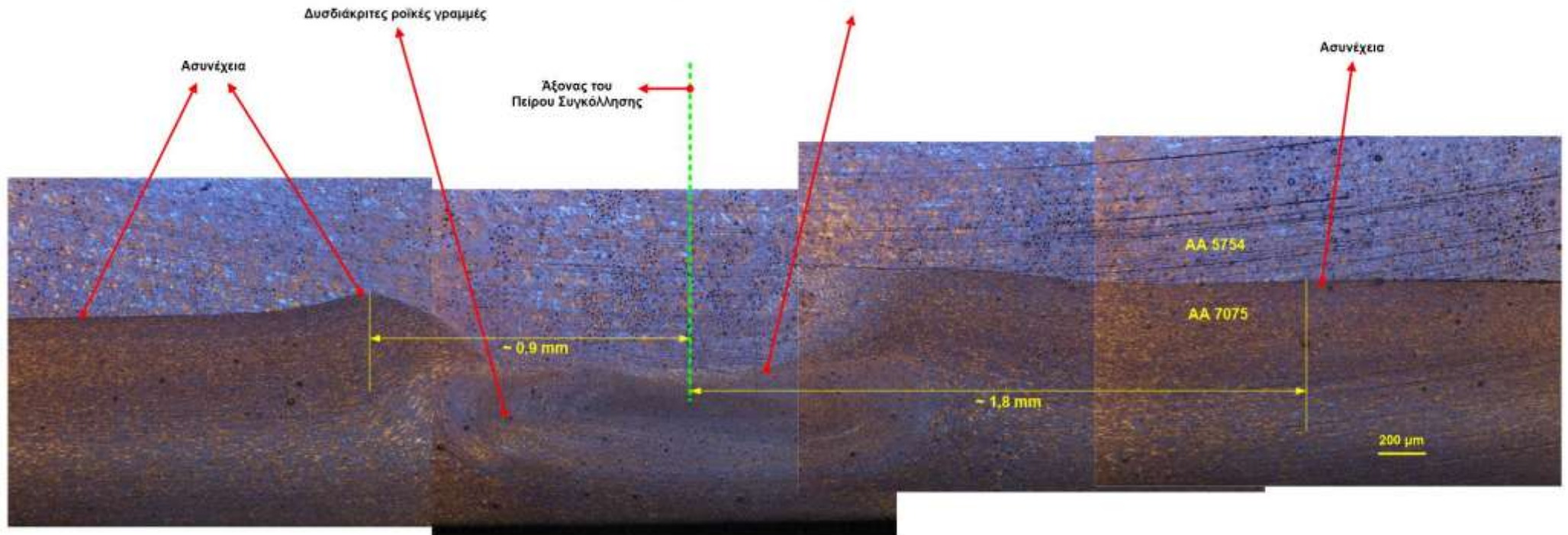
Επιπλέον, οι ασυνέχειες που δημιουργείται μεταξύ των δύο ελασμάτων, για το Δοκίμιο A2, εμφανίζονται από τη μία πλευρά πιο κοντά (περίπου 0,8 mm) και από την άλλη πιο μακριά (περίπου 1,9 mm) από τον άξονα εισχώρησης του πείρου συγκόλλησης (ραφή συγκόλλησης). Η ασυνέχεια που βρίσκεται στη αριστερή πλευρά της Εικόνας 19 πιθανά να έχει προκύψει από το συνδυασμό της γωνίας συγκόλλησης (2°) με την έντονη αξονική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από την μηχανή συγκόλλησης. Συμπερασματικά, η συγκόλληση του Δοκιμίου A2 δεν είναι τόσο επιτυχής όσο του Δοκιμίου A1.

Από τις φωτογραφίες της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας και τις αναλύσεις του EDS είναι πιθανή η παρουσία κατακρημνισμάτων Zn και Mg.

Δοκίμιο Α3 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
 (Παράμετροι συγκόλλησης: 1.000 rpm, 51 mm/min)



Ιστοίχιο	Βάρος %
O	18,26
F	16,34
Mg	1,42
Al	62,48
Zn	1,50



Εικόνα 24: Δοκίμιο Α3

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου A3

Η συγκόλληση των δύο ελασμάτων πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα περιστροφής του πείρου 1.000 rpm και με ταχύτητα πρόωσης ίση με 51 mm/min. Παρόλο που η ταχύτητα περιστροφής του πείρου έχει διατηρηθεί σταθερή με τα άλλα Δοκίμια, η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης μπορεί να προκαλέσει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα από τις δύο προηγούμενες συγκολλήσεις.

Η χημική προσβολή του δοκιμίου φαίνεται να είναι πιο επιτυχής από ό, τι στα δύο προηγούμενα Δοκίμια καθώς δεν υπάρχει έντονα η εμφάνιση μαύρο στιγμάτων στην Εικόνα 20. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα καλύτερης παρατήρησης του σχήματος των κόκκων.

