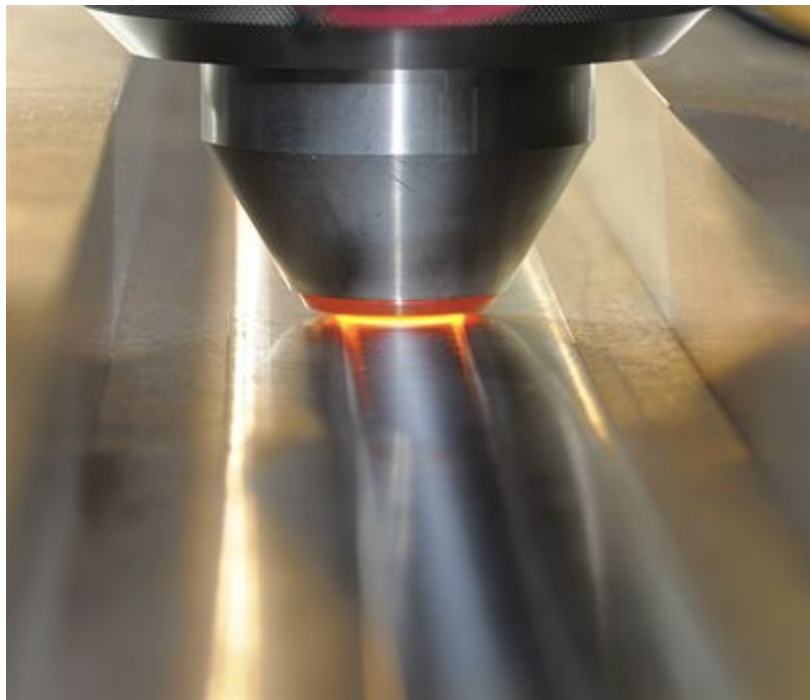




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ**

# Μελέτη Συγκόλλησης με Τριβή και Ανάδευση (FSW) διαφορετικών εδροκεντρωμένων μετάλλων

*Διπλωματική Εργασία*



**Φοιτητής: Σταφυλάς Δημήτριος Αριθμός Μητρώου: mm16067**  
**Επιβλέπων: Dr. – Ing.Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής**

*Αθήνα, 2022*











**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ**

# Μελέτη Συγκόλλησης με Τριβή και Ανάδευση (FSW) διαφορετικών εδροκεντρωμένων μετάλλων

*Διπλωματική Εργασία*

**Φοιτητής: Σταφυλάς Δημήτριος Αριθμός Μητρώου: mm16067**  
**Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/ΜΜ/ΕΕΕΕ**

**Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής** .....(Υπογραφή)

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

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



## Περίληψη

Η μεταποιητική βιομηχανία σήμερα εξακολουθεί να αναζητά τρόπους για την μείωση βάρους και κόστους, που απαιτούνται στην παραγωγική διαδικασία, με σκοπό τη βελτίωση των επιδόσεων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το αλουμίνιο λόγω των ευνοϊκών του χαρακτηριστικών αναπτύσσεται διαρκώς. Σε πολλές εφαρμογές αντικαθιστά μέταλλα όπως χάλυβας ή ο χαλκός ή μπορεί να συνδυάζεται με αυτά. Εξαιτίας των παραπάνω έχει γίνει ένα σημαντικό μέρος της παραγωγικής διαδικασίας των βιομηχανιών αυτοκινήτων, αεροσκαφών, ναυπηγικής και άλλων. Επομένως, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην χρήση κραμάτων αλουμινίου και τη βελτιστοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας και σύνδεσης τους. Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW) είναι μια σχετικά σύγχρονη διαδικασία τεχνικής συγκόλλησης στερεάς κατάστασης και εξαιρετική για υλικά, όπως το αλουμίνιο. Είναι ενεργειακά αποδοτική, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται το εύρος των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου και οι εφαρμογές τους. Επιπλέον αναλύεται η δομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε κράματα αλουμινίου και εξετάζονται παράγοντες που επιδρούν την μορφολογία της συγκόλλησης. Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι η εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων της συγκόλλησης και η βελτιστοποίηση αυτών. Συγκεκριμένα η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται σε κράματα αλουμινίου των σειρών 5XXX σε συγκεκριμένα κράματα και 6XXX. Για κάθε συγκόλληση, ακολουθεί μεταλλογραφική προετοιμασία και μεταλλογραφική παρατήρηση. Συγκεκριμένα έγιναν οχτώ συγκολλήσεις σε κράματα 5083-H111 & 6082-T6, οι οποίες κατέδειξαν τους καλύτερους συνδυασμούς ταχυτήτων για μια αποτελεσματική συγκόλληση. Οι ταχύτητες στις οποίες πραγματοποιείται η συγκόλληση επηρεάζουν την μορφολογία και την ποιότητα της συγκόλλησης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Οι βέλτιστος συνδυασμός ταχυτήτων που δεν επιφέρει ατέλειες είναι ταχύτητα περιστροφής 1000rpm και προώθησης 83mm/min με κλίση εργαλείου στις 3°.



## Abstract

The manufacturing industry today continues to seek ways to reduce weight and costs required in the production process for improved performance and reduced environmental impacts. Aluminum due to its favorable characteristics is increasingly utilized in different industrial systems. In many applications it replaces metals such as steel or copper or can be combined with them. Because of the above, a significant part of the production process of automotive, aircraft, shipbuilding and other industries includes increasing share of Al alloys and has become a significant part of the production share. Therefore, particular attention is paid to aluminum alloys through their processing procedures. Friction Stir Welding is a relatively modern solid state technical welding process and suitable for materials such as aluminum. It is energy-efficient, economic and environmentally friendly. In this Diploma Thesis, the Friction Stir Welding characteristics of different aluminium alloys is investigated. The aim of this work is to investigate the effect of welding parameters in search for an optimized welding. The experimental procedure included welding of two different aluminium alloys from the 5XXX and 6XXX series. In particular, eight different welding experiments on 5083-H111 & 6082-T6 Al alloys were executed and the resulting welding condition, their weld zones and microstructures were evaluated. Welding and rotation speeds effect the morphology and quality of welding according to the results of the optical and electronic microscope. The optimum combination is 1000 rpm and 83 mm/min with a tool tilt on 3°. These parameters prevent the welding defects.





## Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε παράλληλα σε δύο εργαστήρια του ΕΜΠ. Οι συγκολλήσεις τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding) πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατεργασιών στη Σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών και ο έλεγχος της μικροδομής των δοκιμίων στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου για την ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγησή του και, κυρίως, για την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου για την εκπόνηση της.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Βασίλειο Λουκαδάκη και κ. Σπυρίδωνα Χάσκη, οι οποίοι συνέβαλαν τα μέγιστα για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την στήριξη τους κατά την διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο, τον Αναπλ. Καθηγητή Άγγελο Μαρκόπουλο, το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατεργασιών στο σύνολο του, καθώς και το προσωπικό του Μηχανουργείου της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών για την φιλοξενία, την χρήση του εξοπλισμού και την εξαιρετική τους συνεργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Βασίλη και Μαρία, καθώς και την αδερφή μου Αθανασία, οι οποίοι στάθηκαν αρωγοί σε όλη την προσπάθεια μου.





## Πρόλογος

Το αλουμίνιο διαθέτει σειρά χαρακτηριστικών, που το καθιστούν εξόχως ελκυστικό για πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετώνται και αναλύονται οι συγκολλήσεις τριβής με ανάδευση διαφορετικών κραμάτων Αλουμινίου, χρήσιμες για διαφορετικές εφαρμογές. Με τις συμβατές μεθόδους συγκόλλησης τήξης παρουσιάζεται μια σειρά αρνητικών επιπτώσεων, οι οποίες υποβαθμίζουν την ποιότητα της συγκόλλησης που προορίζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση κραμάτων Αλουμινίου προσφέρει συνδέσεις, των οποίων οι μικροδομές αποφεύγουν τέτοιες επιπτώσεις καθιστώντας την ως μια από τις καταλληλότερες μεθόδους για συγκόλληση όμοιων και ανόμοιων κραμάτων Αλουμινίου για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική, στην αεροδιαστημική και σε άλλους τομείς.



## Πίνακας περιεχομένων

.....	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	
ABSTRACT .....	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	
<b>1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>3</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	3
<b>1.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ .....</b>	<b>4</b>
1.1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ .....	4
1.1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΚΡΙΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....	10
1.1.3 Κατεργασίες Κραμάτων Αλουμινίου.....	13
1.1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.....	16
1.1.4 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	18
1.1.5 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083 ΚΑΙ 6082.....	27
<b>1.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ( WELDINGS).....</b>	<b>30</b>
1.2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	30
1.2.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	31
1.2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	33
<b>1.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ – FRICTION STIR WELDING .....</b>	<b>33</b>
1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	34
1.3.2 ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ .....	34
<b>1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ .....</b>	<b>39</b>
1.4.1 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	39
1.4.2 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΩΘΗΣΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	40
1.4.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ .....	43
1.4.4 ΒΑΘΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ Η ΒΥΘΙΣΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	44
1.4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	47
1.4.4.1 Σχεδιασμός Περιαυχένιου εργαλείου συγκόλλησης (Shoulder Design) .....	48
1.4.4.2 Σχεδιασμός πείρου εργαλείου συγκόλλησης .....	51
1.4.5 ΆΛΛΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ.....	58
<b>1.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΡΙΒΗΣ ΔΙΑ ΑΝΑΔΕΥΣΗ.....</b>	<b>58</b>
1.5.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ “ΟΝΙΟΝ RINGS” ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	62
<b>1.6 ΖΩΝΕΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....</b>	<b>64</b>
<b>1.7 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ .....</b>	<b>67</b>
<b>1.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ.....</b>	<b>69</b>
<b>1.9 ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....</b>	<b>71</b>
1. Ατέλειες σε σχήμα αυλακώσεων ή οπών (grooves) .....	72
2. Ατέλειες τύπου τούνελ (tunnel effect).....	73
3. Ατέλειά τύπου “Flash” (εξωθημένο υλικό).....	75
4. “Kissing Bond” , lazy s.....	76
5. “Lack of Penetration form” – Ατέλειες λόγω ακατάλληλης ανάδευσης.....	77
6. Ρηγματώσεις “Cracks” .....	78

7. Σχηματισμός διακενώσεων (Voids/Wormhole defect) .....	78
8. Keyhole defect.....	79
<b>1.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FSW ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....</b>	<b>80</b>
1.11.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	80
1.11.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ .....	83
1.11.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ .....	85
1.11.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΟΥΣ .....	86
<b>1.12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ .....</b>	<b>87</b>
<b>2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>93</b>
2.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ .....	93
2.2 ΜΕΤΑΛΛΑ ΒΑΣΗΣ.....	94
2.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	96
2.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ .....	96
2.5 ΚΟΠΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	97
2.6 ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ .....	97
2.7 ΛΕΙΑΝΣΗ .....	97
2.8 ΣΤΙΛΒΩΣΗ.....	99
2.9 ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ.....	99
2.10 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ .....	100
2.11 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY “SEM”).....	100
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>103</b>
3.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ.....	103
3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ .....	104
<i>Δοκίμιο A1</i> .....	<i>104</i>
<i>Δοκίμιο A2</i> .....	<i>106</i>
<i>Δοκίμιο A3</i> .....	<i>108</i>
<i>Δοκίμιο B1</i> .....	<i>111</i>
<i>Δοκίμιο B2</i> .....	<i>112</i>
<i>Δοκίμιο B3</i> .....	<i>113</i>
<i>Δοκίμιο A4</i> .....	<i>115</i>
<i>Δοκίμιο B4</i> .....	<i>116</i>
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) .....	118
<b>4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>123</b>
<b>4.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>125</b>
<b>5. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>	<b>126</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>129</b>

# 1. Θεωρητικό Μέρος

## Εισαγωγή

Στο πρώτο μέρος αναλύονται τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου και των κραμάτων τους. Στο δεύτερο μέρος αναλύεται η δομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Ακολούθως καταγράφονται βασικά ευρήματα από βιβλιογραφική ανασκόπηση που εστιάζουν στις παραμέτρους που επηρεάζουν την συγκόλληση. Περαιτέρω, παρουσιάζεται στο πειραματικό μέρος η πειραματική διαδικασία συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση στα κράματα 5083-H11 & 6082-T6, καθώς και τα αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό των μικροδομών των συγκολλήσεων. Τέλος κατόπιν σχετικής συζήτησης για τα αποτελέσματα εξάγονται τα συμπεράσματα από την μελέτη.

## 1.1 Το Αλουμίνιο και τα κράματα του

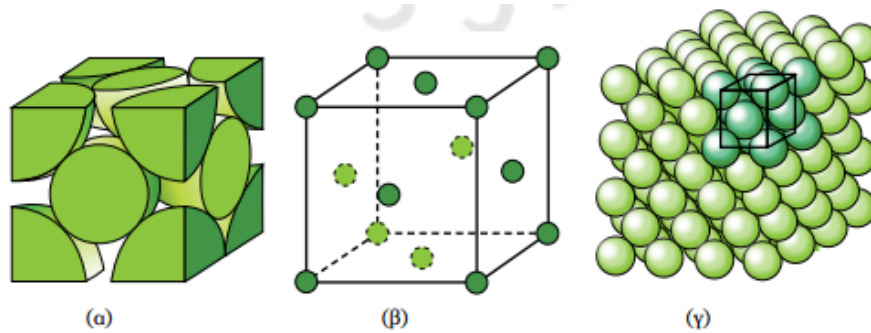
### 1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το Αλουμίνιο ή Αργίλιο, είναι μέταλλο με αργυρόλευκο χρώμα και ανήκει στην ΙΑΑ ομάδα του Περιοδικού Πίνακα συμβολίζεται με Al και έχει ατομικό αριθμό 13. Τα μέταλλα γενικότερα αυξάνουν την χρηστικότητα τους, αφού εξαιτίας της δομής του μεταλλικού δεσμού τους παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες όπως η πλαστικότητα και η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Το Αλουμίνιο συγκεκριμένα θεωρείται από τα πιο διαδεδομένα μέταλλα που υφίστανται στο φυσικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα αποτελεί το τρίτο δημοφιλέστερο υλικό στον κόσμο από πλευράς αφθονίας στον φλοιό της γης.

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Εικόνα 1 Το χημικό στοιχείο του Αργιλίου στον Περιοδικό Πίνακα

Το αλουμίνιο αναπτύσσεται σε εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα -FCC (Face Centered Cubic – Εικόνα 2). Στο συγκεκριμένο σύστημα ανάπτυξης αυτής της κρυσταλλικής δομής, οι διαγώνιοι του κύβου αποτελούν την σταθερά του πλέγματος, στις διευθύνσεις  $\langle 110 \rangle$  δηλαδή (Εικόνα2) [23].



Εικόνα 2 Σχηματική απεικόνιση εδροκεντρωμένου κυβικού πλέγματος (FCC) [23]

Η FCC κρυσταλλική δομή εξαιτίας των περισσότερων επιπέδων ολίσθησης σε σχέση με τις υπόλοιπες κρυσταλλικές δομές, επιτρέπει στο αλουμίνιο μεγαλύτερο βαθμό επιδεκτικότητας μορφοποίησης από μέταλλα που αναπτύσσονται σε άλλο σύστημα. Επιπλέον, είναι ελαφρύ μέταλλο, όλκιμο, είναι ανακυκλώσιμο και φέρει καλή αντίσταση σε διάβρωση [23].

Το καθαρό αλουμίνιο έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως προαναφέρθηκαν, όμως παρουσιάζει χαμηλή μηχανική αντοχή και μαλακότητα. Οι θερμικές ή και μηχανικές κατεργασίες που μπορεί να υποστεί διαμορφώνουν και τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του. Παρ' όλα αυτά διαθέτει υψηλή πλαστικότητα και μπορεί να διαμορφωθεί σε πολλά σχήματα και σε μικρά πάχη (μέχρι 0,01mm) μετά από διαδικασίες μεταλλοτεχνίας. Παρά το χαμηλό σημείο τήξης ( 660 °C) επωφελείται η διαδικασία της συγκόλλησης της τριβής με ανάδευση η οποία στηρίζεται σε ανάδευση και πλαστική παραμόρφωση, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω. Τέτοιο παράδειγμα είναι η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση σε λεπτά ελάσματα αλουμινίου [22].

Η παρουσία συγκεκριμένων ελαττωμάτων, όπως αυτά της χαμηλής μηχανικής αντοχής και σκληρότητας οδηγούν στην μειωμένη χρήση του αλουμινίου σε εφαρμογές που χρειάζονται υψηλές αυτές τις ιδιότητες. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί με μεθόδους βελτιστοποίησης των παραπάνω αδύναμων χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα αυτά είναι η σκλήρυνση μετά από ψυξηλασία είτε με κραμάτωση.



Παρακάτω θα αναλυθούν και πιο διεξοδικά τρόποι σκλήρυνσης των κραμάτων αλουμινίου. Πλέον τα κράματα αποτελούν μια από τις πρώτες ύλες της βιομηχανίας για μεταλλικές συσκευές κ. α. Σχετικά με το αλουμίνιο, αυτό ταιριάζει με στοιχεία όπως ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος. Το αλουμίνιο αλλά και κράματα προσφέρουν ένα πακέτο ελκυστικών ιδιοτήτων όπου συνδυάζονται καθιστώντας το μέταλλο ένα από τα χρήσιμα υλικά. Τα κράματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, κράματα συγκόλλησης και κράματα χύτευσης [22].

Οι θεμελιώδεις ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων που το καθιστούν σε ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα είναι τα εξής [22,23,44]:

**Βάρος :**

Το Αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων λόγω του χαμηλού του ειδικού βάρους. Σε αντίθεση με τον σίδηρο (Fe) που έχει ειδικό βάρος  $7,8 \text{ gr/cm}^3$ , το αλουμίνιο έχει  $2,7 \text{ gr/cm}^3$ . Αυτή η ιδιότητα επιφέρει λύσεις στις απαιτήσεις στον τομέα μεταφορών (πχ αυτοκινητοβιομηχανία). Τέτοιες απαιτήσεις είναι η μείωση βάρους και κατανάλωσης καυσίμων.

**Ηλεκτρική Αγωγιμότητα:**

Το αλουμίνιο διαθέτει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Συγκριτικά με τον χαλκό που είναι το καταλληλότερο μέταλλο για εφαρμογές που χρειάζεται μεγάλη αγωγιμότητα το αλουμίνιο παρουσιάζει σχετική ηλεκτρική αγωγιμότητα 63%, ο χαλκός 98%. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται σε κατασκευές που χρήζουν υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τέτοιο παράδειγμα είναι η παραγωγή ηλεκτρονικών καλωδίων-σωληνώσεων. Συγκρίνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα του Αλουμινίου με αυτή του χαλκού σημειώνεται πως αυτή του αλουμινίου ισούται με το 75% με αυτής του χαλκού. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της μικρότερης πυκνότητας του αλουμινίου χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός [22,23].

Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένα κράματα που χαρακτηρίζονται με μεγάλο βαθμό ηλεκτρικής αντίστασης [Jr.Davis p 351-416].

Θερμική Αγωγιμότητα :

Επιπλέον, το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται ως καλός αγωγός θερμότητας. Η θερμική αγωγιμότητα του είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή του μαλακού χάλυβα. Επομένως, αγωγοί αλουμινίου βρίσκουν εφαρμογή σε θερμαντικά σώματα και σε άλλες αντίστοιχες κατασκευές.

Αντοχή (strength) :

Το αλουμίνιο θεωρείται ισχυρό υλικό όταν βρίσκεται σε προσμίξεις με άλλα στοιχεία. Μαζί με την αύξηση της αντοχής, βελτιώνεται και η αντίσταση σε εφελκυσμό. Ορισμένα κράματα αλουμινίου έχουν αντοχή που κυμαίνονται από 70-750MPa. Σε ένα άλλο χαρακτηριστικό όπου διαφέρει με τον χάλυβα, αφορά στην δυσθραυστότητά του. Σε χαμηλές θερμοκρασίες το αλουμίνιο δεν θραύεται εύκολα, ενώ σε κρυογενικές διαδικασίες η αντοχή του αλουμινίου αυξάνεται.

Αντιδιαβρωτική συμπεριφορά :

Σε αντίθεση με τον σίδηρο, ο οποίος σκουριάζει όταν είναι εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον, το αλουμίνιο έχει καλή ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η επιφάνεια του δεν είναι ευάλωτη και παρουσιάζει αντιδιαβρωτικό χαρακτήρα. Αυτό γίνεται διότι το αλουμίνιο αλληλοεπιδρά με το οξυγόνο ( $O_2$ ) που περικλείεται στον αέρα. Συγκεκριμένα όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, και αντιδρά με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, σχηματίζεται ένα ανθεκτικό λεπτό στρώμα που παρέχει την αντιδιαβρωτική προστασία [Kita- Shinagawa and Shinagawa-ku, 2011]. Το ηλεκτρολυτικό του δυναμικό είναι μεγαλύτερο του σιδήρου και, επομένως, θα έπρεπε να οξειδώνεται γρηγορότερα. Αυτό δεν συμβαίνει, γιατί το αλουμίνιο καλύπτεται από ένα πολύ λεπτό αλλά ανθεκτικό στρώμα του οξειδίου του αλουμινίου που παρεμποδίζει την περαιτέρω οξείδωση του.

Υπολογίζεται πως το πάχος του στρώματος χαρίζει στο υλικό πολύ καλή αντιδιαβρωτική προστασία παρά το γεγονός ότι είναι 4 νανόμετρα [23,24]. Αυτή η προστασία οφείλεται στις ιδιότητές του αφού αυτό το επιφανειακό στρώμα είναι συνεκτικό, αδιαπερατό και συνεχές με αποτέλεσμα το μέταλλο να προφυλάσσεται από περαιτέρω οξείδωση. Επιπλέον, ακόμα και στην περίπτωση που το στρώμα προστασίας είναι χαραγμένο, θα κλείσει και επουλωθεί αυτούσιο με δικό του μηχανισμό. Δεν ξεφλουδίζει για να σχηματιστούν ευνοϊκές συνθήκες για να σκουριάσει η εξωτερική

και η εσωτερική του πάνω επιφάνεια [Jr. Davis]. Το σημείο τήξης του επιφανειακού στρώματος οξειδίου αργιλίου είναι  $2052^{\circ}\text{C}$ .

Εξαιτίας αυτής της προστασίας, το αλουμίνιο διακατέχεται από μια ασπίδα προστασίας με καλή αντοχή σε κάθε διαβρωτικό μέσο από το περιβάλλον, όπως το θαλασσινό νερό (διαβρωτική δράση νερού και αλατιού), ο ατμοσφαιρικός αέρας και ο καθαρός αέρας. Λόγω αυτής της αντοχής βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος επιλογών στην βιομηχανία όπως θα αναλυθεί παρακάτω (Χράματα Συγκόλλησης και Εφαρμογές). Τέτοιο παράδειγμα είναι η χημική βιομηχανία [22].

Αυτή η μεμβράνη που δημιουργείται, καθώς απορροφάτε η υγρασία από τα μόρια του αέρα γίνεται παχύτερη. Παρά την προστατευτική δράση του αν δεν προσεχθεί θα μπορεί να οδηγήσει σε ελαττωματική συγκόλληση. Μέσω των μορίων υδρογόνου  $\text{H}_2$  που εγκλωβίζονται στην επιφάνεια της επιφάνειας δημιουργούνται οι συνθήκες δημιουργίας πορώδους στην συγκόλληση του αλουμινίου [38 Cary and Helzer, 2004].

Ευελιξία:

Από τα πιο ζωτικής σημασίας στοιχεία του αλουμινίου είναι η εύκολη κατεργασιμότητα, ενώ μπορεί να παραχθεί σε οποιαδήποτε μορφή και πάχος. Διαθέτει μεγάλη ευελιξία, αφού μπορεί να συνδυάσει την αντοχή του με την ικανότητα του να λυγίζει υπό ασκούμενο σε αυτό ορισμένο φορτίο. Μπορεί να επεξεργαστεί σχετικά εύκολα, αφού μπορεί να λάβει σε πολλές διεργασίες και είναι ελατό. Έχει καλές ιδιότητες συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σε διαφορετικά είδη συγκολλήσεων όπως η συγκόλληση δια τριβή με ανάδευση που πλεονεκτεί στο συγκεκριμένο υλικό. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες χύτευσης και τελικής επεξεργασίας μεταλλικών τεμαχίων στον μεταποιητικό τομέα για παράδειγμα. Μπορεί να αλλάξει γεωμετρικά χαρακτηριστικά και προφίλ, να χυτευτεί μέσα από καλούπια και να υποστεί διέλαση για την παραγωγή προϊόντων. Η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου μπορεί να γίνει και σε πολύ λεπτά τεμάχια, γνωστά ως φύλλα αλουμινίου με πάχος 4 χιλιοστά και λιγότερο (sheets aluminium) [Greenwood και Earnshaw, 1984]. Τέλος λόγω της ολκιμότητας είναι εύκαμπτο και περνάει από την διαδικασία της σφυρηλάτησης, εξώθησης και κάμψης για παραγωγή προϊόντων όπως οι πρέσες φρένων ή για μη καταστρεπτικό έλεγχο [2,23].

Ανακλαστικότητα :

Υψηλά ανακλαστικές θεωρούνται οι επιφάνειες του αλουμινίου τόσο στο φως όσο και στην θερμότητα. Αυτό συμβαίνει διότι το ορατό φως, η θερμότητα και η «ενέργεια» που «χτυπάνε» στην επιφάνεια είναι ιδιαίτερα ανακλαστικά. Οι επιφάνειες του αλουμινίου συνήθως έχουν υποστεί ανοδίωση για την παθητικοποίηση του, μπορούν να ανακλαστούν ή να απορροφήσουν. Η ανακλαστικότητα ενός φινιρισμένου τεμαχίου αλουμινίου, προσφέρεται σε χρήσεις με διακοσμητικό ρόλο. Σε αυτό συμβάλλει και ο χρωματισμός του αλουμινίου.

Άλλα στοιχεία:

Σημαντικό είναι ότι κατά την διάρκεια της συγκόλλησης ή κατά την έκθεση του αλουμινίου σε θερμικές διαδικασίες, το χρώμα του παραμένει αμετάβλητο. Θα πρέπει όμως να προσαρμόζονται και να ελέγχονται κατάλληλα οι παράμετροι της συγκόλλησης/ διαδικασίας για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητα ενέργειας (heat input) που δίνει ένα κατάλληλο σχήμα λουτρού συγκόλλησης [ Mike and Jim 2009]. Το διαφανές στρώμα οξειδίου είναι άχρωμο, διαφανές, προσκολλάται στο μέταλλο, ενώ το αλουμίνιο δεν αποχρωματίζεται [Jr.Davis].

Το Αλουμίνιο έχει ελκυστική εμφάνιση εξαιτίας του αργυρόλευκου χρώματος του κατά την τελική του επεξεργασία. Είναι φωτεινό, μαλακό και με επιφανειακές διαδικασίες μπορεί να φέρει ποικιλία χρωμάτων.

Αφού δεν αναφλέγεται θεωρείται μη πυροφορικό υλικό ενώ αποτελεί μη σιδηρομαγνητικό υλικό. Τέλος όπως αναφέρθηκε, η χρήση του Al έχει μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Σε αυτό ευθύνεται και η μη τοξικότητα του, αφού το αλουμίνιο μπορεί να καλύψει από τις πιο απαιτητικές ανάγκες μέχρι και τις πιο καθημερινές ή οικιακές (πχ περιτυλίγματα, δοχεία τροφίμων και υγρών) [Jr. Davis].

### 1.1.2 Σύστημα Διάκρισης Κραμάτων Αλουμινίου

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα κράματα αλουμινίου είναι τα κράματα συγκόλλησης και τα κράματα χύτευσης. Η κάθε κατηγορία διακρίνεται σε επιμέρους κατηγορίες – σειρές αναφορικά με το κάθε στοιχείο που προστίθεται στο αλουμίνιο αντίστοιχα. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο οι συγκεκριμένες προσθήκες δημιουργούν σειρές κραμάτων αλουμινίου τόσο στα κράματα συγκόλλησης όσο και στα κράματα χύτευσης [4], [22]. Η διάκριση της κάθε κατηγορίας είναι βασισμένη στις εκάστοτε μηχανικές ιδιότητες και το εύρος εφαρμογών, αφού η κάθε σειρά έχει διαφορετική χημική σύσταση όπως θα παρατηρηθεί στην συνέχεια. Συχνότερη εφαρμογή βρίσκουν τα κράματα συγκόλλησης εξαιτίας της υψηλότερης μηχανικής αντοχής που διαθέτουν [Praveen and Yarlagadda, 2005]. Λόγω της διαφορετικής χημικής σύστασης κάθε σειράς η συγκόλληση του αλουμινίου εξαρτάται από την χημική σύσταση. Οι βασικές ομάδες κραμάτων που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην πράξη είναι αυτά όπου το Αλουμίνιο συνδυάζεται με το Μαγνήσιο (Mg), το Μαγγάνιο (Mn), Πυρίτιο (Si), Χαλκό (Cu) και με τον Ψευδάργυρο (Zn) είτε μεμονωμένα ξεχωριστά είτε συνδυασμούς αυτών (Mg-Si), (Zn-Mg), (Zn-Mg-Cu) [23].

Είναι σημαντικό να γίνονται κατανοητές οι διαφορές μεταξύ των διαθέσιμων κραμάτων, καθώς έχουν διαφορετική απόδοση και χαρακτηριστικά [Prichard and Laub, 1991].

Οι πίνακες 1 και 2 απεικονίζουν τον διαχωρισμό των κραμάτων αλουμινίου σε διακριτές σειρές ανάλογα με το προστιθέμενο στοιχείο. Σύμφωνα με την Aluminium Association (A.A) οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, αποτελούνται από δύο μέρη τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος που αποτελείται από τέσσερα ψηφία δηλώνουν σε ποια από τις δυο κατηγορίες ανήκει το κράμα [4],[31],[44],[45].

### 1.1.2.1 Κράματα διαμόρφωσης (Wrought alloys)

Υπάρχουν εννιά σειρές κραμάτων αλουμινίων διαμόρφωσης. Η ονοματολογία της εκάστοτε σειράς κραμάτων, βασίζεται σε τετραψήφιο κωδικό σύστημα αναγνώρισης κράματος σύμφωνα με την Α.Α. και πραγματοποιείται ως εξής [4,22,31,44,45]:

- Το πρώτο ψηφίο υποδηλώνει το βασικό στοιχείο ή βασικά στοιχεία που προστίθενται (Πίνακας 1).
- Το δεύτερο ψηφίο υποδηλώνει τις διαφορετικές παραλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί στο αρχικό κράμα, ενώ θεωρούνται και τα όρια περιεκτικότητας των προστιθέμενων στοιχείων και ακαθαρσιών. Για παράδειγμα στην αρχική του μορφή το κράμα λαμβάνει το ψηφίο μηδέν (0), για την πρώτη παραλλαγή το ένα (1), για την δεύτερη το δύο (2) κ.τ.λ.π . Οι παραλλαγές αυτές βασίζονται στην ποσότητα των προστιθέμενων στοιχείων.
- 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.

<b>ΚΩΔΙΚΟΣ</b>	<b>ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ</b>
1XXX	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00 %
2XXX	Χαλκός
3XXX	Μαγγάνιο
4XXX	Πυρίτιο
5XXX	Μαγνήσιο
6XXX	Μαγνήσιο και Πυρίτιο
7XXX	Ψευδάργυρος
8XXX	Άλλα στοιχεία
9XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

*Πίνακας 1 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.*

*1.1.2.2 Κράματα Χύτευσης (Cast Alloys)*

Υπάρχουν εννιά σειρές κραμάτων αλουμινίων χύτευσης. Η ονοματολογία της εκάστοτε σειράς κραμάτων, βασίζεται σε τετραψήφιο κωδικό σύστημα αναγνώρισης κράματος σύμφωνα με το Α.Α.. Το πρώτο ψηφίο έχει την ίδια σημασία με εκείνη που αφορά τα κράματα διαμόρφωσης. Η διαφορά είναι πως στην κωδικοποίηση υπάρχει ανάμεσα στο τρίτο και τέταρτο ψηφίο ένα δεκαδικό ψηφίο, το οποίο ξεκαθαρίζει ότι το περιγραφόμενο κράμα ανήκει στην κατηγορία των χυτών. Αυτά μπορούν να πάρουν την μορφή ράβδων- πλινθωμάτων ή να είναι χυτό. Δηλαδή πραγματοποιείται ως εξής [4,22,31,44,45]:

- Το πρώτο ψηφίο υποδηλώνει το βασικό στοιχείο ή τα βασικά στοιχεία που προστίθενται (Πίνακας 2). Εκτός της 1XX.X σειράς που είναι το καθαρό αλουμίνιο και της 9XX.X σειράς, το παραπάνω ισχύει από την σειρά 2XX.X μέχρι την 3XX.X και τα κράματα όπου η χημική τους σύσταση που είναι καταχωρημένη αποτελεί μια τροποποίηση προηγούμενων κραμάτων που έχουν καταχωρηθεί έτσι επίσης.
- Το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δηλώνουν την μορφή κράματος αλουμινίου. Εάν το μέσο ποσοστό από τα στοιχεία που υπάρχουν στο κράμα είναι μεγαλύτερο για πάνω από δύο στοιχεία, τότε η ομάδα του κράματος προσδιορίζεται από το στοιχείο που προστίθεται πρώτο στην σειρά.
- Το τέταρτο ψηφίο είναι το μοναδικό μετά την δεκαδική τελεία υποδηλώνει την μορφολογία του προϊόντος. Συγκεκριμένα το μηδέν στο XXX.0 αναφέρεται σε κράματα χυτά αμέσως μετά την διαδικασία της χύτευσης. Το ένα στο XX.1 αναφέρεται σε πλινθώμα όπου είναι ένα κομμάτι σχετικά καθαρού μετάλλου, το οποίο ρίχνεται σε σχήμα κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία. Τα όρια στα οποία προστίθενται τα κραματικά στοιχεία είναι παρόμοια ή ίδια με αυτά των χυτών. Το δύο στο XX.2 αναφέρεται σε πλινθώματα επίσης που όμως έχουν διαφορετικά όρια προσθήκης στην χημική τους σύσταση.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Κασσίτερος Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

*Πίνακας 2 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης*

### 1.1.3 Κατεργασίες Κραμάτων Αλουμινίου

Συχνά παρατηρείται ότι οι παραπάνω κωδικοποιήσεις τόσο των κραμάτων διαμόρφωσης όσο και χύτευσης συνοδεύονται από ένα ακόμη μέρος. Αυτό υποδηλώνει την θερμική ή μηχανική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα. Παρακάτω ο πίνακας αναφέρει την κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου ανάλογα με την κατεργασία που έχουν υποστεί.

Κωδικός	Κύρια Κατεργασία
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία
O	Ανόπτηση
H1X	Μόνον ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης):
H11	Κράμα Ελάχιστης Σκληρότητας
H12	Κράμα σκληρωμένο κατά 25%
H14	Κράμα σκληρωμένο κατά 50%
H16	Κράμα σκληρωμένο κατά 75%



H18	Κράμα σκληρυσμένο κατά 100%
H19	Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης: Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική Κατεργασία
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση

T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρό και φυσική γήρανση
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
T5	Βαφή σε θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρό και τεχνητή γήρανση
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρό
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρό και τεχνητή γήρανση
W	Θερμική Κατεργασία Ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση

### 1.1.3 Μηχανισμοί σκλήρυνσης Κραμάτων Αλουμινίου

Βρισκόμαστε σε ένα στάδιο στην βιομηχανία, όπου οι ανάγκες απαιτούν πολλαπλά υλικά προς χρήση, όπου η αποκλειστική χρήση ενός υλικού μειώνεται. Συγκεκριμένα το αλουμίνιο όπως αναφέρθηκε έχει ένα βασικό ελάττωμα που φέρνει την ανάπτυξη, την χρήση και την κατανόηση των κραμάτων αλουμινίου. Αυτό είναι ότι το καθαρό αλουμίνιο υστερεί σε αντοχή σε εφελκυσμό. Η ενίσχυση της αντοχής και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων ( επόμενη ενότητα ) επιτυγχάνεται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων που αναφέρονται στους πίνακες 1 και 2 με σκοπό την παραγωγή κραμάτων που προσαρμόζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές [22, 23].

Τα κράματα μπορούν να αυξήσουν τις τιμές σκληρότητας κατά την παρουσία μικρών και όμορφα διασκορπισμένων κατακρημνισμάτων ή μεσομεταλλικών φάσεων ( ενδομεταλλικών ενώσεων ) εντός της μητρικής φάσης του μετάλλου. Η διεργασία αυτή μπορεί να γίνει με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Στον δεύτερο τρόπο (τεχνητό δηλ.) συγκαταλέγονται θερμικές κατεργασίες, με αποτέλεσμα το κράμα να υφίσταται σκλήρυνση με κατακρήμνιση ( precipitation hardening ), ενώ τα σωματίδια τα οποία διασκορπίζονται λέγονται κατακρημνίσματα ( precipitates ). Τα κράματα αλουμινίου υπόκεινται σε σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Τέτοια παραδείγματα κραμάτων είναι αυτά του Αλουμινίου με χαλκό, αλουμίνιο με μαγνήσιο και χαλκό και με ψευδάργυρο και μαγνήσιο.

Επομένως τα κράματα αλουμινίου κατηγοριοποιούνται σε υποκατηγορίες, αυτά που υφίστανται θερμική επεξεργασία για ενίσχυση και αυτά που δεν υφίστανται.

#### **Κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση με θερμική κατεργασία**

(Work Hardening alloys- Μη θερμικά επεξεργασμένα)

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν το καθαρό αλουμίνιο, τα κράματα της 3XXX σειράς ( αυτά που περιέχουν κυρίως Μαγγάνιο) και της 5XXX σειράς (που περιέχουν κυρίως Μαγνήσιο ) με ποσότητες άλλων στοιχείων που δεν είναι τόσο σημαντικές, τα οποία σκληραίνονται με ενδοτράχυνση. Σχετικά με το καθαρό αλουμίνιο ή 1XXX σειρά, δεν περιέχει τα χημικά συστατικά τα οποία μπορούν να διαλυθούν εκτεθειμένα σε θερμικές κατεργασίες, ώστε να ενισχυθεί το διάλυμα ή να πραγματοποιηθεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Επίσης τα κύρια προστιθέμενα συστατικά της 3XXX και 5XXX σειράς, δηλαδή το μαγγάνιο και μαγνήσιο, από την μια μεριά είναι διαλυτά έως ένα βαθμό, αλλά από την άλλη προσφέρουν μέτρια σκλήρυνση. Δεν υπάρχει απαιτούμενη ποσότητα συστατικών, ώστε να πραγματοποιηθεί σκλήρυνση μέσω θερμικών διαδικασιών. Για να αυξήσουν την σκληρότητά τους τα παραπάνω, εφαρμόζονται σε αυτά διαδικασίες ενδοτράχυνσης και ψυχηλασίας (stretching, cold rolling) [22,44].

#### **Κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με θερμικές κατεργασίες**

Αντιθέτως υπάρχουν στοιχεία όπου διαλύονται σε αξιόλογο βαθμό και προσφέρουν την ευκαιρία στα κράματα να σκληραίνονται με κατακρήμνιση. Τέτοια στοιχεία είναι ο χαλκός για τα κράματα της 2XXX σειράς και ο ψευδάργυρος για τα κράματα της 7XXX σειράς. Τα κύρια στοιχεία προσθήκης της 6XXX σειράς, το μαγνήσιο και το πυρίτιο σχηματίζουν μια ενδομεταλλική ένωση, το πυριτικό μαγνήσιο ( $Mg_2Si$ ) .

Η θερμοκρασία (solution heat treatment), στην οποία διενεργείται η διάλυση των σωματιδίων είναι η θέρμανση ενός κράματος σε κατάλληλη θερμοκρασία η οποία συγκρατείται τόσο όσο, ώστε ένα ή περισσότερα συστατικά να διαλυθούν σε στερεό διάλυμα και εν συνεχεία το κράμα να ψυχθεί σε γρήγορο ρυθμό, ώστε τα συστατικά να παραμείνουν στο διάλυμα. Έπειτα, ακολουθεί η διαδικασία της γήρανσης, η οποία αναφέρεται είτε ως φυσική (σε θερμοκρασία δωματίου) είτε σε τεχνητή. Σκλήρυνση με κατακρήμνιση με τεχνητό τρόπο ονομάζεται η διαδικασία με την χρήση θερμικών κατεργασιών [44].

Και στις δυο διαδικασίες ακολουθείται η γήρανση, μέσω θέρμανσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε επιλεγμένη θερμοκρασία και έπεται με ψύξη στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (με αργό ή γρήγορο ρυθμό) [22].

Μια ιδιάζουσα περίπτωση είναι τα κράματα της σειράς 4XXX, που αποτελούνται κυρίως από πυρίτιο. Το πυρίτιο αποκλειστικά μόνο του, δεν αποτελεί στοιχείο το οποίο μπορεί να διαλυθεί προσφέροντας στα κράματα να υφίστανται θερμική κατεργασία. Παρ'όλα αυτά όταν το πυρίτιο ζευγαρώνει με άλλα συστατικά τα οποία παρέχουν αποτελεσματική θερμική επεξεργασία. Τέτοιο παράδειγμα είναι το μαγνήσιο στο κράματα 4032 όπου υπόκειται σε θερμική κατεργασία. Όμοια κατάσταση συμβαίνει και στα κράματα 8XXX.

