



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

*Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση ανόμοιων  
κραμάτων αλουμινίου AA5083-H111 και  
AA7075-T651*

Διπλωματική Εργασία

**Αλέξανδρος Σπετσιέρης**

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύριδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –  
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

*Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση λεπτών  
ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου AA5083-H111  
και AA7075-T651*

Διπλωματική Εργασία

**Αλέξανδρος Σπετσιέρης**

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/ΜΜ/ΕΕΕΕ

Πέτρος Τσακιρίδης, Επικ. Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Άγγελος Μαρκόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Σπύριδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής .....(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Τα τελευταία χρόνια οι αυξανόμενες απαιτήσεις της βιομηχανίας για ελαφρά και ανθεκτικά υλικά οδήγησαν την έρευνα στη μελέτη διαφόρων κραμάτων αλουμινίου, καθώς είναι σχετικά φθηνά με υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος. Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας όπως η αεροδιαστημική, η ναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Σε πολλές εφαρμογές τους απαιτείται συγκόλληση όμοιων είτε και ανόμοιων κραμάτων, οι οποίες με τις συμβατικές μεθόδους τήξης είναι είτε ανέφικτες είτε υποβαθμίζουν την ποιότητα της συγκόλλησης.

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

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης σε κράματα αλουμινίου των σειρών 5XXX και 7XXX. Για κάθε συγκόλληση, ακολουθεί μεταλλογραφική προετοιμασία και μεταλλογραφική παρατήρηση. Εν κατακλείδι αξιολογείται η κάθε συγκόλληση και παρατίθενται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την μέγιστη δυνατή επεξήγηση των αποτελεσμάτων.



## **ABSTRACT**

---

In recent years, the growing demands of the industry for light and durable materials have led research to study various aluminum alloys as they are relatively affordable with a high strength-to-weight ratio. Aluminum alloys are used in various sectors of the industry such as aerospace, shipbuilding and automotive. Many of their applications require welding of similar or dissimilar alloys which with conventional melting methods are either impossible or degrade the quality of the weld.

Friction Stir Welding (FSW) is a relatively new welding method, developed by the British The Welding Institute (TWI). It is a solid-state welding method since there is no melting of the materials to be welded but only partial plasticizing. It was mainly developed for the welding of similar and dissimilar aluminum alloys as well as the welding between aluminum alloys and steel alloys, welds which were difficult (e.g. welding between 7XXX aluminum alloys) or even impossible to perform by the conventional welding methods. Due to the absence of melting and consequently reduced thermal flow, the FSW joints exhibit improved mechanical properties and an upgraded heat affected zone (HAZ) compared to conventional welding methods. These features have established the application of the FSW method in many industrial sectors, such as shipbuilding, aerospace, rail transport as well as the automotive industry.

The aim of the present diploma thesis is to signify the best combination of process parameters in FSW of aluminum alloys 5xxx and 6xxx. For each welding, metallographic preparation is ensued. Finally, each welding outcome & evaluation is presented along with all necessary supportive information and explanations.





## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών σε συνεργασία με το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Συγκολλήσεων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν σε αυτή.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την συνεχή καθοδήγηση και ενασχόληση του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, με ουσιαστικές και πρακτικές συμβουλές στις όποιες δυσκολίες αντιμετώπισα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Βασίλη Λουκαδάκη και κ. Σπυρίδωνα Χασκή, οι οποίοι με την άριστη συνεργασία και επικοινωνία δημιούργησαν ένα ευχάριστο κλίμα και διάθεση για έρευνα. Οι συμβουλές και η υποστήριξή τους υπήρξαν καίριες, ενώ η υπομονή και η κατανόησή τους με βοήθησαν ιδιαίτερα στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ όλο το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Συγκολλήσεων, καθώς και το προσωπικό του μηχανουργείου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την εξαιρετική τους συνεργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Λευτέρη και Βασιλική, καθώς και τον αδερφό μου Νάσο, οι οποίοι με στηρίζουν πάντα απεριόριστα σε όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Περίληψη .....	5
Abstract.....	7
Πρόλογος.....	9
1 Εισαγωγή .....	13
2 Θεωρητικό Μέρος.....	14
2.1 Κράματα αλουμινίου .....	14
2.1.1 Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	14
2.1.2 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου .....	15
2.1.3 Κράματα χύτευσης αλουμινίου .....	16
2.1.4 Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου .....	17
2.2 Δυναμικά φαινόμενα επαναφοράς .....	20
2.2.1 Δυναμική αποκατάσταση (Recovery) .....	21
2.2.2 Μη συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX) .....	22
2.2.3 Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX) .....	25
2.2.4 Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (GDRX) .....	27
2.3 Συγκολλήσεις δια τριβής .....	29
2.3.1 Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή .....	29
2.3.2 Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση .....	30
2.3.3 Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά.....	31
2.3.4 Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή .....	32
2.3.5 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.....	34
2.3.6 Συγκριτικά συμπεράσματα για τα 5 είδη συγκολλήσεων δια τριβής	36
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της FSW στις συγκολλήσεις	
αλουμινίων.....	36
2.5 Παράμετροι της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW). .....	38
2.5.1 Γεωμετρία Εργαλείου .....	38
2.5.2 Βάθος διείσδυσης, γωνία κλίσης και δυνάμεις που ασκούνται	
επάνω στο εργαλείο συγκόλλησης .....	39
2.5.3 Ταχύτητα Περιστροφής.....	40
2.5.4 Ταχύτητα Πρόωσης.....	41
2.6 Ζώνες συγκόλλησης .....	42
2.7 Ροή υλικού κατά τη συγκόλληση FSW .....	44
2.7.1 Δημιουργία Onion rings κατά τις συγκολλήσεις FSW .....	45

2.7.2	Χαρακτηριστικές ατέλειες των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση.....	46
2.8	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου .....	49
2.8.1	Εφαρμογές .....	49
2.9	Βιβλιογραφική ανασκόπηση συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση 51	
2.9.1	Κράματα Αλουμινίου AA 5083 και AA 7075.....	51
2.9.2	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση κραμάτων AA5083.....	52
2.9.3	Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση κραμάτων AA7075.....	53
3	Πειραματικό Μέρος.....	55
3.1	Υλικά και η θερμική κατεργασία τους .....	55
3.2	Μηχανή συγκόλλησης.....	55
3.3	Εργαλείο συγκόλλησης .....	57
3.4	Παράμετροι εκτέλεσης ανόμοιων συγκολλήσεων .....	59
3.5	Μεταλλογραφική προετοιμασία και χαρακτηρισμός δομής .....	59
3.6	Οπτική Μικροσκοπία.....	61
3.7	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy "SEM") .....	62
4	Αποτελέσματα και Σχολιασμός.....	64
4.1	Παρατήρηση με Οπτικό Μικροσκόπιο.....	65
4.1.1	Δοκίμιο A1 .....	65
4.1.2	Δοκίμιο A2.....	66
4.1.3	Δοκίμιο A3.....	67
4.1.4	Δοκίμιο A4 .....	68
4.1.5	Δοκίμιο B1 .....	70
4.1.6	Δοκίμιο B2.....	72
4.1.7	Δοκίμιο B3.....	73
4.1.8	Δοκίμιο B4.....	75
4.2	Παρατήρηση με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) .....	77
4.2.1	Δοκίμιο A1 .....	77
4.2.2	Δοκίμιο B1 .....	82
4.2.3	Δοκίμιο B2.....	86
4.2.4	Δοκίμιο B4.....	88
4.3	Συμπεράσματα .....	91
4.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	92

5	Πίνακας Εικόνων .....	93
6	Βιβλιογραφία .....	96

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται ολοένα και περισσότερο λόγω της μεγάλης αντοχής τους σε συνδυασμό με το μικρό τους βάρος. Η χρήση τους έχει επεκταθεί σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, οι χερσαίες μεταφορές, η ναυπηγική και η αεροναυπηγική. Συνεπώς, η συγκόλλησή τους είναι εξαιρετικής σημασίας. Δεδομένου ότι σε κάποιες περιπτώσεις, η συγκόλλησή τους με συμβατικές μεθόδους είναι δύσκολή ή και αδύνατη (π.χ. κράματα 7XXX), η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο για τη συγκόλληση των συγκεκριμένων κραμάτων.

Τα κράματα που συγκολλήθηκαν στη συγκεκριμένη διατριβή ήταν τα AA5083-H111 και AA7075-T651. Οι συγκολλήσεις μεταξύ των ανόμοιων κραμάτων επιλέχθηκαν, έτσι ώστε να διερευνηθεί η συγκόλληση μεταξύ ενός μη θερμικά κατεργάσιμου και ενδοτραχυμένου κράματος αλουμινίου (AA5083-H111) με ένα θερμικά κατεργασμένο κράμα (AA7075-T651).

Στο πρώτο μέρος της συγκεκριμένης διατριβής παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται κυρίως με τις τεχνολογικές εξελίξεις της FSW, τις εφαρμογές της, την επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης, καθώς και τα φαινόμενα δυναμικής επαναφοράς που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις συγκολλήσεις και τον χαρακτηρισμό των συγκολλήσεων, καθώς και κάποιες σημαντικές πληροφορίες για τα κράματα αλουμινίου που πρόκειται να συγκολληθούν.

Το τρίτο μέρος αποτελείται από τη διαδικασία μικροσκοπικού ελέγχου με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ο σχολιασμός των παραγόμενων μικροδομών και ο βαθμός επίδρασης των παραμέτρων των συγκολλήσεων στην ποιότητα τους.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### 2.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

#### 2.1.1 Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το αλουμίνιο ανήκει στη κατηγορία των ελαφρών μετάλλων [1], δηλαδή των οποίων η πυκνότητα έχει χαμηλές τιμές σε σχέση με άλλα μέταλλα όπως ο χάλυβας. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα του αλουμινίου είναι  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Η σημασία του αλουμινίου για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη, διότι το μέταλλο αυτό, καθώς και τα κράματά του, παρουσιάζουν υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας ( $E/\rho$ ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή ( $\sigma_{TS}/\rho$ ), σε σχέση με άλλα μέταλλα, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση.

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνον από την καθαρότητα του [3], αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί, κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισούται με το 75% αυτής του χαλκού [1], λαμβανόμενης όμως, υπόψιν της χαμηλής τους πυκνότητας, το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός. Έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο και αν αφεθεί στον αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό επιφανειακό και συνεχές στρώμα  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία.

Οι κυριότερες κραματικές προσθήκες του αλουμινίου είναι ο χαλκός (Cu), το μαγγάνιο (Mn), το μαγνήσιο (Mg), ο σίδηρος (Fe), το πυρίτιο (Si) και ο ψευδάργυρος (Zn). Κύριες μικροπροσμίξεις σιδήρου (Fe) και πυριτίου (Si) μπορούν να βρισκονται σ' αυτό σε περιορισμένο φυσικά βαθμό [1].

Τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί [1].

## 2.1.2 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminum Association (A.A.), αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα [1]. 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)

Πίνακας 1: Κύρια στοιχεία κραμάτωσης κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
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 (Πίνακας 2). Ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από το κωδικό.

Πίνακας 2: Κύρια στοιχεία κραμάτωσης κραμάτων χύτευσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
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

### 2.1.3 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 [1].

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι: η καλή χυτεσιμότητα, η απουσία ρωγματώσεων και η ομοιογενής κατανομή του πορώδους (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση), η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων, η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση. 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 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%wt, αν και τις περισσότερες φορές προτιμώνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση.



- **Κράματα αλουμινίου της σειράς 5XX.X.** Πρόκειται για κράματα Al-Mg. 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
- **Κράματα αλουμινίου της σειράς 7XX.X.** Πρόκειται για κράματα Al-Zn και κράματα Al-Zn-Mg. 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.

## 2.1.4 Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

### 2.1.4.1 Κράματα Al που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία

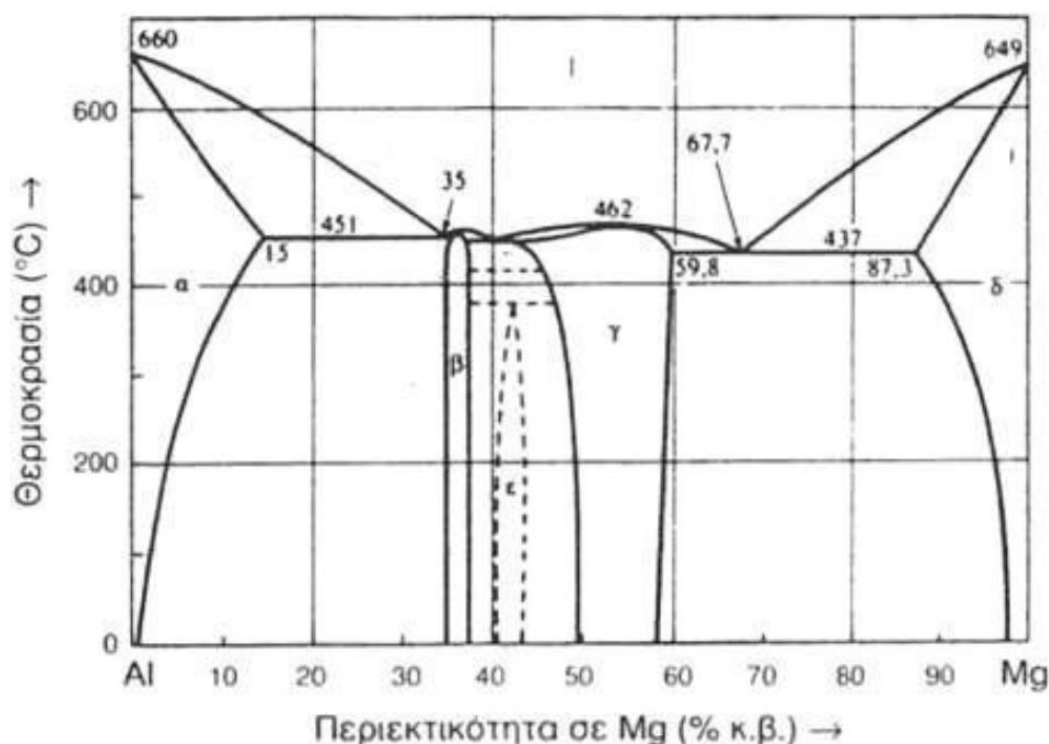
Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 1XXX, 3XXX και 5XXX. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή ενδομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία στερεών διαλυμάτων και κυρίως με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1XXX.** 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 ψυχρώ και χαρακτηρίζονται από σημαντική αντοχή σε διάβρωση κυρίως σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν πολύ καλή 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%.
- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XXX.** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το Mn. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al που είναι 1,8% στους 659°C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία.

Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη ένδομεταλλική ένωση  $Al_6Mn$ . Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη ένδομεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία της  $Al_6Mn$  προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος. Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα.

Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1XXX, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XXX.** Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο σε ποσοστά μικρότερα από 4%. 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 1.28)



Εικόνα 1: Διάγραμμα θερμοκρασίας περιεκτικότητας. Πηγή [1]

Τα κράματα της σειράς 5XXX παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος, όμως, της ολκιμότητάς τους. Όταν βρίσκονται στη μεταλλουργική κατάσταση O, μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρό 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.

#### 2.1.4.2 Κράματα Al που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες

- α. **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XXX.** Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6-6,3% και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η σκλήρυνση

της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων  $\text{CuAl}_2$  και  $\text{CuMgAl}_2$ , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% ευνοεί το σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας. Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Εάν ωστόσο, προστεθεί συγχρόνως, και Ni, σχηματίζεται η ένωση  $\text{Al}_9\text{FeNi}$ , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους  $230^\circ\text{C}$ . Τα κράματα της σειράς 2XXX, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα, διότι οι ζώνες, οι γειτονικές προς τη περιοχή συγκόλλησης, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

β. **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6XXX.** Πρόκειται για κράματα Al-Mg-Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στο σχηματισμό της ένωσης  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , στην οποία, συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si, όπως π.χ. στο κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση. Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Οι προσθήκες αυτές συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση, που προκαλεί. Τα κράματα της σειράς 6XXX μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως δε, παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους  $150^\circ\text{C}$ . Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

γ. **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XXX.** Πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. 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  $\text{MgZn}_2$ . 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 7XXX 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 7XXX 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<sub>2</sub> είναι 130°C.

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7XXX χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή σε διάβρωση.

## 2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ

Τα δυναμικά φαινόμενα της επαναφοράς [6] (restoration) διακρίνονται σε:

- a. Δυναμικά φαινόμενα αποκατάστασης (recovery)
- b. Δυναμικά φαινόμενα ανακρυστάλλωσης (recrystallization)

Επειδή αυτά συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της έντονης παραμόρφωσης του αλουμινίου και των μεταλλικών υλικών γενικότερα, συνήθως κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, ονομάζονται δυναμική αποκατάσταση και δυναμική ανακρυστάλλωση, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει για να τα διαχωρίσουμε από τις διεργασίες ανόπτησης οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας των μετάλλων μετά τη διαδικασία παραμόρφωσής τους. Τόσο τα στατικά, όσο και τα αντίστοιχα δυναμικά φαινόμενα έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά.

Τα φαινόμενα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

1. Μη συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση (Discontinuous dynamic recrystallization, DDRX)
2. Συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος (Dynamic recrystallization by progressive lattice rotation)
3. Συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση με γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση. (Geometric Continuous Recrystallization – GDRX)

### 2.2.1 Δυναμική αποκατάσταση (Recovery)

Το φαινόμενο της αποκατάστασης αποσκοπεί στην δημιουργία υπόκοκκων στο εσωτερικό των κόκκων μέσω ανακατανομής των διαταραχών και παρουσιάζεται κυρίως στην ΘΕΖ [7]. Το φαινόμενο αυτό μπορεί ωστόσο να εμφανιστεί και στη ΘΜΕΖ αλλά και στιγμιαία πριν την έναρξη της δυναμικής ανακρυστάλλωσης στη ζώνη ανάδευσης. Γενικά στα φαινόμενα αποκατάστασης δεν επικρατεί μετακίνηση των ορίων των κόκκων πάρα μόνο ίσως κάποια μικρή παραμόρφωση αυτών. Κατά τα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης παρατηρείται ενίσχυση της εντατικής κατάστασης, καθώς οι διαταραχές αλληλοεπιδρούν και πολλαπλασιάζονται. Με την αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών αυξάνεται και ο ρυθμός του φαινομένου της δυναμικής αποκατάστασης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υποκόκκων με μικρή γωνία κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Υπό επίδραση συγκεκριμένης τάσης ο ρυθμός εργοσκήρυνσης και ο ρυθμός της δυναμικής αποκατάστασης έρχονται σε δυναμική ισορροπία. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση των τάσεων καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση. Οι μηχανισμοί για τη δημιουργία της δυναμικής αποκατάστασης είναι ίδιοι με αυτούς της στατικής δηλαδή η αναρρίχηση και η ολίσθηση των διαταραχών. Μέσω αυτών των μηχανισμών δημιουργούνται οι υπόκοκκοι μικρής γωνίας κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Η ασκούμενη τάση συνεισφέρει στη μετακίνηση των ορίων των υπόκοκκων αυτών και αυτό το φαινόμενο παίζει καθοριστικό ρόλο στη τελική παραμόρφωση του υλικού. Αυτή η μετακίνηση επηρεάζει σημαντικά την ισοαξονιότητα των κόκκων και οδηγεί στην μερική απαλοιφή των διαταραχών [7-8].

Ο ρυθμός παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}$  (σε  $s^{-1}$ ) και η θερμοκρασία παραμόρφωσης  $T$  (σε  $K$ ) ενσωματώνονται στην παράμετρο Zener - Hollomon ( $Z$ ) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

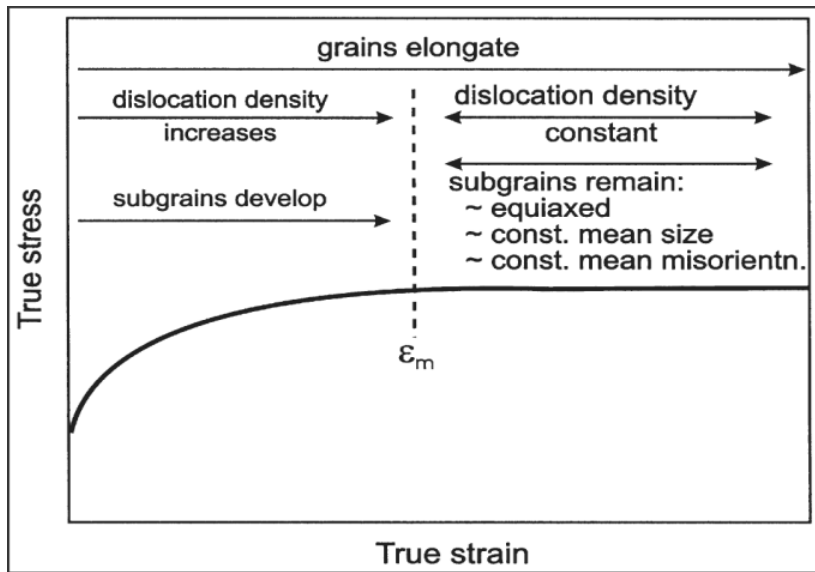
όπου  $Q$  είναι η ενέργεια ενεργοποίησης (σε  $kJ/mol$ ) και  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $8,314 J/(mol \cdot K)$ ).

Το  $Z$  παρατίθεται σε κλίμακα νεπέριου λογάριθμου. Τυπικές τιμές του  $\ln Z$  για τα κράματα αλουμινίου είναι από 15 έως 60. Η ενέργεια ενεργοποίησης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία. Σε περιπτώσεις με συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης, τα όρια των υπόκοκκων μεταναστεύουν τοπικά λόγω της τάσης των ορίων και της ανομοιομορφίας στην πυκνότητα των διαταραχών, σχηματίζοντας οδοντώσεις με μήκος κύματος συγκρίσιμο με το μέγεθος των υπόκοκκων.

Τα φαινόμενα της εργοσκήρυνσης και της δυναμικής αποκατάστασης έχουν ως αποτέλεσμα τη συνεχή εξαφάνιση και την επαναδημιουργία υποκόκκων μικρής γωνίας αποπροσανατολισμού και τη δημιουργία ελεύθερων διαταραχών μέσα σε αυτούς.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2 μετά από μια συγκεκριμένη τιμή παραμόρφωσης  $\epsilon_m$  η οποία ανάλογα με το υλικό κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 1, η μικροδομή των υποκόκκων έρχεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Σε συνθήκες όπου επικρατεί χαμηλή θερμοκρασία αλλά υψηλές τάσεις τότε κυριαρχεί το φαινόμενο της εργοσκήρυνσης. Αντίθετα σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλών τάσεων επικρατεί η δυναμική αποκατάσταση.



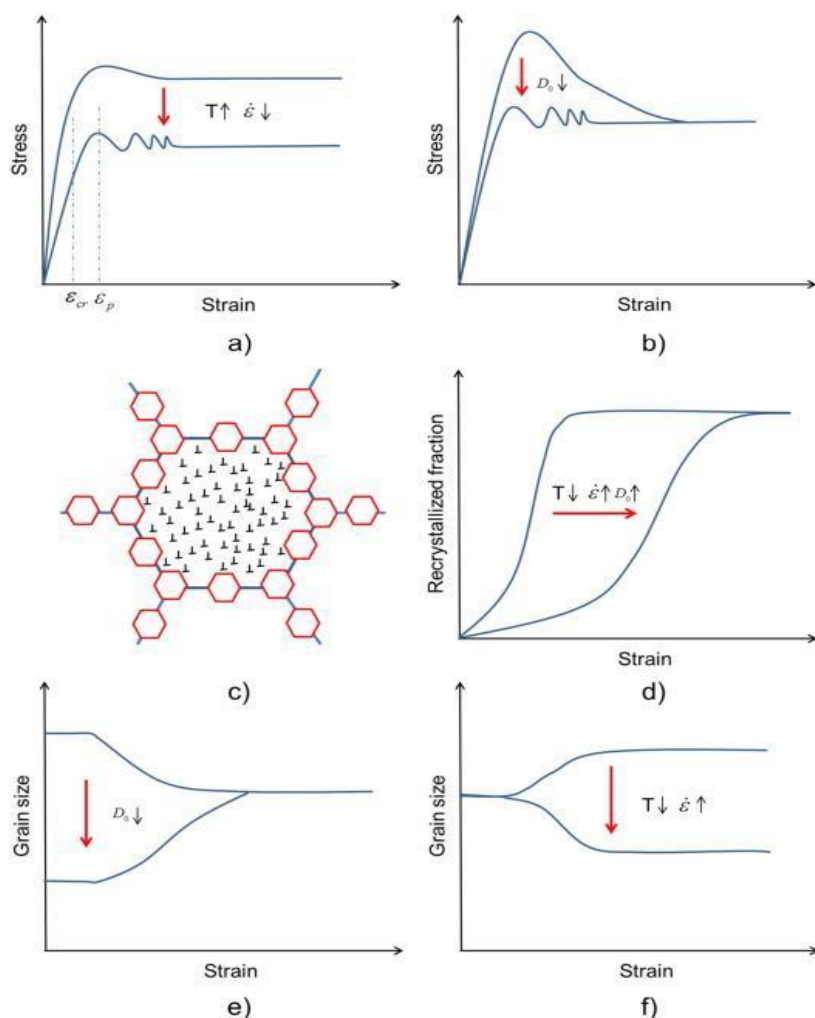
Εικόνα 2: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στο οποίο απεικονίζονται οι αλλαγές στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της δυναμικής αποκατάστασης.[1]

### 2.2.2 Μη συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX)

Όταν αναφέρεται ο όρος δυναμική ανακρυστάλλωση (DDRX) χωρίς κάποια διευκρίνιση τότε συνήθως αναφέρεται στη συμβατική διεργασία μη συνεχούς ανακρυστάλλωσης (DDRX) η οποία έχει σαφή στάδια πυρήνωσης και ανάπτυξης. Η DDRX συνήθως εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της θερμής παραμόρφωσης κραμάτων, μικρών έως μεσαίων SFE (σφάλματα επιστοίβαξης). Τα κράματα που υποβάλλονται σε DDRX εμφανίζουν ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά τα οποία απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 1.25 και συνοψίζονται ως εξής:

- α. 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-Holomon ενώ είναι ανεξάρτητη από το αρχικό μέγεθος κόκκων [12] (Εικόνα 1.25 (a),(b)).

- β. Μία κρίσιμη τάση  $\epsilon_{cr}$ , κάπως χαμηλότερη από τη μέγιστη τάση  $\epsilon_p$ , πρέπει να επιτευχθεί πριν από την εμφάνιση της DDRX. Τόσο αυτή η κρίσιμη τάση όσο και η μέγιστη τάση μειώνονται με τη μείωση της παραμέτρου Zener-Hollemon [13].
- γ. Η πυρηνοποίηση της διαδικασίας DDRX συνήθως ξεκινά από τα προ υπάρχοντα όρια κόκκων, σχηματίζοντας μία μικροδομή “περιδέριου” [14] η οποία αποτελείται από ισοαξονικούς κόκκους όταν η διαφορά μεγέθους μεταξύ των αρχικών και των ανακρυσταλλωμένων κόκκων είναι μεγάλη (Εικόνα 1.25 (c)).
- δ. 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 [15]. Τέλος παρατηρείται μία σχέση μεταξύ του μεγέθους των κόκκων και της παραμέτρου Zener-Hollemon, παρόλο που παρατηρήθηκε απόκλιση σε υψηλές τιμές της παραμέτρου Z (Εικόνα 3 (e),(f)).
- ε. Η κινητική της ανακρυστάλλωσης επιταχύνεται με τη μείωση του αρχικού μεγέθους του κόκκου, το βαθμό καταπόνησης και την αύξηση της θερμοκρασίας παραμόρφωσης [13] (Εικόνα 3 (d)).



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της DDRX (a), (b) Δημιουργία πολλαπλών κορυφών κατά την έναρξη της καταπόνησης (c) δημιουργία της χαρακτηριστικής μικροδομής περιδέραιου (d) επίδραση των παραμέτρων παραμόρφωσης στη κινητική της ανακρυστάλλωσης (e) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε εξάρτηση με το αρχικό μέγεθος κόκκου  $D_0$ , (f) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες παραμόρφωσης.

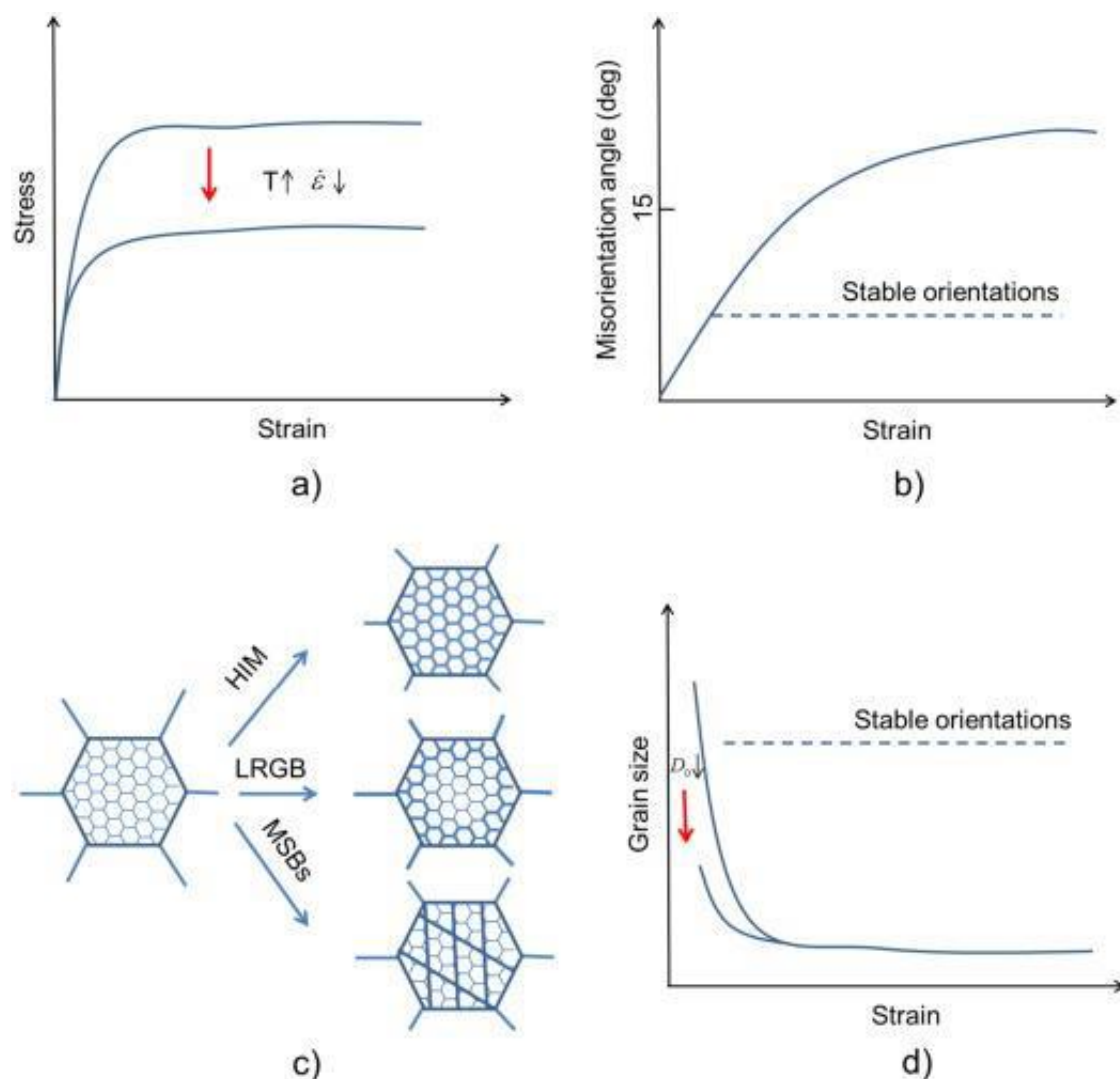
Πηγή [9]



### 2.2.3 Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX)

Η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (CDRX) λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις όπου η μικροδομή εξελίσσεται σχετικά ομοιογενώς σε όλο το υλικό, χωρίς σαφή όρια πυρήνωσης και ανάπτυξης των ανακρυσταλλωμένων κόκκων. Η συγκεκριμένη διεργασία συγκριτικά με την DDRX έχει μελετηθεί αρκετά λιγότερο καθώς υποστηρίζεται ότι η διεργασία δυναμικής αποκατάστασης DRV είναι ο μόνος μηχανισμός εκλέπτυνσης της μικροδομής σε μέταλλα με υψηλά σφάλματα επιστοίβαξης (SFE). Τα κύρια χαρακτηριστικά της διεργασίας CDRX κατά τη διαδικασία της θερμής παραμόρφωσης συνοψίζονται παρακάτω.