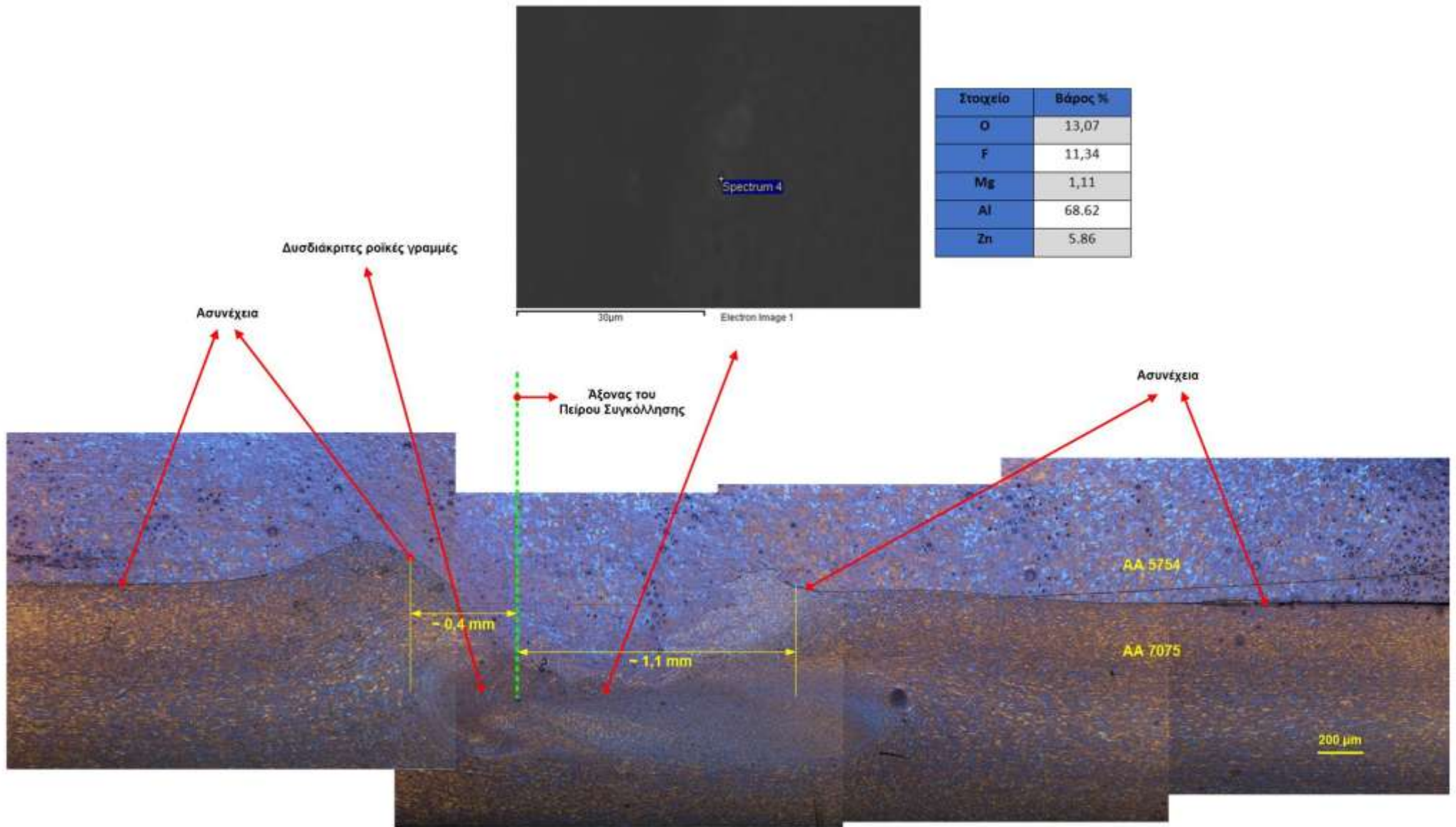
Στη σύνθεση των φωτογραφιών του οπτικού μικροσκοπίου Εικόνα 20 παρατηρείται ότι η ανάμειξη των δύο υλικών είναι εξίσου καλή με των Δοκιμίων A1 και A2. Οι ροϊκές γραμμές που διαμορφώθηκαν κατά τη συγκόλληση ανάδευσης είναι αρκετά πυκνές και σχετικά ευδιάκριτες, για τους ίδιους λόγους που αναφέραμε στις παρατηρήσεις των δυο προηγούμενων Δοκιμίων.

Οι κόκκοι της Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνης (ΘΕΖ) και των μετάλλων βάσης φαίνεται να είναι αρκετά πιο ευμεγέθεις και στρογγυλοποιημένοι συγκριτικά με τους κόκκους στη ζώνη συγκόλλησης που παρατηρούνται πιο μικροί και εμφανώς πιο πεπλατυσμένοι.

Επιπλέον, οι ασυνέχειες που δημιουργούνται μεταξύ των δύο ελασμάτων, με τις συγκεκριμένες παραμέτρους συγκόλλησης, εμφανίζονται αρκετά μακριά από τον άξονα εισχώρησης του πείρου συγκόλλησης (ραφή συγκόλλησης), περίπου 0,9 και 1,8 mm εκατέρωθεν. Κατά συνέπεια, η συγκεκριμένη συγκόλληση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.

Τέλος, από τις αναλύσεις του EDS συγκεκριμένων σημείων της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας γίνεται πιθανή η παρουσία κατακρημνισμάτων Zn και Mg.

Δοκίμιο A4 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
(Παράμετροι συγκόλλησης: 1.000 rpm, 83 mm/min)



Εικόνα 25: Δοκίμιο A4

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου A4

Το τελευταίο Δοκίμιο της Σειράς Δοκιμίων A συγκολλήθηκε με ταχύτητα περιστροφής του πείρου 1.000 rpm και με ταχύτητα πρόωσης ίση με 83 mm/min. Η μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του πείρου φαίνεται να έχει προκαλέσει έντονη ανάδευση χωρίς όμως την επίτευξη της απαιτούμενης συνεκτικότητας των υλικών.

Στις φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο, που παραθέτονται στην Εικόνα 21 παρατηρούνται μαύρες κηλίδες που ενδεχομένως έχουν δημιουργηθεί από την υπερπροσβολή του δοκιμίου κατά την μεταλλογραφική προετοιμασία. Ωστόσο, τα όρια των κόκκων των δύο υλικών είναι αρκετά πιο ευδιάκριτα από τις προηγούμενες Εικόνες.

Οι ροϊκές γραμμές που διαμορφώθηκαν κατά τη συγκόλληση ανάδευσης είναι αρκετά πυκνές και σχετικά ευδιάκριτες στα περισσότερα σημεία της ζώνης συγκόλλησης, όμως υπάρχουν και άλλα σημεία που παρατηρείται μια ενιαία μάζα. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνει την έντονη ανάδευση των δύο υλικών όσο και την έλλειψη ισχυρών δεσμών που μπορεί να αναπτύσσουν.