#### 1.1.4 Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου και επίδραση των κραματικών στοιχείων

Τα κράματα συγκόλλησης διακατέχονται από χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφονται παρακάτω [31,22,23,40,44,45].

##### **1XXX σειρά:**

Η χημική σύσταση είναι απαλλαγμένη από προσθήκες άλλων στοιχείων. Έχει υψηλή ολκιμότητα και κατεργασιμότητα. Έχει τουλάχιστον 99% καθαρού αλουμινίου με αποτέλεσμα να διακατέχεται από τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως (ενότητα 1.2). Αυτά τα επίπεδα αλουμινίου προσφέρουν μεγάλη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, αλλά ελλειμματικές μηχανικές ιδιότητες. Η αντοχή του μπορεί να αυξηθεί με εργοτράχυνση έως ένα βαθμό. Στοιχεία όπως το πυρίτιο και ο σίδηρος δεν προσφέρουν, αλλά θεωρούνται ακαθαρσίες [31,44,45]. Έχει εφαρμογές στην ηλεκτρική και στην χημική βιομηχανία.

##### **2XXX σειρά:**

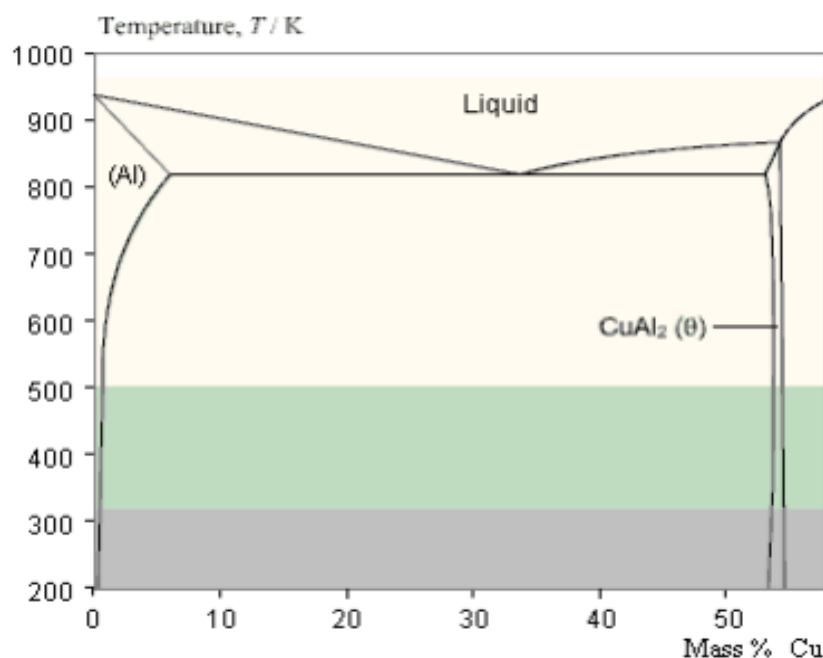
Στην 2XXX σειρά το βασικό στοιχείο που προστίθεται είναι ο χαλκός. Μπορούν να υπάρξουν και άλλα στοιχεία σε μικρότερες ποσότητες όπως το μαγνήσιο. Εξαιτίας της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση που υφίσταται η σειρά κραμάτων χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές αντοχής. Το όριο διαρροής μπορεί να φτάσει τα 455 MPa. Η προσθήκη χαλκού κυμαίνεται από 1-10 % σε πολλά εμπορικά κράματα Al- Cu.

Όταν το κράμα σκληραίνεται φυσικά, η γήρανση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C). Είναι καλύτερο οι απαιτούμενες προεργασίες ή ο σχεδιασμός

του μετάλλου (τεχνικές διαμόρφωσης) να γίνουν αμέσως μετά την ψύξη που ακολουθείται από την θερμική επεξεργασία.

Στην περίπτωση ολοκληρωμένης γήρανσης του κράματος, τα αποτελέσματα είναι αντίθετα και επικρατεί μείωση της ολκιμότητας. Σε αυτήν την κατάσταση επηρεάζεται και η προστασία του υλικού, αφού πλέον δεν χαρακτηρίζεται από καλή προστασία κατά της διάβρωσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτά είναι χαρακτηριστικά και των περισσοτέρων ενδοτραχυμένων κραμάτων.

Γενικά η σκλήρυνση με κατακρήμνιση βελτιώνει την αντίσταση στην ρηγματώση σε διαβρωτικό περιβάλλον, αλλά μειώνεται η ολκιμότητα, η ανθεκτικότητα ή σκληρότητα.



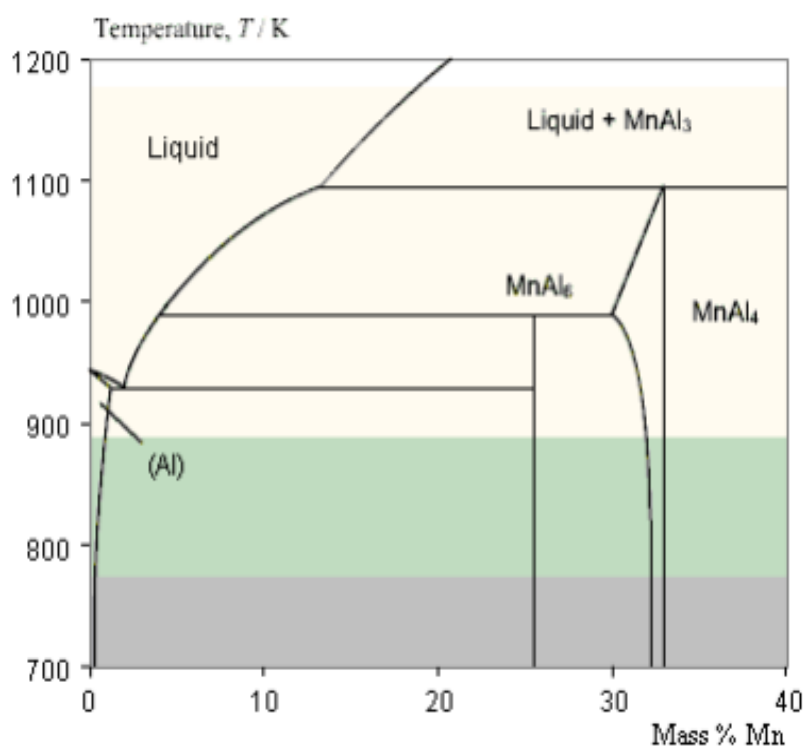
Εικόνα 3 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Αλουμινίου-Χαλκού [107]

Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή μηχανική αντοχή (πχ στην κατασκευή εξαρτημάτων για αεροσκάφη).

### 3XXX σειρά

Στην 3XXX σειρά το βασικό στοιχείο που προστίθεται είναι το μαγγάνιο, ενώ ορισμένες φορές προστίθεται μαζί με μαγνήσιο. Δεν υπόκεινται σε θερμική κατεργασία και έχουν μέτρια μηχανική αντοχή. Διαθέτει σχετικά υψηλή ολκιμότητα και διαμορφωσιμότητα. Πλεονέκτημα αυτών των κραμάτων είναι η μεγάλη αντοχή τους

σε κάθε διαβρωτικό περιβαλλοντολογικό μηχανισμό. Διαθέτουν καλή συγκολλησιμότητα, έχουν καλά αποτελέσματα σε συγκόλληση με κράματα χαλκού και ως υλικό σύνδεσης ανόμοιων κραμάτων. Το μαγγάνιο (Mn) ενώνεται με το αλουμίνιο (Al) δημιουργώντας μια ενδομεταλλική ένωση  $\text{Al}_6\text{Mn}$ . Τα κατακρημνίσματα του Mn που βρίσκονται διασκορπισμένες εντός της μητρικής φάσης του αλουμινίου αυξάνουν την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και είναι υπεύθυνα για τον αποτελεσματικό έλεγχο της δομής ανάπτυξης των κόκκων και την αποτροπή για την δημιουργία ακαθαρσιών που συχνά υπάρχουν στην μορφή της ενδομεταλλικής ένωσης (πχ Σίδηρο, Πυρίτιο). Για να είναι αποτελεσματική η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων, η προσθήκη του μαγγανίου θα πρέπει να είναι περιορισμένη, έως και 1,2 % Mn. Η διαλυτότητα του μαγγανίου στο αλουμίνιο είναι πολύ περιορισμένη, αλλά παραμένει στο διάλυμα κατά την ψύξη. Το μαγγάνιο ανήκει στα στοιχεία τα οποία σχηματίζουν κυρίως δευτερεύοντα στοιχεία, διότι στα περισσότερα εμπορικά κράματα έχουν πολύ χαμηλή διαλυτότητα σε στερεά διαλύματα ισορροπίας.

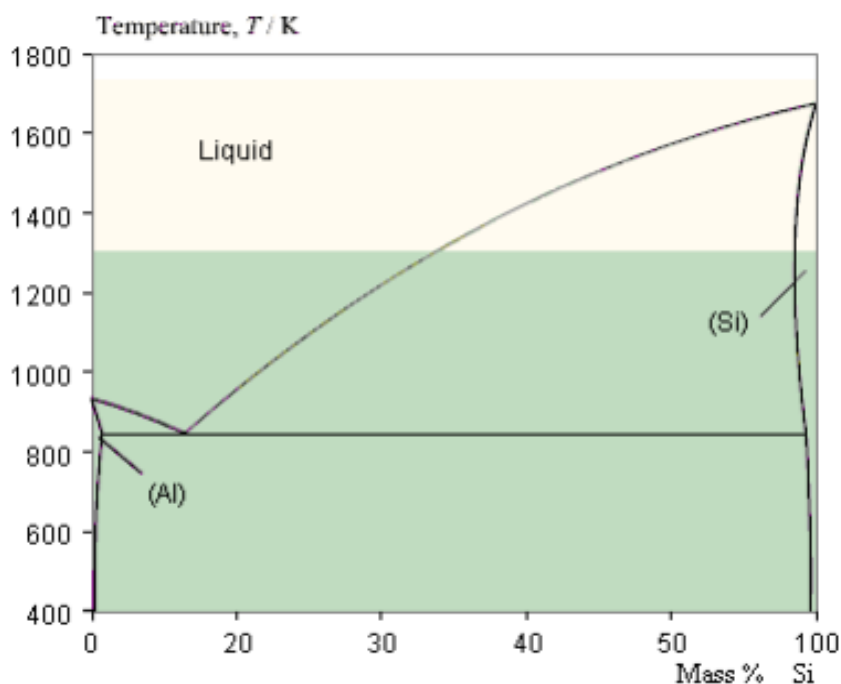


Εικόνα 4 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου-Μαγγανίου [107]

Η 3XXX σειρά κραμάτων βρίσκει πολλές εφαρμογές όπως στην αρχιτεκτονική, σε κατασκευή δοχείων και σε λεπτά φύλλα κραμάτων για περαιτέρω χρήσεις [31,44,45].

#### 4XXX σειρά

Στην 4XXX σειρά το βασικό στοιχείο που προστίθεται είναι το πυρίτιο. Υπάρχουν δύο είδη τέτοιων κραμάτων. Στην περίπτωση που το κύριο στοιχείο είναι μόνο το πυρίτιο, τότε τα εν λόγω κράματα δεν είναι πολύ ισχυρά. Η προστιθέμενη ποσότητα του πυριτίου μπορεί να φτάσει μέχρι 12%. Το πυρίτιο μπορεί να προκαλέσει ουσιαστική μείωση του θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής τήξης χωρίς να προκαλέσει μείωση στην ολκιμότητα, ενώ βελτιώνει την χυτευσιμότητα, το φινίρισμα και την αντοχή μέχρι ένα βαθμό. Σε περιπτώσεις που προστίθεται μεγάλη ποσότητα πυριτίου προκαλείται ευθραυστότητα. Ο άλλος τύπος κράματος αναφέρεται στις περιπτώσεις που το πυρίτιο προστίθεται με μικρές ποσότητες χαλκού ή και μαγνησίου. Με αυτόν τον τρόπο τα 4XXX κράματα μπορούν να θεωρηθούν έως ένα βαθμό θερμικά επεξεργασμένα. Αυτά τα συστατικά λόγω της διαλυτότητας τους στο αλουμίνιο, προσφέρουν σκλήρυνση με κατακρήμνιση με θερμικές επεξεργασίες και γήρανση.



Εικόνα 5 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου-Πυριτίου [107]

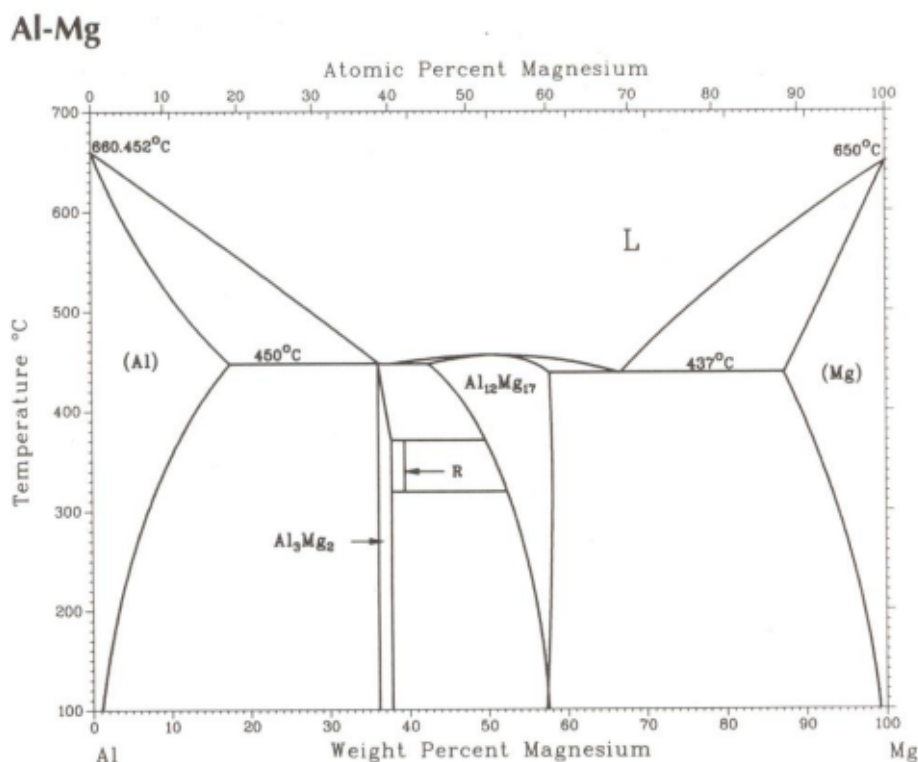


Τα 4XXX κράματα δεν χαρακτηρίζονται από καλή αντίσταση στην διάβρωση του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ όταν είναι εκτεθειμένα σε υγρό περιβάλλον παίρνουν γκριζό χρώμα. Λόγω αυτού διαθέτει ευνοϊκές συνθήκες για καλό φινίρισμα και άλλες επιφανειακές επεξεργασίες όπως η ανοδίωση με αποτέλεσμα να λαμβάνει πληθώρα χρωμάτων σε γκρι αποχρώσεις. Λόγω της διαθεσιμότητας για καλή επιφανειακή εργασία και υψηλής ρευστότητας και ευχυτότητας, ορισμένα κράματα λαμβάνουν περίπλοκα και πολλά σχήματα ενώ μπορούν να συγκολληθούν σε λεπτά φύλλα και σε ράβδους. Αυτό οδηγεί την αυτοκινητοβιομηχανία να τα χρησιμοποιεί για εξαρτήματα με τέτοιες γεωμετρικές απαιτήσεις όπως έμβολα, πιστόνια. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της 4XXX είναι πως το 4043 κράμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης σε τεχνικές συγκόλλησης GMA και GTA για κράματα 6XXX με σκοπό την εφαρμογή σε δομικά υλικά και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

### **5XXX σειρά Al-Mg**

Στην 5XXX σειρά το βασικό στοιχείο που προστίθεται είναι το μαγνήσιο. Εκτός από το μαγνήσιο μπορεί να προστεθεί με την παρουσία μαγγανίου. Η προσθήκη μαγνησίου αυξάνει την αντοχή του αλουμινίου. Η μέτρια αντοχή του αυξάνεται προς υψηλή με ενδοτράχυνση. Το μαγνήσιο προσφέρει αύξηση της αντοχής γιατί θεωρείται από τα πιο ισχυρά υλικά ανάμεσα στα στοιχεία που είναι τα κύρια συστατικά των μη θερμικά επεξεργασμένων κραμάτων. Συγκεκριμένα είναι πιο ισχυρά από το μαγγάνιο αφού 0.8 % Mg ισούται με 1,25% Mn και μπορεί να προστεθεί σε μεγαλύτερες ποσότητες. Η μέγιστη διαλυτότητα του μαγνησίου στο αλουμίνιο πλέον στα 5XXX κράματα θα πρέπει να είναι μικρότερο από 5,5%. Το μαγνήσιο σχηματίζει ενδομεταλλική ένωση με το αλουμίνιο ( $Mg_5Al_3$ ,  $Mg_3Al_5$ ), η οποία κατακρημνίζεται στα όρια των κόκκων. Ο σχηματισμός αυτής της φάσης δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για ρηγμάτωση με βελονοειδές σχηματισμό.

Γενικά τα κράματα διαθέτουν καλά χαρακτηριστικά συγκόλλησης, υψηλή ανθεκτικότητα και σκληρότητα. Εκτός από αντίσταση στην ατμοσφαιρική ρύπανση, έχουν καλή αντοχή στο διαβρωτικό περιβάλλον της θάλασσας. Όταν το μαγνήσιο προστίθεται σε μεγαλύτερο από 3%, τότε τα κράματα που έχουν την συγκεκριμένη περιεκτικότητα σχηματίζουν ευνοϊκές συνθήκες για ρηγμάτωση, όταν βρίσκονται εκτεθειμένα σε θερμοκρασία άνω των 100°C.



Εικόνα 6 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Αλουμινίου- Μαγνησίου [105]

Λόγω της υψηλής ανθεκτικότητας των κραμάτων προορίζονται για εφαρμογές που απαιτούν αυτό το χαρακτηριστικό όπως οι ανάγκες της αυτοκινητοβιομηχανίας, ενώ εξαιτίας του αντιδιαβρωτικού χαρακτήρα χρησιμοποιείται στον τομέα της ναυπηγίας. Επιπλέον μπορούν να εφαρμοστούν σε δομικές κατασκευές είτε σε κτίρια είτε σε αυτοκινητόδρομους οι οποίοι αποτελούνται από γέφυρες και δεξαμενές αποθήκευσης. Μπορούν να λάβουν μέρος σε κρυογενικές διαδικασίες.

### 6XXX σειρά Al-Mg-Si

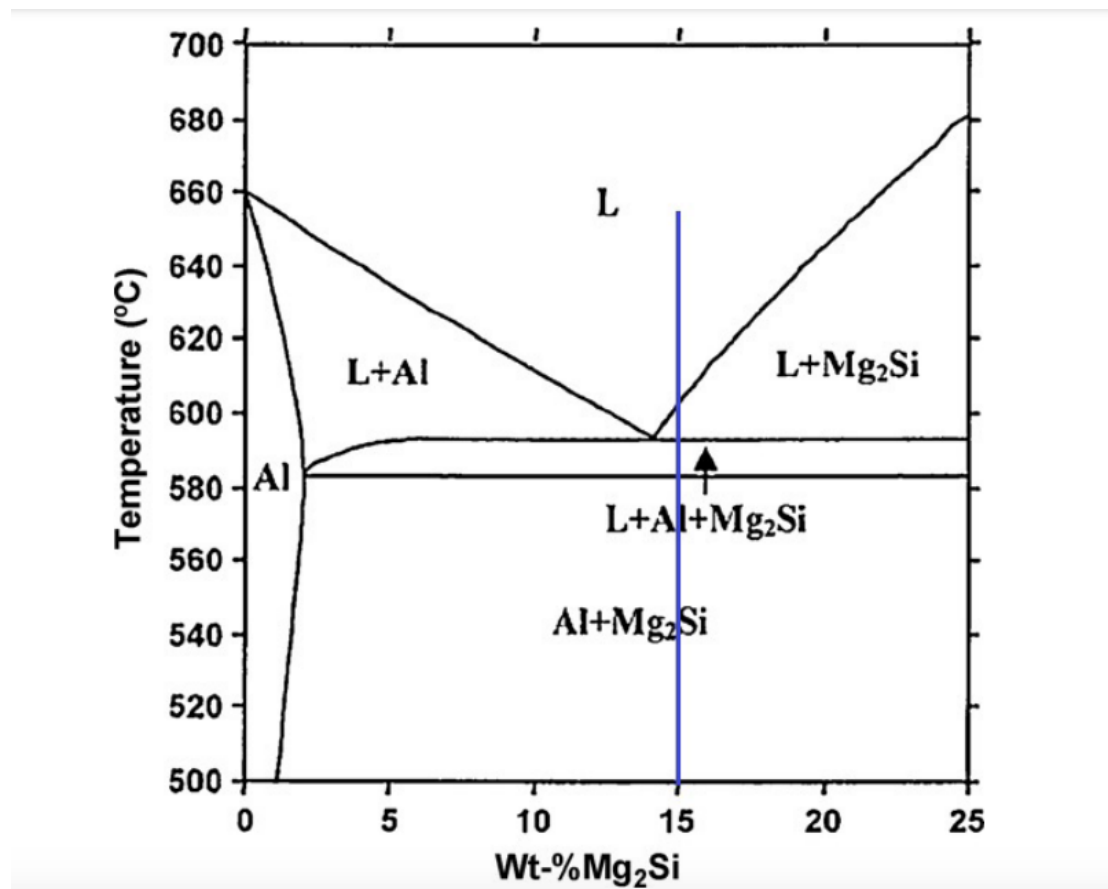
Στην 6XXX σειρά τα βασικά στοιχεία που προστίθενται είναι το μαγνήσιο και το πυρίτιο. Το σύστημα του κράματος είναι το Al-Mg-Si. Η σκλήρυνση δομής του αλουμινίου επιτυγχάνεται με τα κύρια περιεχόμενα συστατικά τα οποία σχηματίζουν μια ένωση, γνωστή ως πυριτικό μαγνήσιο Mg<sub>2</sub>Si. Εξαιτίας της δημιουργίας ενδομεταλλικής αυτής φάσης, σχηματίζεται ένα σύστημα με το αλουμίνιο που αποτελείται από τις δύο αυτές φάσεις (Μαγνήσιο και Πυρίτιο) το οποίο προσφέρει

εξαιρετική ικανότητα σκλήρυνσης με κατακρήμνιση. Επομένως τα 6XXX κράματα θεωρούνται θερμικά επεξεργασμένα κράματα. Λόγω του συγκεκριμένου τρόπου μηχανισμού σκλήρυνσης, τα 6XXX κράματα θεωρούνται ισχυρότερα κράματα από πολλά μη θερμικά επεξεργασμένα αλλά δεν είναι τόσο ισχυρά όσο αυτά των 2XXX και 7XXX. Συγκεκριμένα παίρνουν αρχική μορφή κατά την T4 θερμική διεργασία, χωρίς να υφίσταται σκλήρυνση με κατακρήμνιση και ενισχύονται στην T6 ( τώρα πραγματοποιείται σκλήρυνση με κατακρήμνιση). Η χημική τους σύσταση αποτελείται από 1,5% μαγνήσιο και πυρίτιο αντίστοιχα, ενώ η αναλογία των μαζών των δυο για την δημιουργία της φάσης  $Mg_2Si$  είναι  $Mg/Si = 1,73/1$ . Η διαλυτότητα του πυριτικού μαγνησίου έχει μέγιστη διαλυτότητα 1,85% στο αλουμίνιο. Υπάρχουν 3 περιπτώσεις οι οποίες διακρίνουν τα κράματα Al-  $Mg_2Si$  σε αντίστοιχες υποκατηγορίες.

Στην περίπτωση όπου η περιεκτικότητα των Mg και Si δεν υπερβαίνουν το 1.5% έχουν παρόμοια αναλογία ενώ κάποιες φορές το πυρίτιο μπορεί να βρίσκεται σε περίσσεια, ενώ η περιεκτικότητα του  $Mg_2Si$  είναι 1,1%. Η θερμοκρασία στην οποία διενεργείται η θερμική διεργασία είναι μεγαλύτερη από 500°C. Λόγω της χαμηλής ευαισθησίας που έχουν στην ψύξη δεν χρειάζεται διαφορετική θερμική διεργασία, η ψύξη μπορεί να γίνει στον αέρα και ακολουθεί η τεχνητή γήρανση με το κράμα να αποκτά μέτρια αντοχή, καλή ολκιμότητα και εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση.

Όταν η περιεκτικότητα των δύο βασικών στοιχείων όμως είναι μεγαλύτερη από 1.5 % μπορούν να προστεθούν μικρές ποσότητες άλλων συστατικών. Για παράδειγμα η προσθήκη χαλκού είναι της τάξεως 0.3% αυξάνοντας την αντοχή στην T6. Επιπλέον μπορούν να προστεθούν συστατικά όπως το χρώμιο, το ζirkόνιο και ο ψευδάργυρος τα οποία είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο της ανάπτυξης μικροδομής ( κόκκων και κατακρημνισμάτων). Η προσθήκη Cu μπορεί να αυξήσει την αντοχή κατά 70 MPa. Το χρώμιο Cr όταν προστίθεται σε κράματα αλουμινίου- μαγνησίου- πυριτίου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,35%. Οι προσθήκες αυτές αν και βελτιώνουν την μηχανική αντοχή θα πρέπει να παραμένουν μικρές αφού προκαλείται μείωση της αντοχής σε διάβρωση. Η σκλήρυνση κατακρήμνιση αυτών επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες για τις διεργασίες. Έχουν μεγάλη ευαισθησία στην ψύξη, γι' αυτό χρειάζονται ξεχωριστή θερμική διεργασία, απότομη ψύξη και μετά τεχνητή γήρανση.

Τέλος όταν η ένωση  $Mg_2Si$  βρίσκεται σε μεγαλύτερη ποσότητα, τότε το πυρίτιο βρίσκεται σε περίσσεια. Μια περίσσεια πυριτίου της τάξης 0,2% αυξάνει την αντοχή κατά 70 MPa.



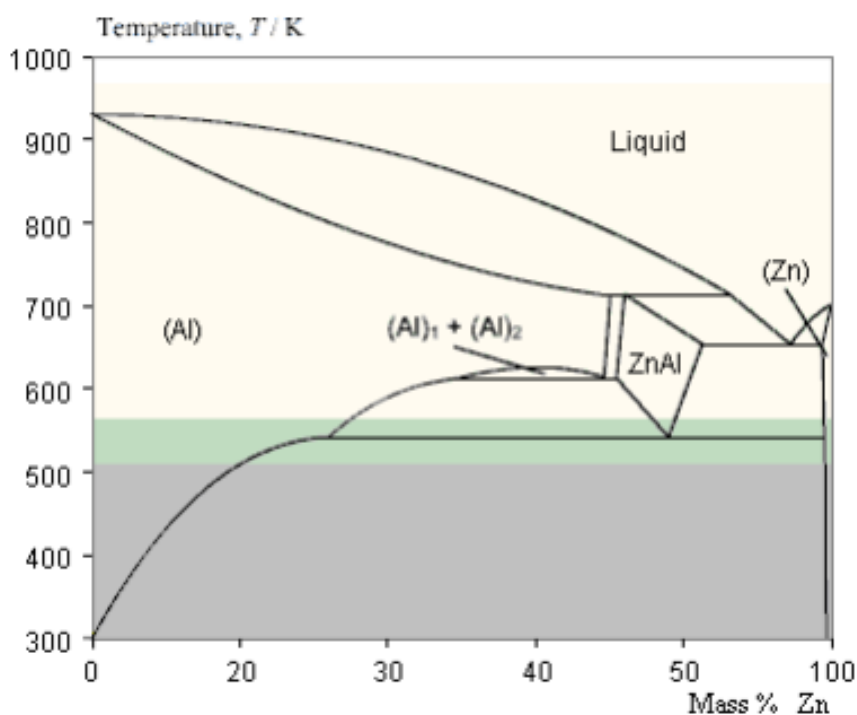
Εικόνα 7 Διάγραμμα φάσεων Αλουμινίου-Μαγνησίου-Πυριτίου [107-108]

Τα 6XXX κράματα είναι από τα καταλληλότερα για επεξεργασία, αφού χαρακτηρίζονται από καλή συγκολλησιμότητα και κατεργασιμότητα τους. Λόγω της ικανότητας τους στην διέλαση δε, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην αρχιτεκτονική, σε δομικά μέλη και σε άλλα όπου χρήζουν ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως καμπύλες κι περύγια, σκληρότητα και ακαμψία. Γενικά η αντοχή των 6XXX κραμάτων κυμαίνεται μεταξύ 125 και 400 MPa. Επομένως θεωρείται εύχρηστη σειρά κραμάτων με καλή αντοχή σε διάβρωση, καλή ολκιμότητα και χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αυτοκινητοβιομηχανία για εξαρτήματα και άλλα προϊόντα.

### 7XXX σειρά Al-Zn

Στην 7XXX το βασικό στοιχείο που προστίθεται είναι ο ψευδάργυρος (Zn). Η διαλυτότητα του ψευδάργυρου στο αλουμίνιο κυμαίνεται μεταξύ 1 – 8%. Όταν συνδυάζεται με άλλα στοιχεία παρέχει ένα πακέτο από εξαιρετικές ιδιότητες εφελκυσμού. Ειδικότερα αν αναμειγνύεται με χαλκό και μαγνήσιο παρέχεται υψηλότερη μηχανική αντοχή από τα υπόλοιπα εμπορικά κράματα, αλλά έχουν χαμηλότερη αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Με προσθήκες τέτοιων συστατικών τα 7XXX επιδέχονται θερμική διεργασία με σκλήρυνση με κατακρήμνιση και εμφανίζουν αυτές τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Τα κράματα της 7XXX σειράς βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών, σε πλαίσια αεροσκαφών και γενικότερα σε εξαρτήματα που επιδέχονται μεγάλες πιέσεις. Αν και έχουν πολύ καλή αντοχή, χαρακτηρίζονται από ελλειμματική αντίσταση σε διάβρωση, καθώς ευνοούνται ευνοϊκές συνθήκες για ρηγμάτωση.



Εικόνα 8 Διάγραμμα ισορροπίας διμερούς συστήματος Αλουμινίου-Ψευδάργυρου [107]

### 1.1.5 Κράματα Αλουμινίου 5083 και 6082

#### **Κράμα AA5083:**

Από το διάγραμμα Αλουμινίου-Μαγνησίου φαίνεται πως το μαγνήσιο έχει μέγιστη διαλυτότητα στο αλουμίνιο είναι 15 % κατά βάρος, ενώ μειώνεται στο 3 % σε θερμοκρασίες δωματίου. Έτσι λοιπόν όπως προαναφέρθηκε οι προστιθέμενες τυπικές περιεκτικότητες μαγνησίου είναι μεταξύ 4-5 % όπου αναμένεται ανάπτυξη κατακρημνισμάτων της εδροκεντρωμένης φάσης  $Al_3Mg_2$  ( γνωστή και ως  $\beta$  φάση). Αναφέρεται ότι η κατακρήμνιση της απαιτεί παραμονή σε θερμοκρασιακό εύρος 50-280 °C για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

*Υπέρκορεσμένο Στερεό Διάλυμα Απόψυξη* → GP Ζώνες →  $\beta''$  4 →  $\beta'$  5 →  $\beta_6$

Αντίδραση 1: Μεταλλουργική αντίδραση σχηματισμού κατακρημνισμάτων της  $\beta$  φάσης

Ανάλογα το θερμοκρασιακό εύρος και την σύσταση του κράματος, μπορεί να υπάρξουν οι παρακάτω ενδομεταλλικές φάσεις:

- $(Mn,Fe)Al_6$
- $(Cr,Fe)Al_7$
- $Mg_3Mn_2Al_{12}$

#### **Κράμα AA6082**

Στα κράματα Αλουμινίου η πιο συχνή ακαθαρσία είναι ο σίδηρος (Fe) ο οποίος εμφανίζεται ως ενδομεταλλική φάση των Al-Fe, Al-Fe-Si και Al-Fe-MnSi ανάλογα τις συνθέσεις του κράματος [82]. Στα κράματα της 6XXX σειράς τα κύρια προστιθέμενα στοιχεία είναι το μαγνήσιο (Mg), με το πυρίτιο (Si) ενώ μπορούν να προστεθούν συστατικά όπως ο σίδηρος, το Μαγγάνιο (Mn), το Χρώμιο (Cr) και ο Χαλκός (Cu) όπως γράφτηκε στην προηγούμενη ενότητα. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να σχηματιστούν ενδομεταλλικές ενώσεις  $\beta-Al_5FeSi$ ,  $\alpha-Al_{12}(FexMn(1-x))_3Si$  και  $Mg_2Si$  κατά την διάρκεια της στερεοποίησης [90]. Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου κράματος

είναι δενδριτική. Μεταξύ του συγκεκριμένου σχηματισμού αναπτύσσεται η β- φάση και τα χονδρόκοκα σωματίδια  $Mg_2Si$ , β'- φάση [88].

Η ακολουθία κατακρήμνισης στα κράματα  $AlMgSi$  περιγράφεται ικανοποιητικά σύμφωνα με την εξής ακολουθία : Υπέρκορο στερεό διάλυμα  $\rightarrow$ G.P zones  $\rightarrow$  β'' ( $Mg_5Si_6$ )  $\rightarrow$  β' ( $Mg_2Si$ )  $\rightarrow$  Si  $\rightarrow$  β

Ο σχηματισμός των G.P zones ξεκινάει περίπου στους  $160^\circ C$  με συνεπακόλουθη δημιουργία της β'' μετασταθούς φάσης γύρω στους  $230^\circ C$  που είναι υπεύθυνη για τις μέγιστες τιμές σκληρότητάς που λαμβάνονται σε κράματα 6082-T6 [82]. Η συγκεκριμένη β'' φάση είναι η κύρια φάση ενίσχυσης του κράματος 6082 [82]. Μετέπειτα σχηματίζεται η β' φάση και καταβυθίζεται το πυρίτιο που βρίσκεται σε περίσσεια. Η κατακρήμνιση της β' φάσης πραγματοποιείται στους  $250^\circ C$ , ενώ τα σωματίδια αναπτύσσονται τόσο εντός της μητρικής φάσης του αλουμινίου όσο και στα όρια των κόκκων. Η πυκνότητα των σωματιδίων  $Mg_2Si$  αυξάνεται με την αύξηση την θερμοκρασίας, ενώ το μέγεθος και ο αριθμός τους μειώνεται. Ο σχηματισμός των σωματιδίων της α φάσης πραγματοποιείται στους  $300^\circ C$ . Εδώ γίνεται ο μετασχηματισμός της βελονοειδής ανάπτυξης σε στρογγυλοποιημένα σωματίδια [89].





## 1.2 Συγκολλήσεις ( Weldings)

### 1.2.1 Τεχνικές Συγκόλλησης

Εξαιτίας των συνεχόμενων απαιτήσεων της βιομηχανίας για την χρήση νέων καινοτόμων υλικών και μεθόδων εξελίσσεται διαρκώς η ανάγκη παραγωγής σύνθετων μεταλλικών αντικειμένων. Η ανάπτυξη κραματικών στοιχείων λόγω των ευνοϊκών τους χαρακτηριστικών, που αναλύθηκαν προηγουμένως, οφείλονται σε διαδικασίες σύνδεσης, όπως οι συγκολλήσεις. Οι συγκολλήσεις είναι τεχνικές διαδικασίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την σύνδεση όμοιων και ανόμοιων τεμαχίων [1].

Συγκεκριμένα με τον όρο «συγκόλληση» εννοείται η ένωση δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων εξαιτίας της μεταλλουργικής τους σύνδεσης. Αρχικά, οι συγκολλήσεις μπορούν να διακριθούν με κριτήριο την σύνδεση των τεμαχίων ανάλογα την γεωμετρική τους θέση [2]. Αυτές οι συνδέσεις είναι :

- Μετωπική σύνδεση ή σύνδεση κατά συμβολή ( butt joint)
- Γωνιακή σύνδεση ( corner joint)
- Αυχενική σύνδεση ( Tee joint)
- Σύνδεση με επικάλυψη ( lap joint)
- Σύνδεση κατ' ακμή ( edge joint).

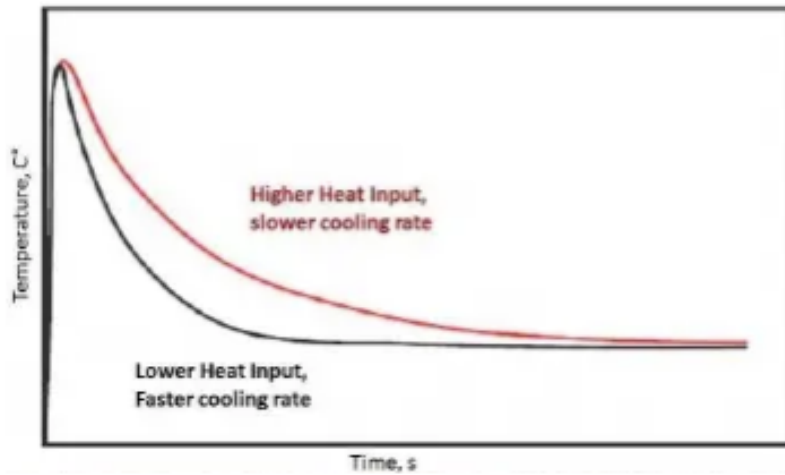
Οι συγκολλήσεις γενικότερα διακρίνονται σε διαδικασίες τήξης και σε συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης. Οι πρώτες απαιτούν την τήξη των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι δεύτερες πραγματοποιούνται σε μέταλλα που θερμαίνονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και σε συνθήκες πίεσης λόγω των ασκούμενων δυνάμεων σε αυτά [1], [3].

Υπάρχουν πολλές συμβατικές μέθοδοι που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες, αλλά μπορούν να εμφανίσουν αρνητικά στοιχεία σε υλικά. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι ελαφρά μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, κράματα αυτού με λεπτό πάχος αλλά και ο χαλκός [3],[4],[5]. Οι περισσότερες συμβατικές μέθοδοι που ανήκουν κυρίως στην κατηγορία της τήξης είναι ανίκανες να συγκολλήσουν ανόμοια κράματα [1], [6].

### 1.2.2 Μειονεκτήματα συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης

Πιο αναλυτικά, στις συμβατικές μεθόδους τήξης εξαιτίας της παραγωγής υψηλών θερμοκρασιών παρατηρείται η τήξη των μετάλλων, ώστε να είναι σε υγροποιημένη κατάσταση κατά την σύνδεση τους. Εκτός της τήξης τους, απαιτείται η συμμετοχή υλικού πλήρωσης και η χρήση ηλεκτροδίου ή καλωδίου. Άλλες χρήζουν ανάγκης αδρανούς αερίου προκειμένου να λειτουργήσει ως ασπίδα προστασίας για να αντιμετωπιστεί η οξείδωση του μετάλλου [3]. Με την χρήση αδρανών αερίων σε τεχνικές συγκόλλησης επιβαρύνεται το περιβάλλον [7]. Σε άλλες τεχνικές τα μέταλλα θερμαίνονται σε θερμοκρασίες τήξης κι έπειτα στερεοποιούνται για να σχηματιστεί η ένωση που απαιτείται. Η τήξη και η στερεοποίηση προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού συγκόλλησης. Τέτοιες ελαττωματικές επιπτώσεις μπορεί να είναι η μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, σε κόπωση, χαμηλή ολκιμότητα και σκληρότητα.

Η ηλεκτρική και χημική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται σε μια συγκόλληση μέσω θερμομηχανικών διαδικασιών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (γνωστή ως heat input). Παρ' όλο που είναι κρίσιμη παράμετρος για την διαδικασία της συγκόλλησης, ιδίως για αυτές της τήξης μπορεί να θεωρηθεί αρνητικός δείκτης της θερμοκρασίας που διαχέεται στο υλικό σχετικά με συγκολλήσεις λεπτών σε πάχος πλακών, κυρίως αλουμινίου [8,9]. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, όσο αυξάνεται η εισροή θερμότητας, μειώνεται ο ρυθμός ψύξης που σχετίζεται με το πάχος των πλακών συγκόλλησης.



Εικόνα 9 (Funderburk,1999) [4]

Επιπλέον, η μεγάλη αύξηση της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παρέχεται στην συγκόλληση μπορεί να συμβάλλει στην δημιουργία ανεπιθύμητων οπών στην επιφάνεια του συγκολλησίμου υλικού.



Εικόνα 10(Craig, 2001) [4]

Εξίσου σημαντικά ελαττώματα είναι πορώδες αλλά και οι ρηγματώσεις. Όσον αφορά το πρώτο, μόρια του αέρια εισέρχονται στο λουτρό συγκόλλησης. Έτσι για παράδειγμα σε συγκολλήσεις αλουμινίου η διαλυτότητα του υδρογόνου αυξάνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας τήξης (Gilbertand Elwin, 2004) και συγκεντρώνεται στο λιωμένο αλουμίνιο στο λουτρό συγκόλλησης. Οι ρηγματώσεις αναφέρονται αποκλειστικά σε κράματα και όχι σε καθαρά μέταλλα [4].