- α. Η αύξηση της τάσης προκαλεί αύξηση της γωνίας προσανατολισμού των ορίων των υποκόκκων. Οι χαμηλότεροι ρυθμοί αύξησης της τάσης επιταχύνουν αυτή τη διαδικασία [9], 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 κάποιοι σταθεροί προσανατολισμοί, για τους οποίους η αύξηση της γωνίας των ορίων των κόκκων δεν επαρκεί για να μετατραπούν και να χαρακτηριστούν ως HAGBs [9], όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 (b).
- β. 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, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4 (c). 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 [9].
- γ. Μέγεθος κρυσταλλίτη : Το μέσο μέγεθος κρυσταλλίτη μειώνεται κατά την παραμόρφωση και φθάνει σε μία συγκεκριμένη “σταθερή τιμή” σε αυξημένες τάσεις. Μία μείωση του αρχικού μεγέθους των κόκκων μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την κινητική της εκλέπτυνσης των κόκκων υπό την επίδραση μίας μεγάλης τάσης παραμόρφωσης. Ωστόσο η ακολουθία της παραμόρφωσης έχει μικρή επίδραση στη κινητική της διεργασίας συνεχούς ανακρυστάλλωσης CDRX [16].
- δ. Σε μεγάλες καταπονήσεις παρατηρείται ο σχηματισμός μίας ισχυρής κρυσταλλογραφικής υφής.



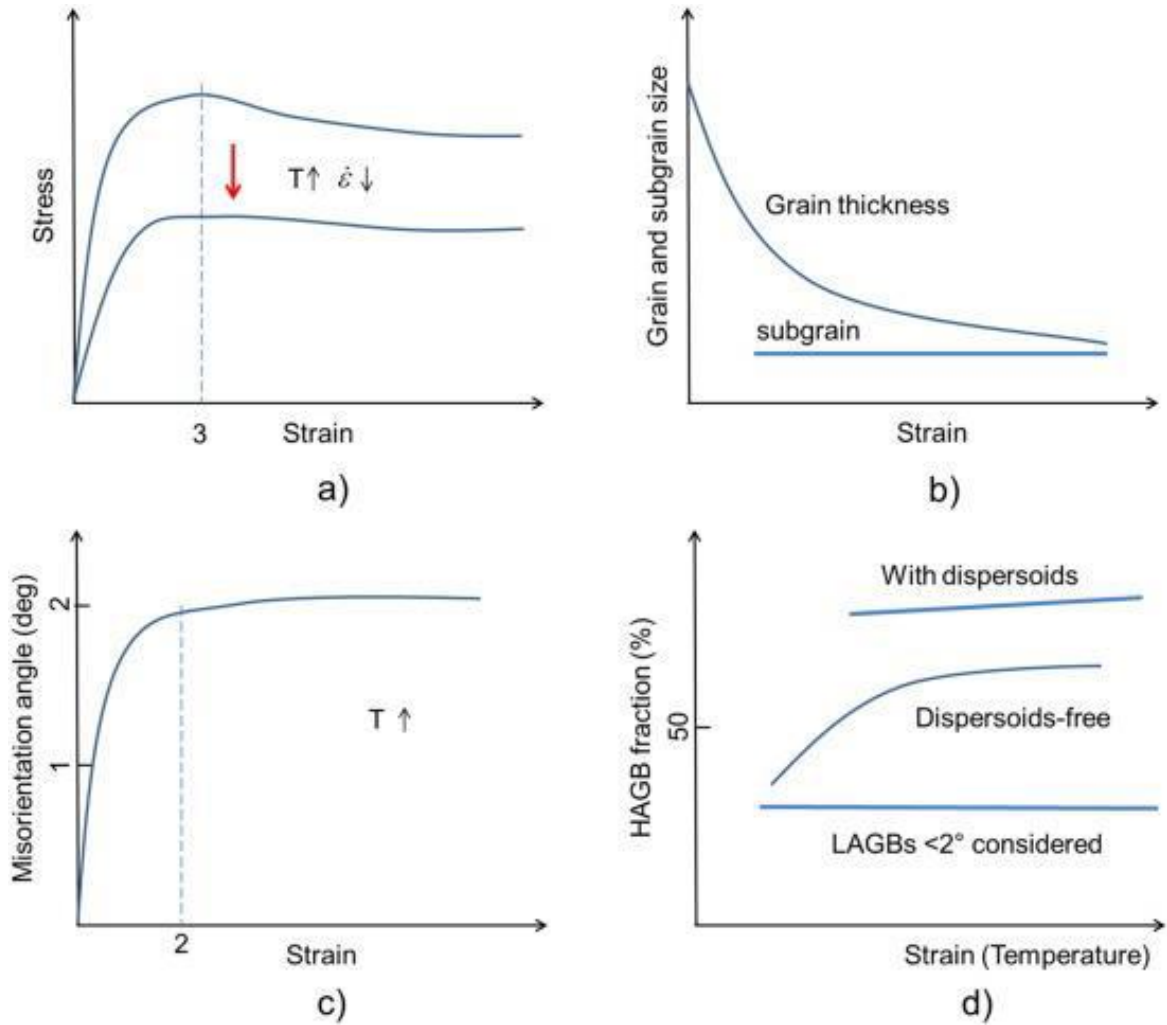
Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της CDRX. (a) καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, (b) Σχέση μεταξύ τάσης και αύξησης της γωνίας προσανατολισμού των ορίων των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες, (c) σχηματική αναπαράσταση των μικροδομών HIM, LRGB και MSBs, (d) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση

Πηγή: [9]

#### 2.2.4 Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (GDRX)

Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση αποτελεί μια διεργασία που συναντάται συχνά σε υλικά όπως εκείνα με υψηλή καθαρότητα αλουμινίου [17] αλλά και κράματα αλουμινίου με στοιχεία προσθήκης όπως ο χαλκός (Cu), το μαγνήσιο (Mg) και ο ψευδάργυρος. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά αυτής της διεργασίας συνοψίζονται παρακάτω.

- α. 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 (Εικόνα 5 (a)).
- β. Οι νέοι κόκκοι ξεκινούν τη δημιουργία τους μετά από μια κρίσιμη παραμόρφωση, αρχικά κοντά στα HAGBs. Οι υποκόκκοι παραμένουν ισοαξονικοί και σταθεροί σε μέγεθος (Εικόνα 5 (b)). Το σταθερό αυτό μέγεθος τους μειώνεται με την αύξηση της παραμέτρου Zener-Hollemon [17].
- γ. 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 [17]. Το μαλάκωμα της υφής, ωστόσο, θεωρείται υπεύθυνο για τη μείωση της τάσης μετά τη πρώτη κορυφή [9] (Εικόνα 5 (a)).
- δ. Όταν λαμβάνει χώρα η διαλυτοποίηση και η κατακρήμνιση των διαμεταλλικών σωματιδίων, η κρίσιμη τάση σχηματισμού νέων υποκόκκων και η αύξηση του ποσοστού των HAGBs (Εικόνα 5 (d)), με την ταυτόχρονη μείωση του σταθερού μεγέθους των υποκόκκων, απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διεργασίας GDRX. Γεγονός που προϋποθέτει μεγάλη παραμόρφωση.



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης τους πάχους των κόκκων και του μεγέθους των υποκόκκων κατά τη διάρκεια της GDRX. (a) ροή τάσης, (b) πάχος κόκκου και εξέλιξη μεγέθους του υποκόκκου, (c) εξέλιξη των LAGBs μετρούμενες με TEM, οι ζώνες παραμόρφωσης και το ποσοστό των HAGBs δεν λαμβάνονται υπόψη, (d) εξέλιξη των HAGBs, όπου έχει προστεθεί η περίπτωση των LAGBs μικρότερων από 2ο για λόγους σύγκρισης.

Πηγή: [9]

## 2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ

Είναι γνωστό ότι κατά τη συγκόλληση δια τριβής, η μηχανική ενέργεια που παράγεται κατά την υπερνίκηση της τριβής μεταξύ δύο συνεχώς κινούμενων επιφανειών, μετατρέπεται σε θερμότητα. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πλαστικοποιούν τις προς συγκόλληση επιφάνειες και με την άσκηση δύναμης ολοκληρώνεται η συγκόλληση. Η συγκόλληση διά τριβής αποτελεί μία διαδικασία στερεάς κατάστασης καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στη ραφή δεν ξεπερνούν το σημείο τήξης των υλικών.

Οι προκύπτουσες συγκολλήσεις δια τριβής, λόγω της απουσίας τήξης του μετάλλου, εμφανίζουν βελτιωμένη μικροδομή, με μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη, χωρίς την ύπαρξη πορώδους, εγκλεισμάτων και άλλων ατελειών που σχετίζονται με την τήξη [2]. Επιπλέον χαρακτηριστικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι συγκολλά διαφορετικά υλικά (dissimilar welding) σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συμβατικές μεθόδους, ενώ χαρακτηρίζεται ως "πράσινη μέθοδος" εφόσον δεν υπάρχουν αέρια, καπνοί και επικίνδυνες ακτινοβολίες κατά τη διεργασία. Υπάρχουν πέντε βασικές παραλλαγές της συγκόλλησης διά τριβής:

1. **Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή.** Η μέθοδος αυτή χωρίζεται σε τρία επιμέρους είδη: τη Μέθοδο μέσω Αδρανείας ή Συσσωρευμένης Ενέργειας (Inertia Friction Welding), τη Μέθοδο Συνεχούς Οδήγησης (Direct Drive Friction Welding) και την Υβριδική Μέθοδο (Hybrid Friction Welding)
2. **Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση** (Linear Friction Welding).
3. **Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά** (Orbital Friction Welding)
4. **Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή** (Radial Friction Welding)
5. **Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση** (Friction Stir Welding)

### 2.3.1 Συγκόλληση δια τριβής με περιστροφή

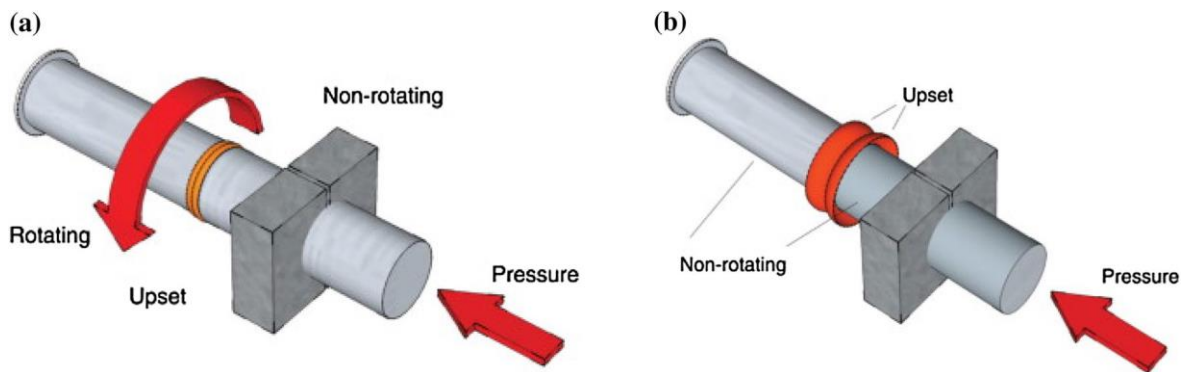
Στη περιστροφική συγκόλληση διά τριβής το ένα τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του ενώ το άλλο παραμένει ακίνητο [2]. Το περιστρεφόμενο τεμάχιο έρχεται σε επαφή με το ακίνητο τεμάχιο είτε υπό σταθερή είτε υπό αυξανόμενη πίεση. Όταν παραχθεί η κατάλληλη θερμότητα, που χρειάζονται τα τεμάχια για να πλαστικοποιηθούν, η περιστροφή σταματάει.

Σύμφωνα με τον L. D'Alvise και τους συνεργάτες του [4], η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής (RFW) είναι μια διαδικασία τήξης στερεάς κατάστασης που επιτρέπει την συγκόλληση ενός μεγάλου εύρους όμοιων και ανόμοιων υλικών με υψηλή ποιότητα. Λόγω του γεγονότος ότι κατά τη διαδικασία

συγκόλλησης οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι αρκετά χαμηλότερες από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι

μικρότερη από εκείνη που προκύπτει κατά τις συμβατικές συγκολλήσεις τήξεως. Σημαντικά πλεονεκτήματα αποτελούν η συμμετρία της συγκόλλησης, οι προοπτικές για αυτοματοποίηση της διαδικασίας και οι σύντομοι χρονικοί κύκλοι.

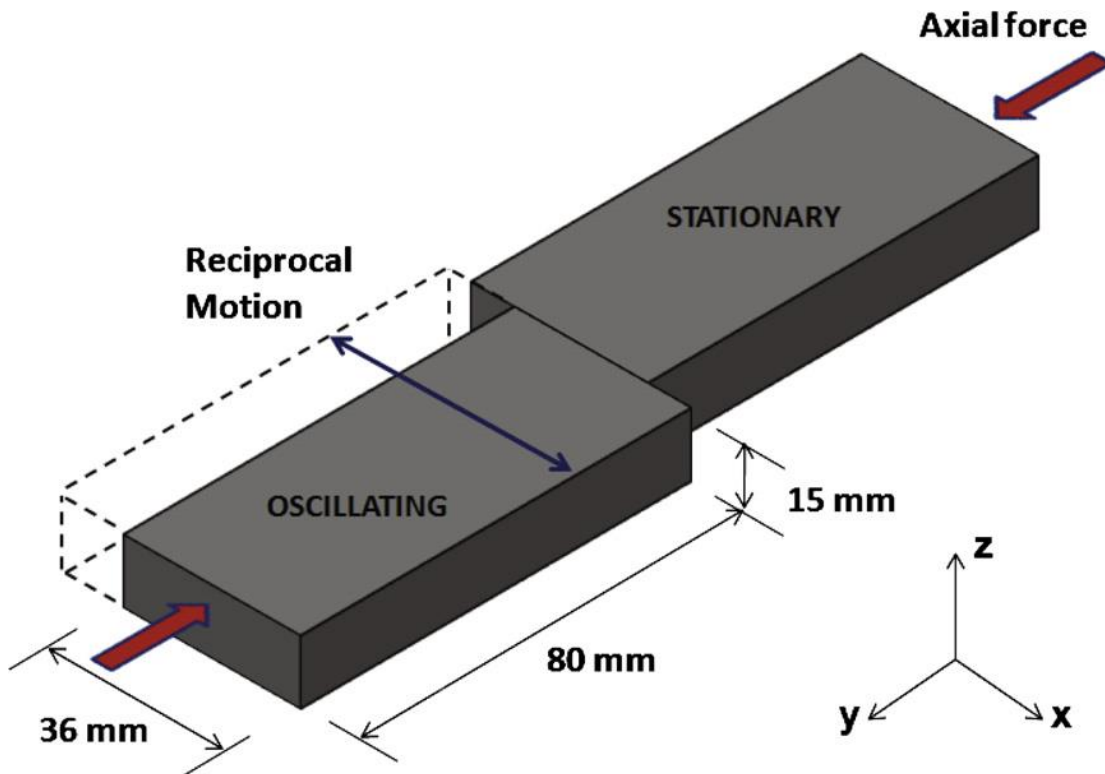
Ο S. Murugan [19] υποστηρίζει ότι στην άμεση συγκόλληση τριβής κίνησης (DDFW), απαιτείται σωστή ποσότητα θερμότητας στο κέντρο των μερών. Δυστυχώς, η αύξηση της ενέργειας και το αυξημένο φορτίο έχουν άμεση επίδραση στο κόστος και την ασφάλεια. Ωστόσο η επιπρόσθετη ενέργεια δημιουργεί αρκετή θερμότητα στο κέντρο των τεμαχίων προς συγκόλληση ώστε να υπάρξει συγκόλληση καλής ποιότητας.



Εικόνα 6: Αναπαράσταση της βασικής αρχής λειτουργίας της περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής. Πηγή : [19]

### 2.3.2 Συγκόλληση δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση

Η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Πρόκειται για μία διαδικασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που εφαρμόζεται σε μη αξονικά συμμετρικά τεμάχια. Η σύνδεση των δύο υλικών επιτυγχάνεται μέσω της σχετικής τους κίνησης υπό την εφαρμογή αξονικής δύναμης [5]. Σε μία τέτοια διαδικασία, η θερμότητα δημιουργείται από τις δυνάμεις τριβής, η οποία οδηγεί σε ένα τοπικό μαλάκωμα του υλικού, δημιουργώντας τις απαιτούμενες συνθήκες συγκόλλησης

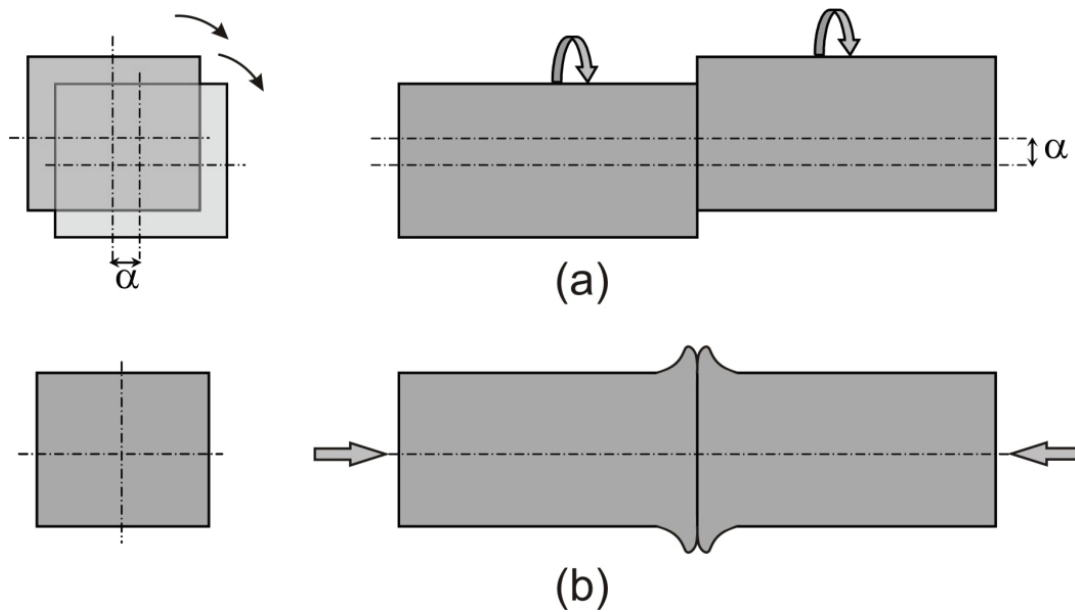


Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση. Πηγή: [5]

Η συγκόλληση διά τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW) παρουσιάζει όλα τα τυπικά πλεονεκτήματα των τεχνικών συγκόλλησης σε στερεά κατάσταση, δηλαδή την απουσία καπνών, την αποφυγή της τήξης του υλικού βάσης, την βελτιωμένη μικροδομή του υλικού σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης καθώς και τη μειωμένη εμφάνιση εγκλεισμάτων και ελαττωμάτων στη περιοχή της ζώνης συγκόλλησης

### 2.3.3 Συγκόλληση δια τριβής με κίνηση σε τροχιά.

Στην τροχιακή συγκόλληση δια τριβής, η οποία είναι συνδυασμός γραμμικής και περιστροφικής συγκόλλησης με τριβή, το κέντρο του ενός τεμαχίου κινείται σε σχέση με το άλλο τεμάχιο γύρω από μια δισδιάστατη καμπύλη, π.χ. έναν κύκλο, για την παροχή της απαιτούμενης τριβής. Τα δύο προς συγκόλληση τεμάχια περιστρέφονται γύρω από τους διαμήκεις άξονές τους με την ίδια σταθερή γωνιακή ταχύτητα (Εικόνα 8). Οι δύο διαμήκεις άξονες είναι παράλληλοι εκτός από μια μικρή απόσταση  $a$ . Όταν σταματά η κίνηση των εξαρτημάτων και πριν εφαρμοστεί η απαιτούμενη δύναμη σφυρηλασίας, τα τμήματα είναι σωστά ευθυγραμμισμένα για να σχηματίσουν τη συγκόλληση [20].



Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με κίνηση σε τροχιά.  
Πηγή: [20]

Στην τροχιακή συγκόλληση τριβής, τέσσερις παράμετροι ελέγχουν τον χαρακτήρα της συγκόλλησης μέσω του προσδιορισμού της ποσότητας ενέργειας που εισάγεται στη συγκόλληση και του ρυθμού παραγωγής θερμότητας στη διεπαφή:

1. η σχετική ταχύτητα μεταξύ των τεμαχίων
2. η διάρκεια της διαδικασίας
3. η αξονική δύναμη
4. τα εύρη διακύμανσης των παραμέτρων αυτών κατά την εξέλιξη της διεργασίας.

Λόγω της άμεσης μετατροπής της μηχανικής σε θερμική ενέργεια στις προς συγκόλληση επιφάνειες, η συγκόλληση με τριβή είναι εγγενώς γρήγορη και οικονομική. Σήμερα, η συγκόλληση με τριβή βρίσκει εκτεταμένες βιομηχανικές εφαρμογές και χρησιμοποιείται σε ολόκληρο τον κόσμο ως μια αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ωστόσο, διάφορα φαινόμενα που σχετίζονται με τη διεργασία, όπως η σοβαρή πλαστική παραμόρφωση, η απότομες διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας και η πολύ υψηλή ταχύτητα τριβής, καθώς και οι επιδράσεις τους στις ιδιότητες του υλικού κατά το στάδιο της τριβής και πλαστικοποίησης του καθιστούν δύσκολη την ανάλυση των συγκολλήσεων τριβής [2]. Μια άλλη δυσκολία είναι η κυρίως άγνωστη εξάρτηση του συντελεστή τριβής από τη θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα.

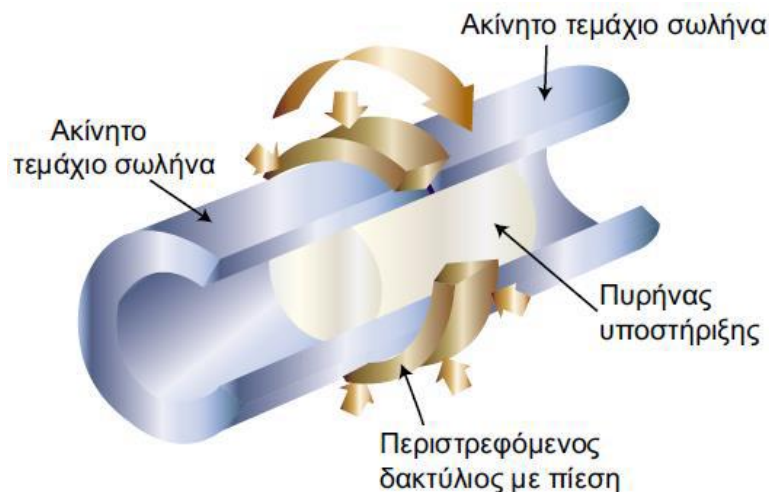
### 2.3.4 Συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή

Η συγκόλληση δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή πρόκειται για μια παραλλαγή της διαδικασίας συγκόλλησης με τριβή, η οποία αναπτύχθηκε από το Βρετανικό



Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, TWI) ως τεχνική ενιαίας σύνδεσης για αγωγούς, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής διαδικασίας συγκόλλησης, όπως εξαιρετικά γρήγορους χρόνους συγκόλλησης (μικρότερους από 30 δευτερόλεπτα), απαίτηση για εξειδικευμένο χειριστή, υψηλή ποιότητα συγκόλλησης, υψηλή επαναληψιμότητα και δυνατότητα σύνδεσης ανόμοιων υλικών. Επιπλέον, πολλά από τα μεταλλουργικά προβλήματα που σχετίζονται με τις διεργασίες συγκόλλησης με σύντηξη μπορούν να αποφευχθούν, αφού η εν λόγω συγκόλληση RFW είναι μια διαδικασία σύνδεσης στερεάς κατάστασης [10].

Η διαδικασία ξεκινάει με τη σύσφιξη των δύο προς συγκόλληση τεμαχίων προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν πρόσθετη περιστροφή ή αξονική κίνηση. Εν συνεχεία ένας καταναλισκόμενος δακτύλιος από το ίδιο υλικό με εκείνο των σωλήνων, ο οποίος έχει υποστεί μηχανουργική κατεργασία προκειμένου να οξυνθεί στην άκρη του, τοποθετείται στην διεπαφή των δύο σωλήνων η οποία επίσης έχει υποστεί λοξοτομή (Εικόνα 1.9). Αυτός ο καταναλισκόμενος δακτύλιος περιστρέφεται και συμπιέζεται ακτινικά για να παραχθεί θερμότητα τριβής μεταξύ αυτού τριβής και των σταθερών προς συγκόλληση επιφανειών του σωλήνα, πράγμα που με τη σειρά του θα παράγει τις θερμομηχανικές συνθήκες που είναι απαραίτητες για την επίτευξη της συγκόλλησης. Για να διατηρηθούν τα άκρα του σωλήνα ευθυγραμμισμένα κατά την ακτινική διεύθυνση και να αντιδράσουν έναντι της εξωτερικής ακτινικής πίεσης συγκόλλησης και να μην υπάρξει υποχώρηση αλλά και εξώθηση υλικού στο εσωτερικό του σωλήνα, τοποθετείται ένας ειδικός άξονας (πυρήνας), ο οποίος είναι ανθεκτικός στη θερμότητα (Εικόνα [1.10]). Μετά από ένα δεδομένο χρονικό διάστημα και μία ελεγχόμενη μείωση της διαμέτρου του καταναλισκόμενου δακτυλίου (που ονομάζεται burnoff), η περιστροφή διακόπτεται και η ακτινική πίεση διατηρείται ή αυξάνεται για την επίτευξη της συγκόλλησης.



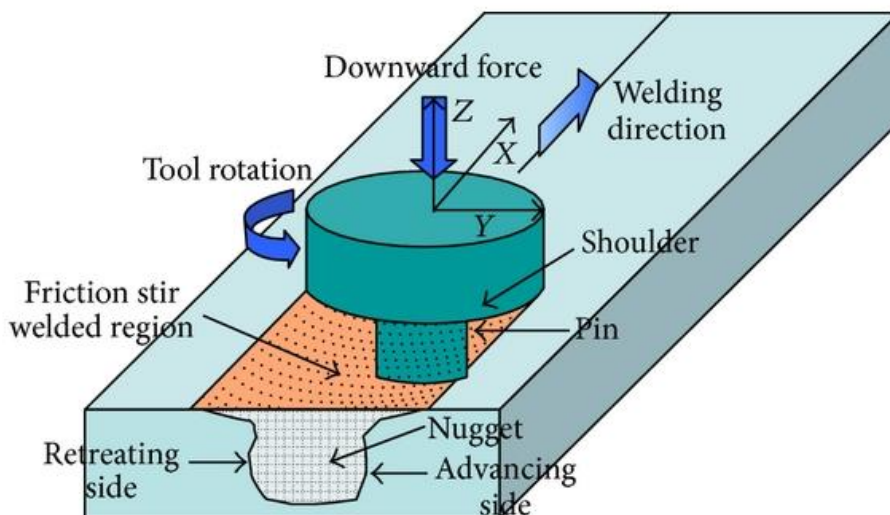
Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή.

Πηγή: [2]

### 2.3.5 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding - FSW) επινοήθηκε το έτος 1991 στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, TWI) [2]. Είναι μία εξαιρετικά καινοτόμα μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κατά την οποία, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο, το οποίο φέρει έναν πείρο συγκεκριμένης γεωμετρίας και ένα φαρδύτερο κυλινδρικό περιαιχένιο, εισέρχεται στο σημείο ένωσης των δύο προς συγκόλληση πλακών και μετατοπίζεται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης πλαστικοποιώντας και αναμιγνύοντας το υλικό των πλακών και πραγματοποιώντας έτσι τη μηχανική ανάμειξη αυτού. Από την επινοήσή της αποτέλεσε μια εξαιρετικά υποσχόμενη μέθοδο συγκόλλησης καθώς όχι μόνο μπορούσε να συγκολληθεί μέταλλα και κράματα τα οποία ήταν αδύνατον να συγκολληθούν με τις έως τότε συμβατικές μεθόδους συγκολλήσεων τήξεως αλλά είναι ιδανική και για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων μεταξύ ανόμοιων κραμάτων όπως διαφορετικά κράματα αλουμινίου μεταξύ τους αλλά και κράματα αλουμινίου με κράματα χαλκού ή χάλυβες.