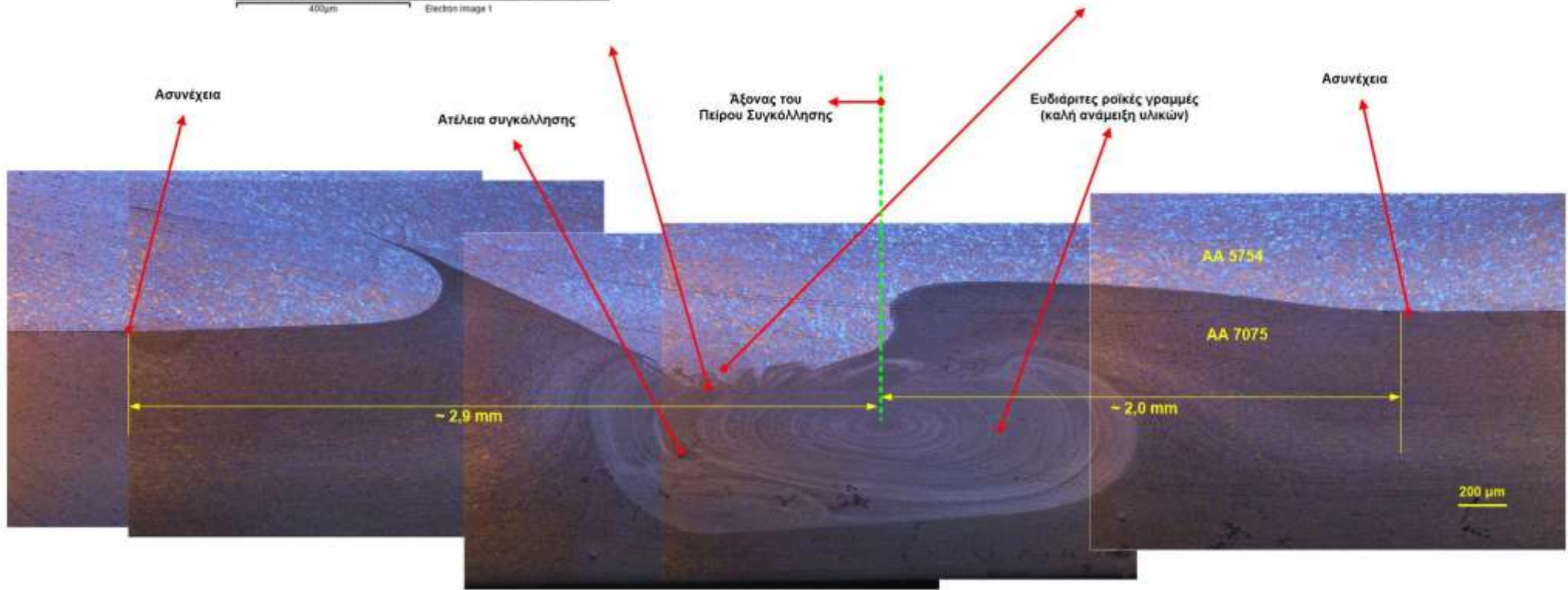
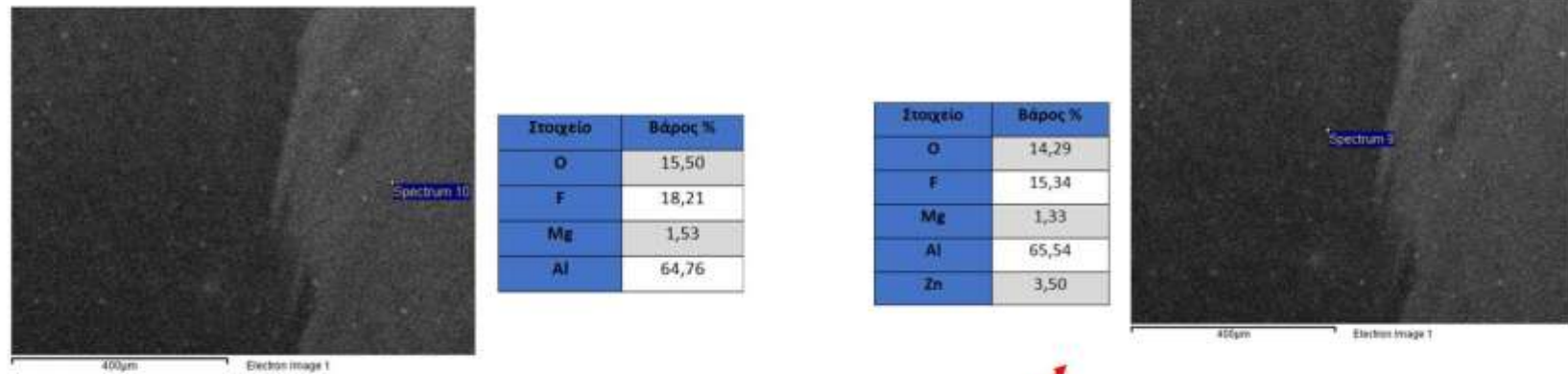
Οι κόκκοι του Δοκιμίου A4 εμφανίζονται να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με το μέγεθος και τη μορφολογία των κόκκων του Δοκιμίου A3, λόγω των παρόμοιων παραμέτρων συγκόλλησης που έχουν υποβληθεί.

Τέλος, η συγκόλληση φαίνεται να μην ήταν αρκετά πετυχημένη καθώς οι ασυνέχειες μεταξύ των δύο ελασμάτων, βρίσκονται πολύ κοντά στον άξονα εισχώρησης του πείρου (περίπου 0,4 και 1,1mm εκατέρωθεν). Κατά συνέπεια, η ένωση των δύο ελασμάτων περιορίζεται μόνο στη ραφή συγκόλλησης τα δύο ελάσματα αποκτούν συνδεσιμότητα μόνη στη ραφή της συγκόλλησης με ενδεχόμενη αδυναμία υψηλής εφελκυστικής τάσης.

Η παρουσία Zn και Mg στις αναλύσεις EDS στη ζώνη συγκόλλησης κάνει πιθανή την εμφάνιση κατακρημνισμάτων που δημιουργήθηκαν κατά την συγκόλληση.

3.2. Σειρά Δοκιμίων Β (590 rpm)

Δοκίμιο Β1 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
(Παράμετροι συγκόλλησης: 590 rpm, 13 mm/min)



Εικόνα 26: Δοκίμιο Β1

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου B1

Η Σειρά Δοκιμίων B αποτελείται από ένα σύνολο πειραμάτων με κοινή Ταχύτητα Περιστροφής πείρου (590 rpm). Συγκεκριμένα, το Δοκίμιο B1 πραγματοποιήθηκε επιπλέον με Ταχύτητα Πρόωσης της συγκόλλησης ίση με 13 mm/min. Η Ταχύτητα αυτή αποτελεί τη μικρότερη Ταχύτητα Περιστροφής που δοκιμάστηκε στα B Δοκίμια προκαλώντας τις ακόλουθες παρατηρήσεις.