Σημαντικό είναι πως πολλές συμβατικές μέθοδοι που ανήκουν και στις δύο κατηγορίες συγκόλλησης (τήξης και στερεάς κατάστασης) δεν εμφανίζουν καλά αποτελέσματα συγκόλλησης σε ανόμοια κράματα αλουμινίου, γιατί αυτά χαρακτηρίζονται από διαφορετικό σημείο τήξης και συντελεστή θερμικής διόγκωσης και αγωγιμότητας [1],[3].

### 1.2.3 Συγκολλήσεις Στερεάς Κατάστασης

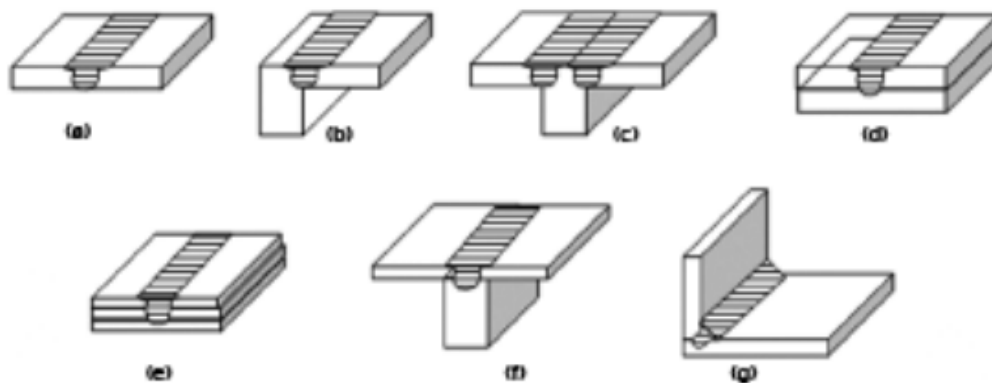
Σε συγκόλληση στερεάς κατάστασης η συνένωση των μετάλλων με μεταλλουργικό δεσμό πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες τήξης των μητρικών υλικών, ενώ παράλληλα τα υλικά παραμορφώνονται πλαστικά εξαιτίας θερμομηχανικών διαδικασιών υπό ασκούμενες πιέσεις. Σημαντικό είναι ότι δεν χρησιμοποιείται κάποιο υλικό πλήρωσης ή αδρανές αέριο, ενώ δεν δημιουργείται λουτρό συγκόλλησης και αποφεύγονται τα ανώτερα μειονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων. Ουσιαστικά σε συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης τα υλικά σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους τήξης δεν υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες τους, ενώ είναι ικανές και για την σύνδεση ανόμοιων μεταλλικών τεμαχίων [1,2,3,11].

## 1.3 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση – Friction Stir Welding

### 1.3.1 Εισαγωγή

Η πρώτη εμφάνιση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έγινε το 1991 όταν εφευρέθηκε από τον W. Thomas και την επιστημονική ομάδα στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (TWI) στο Cambridge της Αγγλίας, ως αποτέλεσμα χρόνιων ερευνών για την συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων, κυρίως αλουμινίου. Αργότερα εκτός των ελαφρύτερων μετάλλων, επεκτάθηκε σε υπόλοιπα μη σιδηρούχα μέταλλα όπως ο χαλκός, ορείχαλκος αλλά και στην συγκόλληση ανόμοιων μεταλλικών τεμαχίων μεταξύ τους [5], [12], [13], [14].

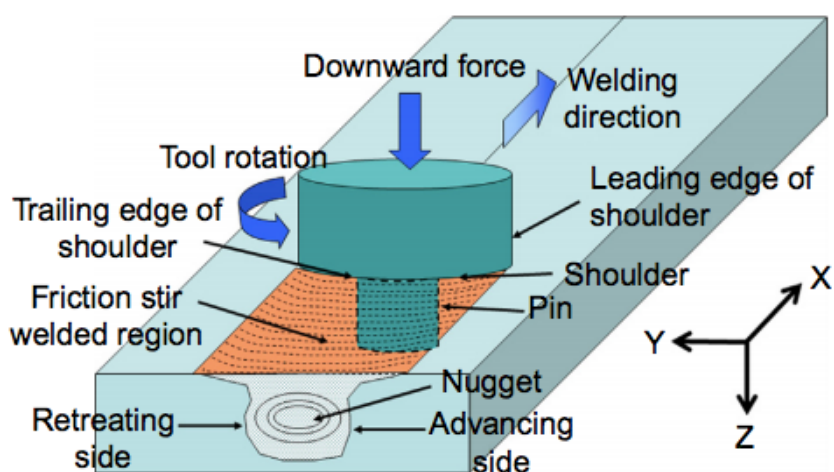
Ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης η οποία επιτρέπει την συγκόλληση με καλά αποτελέσματα σε ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων με ποικίλα γεωμετρικά σχήματα. Παράλληλα, μπορεί να εφαρμοστεί σε μη θερμικώς επεξεργάσιμα κράματα, κράματα της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής αλλά και σε προϊόντα διέλασης με αποτέλεσμα την ραγδαία εξέλιξη της στην μεταποιητική βιομηχανία [3],[8]. Αρχικά, οι συγκολλήσεις μπορούν να διακριθούν με κριτήριο την σύνδεση των τεμαχίων ανάλογα την γεωμετρική τους θέση [2]. Αυτές οι συνδέσεις είναι



Εικόνα 11 Διατάξεις συγκόλλησης για συγκόλληση τριβής με ανάδευση. (a) Square butt, (b) Edge Butt, (c) T-butt joint, (d) Lap Joint, (e) Multiple lap joint, (f) T-lap joint, (g) Fillet Joint [68]

### 1.3.2 Αρχή της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνική η οποία βασίζεται σε ένα μη αναλώσιμο εργαλείο συγκόλλησης (tool) το οποίο αποτελείται από ένα στέλεχος (shank), από μια κεφαλή-περιαυχένιο (shoulder) και έναν πείρο (pin). Αυτά συγκρατούνται σε ειδική μηχανή η οποία περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της. Το εργαλείο είναι συνήθως κυλινδρικό, χαρακτηρίζεται από περιστροφική κίνηση, βυθίζεται στα τεμάχια εργασίας, συγκεκριμένα στις επαπτόμενες ακμές τους και κινείται κατά την γραμμή σύνδεσης (joint - welding direction). Οι πιο διαδεδομένες συνδέσεις είναι η μετωπική και με επικάλυψη όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Η Εικόνα 12 αποτυπώνει το γενικό σχεδιάγραμμα της συγκόλλησης με τριβή και ανάδευση με όλες τις παραμέτρους οι οποίες θα αναλυθούν πιο διεξοδικά.

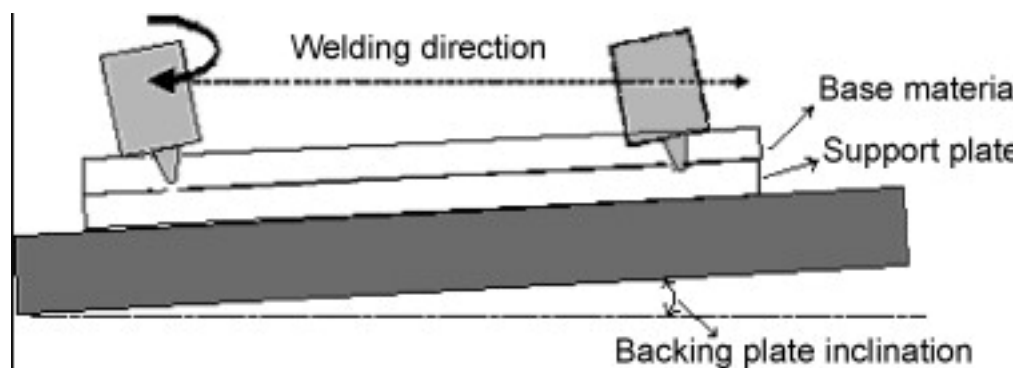


Εικόνα 12 Σχηματική απεικόνιση της Συγκόλλησης με Τριβή και Ανάδευση [11]

Τα προς συγκόλληση τεμάχια εργασίας κόβονται σε ορθογώνια σχήματα κυρίως (πλάκες), συνδέονται μαζί, στήνονται και συσφίγγονται στην βάση μιας ειδικής πλάκας υποστήριξης της μηχανή συγκόλλησης. Πακτώνονται σταθερά, ώστε να εμποδιστεί η απώθηση τους στην διάρκεια της συγκόλλησης (Εικόνα13). Υπάρχουν ειδικοί σφιγκτήρες οι οποίοι παρεμποδίζουν την πλευρική κίνηση ή την ανύψωση των τεμαχίων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης [7], [2], [3], [30].

Το μήκος του πείρου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην υπερβαίνει το πάχος των τεμαχίων εργασίας, ενώ το περιαυχένιο θα πρέπει να είναι σε πλήρη επαφή με τις πλάκες των κομματιών εργασίας για να μπορεί να οδηγεί την συγκόλληση στην

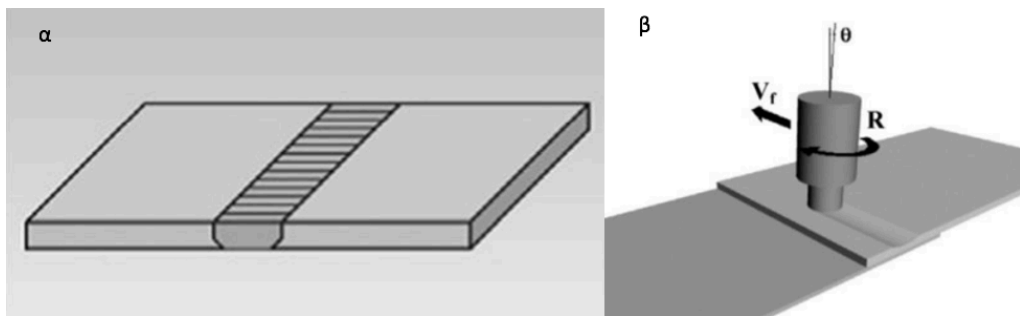
διεύθυνση της και να παράγει την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας. Επιπλέον η διάμετρος του περιανχένιου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του πείρου [2], [3], [30].



Εικόνα 13 Πλάκα υποστήριξης των πακτωμένων τεμαχίων [16]

Η διαδικασία της συγκεκριμένης συγκόλλησης βασίζεται στην αρχή μια σύνθετης θερμομηχανικής διαδικασίας. Πιο αναλυτικά, το εργαλείο συγκόλλησης είναι ο κινητήριος μοχλός για την διαδικασία καθώς είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη τριβής και θερμότητας ανάμεσα σε αυτό και το υλικό προς συγκόλληση. Με αυτόν τρόπο σχηματίζεται μια «μαλακή» περιοχή κοντά στο εργαλείο συγκόλλησης η οποία επιτρέπει την πλαστική παραμόρφωση του υλικού στην περιοχή συγκόλλησης (Friction Stir welded region). Η θερμότητα παράγεται ανάμεσα στο εργαλείο και στα τεμάχια εργασίας αλλά και λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης κατά την διεύθυνση συγκόλλησης. Τα υλικά προς συγκόλληση αναμειγνύονται μηχανικά στην περιοχή της συγκόλλησης και ρευστοποιούνται ώστε να συγκολληθούν υπο μηχανική πίεση [1], [2], [3], [5],[8],[7], [11], [15].

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 12 παρατηρούνται εκατέρωθεν της περιοχής συγκόλλησης δυο διαφορετικές πλευρές οι οποίες επηρεάζουν την συγκόλληση των τεμαχίων εργασίας. Η πλευρά όπου το εργαλείο κινείται με ταχύτητα ομόρροπη με την κατεύθυνση ταχύτητας της συγκόλλησης ονομάζεται προωθητική πλευρά (advancing side). Η πλευρά όπου το εργαλείο περιστρέφεται και κινείται με αντίθετη κατεύθυνση από την ταχύτητα συγκόλλησης ονομάζεται υποχωρούσα πλευρά (retreating side) [8] ,[16] [47].



Εικόνα 14 α) Συγκόλληση μετωπική β) Συγκόλληση με Επικάλυψη [102]

Οι πιο διαδεδομένες συνδέσεις είναι η μετωπική και με επικάλυψη όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.

Η διεργασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία όπου ασκούνται δυνάμεις από το εργαλείο στις πλάκες εργασίες και εκτίθενται σε θερμοκρασίες. Άρα για τον έλεγχο και αποφυγή ελαττωμάτων όπως η φθορά των εξαρτημάτων θα πρέπει να γίνεται έλεγχος και μετατροπές στον κύκλο συγκόλλησης. Ουσιαστικά ο κύκλος συγκόλλησης χωρίζεται σε ξεχωριστά στάδια, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετική ροή θερμότητας και θερμικό προφίλ κατά την ομαδική κίνηση εργαλείου και υλικού συγκόλλησης [3].

**1. Στάδιο βύθισης (plunge phase):** Το εργαλείο συγκόλλησης κινείται περιστροφικά με σταθερή ταχύτητα, προσεγγίζει το υλικό και στην συνέχεια διεισδύει σε αυτό ώστε να παραχθεί το αρχικό ποσό θερμότητας. Παράλληλα παραμένει σταθερό κατά μήκος της συγκόλλησης με την βοήθεια κατακόρυφης δύναμης έως ότου το περιουχένιο να έρθει σε επαφή με το τεμάχιο εργασίας. Η προσέγγιση φαίνεται στην Εικόνα 15. Σε αυτό το στάδιο αρχίζει η προθέρμανση και η πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

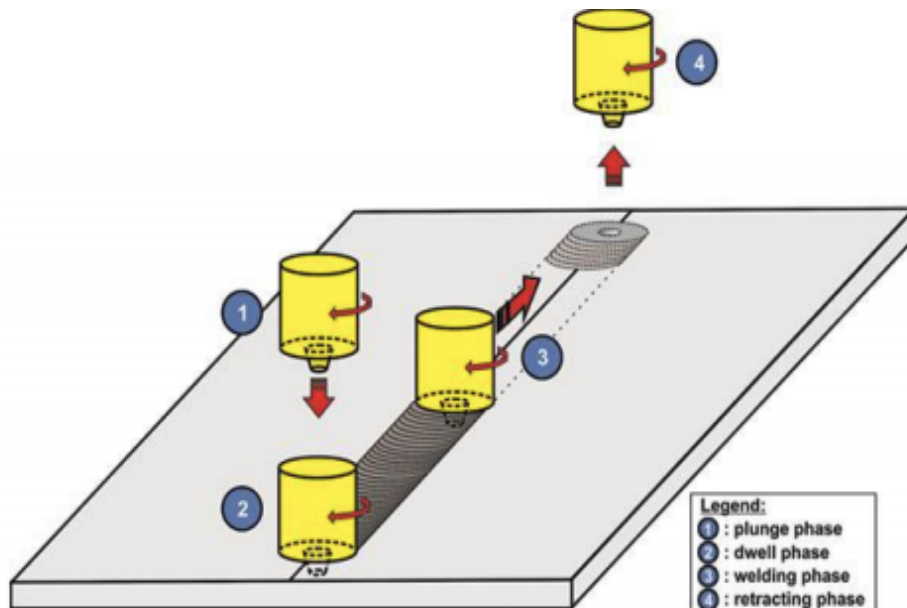
**2. Στάδιο σταθεροποίησης (dwell phase):** Το εργαλείο συγκόλλησης πραγματοποιεί περιστροφική κίνηση και με την επίδραση αξονικής δύναμης το εργαλείο πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού, ενώ το περιουχένιο έρχεται σε επαφή με τα τεμάχια εργασίας. Στο πλαίσιο αυτής της περιστροφικής κίνησης το εργαλείο βυθίζεται αργά και σταδιακά στο τεμάχιο εργασίας. Από την άλλη η επαφή του περιουχένιου με την άνω επιφάνεια των τεμαχίων γίνεται με πιο βίαιο τρόπο. Η παραπάνω φάση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμοκρασίας που είναι απαραίτητη για την λειτουργία της συγκόλλησης στις πακτωμένες πλάκες των υλικών συγκόλλησης (Στάδιο προθέρμανσης). Με την παραγωγή επαρκούς θερμότητας επιτυγχάνεται η πλαστική παραμόρφωση και κίνηση του υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης. Αυτή η



διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φτάσει το ελαστικό μέτρο του υλικού (elastic modulus), μέχρι η δύναμη πίεσης στην διεπαφή εργαλείου – υλικού να χαλαρώσει γεγονός που αποδεικνύει την εκκίνηση της συγκόλλησης.

**3. Στάδιο συγκόλλησης (welding phase):** Μετά τη προθέρμανση που έχει ζωτική σημασία στην διαδικασία, ακολουθεί η φάση της συγκόλλησης μέσω μιας σύνθετης θερμομηχανικής διαδικασίας που περιλαμβάνει την ολοκληρωμένη δράση της θέρμανσης και της πλαστικής παραμόρφωσης. Στο πλαίσιο αυτού του σταδίου το εργαλείο κινείται περιστροφικά σταθερά στην διεύθυνση της συγκόλλησης εξαιτίας ασκούμενων κατακόρυφων και πλευρικών δυνάμεων που εμποδίζουν να βγουν εκτός πορείας το εργαλείο. Το περιανχένιο περιτριγυρίζεται από όγκο πλαστικοποιημένου υλικού. Παράλληλα το στάδιο χαρακτηρίζεται από δυναμική ανάδευση του βασικού υλικού κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης των τεμαχίων αυτών. Επειδή η προθέρμανση δεν προσφέρει πλήρη διάχυση, τα υλικά βάσης - τεμάχια εργασίας που έχουν πακτωθεί στις πλάκες υποστήριξης αναδεύονται με το εργαλείο με την βοήθεια του πείρου. Επιπλέον το περιανχένιο που βρίσκεται σε επαφή με τα τεμάχια σφυρηλατεί τα υλικά, και αποβάλλει το υλικό πίσω από το εργαλείο σε μια κοιλότητα που σχηματίζεται πίσω από το εργαλείο συγκόλλησης. Έτσι με την συνδυαστική δράση επηρεάζει την δημιουργία της θερμικής ενέργειας και επιτυγχάνεται η μηχανική ανάδευση των υλικών βάσης όταν έχουν γίνει πιο μαλακά με την μορφή ατομικής διάχυσης ή διάλυσης ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία ραφής πίσω από το εργαλείο, χωρίς όμως την τήξη των υλικών. Έτσι εξασφαλίζεται μια ποιοτική δομή στην ένωση της συγκόλλησης [48].

**4. Στάδιο ψύξης (exit or retract phase):** Όταν το εργαλείο συγκόλλησης προσεγγίζει την ακμή των τεμαχίων, το εργαλείο εξέρχεται πλήρως από τα τεμάχια στον κατακόρυφο άξονα συνεχίζοντας να περιστρέφεται. Ο περιστρεφόμενος πείρος απομακρύνεται αφήνοντας μια χαρακτηριστική οπή (keyhole) ανεξαρτήτως ταχύτητας. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές όπως η αναπλήρωση του υλικού στην οπή ή η δημιουργία μεγαλύτερου μήκους συγκόλλησης από το επιθυμητό μήκος [3], [5], [17].



Εικόνα 15 Στάδια κατά τον κύκλο της συγκόλλησης [17]

## 1.4 Παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση

Όπως γίνεται κατανοητό η συγκόλληση διά τριβής με ανάδευση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία στην οποία περιλαμβάνεται η κίνηση του υλικού και η πλαστική παραμόρφωση του. Έτσι έχουν αναλυθεί συγκεκριμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης. Οι παράμετροι συγκόλλησης, η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης και ο σχεδιασμός της ραφής επιδρούν στην ροή του υλικού και στο θερμικό πεδίο που αναπτύσσεται στην ζώνη συγκόλλησης με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την εξέλιξη της μικροδομής του υλικού [Mishra R.S. et al., 2005]. Η ένταση και η αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες :

### 1.4.1 Ταχύτητα Περιστροφής Εργαλείου Συγκόλλησης

(Spindle speed-tool rotation)

Είναι η ταχύτητα του άξονα του εργαλείου και δηλώνει την συχνότητα της ταχύτητας που περιστρέφεται ενώ συμβολίζεται σε (rpm). Γενικά η ταχύτητα καθορίζεται

ανάλογα με το μέταλλο το οποίο υπόκειται την κατεργασία, ενώ μπορεί να περιστραφεί δεξιόστροφα ή ανάποδα. Με την κατάλληλη ταχύτητα του κοπτικού εργαλείου αντιμετωπίζονται προβλήματα που δυσχεραίνουν την ζωή του εργαλείου και την ποιότητα της επιφάνειας του τελικού υλικού μετά την αποπεράτωση της συγκόλλησης. Η περιστροφή του εργαλείου συμβάλλει στην μετακίνηση του υλικού γύρω από αυτό και έτσι επιτυγχάνεται η ανάμειξη του υλικού για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της συγκόλλησης. Η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου αυξάνει το ποσοστό της θερμότητας λόγω τριβής και κατ' επέκταση αυξάνεται η θερμοκρασία στην ζώνη συγκόλλησης. Η σχέση μεταξύ της θερμότητας λόγω τριβής και της περιστροφικής ταχύτητας είναι μη γραμμική αφού ο συντελεστής τριβής αλλάζει με την αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας και της θερμοκρασίας.

Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν κάποιες παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας [1,7,11,18].

- I. Αν απαιτείται πολύ υψηλή ένταση και ποιότητα τότε επιλέγονται πιο γρήγορες ταχύτητες. Λόγω της υψηλότερης περιστροφής εργαλείου παράγονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξαιτίας της μεγαλύτερης τριβής, αφού η ανάμειξη γίνεται σε μεγαλύτερη ένταση.
- II. Το υλικό όπως αναφέρθηκε είναι βασική παράμετρος. Γι' αυτό το λόγο στα πιο σκληρά υλικά απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα.
- III. Μέγεθος συγκόλλησης. Όταν θέλουμε συγκόλληση σε μεγάλες επιφάνειες απαιτείται μικρότερη ταχύτητα
- IV. Πάχος της επιφάνειας της πλάκας εργασίας (workpiece) που πρόκειται να συγκολληθεί.

#### 1.4.2 Ταχύτητα Προώθησης Εργαλείου Συγκόλλησης (**Traverse – Welding pressure**)

Η ταχύτητα προώθησης μετριέται σε (mm/min) και αποτυπώνει τον ρυθμό κίνησης (αργό ή γρήγορο αλλά σταθερό) του εργαλείου κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης. Είναι συνδεδεμένη με την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Οι δύο αυτές ταχύτητες πρέπει να επιλέγονται με μεγάλη προσοχή για να διασφαλιστεί ένας

επιτυχημένος και αποτελεσματικός κύκλος συγκόλλησης. Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και την μείωση της ταχύτητας προώθησης, επιτυγχάνεται μια θερμότερη συγκόλληση. Με αυτόν τον τρόπο στην φάση συγκόλλησης τα υλικά (που θα υποστούν την κατεργασία της συγκόλλησης) που περιβάλλουν το εργαλείο θα πρέπει να είναι θερμά για την διευκόλυνση μετακίνηση του εργαλείου και την πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Η συνδυαστική κίνηση του εργαλείου παράγει θερμότητα τριβής με τις πλάκες τεμαχίων εργασίας και εξαπλώνει το μαλακό πλαστικοποιημένο υλικό γύρω από το εργαλείο. Παράλληλα σφυρηλατεί το υλικό για να σχηματίσει μια συνεχόμενη άρθρωση στερεάς κατάστασης [7], [49].

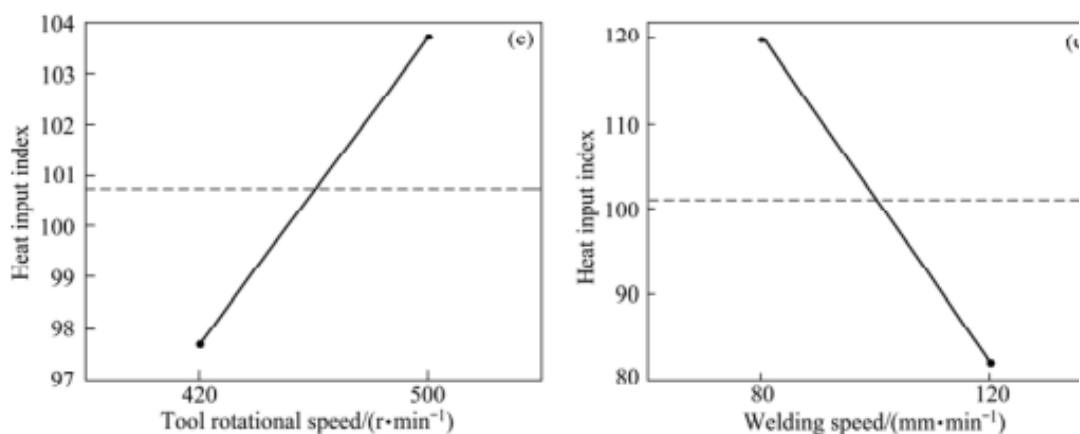
Συμπερασματικά [90] :

1. Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης (προώθησης) είναι σχετικά χαμηλή, η θερμότητα ανάπτυξης στον πυρήνα της συγκόλλησης είναι ιδιαίτερα υψηλή. Η θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής ανά μονάδα μήκους είναι ιδιαίτερα υψηλή ενώ επίσης παρατηρείται η δημιουργία ευμεγεθών κόκκων.
2. Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης (προώθησης) είναι σχετικά υψηλή, η θερμότητα ανάπτυξης στην δεν επαρκεί για να ρέει ομαλά το πλαστικοποιημένο υλικό. Εξαιτίας της χαμηλής εισροής θερμότητας, δεν πλαστικοποιείται επαρκώς το υλικό και δεν αναδεύεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Λόγω μείωσης της θερμοκρασίας παρατηρείται μείωση του μεγέθους των κόκκων.
3. Εάν η ταχύτητα συγκόλλησης (προώθησης) είναι αυτή που απαιτείται, αναπτύσσεται θερμότητα τέτοια ώστε το υλικό να πλαστικοποιείται, να αναδεύεται και αναμειγνύεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Αποτέλεσμα αυτών είναι η ομαλή ροή του υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης και η μικροδομή αποτελούμενη από ισαξονικούς εκλεπτυσμένους κόκκους. η παραγωγή θερμότητας, ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη, οδηγώντας σε καλύτερη θερμοκρασιακή κατανομή και αποτελεσματικότερη ανακρυστάλλωση.

**Feed rate:** Είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας με τον οποίο τροφοδοτείται το κοπτικό εργαλείο και δηλώνει κατά πόσο προωθείται στην πλάκα επεξεργασίας. Επομένως σχετίζεται με την ταχύτητα της συγκόλλησης [33].

## Θερμότητα και Ταχύτητες

Καθώς το εργαλείο κινείται σε δύο άξονες, κατά μήκος των πλακών και περιστροφικά, η θερμότητα παράγεται κατά κύριο λόγο από την τριβή της διεπαφής τεμαχίου εργασίας και περιουχένιου και δευτερευόντως από την επαφή πείρου με την επιφάνεια των επεξεργάσιμων υλικών όταν βρίσκεται εντός αυτών. Αυτή η θερμότητα που παράγεται μέσω τριβής είναι αποτέλεσμα της διασποράς θερμότητας και ενέργειας [7], [50]. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες όπως ο τύπος κράματος, το βάθος διεϊσδυσης, το είδος συγκόλλησης, η περιστροφική ταχύτητα και ο τύπος κράματος οι οποίοι μεταβάλλουν την ταχύτητα προώθησης [51]. Κατά την διάρκεια της ταχύτητας προώθησης το εργαλείο μεταφέρεται στην διεύθυνση της συγκόλλησης, ενώ το μαλακωμένο υλικό ρέει από την μπροστινή ακμή του εργαλείου προς την οπίσθια εξαιτίας της περιστροφικής και πλευρικής κίνησης του εργαλείου. Με αυτόν τον τρόπο το υλικό στοιβάζεται στο πίσω άκρο του εργαλείου. Αυτό οφείλεται και στην αξονική δύναμη που ασκείται στο υλικό [KOYMAR.2008].



Εικόνα 16 Επίδραση ταχύτητας περιστροφής και προώθησης στην παραγόμενη θερμότητα της συγκόλλησης [91]

Η παραπάνω Εικόνα παρουσιάζει την επίδραση της ταχύτητας προώθησης και περιστροφής στην θερμότητα που αναπτύσσεται στην συγκόλληση σε πειραματική διαδικασία που μελέτησε την συγκόλληση όμοιων κραμάτων AA5083-H112 [91]. Η υπέρμετρη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες αυξημένης παραγόμενης θερμότητας από αυτήν που απαιτείται, ενώ παράλληλα μειώνεται ο ρυθμός απόψυξης μετά την συγκόλληση στην ζώνη ανάδευσης. Επιπλέον μπορεί να προκληθεί υπερβολική πλαστικοποίηση και ανάδευση του υλικού και κυρίως στην άνω επιφάνεια, με αποτέλεσμα το υλικό να ρέει ανώμαλα και να δημιουργούνται κενά στην

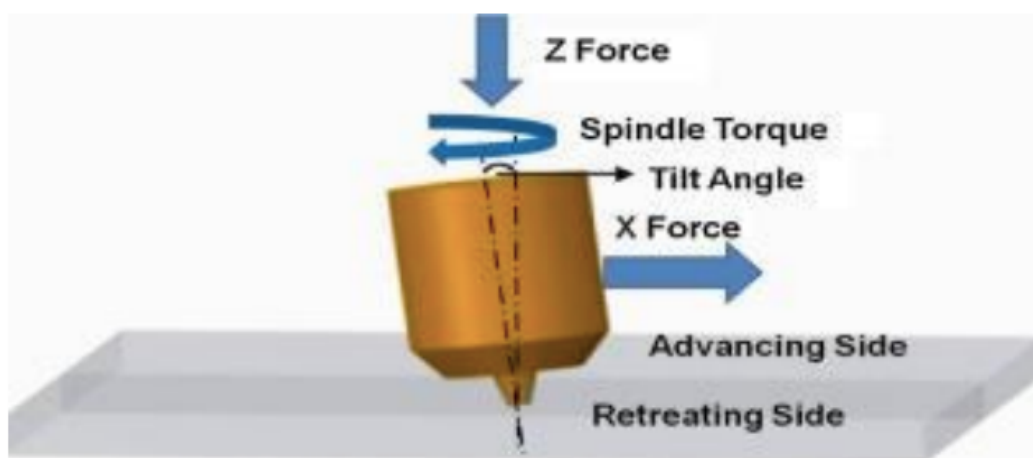
ζώνη ανάδευσης. Από την άλλη μεριά, όταν η εισροή θερμότητας δεν είναι τόσο μεγάλη όσο χρειάζεται, το υλικό δεν μαλακώνει και δεν πλαστικοποιείται επαρκώς, με αποτέλεσμα να επικρατεί ανεπαρκή ανάμειξη των υλικών εξαιτίας και της αύξησης της τάσης ροής (flow stress) [92].

Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων, έχει βρεθεί ότι για μικρές περιστροφικές ταχύτητες και δεδομένη ταχύτητα συγκόλλησης το όριο διαρροής είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου. Σε πειραματική διαδικασία συγκόλλησης για την περίπτωση κράματος αλουμινίου 1050-H24, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής μέχρι τα 1000 rpm, τόσο η εφελκυστική αντοχή όσο και η επιμήκυνση βελτιώνονται, φθάνοντας στο μέγιστο, πριν πέσουν ξανά λόγω των ιδιαίτερα υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων του εργαλείου [93].

#### 1.4.3 Δυνάμεις στην συγκόλληση τριβής με ανάδευση

Στην φάση της συγκόλλησης με τριβή κι ανάδευση εμφανίζονται σχετικές δυνάμεις που κατευθύνουν το υλικό σε μια σύνθετη κίνηση και είναι υπεύθυνες για την «βίαιη» επαφή του κάτω άκρου του εργαλείου με την επιφάνεια του υλικού και την κίνηση του προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης (traverse direction). Συγκεκριμένα αναπτύσσονται δύο δυνάμεις στην διεπαφή του εργαλείου όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω Εικόνα. Η διατήρηση της επαφής επιτυγχάνεται με κάθετη – κατακόρυφη δύναμη  $Z$  που ασκείται προς τα κάτω. Η συγκεκριμένη δύναμη ασκείται όταν το εργαλείο συγκόλλησης εισέρχεται στα τεμάχια εργασίας. Θα πρέπει να είναι κατάλληλη έτσι ώστε εκτός από την προθέρμανση, να δημιουργούνται και ευνοϊκές συνθήκες για την «μαλάκωση» (softening) και πλαστικοποίηση του υλικού. Έπειτα ασκείται μια πλευρική – οριζόντια αξονική δύναμη  $X$  η οποία είναι γνωστή και ως δύναμη συγκόλλησης. Η συγκεκριμένη είναι υπεύθυνη για την μετατόπιση του εργαλείου κατά μήκος της συγκόλλησης. Λειτουργεί σε συνδυασμό με την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης και δημιουργείται από την αντίσταση του υλικού όταν επιδρά

σε αυτό το εργαλείο της συγκόλλησης. Έτσι το εργαλείο διασχίζει την διαδρομή κατά μήκος της γραμμής του άκρου μέχρι το τέλος της συγκόλλησης [3],[16],[89].



Εικόνα 17 Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων που ασκούνται κατά της διάρκεια της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση [89]

#### 1.4.4 Βάθος εισαγωγής ή βύθισης και γωνία κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης

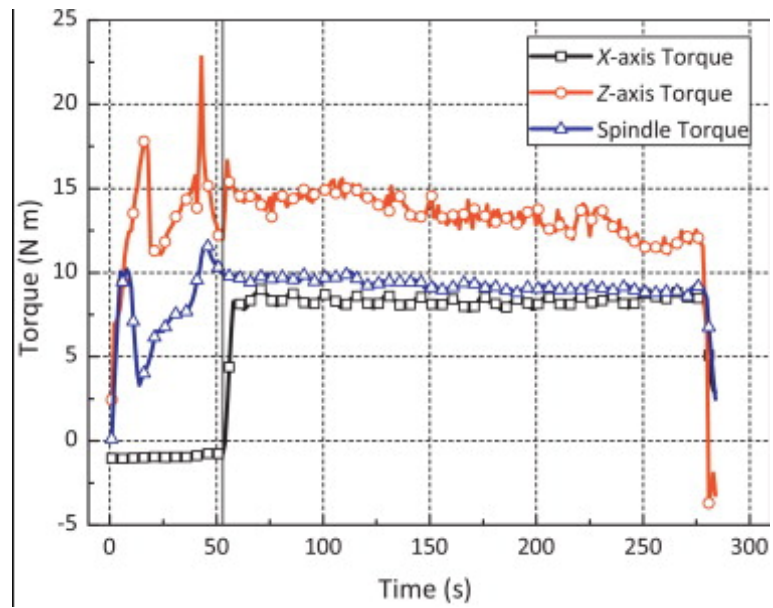
##### **Βάθος εισαγωγής- Κάθετη δύναμη**

Το βάθος εισαγωγής ορίζεται από το χαμηλότερο σημείο του περιουχένιου κάτω από την επιφάνεια της πλάκας συγκόλλησης. Όταν εισέρχεται ο πείρος στο υλικό αυξάνει την πίεση από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου για να διασφαλιστεί ότι το εργαλείο θα μετακινηθεί κατά την διεύθυνση της συγκόλλησης στο κατάλληλο βάθος διείσδυσης. Το ύψος που φέρει ο πείρος σχετίζεται με το βάθος εισαγωγής του. Η κάθετη δύναμη που εφαρμόζεται στο εργαλείο είναι παράμετρος ζωτικής σημασίας που σχετίζεται με το βάθος εισαγωγής του εργαλείου συγκόλλησης. Η κάθετη δύναμη είναι αυτή που εξασφαλίζει το είδος της ποιότητας και της μορφολογίας της συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει, αφού το βάθος εισαγωγής του εργαλείου προκαλεί την επαφή με τα τεμάχια εργασίας, με συνέπεια να αναπτύσσεται θερμότητας εξαιτίας της τριβής τους. Όσον αφορά την δημιουργία θερμότητας κατά την διάρκεια της συγκόλλησης λοιπόν, το βάθος εισαγωγής έχει σημαντικό επιδραστικό ρόλο ενώ ελέγχει την δράση σφυρηλάτησης και πίεσης του εργαλείου συγκόλλησης στο τεμάχιο εργασίας όπως προαναφέρθηκε.

- Το περιανχένιο του εργαλείου δεν εφάπτεται με την επιφάνεια εργασίας στην πλάκα υποστήριξης της πρέσας στην περίπτωση όπου ο πείρος βυθίζεται σε πολύ ρηχό σημείο μέσα στα τεμάχια εργασίας. Επομένως λόγω της μικρότερης αξονικής δύναμης από αυτή που απαιτείται, η ροή του υλικού είναι μη ομαλή, αφού το περιανχένιο δεν μπορεί να το μεταφέρει στο οπίσθιο μέρος του πείρου από το μπροστινό. Αποτέλεσμα της ανώμαλης ροής του υλικού είναι η αναποτελεσματική ανάμειξη του. Εξαιτίας της αδύναμης ανάδευσης δεν μπορεί το υλικό να καλύψει το πίσω μέρος του πείρου πλήρως και να σκορπιστεί γύρω από το εργαλείο δημιουργώντας επιφανειακές αυλακώσεις (lack of surface) ή ατέλειες τύπου «τούνελ» με εσωτερικές ρηγματώσεις και οπές (tunnel defect).
- Από την άλλη πλευρά, όταν ο πείρος εισέρχεται σε μεγάλο βάθος, το περιανχένιο δεν εφάπτεται μόνο, αλλά βυθίζεται και αυτό μέσα στο υλικό επεξεργασίας. Λόγω της υπέρμετρης αξονικής δύναμης δημιουργείται μεγάλος βαθμός ανάδευσης, αναπτύσσεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας, με συνέπεια το υλικό να διασπάται εκτός γραμμή σύνδεσης και στοιβάζεται στα άκρα της γραμμής συγκόλλησης, εκατέρωθεν του αποτυπώματος της συγκόλλησης. Το φαινόμενο αυτό στην βιβλιογραφία των συγκολλήσεων είναι γνωστό ως flash formation. Παράλληλα τα τεμάχια εργασίας τείνουν να λεπταίνουν τοπικά λόγω της πίεσης βύθισης του πείρου και του περιανχένιου [7], [32], [53], [54].

Από πειραματικές διαδικασίες που έχουν πραγματοποιηθεί σε κράματα AA2024-T4 [53], οι μεγαλύτερες δυνάμεις ασκούνται κατά το στάδιο βύθισης του εργαλείου στο υλικό. Ενώ η αξονική κάθετη δύναμη δεν είναι σταθερή σε σύγκριση με την ροπή του εργαλείου, και την πλευρική δύναμη (άξονα Ψ) που είναι ανάλογη με την ταχύτητα προώθησης. Η συγκεκριμένη δύναμη μάλιστα είναι πολύ μικρότερη από την αξονική [7], [32].

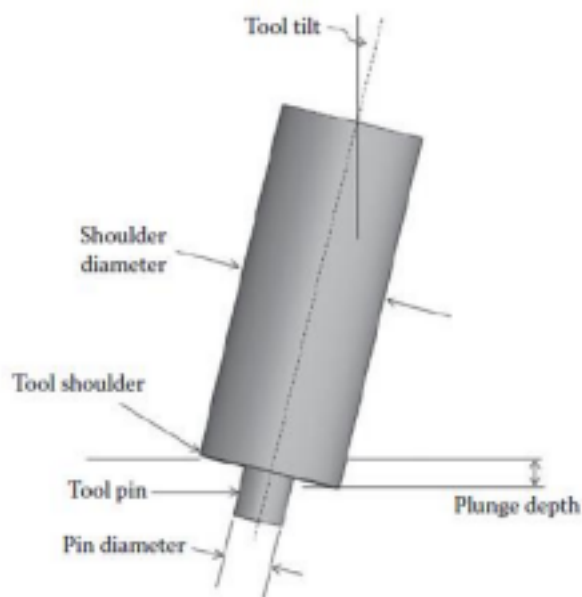




Εικόνα 18 Δυνάμεις στον κύκλο της συγκόλλησης [54]

Σύμφωνα με την εικόνα 16 στο πείραμα που διεξήχθη απεικονίζει την αρχική δυνατή αντίσταση του υλικού κατά την φάση προσέγγισης και προθέρμανσης (0-50 sec).