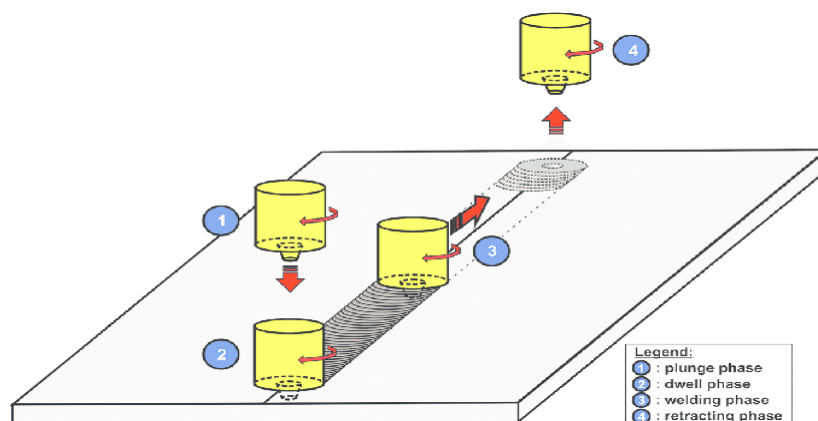
Οι συγκολλήσεις (FSW) χαρακτηρίζονται από δύο διαφορετικές πλευρές οι οποίες παρατηρούνται στην Εικόνα 10: την προωθούμενη πλευρά (advancing side) και την υποχωρούσα πλευρά (retreating side). Η προωθούμενη πλευρά είναι εκείνη κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης, ενώ η υποχωρούσα είναι εκείνη κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει αντίθετη κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης. Οι δύο αυτές πλευρές έχουν σημαντική επίδραση στις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Η διεργασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αποτελείται από τέσσερα διακριτά στάδια τα οποία αναλύονται στη συνέχεια και παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 11.

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 11(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 11(2)). Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται επαρκή 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 11(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 11(4). 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 11: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων συγκόλλησής δια τριβής με ανάδευση.  
Πηγή: [22]

### 2.3.6 Συγκριτικά συμπεράσματα για τα 5 είδη συγκολλήσεων δια τριβής

Από τη σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών συγκόλλησης δια τριβής [9], η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής έχει τον εγγενή περιορισμό ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μη κυκλικές διατομές των προς συγκόλληση τεμαχίων. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα είναι ότι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας δεν είναι ομοιόμορφος στη διεπιφάνεια. Αυτή η μη ομοιόμορφη εισαγωγή θερμότητας προκαλεί ανομοιομορφία στο πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ). Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να αποφευχθούν χρησιμοποιώντας γραμμική ή τροχιακή συγκόλληση τριβής. Οι δύο μέθοδοι μπορούν να συγκολλήσουν μη κυκλικής διατομής τεμάχια και η ενέργεια στην διεπιφάνεια παράγεται σχεδόν ομοιόμορφα. Η παραγωγή θερμότητας στη διεπιφάνεια, λόγω τριβής, είναι ακόμα πιο ομοιόμορφη στην τροχιακή σε σχέση με τη γραμμική συγκόλληση διά τριβής. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ομοιόμορφη μονοκατευθυντική σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο τεμαχίων σε ολόκληρη τη διεπιφάνεια. Η ομοιόμορφη παραγωγή τριβής που υπάρχει στην τροχιακή συγκόλληση δια τριβής μπορεί να συνεισφέρει στην υψηλότερη ποιότητα των συγκολλήσεων διά τριβής.

## 2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ FSW ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΩΝ

Τα πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση [21] συνοψίζονται στη συνέχεια:

- α. Ως αυτοματοποιημένη διαδικασία η FSW δεν απαιτεί εξειδικευμένες δεξιότητες συγκόλλησης. Για την ακρίβεια η χειροκίνητη παρέμβαση σπανίως απαιτείται.

- β. Φιλική προς το περιβάλλον εφόσον δεν υπάρχει υπερϊώδης ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω της απουσίας ηλεκτρικού τόξου από τη διεργασία. Ουσιαστικά οι συγκολλήσεις FSW παράγουν ουσιαστικά μηδενικά αέρια και άλλους ρύπους
- γ. Δεν απαιτείται αέριο προστασίας ή ηλεκτρόδιο πλήρωσης για τα κράματα αλουμινίου.
- δ. Η απουσία τήξης απομακρύνει 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
- ε. 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).
- στ. Η διαδικασία είναι 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 εφόσον δεν υπάρχει προσθήκη υλικού πλήρωσης
- ζ. Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, συγκρίσιμες με τις βέλτιστες τιμές άλλων συγκολλήσεων
- η. 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

Ωστόσο πολλά από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν μπορούν αρκετές φορές να αντιμετωπιστούν και ως μειονεκτήματα ανάλογα τις συνθήκες και τις απαιτήσεις της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα:

- α. Η μηχανοποιημένη φύση της συγκόλλησης εμποδίζει τη χρήση της σε εφαρμογές όπου η πρόσβαση ή η πολύπλοκη γεωμετρία της συγκόλλησης απαιτούν χειροκίνητη διεργασία.
- β. Η διαδικασία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για τη συγκόλληση τεμαχίων που βρίσκονται σε σχετική γωνία μεταξύ τους (fillet welds) λόγω της απουσίας υλικού πλήρωσης.
- γ. Δύο βασικά μειονεκτήματα αποτελούν: η παρουσία οπής στο άκρο της συγκόλλησης από την οποία αποσύρθηκε το εργαλείο συγκόλλησης καθώς και η εξώθηση υλικού (πλευρικό φλας)
- δ. Το πλευρικό φλάς μπορεί επίσης να αποτελέσει αιτία μείωσης του πάχους της ραφής συγκόλλησης υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα της.
- ε. Σε κράματα υψηλής αντοχής (π.χ. κράματα τιτανίου, χάλυβες υψηλής αντοχής) το κόστος του εργαλείου συγκόλλησης, το οποίο θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο από καρβίδιο, καθώς και ο ρυθμός φθοράς αυτού είναι υψηλός.

## 2.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW).

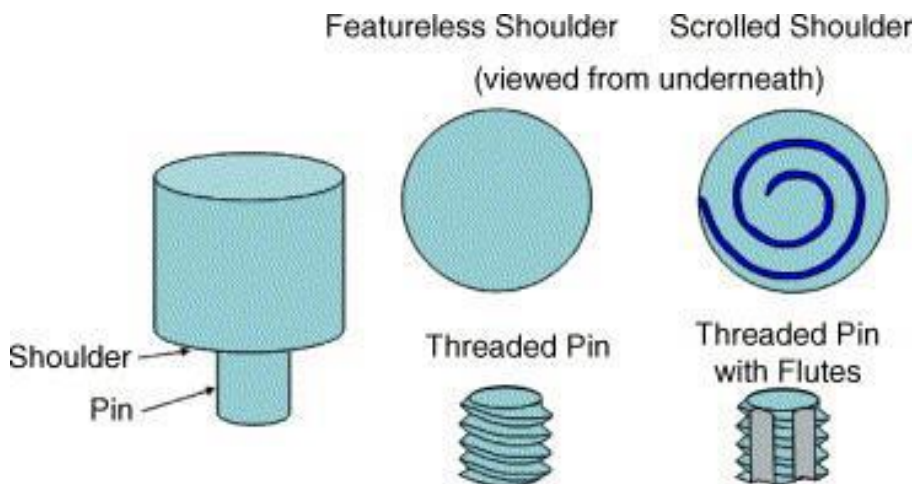
Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα, τη μικροδομή και τη μηχανική αντοχή των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση είναι οι ακόλουθες:

1. Γεωμετρία του εργαλείου
2. Βάθος διείσδυσης, γωνία κλίσης και δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο εργαλείο συγκόλλησης
3. Ταχύτητα Περιστροφής
4. Ταχύτητα Πρόωσης

Οι παράμετροι αυτοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη θερμότητας, στην ανάπτυξη των τάσεων και κατά συνέπεια στην ανάπτυξη όλων των καθοριστικών μεταλλουργικών μηχανισμών. Ακόμη, πολύ σημαντική είναι η επίδρασή τους στη ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση, κυρίως στην περίπτωση ανόμοιων κραμάτων.

### 2.5.1 Γεωμετρία Εργαλείου

Ο σημαντικότερος παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή στη διεργασία της συγκόλλησης είναι η γεωμετρία του εργαλείου. Η γεωμετρία του εργαλείου έχει καθοριστικό ρόλο στη ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση καθώς επηρεάζει την ταχύτητα μετατόπισης με την οποία πραγματοποιείται μια συγκόλληση FSW [22]. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.12 το εργαλείο αποτελείται από ένα περιαιχένιο και έναν πείρο.



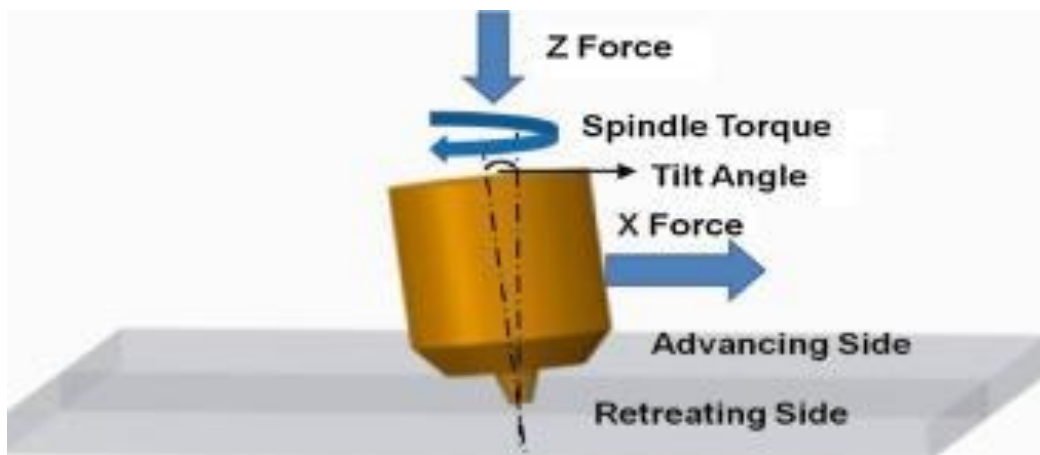
Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιείται κατά τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW)  
Πηγή: [22]

Οι δύο κύριες λειτουργίες του εργαλείου είναι : 1) τοπική πρόσδοση θερμότητας και 2) ανάδευση του υλικού [22]. Στο πρώτο στάδιο βύθισης του εργαλείου, η θερμότητα προκύπτει από την τριβή μεταξύ του πείρου και του τεμαχίου προς συγκόλληση. Μια μικρή ποσότητα θερμότητας προστίθεται λόγω

παραμόρφωσης. Όπως προαναφέραμε το εργαλείο βυθίζεται μέχρι το περιουχένιο να αγγίξει τα προς συγκόλληση τεμάχια. Το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμότητας οφείλεται στη τριβή μεταξύ του ώμου και των ελασμάτων προς συγκόλληση. Από τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά του εργαλείου αναφορικά με την θερμική παροχή αποτελούν το μέγεθος του πείρου και του περιουχενίου. Το περιουχένιο καθορίζει κυρίως τον θερμαινόμενο όγκο του υλικού. Η ομοιομορφία της μικροδομής και των ιδιοτήτων καθώς και τα αξονικά φορτία κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης καθορίζονται από τη σχεδίαση του εργαλείου. 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.

### 2.5.2 Βάθος διείσδυσης, γωνία κλίσης και δυνάμεις που ασκούνται επάνω στο εργαλείο συγκόλλησης

Κατά την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, στη διεπαφή του εργαλείου συγκόλλησης με τα προς συγκόλληση τεμάχια αναπτύσσονται δυο δυνάμεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13. Στο εργαλείο ασκείται μια κατακόρυφη αξονική δύναμη Z καθώς διεισδύει στο τεμάχιο προς συγκόλληση και μια οριζόντια αξονική δύναμη X, γνωστή και ως δύναμη συγκόλλησης, καθώς μετατοπίζεται το εργαλείο κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης λόγω της αντίστασης του υλικού στη ροή. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η επαρκής κατακόρυφη δύναμη Z καθώς προάγει την παραγωγή θερμότητας και την ικανοποιητική ροή του πλαστικοποιημένου υλικού στο πίσω μέρος του εργαλείου. Εξίσου σημαντικό παράγοντα στη ροή του υλικού αποτελεί η κλίση του εργαλείου σε σχέση με τα τεμάχια προς συγκόλληση. Μια ελαφριά κλίση της τάξης των  $2^{\circ}$ - $3^{\circ}$  είναι αρκετή για να εξασφαλίσουμε ότι το περιουχένιο μεταφέρει το πλαστικοποιημένο υλικό αποδοτικά από το εμπρός προς το πίσω μέρος του πείρου (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) με κλίση του άξονα του εργαλείου προς τα πίσω. Πηγή: [23]

Ο Α. Banik [23], ανέλυσε την επίδραση της γωνίας κλίσης με δύο διαφορετικές γεωμετρικές εργαλείων συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι με την αύξηση της γωνίας κλίσης, αυξάνεται η ροπή καθώς και οι δυνάμεις που παράγονται στη διεπαφή εργαλείου-τεμαχίου προς συγκόλληση. Σε γωνία κλίσης 0° παρατηρήθηκε ομαλή κατανομή των ροπών και των δυνάμεων. Ωστόσο η δύναμη Z αυξάνεται με την κλίση λόγω του αυξημένου βάθους βύθισης.

Βασικό παράγοντα στην πραγματοποίηση συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας, όπως αποδεικνύεται από τα παραπάνω αποτελεί και το βάθος διείσδυσης του πείρου στο υλικό. Ως βάθος διείσδυσης ορίζεται η απόσταση του χαμηλότερου σημείου το πείρου από την ανώτερη επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων. Σε πολύ μικρά βάθη διείσδυσης, το περιουχένιο δεν βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του τεμαχίου και δεν μπορεί να συνεισφέρει ούτε θερμικά ούτε κινητικά αλλά ούτε και στον περιορισμό του υλικού στη ζώνη ανάδευσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποτελέσει συχνά αιτία δημιουργίας σημαντικών ελαττωμάτων όπως πορώδες. Αντίθετα όταν το βάθος διείσδυσης είναι αρκετά μεγάλο το περιουχένιο διεισδύει σε τέτοιο βαθμό εντός του τεμαχίου που παρατηρείται η δημιουργία γρεζιού (flash). Στην περίπτωση αυτή οδηγούμαστε σε εκλέπτυνση των τεμαχίων προς συγκόλληση γύρω από την ζώνη ανάδευσης.

### 2.5.3 Ταχύτητα Περιστροφής

Ακόμη μια σημαντική παράμετρος η ταχύτητα περιστροφής. Έχει βασικό ρόλο στη ροή του υλικού αλλά και στην παραγωγή θερμότητας, επηρεάζοντας έτσι όχι μόνο την μικροδομή αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Σύμφωνα με τον K.Elangovan [24] όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία που προκύπτει αλλά και βραδύτερος ο ρυθμός ψύξης στο πυρήνα μετά το πέρας της συγκόλλησης. Καταλήγει επίσης, ότι υψηλότερες τιμές στην ταχύτητα περιστροφής έχουν την τάση να προκαλούν έντονη ανάδευση των υλικών στην ανώτερη επιφάνεια, η οποία μπορεί να δημιουργήσει ελαττώματα στον πυρήνα της συγκόλλησης. Ωστόσο μικρότερες τιμές οδηγούν σε χαμηλότερη παροχή θερμότητας με αποτέλεσμα μη ικανοποιητική ανάδευση των υλικών. Επίσης με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής μειώνεται και η έκταση του πυρήνα επηρεάζοντας έτσι και την θερμοκρασιακή κατανομή στην περιοχή. Αυτό πολλές φορές σημαίνει ότι επηρεάζεται και το σημείο θραύσης της συγκόλλησης από την ταχύτητα περιστροφής [25]. Σε χαμηλές τιμές ταχύτητας περιστροφής για μια συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης οι ιδιότητες εφελκυσμού εμφάνισαν χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Κατά την αύξηση της ταχύτητάς περιστροφής η επιμήκυνση βελτιώθηκε και η αντοχή αυξήθηκε φτάνοντας σε μέγιστο βαθμό. 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.



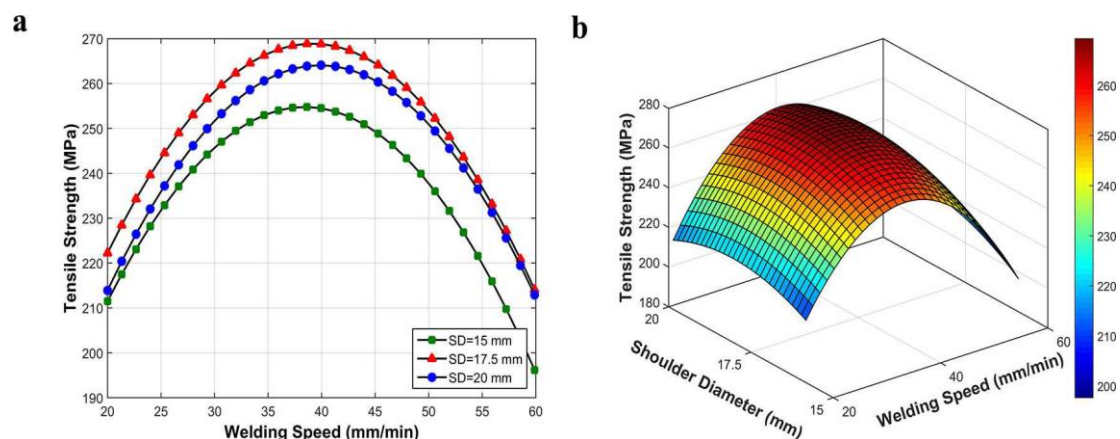
Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντελεστής τριβής μειώνεται όταν επικρατεί τοπική τήξη του υλικού αλλά και στο ότι σε μεγαλύτερες παροχές θερμότητας υπάρχουν και μεγαλύτερες απώλειες .

Τέλος σε περιπτώσεις πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής του εργαλείου τα σωματίδια δευτερευουσών φάσεων θα διαλυτοποιηθούν περισσότερο στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ). Όσο μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής τόσο χαμηλότερη γίνεται και η θερμοκρασία στον πυρήνα της συγκόλλησης με αποτέλεσμα το κλάσμα όγκου των χονδρομερών σωματιδίων της δεύτερης φάσης να αυξάνεται σημαντικά. Έτσι η βελτιστοποίηση της ταχύτητας περιστροφής είναι κρίσιμης σημασίας ώστε να δημιουργηθούν λεπτά σωματίδια δευτερευουσών φάσεων ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μήτρα.

#### 2.5.4 Ταχύτητα Πρόωσης

Εκτός από την περιστροφική κίνηση του εργαλείου η διαδικασία της συγκόλλησης περιλαμβάνει και την πρόωση αυτού η οποία κινεί το αναδυόμενο υλικό από το μέτωπο της συγκόλλησης προς το πίσω μέρος του πείρου. Έτσι ακόμη μια σημαντική παράμετρο αποτελεί η ταχύτητα πρόωσης που με την σειρά της επηρεάζει καθοριστικά την θερμική παροχή και συνεπώς την μικροδομή, τις μηχανικές ιδιότητες και συνεπώς την γενικότερη ποιότητα της συγκόλλησης.

Ο R. Padmanaban [26] και οι συνεργάτες του προσπάθησαν να προσδιορίσουν την επίδραση της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής στην αντοχή σε εφελκυσμό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 14 σε περιπτώσεις υπό σταθερή διάμετρο του περιαιχενίου η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης από χαμηλές σε μεσαίες τιμές προκαλεί σημαντική αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό. Οι υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες εμφανίζονται σε μεσαίες τιμές ταχυτήτων ενώ σε πολύ υψηλές καθώς και πολύ τιμές ταχυτήτων πρόωσης υπάρχει έντονη εμφάνιση ελαττωμάτων.

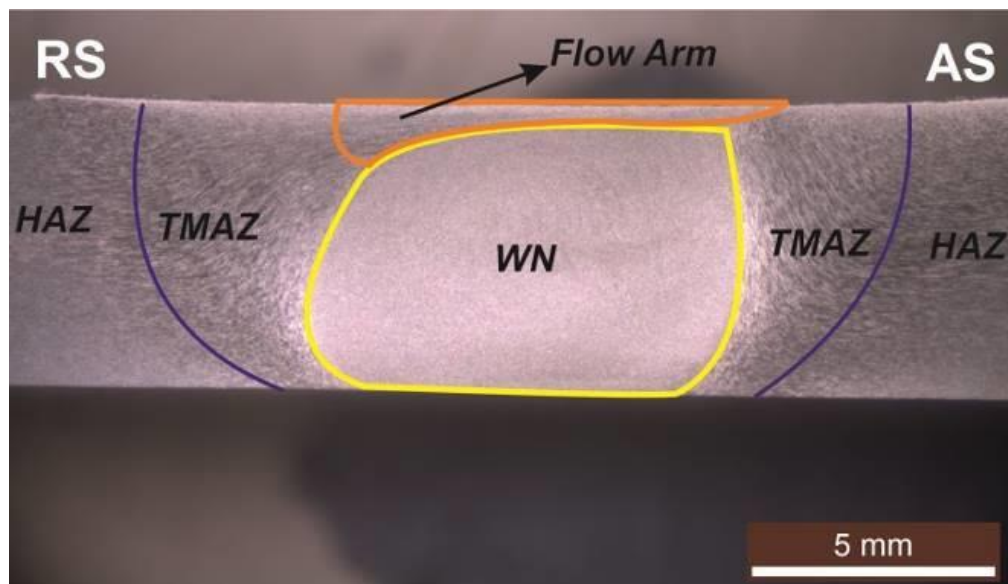


Εικόνα 14: Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στην αντοχή σε εφελκυσμό συναρτήσει της διάμετρου του περιαιχηνίου.

Πηγή: [26]

## 2.6 ΖΩΝΕΣ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ

Ενός τέτοιου είδους στερεάς κατάστασης συγκόλληση που διαφέρει ως προς το μηχανισμό ένωσης των δυο υλικών σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης οδηγεί σε μια χαρακτηριστική μικροδομή [27]. Η μικροδομή αυτή αποτελείται από 5 ζώνες συγκόλλησης όπως φαίνονται και στην εικόνα.



Εικόνα 15: Ζώνες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) συγκολλημένου κράματος AA6082-T6 Πηγή:[27].

1. **Πυρήνας συγκόλλησης ή Ζώνη ανάδευσης (weld nugget, WN, stir zone, SZ):** Αποτελεί το κέντρο της συγκόλλησης, δηλαδή, το σημείο που εισχωρεί ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πείρου, του περιαιχηνίου, η κλίση του εργαλείου, το

βήμα της συγκόλλησης είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν την μορφολογία αυτής της ζώνης. Σε περιπτώσεις συγκόλλησης ανόμοιων κραμάτων καθοριστικό ρόλο παίζει και η πλευρά τοποθέτησης των ελασμάτων. Σε αυτή τη ζώνη παρουσιάζονται φαινόμενα δυναμικής ανακρυστάλλωσης των κόκκων χάριν την υψηλής θερμότητας λόγω τριβής και της πλαστικής παραμόρφωσης στην οποία υπόκεινται. Συνήθως αποτελείται από πολύ μικρού μεγέθους ισοαξονικούς κόκκους. Ωστόσο το μέγεθος των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης είναι εμφανώς μικρότερο από αυτό του μητρικού υλικού. Χαρακτηριστικό αυτής της ζώνης είναι η δημιουργία κάποιων «Δακτυλοειδών Μικροδομών» (onion rings). Ωστόσο αυτή η μικροδομή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της διαδικασίας (που καθορίζουν την ροή του υλικού) που σημαίνει ότι μπορεί να μην είναι τόσο ευκολά διακριτές.[28]

2. **Το “Flow arm”**: Αποτελεί την περιοχή στο πάνω μέρος της ζώνης ανάδευσης της συγκόλλησης. Είναι μια θερμομηχανικά επηρεασμένη περιοχή στην οποία οι κόκκοι είναι έντονα παραμορφωμένοι. Η δημιουργία αυτής της περιοχής οφείλεται στη μεταφερόμενη ροή του υλικού από την υποχωρούσα (retreating) προς την προωθούμενη πλευρά (advancing). Όπως και η εμφάνιση των onion rings στην WN έτσι και το “Flow arm” δεν είναι πάντα διακριτό καθώς εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.
3. **Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (thermo-mechanically affected zone, THAZ)**: Η πρώτη ζώνη που συναντάμε καθώς κινούμαστε από το κέντρο της ζώνης ανάδευσης προς τα έξω είναι η ΘΜΕΖ-ΤΜΑΖ. Η ονομασία αυτή έχει προκύψει από τα έντονα θερμικά και μηχανικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε αυτή. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της περιοχής αποτελούν οι ασκούμενες πλαστικές μηχανικές παραμορφώσεις. Το υλικό στη ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από κόκκους έντονα επιμηκυμένους γύρω από τη ζώνη ανάδευσης. Βέβαια το υλικό αυτής της ζώνης διαφέρει μορφολογικά από το υλικό στη ζώνη ανάδευσης. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά φαινόμενα ανακρυστάλλωσης που παρατηρούνται στις δυο ζώνες [29]. Και σε αυτή τη περιοχή έχει καθοριστικό ρόλο το σχήμα και το μέγεθος του περιαιχενίου.
4. **Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat-affected zone, HAZ)**: Αυτή η ζώνη είναι χαρακτηριστική σε πολλές μεθόδους συγκόλλησης. Ωστόσο κατά την FSW εμφανίζει πολύ καλύτερες ιδιότητες λόγω των χαμηλών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Στη περιοχή αυτή οι παραμορφώσεις εξαλείφονται και το υλικό επηρεάζεται μόνο θερμικά από το εργαλείο της συγκόλλησης, προκαλώντας έτσι μόνο μια μικρή εξομάλυνση στα όρια των κόκκων.
5. **Το μητρικό υλικό ή μέταλλο βάσης (parent material ή base metal)**: Αποτελείται από το ανεπηρέαστο υλικό και παρατηρείται σε όλες τις συγκολλήσεις.

## 2.7 ΡΟΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ FSW

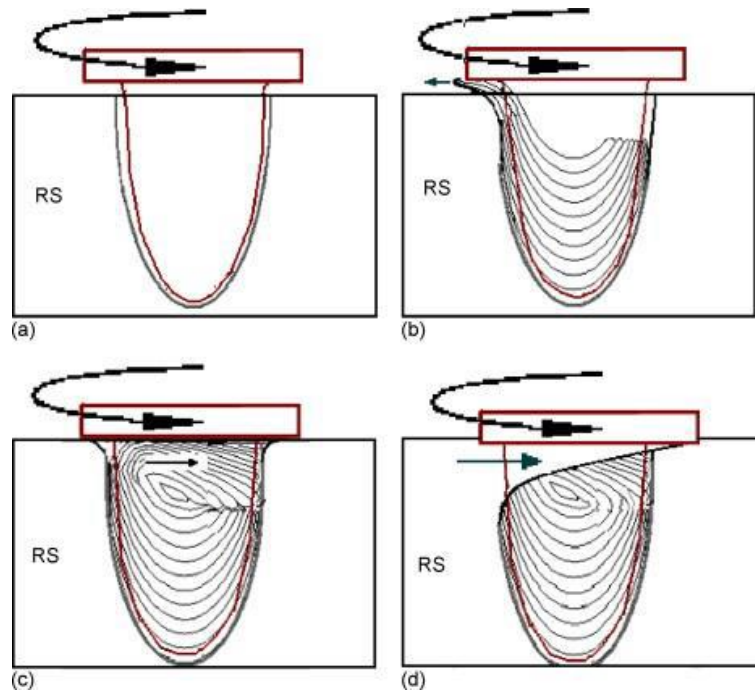
Όπως προαναφέρθηκε, στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) η πλευρά στην οποία η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου είναι ομόρροπη με την ταχύτητα πρόωσης ονομάζεται προωθούμενη (advancing side), ενώ η πλευρά όπου αυτές οι ταχύτητες είναι αντίρροπες ονομάζεται υποχωρούσα πλευρά (retreating side).

Ιδιαίτερής σημασίας σε αυτού του είδους στερεάς κατάστασης συγκόλληση είναι η ροή του υλικού. Στην περίπτωση της FSW η ροή του υλικού εξαρτάται από τρεις παραμέτρους:

- I. ροή η οποία προκαλείται από το περιαυχένιο (shoulder-driven flow) και κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατ' όγκο.
- II. ροή η οποία προκαλείται από το πείρο (pin-driven flow), κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά στρώματα
- III. ροή η οποία προκαλείται από τη σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου

Η ροή του υλικού που οφείλεται στον πείρο πραγματοποιείται κατά την αλληλεπίδραση του μετάλλου βάσης με τον πείρο του εργαλείου συγκόλλησης. Κατά την βύθιση του πείρου δημιουργείται μια κοιλότητα, το σχήμα της οποίας παίρνει τη μορφή του εξωτερικού προφίλ του πείρου. Μέσω της κίνησης του εργαλείου, το υλικό στην μπροστινή ακμή ρέει προς την πίσω ακμή μέσω της υποχωρούσας πλευράς (RS). Αν η αντίσταση στη ροή υλικού μεταξύ του εργαλείου και του σχετικά πιο ψυχρού μετάλλου βάσης είναι υψηλή, το υλικό θα προσπαθήσει να διαφύγει έξω από την κοιλότητα συγκόλλησης αντί να φθάσει στην προωθούμενη πλευρά. Η αντίσταση στην ροή του υλικού στην πλευρά που υποχωρεί εξαρτάται από το πλάτος του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο και από τον όγκο του υλικού που μεταφέρεται ανά περιστροφή [28].

Το περιαυχένιο του εργαλείου όπως έχουμε προαναφέρει είναι υπεύθυνο για την κίνηση της ροής του υλικού από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά. Κατά την ολίσθηση του περιαυχενίου πάνω από το υλικό αλλά και λόγω της αντίστασης του υλικού στην μετακίνηση από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά το υλικό ρέει προς τα επάνω. Αυτή η ανοδική κίνηση προκαλεί πλευρική εξώθηση του υλικού στην επιφάνεια της συγκόλλησης (πλευρικό φλας), (Εικόνα 16(b)). Καθώς η αλληλεπίδραση μεταξύ του υλικού που διαφεύγει και του περιαυχενίου αυξάνεται, το υλικό τελικά εκτρέπεται στην οπίσθια πλευρά του πείρου (Εικόνα 16 (c),(d)).