Το στάδιο της χημικής προσβολής του Δοκιμίου B1 φαίνεται να ήταν αρκετά αποτελεσματικό καθώς δεν παρατηρούνται σημεία που έχουν «καεί». Επίσης, η ευκρίνεια των ορίων των κόκκων, κυρίως στο κράμα AA 5754, καθιστά ευκολότερο τον χαρακτηρισμό της μορφολογίας των κόκκων του.

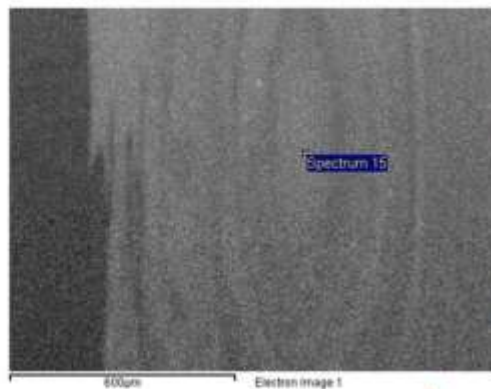
Όπως παρατηρούμε από τη σύνθεση των φωτογραφιών του οπτικού μικροσκοπίου Εικόνα 22, η ανάμειξη των δύο υλικών είναι καλή, καθώς οι ροϊκές γραμμές που διαμορφώθηκαν κατά τη συγκόλληση ανάδευσης είναι αρκετά ευδιάκριτες, αλλά αραιές. Η παρουσία ατελειών στη ζώνη συγκόλλησης οφείλεται στην ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας και προκύπτει από την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (590 rpm).

Ως προς τη μορφολογία των κόκκων, αυτοί φαίνονται να είναι σημαντικά πιο πεπλατυσμένοι στη ζώνη συγκόλλησης τόσο σε σχέση με τους κόκκους στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ), λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προκάλεσε η συγκόλληση ανάδευσης

Ακόμα, οι ασυνέχειες των δύο ελασμάτων που δημιουργούνται εκτός της ζώνης συγκόλλησης, παρατηρούνται αρκετά μακριά από το σημείο της συγκόλλησης (2,9 και 2,0 mm εκατέρωθεν). Το γεγονός αυτό, σε μία ικανοποιητικά πετυχημένη συγκόλληση παρά τις μικρές ατέλειες που επισημάνθηκαν στις ανώτερες παρατηρήσεις.

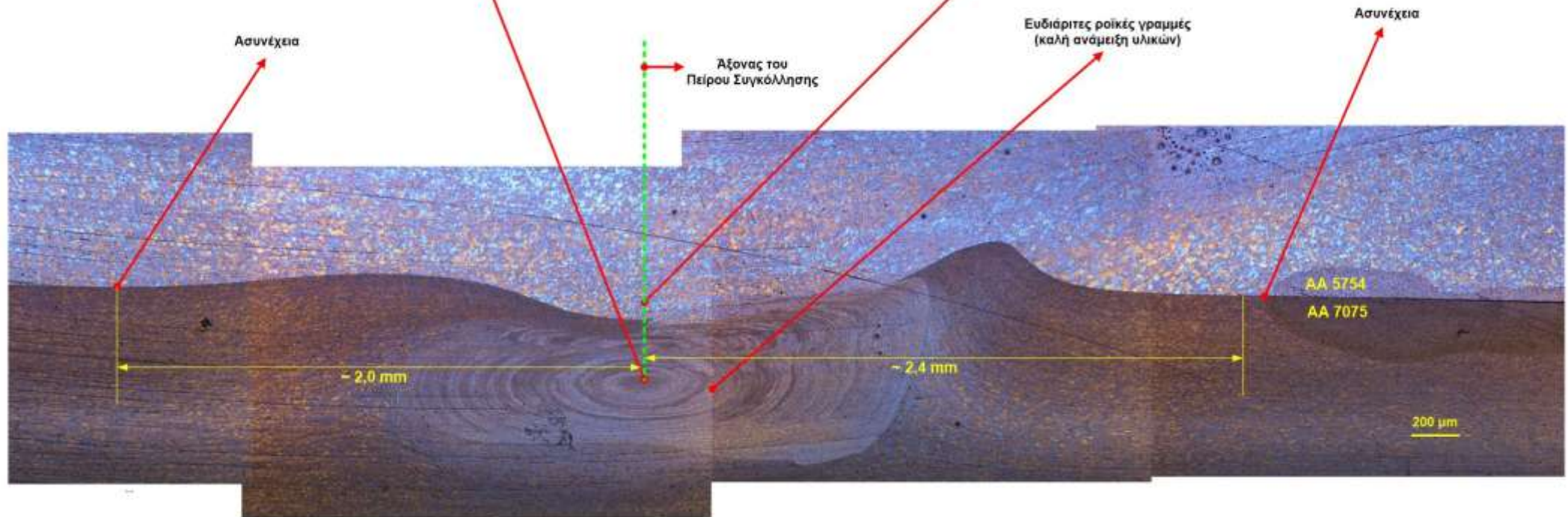
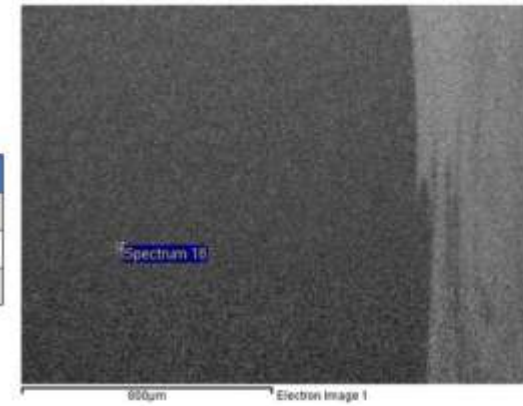
Τέλος, με βάση τις αναλύσεις του EDS από την ηλεκτρονική μικροσκοπία, ενδέχεται να υπάρχουν κάποια κατακρημνίσματα Zn και Mg.