## Γωνία Κλίσης



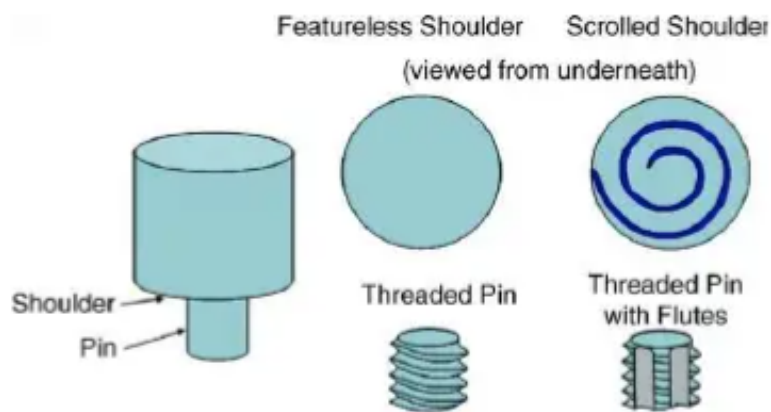
Εικόνα 19 Βάθος εισαγωγής και κλίση εργαλείου συγκόλλησης [96]

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος που επιδρά στην ροή της διαδικασίας είναι η γωνία κλίσης, η οποία αναφέρεται στην γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα του εργαλείου έτσι όπως είναι τοποθετημένο και του οριζόντιου άξονα της επιφάνειας των πακτωμένων τεμαχίων εργασίας. Η γωνία κλίσης μετριέται σε μοίρες ( $\theta$ ). Με την κατάλληλη κλίση εξασφαλίζεται η συγκράτηση του αναδύομενου υλικού από το περιανυχένιο και η μετακίνηση του από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου. Επομένως προσφέρεται μια ομαλή ροή του πλαστικοποιημένου μαλακού υλικού γύρω από το εργαλείο. Τις περισσότερες φορές η γωνία κλίσης του εργαλείου είναι μικρή κατά την βύθιση του στα προς επεξεργασία υλικό. Την συγκεκριμένη στιγμή όπως αναλύθηκε και στα στάδια του κύκλου συγκόλλησης, σύμφωνα με τον Fratini το υλικό υπόκειται σε τοπική διέλαση καθώς μεταφέρεται προς τα πίσω μέχρι το περιανυχένιο [7,52].

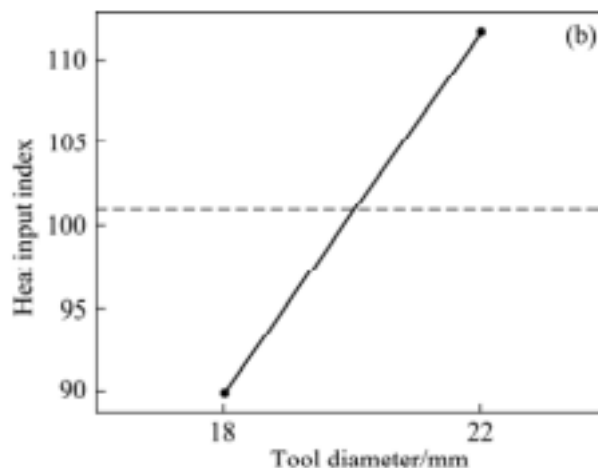
### 1.4.4 Σχεδιασμός Εργαλείου Συγκόλλησης

Από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της συσσωμάτωσης των υλικών βάσης είναι ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζεται το εργαλείο

συγκόλλησης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που λαμβάνει. Όπως είναι γνωστό το σχήμα του είναι κυρίως κυλινδρικό με ένα στέλεχος που έχει ένα περιαιχένιο (shoulder) και έναν πείρο (pin) το οποίο γενικά είναι σπειροειδή εξάρτημα το οποίο μπορεί να φέρει αυλακώσεις. Το εργαλείο συγκόλλησης όταν εισχωρεί στο υλικό θα πρέπει το περιαιχένιο να εφάπτεται με το υλικό και ο πείρος να είναι σε μικρή απόσταση από αυτό. Οι κύριες λειτουργίες του εργαλείου είναι η τοπική πρόσδοση θερμότητας και η ταυτόχρονη, μηχανική, ανάδευση του υλικού [11,64].



Εικόνα 20 Σχηματική απεικόνιση εργαλείου F.S.W [11]

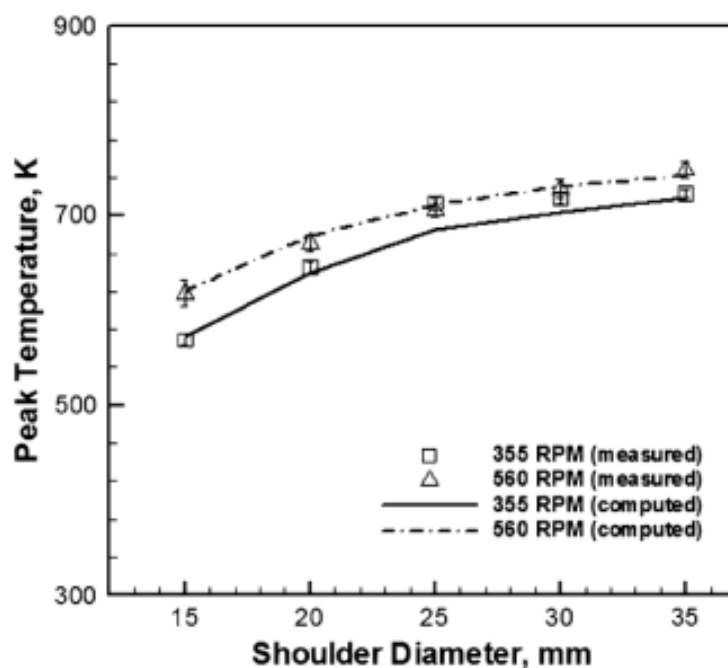


Εικόνα 21 Η επίδραση διαμέτρου του εργαλείου στην παραγόμενη θερμότητα της συγκόλλησης [91]

#### 1.4.4.1 Σχεδιασμός Περιαιχένιου εργαλείου συγκόλλησης (Shoulder Design)

Το τμήμα του περιαιχένιου του εργαλείου, σχετίζεται με την αξονική δύναμη του εργαλείου προς τα τεμάχια εργασίας, καθώς έρχεται σε επαφή με αυτά. Λόγω αυτής

της επαφής αναπτύσσεται θερμότητα μέσω της τριβής του περιουχένιου με τα τεμάχια εργασίας με σκοπό την πλαστικοποίηση του υλικού. Το περιουχένιο επηρεάζει το βάθος εισαγωγής του πείρου, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη ροή του υλικού μέχρι της αποπεράτωση της συγκόλλησης. Επιπρόσθετα το περιουχένιο παρέχει και περιορισμό στην ένταση του θερμαινόμενου όγκου του υλικού [11,64,68, 69].



Εικόνα 22 Η επίδραση της διαμέτρου του περιουχένιου στην μέγιστη παραγόμενη θερμοκρασία στην διάρκεια της συγκόλλησης [97]

Επομένως έχουν αναπτυχθεί πολλοί σχεδιασμοί για το περιουχένιο του εργαλείου. Γενικά υπάρχουν τρία είδη τύπου περιουχένιου ανάλογα το τελείωμα της επιφάνειας τους (shoulder end surface). Τέτοιες μπορεί να είναι οι εξής [68] :

- **Κυρτό περιουχένιο (concave shoulder):**

Το συγκεκριμένο είδος τελικής επιφάνειας είναι κυρτό και αποτελεί τον πρώτο σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκε ενώ είναι ο πιο κύριος σχεδιασμός σε συγκόλληση με τριβή και ανάδευση πλέον. Αποτελεί την πιο συνηθισμένη κατηγορία διότι διαθέτει έναν απλό σχεδιασμό, επεξεργάζεται εύκολα και σχηματίζει ποιοτικές συγκολλήσεις. Συγκεκριμένα η κυρτότητα της επιφάνειας του περιαιχενίου σχηματίζει γωνία 6-10° με τον άξονα του πείρου του εργαλείου. Κατά την διάρκεια που το εργαλείο βρίσκεται βυθισμένο στις πλάκες τεμαχίων, το υλικό που επηρεάζεται από τον πείρο εναποτίθεται σε μια κοιλότητα- αυλάκι που σχηματίζει το περιαιχένιο και σφυρηλατείται από αυτό. Κατά την προωθητική κίνηση του εργαλείου, το υλικό εντός της σχηματιζόμενης κοιλότητας πιέζεται από τον πείρο στην δράση επιρροής ροής υλικού από τον πείρο. Για να είναι αποτελεσματική η συγκόλληση με τον συγκεκριμένο τύπο περιαιχενίου η γωνία κλίσης του εργαλείου θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2-4°. Με την κατάλληλη κλίση το οπίσθιο άκρο του περιαιχενίου μπορεί να ασκεί την απαιτούμενη δύναμη στο υλικό και να το σφυρηλατεί.

- **Κοίλο περιαιχένιο (convex shoulder):**

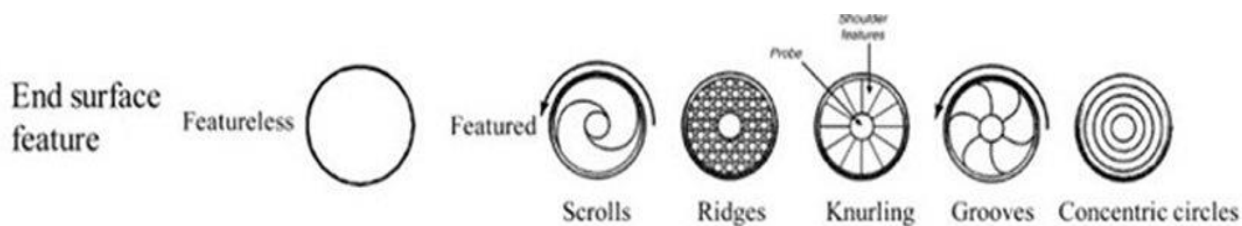
Στο ιστιτούτο συγκόλλησης (TWI) πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες προσπάθειες παραγωγής ενός περιαιχενίου με κοίλο προφίλ. Ωστόσο αρχικά ήταν σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο όπου το υλικό διασκορπιζόταν μακριά από τον πείρο καθιστώντας αναποτελεσματική την συγκόλληση. Ο μόνος επιτυχημένος συνδυασμός είναι όταν το περιαιχένιο διαθέτει διάμετρο 5mm που εισέρχονται σε φύλλα τεμαχίων με πάχος 0,4mm. Λόγω της περιεριστικότητας αυτής, στα περιαιχένια άρχισε μια νέα τάση όπου φέρουν ειδικά χαρακτηριστικά. Έτσι στο περιαιχένιο με κοίλη επιφάνεια όταν φέρει ειδικούς έλικες (scrolls) μεταφέρει το υλικό που βρίσκεται γύρω από το περιαιχένιο προς τον πείρο. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του γεωμετρικού χαρακτηριστικού είναι ότι παρέχει την δυνατότητα στο περιαιχένιο να εισχωρήσει προς τα τεμάχια εργασίας σε οποιοδήποτε σημείο κατά το μήκος της συγκόλλησης χωρίς να αλληλοεπιδρά η εξωτερική πλευρά του. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζονται ποιοτικές συγκολλήσεις, όταν το υλικό προωθείται με τους ειδικούς έλικες, συνδυάζοντας μεγάλη ευελιξία ακόμα και σε τεμάχια εργασίας με διαφορετικό πάχος.

- **Επίπεδο περιαιχένιο (flat shoulder):**

Η επίπεδη επιφάνεια του περιαιχηνίου αποτελεί τον απλούστερο τύπο. Δυστυχώς με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τις πλάκες εργασίας, καθοδηγεί σε αναποτελεσματική ροή του υλικού που επηρεάζεται από το περιαιχηνίο συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα. Συγκεκριμένα το υλικό δεν εγκλωβίζεται κάτω από το εργαλείο συγκόλλησης και εξωθείται εκτός της κοιλότητας δημιουργώντας ελαττωματική συγκόλληση [69].

#### **Χαρακτηριστικά περιαιχηνίου (shoulder features):**

Σε ορισμένες περιπτώσεις το περιαιχηνίο για να βελτιώσει την πλαστικοποίηση ή να αυξήσει την ποσότητα του πλαστικοποιημένου υλικού που επηρεάζεται από το περιαιχηνίο, φέρει ειδικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Απόρροια αυτών είναι η «μαλάκωση» περισσότερου υλικού με αποτέλεσμα η ροή του υλικού να είναι πιο ομαλή και το υλικό αναμιγνύεται και αναδύεται πιο αποτελεσματικά. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι σπειρώματα (ridges), αυλακώσεις (grooves, knurling), έλικες (scrolls) και κύκλους με κοινό κέντρο [68].

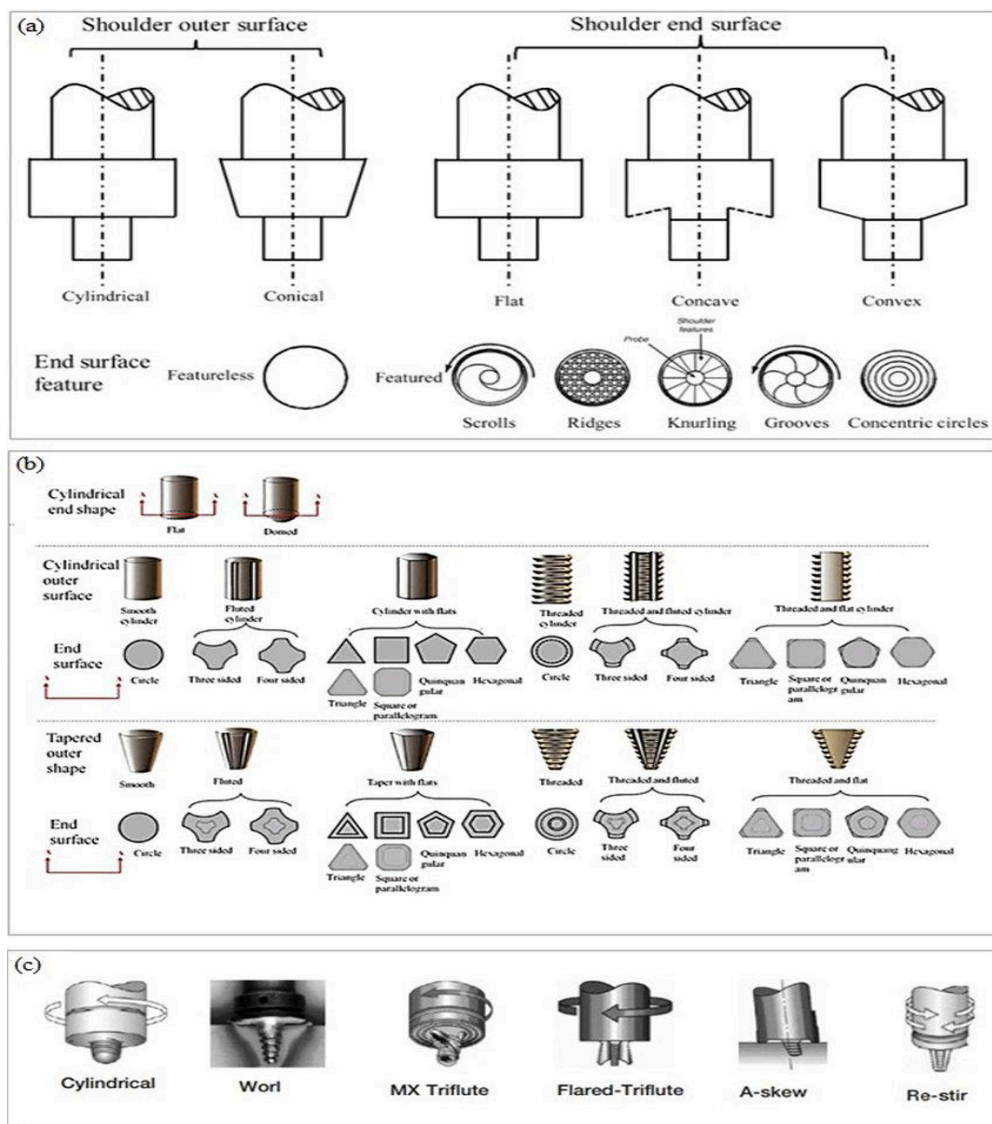


*Εικόνα 23 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τελικής επιφάνειας του περιαιχηνίου [69]*

#### **1.4.4.2 Σχεδιασμός πείρου εργαλείου συγκόλλησης**

Ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης εισέρχεται εντός των τεμαχίων εργασίας, παράγει θερμότητα τριβής και προκαλεί την πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος, ώστε να μην φθείρονται τα τεμάχια εργασίας και να οδηγεί ομαλά το υλικό από το μπροστινό στο οπίσθιο άκρο του εργαλείου [68],[69]. Όπως αναφέρθηκε και στην παράμετρο του βάθους εισαγωγής καθορίζει τον βαθμό παραμόρφωσης. Η πλαστική παραμόρφωση και η ταχύτητα προώθησης ελέγχονται από τον πείρο [70].

Στην παρακάτω Εικόνα παρουσιάζονται διάφοροι τύποι πείρων με γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ο πείρος εργαλείου είναι κυρίως κυκλικό με επίπεδη ή θολωτή τελική επιφάνεια – άκρο.



Εικόνα 24 Τύποι περιανχένιου και πείρου εργαλείου FSW [69]

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πείρων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι οι εξής:

- **Κυλινδρικός πείρος με στρογγυλή άκρη (Round bottom cylindrical pin):**

Ο συγκεκριμένος κυκλικός ή θολωτός πείρος βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης, ειδικά στο σημείο κάτω από τον πείρο, αφού μειώνει την δύναμη σφυρηλάτησης. Λόγω της απουσίας γωνιών εξαλείφονται οι συγκεντρώσεις τάσεων

[68],[71]. Οι διαστάσεις του μπορούν να τροποποιηθούν (μήκος, διάμετρος) προσφέροντας μεγάλη ευελιξία η οποία ενισχύεται όταν φέρει ειδικά χαρακτηριστικά όπως σπειρώματα (threads). Η πιο αποτελεσματική διάμετρος στην κάτω άκρη του πείρου έχει υπολογιστεί ότι είναι το 75% της διαμέτρου στο άνω άκρο του, ενώ όσο μειώνεται τόσο φθίνει η ποιότητα της συγκόλλησης ειδικά στο σημείο επαφής πείρου τεμαχίων εργασίας. Αυτά τα σπειρώματα προωθούν το υλικό από το περιαιχένιο στο άκρο του πείρου, ενώ βελτιώνουν την διάρκεια ζωής του εργαλείου συγκόλλησης. [68],[69],[71].



*Εικόνα 25 Κυρτό περιαιχένιο με κυλινδρικό πείρο και στρογγυλό άκρο [68]*

- **Κυλινδρικός πείρος με επίπεδη άκρη (Flat bottom cylindrical pin):**

Ο συγκεκριμένος τύπος πείρου είναι ο πιο διαδεδομένος σε χρήση. Η επιφανειακή ταχύτητα είναι μηδενική στο κέντρο και φτάνει σε μέγιστη τιμή στο άκρο. Η ταχύτητα αυτή καθορίζει την πλαστική παραμόρφωση του υλικού σε συνάρτηση με τον συντελεστή τριβής των μετάλλων. Γενικότερα οι επιφανειακές ταχύτητες είναι υψηλότερες από αυτές των πείρων με στρογγυλή άκρη [68].





Εικόνα 26 Κυλινδρικός πείρος με επίπεδη άκρη [68]

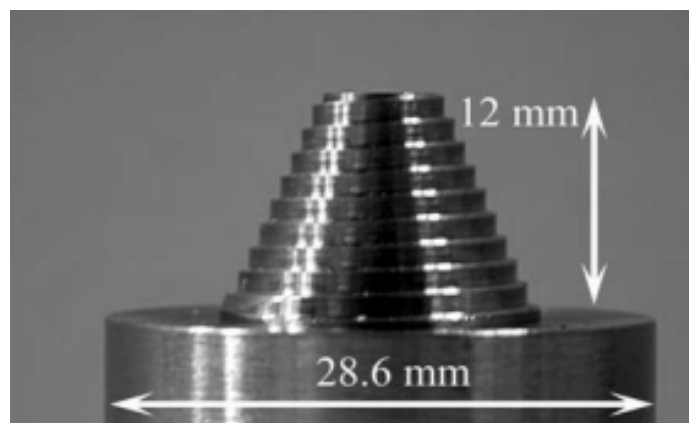
- **Κωνικός πείρος (Truncated cone pin):**

Μια εξέλιξη των απλών κυλινδρικών πείρων είναι η τροποποίηση τους σε κωνικό σχήμα. Ο κωνικός πείρος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα προορίζεται για συγκολλήσεις τεμαχίων με πάχος μεγαλύτερο από 12mm σε συνδυασμό με υψηλότερες ταχύτητες προώθησης [68].



Εικόνα 27 Κωνικός πείρος σε κοίλο περιανχένιο [68]

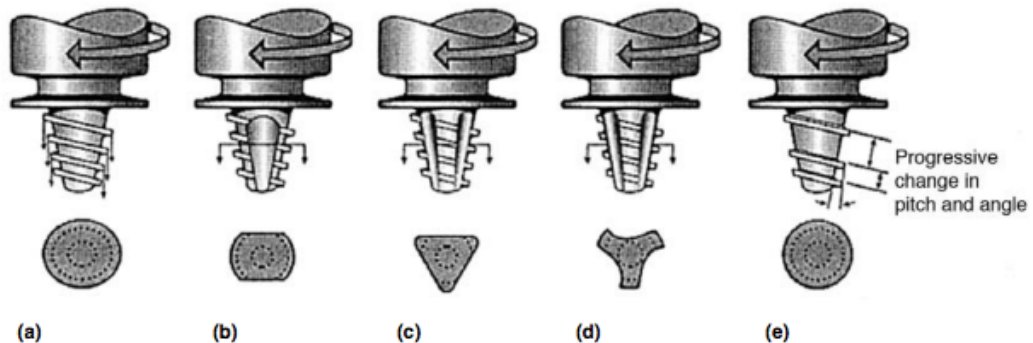
Ο κωνικός πείρος μπορεί να παρουσιαστεί σε παραλλαγή με βαθμίδες ο οποίος προορίζεται για συγκολλήσεις υλικών υψηλών θερμοκρασιών [68].



Εικόνα 28 Κωνικός πείρος με σταδιακό [68]

- **Πείρος τύπου Whorl (ελικοειδές σπείρωμα):**

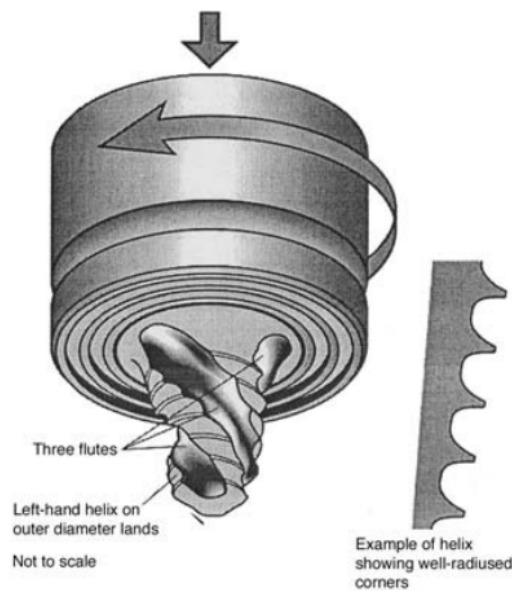
Έχουν αναπτυχθεί πείροι με πιο περίπλοκα χαρακτηριστικά στην επιφάνεια τους για καλύτερες προοπτικές, γιατί όπως προαναφέρθηκε ο συμβατικός κυλινδρικός με σπείρωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεμάχια με πάχος λιγότερο των 12mm [68]. Σκοπός αυτών είναι η βελτίωση της ανάμιξης του υλικού και η μείωση των εγκάρσιων φορτίων που δέχεται το εργαλείο συγκόλλησης. Ο πείρους τύπου Whorl™ αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης για σύνδεση τεμαχίων που μπορούν να φτάσουν 50-60mm [71-73], ενώ παράλληλα μειώνει την ποσότητα του υλικού που εκτοπίζεται κατά 60% συγκριτικά με τον κυλινδρικό πείρο με σπείρωμα. Εξαιτίας αυτής της μείωσης, μειώνεται το εγκάρσιο φορτίο που δέχεται το εργαλείο προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες προώθησης. Ο ελικοειδής σχηματισμός αυτός είναι πιο δραστικός από απλά σπειρώματα, αφού δρα ως τρυπάνι που ασκεί μια καθοδική δύναμη στο υλικό [68]. Ο πείρος τύπου Whorl™ παρουσιάζει πολλές παραλλαγές όπως αποτυπώνονται παρακάτω. Μπορεί να είναι κυκλικός, οβάλ, πεπλατυσμένος ή επαναλαμβανόμενος [68].



Εικόνα 29 Παραλλαγές του πείρου Whorl [68]

- **Πείρος τύπου MX Triflute :**

Ο πείρους MX Triflute αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του Whorl σχεδιασμένο από το TWI. Ο συγκεκριμένος πείρος αποτελείται από τρεις κυματικές αυλακώσεις οι οποίες εξισώσουν τον ελικοειδές σπείρωμα που φέρει. Με την χρήση αυτού του παραλλαγμένου πείρου μειώνεται κατά 70% του ποσού του υλικού που εκτοπίζεται από την ρίζα της συγκόλλησης.

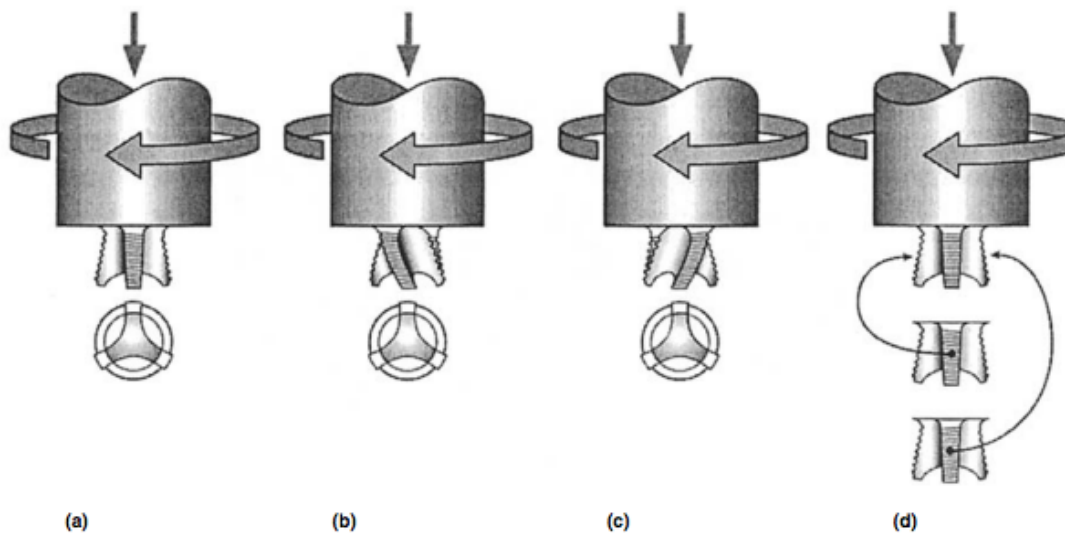


Εικόνα 30 Πείρος τύπου MX Triflute [68]

Με τα δύο παραπάνω είδη πείρων προσφέρεται πιο εύκολη ροή του υλικού, πιέζοντας το προς τα κάτω, αυξάνεται η ένταση της επαφής πείρου και πλαστικοποιημένου υλικού με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας. Ωστόσο λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών και αναγκών της συγκόλλησης με επικάλυψη χρησιμοποιούνται εργαλεία συγκόλλησης με νέους σχεδιαστικούς πείρους [69]. Στις συγκολλήσεις με επικάλυψη (lap welding) υπάρχουν σημαντικοί παράμετροι όπως το πλάτος της συγκόλλησης και η γωνία κλίσης όπου ο πείρος του εργαλείου έρχεται σε επαφή με τα τεμάχια εργασίας σε σημείο που αποτελεί την αρχική άκρη της συγκόλλησης. Εκτός του απλού κυκλικού πείρου με σπείρωμα έχουν αναπτυχθεί πείροι με δύο νέα γεωμετρικά χαρακτηριστικά [Mishra et2005] .

- **Flared – Triflute™**

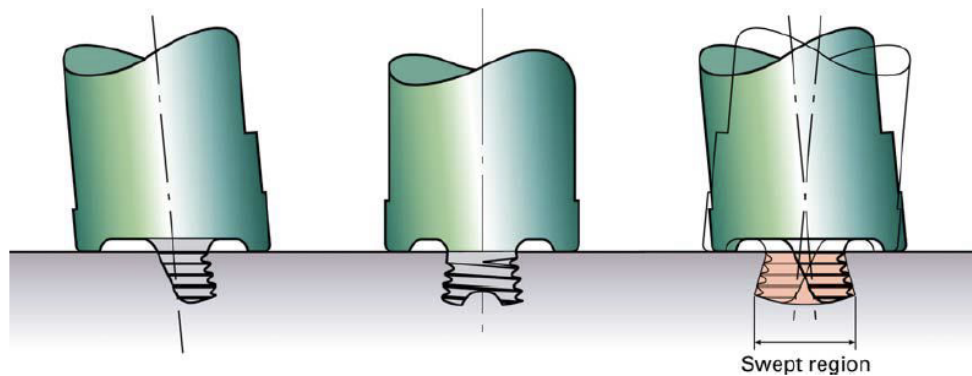
Ο συγκεκριμένος τύπος πείρου που προορίζεται για lap welding ,φέρει ειδικές αυλακώσεις (κυματιστό σχήμα), είναι σχεδιασμένο από το TWI με σκοπό την βελτίωση της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε αυλακώσεις να ανοίγουν προς τα έξω. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα, οι σπειρώσεις του πείρου μπορεί να είναι ουδέτερες, να είναι στραμμένες προς τα δεξιά ή τα αριστερά ή ακόμα και να εμφανίζουν συνδυασμό και των τριών [Mishra,2005], [68].









Εικόνα 31 Διαφορετικά είδη πείρου Flared-Triflute™ a) ουδέτερες σπειρώσεις b) αριστερόστροφες σπειρώσεις c) δεξιόστροφες σπειρώσεις d) συνδυασμός των δύο προηγούμενων [69]

- **Skew-Stir™:**

Ο πείρος τύπου Skew-Stir™ είναι σχεδιασμένος από TWI και αυξάνει την ποσότητα του υλικού που μαζεύεται από την δράση του πείρου κατά την ροή του. Ο άξονας του συγκεκριμένου πείρου είναι λίγο κεκλιμένος σε σχέση με τον άξονα του εργαλείου.



Εικόνα 32 Βασικός σχεδιασμός του πείρου τύπου Skew-Stir™ [69]

Tool	Cylindrical	Wort	MX Triflute	Flared-Triflute	A-skew	Re-stir
Schematics						
Tool probe shapes	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Tapered with threads and flutes	Triflute, flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads
Ratio of probe*	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
Swept rate	1-1	1-8	2-6	2-6	Up to probe angle	1-8
Rotary reversal	No	No	No	No	No	Yes
Joint type	Butt	Butt	Butt	Lap	Lap	Butt

Εικόνα 33 Τα κυριότερα χαρακτηριστικά είδη πείρων εργαλείου συγκόλλησης [69]

Στην παραπάνω εικόνα συνοψίζονται οι κυριότεροι τύποι πείρων, ενώ παρουσιάζονται η αναλογία τους (ratio of probe), η αναλογία της στρέψης, η δυνατότητα αντίθετης στρέψης και η καταλληλότερη διάταξη των δοκιμίων που πρόκειται να συγκολλησει ο κάθε πείρος.

#### 1.4.5 Άλλοι Παράγοντες

**Υλικό Εργαλείου:** Συνήθως χρησιμοποιείται εργαλείο χάλυβα υψηλού άνθρακα με διαφορετική σύνθεση άλλων συστατικών όπως χαλκός, νικέλιο, χρώμιο για να του προσδώσουν ανθεκτικότητα.

**Προθέρμανση- Ψύξη/ Preheating or Cooling:** Λόγω του σχετικά χαμηλού σημείου τήξης του αλουμινίου σε σχέση με άλλα υλικά όπως ο χάλυβας δεν χρειάζεται προθέρμανση για να μεταβεί πιο ομαλά σε μια κατάσταση υψηλής θερμοκρασίας συγκόλλησης. Παρόλα αυτά με κατεργασία όπως η ψύξη μπορεί να μειωθεί ο ρυθμός ανάπτυξης των κόκκων του αλουμινίου στην ζώνη συγκόλλησης [7], [18],[34].

### 1.5 Μηχανισμοί ροής του υλικού κατά την συγκόλληση τριβής δια ανάδευση

Η διαδικασία της F.S.W βασίζεται στις αρχές μιας θερμομηχανικής διαδικασίας που αποτυπώνεται απευθείας στην ζώνη συγκόλλησης. Όπως ανέφερε και ο Busa [19] αλλά και σύμφωνα με υπόλοιπες έρευνες, για να είναι αποτελεσματική η συγκόλληση, θα πρέπει να παραχθεί απαιτούμενο ποσό θερμότητας εξαιτίας των τριβολογικών συνθηκών μεταξύ εργαλείου και υλικού, ώστε να φτάσει τις κατάλληλες τιμές θερμοκρασίας και υδροστατικής πίεσης στην γραμμή σύνδεσης. Επιπλέον η FSW βασίζεται στην μετάδοση θερμότητας λόγω της ροής του υλικού το οποίο θερμαίνεται και παραμορφώνεται πλαστικά το οποίο οδηγεί σε ανακατανομή της θερμότητας γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης, δημιουργώντας θερμικό πεδίο [3], [5], [8].

Συγκεκριμένα έχει εξεταστεί ο τρόπος ροής του μετάλλου γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης όταν εισέρχεται στο κράμα διαφορετικής σύνθεσης από το υλικό βάσης (μητρικό υλικό). Με την χρήση μικροσκοπίου προσδιορίζεται ο χώρος και ο τρόπος μετακίνησης του υλικού όταν αλληλοεπιδρά μαζί με το εργαλείο που διενεργεί την συγκόλληση [8], [20], [21].

Όπως αναφέρθηκε εκατέρωθεν του εργαλείου συγκόλλησης υπάρχουν δύο πλευρές, όπου το υλικό που βρίσκεται σε αυτές ρέει ανάλογα με την κίνηση του εργαλείου συγκόλλησης. Η πλευρά όπου το εργαλείο κινείται με ταχύτητα ομόρροπη με την κατεύθυνση ταχύτητας της συγκόλλησης ονομάζεται προωθητική πλευρά (advancing side). Η πλευρά όπου το εργαλείο περιστρέφεται και κινείται με αντίθετη κατεύθυνση από την ταχύτητα συγκόλλησης ονομάζεται υποχωρούσα πλευρά (retreating side) [8],[16]. Η κίνηση του υλικού είναι αποτέλεσμα δύο διαφορετικών διαδικασιών. Συγκεκριμένα:

- i. Η ροή του υλικού που προκαλείται από το περιαιχένιο (shoulder -driven flow) όπου η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά όγκο.
- ii. Η ροή του υλικού που προκαλείται από τον πείρο συγκόλλησης (pin -driven flow), όπου η μεταφορά του υλικού πραγματοποιείται κατά στρώματα.
- iii. Η ροή η οποία προκαλείται από τη σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και δοκιμίου.

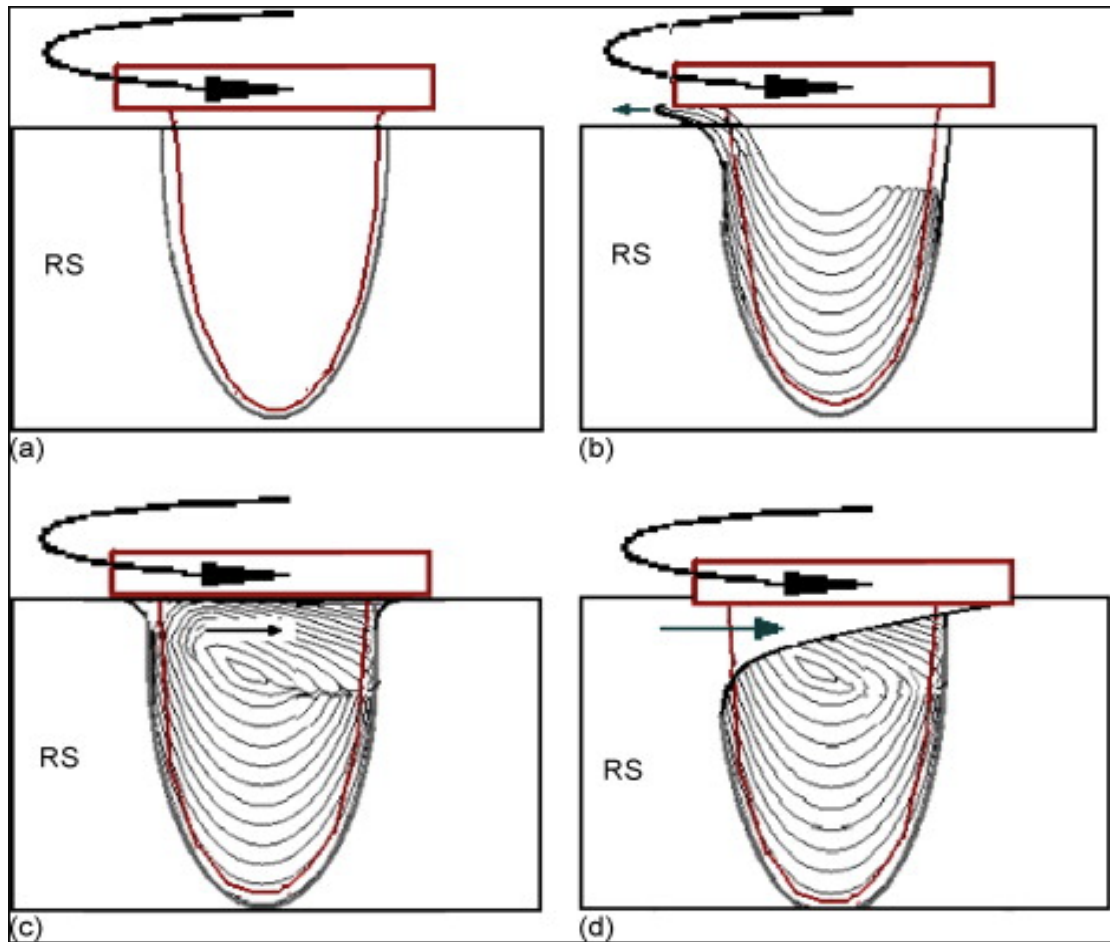
i)

Το υλικό το οποίο βρίσκεται μακριά από τον πείρο του εργαλείου, παραμένει ανεπηρέαστο αλλά το περιανχένιο μπορεί να επιδράσει σε αυτό.

ii)

Το υλικό βάσης που υπάρχει στην προωθητική πλευρά παρασύρεται μαζί με το εργαλείο συγκόλλησης κατά την περιστροφική του κίνηση από τον πείρο ο οποίος σχηματίζει μια κοιλότητα όταν βυθίζεται στο μέταλλο βάσης. Η κοιλότητα που σχηματίζεται επηρεάζεται από τον σχεδιασμό του εργαλείου συγκόλλησης. Κατά την κίνηση του εργαλείου, το υλικό από την εμπρόσθια ακμή του εργαλείου μεταφέρεται μέσω της υποχωρούσας πλευράς (RS) στην πίσω άκρη του εργαλείου (trailing edge). Το υλικό αυτό είναι έντονα παραμορφωμένο αφού αναδεύεται μαζί με τον πείρο και σχηματίζει αυτήν την ειδική κοιλότητα (Μοιάζει με μορφή τόξου που φαίνεται από πάνω).

Παράλληλα της διαδικασίας αυτής το πλαστικοποιημένο που κινείται μεταξύ του εργαλείου και του ψυχρότερου μέρους του μητρικού υλικού. Αν η αντίσταση της ροής παραπάνω κίνησης είναι υψηλή τότε το υλικό προσπαθεί να διαφύγει από την σχηματιζόμενη κοιλότητα αντί να φτάσει στην προωθητική πλευρά. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από το πλάτος του πλαστικοποιημένου μετάλλου που βρίσκεται περιφερειακά του πείρου και από την ποσότητα μεταφοράς υλικού ανά περιστροφή.



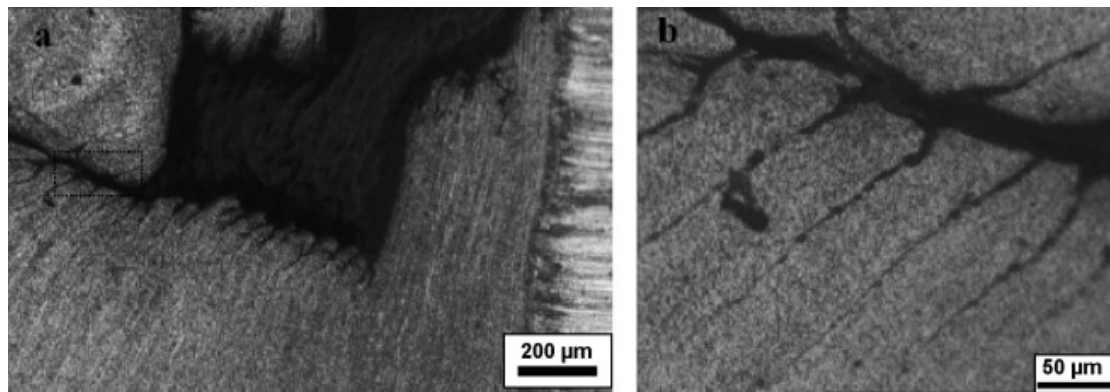
Εικόνα 34: (α) Ροή προκαλούμενη από τον πείρο συγκόλλησης – Δημιουργία κοιλότητας (β) Ροή προκαλούμενη από τον πείρο αποκλειστικά (Μετακίνηση σε γραμμές) c,d) Ροή προκαλούμενη από το περιαιχένιο [16]

Στα επίπεδα όπου το περιαιχένιο επηρεάζει το υλικό (το αποκολλάει και μεταφέρει το υλικό κοντά στον πείρο από την υποχωρούσα πλευρά (RS) στην προωθητική πλευρά (AS). Η μεταφορά υλικού λαμβάνει χώρα με την ολίσθηση του περιαιχενίου πάνω από το υλικό και της ταυτόχρονης περιστροφικής κίνησης του πείρου. Κατά την κίνηση αυτή λόγω της αντίστασης του υλικού να μετακινηθεί από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά, το υλικό αναδύεται προς τα επάνω. Αυτή η ανοδική κίνηση οδηγεί στο εξώθηση του υλικού στην επιφάνεια της συγκόλλησης [16], [25].