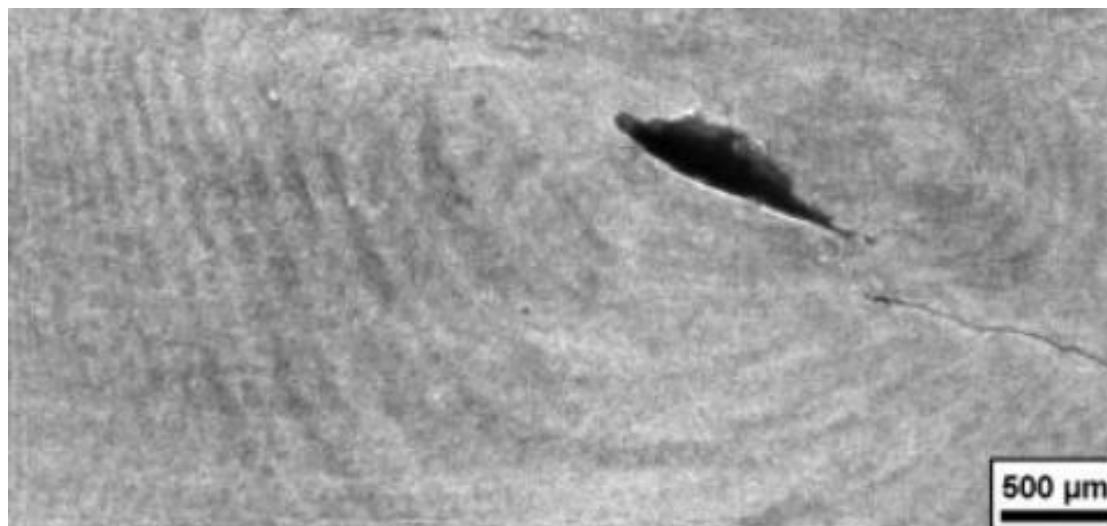
Εικόνα 16: Σχηματική παρουσίαση της ροής του υλικού κατά τις συγκολλήσεις FSW. (a) Δημιουργία της κοιλότητας συγκόλλησης κατά την είσοδο του πείρου (b) Ροή υλικού οφειλόμενη αποκλειστικά στη κίνηση του πείρου του εργαλείου, (c) Ροή οφειλόμενη στην αλληλεπίδραση πείρου και περιαυχενίου συγκόλλησης, (d) Τελικά μορφολογία των κόκκων του υλικού στο πυρήνα συγκόλλησης.

Από το παραπάνω εύλογα προκύπτει ότι η ροή του υλικού καθορίζεται από την αποτελεσματικότητα του πείρου να μεταφέρει την απαραίτητη ποσότητα πλαστικοποιημένου υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης. Έτσι η γεωμετρία του πείρου έχει σημαντικό ρόλο στην ποσότητα αυτή. Η ροή του υλικού εξαρτάται επίσης από την αποτελεσματικότητα του περιαυχενίου να διατηρήσει το υλικό στην περιοχή της συγκόλλησης. Έτσι ο σχεδιασμός του περιαυχενίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μην αποτρέπει την εξώθηση μεγάλου ποσοστού του υλικού αλλά να το επιστρέφει εντός των ορίων της επιφάνειας συγκόλλησης.

### 2.7.1 Δημιουργία Onion rings κατά τις συγκολλήσεις FSW

Η χαρακτηριστική δομή των «onion rings» κατά τις συγκολλήσεις FSW φαίνονται στην εικόνα 17. Κατά την ροή του υλικού από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά το υλικό διατηρεί τη χαρακτηριστική μορφολογία των στρωμάτων χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η δομή τους. Όσο αυξάνεται η αλληλεπίδραση του υλικού με το περιαυχένιο, τόσο οι ροές που οφείλονται στον πείρο και οι ροές που οφείλονται στο περιαυχένιο συγχωνεύονται και τα στρώματα ενώνονται μεταξύ τους. Ο σχηματισμός λοιπόν αυτών των μικροδομών οφείλεται σε αυτή την συγχώνευση. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτών των μικροδομών είναι πως το κατώτερο μέρος της δομής οφείλεται στην στοίβαξη των στρωμάτων λόγω της περιστροφικής κίνησης του πείρου ενώ το

ανώτερο τμήμα οφείλεται στο υλικό το οποίο πήγε να εξωθηθεί και το περιουχένιο το ώθησε ξανά πίσω στην περιοχή της συγκόλλησης. Με αυτόν το τρόπο δημιουργείται μια κυκλική ροή στο υλικό στην οποία οφείλεται και η μορφολογία των δακτυλίων στην περιοχή αυτή. Βέβαια σημαντική προϋπόθεση για την εμφάνιση μικροδομών οπιοη rings αποτελεί η ύπαρξη σπειρώματος στον πείρο που φέρει το εργαλείο. Σε κάθε άλλη περίπτωση το φαινόμενο είναι σπάνιο να συναντηθεί.

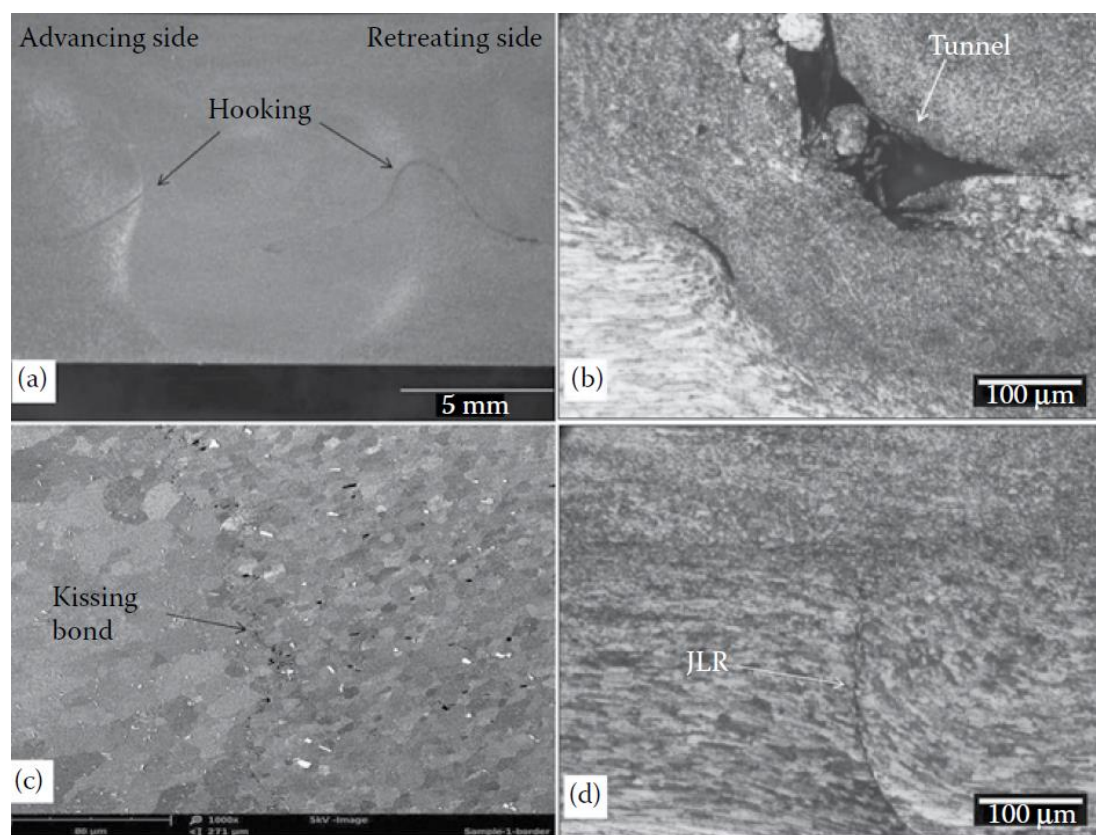


Εικόνα 17: Χαρακτηριστική δομή δακτυλίου κρεμμυδιού (onion ring).  
Πηγή: [28]

### 2.7.2 Χαρακτηριστικές ατέλειες των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση

Η ακατάλληλη επιλογή των παραμέτρων στη διαδικασία των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό ατελειών που καθορίζουν την τελική ποιότητα της συγκόλλησης. Το ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας επηρεάζει καθοριστικά τον σχηματισμό αυτών των ατελειών. Σε συνθήκες υψηλής θερμικής παροχής παρατηρείται γενικότερα αύξηση στο μέγεθος των κόκκων, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη μείωση της αντοχής [32]. Αντίθετα σε συνθήκες χαμηλής θερμικής παροχής, πραγματοποιείται ανεπαρκής ανόπτηση του υλικού προς συγκόλληση οδηγώντας με την σειρά του σε αναποτελεσματική σταθεροποίηση και ανεπαρκή ανάμιξη των υλικών. Συνεπώς κάποιες ατέλειες όπως επιφανειακές ρωγμές, πλευρικό φλάς κ.λπ. οφείλονται σε υψηλές θερμικές παροχές ενώ ατέλειες όπως τύπου τούνελ, kissing bond, hooking και το υπόλειμμα της γραμμής συγκόλλησης δημιουργούνται από χαμηλές θερμικές παροχές. Έτσι η επιλογή των παραμέτρων και η επίδραση που έχουν στην θερμική παροχή είναι κρίσιμης σημασίας για την παραγωγή συγκολλήσεων άνευ ατελειών. Στις συγκολλήσεις FSW συναντάται μια ποικιλία ατελειών που επηρεάζουν

καθοριστικά την ποιότητα της συγκόλλησης οι περισσότερες από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 18: Ατέλειες στις συγκολλήσεις FSW : (a) Τύπου hooking, (b) Τύπου τούνελ, (c) Τύπου kissing bond, (d) Υπόλειμμα γραμμής.  
Πηγή[32]

#### ➤ Ατέλεια τύπου hooking

Αυτού του τύπου η ατέλεια παρατηρείται αρκετά συχνά στις συγκολλήσεις με FSW και κυρίως σε μετωπικές συγκολλήσεις (lap joints). Γενικά παρατηρείται στην TMAZ από τη μεριά της προωθούμενης πλευράς, καθώς το υλικό υπόκεινται σε μια κίνηση ανοδικής εξώθησης όπως αναφέραμε. Το υλικό της υποχωρούσας πλευράς καθώς κινείται προς την προωθούμενη υφίσταται καθοδική σφυρηλάτηση από την κίνηση της κεφαλής με το σπείρωμα. Ο συνδυασμός της εξώθησης και της σφυρηλάτησης αυτής επηρεάζεται σημαντικά από την κλήση του πείρου και το βάθος διείδυσης. Η ακατάλληλη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων οδηγεί σε ανεπαρκή σφυρηλάτηση του εξωθούμενου υλικού δημιουργώντας ατέλειες τύπου hooking όπως φαίνεται και στην εικόνα 18a .

#### ➤ Ατέλεια τύπου τούνελ

Αυτού του είδους οι ατέλειες είναι αρκετά κοινές όταν πρόκειται για FSW σε κράματα αλουμινίου και έχουν καθοριστική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Συνήθως δεν είναι ευδιάκριτη στην επιφάνεια της

συγκόλλησης, αλλά εμφανίζεται κυρίως στο εσωτερικό της συγκόλλησης και πιο συχνά στην προωθούμενη πλευρά στα όρια μεταξύ της ζώνης ανάδευσης (SZ) και της θερμομηχανικά επηρεαζόμενης ζώνης (TMAZ)(Εικόνα 18b). Όπως οι περισσότερες ατέλειες έτσι και οι τύπου τούνελ δημιουργούνται εξαιτίας της επιλογής ακατάλληλων παραμέτρων, όπως οι ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης, η κάθετη δύναμη αλλά και το σχήμα του πείρου.

Ακόμη ένας παράγοντας που συμβάλει στην εμφάνιση αυτών των ατελειών μπορεί να είναι και η χαμηλή θερμική παροχή [33]. Η χαμηλή θερμική παροχή μπορεί να οδηγήσει σε μη ικανοποιητική μετακίνηση του υλικού γύρω από τον πείρο το οποίο εμποδίζει την ενοποίηση των υλικών πίσω από τον πείρο αφήνοντας πίσω ένα τούνελ.

➤ Ατέλεια τύπου kissing bond

Η συγκεκριμένη χαρακτηρίζεται ως ατέλεια στερεάς κατάστασης, η οποία δημιουργείται ως αποτέλεσμα μη ικανοποιητικής πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες κακής ανάμιξης του υλικού. Επίσης σε συνθήκες όπου το στρώμα του οξειδίου δεν έχει αφαιρεθεί σωστά πριν από την συγκόλληση θα εκδηλωθεί kissing bond στην διεπιφάνεια της συγκόλλησης.

Εκτός αυτού, η έλλειψη εναπόθεσης υλικού λόγω χαμηλής θερμικής παροχής και οι υψηλές ροϊκές τάσεις μπορούν επίσης να οδηγήσουν στον σχηματισμό kissing bond [34]. Η ύπαρξη αυτής της ατέλειας εμποδίζει σημαντικά των δεσμό μεταξύ των επιφανειών των μετάλλων βάσης προκαλώντας χαμηλής ποιότητας συγκόλληση. Ο Zhou στην έρευνά του [35], αναφέρει πως οι ατέλειες τύπου “Kissing bond” μπορούν να μειώσουν 20-40 φορές την αντοχή σε κόπωση των συγκολλήσεων του αλουμινίου 5083 και 30-80 φορές αντίστοιχα στις συγκολλήσεις των αλουμινίων 2024.

Για να εξαιρεθεί αυτό το φαινόμενο απαιτείται πλήρης ανάμιξη κατά τη συγκόλληση παρέχοντας κίνηση του υλικού γύρω από τον πείρο που θα σπάσει και θα διανείμει το στρώμα οξειδίου στην επικείμενη επιφάνεια του μετάλλου βάσης.

➤ Υπόλειμμα γραμμής

Το ανεπαρκές βύθισμα του εργαλείου ή το ανεπαρκές μήκος του πείρου ή και τα δύο μπορεί να προκαλέσουν ένα μικρό τμήμα της ρίζας της συγκόλλησης να παραμείνει μη στερεοποιημένο, το οποίο εκδηλώνεται ως μια ατελής διεϊσδυση στη ρίζα (Εικόνα 1.18d). Αυτή η ατέλεια μπορεί επίσης να δημιουργηθεί από μικρές ανωμαλίες και διαφοροποιήσεις στο πάχος των πλακών προς συγκόλληση. Για την εξάλειψη αυτής της ατέλειας απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ικανοποιητική ανάμιξη σε όλη τη ρίζα της συγκόλλησης, γεγονός που εξασφαλίζεται με τα κατάλληλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πείρου αλλά και το κατάλληλο βάθος διεϊσδυσης.

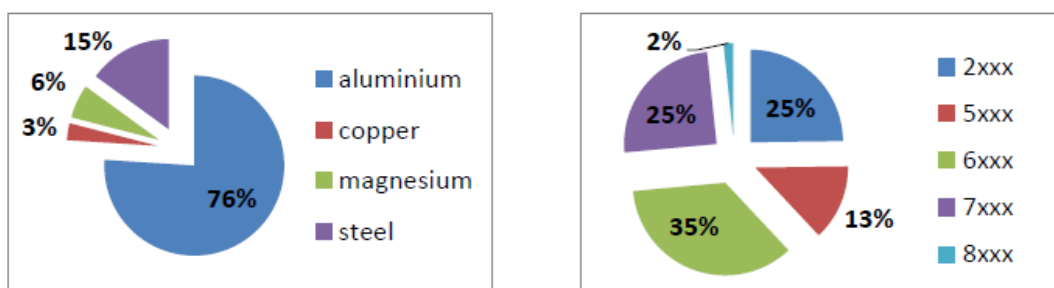


## 2.8 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) ΜΕΤΑΞΥ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

### 2.8.1 Εφαρμογές

Οι εμπορικές εφαρμογές της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) έχουν αναφερθεί σε πολλές βιομηχανίες. Παρακάτω αναφέρονται κάποια παραδείγματα που απεικονίζουν την ευρύτερη εφαρμογή της διαδικασίας. Τα παραδείγματα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά αλλά θα πρέπει να τονιστεί ότι νέες εφαρμογές εμφανίζονται συνεχώς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η FSW δεν προσδίδει επιπλέον περιορισμούς στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των παραγόμενων προϊόντων, με εφαρμογές που κυμαίνονται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (όπως το υγρό οξυγόνο και υγρό άζωτο στις δεξαμενές καυσίμων πυραύλων) έως ελαφρώς αυξημένες θερμοκρασίες (όπως εναλλάκτες θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης). Οι περισσότερες συγκολλήσεις FSW που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι μετωπικές, αν και οι συγκολλήσεις επικάλυψης καθώς και οι σημειακές συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση εφαρμόζονται επίσης με αυξημένη συχνότητα.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.19, η πλειοψηφία των ερευνών αφορά τα κράματα του αλουμινίου και κατ' επέκταση, τα κράματα του αλουμινίου έχουν λάβει το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών.



Εικόνα 19: Συγκριτική αποτίμηση δημοσιευμένων ερευνών ως προς το είδος των υλικών της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση.

Πηγή: [55]

#### ➤ Ναυπηγική Βιομηχανία

Πιστεύεται ότι η πρώτη βιομηχανική εφαρμογή της FSW ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου για τη συνένωση των υπερκατασκευών με το κύριο κατάστρωμα σε πλοία υψηλών ταχυτήτων κατασκευασμένα από αλουμίνιο καθώς και σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια κατασκευασμένα από χάλυβα τα οποία φέρουν υπερκατασκευές αλουμινίου για μείωση βάρους. Σε τέτοιες εφαρμογές τα συγκολλημένα με FSW πάνελ είναι πολύ επίπεδα λόγω του χαμηλού βαθμού παραμόρφωσης με αποτέλεσμα να κόβονται και να συγκολλώνται μεγαλύτερου μεγέθους κατασκευαστικά μέρη. Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στις αλουμινένιες υπερκατασκευές κρουαζιερόπλοιων, όπως το "Seven Seas Navigator". Επίσης, το μεγαλύτερο, κατασκευασμένο από αλουμίνιο, σκάφος του κόσμου, το επιβατηγό-οχηματαγωγό "Ogasawar", ναυπηγήθηκε το 2004 και έκανε εκτεταμένη χρήση της συγκόλλησης FSW στις υπερκατασκευές του.

➤ Αεροδιαστημική και Αεροναυπηγική Βιομηχανία

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία η εφαρμογή αυτής της μεθόδου συγκόλλησης έχει αναφερθεί ότι παρέχει πιο αποτελεσματικές συγκολλήσεις σε σχέση με άλλες μεθόδους από 40% έως και 50% και μειώνει τον χρόνο παραγωγής από 23 σε 6 ημέρες μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος κατασκευής έως και κατά 60% [36]. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση δεξαμενών καυσίμου σε διαστημικούς πυραύλους και λεωφορεία [37]. Στην αεροναυπηγική βιομηχανία η συγκόλληση FSW έχει χρησιμοποιηθεί για την ένωση δομικών τμημάτων της ατράκτου, πτερυγών, δαπέδων αλλά και δεξαμενών καυσίμου. Επιπλέον, προσπάθειες καταβάλλονται ώστε η μέθοδος αυτή να αντικαταστήσει τις συνδέσεις ηλώσεων εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο μείωση στο συνολικό βάρος του αεροσκάφους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πολιτικό αεροσκάφος «Eclipse» όπου η συγκόλληση τριβής με ανάδευση αντικατέστησε το 60% των ηλώσεων.

➤ Σιδηροδρομική Βιομηχανία

Στην σιδηροδρομική βιομηχανία η μέθοδος χρησιμοποιείται σε διάφορα τμήματα της ατράκτου των βαγονιών, σε κοντέινερ και σε βαγόνια μεταφοράς καυσίμου. Ακόμα, δεδομένου ότι οι συγκολλήσεις που ενώνουν τα δομικά μέρη ενός τρένου είναι μεγάλες (περισσότερο από 25 m) και σε ευθεία, η FSW είναι η πλέον ιδανική διεργασία, με το πολύ μικρό ποσοστό παραμόρφωσης να αποτελεί το σημαντικότερο όφελος.

➤ Αυτοκινητοβιομηχανία

Στα περισσότερα οδικά οχήματα υπάρχουν μικρού μήκους συγκολλήσεις, γεγονός που περιορίζει αρκετά την χρήση της μεθόδου FSW σε εξαρτήματα αναρτήσεων, σε τροχούς, στα παρελκόμενα των καθισμάτων κ.λπ. Για να μπορέσει η μέθοδος να ανταπεξέλθει στις πολύπλοκες γεωμετρίες και στις απαιτήσεις της αγοράς για υψηλή παραγωγή με χαμηλό κόστος οδηγήθηκε στην πλήρη αυτοματοποίηση της με την ανάπτυξη ενός ρομποτικού βραχίονα. Ευρύτατη είναι η χρήση της μεθόδου σε σημειακές συγκολλήσεις όντας μια από τις πιο αποτελεσματικές της βιομηχανίας όσον αφορά την σύνδεση φύλλων αλουμινίου [36]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μοντέλο Mazda Rx-8, με σημειακές συγκολλήσεις με FSW στο καπό και στις πίσω πόρτες του. Τέλος, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) εφαρμόζεται για την κατασκευή τεθωρακισμένων οχημάτων, όπου αξιοποιείται η ικανότητα της διαδικασίας να συγκολλά υλικό πάχους από 24mm έως 40mm με ένα πέρασμα.

## 2.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

### 2.9.1 Κράματα Αλουμινίου AA 5083 και AA 7075

#### ➤ Κράμα AA 5083

Από το διάγραμμα Αλουμινίου – Μαγνησίου[52,53] φαίνεται ότι η μέγιστη διαλυτότητα του μαγνησίου στο αλουμίνιο είναι πάνω από 15% κατά βάρος, ενώ σε θερμοκρασία δωματίου η τιμή αυτή διαμορφώνεται περί το 3%. Συνεπώς καθώς οι τυπικές περιεκτικότητες για το δεδομένο κράμα κυμαίνονται από 4% – 5% αναμένεται να υπάρχει συμμετοχή κατακρημνισμάτων της εδροκεντρωμένης,  $Al_3Mg_2$  φάσης, γνωστής και ως  $\beta$  φάσης. Αναφέρεται ωστόσο, ότι η κατακρήμνιση της, απαιτεί εκτεταμένα χρονικά διαστήματα παραμονής σε εύρος 50 – 280°C και παρατηρείται στα όρια των κόκκων και έχουν αρνητική επίδραση στην αντοχή σε διάβρωση του υλικού (55). Η αντίδραση κατακρήμνισης τους είναι η εξής:

*Υπέρκορεσμένο Στερεό Διάλυμα Απόψυξη* → GP Ζώνες →  $\beta''$  4 →  $\beta'$  5 →  $\beta$ 6  
Αντίδραση 1: Μεταλλουργική αντίδραση σχηματισμού κατακρημνισμάτων της  $\beta$  φάσης

Παράλληλα ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος το οποίο βρισκόμαστε είναι πιθανή η ύπαρξη των παρακάτω ενδομεταλλικών φάσεων :

1. (Mn,Fe)Al<sub>6</sub>
2. (Cr,Fe)Al<sub>7</sub>
3. Mg<sub>3</sub>Mn<sub>2</sub>Al<sub>12</sub>

#### ➤ Κράμα AA 7075

Σύμφωνα με τους Fuller, Mahoney, Calabrese και Micono [54], στα κράματα αλουμινίου σειράς 7XXX (Al-Zn-Mg) το υπέρκορο διάλυμα κατακρημνίζεται με την εξής ακολουθία [55], [56], [57]:

Υπέρκορο στερεό διάλυμα → GP ζώνη →  $\eta'$ (MgZn<sub>2</sub>) →  $\eta$ (MgZn<sub>2</sub>)

Η αποσύνθεση του υπέρκορου στερεού διαλύματος παράγει συγχρόνως GP(I) ζώνες και κενές θέσεις στο πλέγμα ατόμων από τις οποίες πυρηνοποιούνται ζώνες GP(II) [58], [59]. Παρόλο που και οι δύο τύποι ζωνών GP σχηματίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες (120-125 °C) [60], [61], η ζώνη GP(i) διαλύεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (περίπου στους 100 ο C). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες γήρανσης (από 130 έως 290°C), ο σχηματισμός της μετασταθούς  $\eta'$  φάσης ακολουθείται από σχηματισμό της φάσης ισορροπίας  $\eta$ . Και οι δύο φάσεις είναι εξαγωνικές αλλά με διαφορετικές παραμέτρους πλέγματος.

## 2.9.2 Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση κραμάτων AA5083

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση του κράματος AA5083 έχει αποτελέσει βασικό αντικείμενο μελέτης σε μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων καθώς στο συγκεκριμένο κράμα αλουμινίου η μηχανική του αντοχή αυξάνεται με την ενδοτράχυνση και όχι με θερμική κατεργασία. Συνεπώς η μελέτης της μικροδομής καθώς και των μηχανικών ιδιοτήτων έχει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον.

Ο Chen και οι συνεργάτες του [38] παρατήρησαν ότι μετά από ένα πέρασμα της διαδικασίας ανάδευσης δια τριβής (FSP) δημιουργείται μία δυναμικά ανακρυσταλλωμένη ζώνη ανάδευσης αποτελούμενη από όρια κόκκων με υψηλή γωνία διαφοράς κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού. Στη συγκεκριμένη μελέτη επίσης παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου αυξάνεται και το μέγεθος των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης, ενώ αποτέλεσμα της αύξησης του μεγέθους των κόκκων αλλά και της ανακρυστάλλωσης ήταν η μείωση της σκληρότητας. Επιπλέον, μείωση εμφάνισαν και οι μηχανικές ιδιότητες στη περιοχή της ζώνης ανάδευσης. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν ο Peel και οι συνεργάτες του [39][40] σε μελέτη συγκόλλησης του κράματος αυτού. Πιο συγκεκριμένα η συγκόλληση είχε μικρότερο όριο διαρροής και σκληρότητα από το μητρικό υλικό, γεγονός που δικαιολογείται από την θερμική κατεργασία που είχε υποστεί (H19). Ειδικότερα, η πτώση αυτή στις μηχανικές ιδιότητες οφείλεται στο γεγονός ότι εντός της ζώνης ανάδευσης γίνεται εκλέπτυνση των κόκκων, αλλά εξαιτίας της θερμικής επίδρασης ακυρώνεται ένα μεγάλο ποσοστό των διαταραχών που είχαν δημιουργηθεί από την ψυχρή έλαση.

Ακόμη υπήρχαν μελέτες στις οποίες το μητρικό υλικό AA5083 ήταν ανοπτημένο [41]. Στην έρευνα αυτή η εκλέπτυνση των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης οδήγησε σε αύξηση της σκληρότητας. Επίσης η διαδικασία της FSW οδηγεί σε βελτίωση και άλλων ιδιοτήτων όπως η αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με το μητρικό υλικό. Η βελτίωση αυτή στην αντοχή σε διάβρωση οφείλεται στο ότι ο περικρυσταλλικός μηχανισμός της είναι πιο επιδεκτικός στα περικρυσταλλικά κατακρημνίσματα, τα οποία είναι περισσότερα στο μητρικό υλικό. Ως προς τη διάβρωση, σε άλλη σχετική έρευνα για την FSW του AA5083 παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα. Δηλαδή, η συγκόλληση παρουσίασε βελτιωμένη αντοχή σε διάβρωση σε σχέση με το μέταλλο βάσης, λόγω της ανακρυστάλλωσης του πυρήνα συγκόλλησης που οδηγεί σε ομοιόμορφη κατανομή των περικρυσταλλικών κατακρημνισμάτων.

Όπως αναφέρεται και νωρίτερα πολύ σημαντικός παράγοντας για τις συγκολλήσεις είναι η παρουσία ατελειών. Ο Lombard και οι συνεργάτες του [42] σε σχετική μελέτη, συμπέραναν ότι η ταχύτητα περιστροφής καθορίζει την παρουσία ατελειών κατά την FSW του 5083-H321. Επίσης, κατέληξαν ότι υπάρχει μία στενή σχέση μεταξύ της θερμικής παροχής (frictional heat input) με την αντοχή σε εφελκυσμό και την κόπωση.

Ο Hirata και οι συνεργάτες του [43] μελέτησαν την FSW του κράματος AA5083 ως προς τη μικροδομή και τις μηχανικές του ιδιότητες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μείωση της θερμικής παροχής κατά τη συγκόλληση οδηγεί σε μείωση στο μέγεθος των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης και αύξηση στην ολκιμότητα του κράματος. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στην αντοχή σε εφελκυσμό από τις αλλαγές στις παραμέτρους της διαδικασίας.

Ο Kundu και οι συνεργάτες του [44] μελέτησαν την συγκόλληση FSW σε κράματα 5083 και 5086 σε διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων. Από τις παρατηρήσεις τους προέκυψε ότι η γεωμετρία του πείρου επηρεάζει καθοριστικά την ροή του υλικού και τις συνθήκες ανάδευσης. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει η γωνία κλίσης του εργαλείου καθώς οι ασυνέχειες αυξάνονται με την αύξηση της κλίσης.

Ο Saeidi και οι συνεργάτες του [45] πραγματοποίησαν συγκόλληση σε κράματα 7075-T6 και 5083-H116 χρησιμοποιώντας τετραγωνικό πείρο. Βέλτιστα αποτελέσματα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες είχαν οι συγκολλήσεις που παρήχθησαν με ταχύτητες περιστροφής 500rpm και ταχύτητα πρόωσης 50mm/min.

### 2.9.3 Συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση κραμάτων AA7075

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το κράμα αλουμινίου 7075 είναι ένα κράμα υψηλής αντοχής, η οποία οφείλεται στα φαινόμενα κατακρήμνισης που πραγματοποιούνται μετά από θερμική επεξεργασία. Η μικρή θερμική παροχή της FSW έχει ως αποτέλεσμα ακόμη καλύτερες ιδιότητες για το 7075 σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Ο Shah [46] μελέτησε την κατανομή της θερμοκρασίας στο περιεχόμενο κατά την συγκόλληση FSW του AA7075-T651. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είχαν μεγαλύτερες τιμές στην προωθούμενη πλευρά απ' ό,τι στην υποχωρούσα. Επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι τιμές των παραμέτρων της διαδικασίας της FSW πρέπει είναι τέτοιες, ώστε οι παραγόμενες θερμοκρασίες να έχουν ένα εύρος από 375°C- 420°C και να ελαχιστοποιούνται οι ατέλειες.