Δοκίμιο B2 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
 (Παράμετροι συγκόλλησης: 590 rpm, 32 mm/min)



Στοιχείο	Βάρος %
Mg	1,72
Al	89,45
Fe	3,10
Zn	5,73

Στοιχείο	Βάρος %
Mg	2,50
Al	96,65
Si	0,85



Εικόνα 27: Δοκίμιο B2

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου B2

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο Δοκίμιο αυτό ήταν: ταχύτητα περιστροφής πείρου 590 rpm και ταχύτητα πρόωσης 32 mm/min.

Αρχικά, φαίνεται ότι η χημική προσβολή του Δοκιμίου B1 είναι εξίσου καλή με του Δοκιμίου B2 αλλά δυστυχώς στις φωτογραφίες της Εικόνας 23 παρατηρούνται κάποιες γραμμές που έχουν δημιουργηθεί στη διαδικασία της λείανσης κατά την μεταλλογραφική προετοιμασία του δοκιμίου.

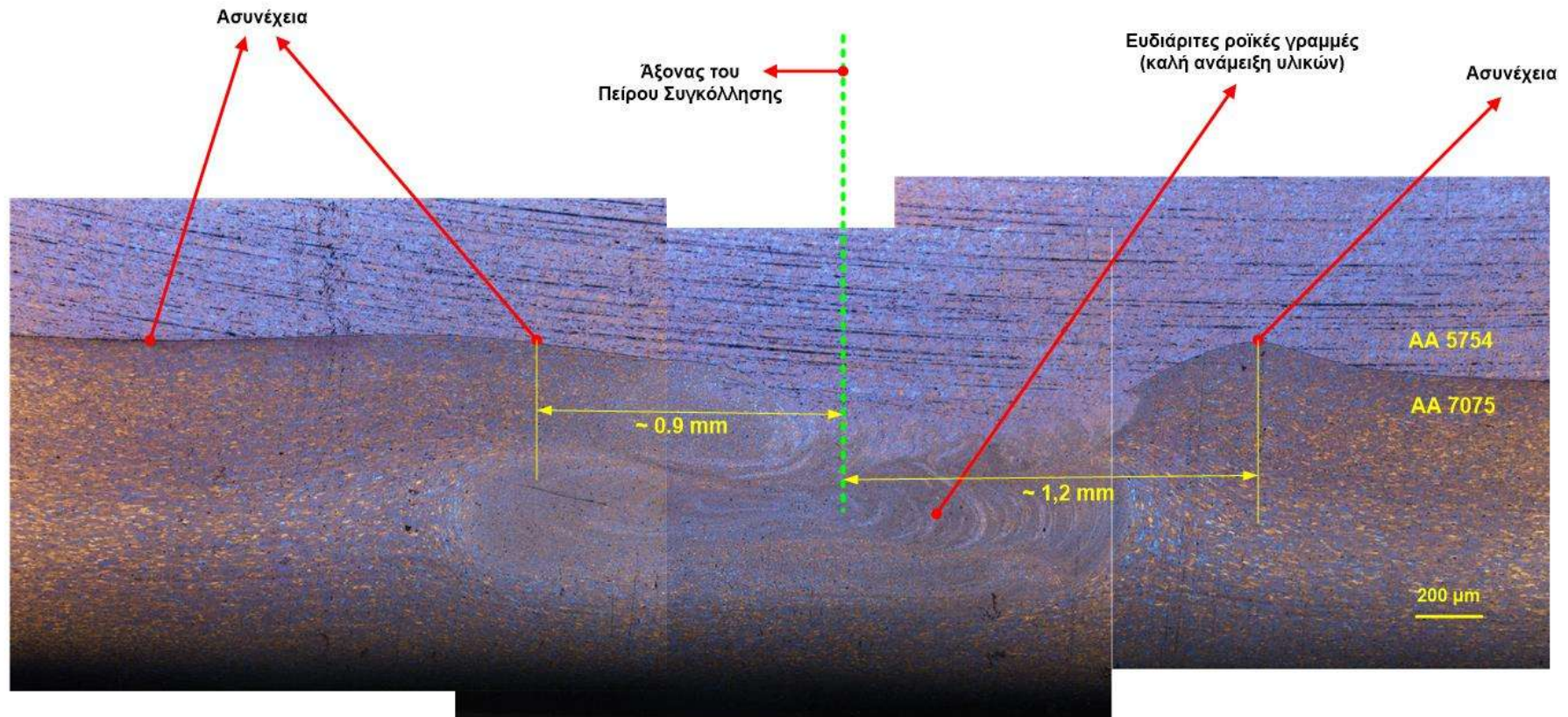
Στην Εικόνα 23, η ανάμειξη των δύο υλικών φαίνεται να είναι καλή, καθώς οι ροϊκές γραμμές που διαμορφώθηκαν κατά τη συγκόλληση ανάδευσης είναι αρκετά ευδιάκριτες. Ωστόσο, ο αραιός σχηματισμός τους μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του πείρου (590 rpm), όπως αντίστοιχα συνέβη και στο Δοκίμιο B1.

Όσο πιο κοντά στη ζώνη συγκόλλησης βρίσκονται οι κόκκοι, τόσο πιο πεπλατυσμένοι και μικροί σε μέγεθος είναι. Η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) της συγκόλλησης διαθέτει πιο ευμεγέθεις και σχηματικά στρογγυλοποιημένους κόκκους από αυτούς στη ζώνη συγκόλλησης.

Επίσης, οι αποστάσεις των ασυνεχειών από τον άξονα περιστροφής του πείρου μετρήθηκαν ίσες με 2,0 mm από τη μία πλευρά και 2,4 mm από την άλλη. Η μικρότερη ταχύτητα περιστροφής του πείρου (590 rpm) συγκριτικά με την Α Σειρά Δοκιμίων (1.000 rpm) φαίνεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά στη συνεκτικότητα των δύο ελασμάτων.

Η παρουσία Si, Fe, Mg και Zn από τους πίνακες των χημικών αναλύσεων συγκεκριμένων σημείων στη ζώνη συγκόλλησης, οδηγεί στην πιθανή παρουσία κατακρημνισμάτων των αντίστοιχων φάσεων.