Όπως φαίνεται από την παρακάτω εικόνα η μεταφορά του υλικού που οφείλεται στον πείρο γίνεται κατά στρώσεις. Καθώς το εργαλείο κινείται στο μήκος της συγκόλλησης,



το πάχος της κεντρικά παρουσιάζεται βαθύτερο από τις πλευρές που μειώνεται. Η γεωμετρία του πείρου διαμορφώνει το σχήμα της κοιλότητας, η οποία στο οπίσθιο μέρος γεμίζει περιοδικά κατά την διάρκεια της μετατόπισης του εργαλείου. Με αυτόν τον τρόπο όταν το εργαλείο κινείται περιστροφικά, το υλικό από την μπροστινή ακμή του εργαλείου εναποτίθεται στο χώρο που δημιουργείται πίσω λόγω της μετακίνησης του εργαλείου με την μορφή στρωματώσεων το ένα πάνω στο άλλο [3], [16].



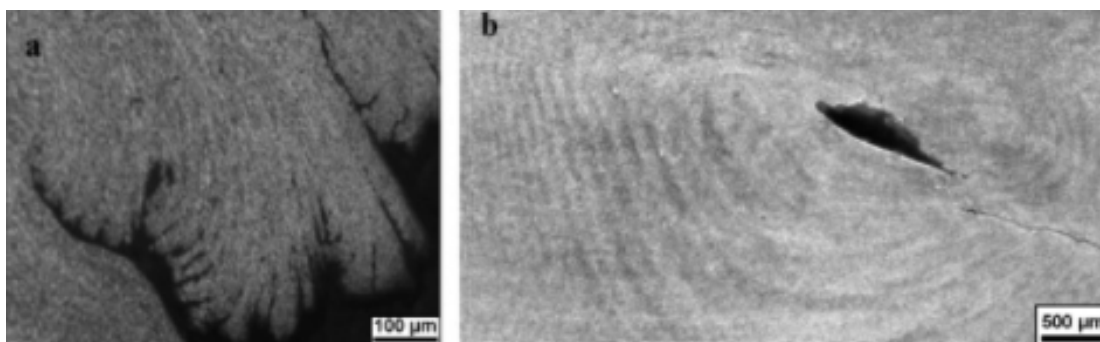
Εικόνα 35 α) Πολλαπλές στρώσεις μεταφοράς υλικού από τον πείρο β) Μεγέθυνση των στρώσεων [16]

Η ροή του υλικού εξαρτάται επίσης από την αποτελεσματικότητα του περιανυχνίου να διατηρήσει το υλικό στην περιοχή της συγκόλλησης. Έτσι ο σχεδιασμός του περιανυχνίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μην αποτρέπει την εξώθηση μεγάλου ποσοστού του υλικού αλλά να το επιστρέφει εντός των ορίων της επιφάνειας συγκόλλησης.

### 1.5.1 Σχηματισμοί “onion rings” κατά την διάρκεια της συγκόλλησης

Οι εικόνες 34,36β παρουσιάζουν τον σχηματισμό των δακτύλιων ομόκεντρων κύκλων γνωστοί ως “onion rings”. Ο σχηματισμός αυτών μπορεί να παρατηρηθεί και από τις εικόνες 36α,β. Αυτός ο σχηματισμός αποτυπώνεται με σκουρόχρωμες και ελαφρά χαραγμένες ζώνες κατά την ροή του υλικού η οποία προκαλείται από τον πείρο (εικόνα

32β). Οι στρώσεις που φαίνονται στην εικόνα 35 είναι με διαφορετικό τρόπο χαραγμένες από αυτές του “onion ring formation”, και εμφανίζονται ως διακριτά συγκεντρωμένες μαζί. Αυτές οι ζώνες που είναι συγκεντρωμένες κατά συγκροτήματα παίρνουν την χαρακτηριστική μορφή U, όταν στην ροή του επιδρά ο πείρος. Το υλικό σε αυτή την κατάσταση λοιπόν, έρχεται σε επαφή και με το περιουχένιο στην υποχωρούσα πλευρά οδηγείται στην προωθητική. Με τον ίδιο τρόπο μεταφέρεται και ο σχηματισμός του υλικού κατά στρώσεις που οφείλονται στον πείρο, ενώ η δομή αυτού παραμένει αναλλοίωτη. Όταν η κάθετη δύναμη αναγκάζει το περιουχένιο να δρα στο υλικό πιο έντονα, οι μεταλλικές ροές προκαλούμενες από πείρο και περιουχένιο αναμοχλεύονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα η μεταφορά του υλικού κατ’ όγκο και κατά στρώσεις ενώνονται δημιουργώντας τον σχηματισμό του onion ring. (εικόνα 36β). Το μέρος του “onion ring” που βρίσκεται στην άνω επιφάνεια των τεμαχίων εργασίας επηρεάζεται από την δράση του περιουχένιου με συνέπεια να υπάρχει κυκλική ροή στο κατακόρυφο επίπεδο [35].

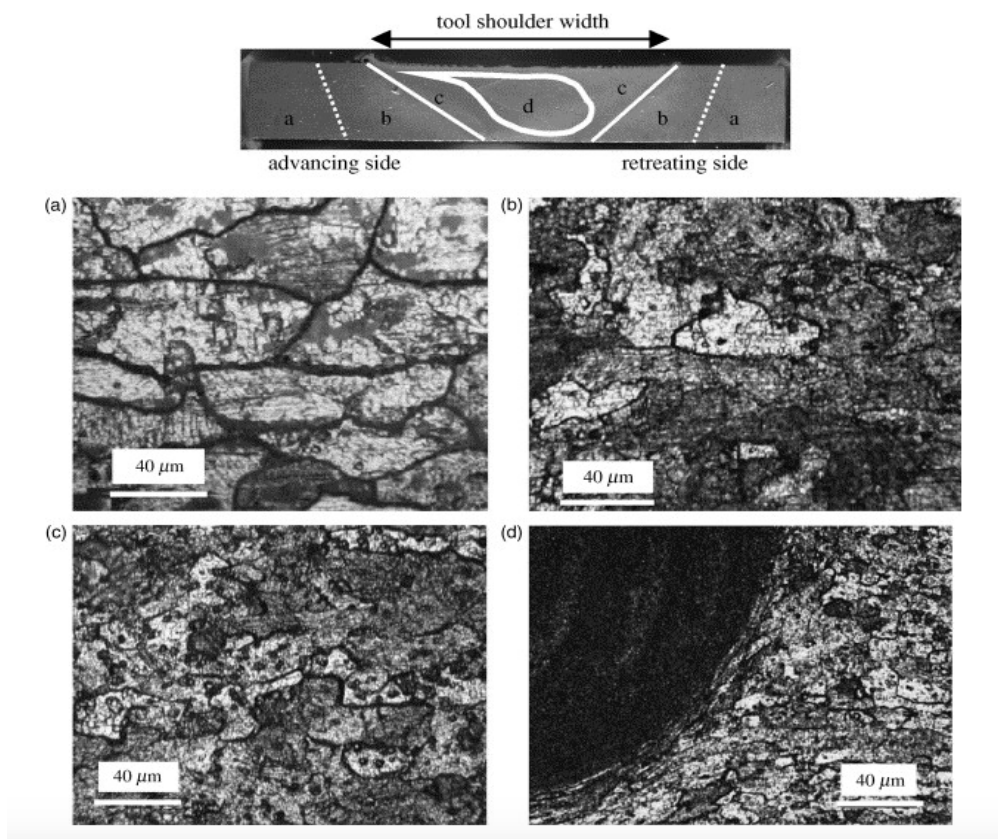


Εικόνα 36 Σχηματισμός onion rings [16]

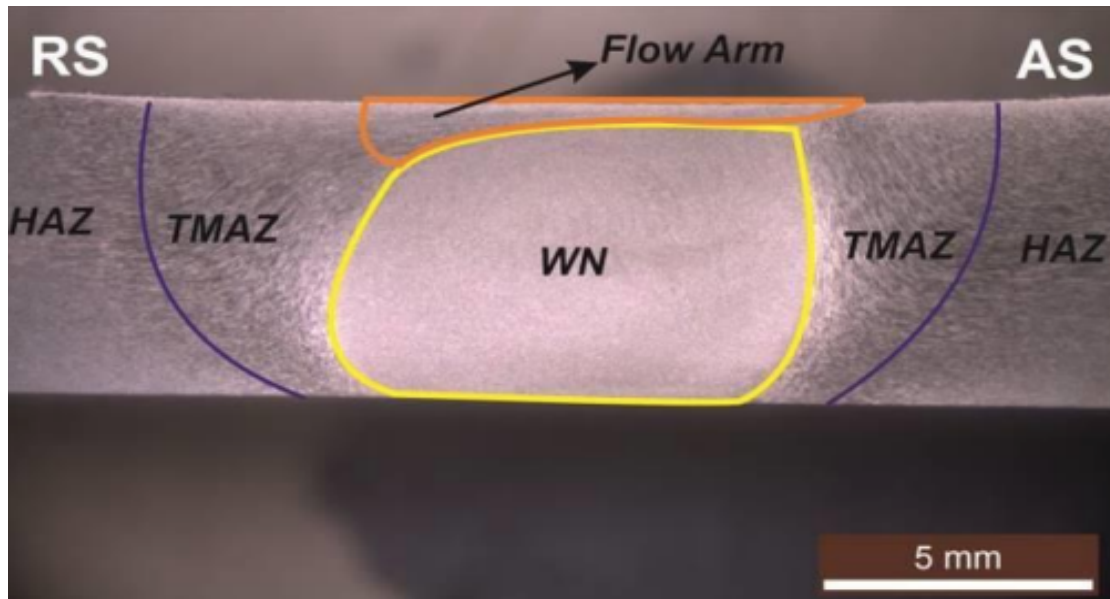
Αντιθέτως ο σχηματισμός «U» των διαφορετικών γραμμών/στρώσεων εμφανίζονται με πιο σκούρο χρώμα και οφείλονται στην γεωμετρική φύση της ροής προκαλούμενης από τον πείρο σύμφωνα με Krishnan [36].

## 1.6 Ζώνες μικροδομής συγκόλλησης

Η συγκόλληση τριβής δια ανάδευση πρόκειται για μία θερμομηχανική διαδικασία κατά την οποία η θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής μεταδίδεται στο υλικό ώστε να πραγματοποιηθεί η ροή του υλικού που αναλύθηκε στις προηγούμενες φάσεις . Για να επιτευχθεί όμως η διαδικασία θα πρέπει εξ αρχής τα υλικά να αλλοιώσουν τα μηχανικές τους ιδιότητες (σκληρότητα – αντοχή) χωρίς να καταστραφούν, για να επιτευχθεί η πλαστική παραμόρφωση τους . Άρα με την σωστή επιλογή παραμέτρων και κατάλληλο έλεγχο ταχυτήτων και δυνάμεων η συγκόλληση θα έχει τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι ιδιότητες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την εξέλιξη της μικροδομής του υλικού. Επομένως η μικροδομή του υλικού κατά την διάρκεια της συγκόλλησης διακρίνεται σε ζώνες:



Εικόνα 37 Ζώνες Μικροδομής συγκόλλησης κράματος AA6082-T6 α) Υλικό βάσης β) Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη γ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη δ) Ζώνη Συγκόλλησης [95]



Εικόνα 38 Ζώνες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) συγκολλημένου κράματος AA6082-T6 [94]

### 1. Ζώνη Ανάδευσης ή Πυρήνας Συγκόλλησης ( Stir Zone, SZ –Nugget Zone) :

Πρόκειται για την περιοχή στην οποία γίνεται η ανάδευση καθώς εισχωρεί ο πείρος συγκόλλησης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όλου του εργαλείου συγκόλλησης ( πείρος και περιανυθένιο) επηρεάζουν σημαντικά την μορφολογία της συγκόλλησης. Γενικά ο πυρήνας συγκόλλησης αποτελείται από έντονα παραμορφωμένο υλικό και η μικροδομή της χαρακτηρίζεται από ομοιομορφία και λεπτότητα. Σε αυτήν την περιοχή λόγω της τριβής του περιανυθένιου και του πείρου με το τεμάχιο εργασίας και της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού παρουσιάζεται το φαινόμενο δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Απόδειξη της ύπαρξης δυναμικής ανακρυστάλλωσης είναι το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων όπου θα έχουν περίπου το ίδιο μήκος. Σε πολλές περιπτώσεις το μέγεθος των κόκκων είναι μικρότερο από εκείνο του μητρικού υλικού. Ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να λάβει χώρα στην συγκεκριμένη περιοχή είναι ο σχηματισμός ομόκεντρων δακτυλίων (onion ring structure) οι οποίοι είναι παραμορφωμένοι και επηρεάζονται από την ροή του μεταλλικού υλικού [3],[5], [16],[22].

### 2. “Flow arm” zone:

Πρόκειται για την ζώνη η οποία βρίσκεται στην ανώτερη επιφάνεια της συγκόλλησης. Είναι θερμομηχανικά επηρεασμένη περιοχή με παραμορφωμένους κόκκους καθώς το υλικό έρχεται σε επαφή και τρίβεται με το περιουχένιου του εργαλείου συγκόλλησης όταν το περιουχένιο μεταφέρει το υλικό από την υποχωρούσα πλευρά (RS) στην προωθητική πλευρά (AS) [3], [16].

### **3. Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (thermo-mechanically affected zone, THAZ):**

Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη εμφανίζεται σε δύο πλευρές εκατέρωθεν της ζώνης ανάδευσης. Στις συγκεκριμένες περιοχές το υλικό υφίσταται θερμομηχανική καταπόνηση, αφού εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες και σε πλαστική παραμόρφωση. Η επίδραση τους ωστόσο είναι μικρότερες από την ζώνη ανάδευσης και την flow arm zone. Σε αντίθεση με την ζώνη ανάδευσης, η μικροδομή της THAZ ζώνης αναγνωρίσιμη από εκείνη του μητρικού υλικού. Αυτό συμβαίνει λόγω της παραμόρφωσης και της περιστροφής των επιμηκών κόκκων σύμφωνα με διάφορες έρευνες. Επιπλέον οι κόκκοι του υλικού στην συγκεκριμένη ζώνη διαφέρουν με αυτούς της ζώνης ανάδευσης. Η συγκεκριμένη περιοχή περιγράφει οποιοδήποτε χώρο υλικού που παραμορφώνεται και δεν καλύπτεται από τις προηγούμενες δύο [3], [5],[26],[27].

### **4. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη ( heat-affected zone, HAZ)**

Η συγκεκριμένη ζώνη δημιουργείται και είναι πανομοιότυπη σε όλες τις διαδικασίες συγκολλήσεων. Ακόμα και αυτή η περιοχή υποβάλλεται σε διαδικασία θερμικού κύκλου αλλά και δεν υπόκειται σε κύκλο συγκόλλησης κι δεν παραμορφώνεται. Η μετάβαση από την THAZ στην HAZ αποτυπώνεται στην διαφορά πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτήν την περιοχή το εργαλείο δρα μόνο με το περιφερειακό του τμήμα. Παρόλο που το μέγεθος των κόκκων είναι μεγαλύτερο, αυτό εξαρτάται σε ποια πλευρά της συγκόλλησης βρίσκονται. Η δομή των κόκκων στην προωθητική πλευρά (AS) είναι λεπτότερη από εκείνη στην υποχωρούσα (RS). Πρέπει να σημειωθεί πως το μέγιστο μέγεθος των κόκκων λαμβάνει μέρος στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη στην υποχωρούσα πλευρά. Το σημαντικότερο είναι ότι στην FSW έχει πολύ καλύτερες μηχανικές το υλικό της συγκεκριμένης ζώνης σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνικές

συγκόλλησης εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών [6]. Το μέγεθος της HAZ παραμένει ανεπηρέαστο σε οποιαδήποτε ταχύτητα συγκόλλησης [3], [5].

## **5. Το μητρικό υλικό ή μέταλλο βάσης ( parent material ή base metal):**

Αποτελείται από το ανεπηρέαστο υλικό και παρατηρείται σε όλες τις συγκολλήσεις.

### 1.7 Παραγόμενη Θερμότητα

Όπως αναφέρθηκε η διαδικασία της FSW ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης βασίζεται στις αρχές της θερμομηχανικής διαδικασίας. Με τις συμβατικές μεθόδους τήξης διαφέρει ως προς την πηγή προέλευσης της θερμότητας που πρέπει να αναπτυχθεί για την εκκίνηση αλλά και την συνέχιση της διαδικασίας. Σε άλλες διαδικασίες τήξης, όπως εκείνη με λέιζερ, θα πρέπει να έχουν εξωτερική πηγή θερμότητας συγκεκριμένης ισχύς. Αντιθέτως η συγκόλληση δια τριβή με ανάδευση είναι μια αποδοτική και αυτόνομη μέθοδος που δημιουργεί μόνη της το απαιτούμενο ποσό θερμότητας. Η θερμική ενέργεια που προσφέρεται μέσω των θερμομηχανικών διαδικασιών στην συγκόλληση είναι πολύπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από παράγοντες όπως η ταχύτητα περιστροφής και προώθησης, από τον σχεδιασμό του εργαλείου, αλλά και από το ίδιο το κράμα [8],[9].

Η θερμική ηλεκτρική ενέργεια (heat input) που διαχέεται στην συγκόλληση οφείλεται στην θερμότητα που παράγεται εξαιτίας της τριβής των εξαρτημάτων συγκόλλησης τα οποία είναι ανθεκτικά αλλά και των πλακών τεμαχίων εργασίας που έχουν πακτωθεί στην πλάκα υποστήριξης. Η συγκεκριμένη θερμότητα μαζί με εκείνη της ανάδευσης και τριβής του εργαλείου, αλλά και την αδιαβατική θερμότητα του υλικού, προκαλούν μαλάκωση των υλικών χωρίς να υπόκειντο σε τήξη [3]. Όταν μειώνεται η ταχύτητα προώθησης του εργαλείου, άρα και της συγκόλλησης, ένα μέρος της θερμότητας αναπτύσσεται στις πλάκες υποστήριξης, ως απόδειξη της συσχέτισης της θερμικής ηλεκτρικής ενέργειας με τις μπάρες υποστήριξης των τεμαχίων εργασίας [9].



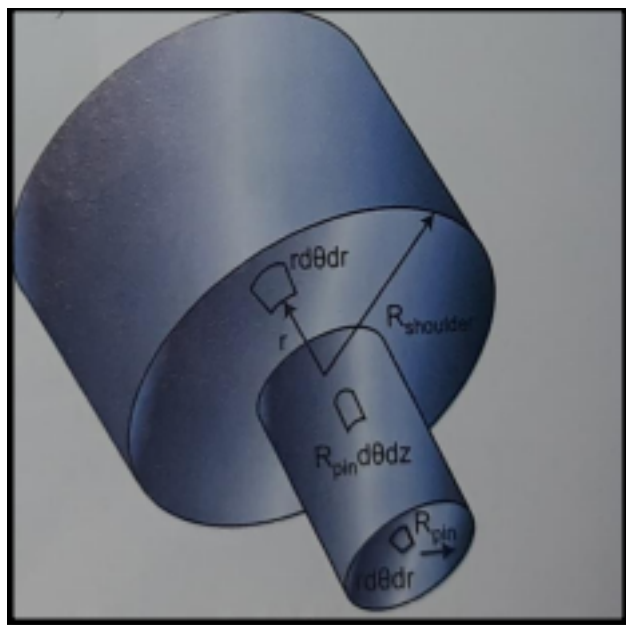
Πιο συγκεκριμένα η τριβή του εργαλείου συγκόλλησης με τα τεμάχια εργασίας είναι τριβή της δύναμης Coulomb (τριβή ολίσθησης) με σταθερό συντελεστή τριβής. Ενώ η τριβή προσκόλλησης των τεμαχίων εργασίας στον πείρο (sticking friction) συμβαίνει όταν μαλακώνει το υλικό, αντί να ολισθαίνει πιθανότατα λόγω της μείωσης του ορίου διαρροής του μετάλλου. Επιπρόσθετα ή εναλλακτικά η θερμική ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να οφείλεται και στην ροπή του περιστροφικού εργαλείου [8], [28],[29].

Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, αν υποθέσουμε την ύπαρξη τριών επιφανειών:

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

A. Υπολογισμός συνολικής θερμότητας [2]

$$Q \sim [ ( 1 - \delta ) \times \eta \times \tau + \delta \times \mu_F \times P ] \times [ r d\theta dr ] \times ( \omega \times r - U \times \sin\theta )$$



Όπου:

$\delta$  = συντελεστής ολίσθησης (fractional slip )  
 $\eta$  = μηχανικός βαθμός απόδοσης (mechanical efficiency)  
 $\tau$  = συντελεστής διατμητικής δύναμης (shear yield strength)  
 $\mu_F$  = συντελεστής τριβής (coefficient of friction)  
 $P$  = κατακόρυφη πίεση (axial pressure)  
 $\omega$  = περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)  
 $U$  = ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed)

## 1.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Συγκόλλησης Τριβής Με ανάδευση

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με ανάδευσης εξαιτίας των χαρακτηριστικών της μπορούν να διακριθούν σε μεταλλουργικά, περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματα [1,2,3,7,11] .

1. Συγκεκριμένα η FSW προσφέρει συνένωση των μετάλλων μεταλλουργικά και κρυσταλλικά σε θερμοκρασίες υπό τις θερμοκρασίες τήξης των μητρικών υλικών, ενώ παράλληλα παραμορφώνονται πλαστικά εξαιτίας θερμομηχανικών διαδικασιών υπό ασκούμενες πιέσεις. Η σύνδεση αυτή δεν απαιτεί χημικό δεσμό, καθιστώντας την κατάλληλη για συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων.

2. Αφού ανήκει στο πλαίσιο συγκολλήσεων στερεάς κατάστασης, αποφεύγονται διαφορά μεταλλουργικά ελαττώματα όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω. Μπορεί να εφαρμοστεί σε κράματα αλουμινίου χωρίς την εμφάνιση ρηγματώσεων, πορώδους και άλλων ακαθαρσιών, ενώ διακατέχονται από ομοιόμορφη κοκκομετρία. Η FSW χρησιμοποιείται σε κράματα αλουμινίου λόγω των μικρών παραμενουσών τάσεων [80] καθώς και των μικρών ρυθμών παραμόρφωσης που επιφέρουν. Η συγκράτηση των τεμαχίων επίσης συμβάλει στην μείωση των διάφορων ειδών παραμόρφωσης ακόμα και σε συγκολλήσεις μεγάλου μήκους.

3. Η διαδικασία είναι απλή και δεν χρειάζεται χρήση μετάλλου προσθήκης ή προστατευτικού αερίου [2],[7].



4. Σε πολλές περιπτώσεις είναι πιο αποτελεσματική από τις διαδικασίες τήξης, καθώς παρουσιάζει καλύτερη αντοχή σε διάβρωση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους [Colligan 2010], [2].

5. Συγκριτικά με διαδικασίες τήξης, η FSW μπορεί να προσφέρει ανθεκτικές συγκολλήσεις με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όσον αφορά την κόπωση, εφελκυσμό και κάμψη. Επιπλέον μπορεί να βελτιώσει την σκληρότητα και την ολκιμότητα [81].

6. Είναι ενεργειακά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον καθώς με την χρήση της μεθόδου παρατηρείται μείωση του βάρους σε δομές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην βιομηχανία. Περαιτέρω σε τομείς μεταφορών η μείωση του βάρους, οδηγεί σε μείωση κατανάλωσης καυσίμων και αέριων ρύπων [7,23].

7. Εκτός του 6 που την καθιστά φιλική προς το περιβάλλον, η χρήση μη καταναλισκόμενου εργαλείου, η απουσία υλικού πλήρωσης, ηλεκτροδίων και τοξικών αερίων που προστατεύουν την συγκόλληση οδηγεί στο να θεωρείται μια πράσινη τεχνική συγκόλλησης χωρίς αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον [2,7,11,68].

8. Υπάρχει δυνατότητα αυτοματισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές επιφάνειες και να εφαρμοστεί σε αρκετές γεωμετρικές θέσεις [2].

Ωστόσο παρά πολλά από τα πλεονεκτήματα που διαθέτει η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, σε άλλες συνθήκες μπορεί να θεωρηθούν ως παρακάτω [1,2,11].

1. Λόγω των δυνάμεων που επικρατούν στην διαδικασία απαιτείται υψηλό σύστημα ασφάλειας σύσφιξης και πάκτωσης των πλακών.

2. Παρά τις καλές μηχανικές ιδιότητες που προσφέρεται, ορισμένες φορές η ταχύτητα συγκόλλησης είναι μικρότερη απ' ό τι είναι στις συμβατικές.

3. Παρά την σχετικά χαμηλού κόστους συντήρησης, οι μηχανές στις οποίες διενεργείται η συγκόλληση θεωρούνται ακριβές για να αποκτηθούν. Επιπλέον το εργαλείο συγκόλλησης φθείρεται σχετικά γρήγορα ειδικά όταν εισέρχεται σε κράματα υψηλής αντοχής (πχ κράματα τιτανίου, χάλυβες υψηλής αντοχής).

## 1.9 Ατέλειες συγκόλλησης

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι αν δεν επιλεγθούν οι κατάλληλες παράμετροι μπορούμε να οδηγηθούμε σε σημαντικές ατέλειες που μπορούν να υποβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Γενικά ατέλεια μπορεί να χαρακτηριστεί οποιαδήποτε ανωμαλία στο επίπεδο της συγκόλλησης τόσο στην δομή όσο και στην τελική εμφάνισή της που προέρχονται από τις παραπάνω παραμέτρους που αναλύθηκαν. Οι παράμετροι της διεξαγωγής της διαδικασίας ( ταχύτητα περιστροφής και προώθησης, κάθετη δύναμη, βάθος εισαγωγής, κλίση εργαλείου) και η γεωμετρία του εργαλείου επηρεάζουν την διαδικασία της συγκόλλησης και την εισροή θερμότητας. Η εισροή θερμότητας όπως αναφέρθηκε είναι μια κρίσιμη παράμετρος η οποία επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της συγκόλλησης τον σχηματισμό ατελειών στην διαδικασία.

Σε περίπτωση που η εισροή θερμότητας στην συγκόλληση είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες όπου σχηματίζονται ενδομεταλλικές ενώσεις που θεωρούνται σκληρές, αλλά λόγω της ευθραυστότητάς (ψαθυρές) τους μειώνουν την ολκιμότητα και την αντοχή του υλικού που συγκολλάται. Επίσης αυξάνεται η ανάπτυξη κόκκων οι οποίες επιδρούν αρνητικά στην αντοχή της συγκόλλησης.

Από την άλλη μεριά, όταν η εισροή θερμότητας δεν είναι τόσο μεγάλη όσο χρειάζεται, το υλικό δεν μαλακώνει και δεν πλαστικοποιείται επαρκώς, με αποτέλεσμα να επικρατεί ανεπαρκή ανάμειξη των υλικών εξαιτίας και της αύξησης της τάσης ροής (flow stress).

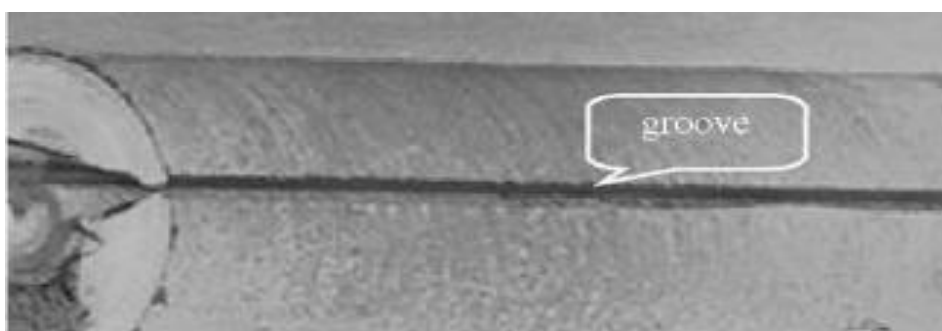
Επομένως για να υπάρξει μια ποιοτική συγκόλληση χωρίς την παρουσία των παρακάτω ελαττωμάτων, θα πρέπει η εισροή θερμότητας να είναι κατάλληλη. Επομένως η επιλογή των παραμέτρων της διαδικασίας της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι ζωτικής σημασίας αφού επηρεάζουν την θερμότητα και τον σχηματισμό της σύνδεσης των τεμαχίων [7,16,18,54,55].

Τα πιο κοινά ελαττώματα που συναντώνται στην συγκόλληση τριβής με ανάδευση είναι τα εξής:

1. Ατέλειες σε σχήμα αυλακώσεων ή οπών (grooves)

Οι ατέλειες με την μορφή αυλακώσεων (cavity) ή αυλακώσεων (grooves) επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων. Η πηγή σχηματισμού αυτών των αρνητικών σχηματισμών είναι η χαμηλότερη εισροή θερμότητας από αυτή που απαιτείται εξαιτίας της λάθος επιλογής των παραμέτρων της συγκόλλησης [59,62,63]. Κυρίως επηρεάζεται από την επίδραση από το βάθος εισαγωγής του πείρου και του περιαχένιου του εργαλείου συγκόλλησης.

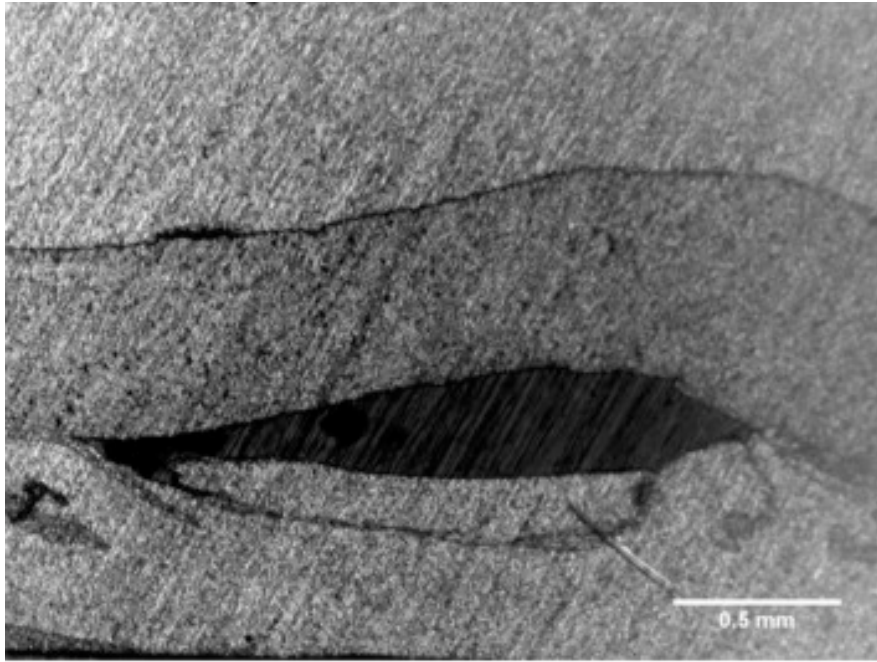
Όπως αναλύθηκε και παραπάνω στην παράγραφο η ροή του υλικού, αυτή διακρίνεται στις δράσεις του περιαχένιου και του πείρου η οποία προκαλείται από την δύναμη επέμβασης του εργαλείου συγκόλλησης [16]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η επέμβαση του εργαλείου είναι ελλειμματική, όταν η αξονική δύναμη του είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται. Αν το βάθος εισαγωγής είναι πολύ ρηχό το περιαχένιο δεν θα μπορεί να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια συγκόλλησης με αποτέλεσμα να μην μπορεί κατά την ανάδευση να μεταφέρει το υλικό στο πίσω μέρος του πείρου λόγω ανεπαρκούς θερμότητας σχηματίζοντας αυλακώσεις (**grooves**) ή οπές λόγω μη πλήρωσης του πλαστικοποιημένου υλικού στην επιφάνεια (**lack of surface**). Τέτοιες αυλακώσεις μπορούν να εμφανιστούν στην προωθητική πλευρά καθώς δεν μεταφέρεται εκεί αποτελεσματικά από την υποχωρούσα πλευρά [7],[16],[18], [32].



Εικόνα 39 Σχηματισμός αυλακώσεων (56)

## 2. Ατέλειες τύπου τούνελ (tunnel effect)

Πιθανή δημιουργία ατελειών τύπου «τούνελ» (**tunnel effect**) παρατηρείται στην κάτω επιφάνεια του πυρήνα συγκόλλησης και οφείλεται στην μη επαρκή ανάδευση. Είναι γνωστό και ως ελάττωμα τύπου σήραγγας το οποίο επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων. Πολλές φορές δίνεται η ονομασία “wormhole” καθώς είναι πανομοιότυπο με το συγκεκριμένο φαινόμενο ορισμένες φορές. Συγκεκριμένα οι ατέλειες τύπου τούνελ δεν γίνονται διακριτές στην επιφάνεια, αλλά σχηματίζονται υπό την επιφάνεια των τεμαχίων εργασίας εσωτερικά. Οι σχηματισμοί αυτοί οφείλονται λόγω της κακής επιλογής παραμέτρων όπως η μικρή αξονική δύναμη του εργαλείου. Έτσι η ανάδευση του υλικού είναι ανεπαρκής, δεν πλαστικοποιείται κατάλληλα και δεν υπάρχει ομαλή ροή γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο σχηματισμός αυτός μπορεί να εμφανιστεί και στην επιφάνεια της συγκόλλησης. [54],[57]. Συγκεκριμένα αυτοί οι παράγοντες της συγκόλλησης όπως αναφέρθηκαν και στην εισαγωγή των ατελειών, δεν παράγουν την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας για την κατάλληλη ανάμιξη και ανάδευση του υλικού για την συγκόλληση. Συγκεκριμένα [58] όταν καθίσταται μικρότερη εισροή θερμότητας απ’ ότι απαιτείται, δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για τον σχηματισμό τύπου τούνελ όπως φαίνεται παρακάτω.



*Εικόνα 40 Σχηματισμός τύπου τούνελ [54]*

Το συγκεκριμένο ελάττωμα εμφανίζεται κυρίως στην ζώνη ανάδευσης, ενώ μπορεί να παρουσιαστεί και στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη [54]. Λόγω μη ομαλής ροής του υλικού που δεν πλαστικοποιείται κατάλληλα εμφανίζεται κυρίως στην προωθητική πλευρά [54],[59]. Συγκεκριμένα σύμφωνα με πειραματικές διαδικασίες [54] όπου εξετάζαν την δράση του πείρου και το βάθος διείσδυσης, όταν δεν υπάρχει αρκετή πίεση εξαιτίας του μικρού βάθους διείσδυσης, η εισροή θερμότητας είναι μικρότερη της απαιτούμενης (μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία της συγκόλλησης), το υλικό δεν μαλακώνει και δεν πλαστικοποιείται επαρκώς, με αποτέλεσμα να επικρατεί ανεπαρκή ανάμειξη των υλικών εξαιτίας και της αύξησης της τάσης ροής. Ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος του φαινομένου, υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού [7],[16],[18],[32], [54].

Για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων ατελειών απαιτείται κατάλληλη εισροή θερμότητας και ομαλή ροή του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης. Για να είναι κατάλληλοι οι δύο παράγοντες θα πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα οι παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση. Για την βελτιστοποίηση της μεταλλικής ροής χωρίς παρουσία ελαττωμάτων έχει αναφερθεί ότι συμβάλει η μείωση της ταχύτητας προώθησης [60]. Ο Yang Zhao σε μελέτη που έκανε ανέφερε ότι η αύξηση της ταχύτητας προώθησης συμβάλει στον σχηματισμό

τύπου τούνελ [61]. Αυτό οφείλεται στην επίδραση των ταχυτήτων περιστροφής και προώθησης στην παραγωγή θερμότητας συγκόλλησης .

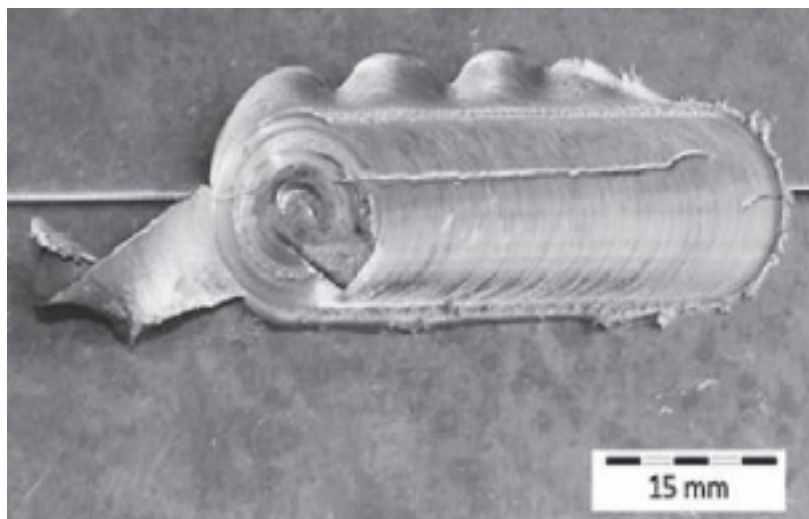
### 3. Ατέλειά τύπου “Flash” (εξωθημένο υλικό)

Τα τεμάχια εργασίας αποκτούν την μορφή εξωθημένου υλικού στην επιφάνεια, όταν βρίσκεται εκτεθειμένο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγάλη εισροή θερμότητας η οποία παράγεται, μαλακώνει και πλαστικοποιεί το υλικό σε υψηλό βαθμό κοντά στο περιουχένιο του εργαλείου συγκόλλησης με αποτέλεσμα να αποβάλλεται μεγάλη ποσότητα του υλικού στα άκρα του αυλακιού που σχηματίζεται στην γραμμή της συγκόλλησης.

Όταν αυξάνεται η κάθετη δύναμη , η αλληλεπίδραση του περιουχένιου με το υλικό αυξάνεται και μεταφέρεται στην προωθητική πλευρά με σταδιακό ρυθμό και ενώνεται με το υλικό βάσης που προϋπάρχει στην Adv.Side. Σε υπέρμετρη αύξηση της δύναμης το περιουχένιο εισέρχεται σε μεγαλύτερο βάθος, επομένως μεγαλύτερη ποσότητα υλικού μεταφέρεται χωρίς να υπάρχει υλικό να γεμίσει την κοιλότητα της συγκόλλησης. Επομένως το υλικό εξωθείται εκατέρωθεν του αποτυώματος της συγκόλλησης, δημιουργώντας γρέζι (**flash formation**). Όπως γίνεται κατανοητό η μεγάλη εισροή θερμότητας οφείλεται στο μεγάλο βάθος διείσδυσης, αλλά και στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Το βάθος εισαγωγής του πείρου σχετίζεται με το μήκος του, με συνέπεια όταν αυτό δεν διαθέτει το κατάλληλο μήκος σχετικά με το πάχος των υλικών βάσης, το βάθος διείσδυσης δεν είναι αυτό που απαιτείται. Ακόμη αν το πάχος των τεμαχίων δεν είναι σταθερό σε όλη την επιφάνεια τους, ενώ το βάθος εισαγωγής μεταβάλλεται δημιουργούνται συνθήκες για τον σχηματισμό τύπου “flash”. [54,59]. Γίνεται αντιληπτό πως η λάθος επιλογή παραμέτρων όπως η υψηλή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με χαμηλή ταχύτητα προώθησης οδηγούν στην αποβολή ποσοτήτων υλικού εκατέρωθεν στο αποτύωμα της συγκόλλησης, σχηματίζοντας λωρίδες από γρέζι (ribbon flash) [64].

Η κοιλότητα όμως από το υλικό που χάνεται, δεν μπορεί να γεμίσει επαρκώς από το υλικό ροής από το περιουχένιο με συνέπεια να δημιουργούνται κενά και αυλακώσεις επίσης [7], [16,], [18], [32], [54].

Αν δεν καλυφθεί η κοιλότητα συγκόλλησης επαρκώς, δεν μπορεί να παραχθεί απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας για πλαστική παραμόρφωση και υδροστατική πίεση. Απόρροια της ανεπαρκούς θερμότητας είναι η ανεπαρκής σύνδεσης των στρώσεων [16].