Ο Srinivasa Rao [47] και οι συνεργάτες του μελέτησαν τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση του AA7075-T651 σε μεγάλα πάχη (10mm και 16mm). Στα ελάσματα με το μεγαλύτερο πάχος παρατηρήθηκε έντονη μείωση της σκληρότητας στην HAZ λόγω της μεγαλύτερης θερμικής παροχής απαιτήθηκε για την συγκόλληση τους. Τα ελάσματα των 10mm στον πυρήνα της συγκόλλησης δεν εμφάνισαν μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα σε σχέση με τα μεγαλύτερου πάχους. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, μεγαλύτερο όριο διαρροής και αντοχή σε εφελκυσμό παρουσίασαν τα δοκίμια πάχους 10mm. Οι θραύσεις και στις δύο περιπτώσεις, κατά τη δοκιμή εφελκυσμού

παρατηρήθηκαν στη περιοχή της HAZ καθώς αποτελούταν από ζώνες χωρίς κατακρημνίσματα.

Ο Fuller [48] και οι συνεργάτες του ερεύνησαν την εξέλιξη της μικροδομής μετά την FSW ως προς τον χρόνο με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της φυσικής γήρανσης. Στην συγκεκριμένη έρευνα μελετώνται οι μηχανισμοί κατακρημνίσεως, οι οποίοι καθορίζουν τη μηχανική αντοχή του συγκολλημένου AA7075. Με την πάροδο του χρόνου (φυσική γήρανση) παρατηρείται σημαντική αύξηση της σκληρότητας σε όλες τις ζώνες (κυρίως στο WN), του ορίου διαρροής και της αντοχής σε εφελκυσμό. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη μελέτη σημειώνεται μία πολύ σημαντική παρατήρηση ως προς την επιμήκυνση. Σε συγκολλήσεις που αποτελούνται από ζώνες διαφορετικής μικροδομής (κατακρημνίσματα, μέγεθος και σχήμα κόκκων), η παραμόρφωση περιορίζεται στην πιο αδύναμη περιοχή. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως “strain localization” και έχει αποδειχθεί ότι συμβαίνει στη HAZ συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση (όπου η αντοχή μπορεί να είναι 60% μικρότερη από αυτή του μετάλλου βάσης) για κράματα αλουμινίου που έχουν υποστεί σκλήρυνση με κατακρημνίση. Όταν το φαινόμενο αυτό είναι ισχυρό, η επιμήκυνση μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό και να παρουσιάσει πολύ χαμηλότερες τιμές από τις αναμενόμενες για κράματα αλουμινίου. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει και τη αντοχή των συγκολλήσεων, αφού κατά τον εφελκυσμό παρουσιάζεται πάντα «λαιμός» και αστοχία στην πιο αδύναμη περιοχή.

Ο Jamshidi Aval [49][50] μελέτησε την επίδραση της ταχύτητας περιστροφής και της ταχύτητας πρόωσης στις παραμένουσες τάσεις και στη μικροδομή της συγκόλλησης μεταξύ των AA7075-T6 και AA6082-T6. Ως προς το μέγεθος κόκκων, η δομή του WN είναι πιο λεπτόκοκκη στην πλευρά του AA7075 συγκριτικά με αυτή του AA6082. Η σκληρότητα του πυρήνα συγκόλλησης εξαρτάται από τη διεύρυνση και τη διάλυση των κατακρημνισμάτων και παρουσιάζει αύξηση λόγω φυσικής γήρανσης μετά τη συγκόλληση.

Ο Bahemmat [51] και οι συνεργάτες του εκτέλεσαν δοκιμές συγκολλήσεων σε κράματα 7075-T6 με κωνικό πείρο και με πείρο τεσσάρων (4) αυλακώσεων, όπου και οι δύο πείροι είχαν αυλακώσεις. Η ταχύτητα πρόωσης ήταν 80mm/min και η αξονική δύναμη από το εργαλείο ήταν 10kN. Οι παράμετροι για τις οποίες οι συγκολλήσεις δεν εμφάνισαν κάποια ουσιαστική ατέλεια ήταν: 900rpm για τον κωνικό πείρο και 700rpm για τον πείρο με τις αυλακώσεις. Η μέση σκληρότητα της ζώνης ανάδευσης και στις δύο περιπτώσεις μειωνόταν με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Η περιοχή έναρξης θραύσης των συγκολλήσεων χωρίς σφάλματα ταυτιζόταν με την περιοχή μειωμένης σκληρότητας.

### 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

#### 3.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία ήταν τα κράματα αλουμινίου AA5083-H111 και AA7075-T651, με διαστάσεις πλακών 150mm\*200mm\*3mm. Τα κράματα της σειράς 5XXX, όπως προαναφέρθηκε, βρίσκουν εφαρμογή στη ναυπηγική ενώ τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7XXX βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην αεροναυπηγική βιομηχανία.

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις των δύο προαναφερθέντων κραμάτων .

Πίνακας 3: Χημική σύσταση των προς συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου (% κ.β.)

Componen nts	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
<b>AA 5083- H111</b>	0.4	0.4	0.1	0.4- 1.0	4.0-4.9	0.05- 0.25	0.25	0.15	Bal.
<b>AA 7075- T651</b>	0.5	0.7	1.2- 2.0	0.3	2.1-2.9	0.18- 0.40	6.1	0.2	Bal.

Σύμφωνα με το σύστημα τυποποίησης ονοματολογίας των κραμάτων αλουμινίου, το κράμα 5083-H111 έχει υποστεί ανόπτηση και στη συνέχεια ένα μικρό ποσοστό ενδοτράχυνσης κατά τις μεταγενέστερες εργασίες του κράματος όπως π.χ. η εξώθηση.

Αντίστοιχα το κράμα 7075-T651 έχει υποστεί θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, εκτόνωση των παραμενουσών τάσεων και στην συνέχεια τεχνητή γήρανση.

#### 3.2 ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ

Το σύνολο των συγκολλήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν σε μια τροποποιημένη κάθετη τροποποιημένη φρεζομηχανή τύπου 'KEARNEY TRECKER Horizontal Milling Machine Type No. 3CE' του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Συγκολλήσεων της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1. Η συγκεκριμένη φρεζομηχανή είναι βαρέος τύπου προκειμένου να δέχεται τις μεγάλες δυνάμεις, αλλά και τους κραδασμούς, που παράγονται κατά τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση.



Εικόνα 20: Κάθετη τροποποιημένη φρεζομηχανή τύπου "KEARNEY TRECKER Horizontal Milling Machine Type No. 3CE"

Οι ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής που μπορούν να εφαρμοστούν από τη συγκεκριμένη φρεζομηχανή παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης που μπορεί να αναπτύξει η μηχανή FSW.

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



Ως βάση έδρασης των δοκιμών συγκόλλησης (τράπεζα συγκόλλησης) χρησιμοποιείται μία χαλύβδινη πλάκα (Εικόνα 2.3) από χυτοσίδηρο. Η βάση έδρασης φέρει και 4 οπές (διαμέτρου Φ17 για κοχλία M16 τύπου Allen) σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους προκειμένου να επιτευχθεί η πρόσδεσή της στο τραπέζι της εργαλειομηχανής.



Εικόνα 21: Βάση έδρασης των δοκιμών συγκόλλησης (Τράπεζα συγκόλλησης) της φρεζομηχανής του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Συγκολλήσεων.

### 3.3 ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Για όλες τις συγκολλήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε εργαλείο συγκόλλησης κυλινδρικής γεωμετρίας με διαστάσεις:

Πίνακας 5: Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε.

<b>Διάμετρος περιαιχενίου (shoulder)</b>	22mm
<b>Διάμετρος πείρου</b>	4.5mm
<b>Ύψος πείρου</b>	4.55mm

επίσης, ο πείρος για τις συγκεκριμένες συγκολλήσεις έφερε σπείρωμα. Η γεωμετρία και ο σχεδιασμός των εργαλείων συγκόλλησης είναι μεγίστης

σημασίας για τις συγκολλήσεις FSW, καθώς καθορίζουν τη παραγόμενη παροχή θερμότητας και τη ροή υλικού. Διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείων συγκόλλησης παράγουν συγκολλήσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά μικροδομής και με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 22: Εργαλείο συγκόλλησης FSW με διάμετρο περιαιχενίου και πείρου 22mm και 4.5mm αντίστοιχα και ύψος πείρου 4.55mm.

### 3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι εκτέλεσης των συγκολλήσεων που θα συζητηθούν και στη συνέχεια. Σε όλες τις συγκολλήσεις ο χρόνος παραμονής του περιστρεφόμενου πείρου μετά την πλήρη βύθιση του στα τεμάχια της συγκόλλησης μέχρι την εκκίνηση της πρόωσης του ήταν 10 δευτερόλεπτα. Επίσης σε όλες τις συγκολλήσεις ως βάση της συγκόλλησης ήταν το κράμα 7075-T651, δηλαδή στο πάνω μέρος βρισκόταν το κράμα 5083-H111.

Πίνακας 6: Παράμετροι εκτέλεσης ανόμοιων συγκολλήσεων κραμάτων 5083-H111 και 7075-T651

Αύξων Αριθμός Δοκιμίων	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Κλίση εργαλείου	Είδος πείρου συγκόλλησης
A1	590	51	3°	Κυλινδρικός με σπείρωμα
A2	590	83		
A3	590	127		
A4	590	203		
B1	1000	51		
B2	1000	83		
B3	1000	127		
B4	1000	203		

### 3.5 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΗΣ

Προκειμένου να γίνει εφικτή η μεταλλογραφική παρατήρηση των συγκολλήσεων, τα συγκολλημένα πλέον ελάσματα κόπηκαν σε μικρότερα δοκίμια με κατάλληλες διαστάσεις, τα οποία περιλάμβαναν όλες τις ζώνες συγκόλλησης και μέρος του βασικού υλικού κάθε κράματος.

➤ Κοπή των δοκιμίων

Η κοπή των συγκολλημένων ελασμάτων πραγματοποιήθηκε στο μικροτόμο (κορδέλα) του εργαστηρίου της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

➤ Λείανση και στίλβωση

Στο στάδιο της λείανσης μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας και απομακρύνονται οι ανωμαλίες που προκαλούνται από την τομή της κοπής. Κατά τη λείανση, το δοκίμιο τοποθετείται διαδοχικά σε περιστρεφόμενα χαρτιά κατάλληλης κοκκομετρίας, ένα από τα οποία κάθε φορά τοποθετείται στον περιστρεφόμενο δίσκο της συσκευής.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε λείανση και στίλβωση σε κατάλληλη υδρόψυκτη διάταξη τύπου “Stuers, DP-U2” του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων -Μεταλλουργών, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 23: Υδρόψυκτη διάταξη τύπου “Stuers, DP-U2” του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας.

Τα δύο κύρια μέρη της διάταξης είναι το περιστρεφόμενο πλάτο και το σύστημα ψύξης. Η συσκευή έχει δυνατότητα ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας μέσω ενός ηλεκτρονικού σερβοσυστήματος, χάρη στο οποίο αυτή παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό (rpm). Για την ψύξη και τη λίπανση της επιφάνειας λείανσης/στίλβωσης χρησιμοποιείται νερό, η παροχή του οποίου γίνεται από βρύση ενσωματωμένη στη συσκευή. Η διαδικασία λείανσης και στίλβωσης η οποία εφαρμόστηκε σε κάθε δοκίμιο παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4.

Στη συγκεκριμένη διαδικασία αξίζει να σημειωθεί πως είναι σημαντική η αρκετά υψηλή παροχή νερού προκειμένου οι ακαθαρσίες της λείανσης ( ρινίσματα και καρβίδια) να απομακρύνονται, ενώ η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής για τα συγκεκριμένα δείγματα είναι στις 300-350 στροφές/λεπτό (rpm). Αντίθετα στη στίλβωση το βελούδο χρειάζεται να είναι νωπό χωρίς ιδιαίτερη παροχή νερού προκειμένου να μην απομακρύνεται η αδαμαντόπαστα ή το σπρέι διαμαντιού από το δίσκο, ενώ η βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής κυμαίνεται στις 150-200 στροφές/λεπτό (rpm). Τέλος, ακολουθεί καθαρισμός του δοκιμίου με απιονισμένο νερό, αιθανόλη και στέγνωμα με πιστόλι θερμού αέρος.

Πίνακας 7: Διαδικασία λείανσης και στίλβωσης

	Λείανση
<b>Βήμα 1</b>	Λειαντικό χαρτί κοκκομετρίας 220 grit
<b>Βήμα 2</b>	Λειαντικό χαρτί κοκκομετρίας 500 grit
<b>Βήμα 3</b>	Λειαντικό χαρτί κοκκομετρίας 1000 grit
	Στίλβωση
<b>Βήμα 4</b>	Πάστα αλουμίνας κοκκομετρίας 1 μm πάνω σε βελούδο
<b>Βήμα 5</b>	Πάστα αλούμινας κοκκομετρίας 0,1 μm πάνω σε βελούδο

Στο επόμενο στάδιο ακολουθεί η χημική προσβολή των δοκιμίων προκειμένου να γίνει εφικτή η μεταλλογραφική παρατήρηση τους. Η χημική προσβολή φανερώνει τα όρια των κόκκων και κατ' επέκταση τις ζώνες συγκόλλησης [27]. Η χημική προσβολή στα συγκεκριμένα δείγματα πραγματοποιήθηκε με διάλυμα HF 0.5% w/v με βύθιση των δοκιμίων για 20sec.

### 3.6 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Το οπτικό μικροσκόπιο αποτελεί το πιο σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Ενώ, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ξεπερνούν δύο από τους σημαντικότερους περιορισμούς του οπτικού μικροσκοπίου-την ανάλυση και το βάθος του πεδίου-δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν την σημασία του. Όντως, οι περιορισμοί των μικροσκοπίων TEM και SEM αποτελούν τα ισχυρά σημεία του οπτικού μικροσκοπίου και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τεχνικές οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας να είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές. Σε κάθε μελέτη υλικών, η πιο σωστή διαδικασία είναι η αρχή της εξέτασης να γίνει πρώτα σε μακροσκοπικό επίπεδο, πριν προχωρήσει σε μικροσκοπικές λεπτομέρειες. Η απλή οπτική εξέταση, ίσως μακροσκοπικής προσβολής, πρέπει να προηγείται της μεγέθυνσης.

Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση και μετάφραση της μικροδομής, χωρίς επιπλοκές από σφάλματα (artifacts). Τα δοκίμια τα οποία αντιδρούν στο πολωμένο φως, όπως τα υλικά με μη-κυβικές δομές, γενικά εξετάζονται χωρίς χημική προσβολή.

Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η χημική προσβολή πρέπει γίνει, για είναι δυνατή η παρατήρηση της μικροδομής.

### **3.7 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY "SEM")**

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί περαιτέρω μεταλλογραφική παρατήρηση σε αρκετά μεγαλύτερη μεγέθυνση και να γίνει προσδιορισμός της χημικής σύστασης των νεοδημιουργηθέντων κατακρημνισμάτων χρησιμοποιήσαμε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας τύπου Jeol JSM 6380LV (Εικόνα 2.5) με διακριτική ικανότητα μέχρι 3 nm και με δυνατότητα χημικής ανάλυσης (energy dispersive spectroscopy system, EDS, Oxford Inca Energy 250).

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) είναι ένας τύπος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου που παράγει εικόνες μέσω της σάρωσης της επιφάνειας του δείγματος με εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Κατά τη μελέτη μίας στερεής μεταλλικής επιφάνειας εκπέμπεται μία δέσμη ηλεκτρονίων με πολύ μικρό μήκος κύματος ( $\lambda < 1$ ), η οποία αλληλοεπιδρώντας με τα άτομα του στερεού σε περιβάλλον κενού, σαρώνει την υπό μελέτη επιφάνεια μέσω συστημάτων ηλεκτροστατικής εκτροπής.

Η ηλεκτρονιακή δέσμη παράγεται εξαιτίας της θερμιονικής εκπομπής των ηλεκτρονίων από την κάθοδο βολφραμίου και η δέσμη καθώς διέρχεται από έναν επιταχυντή σταθερής τάσης αποκτά καθορισμένο μήκος κύματος. Στη συνέχεια δύο ή τρεις φακοί απομεγεθύνουν την ηλεκτρονιακή δέσμη, η οποία καθώς προσκρούει στο δείγμα έχει διάμετρο της τάξης των 2-10 nm. Κατά την πρόσπτωση των ηλεκτρονίων στα διάφορα μέρη του εξεταζόμενου δείγματος, οι πληροφορίες λαμβάνονται καθώς ανιχνεύονται ακτινοβολίες που εκπέμπονται δευτερογενώς από το δοκίμιο.

Τα ηλεκτρονιακά ή φωτονιακά σήματα εκπέμπονται δευτερογενώς από το δοκίμιο και οδηγούνται σε οθόνη καθοδικού σωλήνα μετά από κατάλληλη ενίσχυση. Από εκεί με τη βοήθεια μαγνητικών φακών μετατρέπονται σε εικόνα, η οποία αφού αναπαραχθεί σε οθόνη μπορεί να φωτογραφηθεί και αναπαρασταθεί με ιδιαίτερη ακρίβεια το ανάγλυφο της υπό εξέτασης περιοχής.

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω φαινόμενο εκπέμπονται ακτίνες X, των οποίων οι ενέργειες συλλέγονται και καταγράφονται. Από τις ενέργειες αυτές και με πολύπλοκους υπολογισμούς προκύπτει τόσο η ποιοτική όσο και η ποσοτική σύσταση του δείγματος.



Εικόνα 24: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας τύπου Jeol JSM 6380LV

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ



590rpm

51mm/min



590rpm

83mm/min



590rpm

127mm/min



590rpm

203mm/min



1000rpm

51mm/min



1000rpm

83mm/min



1000rpm

127mm/min



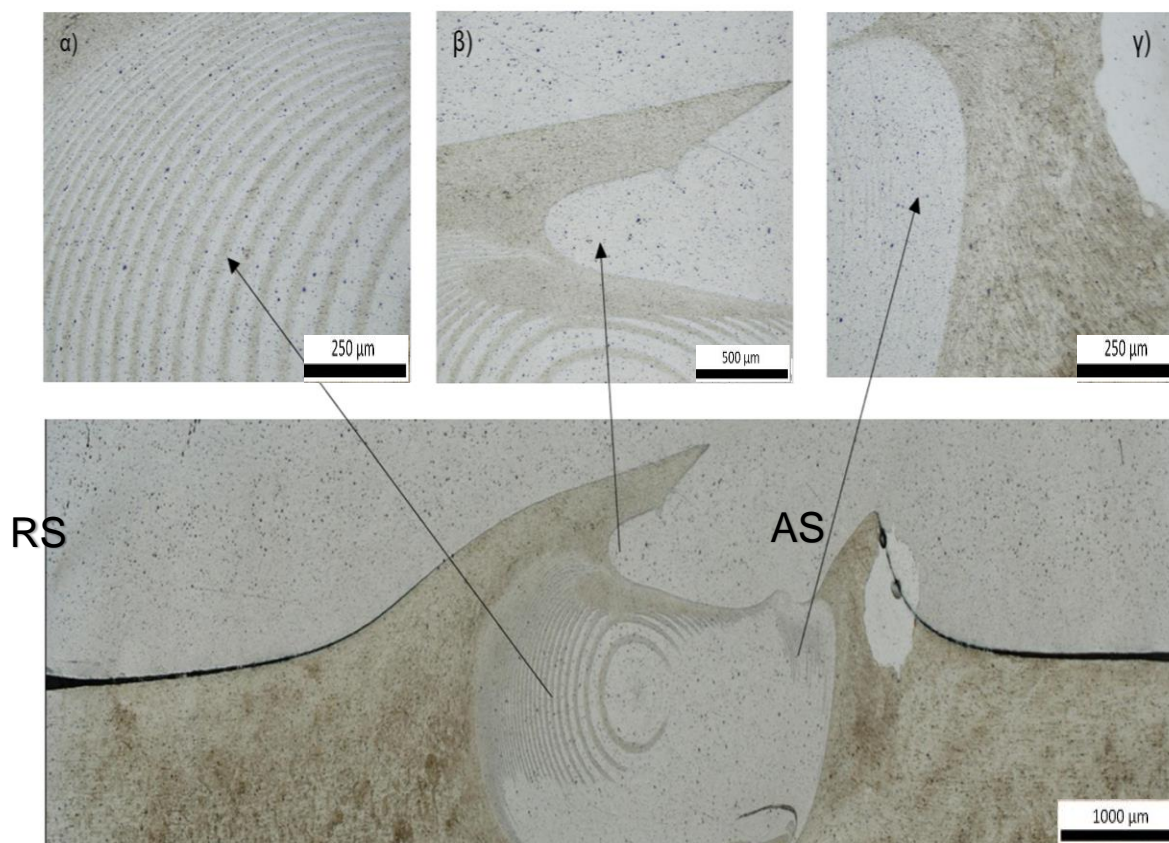
1000rpm

203mm/min



## 4.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΕ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

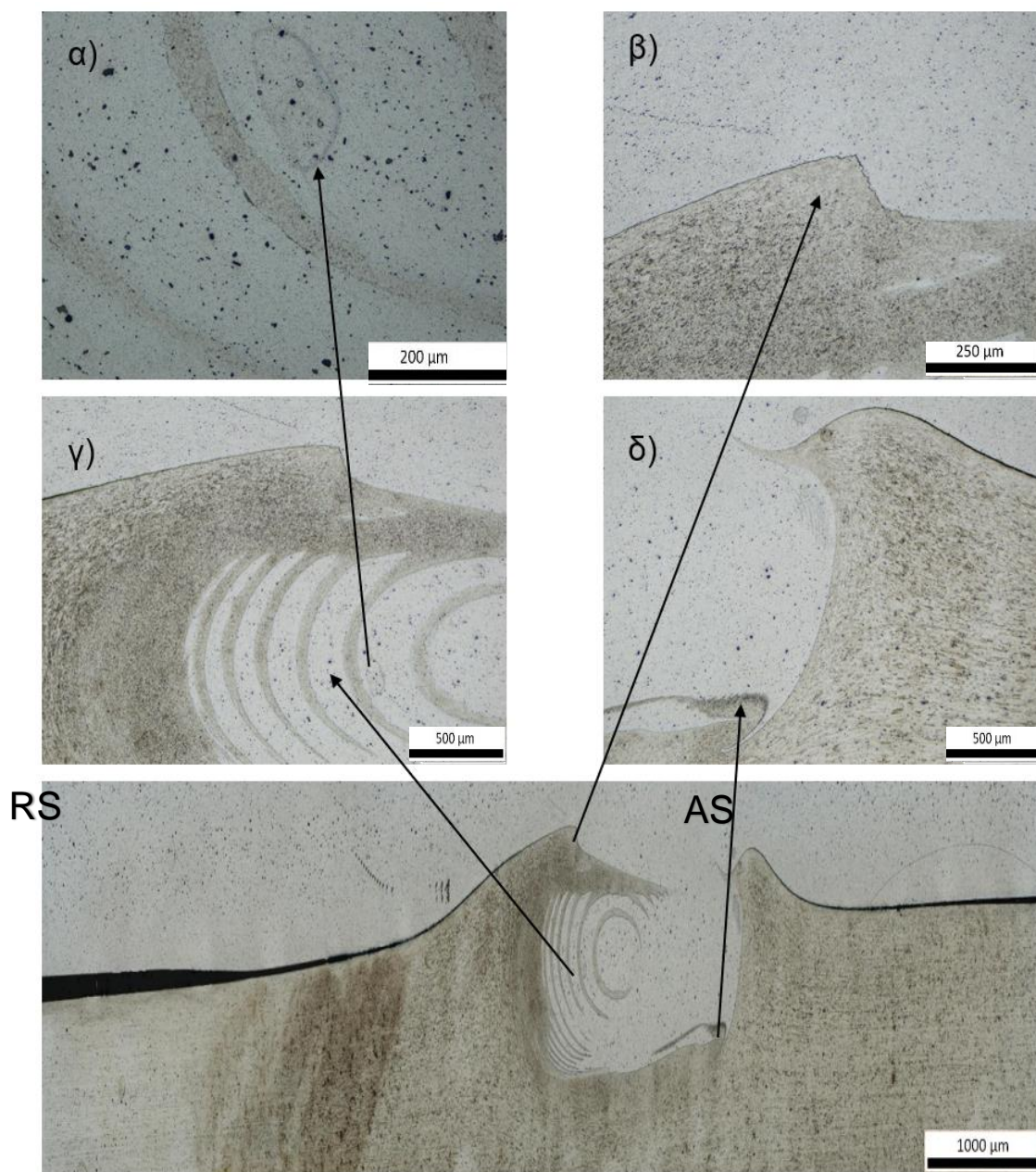
### 4.1.1 Δοκίμιο Α1



Εικόνα 25:Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A1) σε μεγέθυνση  $\times 2.0$ . Εικόνα: α) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , β) σε μεγέθυνση  $\times 10.0$ , γ) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ .

Από τις Εικόνες 25 α),β) και γ) της συγκόλλησης του δοκιμίου A1 παρατηρούμε ότι οι συνθήκες της συγκόλλησης προκάλεσαν καλή ανάμιξη στην ζώνη ανάδευσης. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 25.α) παρατηρούμε τη δημιουργία συνεκτικών μικροδομών οπιοι rings χωρίς την ύπαρξη ασυνεχειών ή ατελειών στην διεπιφάνεια των δυο υλικών. Παρόμοιες μικροδομές φαίνονται και στην Εικόνα 25.γ) με μικρότερο πάχος αλλά παρόμοια συνεκτικότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εικόνα 25 παρουσιάζεται μια μαύρη γραμμή που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ατέλεια μορφής τούνελ η kissing bond. Ωστόσο η παρατήρηση της ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM απέδειξε πως πρόκειται για κάποιο είδος αστοχίας στην διαδικασία του εγκιβωτισμού. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η συγκόλληση (A1) χαρακτηρίζεται ως επιτυχημένη.

#### 4.1.2 Δοκίμιο A2

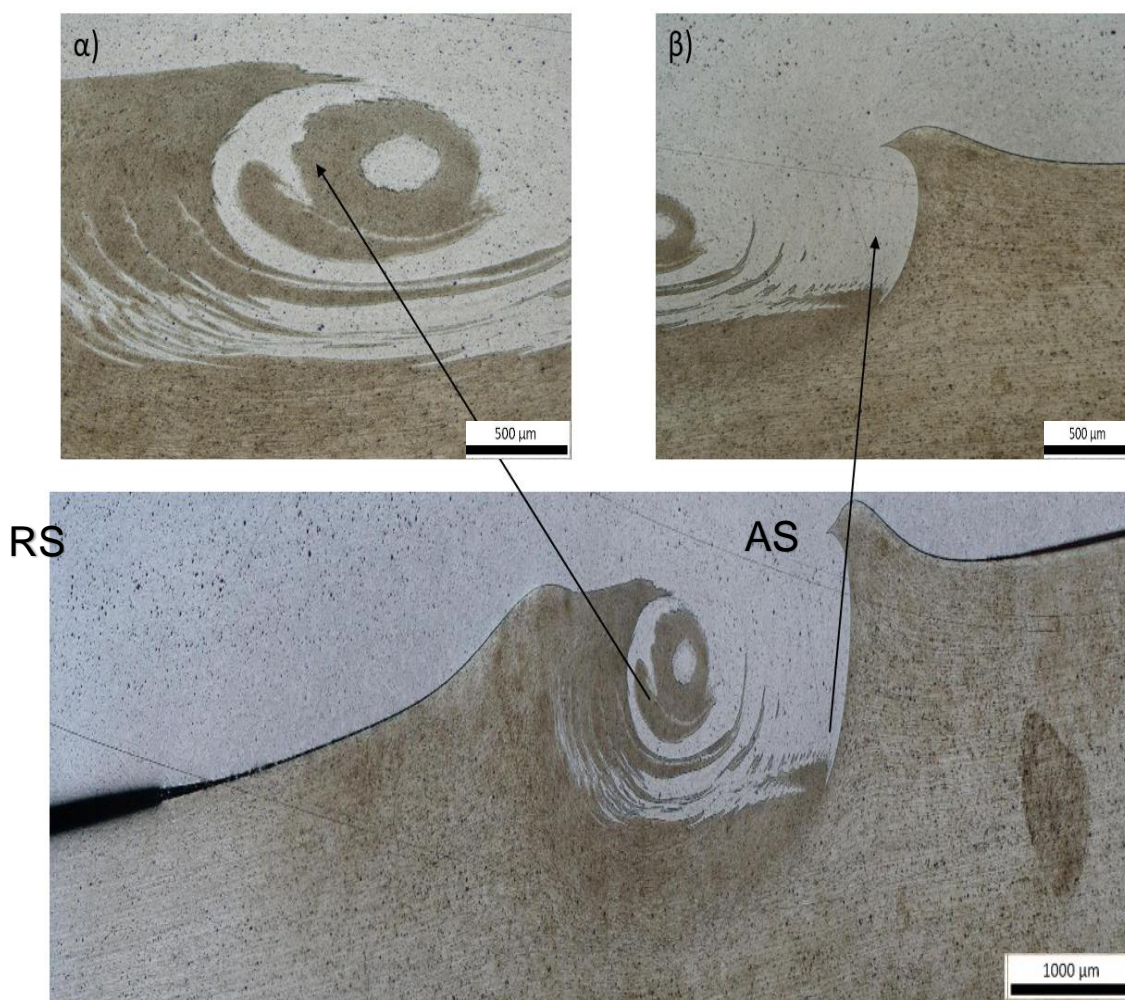


Εικόνα 26: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A2) σε μεγέθυνση  $\times 2.0$ . Εικόνα: α) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , β) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , γ) σε μεγέθυνση  $\times 10.0$ , δ) σε μεγέθυνση  $\times 10.0$ .

Από τις Εικόνες 26 α),β),γ) και δ) της συγκόλλησης του δοκιμίου A2 παρατηρούμε ότι οι συνθήκες της συγκόλλησης προκάλεσαν ικανοποιητική ανάμιξη στην ζώνη ανάδευσης. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 26.γ)

παρατηρούμε τις μικροδομές οπιοn rings αρκετά έντονες χωρίς όμως να υπάρχει η συχνότητα και η συνεκτικότητα όπως σε αυτές του δοκιμίου A1. Στις Εικόνες 26.α) παρατηρούνται αχνές κηλίδες οι οποίες θα μπορούσαν εξαρχής να χαρακτηριστούν ως ατέλειες. Ωστόσο η παρατήρηση του στο SEM επιβεβαίωσε πως πρόκειται για αστοχία στην διαδικασία της χημικής προσβολής ή του εγκιβωτισμού. Στην Εικόνα 26.β) αξίζει να σημειωθεί πως στην περιοχή του flow arm έχουμε πολύ καλή ενοποίηση των δυο υλικών γεγονός που προδίδει ο τρόπος με τον οποίο σβήνεται η ασυνέχεια στη διεπιφάνεια των δύο πλακών. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, η συγκόλληση του δοκιμίου A2 θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και αυτή ως επιτυχημένη.