Δοκίμιο Β3 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
(Παράμετροι συγκόλλησης: 590 rpm, 51 mm/min)



Εικόνα 28: Δοκίμιο Β3

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου B3

Το επόμενο δοκίμιο συγκολλήθηκε με ταχύτητα περιστροφής πείρου 590 rpm και με ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min. Ο συνδυασμός αυτών των δύο ταχυτήτων φαίνεται να έχει προκαλέσει αντίστοιχα αποτελέσματα με αυτά του Δοκιμίου A3 (Εικόνα 20). Αυτό συμβαίνει ενδεχομένως, καθώς τα δύο πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την ίδια ταχύτητα πρόωσης.

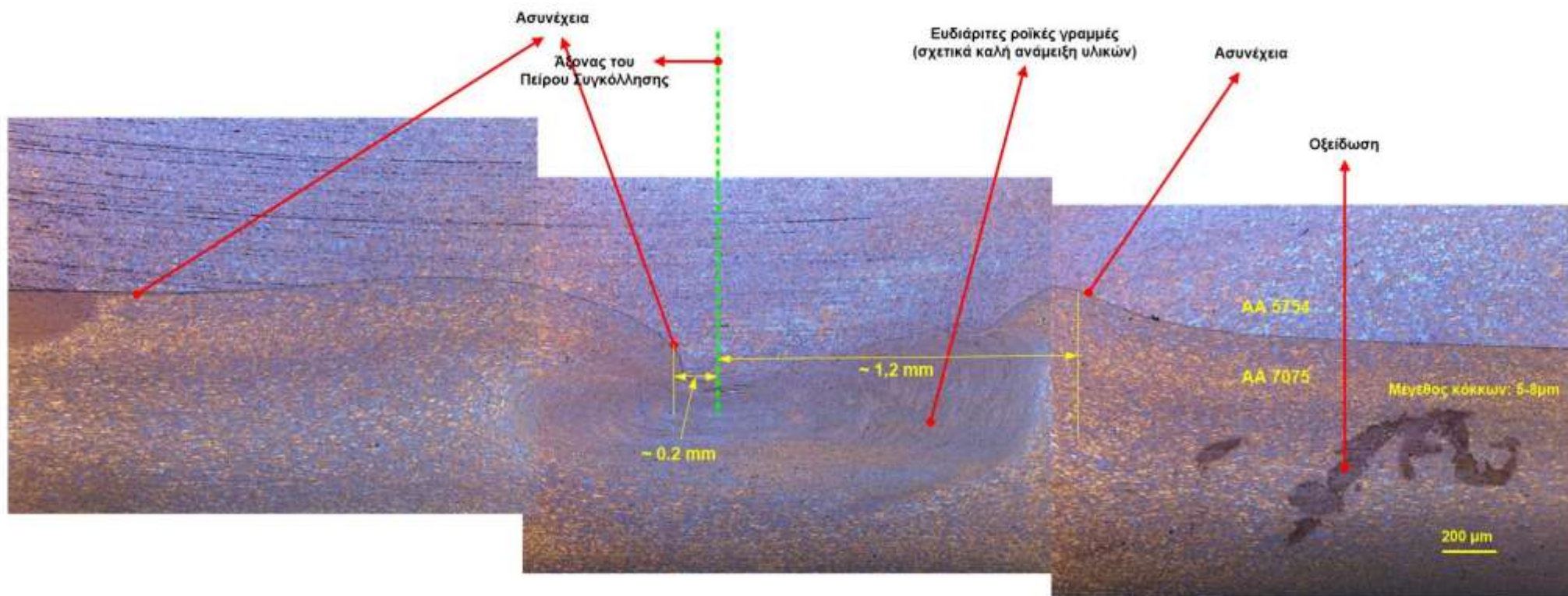
Η μεταλλογραφική προετοιμασία του δοκιμίου πριν την ανάλυση του στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο φαίνεται να μην έδωσε καθαρές εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, οι γραμμές που εμφανίζονται κυρίως στο έλασμα AA 5754, είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της λείανσης δυσκολεύοντας έτσι την παρατήρηση των κόκκων στο σημείο αυτό.

Ακολούθως, στην Εικόνα 24 εμφανίζονται ευδιάκριτα οι ροϊκές γραμμές που έχουν δημιουργηθεί κατά τη συγκόλληση των δύο υλικών. Λόγω σχετικά μεγάλης ταχύτητας πρόωσης (53 mm/min) κατά τη συγκόλληση, δεν παρέχεται επαρκής θερμότητας στα προς δύο τεμάχια με αποτέλεσμα να υπάρχει ανεπαρκής ροή πλαστικοποιημένου υλικού στο πυρήνα.

Παρατηρείται μείωση του μεγέθους των κόκκων στη ζώνη συγκόλλησης, ωστόσο το πλαστικοποιημένο υλικό βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάδευση του, προκαλώντας ατέλειες στη παραγόμενη συγκόλληση.

Οι ασυνέχειες που εμφανίζονται δίπλα από την ζώνη συγκόλλησης βρίσκονται σε αποστάσεις 0,9 και 1,2mm εκατέρωθεν του σημείου εισχώρησης του πείρου, γεγονός που οδηγεί σε μία μέτρια συγκόλληση. Η συγκεκριμένη ανάδευση φαίνεται να περιορίζεται μόνο κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης, χωρίς να επιτυγχάνεται ισχυρή συγκόλληση των δύο ελασμάτων.

Δοκίμιο Β4 - Οπτικό μικροσκόπιο και S.E.M.
(Παράμετροι συγκόλλησης: 590 grm, 83 mm/min)



Εικόνα 29: Δοκίμιο Β4

Σχολιασμός πειραματικών παρατηρήσεων Δοκιμίου B4

Το τελευταίο πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία έγινε με παραμέτρους συγκόλλησης με ταχύτητα περιστροφής πείρου 590 rpm και ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι η υψηλότερη ταχύτητα πρόωσης που δοκιμάστηκε στην εργασία και η μικρότερη ταχύτητα περιστροφής.

Αρχικά, από στάδιο της μεταλλογραφικής προετοιμασίας φαίνεται να έχουν προκύψει κάποιες γραμμές, οι οποίες δεν ομαλοποιήθηκαν κατά τη λείανση, ενώ η κατάλληλη χημική προσβολή που υπέστη το Δοκίμιο B4 έδωσε καλά αποτελέσματα στην παρατήρηση των κόκκων του πλέγματος.