Εικόνα 41 Ατέλειες τύπου "flash" μαζί με αυλακώσεις στην επιφάνεια [63]

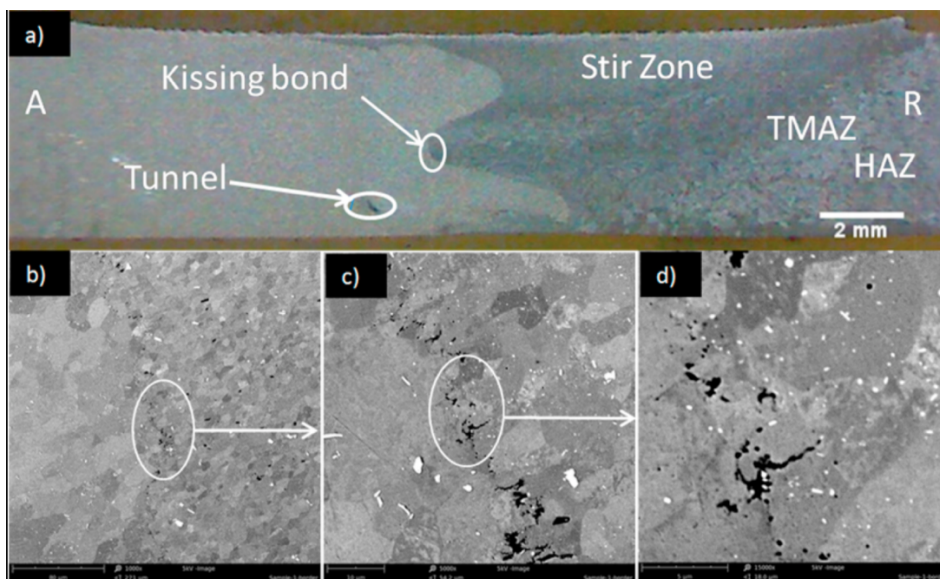
#### 4. "Kissing Bond", lazy s

Ένα συχνό φαινόμενο σε συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης όπως η F.S.W είναι ο σχηματισμός "kissing bond". Η χαμηλή θερμότητα κατά την διάρκεια συγκόλλησης οδηγεί σε ανεπαρκή πλαστική παραμόρφωση του υλικού εξαιτίας της ανεπαρκούς πίεσης που ασκείται από το εργαλείο συγκόλλησης στο υλικό, με αποτέλεσμα αυτό να μην είναι αναμιγνύεται κατάλληλα και να δημιουργούνται συνθήκες που ευνοούν τον σχηματισμό του συγκεκριμένου ελαττώματος. Αυτές οι συνθήκες σχετίζονται με την χαμηλή εισροή θερμότητας, εξαιτίας της ακατάλληλης επιλογής παραμέτρων συγκόλλησης όπως αναφέρθηκε. Το συγκεκριμένο ελάττωμα εμφανίζεται κυρίως σε συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου στον πυρήνα της συγκόλλησης ή στην διεπαφή των τεμαχίων εργασίας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της παρουσίας του επιφανειακού στρώματος οξειδίου ( $Al_2O_3$ ) που διαθέτουν τα τεμάχια εργασίας [54]. Επιπλέον άλλοι παράγοντες που επιδρούν για τον συγκεκριμένο σχηματισμό είναι το χαμηλό βάθος διείσδυσης. Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο όταν ο πείρος δεν βυθίζεται



σε όλο του το μήκος εντός το πάχος των πλακών [65]. Εξαιτίας της αδύναμης ανάδευσης εξαιτίας του μικρού βάθους εισαγωγής, δεν μπορεί το υλικό να καλύψει το πίσω μέρος του πείρου πλήρως και να σκορπιστεί γύρω από το εργαλείο δημιουργώντας αυλακώσεις σε συνθήκες χαμηλής θερμότητας [66]. Εκτός από τα παραπάνω, σε συνθήκες υψηλής περιστροφής και χαμηλής ταχύτητας προώθησης το στρώμα οξειδίων διασπάται με αποτέλεσμα την ανεπαρκή πλαστική παραμόρφωση και ανάδευση του υλικού. Λόγω της ανώμαλης ροής γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης λοιπόν, παρατηρείται συγκέντρωση σπασμένων μαζών οξειδίων με την μορφή ζιγκ-ζαγκ ή “kissing bond” [59,67].

Ο μεταλλικός δεσμός είναι ανεπαρκής σε αυτή την κατάσταση όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα μικρογραφίας SEM. Στην διάρκεια της F.S.W είναι κρίσιμη η διεπαφή των οξειδίων η οποία θα πρέπει να διακοπεί, ώστε να σχηματιστεί καλός μεταλλικός δεσμός [65].



Εικόνα 42 Ατέλεια τύπου kissing bond στο SEM [65]

##### 5. “Lack of Penetration form” – Ατέλειες λόγω ακατάλληλης ανάδευσης



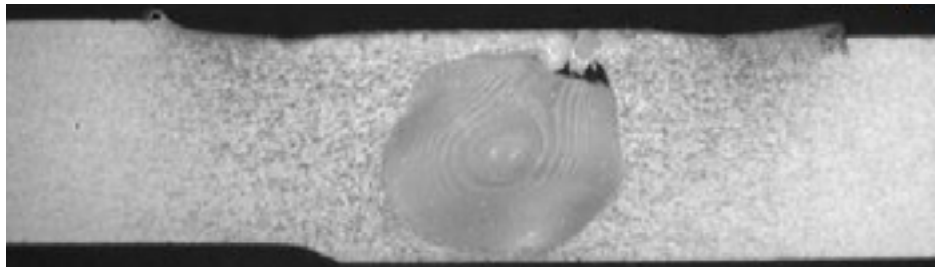
Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω ελαττώματα, η επιλογή λανθασμένων παραμέτρων συγκόλλησης οδηγούν σε σχηματισμό με αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα της συγκόλλησης, άρα και στις μηχανικές ιδιότητες τους[59]. Επομένως δεν υπάρχει ιδανική ανάδευση και πλαστικοποίηση του υλικού. Αυτό μπορεί να οφείλεται εξαιτίας του μικρού βάθους διείσδυσης λόγω της ανεπαρκούς πίεσης αξονικής δύναμης του εργαλείου συγκόλλησης, της γεωμετρίας του πείρου ( πχ μικρό μήκος) , ή και της ακαταλληλότητας κλίσης του εργαλείου. Το συγκεκριμένο ελάττωμα εμφανίζεται στον πυρήνα της συγκόλλησης με την μορφή ρηγματώσεων ή αυλακώσεων προκαλώντας με υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες κυρίως σε θέματα αντοχής [63].

#### 6. Ρηγματώσεις “Cracks”

Ξεχωριστά με τις ατέλειες ρηγμών στην ρίζα της συγκόλλησης (πυρήνας συγκόλλησης όπως αναφέρθηκε στο 5 (lack of penetration), θεωρούνται οι ρηγματώσεις οι οποίες εμφανίζονται στην συγκόλληση κάτω από το περιουχένιο του εργαλείου. Σύμφωνα με τον Sang Woo Song συναντάται κυρίως σε συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων όπου η θερμοκρασία φτάνει την μέγιστη τιμή της κάτω από το περιουχένιο του εργαλείου συγκόλλησης σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας περιστροφής. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των διαφορετικών σημείων τήξης των κραμάτων. Η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται προκαλεί ανάμεσα σε κατακρημνίσματα και της μητρικής φάσης του αλουμινίου αντίδραση. Τα κατακρημνίσματα ως ενδομεταλλικές φάσεις βρίσκουν πρόσφορο έδαφος για τον σχηματισμό τους και χαρακτηρίζονται από ψαθυρότητα [59,86].

#### 7. Σχηματισμός διακενώσεων (Voids/Wormhole defect)

Γενικότερα ένα πλαίσιο οικονομικών συγκολλήσεων με υψηλή παραγωγικότητα απαιτεί υψηλότερες ταχύτητες προώθησης. Ωστόσο οι υπερβολικά υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης συμβάλλουν στον σχηματισμό κενών στο εσωτερικό της συγκόλλησης ή στο άκρο της προωθούμενης πλευράς. Ο σχηματισμός των συγκεκριμένων διακενώσεων αποτελεί σύνθετο ελάττωμα σε συγκόλληση τριβής με ανάδευση. Η συγκεκριμένη ατέλεια παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα [98].



*Εικόνα 43 Σχηματισμού κενού κατά την διάρκεια συγκόλλησης δια τριβή με ανάδευση[98]*

Η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας προώθησης δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερα κενά (wormhole defect). Εκτός των υψηλών ταχυτήτων προώθησης, οι ανεπαρκείς πιέσεις σφυρηλάτησης συμβάλλουν στην δημιουργία των συγκεκριμένων ατελειών σύμφωνα με τον Leonard [98]. Επιπλέον η γεωμετρία του εργαλείου επηρεάζει την εμφάνιση αυτών των διακενώσεων. Συγκεκριμένα περιανχένιο με επίπεδη επιφάνεια συμβάλλει στον σχηματισμό των κενών [98].

#### 8. Keyhole defect

Όταν το εργαλείο συγκόλλησης προσεγγίζει την ακμή των τεμαχίων, το εργαλείο εξέρχεται πλήρως από τα τεμάχια στον κατακόρυφο άξονα συνεχίζοντας να περιστρέφεται. Ο περιστρεφόμενος πείρος απομακρύνεται αφήνοντας μια χαρακτηριστική οπή (keyhole) ανεξαρτήτως ταχύτητας. Η συγκεκριμένη ατέλεια δεν αποφεύγεται και αποτελεί σημείο συγκέντρωσης τάσεων που επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου προϊόντος. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές όπως η αναπλήρωση του υλικού στην οπή ή η δημιουργία μεγαλύτερου μήκους συγκόλλησης από το επιθυμητό μήκος [3], [5], [17]. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδικά διαμορφωμένος πείρους τύπου semi-consumable stir pin [101].



Εικόνα 44 Σχηματισμός Keyhole σε συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων AA2219/AA7075 [100]

## 1.11 Εφαρμογές μεθόδου FSW και χρήση κραμάτων αλουμινίου

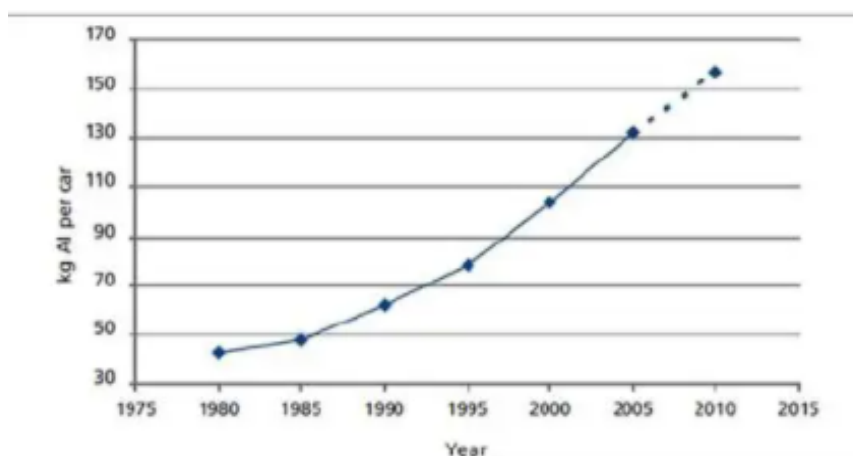
Εξαιτίας των ελκυστικών ιδιοτήτων τόσο των κραμάτων αλουμινίου όσο και των χαρακτηριστικών της F.S.W προσφέρεται η εφαρμογή της σε μεγάλο εύρος της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Συγκεκριμένα παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα με μείωση του κόστους και υψηλή αποδοτικότητα και αναπτύσσεται στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, ναυπηγίας, της αεροδιαστημικής, της σιδηροδρομίας, της ενέργειας και σε άλλες πολυάριθμες εφαρμογές [Jr.Davis].

Σχετικά με τον τομέα της ναυπηγίας, της αεροδιαστημικής και των μεταφορών που χρήζουν δομών με ελαφρύ βάρος και υψηλή αντοχή, χρησιμοποιούν την συγκόλληση με τριβή και ανάδευση. Ειδικότερα χρησιμοποιείται η μέθοδος σε ανόμοια κράματα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά αυτών των δομών. Εκτός από υψηλή αντοχή αλλά και του αντιδιαβρωτικού χαρακτήρα τους, η μέθοδος της FSW παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία για την κατασκευή προϊόντων στην αεροδιαστημική και ναυπηγική [1].

Σχετικά με τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας εφαρμόζεται η FSW εκτενώς ,είτε με διαφορετικά κράματα αλουμινίου μπορούν να συγκολληθούν μεταξύ τους, είτε με κράματα αλουμινίου με χάλυβα με αποτέλεσμα την παραγωγή δομικών στοιχείων ενός αυτοκινήτου σε μεγάλη ποσότητα [1].

### 1.11.1 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Το αλουμίνιο τα τελευταία χρόνια έχει συγκεντρώσει ευρεία αποδοχή στην αυτοκινητοβιομηχανία και αναπτύσσεται διαρκώς. Η χρήση του όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, αφού τα προϊόντα αλουμινίου βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά μέρη του αυτοκινήτου.



Εικόνα 45 Η τάση χρήσης αλουμινίου ανά αυτοκίνητο τα τελευταία χρόνια[103]

Αυτοκίνητο το οποίο έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο κατά την φάση χρήσης του έχει χαμηλό αντίκτυπο στο περιβάλλον, ενώ το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από αυτόν του χάλυβα. Η αντοχή σε διάβρωση που έχει το αλουμίνιο οφείλεται για το παραπάνω. Σε έρευνα που διεξήχθη στο Buenos Aires από τον Gustavo Zini (University of Buenos Aires School of Engineering) για την σύγκριση αλουμινίου και χάλυβα έδειξε ότι το αλουμίνιο σε όλο τον κύκλο ζωής του έχει 8,2 % λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και 10,3% λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub>. Επομένως το αλουμίνιο και τα κράματα του χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αυτοκινητοβιομηχανία και αντικαθιστούν πιο βαριά στοιχεία όπως ο χάλυβας.

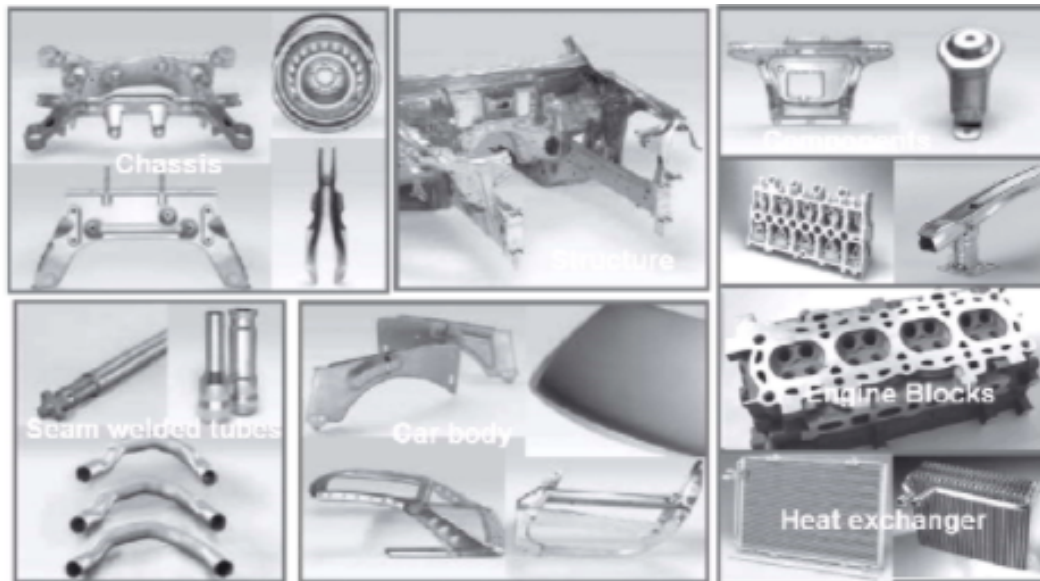
Η FSW χρησιμοποιείται για δομικά μέρη αυτοκινήτου όπως το δεξαμενές καυσίμων, συστήματα αναρτήσεων, σε κινητήρες, σε σασί, σε τροχούς και σε εξαρτήματα όπως πιστόνια (έμβολα) του κινητήρα (Εικόνα 47). Για παράδειγμα η αμερικάνικη εταιρεία Ford χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης για το σύστημα μετάδοσης του αγωνιστικού οχήματος Ford GT το 2015 (κεντρικό τούνελ του αυτοκινήτου). Ως δομικό μέρος αυξάνει την αντοχή σε κάμψη στο σασί του αυτοκινήτου και ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ως δεξαμενή καυσίμων με ατμό [74,23,84,85]. Πλέον ανάγκες μείωσης του κόστους και κατανάλωσης του υλικού, οδηγούν στην χρήση του

αλουμινίου, της FSW και αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Με την χρήση ρομποτικής η μέθοδος μπορεί να ανταπεξέλθει σε δύσκολες γεωμετρικές συνθήκες επίσης. Οι ανάγκες αυτές οδήγησαν στην επιτυχία της FSW και στην εφαρμογή μια νέας τεχνικής, της Friction Stir Spot Welding η οποία αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης. Η FSSW χρησιμοποιείται για κατασκευή μηχανικών προϊόντων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία [74].



*Εικόνα 46 Το κεντρικό τούνελ συγκολλημένο με FSW στο Ford GT[74]*

Τα περισσότερα κράματα του αλουμινίου που χρησιμοποιούνται είναι τα κράματα διαμόρφωσης με τα πιο σημαντικά αυτά της 5XXX και 6 XXX σειράς που είναι κατάλληλα για την κατασκευή των αμαξωμάτων και κορμών αυτοκινήτων (εσωτερικών και εξωτερικών πάνελ). Για παράδειγμα το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση και γι' αυτόν τον λόγο η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της. Από τη άλλη ορισμένα κράματα της 5XXX σειράς βρίσκουν εφαρμογή σε καπό και φτερά αυτοκινήτων. Ακόμη και η Mazda χρησιμοποίησε την FSSW για την κατασκευή της πίσω πόρτας και του καπό για το μοντέλο RX-8 [44,74,83,84].

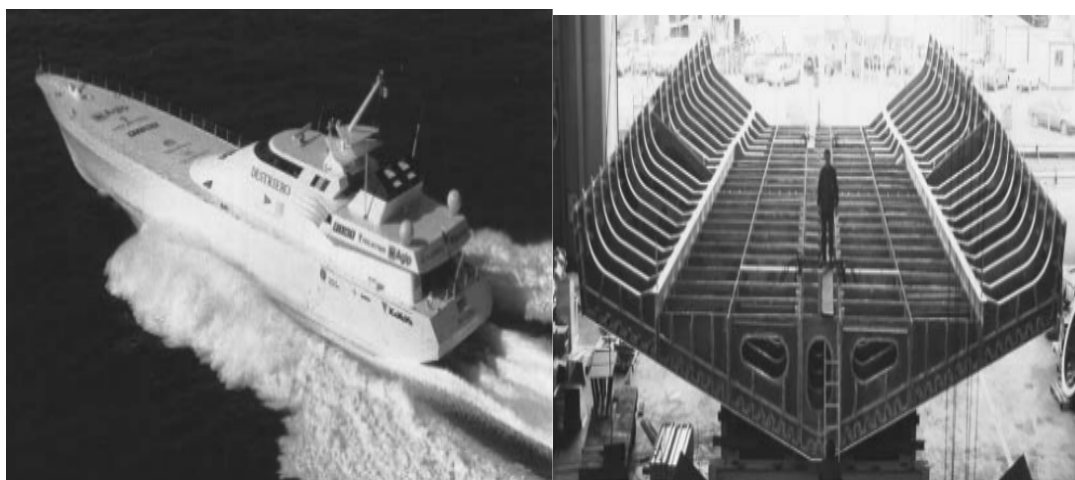


Εικόνα 47 Δομικά μέρη αυτοκινήτου από αλουμίνιο

### 1.11.2 Εφαρμογές στην αεροναυπηγική και σε θαλάσσιες κατασκευές

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην κατασκευή θαλάσσιων κατασκευών και σκαφών. Τα πιο χρησιμοποιούμενα κράματα είναι αυτά της σειράς 5XXX και 6XXX για την κατασκευή προϊόντων ή στοιχείων στον συγκεκριμένο τομέα όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Η πρώτη ιστορική αναφορά για εμπορική χρήση της μεθόδου αναφέρεται σε πάνελ από εξωθημένα κράματα αλουμινίου με κοίλο σχήμα το 1991 στην Σουηδία και αργότερα στην Γερμανία. Αυτά τα πάνελ προορίζονται για αλιευτικά σκάφη και λειτουργούσαν ως καταψύκτες. Κράματα της 5XXX σειράς όπως το 5083 χρησιμοποιείται για την κατασκευή ταχύπλοων σκαφών, του καταστρώματος τους άλλα και για το κύτος που αποτελεί το χαμηλότερο στάδιο ενός πλοίου. Τέτοιο παράδειγμα είναι το ταχύπλοο Destriero [44,74].





*Εικόνα 48 α) Ταχύπλοο Destriero β) Εσωτερική δομή σκληρού κύτους ταχύπλοου σκάφους [44]*

Επιπλέον η FSW εφαρμόζεται σε πλαίσια αμαξώματος πλοίων, σε προκατασκευασμένα πάνελ ταχύπλοων και κρουαζιερόπλοιων, σε εξέδρες άντλησης πετρελαίου και σε πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων [44,74].

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο επιβατηγό οχηματαγωγό πλοίο που κατασκευάστηκε εξ'ολοκλήρου με την μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι το Super Liner Ogasawara, το οποίο ναυπηγήθηκε το 2004 από την ναυπηγική βιομηχανία της Ιαπωνίας σε συνεργασία με την εταιρία Mitsui Engineering.



*Εικόνα 49 Πλοίο Super Liner Ogasawara [74]*

### 1.11.3 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική και σε αεροσκάφη

Στην βιομηχανία αεροδιαστημικής στις Ηνωμένες Πολιτείες, η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση χρησιμοποιείται για να σχεδιάζει δεξαμενές οχημάτων δορυφορικής εκτόξευσης από κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής. Οι αποθήκες καυσίμου και οι πύραυλοι προώθησης του διαστημικού λεωφορείου είναι από κράματα 2XXX και πλέον από κράματα αλουμινίου – λιθίου. Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα [44].



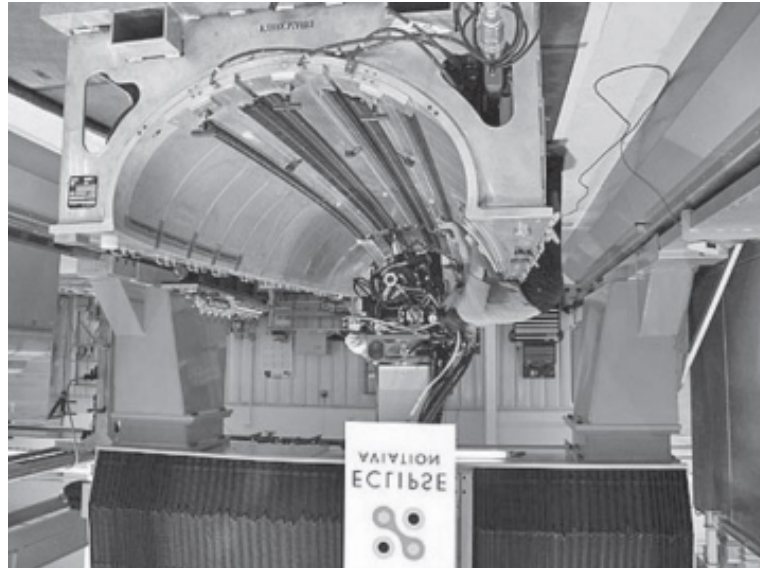
*Εικόνα 50 Αποθήκες καυσίμου και πύραυλοι προώθησης σε διαστημικά σκάφη [44]*

Η πρώτη χρήση της FSW για κατασκευή του πρώτου πυραύλου γνωστού ως delta έγινε το 1999 όπου και εκτοξεύθηκε. Η FSW βελτίωσε τον delta II, αυξάνοντας την αντοχή της συγκόλλησης κατασκευάζοντας τον delta IV. Ο συγκεκριμένος, λόγω του ειδικού του σχεδιασμού εξοικονομεί κόστος και χρόνο παραγωγής.

Πλέον επιδιώκεται από διάφορες εταιρίες να χρησιμοποιούν την FSW με διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης για την παραγωγή πάνελ αλουμινίου. Για παράδειγμα η εταιρία Boeing θέλει να εφαρμόζει συγκολλήσεις είτε μετωπικές είτε με επικάλυψη είτε γωνιακές με σκοπό την παραγωγή εξαρτημάτων με περίπλοκα σχήματα. Συγκεκριμένα έχει σχεδιάσει ειδική καμπυλωτό μηχανισμό προσγείωσης ενός αεροσκάφους (προστατευτικός μηχανικός προσγείωσης). Επιπρόσθετα η εταιρία Eclipse Aviation επεδίωξε με την σειρά τις να αντικαταστήσει παραδοσιακές τεχνικές συγκόλλησης με την εφαρμογή της FSW, ενώ αποτελεί χρονικά την πρώτη εμπορική



χρήση της FSW για την παραγωγή εμπορικών αεροσκαφών με χαμηλό κόστος και χρόνο κατασκευής. Παράδειγμα της χρήσης είναι η κατασκευή αεροσκάφους Jet Eclipse 500 [74].



*Εικόνα 51 Διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση για την συγκόλληση stringer και spar στα αλουμιένια πάνελ της καμπίνας[74]*

Κράματα της σειράς 4xxx , όπως το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για προϊόντα συγκόλλησης και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Η εσωτερική κατασκευή των αεροσκαφών περιλαμβάνει διατομές και φύλλα των σειρών 2xxx και 7xxx [44].

#### 1.11.4 Εφαρμογή στους σιδηροδρόμους

Ο τρόπος κατασκευής τρένων και τραμ είναι τομέας όπου πλέον η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση θεωρούνταν καινοτόμο με σταθερή χρήση. Τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ιαπωνία, η FSW προορίζεται για την κατασκευή πλαισίων και άλλων δομικών μερών από εξωθημένο αλουμίνιο. Για παράδειγμα ορισμένα 2XXX ή 6XXX κράματα χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για τα εσωτερικά δομικά μέλη ενός τρένου. Ιδιαίτερο εγχείρημα είναι η κατασκευή σιδηροδρόμου και τρένου με την μέθοδο μαγνητικής αιώρησης γνωστή ως Magnetic levitation τόσο στην Ευρώπη όσο και σε

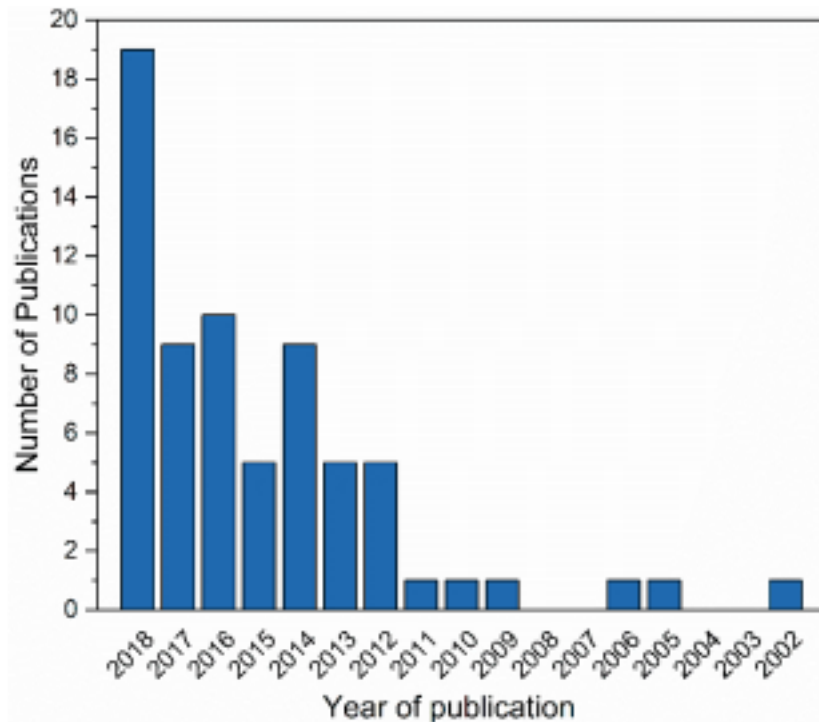
Ιαπωνία. Το πειραματικό αυτό τρένο απαρτίζεται από κράματα αλουμινίου 6XXX σειράς για τα σώματα των βαγονιών. Εικόνα 52 [44],[74].



Εικόνα 52 [44]

## 1.12 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Συγκόλλησης δια τριβής με Ανάδευση

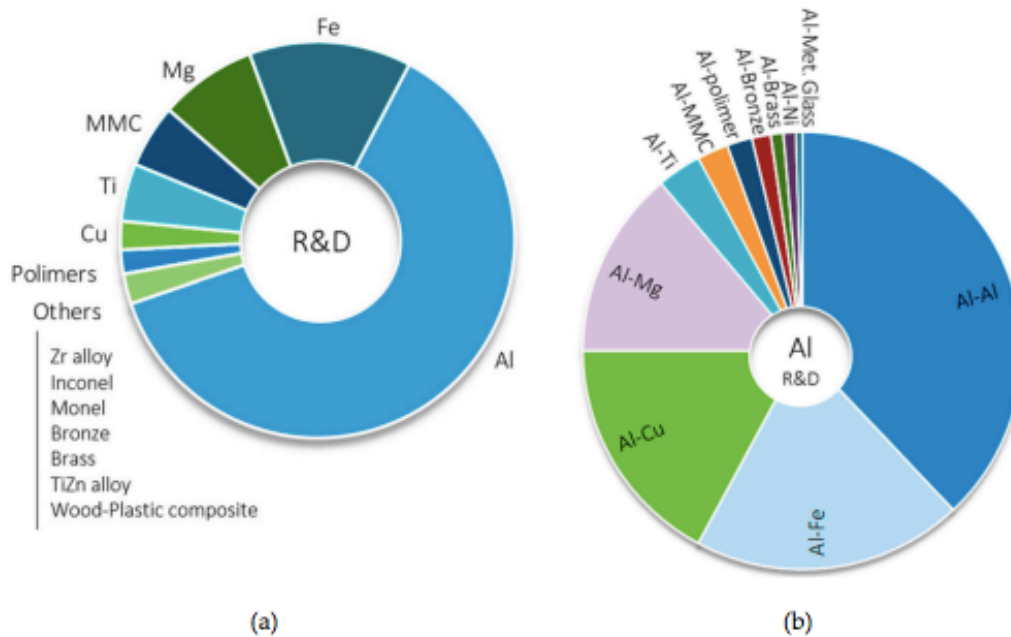
Μελέτες και αποτελέσματα επιστημονικών ερευνών ενισχύουν την χρήση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση όπως προαναφέρθηκε η οποία έχει μεγάλη επιτυχία στην σύνδεση κραμάτων αλουμινίου [75]. Σύμφωνα με τον Vitek και των συνεργατών του πολλές δομές, κυρίως αυτές που έχουν ανάγκη από μειωμένο βάρος, σχεδιάζονται μέσω της FSW. Η FSW λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σύγκριση με τις μεθόδους τήξης, έχει ως αποτέλεσμα να είναι το επίκεντρο πολλών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για να διερευνηθούν οι παράμετροι που διέπουν την λειτουργία της. Αυτό αποτυπώνεται από το παρακάτω διάγραμμα το οποίο αποδεικνύει πως η συγκεκριμένη τεχνική είναι ικανή για συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, καθώς μπορεί να συνεισφέρει μειωμένο κόστος συγκόλλησης και καλύτερες επιδόσεις για τα ίδια τα τεμάχια εργασίας [75].



Εικόνα 53 Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά σχετικές με FSW ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου[75]

Στην παραπάνω Εικόνα παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις εγγράφων που σχετίζονται με την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου οι οποίες έχουν αυξητικές τάσεις τα τελευταία χρόνια.

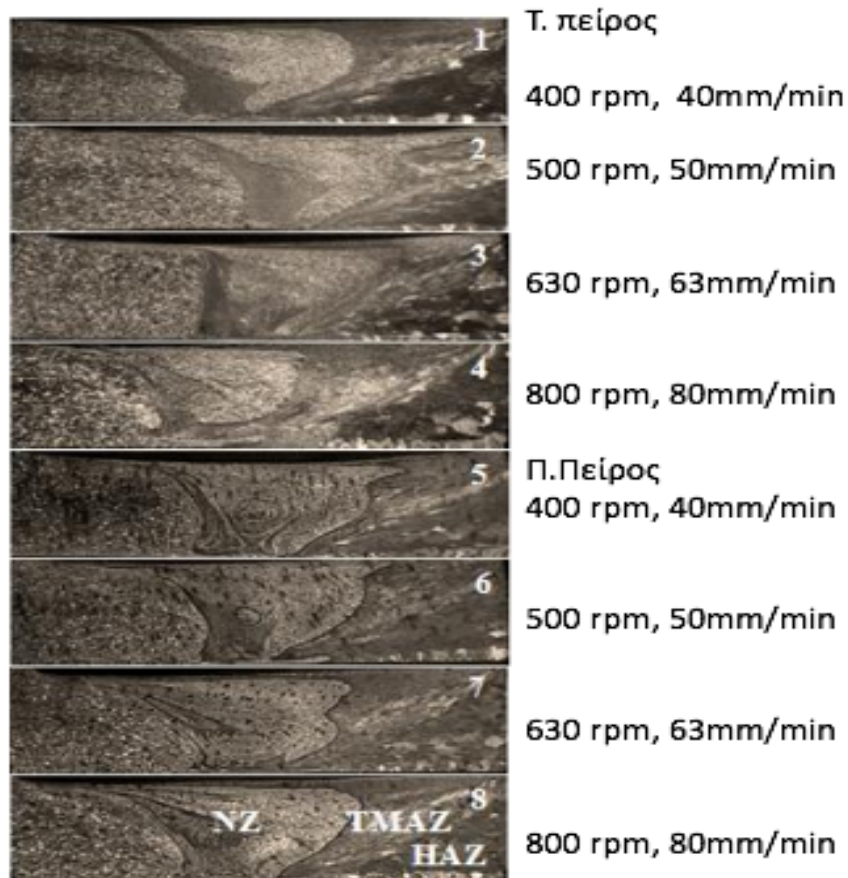
Σύμφωνα με τον **Megalhaes** [76] που ερεύνησε τομείς εφαρμογής της FSW στην βιομηχανία όσον αφορά την συγκόλληση τριβής με ανάδευση τόσο όμοιων όσο και ανόμοιων κραμάτων, το μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης όμοιων κραμάτων πραγματοποιούνται με κράματα του αλουμινίου. Σχετικά με την συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων, μεγαλύτερο ποσοστό λαμβάνουν κράματα αλουμινίου επίσης. Τα παραπάνω συνοψίζονται και στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα54).



Εικόνα 54 [76]

Οι **Sefika Kasman**, **Fatih Kahraman**, **Anil Emiralio** και **Haydar Kahraman** πραγματοποίησαν πειράματα για την συγκόλληση των διαφορετικών τύπων αλουμινίου σειράς AA6082-T6 και AA5083-H111 με την μέθοδο FSW. Διατήρησαν σταθερό τον λόγο ταχυτήτων περιστροφής και προώθησης σε δύο διαφορετικά γεωμετρικά εργαλεία συγκόλλησης με σκοπό την διερεύνηση επίδρασης αυτών στις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν περάσματα συγκόλλησης σε διαφορετικά ζεύγη ταχυτήτων. Αναλυτικά αυτά τα 8 ζεύγη ήταν: ταχύτητα περιστροφής 400,500,630,800 (rpm) με ταχύτητα προώθησης 40,50,63,80 (mm/min) αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκαν για όλα τα ζεύγη τριγωνικός και πενταγωνικός πείρος εργαλείου συγκόλλησης. Οι υπόλοιποι παράγοντες θεωρούνται σταθεροί ως εξής: Γωνία κλίσης εργαλείου  $2^\circ$ , διάμετρος περιανχένιου 20mm.

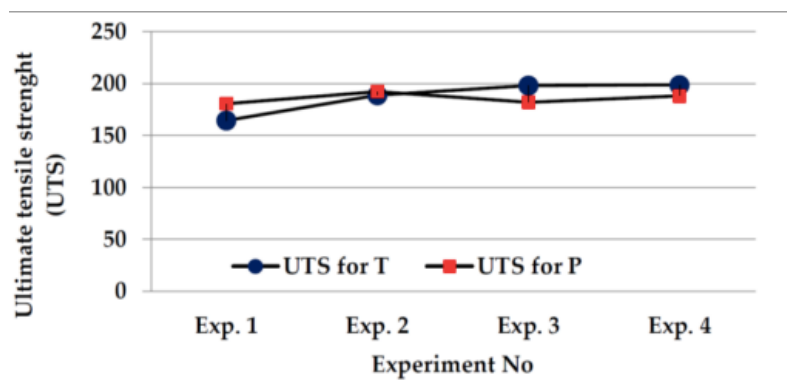
Η ζώνη ανάδευσης και η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη επηρεάζεται τόσο από τις παραμέτρους συγκόλλησης όσο και από τον σχεδιασμό του εργαλείου συγκόλλησης. Ο πενταγωνικός πείρος όπως φαίνεται στην ζώνη ανάδευσης σχηματίζει πιο έντονο το φαινόμενο ανάδευσης “onion ring” απ’ότι ο τριγωνικός.



Εικόνα 55 Σειρές Πειραμάτων σε διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης (Όπου T για τριγωνικός πείρος και Π για πενταγωνικός πείρος)

Οι συνδυασμοί των 3,4,7,8 πειραμάτων διαθέτουν πιο ευρεία θερμομηχανική επηρεασμένη ζώνη εξαιτίας της μεγαλύτερης εισροής θερμότητας που παρέχουν οι υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

Οι δοκιμές εφελκυσμού δηλώνουν ότι η υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού χαρακτηρίζει την 4<sup>η</sup> συγκόλληση (198,40MPa) με την χρήση τριγωνικού πείρου, δίχως την παρουσία ελαττωμάτων. Οι υπόλοιπες συγκολλήσεις παρουσιάζουν ελαττώματα λόγω της ανεπαρκούς εισροής θερμότητας.



Εικόνα 56 Δοκιμές αντοχής εφελκυσμού

Οι **Beytullah Gungor, Erdinc Kaluc, Emel Taban** και **Aydin Sik** εξέτασαν τις συγκολλήσεις μεταξύ κοινών τύπων αλουμινίου 5083-H111,5083H111(F55) 6082-T651,6082-T651(F56) και διαφορετικών τύπων αλουμινίου 5083H-111 και 6082-T651(F66). Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ταχύτητα περιστροφής 1250 rpm, ταχύτητα προώθησης 64mm/min και σε γωνία εργαλείου συγκόλλησης 2°. Το εργαλείο συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε είναι το H13. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Στην συγκόλληση F55 σε αντίθεση με τις υπόλοιπες δεν φαίνεται τόσο ξεκάθαρα ο σχηματισμός των onion rings. Οι κόκκοι του ενδοτραχυμένου 5083 στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη είναι πιθανόν να ανακρυσταλλωθούν πλήρως, κοντά στην ζώνη ανάδευσης του F55. Οι κόκκοι του 6082 παραμορφώνονται πλαστικά και επιμηκύνονται εξαιτίας της περιστροφικής δράσης του στελέχους. Βρέθηκε ότι στα όμοια κράματα 5083-H111 πέτυχαν μέση αντοχή στην κάμψη το 86% της αντοχής των μετάλλων βάσης. Η ανόμοια συγκόλληση των 5083-H111 και 6082-T651 επιτυγχάνει αντοχή κάμψης 65% ενώ παρόμοια συγκόλληση 6082 πέτυχε 62% αντοχή κάμψης.

Οι **Anil Kumar, V Venkata Ramana and Mayur Pawar** σύγκριναν τις συγκολλήσεις μεταξύ κοινών τύπων αλουμινίου (5083-5083) (6082-6082) και διαφορετικών τύπων αλουμινίου (5083 και 6082). Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν πλάκες 4mm που συγκολλήθηκαν με ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου 1200rpm και ταχύτητα προώθησης του εργαλείου 63mm/min και γωνία κλίσης 1°. Τα αποτελέσματα των παραπάνω συγκολλήσεων έδειξαν ότι η συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων χαρακτηρίζονται από καλύτερα χαρακτηριστικά, καθώς η απόδοση της ήταν υψηλότερη από τις άλλες δύο.

Ο **Cavaliere** και οι συνεργάτες του [82], παρατήρησαν ότι με αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό το όριο διαρροής της συγκόλλησης διατριβής με ανάδευση σε κράματα αλουμινίου 6082, μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή, της οποίας η υπερβολή οδηγεί στη μείωση του. Το όριο διαρροής επηρεάζεται άμεσα από την εισροή θερμότητας όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα των Ατελειών μιας συγκόλλησης.