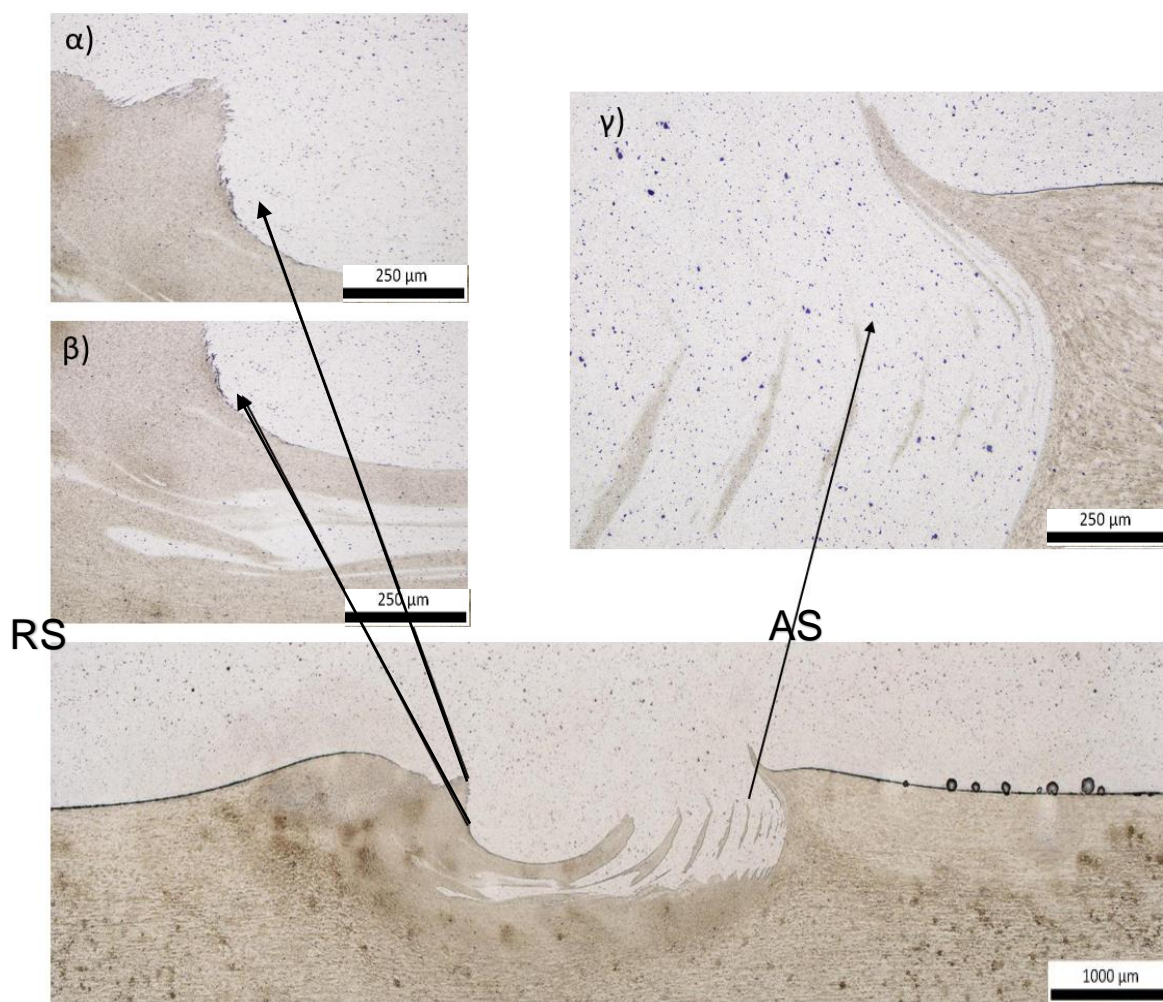
#### 4.1.3 Δοκίμιο A3



Εικόνα 27: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A3) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x10.0, β) σε μεγέθυνση x5.0,

Από τις Εικόνες 3.7 α),β) της συγκόλλησης του δοκιμίου A3 παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης, περιορίζει σημαντικά την θερμική παροχή τόσο στη ζώνη ανάδευσης όσο και στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη κατά τη συγκόλληση προκαλώντας μη επαρκή ανάδευση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7.α) τα δύο υλικά δεν έχουν καταφέρει να ενοποιηθούν πλήρως, δημιουργώντας έντονες ασυνέχειες στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης, σημεία δηλαδή, υποψήφια για εμφάνιση μικρορωγμών και άλλων ατελειών. Ακόμη, στην Εικόνα 3.7.β) είναι ευδιάκριτη στο δεξί μέρος της συγκόλλησης η απουσία οποιασδήποτε δομής που να δηλώνει την ενοποίηση των δύο υλικών. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η συγκόλληση (A1) χαρακτηρίζεται ως αποτυχημένη.

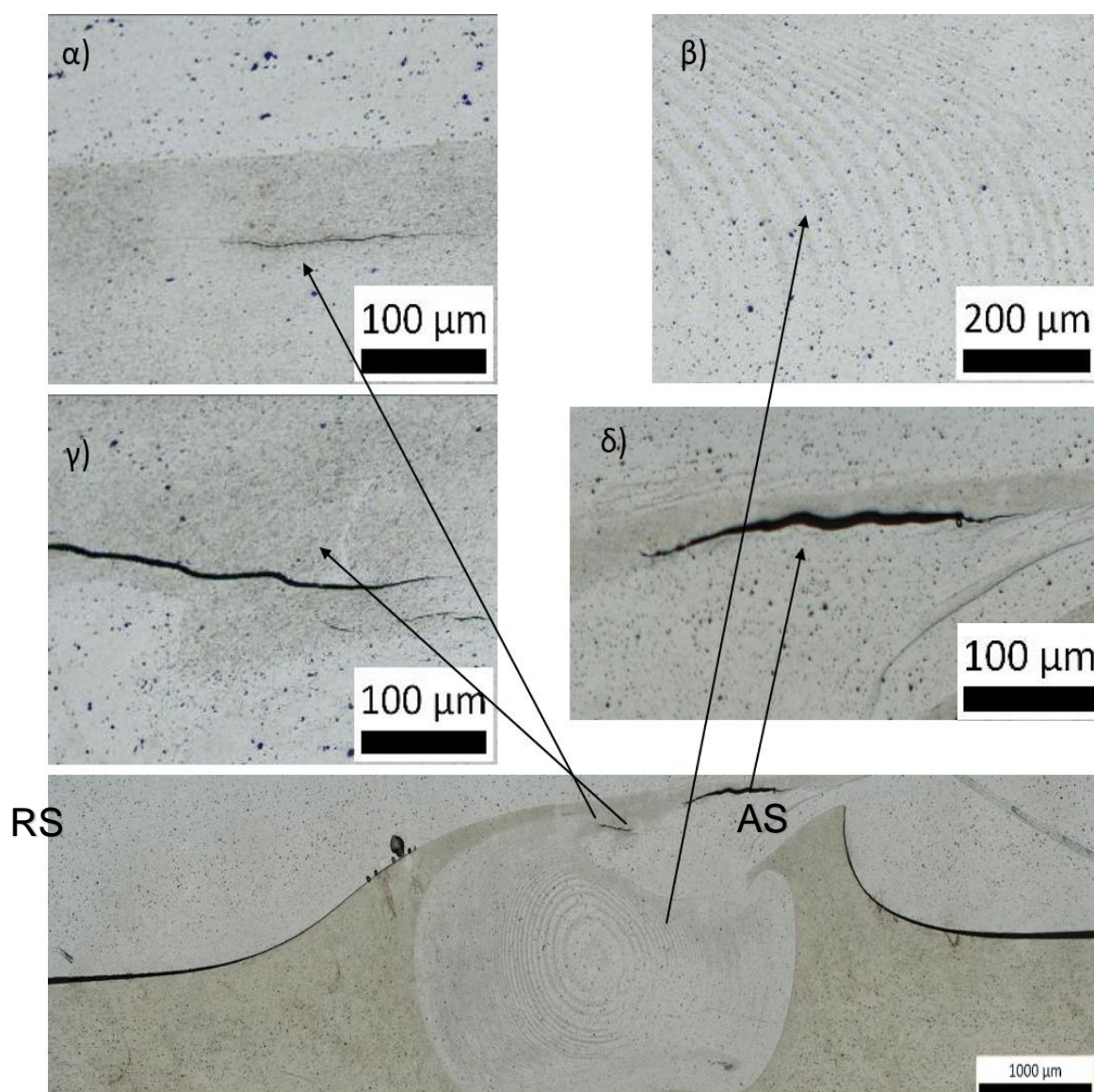
#### 4.1.4 Δοκίμιο A4



Εικόνα 28: Εικόνα 3.8: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A4) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0

Από τις Εικόνες 28 α),β) και γ) παρατηρούμε πως στη συγκόλληση του δοκιμίου A4 οι συνθήκες ανάδευσης ήταν τέτοιες που οδήγησαν σε πολύ μικρό βαθμό ανάμιξης των δυο υλικών. Ήδη όπως παρατηρήσαμε από την συγκόλληση του δοκιμίου A3, η υψηλή ταχύτητα πρόωσης μειώνει την θερμική παροχή οδηγώντας σε μη ικανοποιητική ανάδευση. Έτσι, στην συγκεκριμένη περίπτωση εκτός από την πολύ κακή ανάμιξη των δύο υλικών έχουμε και ένα συνδυασμό ατελειών που υπονομεύουν την ποιότητα της συγκόλλησης εξίσου. Στην εικόνα 28.α) παρατηρούμε την εμφάνιση ατέλεια τύπου kissing bond (KB) η οποία οφείλεται στην μη ικανοποιητική πλαστική παραμόρφωση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη λόγω των συνθηκών κακής ανάδευσης που επικρατούσαν. Στην προέκταση της ατέλειας (KB) και πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 28.β) παρατηρείται μια έντονη ασυνέχεια η οποία επιβεβαιώνει την ύπαρξη της παραπάνω ατέλειας. Ακόμη στην εικόνα 28.γ) είναι έντονη η κακή ανάμιξη των δύο υλικών. Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι η γρήγορη ταχύτητά πρόωσης δεν επέτρεψε και την κατακόρυφη ανάμιξη του υλικού σε ικανοποιητικό βαθμό, ενώ το βάθος διείσδυσης του πείρου παρέμεινε ίδιο για όλα τα δείγματα. Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η συγκόλληση A4 χαρακτηρίζεται ως αποτυχημένη.

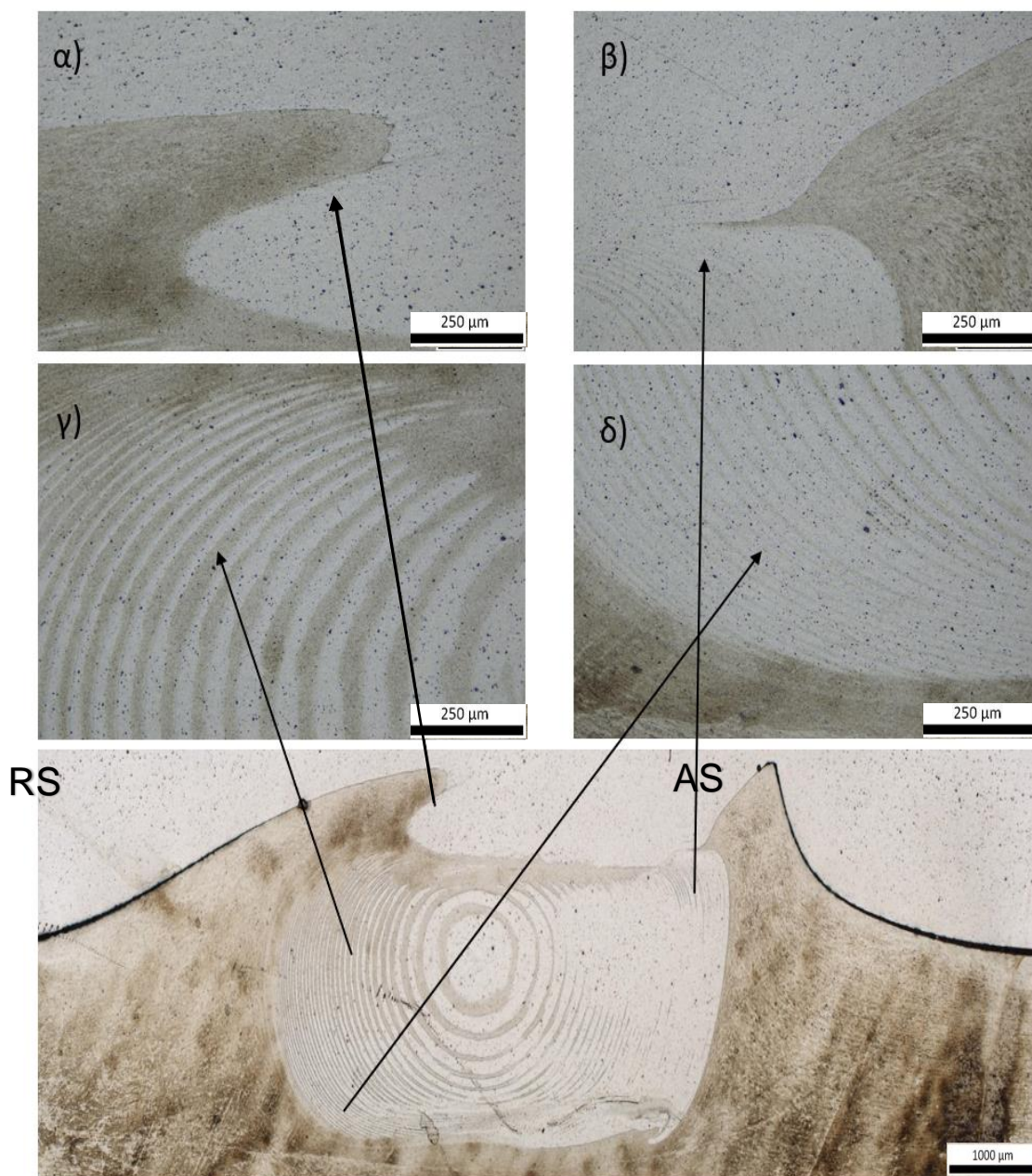
#### 4.1.5 Δοκίμιο Β1



Εικόνα 29:Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (B1) σε μεγέθυνση  $\times 2.0$ . Εικόνα: α) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , β) σε μεγέθυνση  $\times 10.0$ , γ) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , δ) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ .

Από τις Εικόνες 29.α),β),γ) και δ) της συγκόλλησης του δοκιμίου B1 παρατηρούμε ότι ενώ η υψηλή ταχύτητα περιστροφής δημιούργησε εξαιρετική ανάμιξη στην ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης, με πολύ ομοιόμορφες και συνεκτικές μικροδομές οπιοη rings σε όλο το εύρος του πυρήνα (Εικόνα 29.β), έχουμε της εμφάνιση έντονων ρηγματώσεων στο πάνω μέρος του λαιμού της συγκόλλησης, στη περιοχή του flow arm. Πιο συγκεκριμένα, στις Εικόνες 29.α),γ) και δ) παρατηρούνται ρωγμές στην διεπιφάνεια των υλικών, οι οποίες οφείλονται στις συνθήκες υψηλής θερμικής παροχής που δημιουργήθηκαν από το συνδυασμό χαμηλής ταχύτητας πρόωσης και υψηλής ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι ρηγματώσεις στο συγκεκριμένο σημείο επηρεάζονται καθοριστικά από την γεωμετρία του πείρου, και τον βαθμό που επηρεάζει αυτή την ροή του υλικού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου ο πείρος είχε σπείρωμα, οι υψηλές ροϊκές τάσεις που δημιουργήθηκαν δεν επέτρεψαν την ενοποίηση των δυο υλικών, ενώ πιθανόν να μην ήταν αρκετή και η κάθετη αξονική δύναμη που ασκούσε το περιαιχένιο. Από όλα τα παραπάνω προκύπτει εύκολα το συμπέρασμα ότι η συγκόλληση B1 χαρακτηρίζεται ως αποτυχημένη.

#### 4.1.6 Δοκίμιο Β2



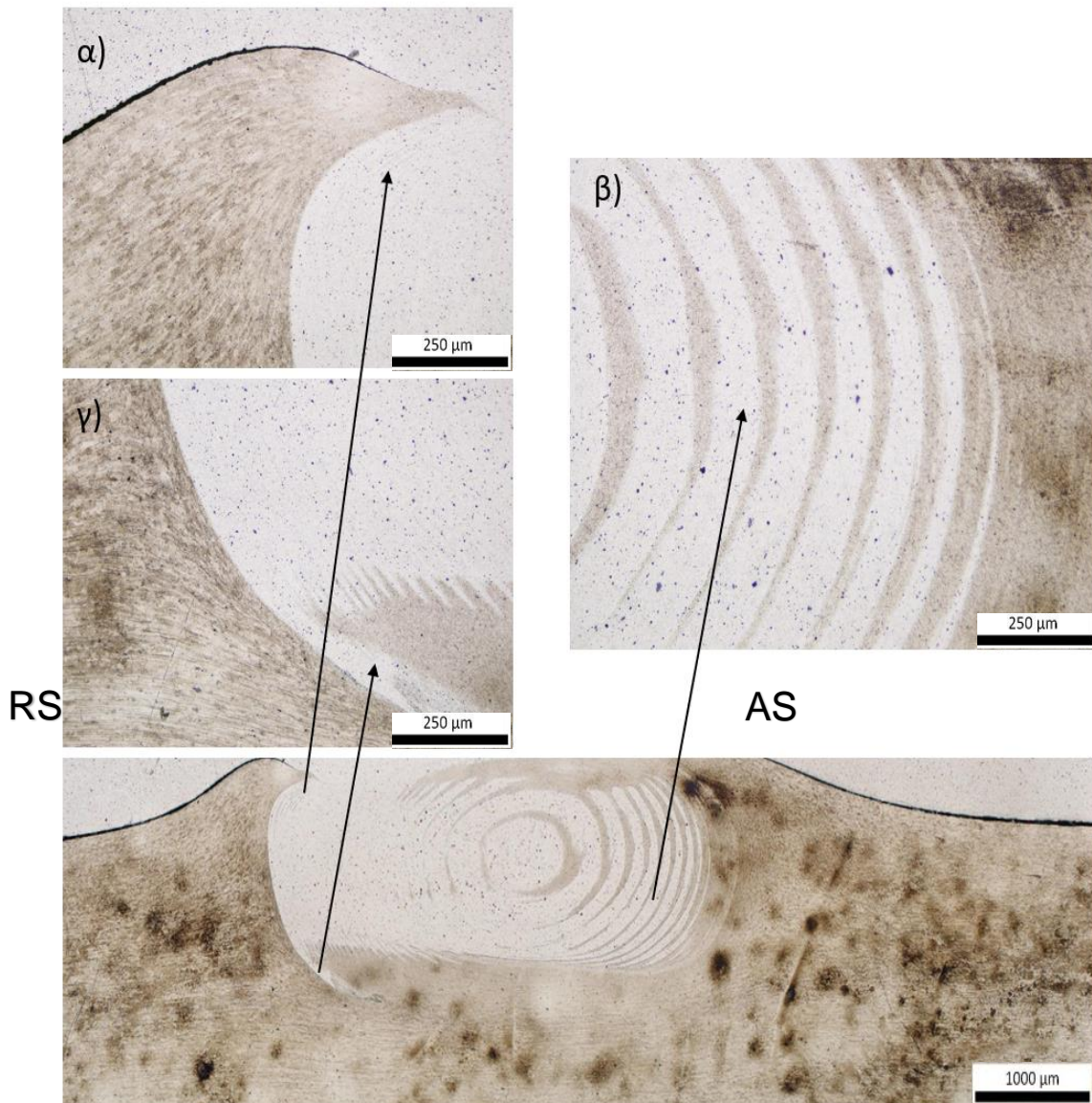
Εικόνα 30: Εικόνα 3.10: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A5) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0, δ) σε μεγέθυνση x20.0.

Από τις Εικόνες 30.α),β),γ) και δ) της συγκόλλησης του δοκιμίου Β2 παρατηρούμε ότι, σε σχέση με την συγκόλληση του δοκιμίου Β1, έχουμε εξίσου εξαιρετική ανάμιξη στον πυρήνα της συγκόλλησης, χωρίς όμως να υπάρχει



ίχνος μικρορωγμών σε όλο το εύρος της. Στις Εικόνες 30.γ),δ) παρατηρούνται οι πολύ συνεκτικές μικροδομές οπιοη rings που εκτείνονται σε όλο το εύρος της συγκόλλησης. Στις Εικόνες 30.α),β) φαίνεται η περιοχή του flow arm που δεν εμφανίζει καμία ασυνέχεια στη διεπιφάνεια των υλικών, γεγονός που αποδεικνύει την κατάλληλη ροή του υλικού. Στο κάτω μέρος της συγκόλλησης φαίνεται μια αχνή μαύρη σκιά, η οποία όμως διαπιστώθηκε στην παρατήρηση στο SEM ότι πρόκειται για αστοχία στο στάδιο της χημικής προσβολής ή του εγκιβωτισμού. Συνεπώς η συγκόλληση του δοκιμίου B2 χαρακτηρίζεται ως πιθανώς βέλτιστη.

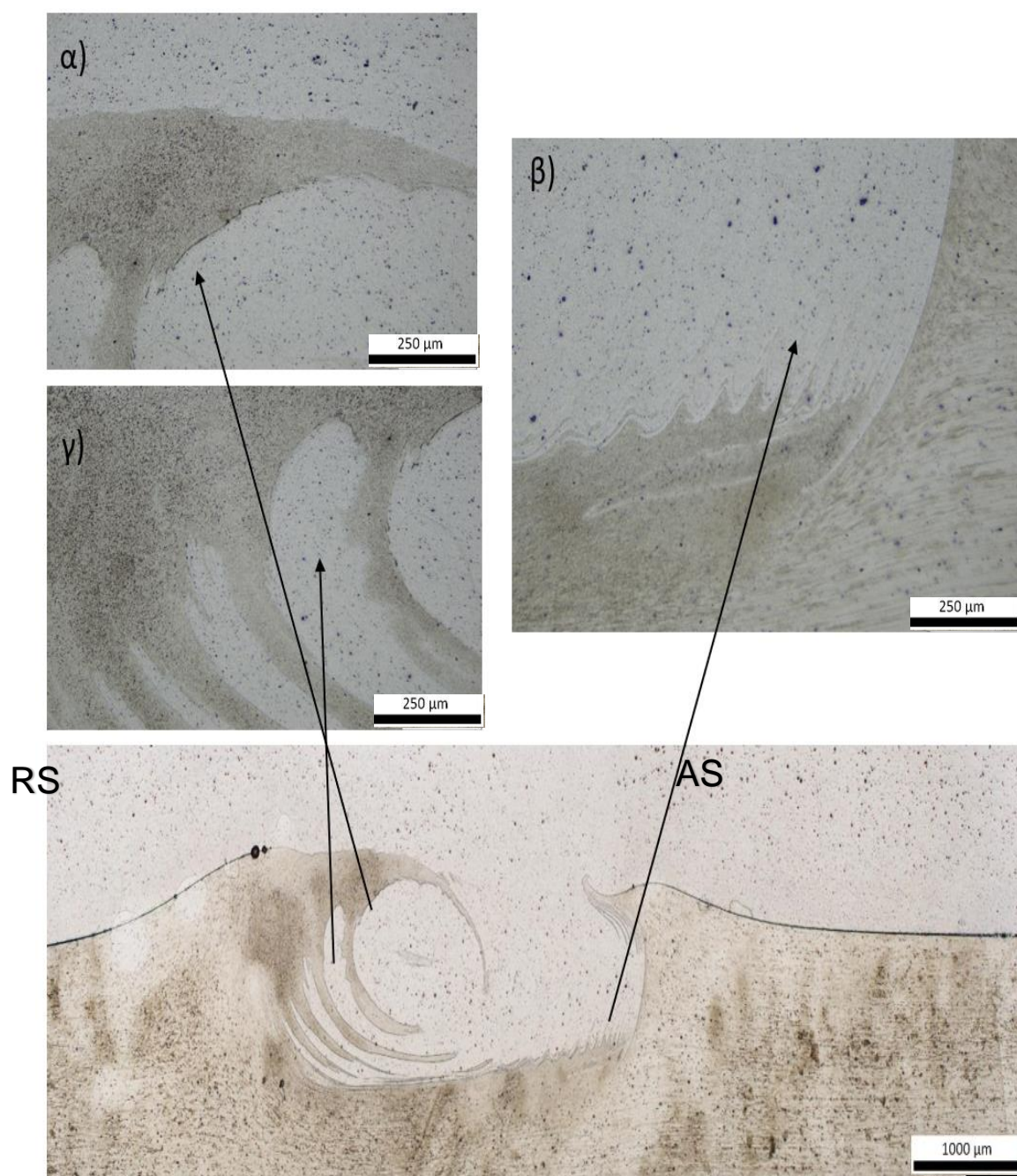
#### 4.1.7 Δοκίμιο B3



Εικόνα 31: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A7) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0.

Από τις Εικόνες 31 α),β) και γ) παρατηρούμε πως στη συγκόλληση του δοκιμίου B3 οι συνθήκες ανάδευσης ήταν τέτοιες που οδήγησαν σε καλή ανάδευση στο πυρήνα της συγκόλλησης και συνεπώς καλή ανάμιξη των δύο υλικών. Συγκριτικά με το δοκίμιο B2 που είχε μικρότερη ταχύτητα πρόωσης παρατηρούμε ότι η ροή του υλικού δεν ήταν τόσο ομαλή. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 31.α) και γ) παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καλή ανάμιξη των δυο υλικών όσο απομακρυνόμαστε από την ζώνη ανάδευσης. Παρόλα αυτά η συγκόλληση δεν έχει κάποια σημαντική ατέλεια που να την καταστήσει ως άστοχη, συνεπώς, η συγκόλληση B3 χαρακτηρίζεται ως επιτυχημένη.

#### 4.1.8 Δοκίμιο Β4



Εικόνα 32: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (B4) σε μεγέθυνση  $\times 2.0$ . Εικόνα: α) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , β) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ , γ) σε μεγέθυνση  $\times 20.0$ .

Από τις Εικόνες 32 παρατηρούμε πως στη συγκόλληση του δοκιμίου B4 οι συνθήκες ανάδευσης ήταν τέτοιες που οδήγησαν σε πολύ μικρό βαθμό ανάμιξης των δυο υλικών. Ήδη όπως παρατηρήσαμε από την συγκόλληση του δοκιμίου A4, η υψηλή ταχύτητα πρόωσης μειώνει την θερμική παροχή οδηγώντας σε μη ικανοποιητική ανάδευση. Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 32.β) και γ) παρατηρούμε πως η ροή που δημιουργήθηκε δεν επαρκούσε για να αναμίξει τα δυο υλικά όχι μόνο στα όρια της ζώνης αλλά και στην ίδια την ζώνη ανάδευσης. Επιπλέον στην Εικόνα 32.α), λίγο πάνω δηλαδή από τον πυρήνα της συγκόλλησης παρατηρείται μια έντονη ασυνέχεια που υποδεικνύει την ύπαρξη κενού ή αλλού είδους ατέλειας. Σύμφωνα με τα παραπάνω και συγκριτικά με τα άλλα δοκίμια η συγκόλληση του δοκιμίου B4 χαρακτηρίζεται ως αποτυχημένη.

Συνολικά λοιπόν από τη σύγκριση των 8 (οχτώ) συγκολλήσεων, καταλήγουμε σε 4 πιθανώς βέλτιστες συγκολλήσεις οι οποίες σημειώνονται με πράσινο χρωματισμό στον Πίνακα 8 που ακολουθεί.

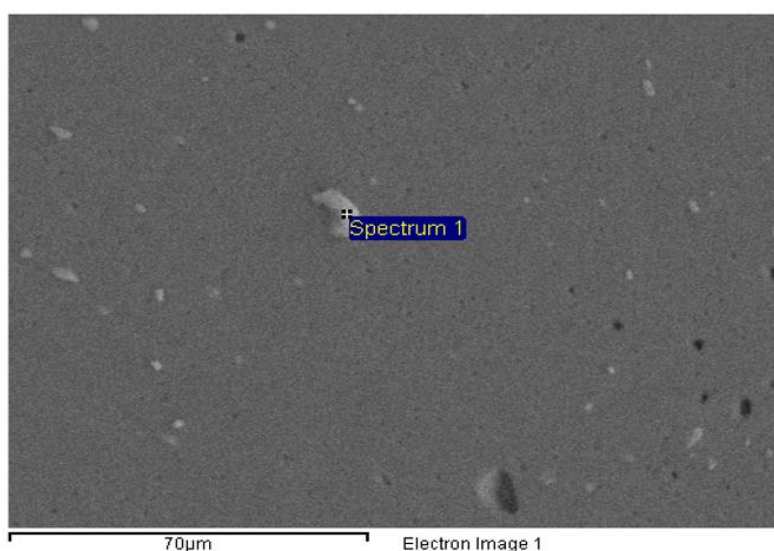
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας των πιθανώς βέλτιστων συγκολλήσεων

Αύξων Αριθμός Δοκιμίων	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Πάχος ελασμάτων	Είδος πείρου συγκόλλησης	Αποτέλεσμα
A1	590	51	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Επιτυχημένη
A2	590	83	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Επιτυχημένη
A3	590	127	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Αποτυχημένη
A4	590	203	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Αποτυχημένη
B1	1000	51	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Αποτυχημένη
B2	1000	83	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Πιθανώς Βέλτιστη
B3	1000	127	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Επιτυχημένη
B4	1000	203	3mm	Κυλινδρικός με σπείρωμα	Αποτυχημένη

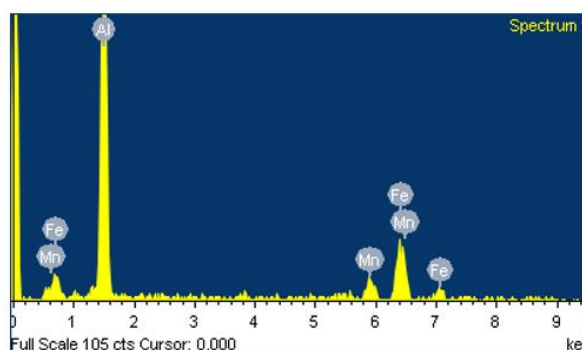
## 4.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Για την παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα. Η επιλογή έγινε με βάση τα κριτήρια που διαμορφώθηκαν μέσα από την παρατήρηση με τον οπτικό μικροσκόπιο. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα δείγματα: A1 ως αρκετά ποιοτικής ανάμιξης συγκόλληση, B1 ως πλήρη αστοχία του υλικού (δημιουργία πολλαπλών ρωγμών), B2 ως εξαιρετική ποιότητα συγκόλλησης και ως μη ικανοποιητική ανάδευση του υλικού. Σε καθένα από τα παραπάνω δοκίμια έγινε μελέτη σε όλο το εύρος των συγκολλήσεων καθώς και εστίαση σε συγκεκριμένα σημεία εμφάνιζαν ιδιομορφία στη μικροδομή τους.