Η μικρή ταχύτητας περιστροφής (590 rpm) είχε ως αποτέλεσμα την έλλειψη ανάδευσης λόγω της χαμηλής παροχής θερμότητας. Η έκταση του πυρήνα μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου επηρεάζοντας την κατανομή της θερμοκρασίας στη περιοχή. Παρατηρείται στην Εικόνα 25, ότι η ροή πλαστικοποιημένου υλικού στο πυρήνα είναι ανεπαρκής. Η τελευταία παρατήρηση οφείλεται, στην απουσία επαρκούς παροχής θερμότητας λόγω της σχετικά υψηλής ταχύτητας πρόωσης (83 mm/min).

Ως προς τη μορφολογία των κόκκων, αυτοί φαίνονται να είναι σημαντικά πιο πεπλατυσμένοι στη ζώνη συγκόλλησης τόσο σε σχέση με τους κόκκους στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ), όσο και με τους κόκκους στα μέταλλα βάσης (μακριά από τη Ζώνη Συγκόλλησης). Ωστόσο, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του υλικού, παρατηρείται μείωση του μεγέθους τους.

Οι μικρές αποστάσεις (περίπου 0,2 και 1,2 mm) που εμφανίζονται οι ασυνέχειες από την ζώνη συγκόλλησης, είναι αποτέλεσμα μιας μέτριας ανάδευσης του υλικού. Η απουσία υψηλής θερμότητας κατά το πειραματική μέθοδο καθιστά δύσκολη την ανάδευση του υλικού, προκαλώντας ατέλειες στην παραγόμενη συγκόλληση.

4. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από τις παρατηρήσεις που έγιναν στο Κεφάλαιο 3 μπορούμε να εξάγουμε την επιλογή του βέλτιστου Δοκιμίου. Όπως φαίνεται, στα δοκίμια με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής (1.000 rpm) επιτυγχάνεται γενικά καλύτερη ανάδευση των δύο υλικών από αυτή των δοκιμίων με μικρότερη ταχύτητα περιστροφής (590 rpm). Ωστόσο, σε συνδυασμό με την ταχύτητα πρόωσης, παρατηρούνται καλά αποτελέσματα και στα δοκίμια της Σειράς B, τόσο στην συνεκτικότητα και την πύκνωση των ροϊκών γραμμών της ζώνης συγκόλλησης, όσο και στη μακρινή απόσταση παρουσίας ασυνεχειών των δυο ελασμάτων. Εν κατακλείδι, φαίνεται ότι μεταξύ των 8 δοκιμίων που συγκολλήθηκαν, την πιο επιτυχημένη συγκόλληση την διαθέτει το Δοκίμιο A1 (1.000 rpm & 13 mm/min), B1 (590 rpm & 13 mm/min) και B2 (590 rpm & 32 mm/min).

Επομένως, εκ του αποτελέσματος, φαίνεται ότι γενικά οι μικρότερες ταχύτητες πρόωσης δίνουν πιο επιτυχημένες συγκολλήσεις καθώς ο πείρος της συγκόλλησης έχει δημιουργήσει εκλεπτυσμένους κόκκους στην παραγόμενη μικροδομή και επαρκή ροή πλαστικοποιημένου υλικού στο πυρήνα συγκόλλησης.

Η εξαγωγή συμπερασμάτων με τη βοήθεια της οπτικής και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μπορεί να αποτελεί αρκετά αξιόπιστη πηγή αποτελεσμάτων, ωστόσο η χρήση πρόσθετων μεθόδων θα έδινε μία πιο ολοκληρωμένη άποψη.

Για αυτό το λόγο, παρατίθενται οι εξής προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Φωτογραφίες με μεγαλύτερη μεγέθυνση μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας S.E.M. στη ζώνη συγκόλληση, με σκοπό την πιθανή παρουσία κατακρηνισμάτων
- Χημικές αναλύσεις, μέσω EDS, των κατακρηνισμάτων και σημείων των διαφορετικών ζωνών συγκόλλησης
- Μικροσκληρομετρήσεις στις επιμέρους ζώνες συγκόλλησης των δοκιμίων
- Δοκιμές εφελκυσμού, με σκοπό τον υπολογισμό του βαθμού συγκράτησης των διαφορετικών συνδυασμών των παραμέτρων
- Συγκόλληση δοκιμίων με ενδιάμεσες τιμές παραμέτρων από τις βέλτιστες που καταλήξαμε

5. Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ FSW [4]	6
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ FSW [5]	9
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΤΗ FSW [6].....	10
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW).....	12
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ WHORL™ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΜΧ TRIFLUTE™ (ΔΕΞΙΑ) ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ (TWI) ΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW)	13
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ FLARED-TRIFUTE™ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟ ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ (TWI) ΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΠΛΑΚΩΝ.(Α) ΜΕ ΟΥΔΕΤΕΡΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ, (Β) ΜΕ ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΚΑΙ (Γ) ΜΕ ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ [8]	14
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ A-SKEW™ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΟ ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ (TWI) ΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΠΛΑΚΩΝ [8] ...	14
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΩΜΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΒΡΕΤΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ (TWI) ΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) [8].....	15
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) ΜΕ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΠΡΟΣ ΤΑ ΠΙΣΩ [5]	16
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AL-MG [42].....	32
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AL-CU [42].....	33
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AL-ZN [42]	33
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΠΩΝ ΣΤΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΚΤΩΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ FSW	34
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΦΡΕΖΟΜΗΧΑΝΗ ΤΟΜΕΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΣΗΜΕΙΑ ΠΑΚΤΩΣΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ FSW	36
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	36
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΧΑΡΤΙΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	39
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΙΣΚΟΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ-ΣΤΙΛΒΩΣΗΣ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΜΕΡΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ	41
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ (SEM) ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΕΛΛΟΥΡΓΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ	42
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΔΟΚΙΜΙΟ Α1	44
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΔΟΚΙΜΙΟ Α2	46
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΔΟΚΙΜΙΟ Α3	48
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΔΟΚΙΜΙΟ Α4	50
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΔΟΚΙΜΙΟ Β1.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΔΟΚΙΜΙΟ Β2.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΔΟΚΙΜΙΟ Β3.....	56