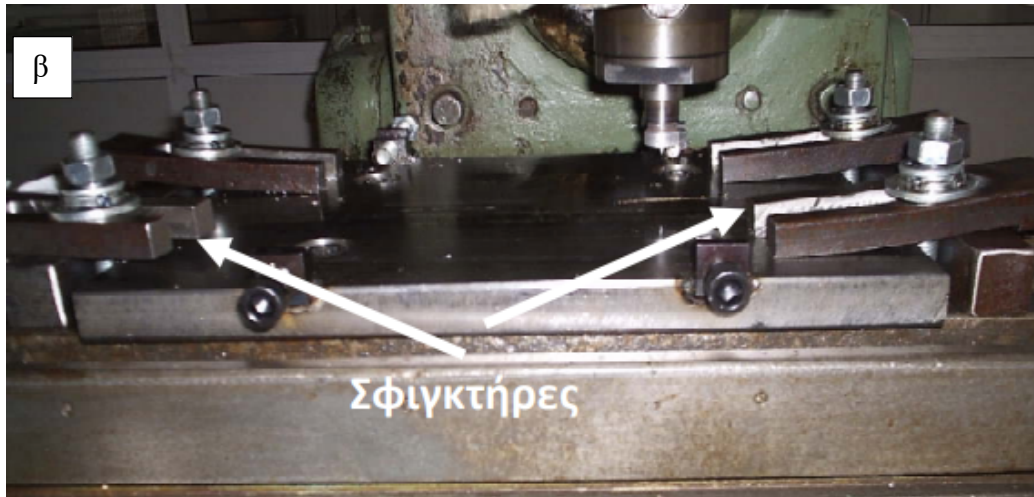
## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Εξοπλισμός

Για την διεκπεραίωση των πειραματικών διαδικασιών της Συγκόλλησης Τριβής Με Ανάδευση χρησιμοποιήθηκε ειδική πρέσα-φρέζα μετάλλου (milling machine) με συγκεκριμένες τροποποιήσεις ( ασφάλειες και συγκεκριμένη κλίση  $\theta=3^0$ ) από τους υπεύθυνους του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.







Εικόνα 57: α) Μηχανή Συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης - Κάθετη τροποποιημένη φρεζομηχανή τύπου 'KEARNEY TRECKER Horizontal Milling Machine Type No. 3CE' β) Βάση τοποθέτησης – πάκτωσης των δοκιμιών

Η ταχύτητα περιστροφής και η ταχύτητα πρόωσης της μηχανής καθορίζονται ανάλογα με τις συγκεκριμένες που διαθέτει η φρεζομηχανή.



Εικόνα 58: Συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης της μηχανής συγκόλλησης

## 2.2 Μέταλλα Βάσης

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν δύο μέταλλα βάσης για συγκόλληση με επικάλυψη (lap joint). Τα κράματα AA5083- H111 και AA6082-T6 είναι σε μορφή πλακών με πάχος 3mm και 6mm αντίστοιχα. Οι διαστάσεις σε μήκος τους ήταν μήκος 200mm και πλάτος 150 mm.

Οι μέσες χημικές συστάσεις των δύο κραμάτων αλουμινίου κατά προσέγγιση είναι και κυμαίνονται ως εξής :

	Βάρος (%)										
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Other each	Others Total
AA5083 min	92,4				0,4	0,05	4,0				-
AA5083 max	95,6	0,4	0,4	0,1	1,0	0,25	4,9	0,15	0,25	0,05	0,15
AA6082 min	95,1	0,7			0,4		0,6				-
AA6082 max	98,3	1,3	0,5	0,1	1,0	0,2	1,2	0,1	0,2	0,05	0,15

Πίνακας 3: Χημική Σύσταση των Μετάλλων Βάσης

Πίνακας 4: Δοκίμια – Συνδυασμοί Παραμέτρων

ΔΟΚΙΜΙΑ	Ταχύτητα προώθησης (χιλιοστά/λεπτό)	Ταχύτητα περιστροφής (στροφές/λεπτό)
A1	51	590
A2	83	590
A3	127	590
A4	203	590
B1	51	1000
B2	83	1000
B3	127	1000
B4	203	1000

Με τις συγκεκριμένες τιμές εξετάζεται σημαντικό μέρος των παραμέτρων της συγκόλλησης προκειμένου να μελετηθούν αποτελέσματα και συνθήκες στον σχηματισμό της συγκόλλησης.

### 2.3 Διαστάσεις εργαλείου συγκόλλησης

Το εργαλείο της συγκόλλησης είχε κυκλική διάμετρο πείρου 4,50mm, διάμετρο περιανχένιου 22mm και βάθος διείδσης 4,55mm. Είναι κυκλικό με σπείρωμα. Ο πείρος διαθέτει σπείρωμα έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ροή του μετάλλου. Το εργαλείο είναι κατασκευασμένο από θερμικά κατεργασμένο χάλυβα SVERKER 21 σκληρότητας 61 HRC. Ο συγκεκριμένος χάλυβας εξασφαλίζει ότι η γεωμετρία του εργαλείου δεν θα αλλάξει όταν αυτό εκτεθεί σε επαναλαμβανόμενους κύκλους των θερμοκρασιών που σχηματίζονται κατά τη συγκόλληση, αλλά και της μηχανικής καταπόνησης που δέχεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το εργαλείο συγκόλλησης, ενώ φαίνεται και ο πείρος με το κυκλικό σπείρωμα.



### 2.4 Μηχανική Προετοιμασία Ελασμάτων

Για την ασφαλέστερη και καταλληλότερη διαδικασία η συγκολλησή πριν αρχίσει απαιτεί μια ειδική μηχανική προεργασία. Αρχικά στις πλάκες των δοκιμών θα πρέπει να γίνουν τέσσερις συμμετρικές οπές στα τέσσερα άκρα τους σε κάθε μια από αυτές.

Οι οπές βοηθάνε ώστε οι πλάκες να περάσουν μέσα από τις ασφάλειες της φρέζας όπου χρησιμοποιήθηκαν βίδες για να βιδώσουν τις πλάκες και με αυτό τον τρόπο να πακτωθούν και να συσφίγγονται ώστε μην απομακρυνθούν κατά την διάρκεια της διαδικασίας εξαιτίας των δυνάμεων. Οι πλάκες ευθυγραμμίζονται πάνω στην τράπεζα η μια πάνω στην άλλη, ώστε να μην υπάρχει κενό μεταξύ τους καθώς περνάει ο πείρος μέσα από αυτά σε όλο το μήκος της συγκόλλησης.

## 2.5 Κοπή Δοκιμίων

Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία για την αποκάλυψη της δομής, τέμνουμε το δοκίμιο στο κατάλληλο μέγεθος. Η μικροδομή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή κατά την διαδικασία της κοπής παρά σε κάποιο άλλο βήμα της προετοιμασίας. Η αλλαγή μπορεί να επέλθει από υπερβολική θερμότητα, μηχανική παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι λεγόμενες «τεχνητές μικροδομές» που προκύπτουν σ' αυτήν την περίπτωση είναι πιθανόν να μην επιτρέψουν την αποκάλυψη της πραγματικής δομής. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει η ζώνη παραμόρφωσης να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή, με την χρήση λειαντικού τροχού εκχόνδρισης. Για την μελέτη των συγκολλήσεων είναι η απαραίτητη η λήψη δοκιμίων. Η κοπή ουσιαστικά είναι το πρώτο βήμα της μεταλλογραφίας, και γίνεται σε διαστάσεις ώστε να είναι ευνοϊκές για τα επόμενα βήματα. Ο δυσκοτόμος που κόβει τις πλάκες σε δοκίμια με συγκεκριμένες διαστάσεις διαθέτει σύστημα ψύξης-λίπανσης με νερό και λάδι αντίστοιχα ώστε να διατηρείται η μικροδομή του ελάσματος.

## 2.6 Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή του δοκιμίου, ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Τα δοκίμια εγκιβωτίζονται και βυθίζονται σε ειδικό υλικό με κατάλληλο σχήμα με σκοπό την παραγωγή κατάλληλο δοκιμίου που θα είναι διαθέσιμο για τα επόμενα βήματα. Το υλικό είναι ρητίνη ώστε να πραγματοποιηθούν πιο εύκολα τα επόμενα βήματα διεργασίας τους.

## 2.7 Λείανση

Μέσω της λείανσης προετοιμάζουμε την επιφάνεια του δοκιμίου. Όπως αναφέραμε παραπάνω ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για το κόψιμο του υλικού,

η δομή της επιφάνειας έχει αλλοιωθεί σε κάποιο βαθμό. Το κατεστραμμένο στρώμα απομακρύνεται χρησιμοποιώντας σταδιακά χαρτιά λείανσης με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους. Κατά την διάρκεια της λείανσης είναι απαραίτητη η συνεχόμενη παροχή νερού, για τον καθαρισμό του δίσκου καθώς και την ψύξη του δοκιμίου. Για να έχουμε ένα δοκίμιο με σωστά λειασμένη επιφάνεια συγκρατούμε με τα ακροδάχτυλα, με την χρήση γαντιών όσο πιο κοντά στο λειαντικό τροχό γίνεται και χρησιμοποιούμε κατάλληλη δύναμη για να είναι κατακόρυφο και να σχηματίζει ορθή γωνία με την επιφάνεια των λειαντικών χαρτιών στην επιφάνεια του τροχού. Εξετάζουμε ανα τακτά χρονικά διαστήματα την επιφάνεια που λειάνεται αν φέρει αυλακώσεις, χαραγές ή αν είναι επίπεδη.

Αν κατά την διάρκεια της λείανσης προκύψει κάποιο σφάλμα πρέπει να αυξηθεί η ασκούμενη δύναμη και να μην χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκο χαρτί. Το δοκίμιο πρέπει να παραμείνει στον δίσκο που δημιουργήθηκε το ελάττωμα ή να επιστρέψει στον προηγούμενο ώστε να περάσει ξανά από την ίδια διαδικασία. Σε περίπτωση που δεν πετυχαίνει η λείανση από την μία πλευρά επιλέγεται άλλη πλευρά του δοκιμίου για εκ νέου διαδικασία. Το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται κατά 90° μεταξύ με το πέρας κάθε σταδίου. Κατά την αλλαγή των χαρτιών το δοκίμιο πρέπει να είναι υγρό για να αποφύγουμε τυχόν ολίσθηση. Επίσης πρέπει να ξεπλένεται πριν προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, για να μην μολυνθούν τα λειαντικά χαρτιά με κόκκους από τους πιο χονδρόκοκκους λειαντικά χαρτιά. Μετά από κάθε στάδιο η διαδικασία καθαρισμού που ακολουθεί είναι καθαρισμός του δοκιμίου με βαμβάκι και νερό, ενώ στη συνέχεια περιχύνεται με αιθανόλη και στεγνώνεται με εμφύσηση θερμού αέρα.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά που περιέχουν καρβίδια του πυριτίου (SiC) :

1. 220grit. / (SiC/inch<sup>2</sup>).
2. 500grit. / (SiC/inch<sup>2</sup>).
3. 1200grit. / (SiC/inch<sup>2</sup>).



*Εικόνα 59: Μηχανή Λείανσης Υδρόψυκτη διάταξη τύπου “Stuers, DP-U2” του Εργαστηρίου Μεταλλογραφίας*

## 2.8 Στίλβωση

Μετά το πέρας της λείανσης, ελέγχεται αν το αποτέλεσμα είναι επιθυμητό και ακολουθεί η διαδικασία της στίλβωσης. Στην στίλβωση χρησιμοποιείται ο περιστρεφόμενος δίσκος, αλλά αντί για τα χαρτιά λείανσης τοποθετούμε βελούδο και ειδική πάστα όπου την απλώνουμε κυκλικά. Συγκεκριμένα μετά τα λειαντικά χαρτιά, χρησιμοποιείται πάστα αλουμίνας κοκκομετρίας 1μm και 0,1 μm έπειτα πάνω σε βελούδο. Με την διαδικασία της στίλβωσης η επιφάνεια τομής του δοκιμίου απαλλάσσεται από μικρές γραμμές που είχαν μείνει από την διαδικασία της λείανσης. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι μια λαμπερή και στιλπνή επιφάνεια, η οποία ανταναλά κάθετα όλες τις ακτίνες που προσμίπτουν πάνω της.

## 2.9 Χημική Προσβολή

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου με σκοπό να είναι έτοιμο για την παρατήρηση μέσω οπτικού μικροσκοπίου. Συγκεκριμένα φανερώνει τα όρια των κόκκων και τις ζώνες συγκόλλησης. Το δοκίμιο θα πρέπει να διαθέτει μια γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια, ώστε να είναι έτοιμο για χημική προσβολή. Η χημική προσβολή στα συγκεκριμένα

δείγματα πραγματοποιήθηκε με διάλυμα HF 0.5% w/v με βύθιση των δοκιμίων για 20sec.

## 2.10 Οπτική Μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία αποτελεί μέθοδος παρατήρησης μικροδομής των δοκιμίων και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για τη μελέτη της μικρογραφίας.

Πριν από την χρήση του οπτικού μικροσκοπίου, η εξέταση του τεμαχίου εργασίας και των δοκιμίων περαιτέρω θα πρέπει να γίνει μακροσκοπικά. Συγκεκριμένα σε πρώτο στάδιο η παρατήρηση θα πρέπει να γίνει με μικρή μεγέθυνση και σταδιακά να αυξάνεται για την καλύτερη εξέταση της μικροδομής. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται καλύτερα η μικροδομή του δοκιμίου σε όλο το φάσμα της για πιθανές ατέλειες και σχηματισμούς της. Εκτός αυτών, καθορίζονται οι δομικές φάσεις και η σύσταση της κυρίας μάζας του μετάλλου. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας, επειδή η δομή και η σύσταση του υλικού, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξετάζει ένα καλά προετοιμασμένο δοκίμιο πριν ή και μετά από χημική προσβολή. Τις φορές που προηγείται της χημικής προσβολής γίνεται για τον εντοπισμό πιθανών ατελειών. Το δοκίμιο πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένο ώστε να γίνει η παρατήρηση της μικροδομής του δοκιμίου χωρίς επιπλοκές και 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. Στην παρούσα διπλωματική η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιείται για την παρατήρηση και ερμηνεία της μικροδομής των ζωνών της συγκόλλησης.

## 2.11 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy “SEM”)

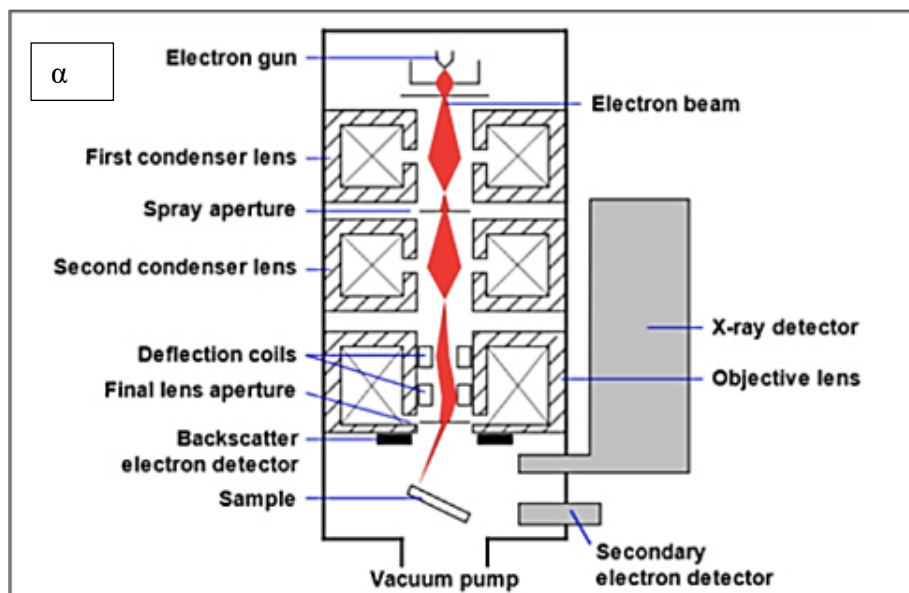
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών σε λεπτομερή κλίμακα με υψηλή διακριτική ικανότητα και μεγεθύνσεις έως x300.000. Βασίζεται στην αλληλεπίδραση του προς εξέταση δείγματος με την



προσπίπτουσα σε αυτό δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας.

Αποτελείται από την στήλη παραγωγής ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνση της δέσμης, το θάλαμο όπου τοποθετείται το δοκίμιο, την αντλία κενού και το σύστημα ανιχνευτών και παρουσίασης. ( Εικόνα 60α) .Τα ηλεκτρόνια παράγονται στην στήλη παραγωγής από ένα νήμα βολφραμίου, το οποίο θερμαίνεται σε θερμοκρασία περίπου 2800K, υπό την επίδραση κενού για την αποφυγή σκέδασης της δέσμης. Η παραγόμενη δέσμη ηλεκτρονίων διέρχεται από μια σειρά μαγνητικών φακών, επιταχύνεται, συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Η εστιαζόμενη δέσμη, περνώντας από ζεύγη πηνίων σάρωσης, εκτρέπεται οριζόντια και κάθετα, σαρώνοντας την υπό μελέτη επιφάνεια του δοκιμίου. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την επιφάνεια συλλέγονται και ενισχύονται ώστε να προκύψει ένα οπτικό σήμα.

Μια πρόσθετη λειτουργία του μικροσκοπίου σάρωσης είναι δυνατή μέσω του συστήματος στοιχειακής μικροανάλυσης με φασματοόμετρο ακτίνων X διεσπαρμένης ενέργειας (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) και στοχεύει στην ποιοτική και ημι-ποσοτική στοιχειακή ανάλυση της εξεταζόμενης επιφάνειας του δοκιμίου.





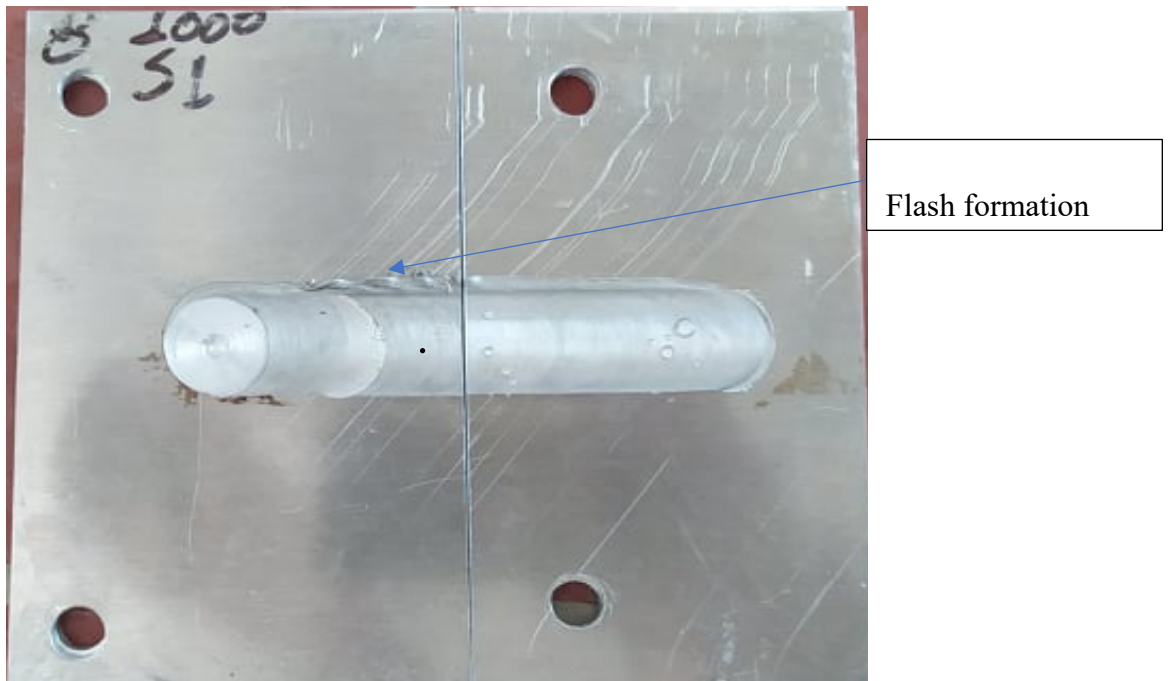


*Εικόνα 60:α) Διάταξη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης β) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM του Εργαστηρίου Ορυκτολογίας Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας τύπου Jeol JSM 6380LV*

### 3. Αποτελέσματα και συζήτηση

#### 3.1 Μακροσκοπική Παρατήρηση

Χωρίς την εξέταση οπτικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου παρατηρώντας πρώτα τα τεμάχια εργασίας μακροσκοπικά, μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για την επιτυχία ή την αστοχία της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα στο B1 τεμάχιο εργασίας παρατηρείται το φαινόμενο της εξώθησης του υλικού εκατέρωθεν του αποτυπώματος της συγκόλλησης, γνωστό ως flash formation/ribbon flash. Η απομάκρυνση του υλικού που προκαλείται από το συγκεκριμένο φαινόμενο επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Στην παρακάτω φωτογραφία η ταχύτητα προώθησης είναι μικρότερη από αυτήν των υπόλοιπων δοκιμίων όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι 1000 rpm. Επιπρόσθετα φαίνεται η ατέλεια “Keyhole” η οποία οφείλεται στην έξοδο του πείρου εργαλείου συγκόλλησης.



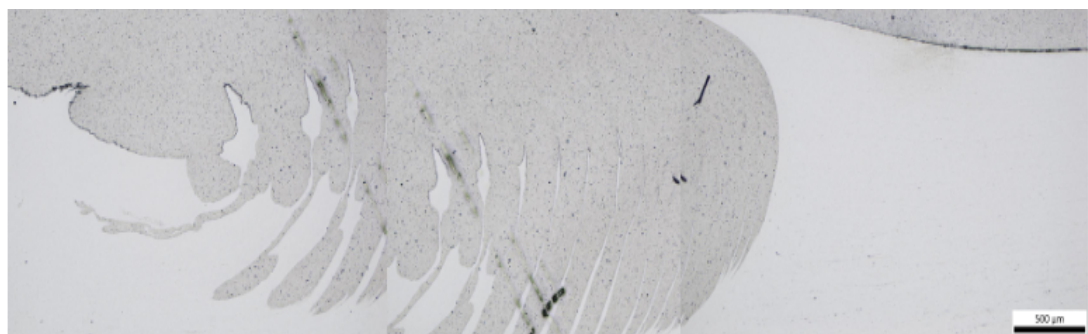
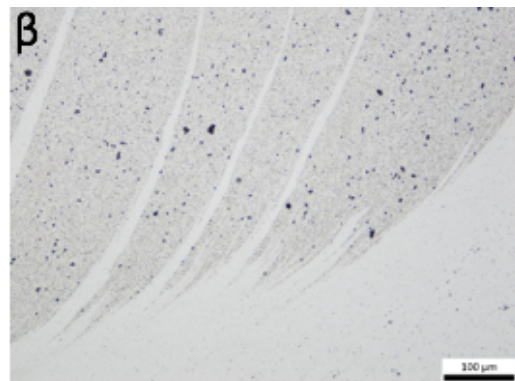
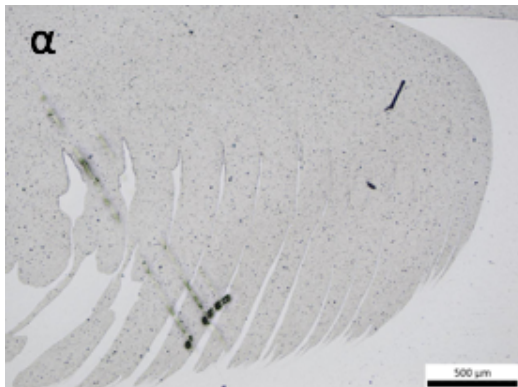
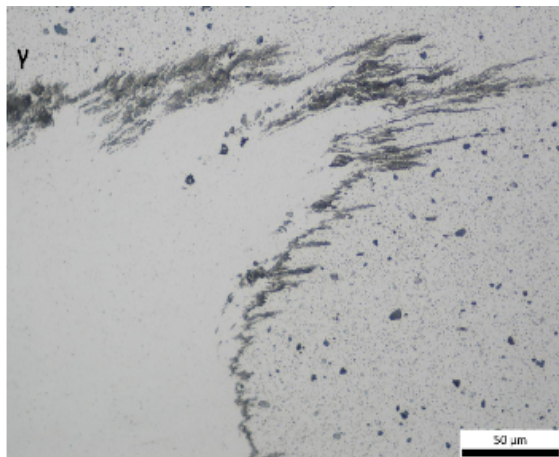
Εικόνα 61: Δοκίμιο B1 Ατέλεια τύπου "flash"

Γίνεται αντιληπτό πως η λάθος επιλογή παραμέτρων όπως η υψηλή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με χαμηλή ταχύτητα προώθησης οδηγούν στην αποβολή ποσοτήτων υλικού εκατέρωθεν στο αποτύπωμα της συγκόλλησης, σχηματίζοντας

λωρίδες από γρέζι. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν την εισροή θερμότητας η οποία θα είναι μεγαλύτερη απ'όσο απαιτείται, με αποτέλεσμα το υλικό να πλαστικοποιείται σε μεγάλο βαθμό και να αποβάλλεται από την ζώνη συγκόλλησης.

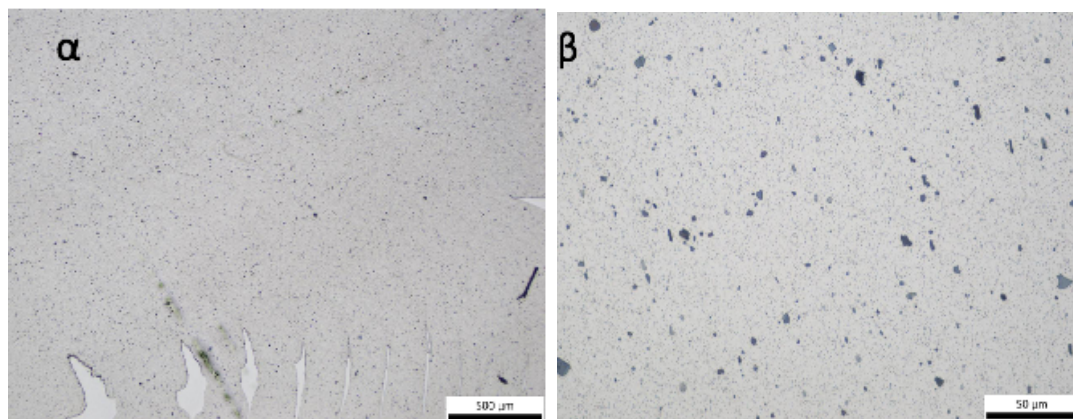
### 3.2 Αποτελέσματα Οπτικού Μικροσκοπίου

Δοκίμιο A1



Εικόνα 62 Πυρήνας Ζώνης Συγκόλλησης δοκιμίου A2 σε μεγέθυνση x5,0 α) σε μεγέθυνση x10,0 β) σε μεγέθυνση x20,0 γ) σε μεγέθυνση x50,0

Από την εικόνα 62 παρατηρούμε ότι οι συνθήκες συγκόλλησης του δοκιμίου A1 προκάλεσαν μια σχετικά ομοιόμορφη και συνεκτική συγκόλληση στο κάτω μέρος. Εκεί αναπτύσσονται κάποιες ροϊκές γραμμές που δηλώνουν τον σχηματισμό των “onion rings”, οι οποίες παρουσιάζουν τον βαθμό ανάμειξης και ανάδευσης των δύο υλικών. Συγκεκριμένα στην 62 α) παρατηρείται ατέλεια η οποία υπονομεύει την ποιότητα της συγκόλλησης. Πιθανόν να είναι ατέλεια τύπου τούνελ. Αυτό όμως επαληθεύεται από παρατήρηση μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, Στην εικόνα 62 α) και β) παρατηρείται η δομή των “onion rings” χωρίς να φαίνεται κάποια ασυνέχεια εντός του πυρήνα συγκόλλησης. Ειδικά στην Εικόνα 62β) η δομή των “onion rings” διαθέτει συνεκτικότητα αλλά με μικρότερο πάχος. Πάλι δεξιά από τον πυρήνα συγκόλλησης οι ροϊκές γραμμές της συγκεκριμένης δομής λείπουν εξαιτίας της σχετικά υψηλής ταχύτητας συγκόλλησης. Ο συγκεκριμένος σχηματισμός δηλώνει την ανάμειξη των δύο υλικών σε μη ικανοποιητικό βαθμό σε όλο τον πυρήνα συγκόλλησης. Επομένως δεν θεωρείται ικανοποιητική συγκόλληση σε όλο το μήκος της.

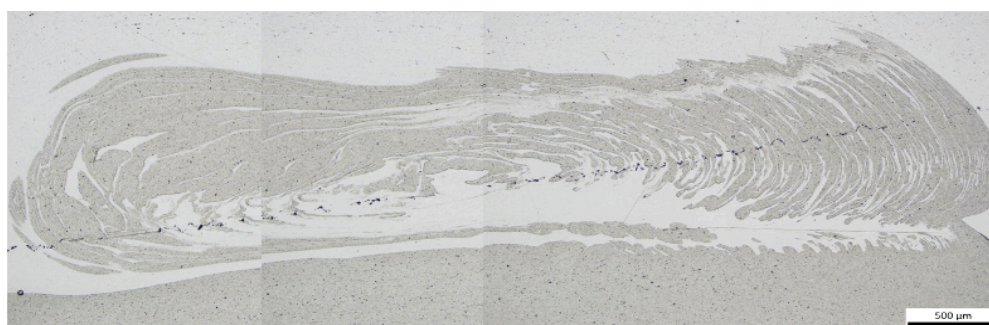


Εικόνα 63 Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη Συγκόλλησης A2 δοκιμίου α) σε μεγέθυνση x5,0 β) σε μεγέθυνση x50,0

Τα κατακρημνίσματα δεν είναι τόσο ευμεγέθη καθώς δεν ξεπερνάνε τα 10  $\mu\text{m}$  σύμφωνα με την Εικόνα 63β) και την Εικόνα 62γ). Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι ευδιάκριτα. Αυτή η κατάσταση είναι πιθανό να οφείλεται στις συνθήκες υψηλών ταχυτήτων συγκόλλησης στην προκειμένη. Στην ζώνη ανάδευσης οι κόκκοι είναι μικρότεροι από αυτούς του υλικού βάσης εξαιτίας της δυναμικής ανακρυστάλλωσης στην οποία υπόκεινται, ενώ είναι πεπλατυσμένοι εξαιτίας της παραμόρφωσης τους από το εργαλείο συγκόλλησης. Μάλιστα, για τον ίδιο λόγο είναι μικρότεροι από αυτούς της

Θερμομηχανικά και Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης. Οι κόκκοι της ζώνης ανάδευσης φαίνονται στην Εικόνα 62γ.

Δοκίμιο A2

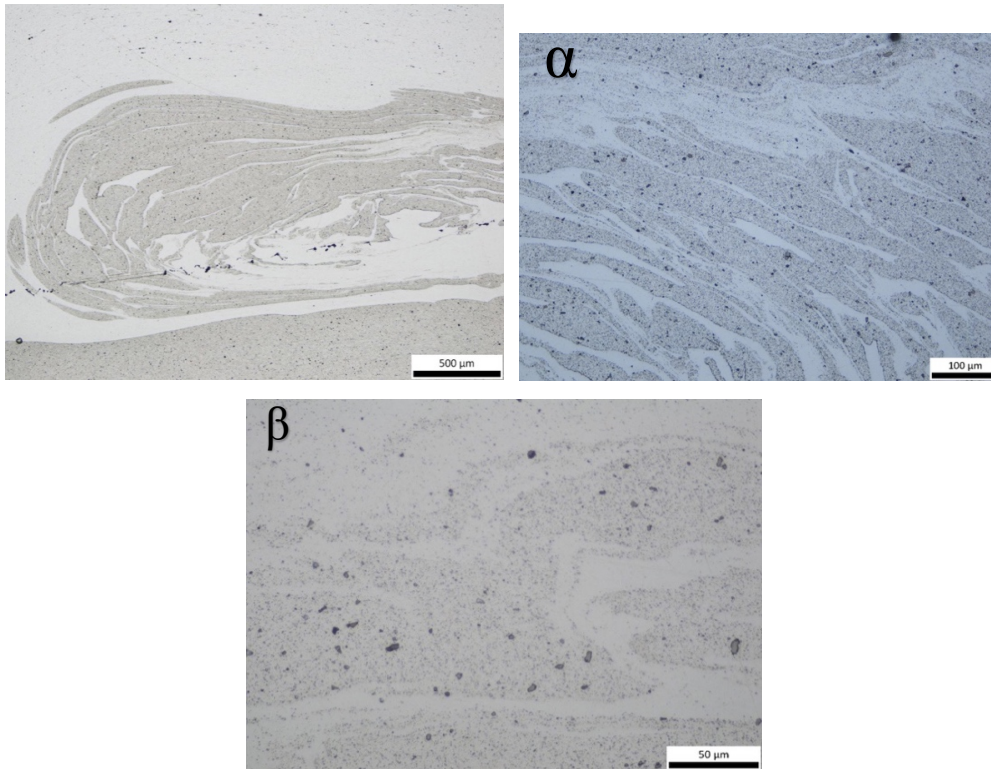


*Εικόνα 64 Πυρήνας συγκόλλησης Δοκιμίου A2 σε μεγέθυνση x5,0*

Η Εικόνα 64 αποτελεί φωτογραφία του οπτικού μικροσκοπίου του δοκιμίου A2 στην οποία παρατηρούμε την ανάπτυξη ροϊκών γραμμών των ομόκεντρων δακτυλίων στον πυρήνα συγκόλλησης. Η δακτυλιοειδής δομή “onion rings” είναι αποτέλεσμα χρήσης του εργαλείου και πείρου με σπείρωμα στην οποία αποτυπώνεται ο τρόπος ανάδευσης των δύο υλικών. Φαίνεται πιο έντονη και συνεκτική στα δεξιά του πυρήνα συγκόλλησης με μεγαλύτερη συχνότητα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 64 οι ανώτερες ροϊκές γραμμές των “onion rings” στο τμήμα της Ζώνης Ανάδευσης είναι λιγότερο συνεκτικές χωρίς μεγάλη συνοχή μεταξύ τους. Δηλαδή, παρουσιάζονται με μικρότερη συχνότητα εξαιτίας της σχετικά υψηλής ταχύτητας συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η πλήρης και ομαλή ανάμειξη των 2 υλικών σε όλη την περιοχή της ζώνης συγκόλλησης.

Πιθανότατα η σκουρόχρωμη περιοχή που εξισώνει τον πυρήνα συγκόλλησης να οφείλεται σε υπερβολική προσβολή του δοκιμίου.

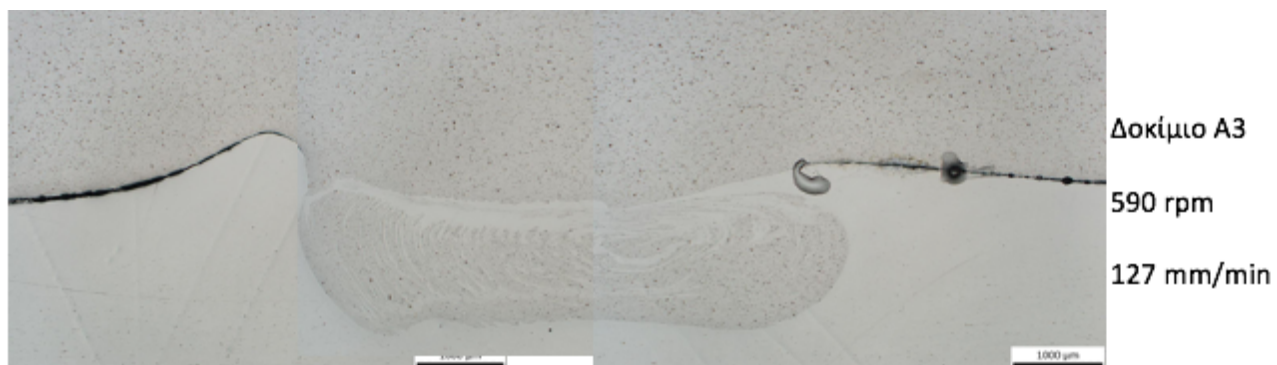




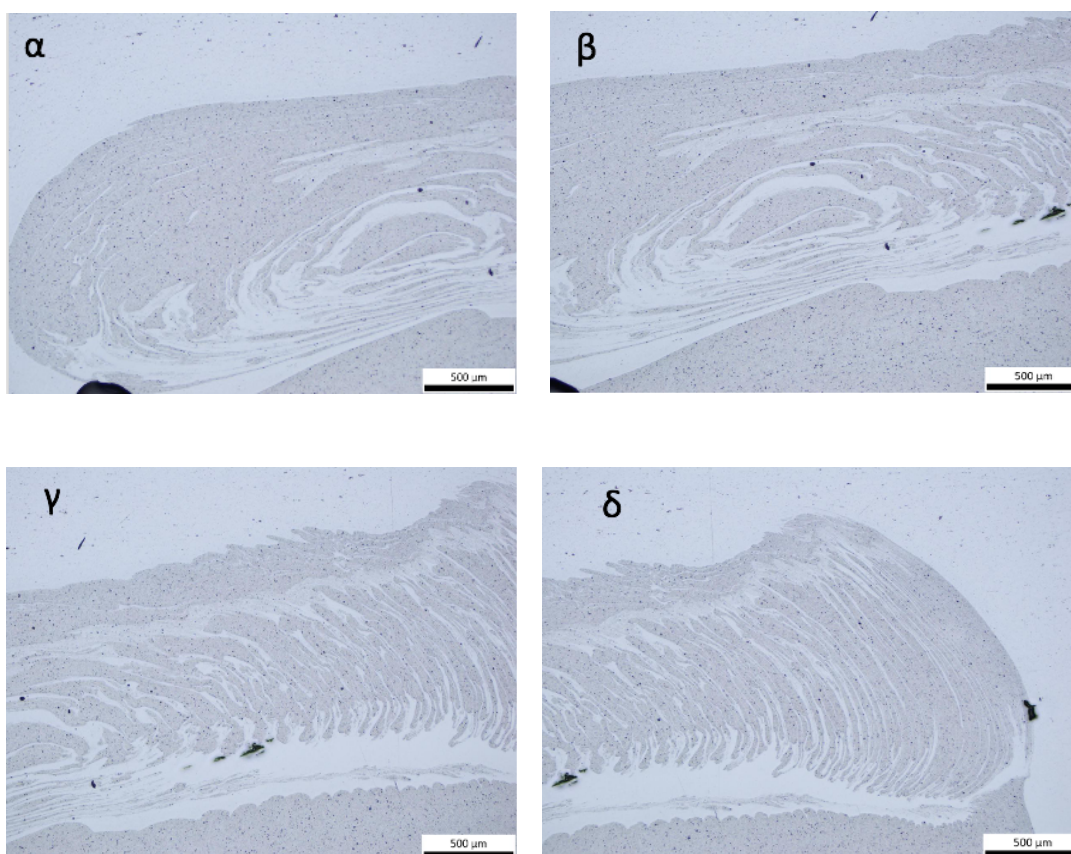
Εικόνα 65 Εικόνα Οπτικού μικροσκοπίου του πυρήνα συγκόλλησης του δοκιμίου A1 σε μεγέθυνση της εικόνας 52 α) ζώνη συγκόλλησης σε μεγέθυνση  $\times 20,0$  β)ζώνη συγκόλλησης μεγέθυνση  $\times 50,0$

Η Εικόνα 65 α,β) εστιάζει σε σημείο στον πυρήνα συγκόλλησης (όρια ZN-TMAZ) η οποία αποτυπώνει τα παραπάνω που αναφέρθηκαν, ενώ η Εικόνα 65β παρουσιάζει τα διασκορπισμένα κατακρημνίσματα της φάσης υλικού 5XXX ή 6XXX στην ζώνη συγκόλλησης. Η χημική ανάλυση μέσω της διαδικασίας του SEM μπορεί να δείξει την προέλευση της φάσης και να χαρακτηρίζει την ενδομεταλλική ένωση. Η Εικόνα 65 α αποδεικνύει μια σχετικά ικανοποιητική ανάμειξη των δύο υλικών υπό την απουσία ελαττωμάτων. Επομένως η συγκόλληση του A2 θεωρείται μια σχετικά επιτυχημένη συγκόλληση.

Δοκίμιο A3



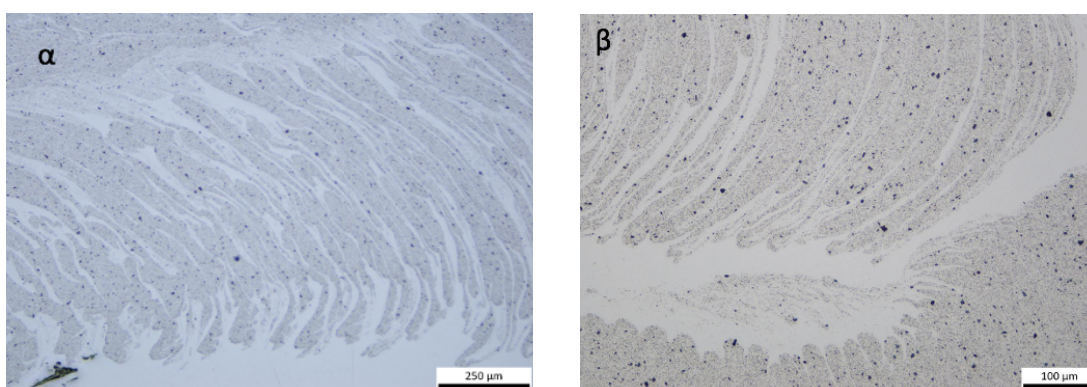
Εικόνα 66 Μικροσκοπική παρατήρηση δοκιμίου A3 σε μεγέθυνση x2,5



Εικόνα 67 Πυρήνας Συγκόλλησης δοκιμίου A3 σε μεγέθυνση x5,0

Από τις εικόνες πάνω 67 α), β), γ), δ) παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας προώθησης επηρεάζει την παροχή θερμότητας στην ζώνη συγκόλλησης, και στην

θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Όπως φαίνεται από την δομή των “onion rings” , η συγκόλληση του δοκιμίου A3 φαίνεται πιο συνεκτική σε αντίθεση με το προηγούμενο δοκίμιο. Ωστόσο η μειωμένη εισροή θερμότητα που προκαλείται από υψηλή ταχύτητας προώθησης (127mm/min) οδηγεί σε ανεπαρκή ανάδευση των δύο υλικών. Όπως φαίνεται και στην δομή των onion rings, τα δύο υλικά δεν έχουν καταφέρει να αναμειχθούν πλήρως σε όλη την ζώνη συγκόλλησης. Αυτό αναδεικνύεται και στην Εικόνα 68 β) κάτω δεξιά.