### 4.2.1 Δοκίμιο A1



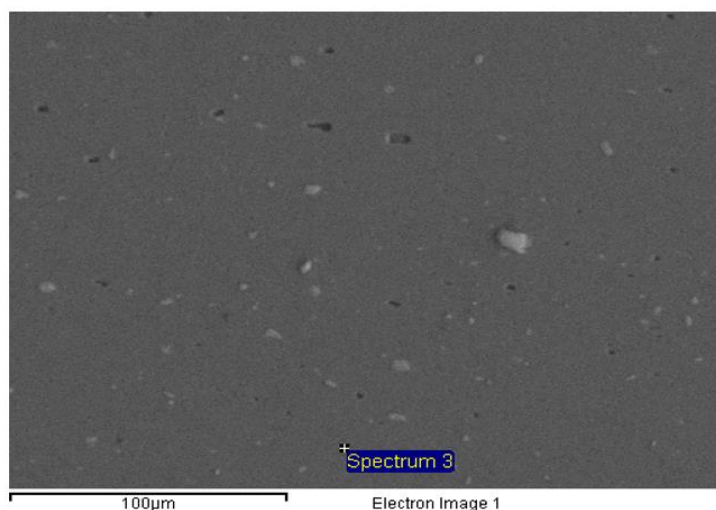
Element	Weight%	Atomic%
Al K	61.70	76.86
Mn K	9.59	5.87
Fe K	28.70	17.27
Totals	100.00	



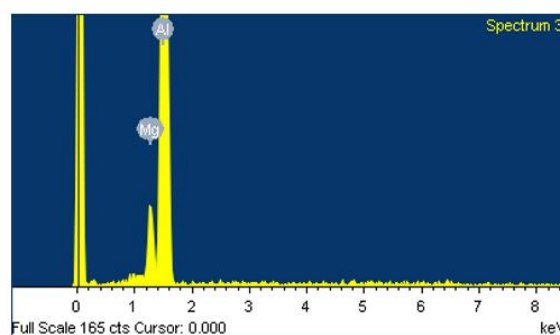
Εικόνα 33: S.E.M., Μέτρηση σε κατακρήνισμα της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιου και χημική ανάλυση του Spectrum 1.

Εστιάζοντας στη ζώνη ανάδευσης παρατηρούνται χαρακτηριστικά κατακρήνισματα με μεγαλύτερο μέγεθος από την μητρική φάση, έντονο ανάγλυφο και ακανόνιστο σχήμα. Λαμβάνοντας την χημική ανάλυση του EDS,

το μεγάλο ποσοστό σε Fe καθώς και η ύπαρξη Mn, υποδηλώνουν μια αρκετά συνηθισμένη μορφή ακαθαρσίας στα κράματα αλουμινίου που εμφανίζεται ως διμεταλλική φάση Al-Fe, Al-Fe-Si και Al-Fe-Mn-Si, εξαρτώμενες πάντα από τις συνθέσεις του κράματος.



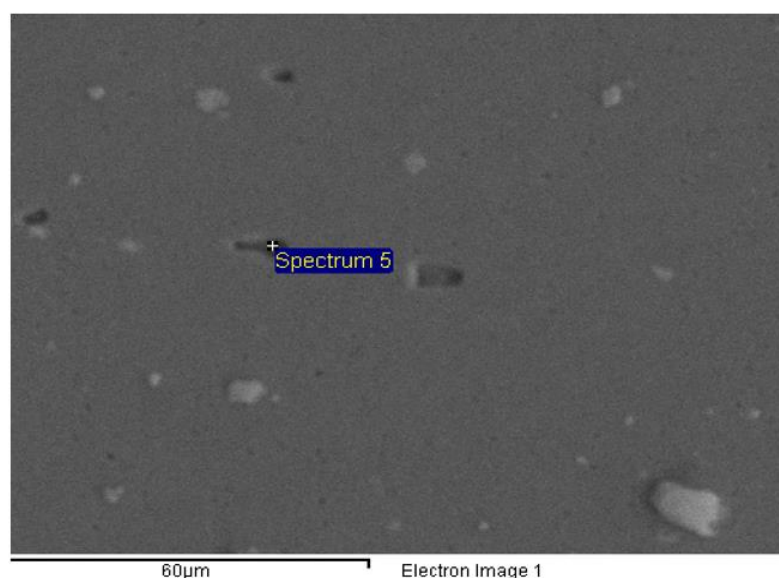
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	4.69	5.17
Al K	95.31	94.83
Totals	100.00	



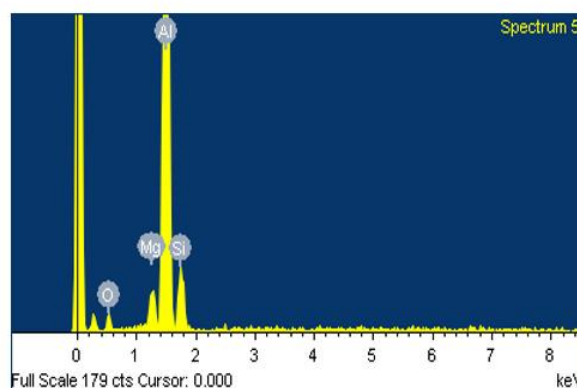
Εικόνα 34: S.E.M., Μέτρηση σε σημείο του μητρικού υλικού της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιου και χημική ανάλυση του Spectrum 3.

Παρατηρούνται στην Εικόνα 34 οι μονομεταλλικές φάσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Σε όλο το εύρος της ζώνης ανάδευσης παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή λεπτόκοκκων μικροδομών, γεγονός που ήταν αναμενόμενο λόγω της χαμηλής ταχύτητας πρόωσης η οποία επέτρεπε την διατήρηση σε ένα συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος.

Η χημική ανάλυση αναφέρεται σε σημείο του υλικού στη ζώνη ανάδευσης και πρόκειται για το 5083-H111 με βάση τα ποσοστά σε Mg.

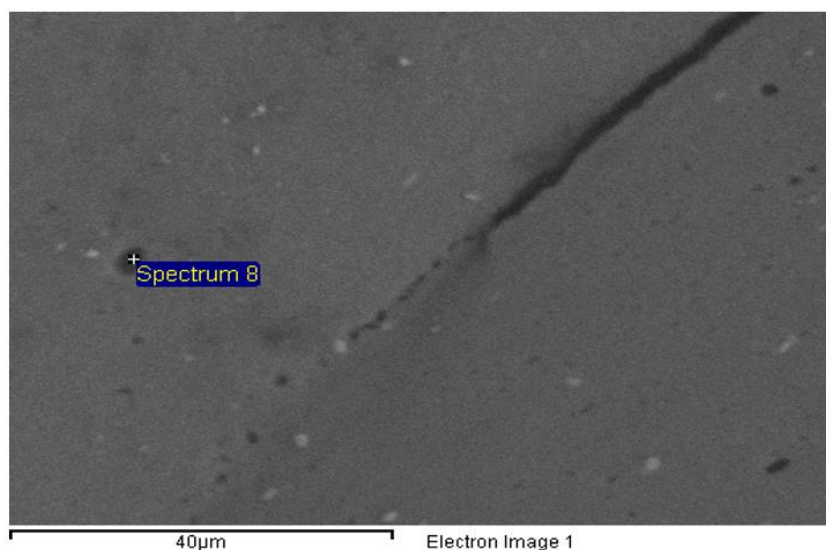


Element	Weight%	Atomic%
O K	10.85	17.07
Mg K	3.56	3.68
Al K	69.70	65.01
Si K	15.89	14.24

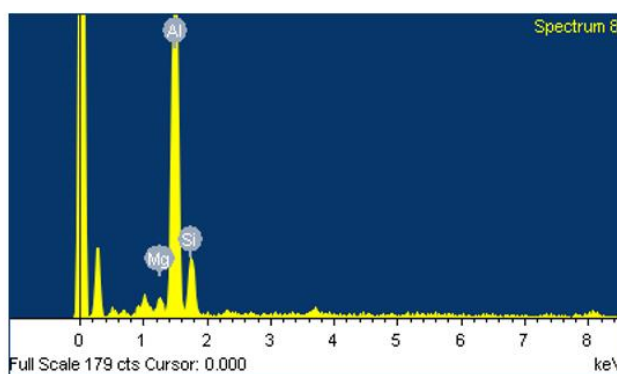


Εικόνα 35: S.E.M., Μέτρηση σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 5.

Στη συνέχεια σε διαφορετική μέτρηση που έγινε, πάλι παρατηρούμε τα όρια των ζωνών, ενώ αυτή τη φορά η χημική σύσταση απευθύνεται σε φάση η οποία περιέχει πυρίτιο καθώς και ένα χαμηλό ποσοστό σε οξυγόνο. Σύμφωνα με αυτή τη χημική σύσταση πρόκειται για κάποια ακαθαρσία πιθανότατα κατά τη διαδικασία της λείανσης. Τα συγκεκριμένα μαύρα στίγματα έχουν χαμηλό ανάγλυφο και εμφανίζονται και σε άλλες γειτονικές περιοχές της ζώνης ανάδευσης.



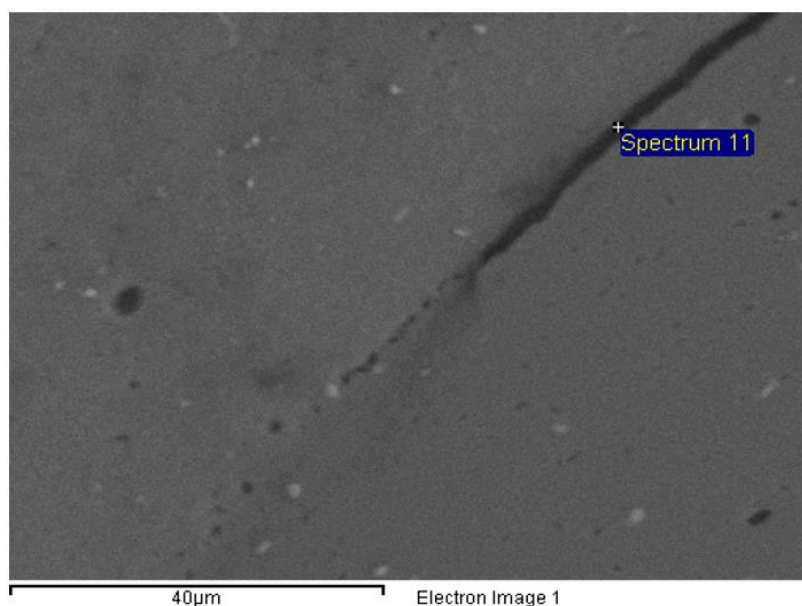
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	3.00	3.35
Al K	72.90	73.35
Si K	24.10	23.30
Totals	100.00	



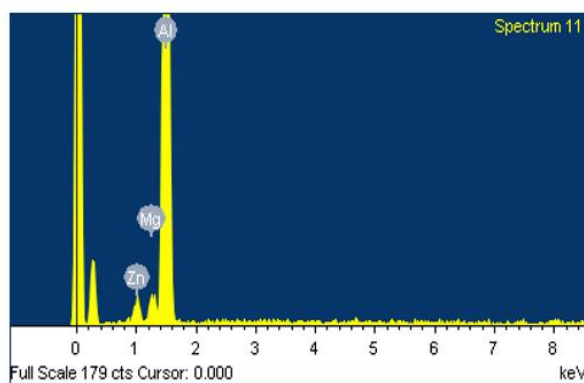
Εικόνα 36: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A1 Δοκίμιου και χημική ανάλυση του Spectrum 8.

Ωστόσο, υπάρχουν και σημεία στην Εικόνα 36 όπου δεν υπάρχει η εμφάνιση οξυγόνου, και σε αυτήν την περίπτωση η παρουσία του Πυριτίου υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιας ενδομεταλλικής φάσης. Πιθανότατα μπορεί να είναι σωματίδια ( $Mg_2Si$ ), καθώς τα κράματα δεν έχουν υπερβεί την θερμοκρασία των  $450C^\circ$  από την φύση της συγκόλλησης, άρα είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους δημιουργίας τους .





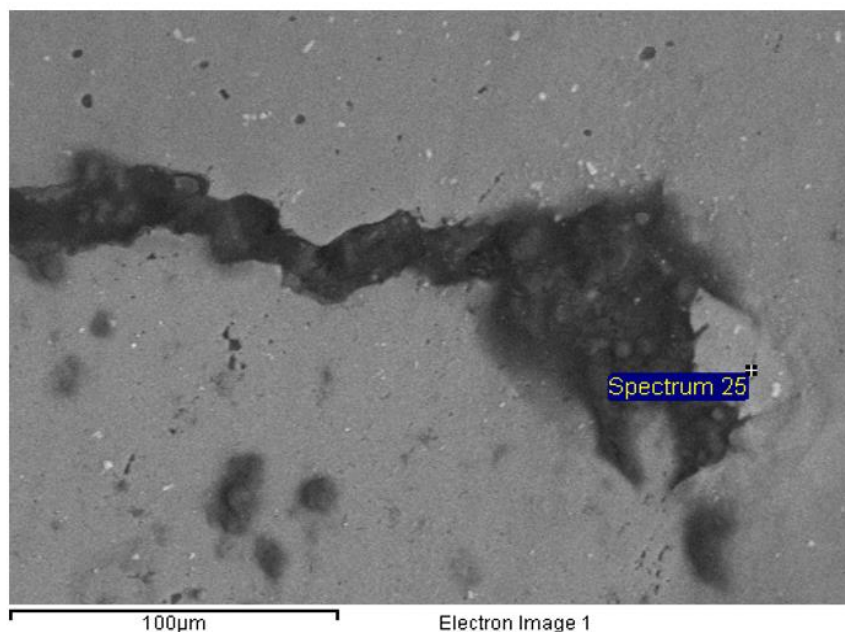
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	2.54	2.94
Al K	90.26	93.97
Zn K	7.19	3.09
Totals	100.00	



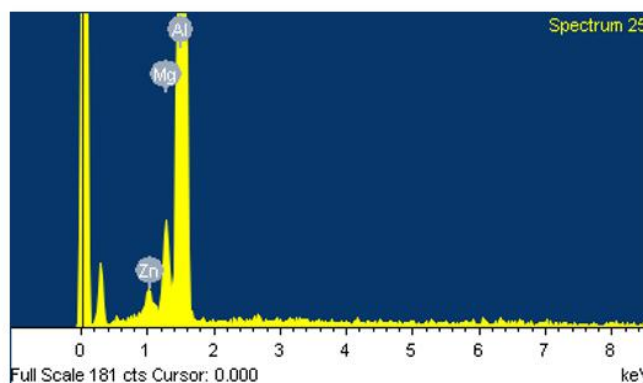
Εικόνα 37: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 11.

Στην εικόνα 37 παρατηρείται η ασυνέχεια λίγο δίπλα από την θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη. Από τα στοιχεία που ανιχνεύονται κατά την ανάλυση EDS η παραπάνω περιοχή, πιθανώς, να περιέχει κάποιες από τις ενδομεταλλικές ενώσεις  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $MgZn_2$  που εμφανίζονται συχνά ως φάσεις σκλήρυνσης στα κράματα αλουμινίου 7075.

#### 4.2.2 Δοκίμιο B1

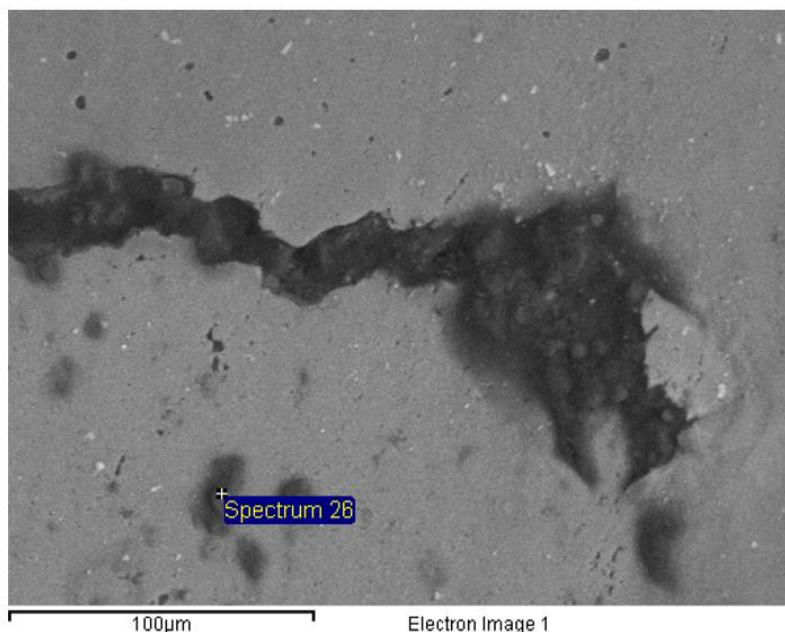


Element	Weight%	Atomic%
Mg K	3.65	4.09
Al K	93.95	94.91
Zn K	2.40	1.00
Totals	100.00	

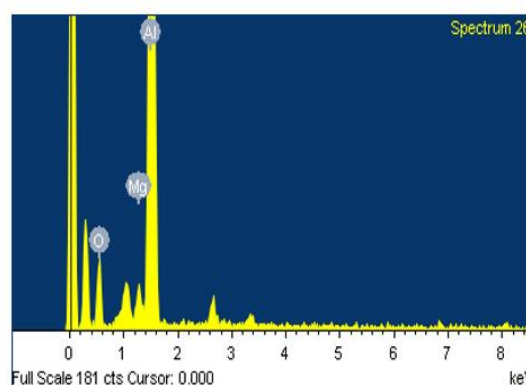


Εικόνα 38: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του B1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 25.

Στην Εικόνα 38 παρατηρείται η ασυνέχεια που εντοπίζεται στο πάνω μέρος του flow arm της συγκόλλησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως και σύμφωνα με την χημική ανάλυση η εστιασμένη περιοχή αφορά πιθανώς μονομεταλλικές ενώσεις  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $MgZn_2$  που εμφανίζονται συχνά ως φάσεις σκλήρυνσης στα κράματα αλουμινίου 7075.



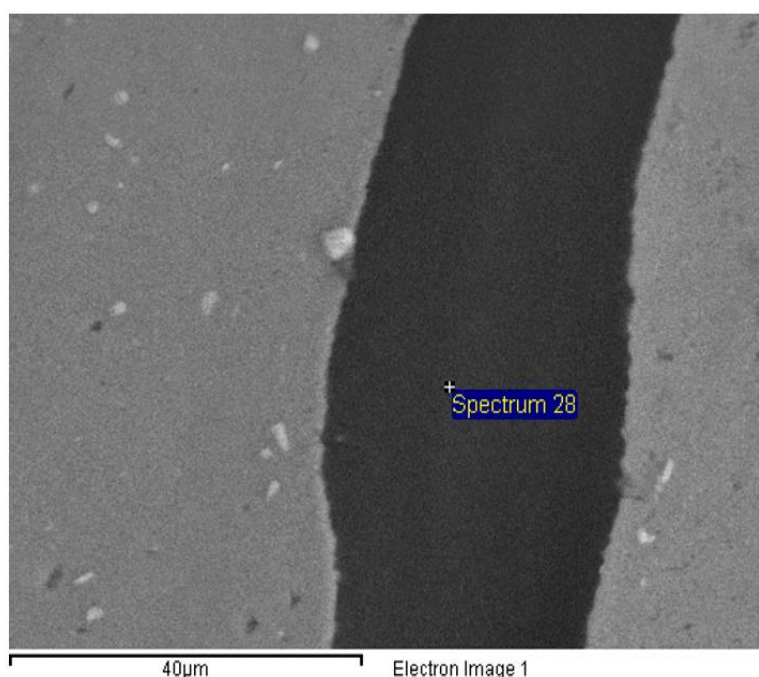
Element	Weight%	Atomic%
O K	23.41	33.94
Mg K	2.22	2.11
Al K	74.37	63.94
Totals	100.00	



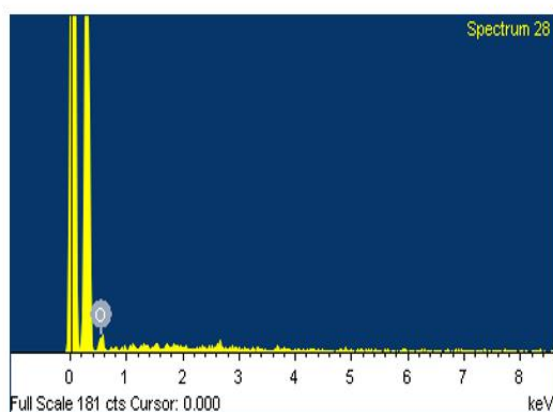
Εικόνα 39: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A5 Δοκίμιου και χημική ανάλυση του Spectrum 26.

Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης που έχουν εστιάσει στις έντονες ρηγματώσεις που παρουσίασε το δοκίμιο A5 στην περιοχή του arm flow. Οι χημικές αναλύσεις δείχνουν εντονη εμφάνιση οξυγόνου ειδικά στο κεντρο των ρωγμων του δοκιμίου.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39 επικρατούν περιοχές, που είναι πιο θολές και άλλες που είναι αρκετά πιο ευκρινείς. Αυτό υποδικνεύει μεγάλες διαφοροποιήσεις στο ανάγλυφο της συγκεκριμένης εστιασμένης περιοχής. Πιο αναλυτικά οι περιοχές χαμηλότερης ευκρίνειας έχουν και υψηλότερο ανάγλυφο, συνεπώς δεν μπορούν να αποτελούν σημεία από τα οποία έχει γίνει αποκόλληση κάποιου οξειδίου ή κάποιας σκληρής φάσης. Έτσι, πιθανότατα πρόκειται για κάποια ακαθαρσία που έχει προσκολληθεί στην μικροδομή και όχι για κάποια φάση του υλικού.

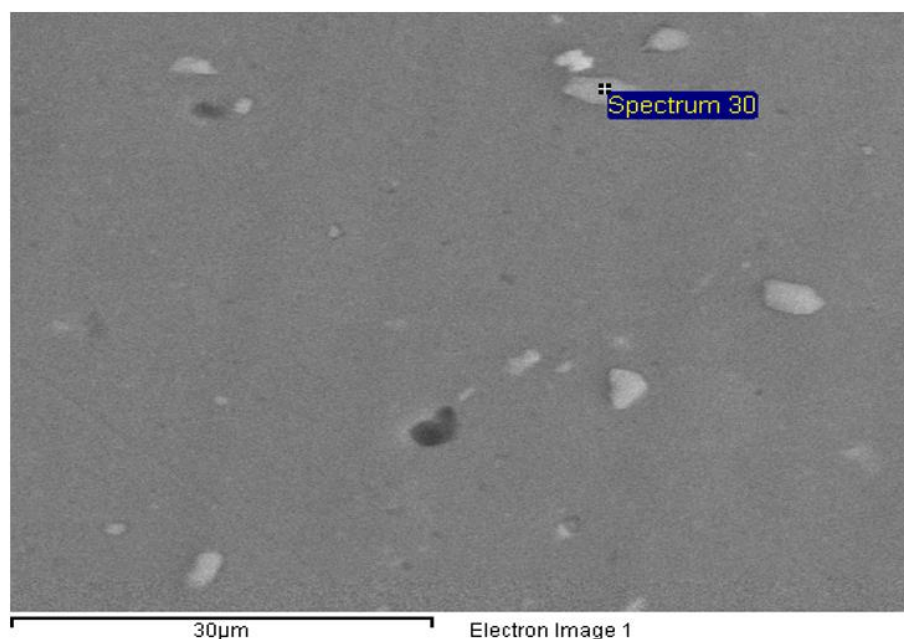


Element	Weight%	Atomic%
O K	100.00	100.00
Totals	100.00	

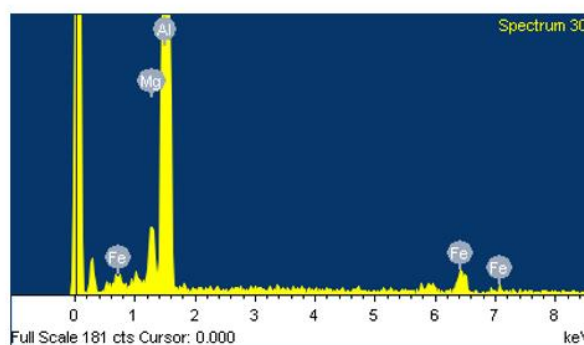


Εικόνα 40: S.E.M., Επιλογή σε περιοχή εντός της ρωγμής του B1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 28.

Στην Εικόνα 40 παρατηρούμε την μεγαλύτερη ρωγμή που δημιουργήθηκε κατά την συγκόλληση του δοκίμιου B1. Γενικότερα στις ρωγμές τέτοιου μεγέθους είναι εύκολο να παγιδευτεί κάποια ακαθαρσία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πιθανότερο ενδεχόμενο, που εξηγεί την χημική ανάλυση είναι να έχει εγκλωβιστεί νερό ή αλκοόλη με την οποία έγινε καθαρισμός των δειγμάτων πριν από την τοποθέτηση τους στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.



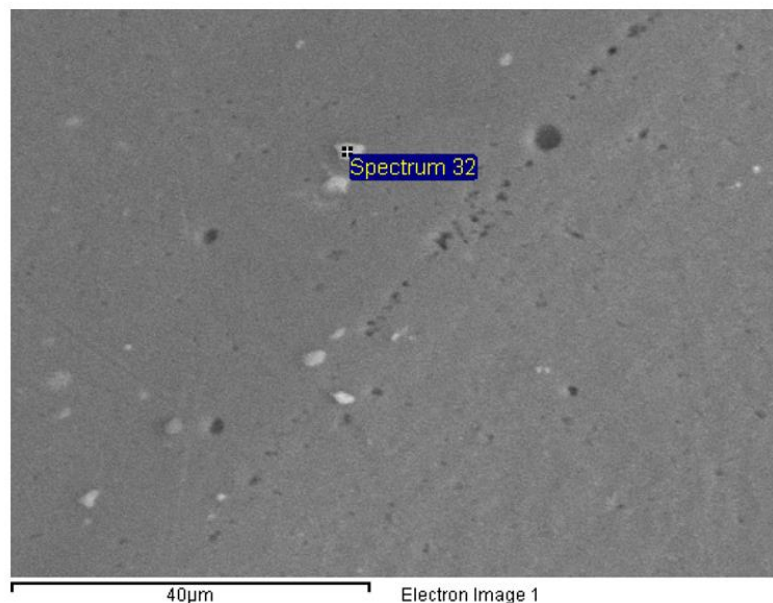
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	3.49	3.99
Al K	90.16	92.85
Fe K	6.35	3.16
Totals	100.00	



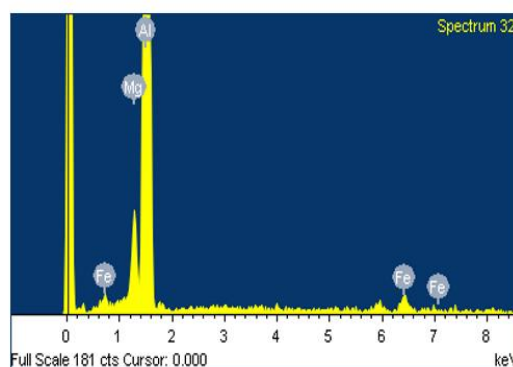
Εικόνα 41: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήνισμα του flow arm του B1 Δοκίμιου και χημική ανάλυση στο Spectrum 30

Στο συγκριμένο δοκίμιο, παρατηρείται ακόμα πιο μικρό μέγεθος κατακρημνισμάτων . αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου κατά την οποία δεν προσδίδεται ο απαραίτητος χρόνος παραμονής σε συγκριμένη θερμότητα ώστε να αναπτυχθούν οι κόκκοι. Χημική ανάλυση στην μήτρα του υλικού μας δίνει μεγάλο ποσοστό αλουμινίου, όπως ακριβώς αναμένεται, ενώ τα διάφορα ποσοστά σιδήρου οφείλονται σε τυχόν ακαθαρσίες του κράματος που αναφέρθηκαν και προηγουμένως.

### 4.2.3 Δοκίμιο B2

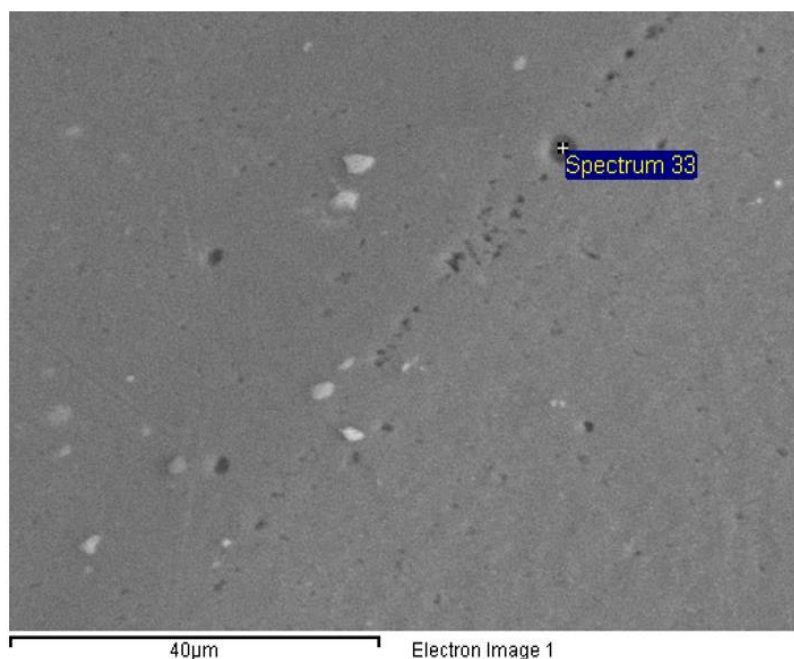


Element	Weight%	Atomic%
Mg K	3.88	4.37
Al K	92.44	93.83
Fe K	3.68	1.80
Totals	100.00	

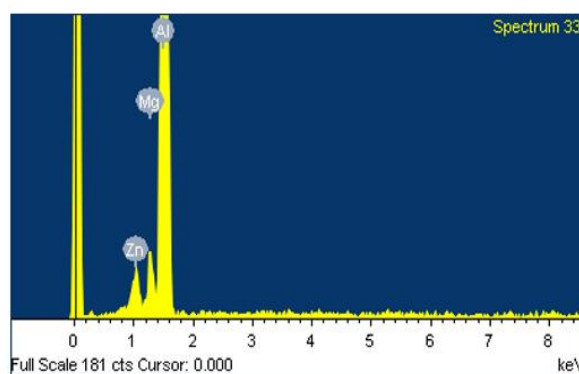


Εικόνα 42: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B2 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 32.