ΕΙΚΟΝΑ 29: ΔΟΚΙΜΙΟ Β4..... 58

6. Πίνακας Γραφημάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ.....	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΚΡΑΜΑΤΑ - ΚΥΡΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΒΑΣΗΣ.....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΠΟΥ ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΑΝ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.....	37

7. Βιβλιογραφία

- [1] T. W. Institute, «www.twi.co.uk,» [Ηλεκτρονικό].
- [2] E. D. N. W. M. T. Stephan W. Kallee, «Friction Stir Welding : Invention, Innovations and Industrialisation,» σε *8th International Conference on Joints in Aluminium*, Munich, Germany, 2001.
- [3] P. Threadgill, «Friction stir welding of aluminium alloys,» *International Materials Reviews*, αρ. 49-93, pp. 49-93.
- [4] M. W. Rajiv S.Mishra, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007.
- [5] R. Mishra, «Friction stir welding and processing,» *Materials Science and Engineering: R: Reports*, pp. 1-78, 31 August 2005.
- [6] P.L.Threadgil, *TWI Bull*, March 1997.
- [7] W.M.Thomas, «Friction stir welding - Tool developments,» σε *TMS Annual Meeting*, New Orleans, LA, United States, 2001.
- [8] W. Thomas, «Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies,» *Advanced Engineering Materials*, pp. 485-490, 1 July 2003.
- [9] Z. Chen, «On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds,» *Scripta Materialia*, pp. 417-420, March 2008.
- [10] U. O. Z. Barlas, «Effects of FSW Parameters on Joint,» *Welding Journal*, p. 22, January 2012.
- [11] B. Abhijit, «An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: Friction stir welding of AA 6061-T6,» *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 395-404, January 2018.
- [12] Schneider, «The Influence of Friction Stir Weld Tool Form and Welding Parameters on Weld Structure and Properties: Nugget Bulge in Self-Reacting Friction Stir Welds,» *Nasa Technical Reports Server*, 10 May 2010.
- [13] L. Yu, «Differential expression of RAB5A in human lung adenocarcinoma cells with different metastasis potential,» *SpringerLink*, pp. 213-219, May 1999.
- [14] K. Elangovan, «Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 7-18, 25 June 2007.
- [15] Liu, «Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050 – H24 aluminium alloy,»

Science and Technology of Welding and Joining, pp. 450-454, 4 December 2013.

- [16] Krishnam, «Prediction of Optimum Welding Parameters for FSW of Aluminium,» *Materials Today*, 29 July 2016.
- [17] T. Seidel, «Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique,» *Springerlink*, 1 February 2001.
- [18] N. Afrin, «Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 179-186, 15 January 2008.
- [19] S. Chowdhury, «Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 6064-6075, 20 August 2010.
- [20] F. Humphreys, *Recrystallization and Related phenomena*, Netherlands, 1995.
- [21] K. Huang, *A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials*, December 2016.
- [22] R. Doherty, «Current issues in recrystallization: a review,» *Materials Science and Engineering*, November 1997.
- [23] A. Galiyev, «Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy,» *Acta Materialia*, pp. 1199-1207, 19 April 2001.
- [24] A. Dehgham-Manshadi, «Hot deformation and recrystallization of austenitic stainless steel: Part 1. dynamic recrystallization,» *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 1359-1370, June 2008.
- [25] M. Luton, «Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation,» *Acta Metallurgica*, pp. 1033-1043, August 1969.
- [26] L. Blaz, «Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of copper,» *Metal Science*, pp. 609-616, 18 July 2013.
- [27] D. Ponge, «Necklace formation during dynamic recrystallization: Mechanisms and impact on flow behavior,» *Acta Materialia*, pp. 69-80, 19 December 1998.
- [28] Ohashi, «Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of pure nickel,» April 1990.
- [29] S. Gourdet, «A model of continuous dynamic recrystallization,» *Acta Materialia*, pp. 2685-2699, 23 May 2003.
- [30] Y. Huang, «Measurements of grain boundary mobility during recrystallization of a single-phase aluminum alloy,» *Acta Materialia*, pp. 2259-2268, 28 May 1999.

- [31] W. Liu, «Effect of grain orientation on microstructures during hot deformation of AA 3104 aluminium alloy by plane strain compression,» *Acta Materialia*, pp. 3347-3367, September 2001.
- [32] L. Qing, «On deformation-induced continuous recrystallization in a superplastic AlLiCuMgZr alloy,» July 1992.
- [33] Sakai, «Effect of initial microstructures on grain refinement in a stainless steel by large strain deformation,» *Acta Materialia*, pp. 847-861, February 2003.
- [34] M. Kassner, «Dislocation microstructure of aluminum deformed to very large steady-state creep strains,» May 1987.
- [35] A. M. Wusatowska-Sarnek, «Nucleation and microtexture development under dynamic recrystallization of copper,» *Materials Science and Engineering A*, pp. 177-186, January 2002.
- [36] G. Henshall, «Dynamic restoration mechanisms in Al-5.8 At. Pct Mg deformed to large strains in Al-Mg alloys by conventional rolling,» October 2002.
- [37] A. Gholinia, «Production of ultra-fine grain microstructures in Al-Mg alloys by conventional rolling,» *Acta Materialia*, pp. 4461-4476, October 2002.
- [38] L. Jiang, «Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding,» *Acta Materialia*, pp. 1228-1242, April 2008.
- [39] J. Solberg, «Influence of ultra-high strains at elevated temperatures on the microstructure of aluminium,» *Philosophical Magazine A*, 25 October 1988.
- [40] H. K. Y.G.Kim, «Three defect types in friction stir welding of aluminium die casting alloy,» *Materials Science and Engineerint: A*, pp. 250-254, 15 January 2006.
- [41] K. Y. T. L. S.-B. C. C.-Y. J. Hua-Bin Chen, «The investigation of typical weldig defects for 5456 aluminium alloy friction stir welds,» *Materials Science and Engineering A*, pp. 64-69, October 2006.
- [42] Γ. Δ. Χ. Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία μεταλλικών υλικών, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008.
- [43] Stirweld, [Ηλεκτρονικό].