Εστιάζοντας στη ζώνη ανάδευσης παρατηρούνται χαρακτηριστικά κατακρήμνισμα με μεγαλύτερο μέγεθος από την μητρική φάση, έντονο ανάγλυφο και ακανόνιστο σχήμα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την χημική ανάλυση του EDS, το χαρακτηριστικό ποσοστό σε Fe καθώς και η ύπαρξη Mn, υποδηλώνουν μια αρκετά συνηθισμένη μορφή ακαθαρσίας στα κράματα αλουμινίου που εμφανίζεται ως διμεταλλική φάση Al-Fe, Al-Fe-Si και Al-Fe-Mn-Si, εξαρτώμενες πάντα από τις συνθέσεις του κράματος κατά την παραγωγή του.



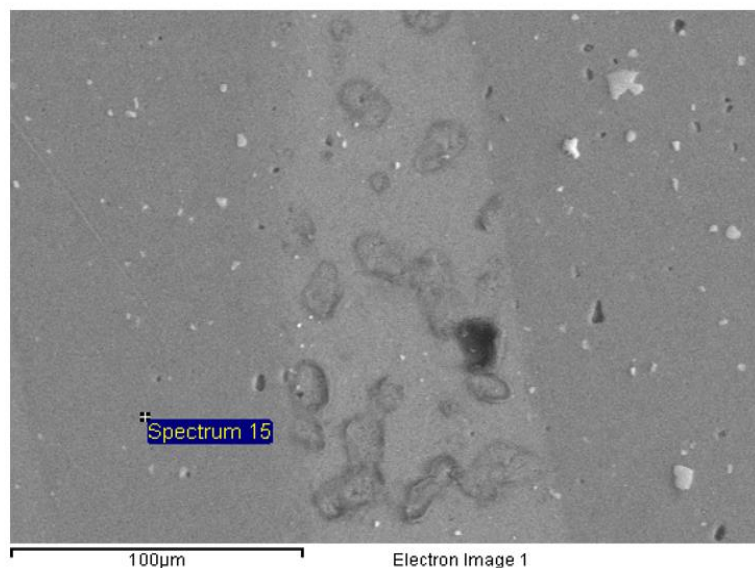
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	2.84	3.28
Al K	90.00	93.65
Zn K	7.16	3.07
Totals	100.00	



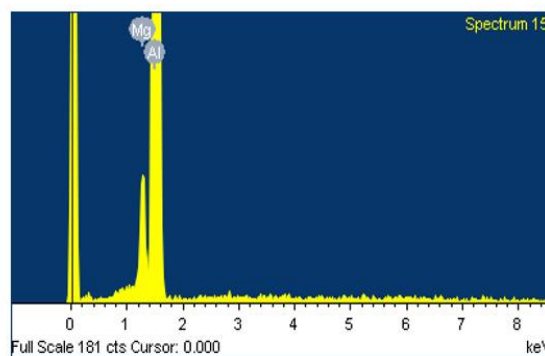
Εικόνα 43: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B2 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 33.

Στην Εικόνα 43 είναι διακριτά τα όρια της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης ανάδευσης. Στη χημική ανάλυση EDS για την μήτρα τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα, Παρατηρούνται όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία του κράματος 7075-T651. Πιθανότατα συνθέτουν τις φάσεις σκλήρυνσης σκλήρυνσης [η'] ( $MgZn_2$ ) και [η] ( $MgZn_2$ ) καθώς και τα υπόλοιπα κατακρημνίσματα ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $Mg_2Si$ ).

#### 4.2.4 Δοκίμιο B4



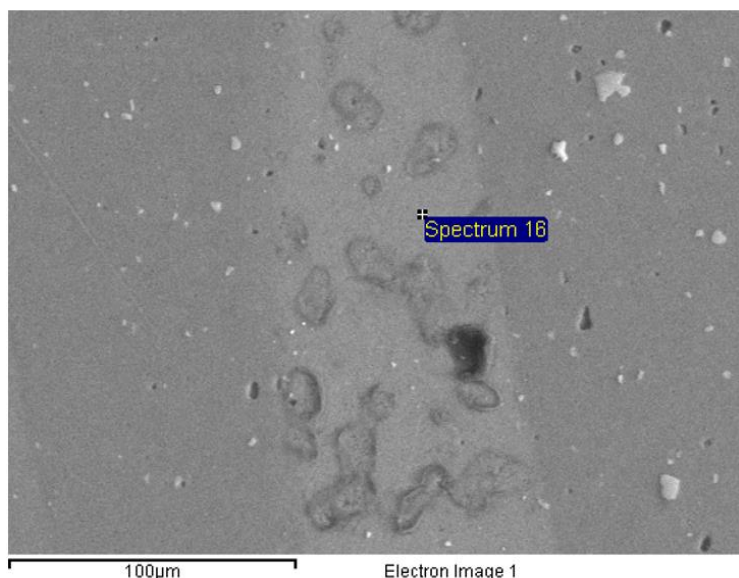
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	4.49	4.95
Al K	95.51	95.05
Totals	100.00	



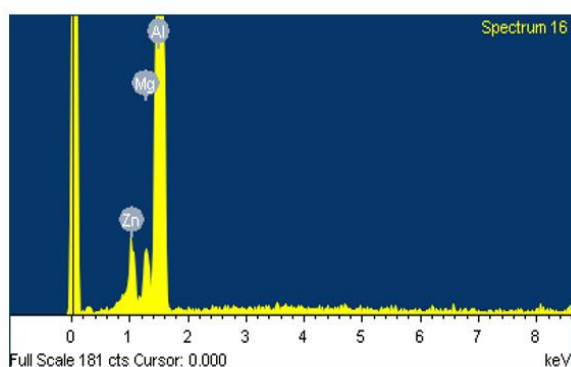
Εικόνα 44: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 15.

Στην Εικόνα 44 παρατηρείται η ζώνη ανάδευσης του δοκίμιο B4 και πιο συγκεκριμένα είναι εμφανή τα όρια των δύο υλικών. Γεγονός που αποδεικνύεται και από την χημική ανάλυση του EDS. Η περιοχή που αναφέρεται το Spectrum 15 είναι ξεκάθαρα η μήτρα του κράματος 5083-H111 κρίνοντας με βάση τα ποσοστά σε Mg.





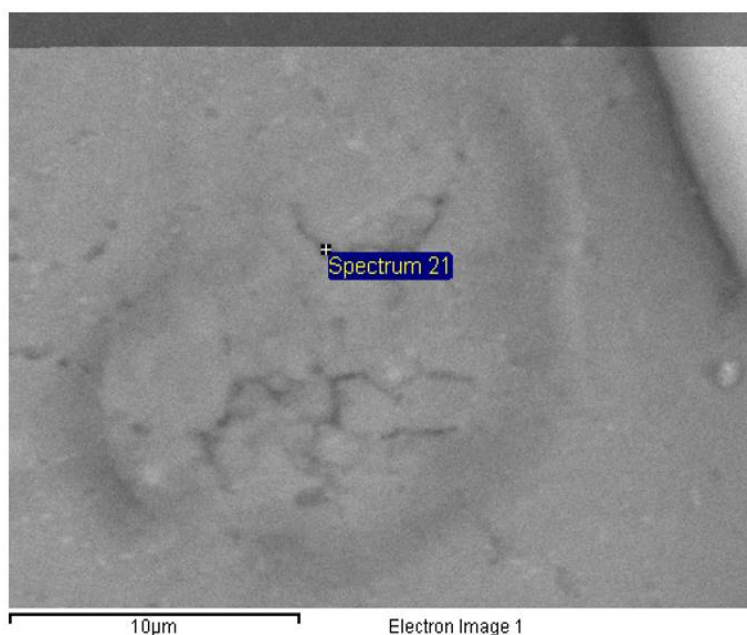
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	2.29	2.63
Al K	91.52	94.73
Zn K	6.19	2.64
Totals	100.00	



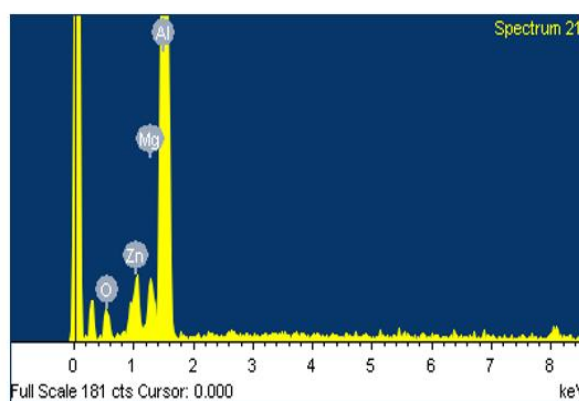
Εικόνα 45: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιου και χημική ανάλυση του Spectrum 16.

Σε συνέχεια από τον σχολιασμό της Εικόνας 45 , παρατηρήθηκε και η περιοχή του υλικού 7075-T651, όπως ήταν αναμενόμενο από το Spectrum 15 αλλά και αποδείχθηκε και από την χημική ανάλυση του EDS σύμφωνα με τα ποσοστά σε Zn

Ωστόσο, αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η μορφολογία αυτών των σκουρόχρωμων σφαιροειδών σχηματισμών εντός της μήτρας του κράματος 7075. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο B4 είναι το μοναδικό εκ των 8, στο οποίο παρατηρήθηκαν αυτές οι μορφολογίες στην ζώνη ανάδευσης.



Element	Weight%	Atomic%
O K	8.90	14.66
Mg K	2.79	3.02
Al K	81.51	79.58
Zn K	6.80	2.74



Εικόνα 46: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 21.

Εστιάζοντας στις ιδιόμορφες αυτές μικροδομές (Spectrum 21) παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση στο ανάγλυφο ειδικά στα όρια με το μητρικό υλικό. Επίσης αξιοσημείωτες είναι κάποιες μικρορωγμές ακανόνιστου προσανατολισμού που εμφανίζονται στο κέντρο αυτών των δομών. Σύμφωνα με την χημική ανάλυση EDS (Εικόνα 46) η παρουσία του οξυγόνου ενισχύει την ύπαρξη των ρωγμών. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι μορφολογίες αυτές εμφανίστηκαν μόνο στο δοκίμιο B4 το οποίο συγκριτικά με τα υπόλοιπα συγκολλήθηκε σε πιο ακραίες παραμέτρους, δηλαδή υψηλή ταχύτητα περιστροφής και υψηλή ταχύτητα πρόωσης. Ο συνδυασμός δημιούργησε υψηλή θερμική παροχή και σε αλληλεπίδραση με τις μεγάλες τάσεις δημιούργησε αυτές τις ιδιόμορφες μικροδομές στη μήτρα του κράματος 7075, στη ζώνη ανάδευσης.

### 4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων και της μικροδομής των δοκιμίων, σε συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης FSW και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα κράματα αλουμινίου 5083-H111 και 7075 T651 συγκολλήθηκαν σε διάταξη Lap Joint και κρίνονται συμφωνά με τις παραγόμενες μηχανικές ιδιότητες και την μικροδομή του. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι:

1. Τα αποτελέσματα της μελέτης κατέδειξαν τέσσερις πιθανές βέλτιστες παραμέτρους μεταξύ των ανόμοιων κραμάτων AA5083 και AA7075. Οι πρώτες δύο (A1 και A2) πραγματοποιήθηκαν με ίδια ταχύτητα περιστροφής 500 rpm και ταχύτητες πρόωσης 51 mm/min και 83 mm/min αντίστοιχα. Οι επιπλέον δύο (B2 και B3) πραγματοποιήθηκαν με ίδια ταχύτητα περιστροφής 1000rpm και ταχύτητες πρόωσης 83 mm/min και 127 mm/min αντίστοιχα.
2. Φαινομενικά όλες οι συγκολλήσεις εκτός της B1 θεωρούνται επιτυχημένες, καθώς έχει γίνει συσσωμάτωση των δύο υλικών. Ωστόσο, στις περιπτώσεις μη ικανοποιητικής ανάμιξης οι συγκολλήσεις απορρίφθηκαν.
3. Η συγκόλληση του δοκιμίου B1 ήταν αποτυχημένη, καθώς υπήρξε δημιουργία πολλαπλών ρωγμών σε όλο το μήκος του flow arm της συγκόλλησης. Οι συνθήκες συγκόλλησης ήταν: 1000rpm ταχύτητα περιστροφής και 51mm/min ταχύτητα πρόωσης.
4. Ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων σύμφωνα με την οπτική και την ηλεκτρονική μικροσκοπία είναι αυτός του δοκιμίου B2 με παραμέτρους διεργασίας: 1000rpm ταχύτητα περιστροφής και 83mm/min ταχύτητα πρόωσης.
5. Με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης, μειώνεται σημαντικά ο βαθμός ανάμιξης των δυο υλικών υπονομεύοντας έτσι την ποιότητα της συγκόλλησης.
6. Η ταχύτητα πρόωσης 200mm/min δεν δημιούργησε σε καμία περίπτωση καλή ανάδευση, οπότε θεωρείται μη ικανοποιητική παράμετρος για τα συγκεκριμένα υλικά
7. Οι ταχύτητες 590rpm και 1000rpm είναι επαρκείς ταχύτητες περιστροφής για την αποτελεσματική πλαστικοποίηση των κραμάτων 5083 και 7075, δεδομένου ότι η ταχύτητα πρόωσης δεν είναι αρκετά υψηλή.
8. Η έντονη διαφοροποίηση του ανάγλυφου σε ορισμένα δείγματα όπως και η εμφάνιση οξυγόνου στην χημική ανάλυση EDS στην περιοχή των ρωγμών στο δείγμα B1 υποδεικνύουν την ύπαρξη ακαθαρσιών στη επιφάνεια των δειγμάτων προς μελέτη

9. Η έξοδος του πείρου από την επιφάνεια συγκόλλησης πάντα προκαλεί την δημιουργία τρύπας στο πέρας της συγκόλλησης, ασχέτως από την ταχύτητα απομάκρυνσης του εργαλείου.
10. Βασική προϋπόθεση για την δημιουργία ικανοποιητικών συγκολλήσεων με την μέθοδο FSW αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων της μεθόδου και ιδιαίτερα η ταχύτητα πρόωσης, η ταχύτητα περιστροφής και η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης.
11. Η εμφάνιση συγκεκριμένων ενδομεταλλικών φάσεων για το εκάστοτε κράμα ήταν αναμενόμενη εξαιτίας του συγκεκριμένου θερμοκρασιακού εύρους που αναπτύσσεται στην μέθοδο FSW.

#### 4.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας μελλοντικά, μπορεί να επεκταθεί σύμφωνα με τις παρακάτω προτάσεις:

- ❖ Μελέτη των ανόμοιων συγκολλήσεων ως προς τις ιδιότητες κόπωσης καθώς και την αντοχή σε διάβρωση.
- ❖ Μελέτη και παρακολούθηση του εύρους της θερμικής παροχής κατά τη συγκόλληση. Παρακολούθηση μέσω ειδικών θερμομέτρων ή θερμοκαμερών, ώστε να είναι δυνατή η πρόγνωση και η ερμηνεία της μικροδομής και, συνεπώς, η ποιότητα της συγκόλλησης.
- ❖ Πραγματοποίηση και μελέτη συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση των κραμάτων 5083 και 7075 με χρήση εργαλείου συγκόλλησης διαφορετικής γεωμετρίας για τον προσδιορισμό της επίδρασης στην μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.
- ❖ Μελέτη των ιδιόμορφων μικροδομών στην ζώνη ανάδευσης του κράματος 7075 υπό παραμέτρους συγκόλλησης: 1000rpm ταχύτητα περιστροφής, 203mm/min ταχύτητα πρόωσης, 3° Κλίση, κυλινδρικό εργαλείο με σπείρωμα.

## 5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διάγραμμα θερμοκρασίας περιεκτικότητας. Πηγή [1] .....	18
Εικόνα 2: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στο οποίο απεικονίζονται οι αλλαγές στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της δυναμικής αποκατάστασης.[1] 22	
Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της DDRX (a),(b) Δημιουργία πολλαπλών κορυφών κατά την έναρξη της καταπόνησης (c) δημιουργία της χαρακτηριστικής μικροδομής περιδέραιου (d) επίδραση των παραμέτρων παραμόρφωσης στη κινητική της ανακρυστάλλωσης (e) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε εξάρτηση με το αρχικό μέγεθος κόκκου D0, (f) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες παραμόρφωσης. ....	24
Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση των χαρακτηριστικών σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία της CDRX. (a) καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης,(b) Σχέση μεταξύ τάσης και αύξησης της γωνίας προσανατολισμού των ορίων των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες, (c) σχηματική αναπαράσταση των μικροδομών HIM, LRGB και MSBs, (d) εξέλιξη του μέσου μεγέθους των κόκκων σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση .....	26
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της εξέλιξης τους πάχους των κόκκων και του μεγέθους των υποκόκκων κατά τη διάρκεια της GDRX. (a) ροή τάσης, b) πάχος κόκκου και εξέλιξη μεγέθους του υποκόκκου, (c) εξέλιξη των LAGBs μετρούμενες με TEM, οι ζώνες παραμόρφωσης και το ποσοστό των HAGBs δεν λαμβάνονται υπόψη, (d) εξέλιξη των HAGBs, όπου έχει προστεθεί η περίπτωση των LAGBs μικρότερων από 2 $\sigma$ για λόγους σύγκρισης.....	28
Εικόνα 6: Αναπαράσταση της βασικής αρχής λειτουργίας της περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής. Πηγή : [19] .....	30
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με γραμμική παλινδρόμηση. Πηγή: [5] .....	31
Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με κίνηση σε τροχιά. Πηγή: [20] .....	32
Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης δια τριβής με τοξοειδή περιστροφή. ....	33
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση .....	34
Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων συγκόλλησής δια τριβής με ανάδευση. Πηγή: [22] .....	36
Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιείται κατά τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση (FSW) Πηγή: [22] .....	38
Εικόνα 13: Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) με κλίση του άξονα του εργαλείου προς τα πίσω. Πηγή: [23].....	39
Εικόνα 14:Επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στην αντοχή σε εφελκυσμό συναρτήσει της διάμετρου του περιαιχένιου. Πηγή: [26] .....	42
Εικόνα 15: Ζώνες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) συγκολλημένου κράματος AA6082-T6 Πηγή:[27].....	42

Εικόνα 16: Σχηματική παρουσίαση της ροής του υλικού κατά τις συγκολλήσεις FSW. (a) Δημιουργία της κοιλότητας συγκόλλησης κατά την είσοδο του πείρου (b) Ροή υλικού οφειλόμενη αποκλειστικά στη κίνηση του πείρου του εργαλείου, (c) Ροή οφειλόμενη στην αλληλεπίδραση πείρου και περιαιχενίου συγκόλλησης, (d) Τελικά μορφολογία των κόκκων του υλικού στο πυρήνα συγκόλλησης.....	45
Εικόνα 17: Χαρακτηριστική δομή δακτυλίου κρεμμυδιού (onion ring). Πηγή: [28] .....	46
Εικόνα 18: Ατέλειές στις συγκολλήσεις FSW : (a) Τύπου hooking, (b) Τύπου τούνελ, (c) Τύπου kissing bond, (d) Υπόλειμμα γραμμής. Πηγή[32] .....	47
Εικόνα 19: Συγκριτική αποτίμηση δημοσιευμένων ερευνών ως προς το είδος των υλικών της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση. Πηγή: [55] .....	49
Εικόνα 20: Κάθετη τροποποιημένη φρεζομηχανή τύπου ‘KEARNEY TRECKER Horizontal Milling Machine Type No. 3CE’ .....	56
Εικόνα 21: Βάση έδρασης των δοκιμών συγκόλλησης (Τράπεζα συγκόλλησης) της φρεζομηχανής του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Συγκολλήσεων. ....	57
Εικόνα 22: Εργαλείο συγκόλλησης FSW με διάμετρο περιαιχενίου και πείρου 22mm και 4.5mm αντίστοιχα και ύψος πείρου 4.55mm. ....	58
Εικόνα 23: Υδρόψυκτη διάταξη τύπου “Stuers, DP-U2” του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας. ....	60
Εικόνα 24: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας τύπου Jeol JSM 6380LV .....	63
Εικόνα 25: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A1) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x10.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0.....	65
Εικόνα 26: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A2) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x10.0, δ) σε μεγέθυνση x10.0. ....	66
Εικόνα 27: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A3) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x10.0, β) σε μεγέθυνση x5.0, .....	67
Εικόνα 28: Εικόνα 3.8: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A4) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0 .....	68
Εικόνα 29: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (B1) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x10.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0, δ) σε μεγέθυνση x20.0. ....	70
Εικόνα 30: Εικόνα 3.10: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκιμίου (A5) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0, δ) σε μεγέθυνση x20.0. ....	72

Εικόνα 31: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκίμιου (A7) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0.....	73
Εικόνα 32: Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα της συγκόλλησης του δοκίμιου (B4) σε μεγέθυνση x2.0. Εικόνα: α) σε μεγέθυνση x20.0, β) σε μεγέθυνση x20.0, γ) σε μεγέθυνση x20.0.....	75
Εικόνα 33: S.E.M., Μέτρηση σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 1. ....	77
Εικόνα 34: S.E.M., Μέτρηση σε σημείο του μητρικού υλικού της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 3. ....	78
Εικόνα 35: S.E.M., Μέτρηση σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 5. ....	79
Εικόνα 36: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 8. ....	80
Εικόνα 37: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 11. ....	81
Εικόνα 38: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του B1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 25. ....	82
Εικόνα 39: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του A5 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 26. ....	83
Εικόνα 40: S.E.M., Επιλογή σε περιοχή εντός της ρωγμής του B1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 28. ....	84
Εικόνα 41: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα του flow arm του B1 Δοκίμιού και χημική ανάλυση στο Spectrum 30.....	85
Εικόνα 42: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B2 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 32. ....	86
Εικόνα 43: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B2 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 33. ....	87
Εικόνα 44: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 15. ....	88
Εικόνα 45: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 16. ....	89
Εικόνα 46: S.E.M., Επιλογή σε κατακρήμνισμα της ζώνης ανάδευσης του B4 Δοκίμιού και χημική ανάλυση του Spectrum 21. ....	90

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γρηγόρης Δ. Χρυσουλάκης, «Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών (2η έκδοση)», Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008.
2. Δημήτριος Ι. Παντελής, Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων», Αθήνα: Εκδόσεις Τσιόλα, 2017.
3. Davis. J.R., Aluminum and Aluminum Alloys, ASM specialty handbook: ASM International. 2002.
4. L. D'Alvise, «Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials,» Journal of Materials Processing Technology, pp. 387-391, 9 September 2002.
5. F. Rotundo, «Mechanical and microstructural characterization of 2124Al/25 vol.%SiCp joints obtained by linear friction welding (LFW),» Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, pp. 1028-1037, September 2010.
6. Friction Stir Welding Dissimilar Aluminum Alloys, Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, and Zahid A. Khan
7. Recrystallization mechanisms in 5251-H14 and 5251-O aluminum friction stir welds. A.L. Etter, T. Baudin, N. Fredj, R. Penelle. Materials Science and Engineering A 445–446 (2007) 94–99.
8. Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys.
9. K. Huang, «A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials,» Materials & Design, pp. 548-574, 5 December 2016.
10. A. Dehghan-Manshadi, «Dependency of Recrystallization Mechanism to the Initial Grain Size,» SpringerLink, 2 December 2008.
11. M. Luton, «Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation,» Acta Metallurgica, pp. 1033-1043, August 1969.
12. L. Blaz, «Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of copper,» Metal Science, pp. 609-616, 18 July 2013.
13. M. Luton, «Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation,» Acta Metallurgica, pp. 1033-1043, August 1969.
14. D. Ponge, «Necklace formation during dynamic recrystallization: Mechanisms and impact on flow behavior,» Acta Materialia, pp. 69-80, 19 December 1998.
15. Ohashi, «Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of pure nickel,» Nippon Kinzoku Gakkai-si, pp. 435-441, April 1990.
16. S. Gourdet, «An experimental study of the recrystallization mechanism during hot deformation of aluminium,» Materials Science and Engineering A, pp. 274-288, 15 May 2000.
17. G. Henshall, «Dynamic restoration mechanisms in Al-5.8 At. Pct Mg deformed to large strains in the solute drag regime,» Metallurgical Transactions A, pp. 881-889, March 1992.



18. D. Scmicker, «A robust simulation of Direct Drive Friction Welding with a modified Carreau fluid constitutive model,» ScienceDirect, pp. 186-194, 1 October 2013.
19. S. Senthil Murugan, Sathiya A., Noorul Haq «Experimental study on the effect of silver, nickel and chromium interlayers and upset pressure in joining SS304L-AA6063 alloys through direct drive friction welding process», 1 October 2020
20. M. Maalekian, H. Cerjak, Modelling the Orbital Friction Welding of Pearlitic Steel Bars.
21. P. Threadgill, «Friction stir welding of aluminum alloys,» International Materials Reviews, pp. 49-93, 18 July 2013.
22. R. Mishra, «Friction stir welding and processing,» Materials Science and Engineering: R: Reports, pp. 1-78, 31 August 2005.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. R. Padmanaban, Effect of friction stir welding process parameters on the tensile strength of dissimilar aluminum alloy AA2024-T3 and AA7075-T6 joints. Materialwiss. Werkstofftech. 2020, 51, 17–27
27. Νικόλαος Μ.Δανιόλος, «Μέλετη της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση όμοιων και ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, με έμφαση στην επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες», Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, 2017, Ιούνιος.
28. K. Kumar, «The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation,» Materials Science and Engineering: A, pp. 367-374, 25 June 2008.
29. P. Threadgill, «Friction stir welding of aluminum alloys,» International Materials Reviews, pp. 49-93, 18 July 2013.
30. A. Leonard, «FLAWS IN FRICTION STIR WELDS,» σε 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 2003.
31. S.Sato, «FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy,» Scripta Materialia, pp. 365-369, February 2004.
32. Chen, T. Pasang, Y. Qi. «Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminum alloy 5083-O.» Materials Science and Engineering A. 474:312–316, 2008.
33. Kim, H. Fujii, T. Tsumur, T. Komazaki, K. Nakata. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. Material Science and Engineering A. 415:250254, 2006.
34. Oosterkamp, L.D. Oosterkamp, A. Nordeide. 'KB' phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. Welding Journal. 83(8):225–231, 2004.
35. C. Zhou, «Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds,» Scripta Materialia, pp. 1515-1520, April 2006.

36. Verma, S., & Misra, J. P. (2015). A Critical Review of Friction Stir Welding Process. 249–266
37. Gite, R. A., Loharkar, P. K., & Shimpi, R. (2019). Friction stir welding parameters and application: A review. *Materials Today: Proceedings*, 19(xxxx), 361–365.
38. Chen Y., Ding H., Li J., Cai Z., Zhao J., Yang W. (2016). Influence of multipass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of Al-5083 alloy, *Materials Science & Engineering A*, 650, 281–289.
39. Peel M.J., Steuwer A., Withers P.J., Dickerson T., Shi Q., Shercliff H. (2006). Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082. Part I: Process Parameter Effects on Thermal History and Weld Properties, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37A, 2183-2193.
40. Peel M.J., Steuwer A., Withers P.J. (2006). Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082. Part II: Process Parameter Effects on Microstructure, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37A, 2195-2206.
41. Abdi Behnagh R., Besharati Givi M. K., Akbari M. (2012). Mechanical Properties, Corrosion Resistance, and Microstructural Changes during Friction Stir Processing of 5083 Aluminum Rolled Plates, *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 636-640.
42. Lombard H., Hattingh D.G., Steuwer A., James M.N. (2008). Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminum alloy, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 341–354.
43. Hirata T., Oguri T., Hagino H., Tanaka T, Chung S.W., Takigawa Y., Higashi K. (2007). Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 456, 344–349.
44. Kundu, J., & Singh, H. (2016). Friction stir welding of dissimilar Al alloys: Effect of process parameters on mechanical properties. *Engineering Solid Mechanics*, 4(3), 125–132.
45. Saeidi, M., Manafi, B., Givi, M. K. B., & Faraji, G. (2015). Mathematical modeling and optimization of friction stir welding process parameters in AA5083 and AA7075 aluminum alloy joints.
46. Shah P.H., Badheka V. (2016). An experimental investigation of temperature distribution and joint properties of Al 7075 T651 friction stir welded aluminum alloys, *Procedia Technology*, 23, 543 – 550.
47. Srinivasa Rao T., Madhusudhan Reddy G., Koteswara Rao S. R. (2015). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075–T651 aluminum alloy thick plates, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25, 1770–1778.
48. Fuller C., Mahoney M., Calabrese M., Micono L. (2010). Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds, *Materials Science and Engineering A*, 527, 2233–2240.
49. Jamshidi Aval H. (2015). Influences of pin profile on the mechanical and microstructural behaviors in dissimilar friction stir welded AA6082–AA7075 butt joint, *Mater Des*, 67, 413–421.

50. Jamshidi Aval H. (2015). Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys, *Materials and Design*, 87, 405–413.
51. Bahemmat, P., Besharati, M. K., Haghpanahi, M., Rahbari, A., & Salekrostam, R. (2009). Mechanical , micro- , and macrostructural analysis of AA7075 – T6 fabricated by friction stir butt welding with different rotational speeds and tool pin profiles. 224, 419–433.
52. Davis, J.R. *Alloying: Understanding the Basics*.
53. ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.  
[http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a\\_aluminum\\_alloys.pdf](http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf).  
[Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: Τετάρτη ,4 Μάρτιος 2020.]
54. B. Christian, «Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 2233-2240, 15 April 2010.
55. G. Lorimer, «Further results on the nucleation of precipitates in the AlZnMg system,» *Acta Metallurgica*, pp. 1009-1013, August 1966.
56. L. Mondolfo, «Structure of the aluminium: magnesium: zinc alloys,» *Metallurgical Reviews*, pp. 95-124, 19 July 2013.
57. D. J. Lloyd, «A calorimetric study of aluminium alloy AA-7075,» *Journal of Materials Science*, pp. 1819-1824, 24 September 1981.
58. Lendvai, «The effect of vacancy-rich clusters on the decomposition processes in Al-Zn-Mg alloys,» *Wiley Online Library*, 1984.
59. Lendvai, «Precipitation and Strengthening in Aluminium Alloys,» *Materials Science Forum*, pp. 43-56, May 1966.
60. K. Stiller, «Investigation of precipitation in an Al–Zn–Mg alloy after two-step ageing treatment at 100° and 150°C,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 55-63, 15 September 1999.
61. X. Jiang, «Differential scanning calorimetry and electron diffraction investigation on low-temperature aging in Al-Zn-Mg alloys,» *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp. 339-348, February 2000.