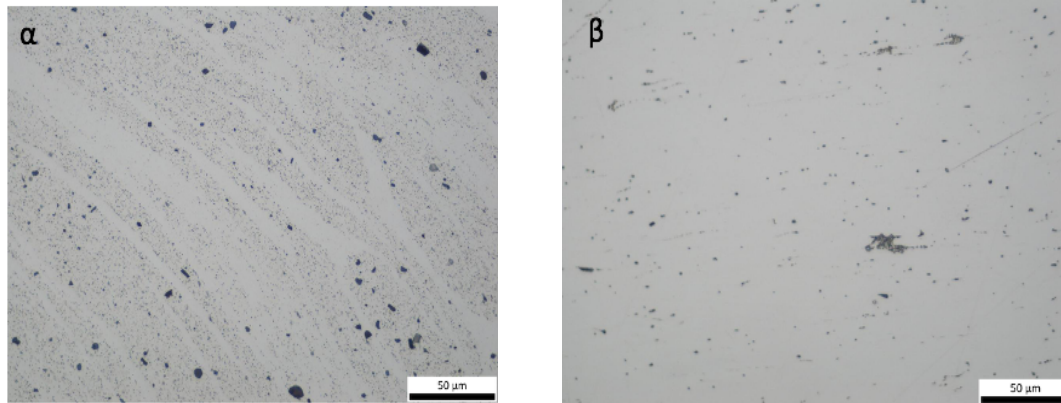
Εικόνα 68 Ζώνη συγκόλλησης α) σε μεγέθυνση  $\times 10,0$  β) σε μεγέθυνση  $\times 20,0$

Εξαιτίας της παραπάνω ανεπάρκειας, δημιουργούνται συνθήκες για εμφάνιση ασυνεχειών ή ατελειών όπως φαίνεται στην Εικόνα 68 α). Η συγκεκριμένη ατέλεια μπορεί να είναι ατέλεια τύπου τούνελ που σχετίζεται με την χαμηλή παροχή θερμότητας. Επιπλέον μπορούν να εμφανιστούν άλλες ασυνέχειες ή μικρές ρηγματώσεις στην διεπιφάνεια των δύο υλικών. Η επαλήθευση για το αν πρόκειται για ατέλεια ή για κάποιο σημείο υπερβολικής χημικής προσβολής μπορεί να γίνει μέσω SEM. Εξαιτίας των παραπάνω η συγκόλληση δεν θεωρείται επιτυχημένη.

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, παρατηρείται πιο μικρό μέγεθος κόκκων από αυτά που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο δοκίμιο A2 για παράδειγμα. Αυτό συμβαίνει διότι στην μεγαλύτερη ταχύτητα προώθησης δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ώστε να αναπτυχθούν οι κόκκοι.



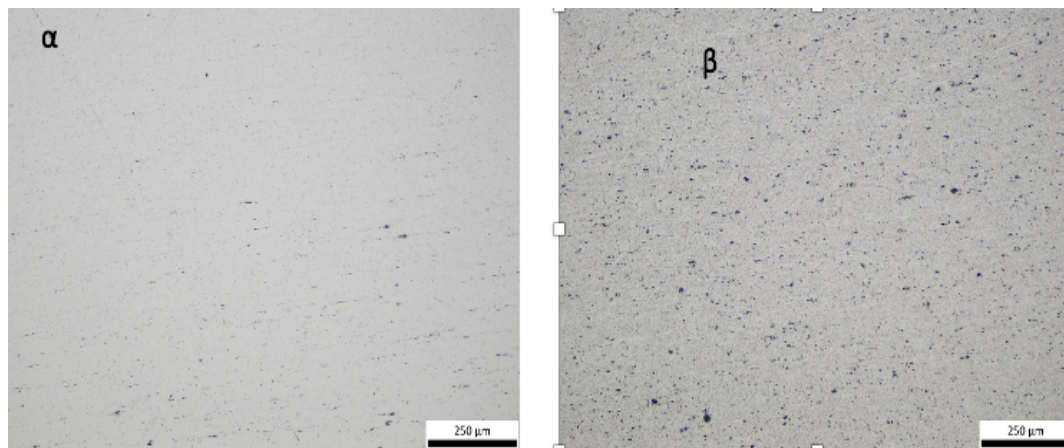
Επιπρόσθετα οι κόκκοι της 68αβ) ,69α) έχουν διαφορετική μορφολογία από αυτούς της 69 β). Ο λόγος αυτής της διαφοράς είναι το εργαλείο συγκόλλησης το οποίο επηρεάζει θερμομηχανικά την περιοχή της ζώνης συγκόλλησης.



*Εικόνα 69 σε μεγέθυνση x50,0*

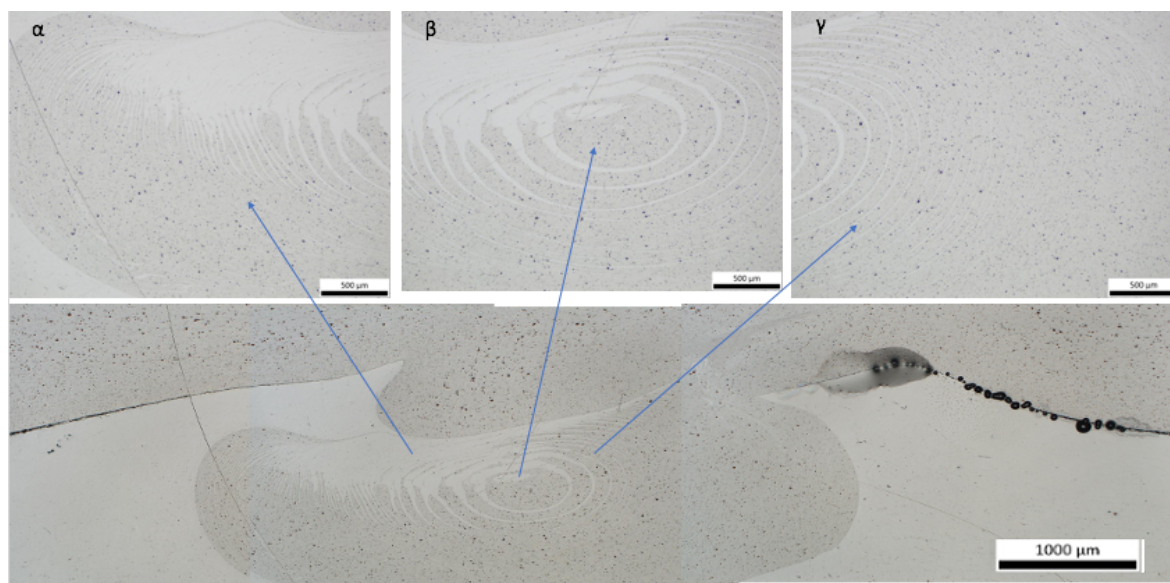
*α) Ζώνη Συγκόλλησης δοκιμίου A3 β) Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη δοκιμίου A3*

Στις Εικόνες 70α) και 70β) φαίνεται η διαφορά ανάπτυξης και μορφολογίας των κόκκων των υλικών βάσης 5083-H111 και 6082-T6 αντίστοιχα.



*Εικόνα 70 Μικροδομή μητρικού υλικού σε μεγέθυνση x10,0*

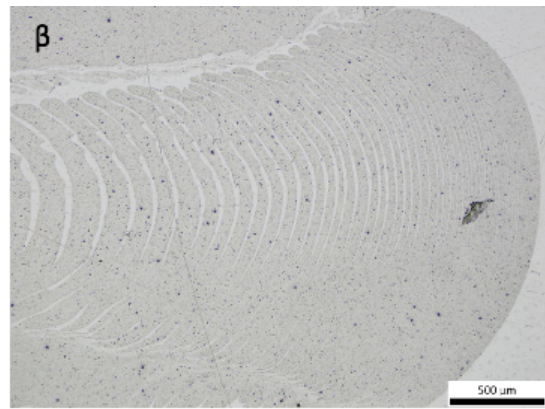
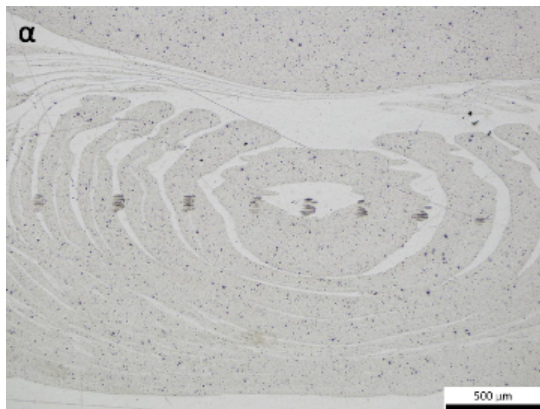
## Δοκίμιο B1



Εικόνα 71 Μικροσκοπική Παρατήρηση Ζώνη συγκόλλησης σε μεγέθυνση  $\times 2,5$  α) σε μεγέθυνση β) σε μεγέθυνση γ) σε μεγέθυνση

επίσης, στην συγκεκριμένη συγκόλληση του δοκιμίου B1 φαίνεται μια σχετικά ομοιόμορφη ανάπτυξη των “onion rings”. Στο κέντρο της συγκόλλησης (Εικόνα 71β) ο σχηματισμός των ομόκεντρων δακτυλίων είναι πιο έντονος από αυτούς της συγκόλλησης των προηγούμενων δοκιμίων. Αυτό συμβαίνει διότι τα δύο υλικά αναμειγνύονται σε συνθήκες υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας από το δοκίμιο A1. Γι’ αυτόν τον λόγο το υλικό πλαστικοποιείται και αναμειγνύεται σε καλύτερο βαθμό σε σχέση με το A1. Σε μερικά σημεία όπως αποδεικνύεται από την Εικόνα 71 α) ο σχηματισμός είναι λιγότερο συνεκτικός χωρίς την παρουσία ατελειών όμως. Επομένως θεωρείται μια σχετικά καλή συγκόλληση.

Δοκίμιο Β2





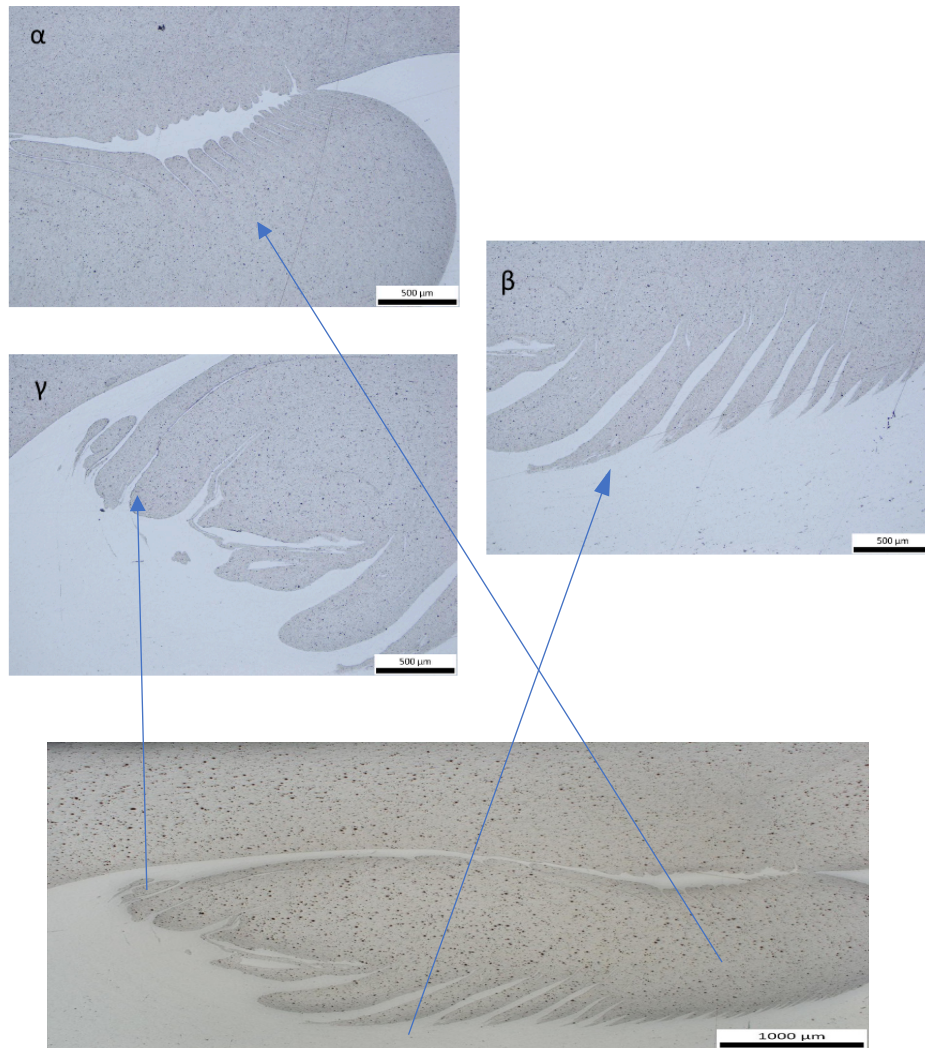
Εικόνα 72 Μικροσκοπική παρατήρηση του πυρήνα συγκόλλησης του δοκιμίου A7 σε μεγέθυνση x2,5 α) σε μεγέθυνση x5,0 γ) σε μεγέθυνση x5,0

Από τις παραπάνω εικόνες της συγκόλλησης του δοκιμίου B2 παρατηρείται γενικά παρόμοια δομή με αυτή του δοκιμίου A2. Συγκεκριμένα ο πυρήνας συγκόλλησης του B2 έχει μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση τόσο με τα δοκίμια A1,A2 όσο και με το B3. Σε σχέση με το (A2) έχει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, ενώ σχετικά με το B3 έχει χαμηλότερη ταχύτητα προώθησης. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν περισσότερη θερμότητα και προκαλείται μεγαλύτερη ομοιογένεια ανάμειξης μεταξύ των δύο υλικών. Ο μεγάλος δακτύλιος της δομής των “onion rings” στο κέντρο είναι έντονος εξαιτίας της έντονης διαταραχής που υφίσταται το υλικό υπό συνθήκες υψηλής ταχύτητας περιστροφής και προώθησης. Είναι εντονότερος από αυτόν που σχηματίζεται στο προηγούμενο δοκίμιο εξαιτίας της υψηλότερης ταχύτητας προώθησης. Με αυτές τις συνθήκες αναπτύσσεται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας στην συγκόλληση του δοκιμίου B2 σε σχέση με τα προηγούμενα με αποτέλεσμα να εκτελείται καλύτερη ανάδευση και ανάμειξη των δύο υλικών.

Παρατηρούμε την ανάπτυξη ροϊκών γραμμών των ομόκεντρων δακτυλίων στον πυρήνα συγκόλλησης. Η δακτυλιοειδής δομή “onion rings” είναι αποτέλεσμα χρήσης του εργαλείου και πείρου με σπείρωμα. Φαίνεται πιο έντονη, πιο συνεκτική και με μεγαλύτερη συχνότητα από οποιοδήποτε άλλο δοκίμιο. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η αποτελεσματική ανάδευση και ανάμειξη των δύο υλικών. Επομένως η συγκόλληση θεωρείται επιτυχημένη.

Δοκίμιο B3





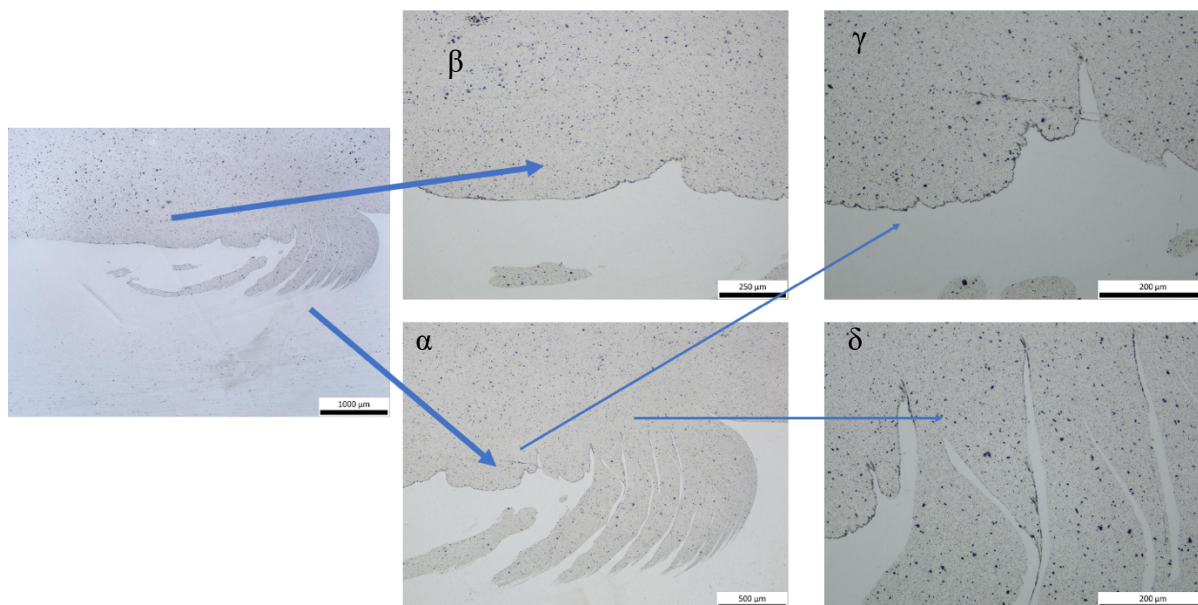
Εικόνα 73 Μικροσκοπική παρατήρηση πυρήνα συγκόλλησης σε μεγέθυνση  $\times 2,5$  α,β,γ) σε μεγέθυνση  $\times 5,0$

Συγκριτικά με την ζώνη ανάδευσης του A2 δοκιμίου, η παρούσα συγκόλληση παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στο κάτω μέρος της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται λίγο καλύτερη ομοιογένεια και ανάμειξη των δύο υλικών εξαιτίας της μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής η οποία παρέχει μεγαλύτερη εισροή θερμότητας στην ζώνη ανάδευσης.

Ωστόσο, λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας προώθησης από τα δύο προηγούμενα, τα δύο υλικά δεν προλαβαίνουν να αναμειχθούν. Συγκεκριμένα, σε σχέση με τα δοκίμια B1 και B2, στο συγκεκριμένο δοκίμιο υπάρχει μειωμένη εισροή θερμότητας που προκαλείται από υψηλή ταχύτητας προώθησης ( $127\text{mm/min}$ ) και οδηγεί σε ανεπαρκή ανάδευση των δύο υλικών. Όπως φαίνεται και στην δομή των onion rings, τα δύο υλικά δεν έχουν καταφέρει να αναμειχθούν πλήρως σε όλη την ζώνη συγκόλλησης. Στις

εικόνες 73 α) και 73γ) παρατηρείται ανώμαλη ροή του υλικού. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο όσο απομακρυνόμαστε από την ζώνη συγκόλλησης. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα προώθησης ή στην ελλειμματική επέμβαση του εργαλείου. Παρόλα αυτά η συγκόλληση του δοκιμίου B3 δεν εμφανίζει κάποια ατέλεια όπως αυτή του A3. Η υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής (με ίδια ταχύτητα προώθησης όπως αυτή της συγκόλλησης του A3) αναπτύσσει μεγαλύτερο ποσό θερμότητας εντός της συγκόλλησης για πλαστικοποίηση του υλικού και για την ομαλή ροή γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης. Επομένως πιθανόν μπορεί να θεωρηθεί σχετικά επιτυχημένη συγκόλληση.

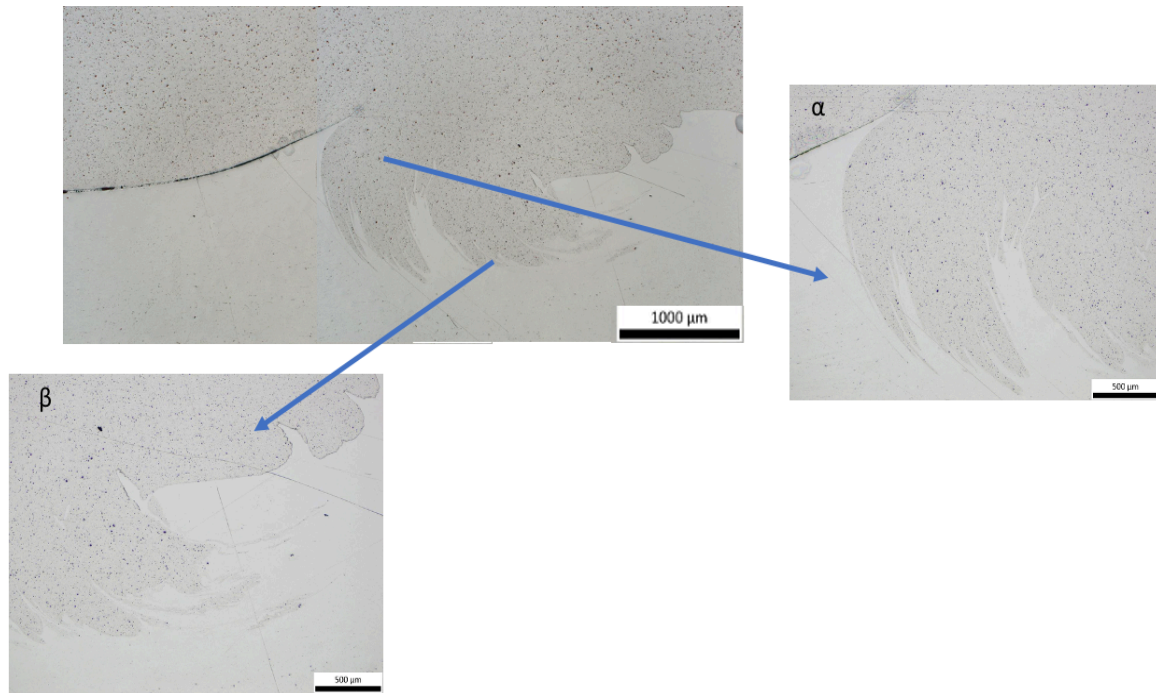
Δοκίμιο A4



Εικόνα 74 Μικροσκοπική παρατήρηση πυρήνα συγκόλλησης σε μεγέθυνση x2,5 α) σε μεγέθυνση x5,0 β) σε μεγέθυνση x10,0 γ) σε μεγέθυνση x20,0 δ) σε μεγέθυνση x20,0

Από τις εικόνες 74 παρατηρούμε ότι η συγκόλληση του δοκιμίου A4 πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες, οι οποίες οδήγησαν σε μικρό βαθμό ανάδευσης και ανάμειξης των δύο υλικών. Όπως παρατηρήσαμε στο δοκίμιο A3 και B3 η υψηλή ταχύτητα προώθησης μειώνει την εισροή θερμότητας με αποτέλεσμα την μη ικανοποιητική ανάδευση. Ο σχηματισμός των “onion rings” αποτυπώνει την ανεπαρκή ανάδευση των δύο υλικών, καθώς ο συγκεκριμένος σχηματισμός δεν είναι συνεκτικός. Επιπλέον, εκτός του μη συνεκτικού σχηματισμού, δεν εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα στην άνω περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης. Η ανεπαρκής κατακόρυφη ανάδευση των δύο υλικών δηλαδή οφείλεται στην υψηλή ταχύτητα προώθησης. Λόγω της ανεπαρκούς αναπτυσσόμενης θερμότητας, το υλικό δεν παραμορφώνεται πλαστικά, δεν αναμειγνύεται σε ικανοποιητικό βαθμό και δεν ρέει ομαλά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Συγκεκριμένα στις εικόνες 74 β), γ), δ) εμφανίζεται το φαινόμενο του Kissing Bond (KB) εξαιτίας των παραπάνω συνθηκών που σχετίζονται με την εισροή χαμηλής θερμότητας. Τα παραπάνω συντελούν στο να θεωρείται αποτυχημένη η συγκόλληση του δοκιμίου A4.

Δοκίμιο B4



*Εικόνα 75 Μικροσκοπική Παρατήρηση Πυρήνα Συγκόλλησης σε μεγέθυνση x2,5 α) σε μεγέθυνση x5,0 β) σε μεγέθυνση x5,0*

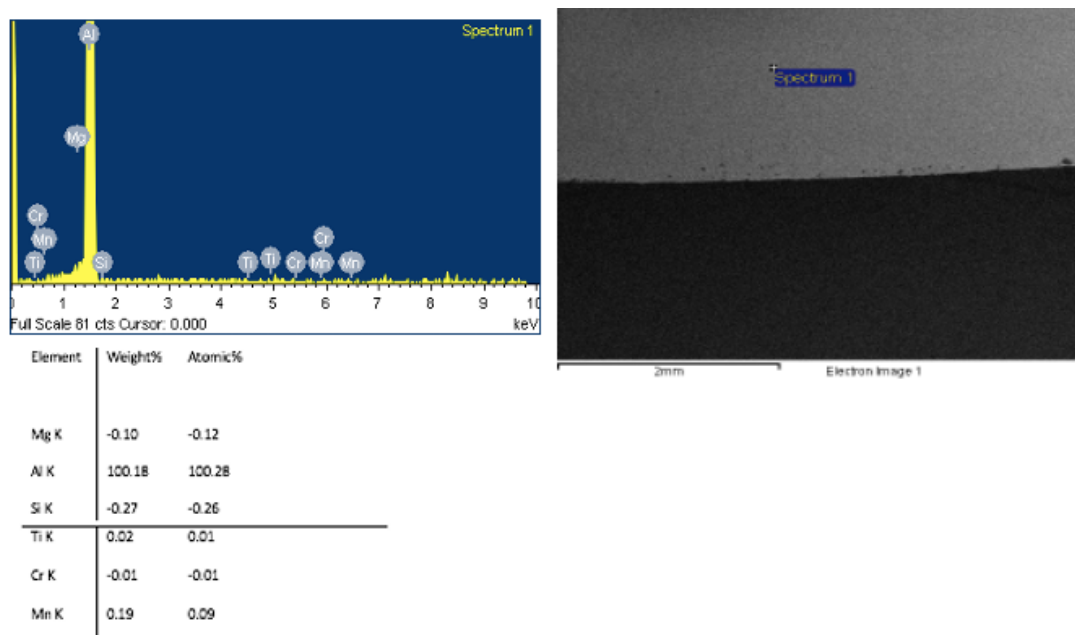
Όπως και στην συγκόλληση του δοκιμίου του A4, στην συγκόλληση του δοκιμίου B4 δεν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες ικανοποιητικής ανάδευσης όπως φαίνεται από την Εικόνα 75. Η μη ικανοποιητική ανάδευση του υλικού και ο μη συνεκτικός σχηματισμός των “onion rings” όπως φαίνεται στην Εικόνα 74 α) και β) οφείλονται στην υψηλή ταχύτητα προώθησης. Σε σύγκριση με το δοκίμιο A4, η συγκόλληση του δοκιμίου B4 είναι λίγο καλύτερη εξαιτίας της υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής. Ωστόσο όταν η εισροή θερμότητας δεν είναι τόσο μεγάλη όσο χρειάζεται, το υλικό δεν μαλακώνει και δεν πλαστικοποιείται επαρκώς, με αποτέλεσμα να επικρατεί ανεπαρκή ανάμειξη των υλικών εξαιτίας και της αύξησης της τάσης ροής (flow stress). Λόγω των παραπάνω η συγκόλληση του δοκιμίου B4 δεν θεωρείται επιτυχημένη.



### 3.3 Αποτελέσματα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM)

Για την πιο αναλυτική εξέταση της μικροδομής των συγκολλήσεων είναι σημαντική η παρατήρηση μέσω SEM. Με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης με την ανάλυση EDS μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την χημική σύσταση και φάσεων - κατακρημνισμάτων στις επιμέρους ζώνες μικροδομής μιας συγκόλλησης.

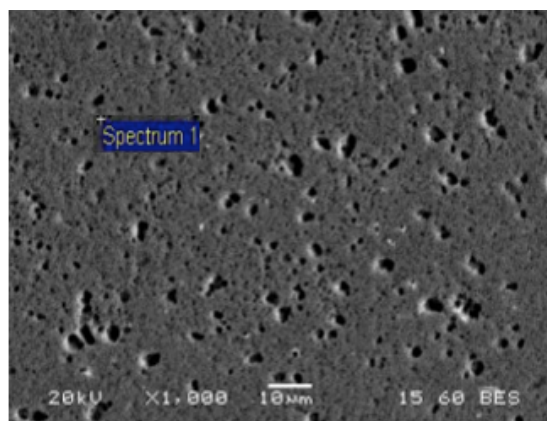
#### B2 δοκίμιο



Εικόνα 76 Μέτρηση σε κατακρημνισμα της ζώνης ανάδευσης και Χημική Ανάλυση Spectrum 1.

Η παρουσία πυριτίου υποδηλώνει την ύπαρξη κάποιας ενδομεταλλικής φάσης. Λόγω της φύσης της συγκόλλησης, τα κράματα βρίσκονται σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 450 °C. Επομένως είναι ευνοϊκές οι συνθήκες για την δημιουργία 3 φάσεων. Συγκεκριμένα α,β φάση και  $Mg_2Si$ . Τα υπόλοιπα στοιχεία αναφέρονται σε τυχόν ακαθαρσίες του υλικού τα οποία συγκεντρώνονται στις ενδομεταλλικές ενώσεις.

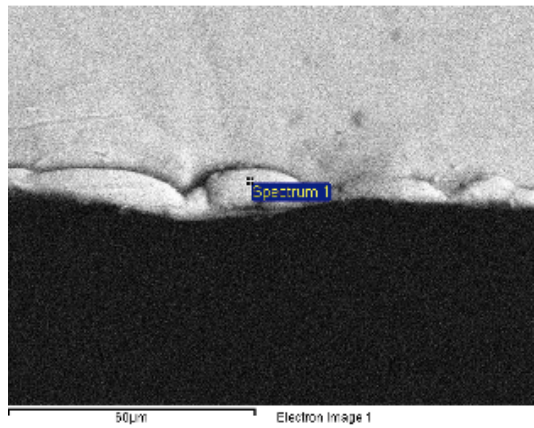
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	1.24	1.42
Al K	92.32	95.34
Mn K	2.41	1.22
Fe K	4.03	2.01
Totals	100.00	



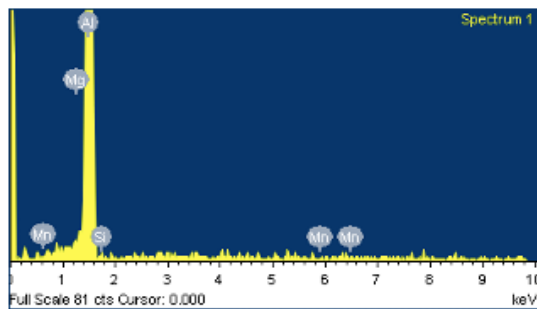
*Εικόνα 77 Μέτρηση υλικού της ζώνης ανάδευσης και Χημική Ανάλυση Κατακρημνίσματος Spectrum 1 στην Ζώνη Ανάδευσης*

Το συγκεκριμένο σημείο χημικής ανάλυσης τυχαίου κατακρημνίσματος αφορά φάση προερχόμενη από το κράμα 5083-H111 εξαιτίας της παρουσίας του μαγγανίου κυρίως που αποτελεί βασικό συστατικό της συγκεκριμένης σειράς. Η χημική ανάλυση του Spectrum1 εφαρμόζεται σε κατακρήμνισμα στην ζώνη ανάδευσης.

Η ύπαρξη του Μαγγανίου μπορεί να αναφέρεται σε ενδομεταλλικές φάσεις όπως  $Mg_2Al_3$  ή  $Mg_3Mn_2Al_{12}$ . Ο σίδηρος που περικλείεται μπορεί να είναι υπεύθυνος για την δημιουργία  $(Mn,Fe)Al_6$ . Τα ποσοστά σιδήρου μπορεί να οφείλονται σε σωματίδια φάσης  $\alpha$ -β ή  $Mg_2Si$ .



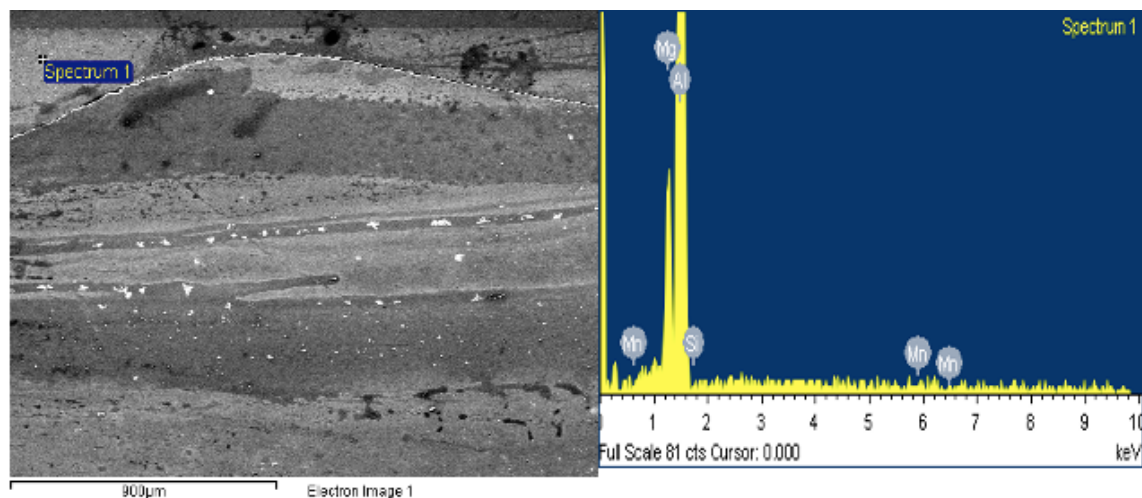
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	-0.06	-0.06
Al K	99.99	99.83
Si K	0.42	0.40
Mn K	-0.35	-0.17



*Εικόνα 78 Μέτρηση και Χημική Ανάλυση Κατακρήνιματος στην Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη*

Η παραπάνω εικόνα πιθανότατα να αφορά κατακρήνισμα εντός Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης. Όπως φαίνεται από την εικόνα έχουν σχηματισθεί ευμεγέθη λευκά σωματίδια β φάσης. Η φάση αυτή μπορεί να είναι η ενδομεταλλική ένωση  $Mg_2Si$ .

## Δοκίμιο B1



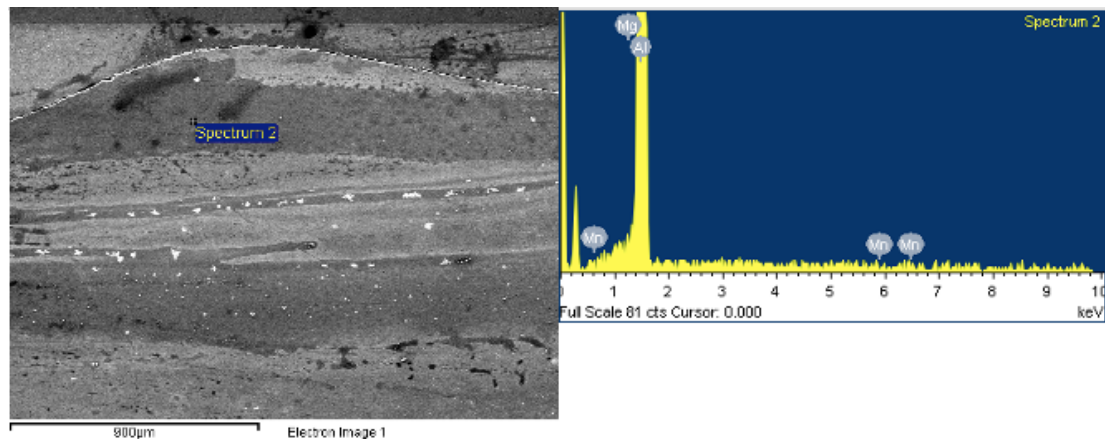
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	4.09	4.52
Al K	95.33	95.13
Si K	0.14	0.13
Mn K	0.44	0.22
Totals	100.00	

Εικόνα 79 Μέτρηση σε σημείο του μητρικού υλικού της Ζώνης Ανάδευσης και Χημική Ανάλυση Spectrum 1

Η σκούρα φάση είναι μάλλον η μητρική φάση του δοκιμίου A8. Συγκεκριμένα στην μέτρηση που διεξήχθη για το Spectrum1 παρατηρείται η ζώνη ανάδευσης ενώ είναι εμφανή τα όρια των δύο υλικών. Η χημική ανάλυση του EDS αποδεικνύει την παραπάνω περιοχή. Η χημική σύσταση του κατακρημνίσματος αποτελείται από μεγάλο ποσοστό αλουμινίου και ακολουθεί το μαγνήσιο, το μαγγάνιο και το πυρίτιο. Η ύπαρξη των τελευταίων δύο στοιχείων στην χημική σύσταση με τα συγκεκριμένα ποσοστά, απευθύνεται σε φάση που τα περικλείει και προέρχεται από το αλουμίνιο του κράματος 6082-T6.

Σύμφωνα με το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο βρισκόμαστε η συγκεκριμένη φάση μπορεί να είναι ενδομεταλλική ένωση τύπου:  $Mg_3Al_{12}$ . Ωστόσο εξαιτίας της παρουσίας πυριτίου σε συγκεκριμένες συνθήκες ( υψηλή ταχύτητα περιστροφής, χαμηλή

ταχύτητα προώθησης) με μεγαλύτερη εισροή θερμότητας είναι πιο πιθανό ο σχηματισμός ενώσεων τύπου  $Al_3Mg_2$  -β φάση και α φάσης.



*Εικόνα 80 Μέτρηση μητρικού υλικού της ζώνης ανάδευσης και Χημική Ανάλυση Spectrum 2*

Η περιοχή αναφέρεται σε περιοχή μητρικού υλικού στην ζώνη ανάδευσης, ενώ παράλληλα είναι εμφανή τα όρια των δύο υλικών. Αυτό αποδεικνύεται και από την ανάλυση του EDS. Εξαιτίας της παρουσίας Μαγγανίου η περιοχή του Spectrum2 αποτελεί μήτρα του κράματος 5083-H11.

## 4.1 Συμπεράσματα

- Σχεδόν όλες οι συγκολλήσεις (A1,A2,B1,B2,B3) θεωρούνται επιτυχημένες, αφού έχει επιτευχθεί η συνένωση των δύο υλικών έως ένα βαθμό. Κάποιες συγκολλήσεις δοκιμίων απορρίφθηκαν (A3,A4,B4), καθώς παρουσίασαν ατέλειες ή δεν επιτεύχθηκε πλήρης ανάμειξη των δύο υλικών.
- Σε όλα τα δοκίμια είναι ευδιάκριτο το αποτύπωμα του πείρου του εργαλείου που επηρεάζει την μορφολογία της συγκόλλησης. Η ζώνη ανάδευσης κάθε συγκόλλησης περιείχε τον σχηματισμό “onion rings”. Το σχήμα και η μορφολογία της δομής των “onion rings” επηρεάζονται από τις τιμές ταχύτητας συγκόλλησης και προώθησης όπως αναλύθηκε στον σχολιασμό αποτελεσμάτων του οπτικού μικροσκοπίου.
- Στα περισσότερα δοκίμια οι γραμμές του σχηματισμού των “onion rings” στο κέντρο έχουν μεγαλύτερο πάχος λόγω της επίδρασης του πείρου και της ανάμειξης του υλικών μέσω των διαταραχών.
- Τα αποτελέσματα του οπτικού μικροσκοπίου έδειξαν ότι υπάρχουν τέσσερις πιθανοί συνδυασμοί παραμέτρων με καλά αποτελέσματα συγκόλλησης μεταξύ των ανόμοιων κραμάτων AA5083-H111 και AA6082-T6. Συγκεκριμένα, οι συγκολλήσεις των δοκιμίων A1 και A2 που πραγματοποιήθηκαν με κοινή ταχύτητα περιστροφής 590 rpm και ταχύτητα προώθησης 51mm/min, 83mm/min αντίστοιχα είχαν σχετικά καλά αποτελέσματα ανάδευσης. Επίσης καλά αποτελέσματα ανέδειξαν οι συγκολλήσεις των δοκιμίων B1 και B2 όπου πραγματοποιήθηκαν με κοινή ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm και ταχύτητα προώθησης 51 και 83 mm/min αντίστοιχα.
- Οι συγκολλήσεις των δοκιμίων B1,B2 είχαν καλύτερα αποτελέσματα από αυτές των δοκιμίων A1 και A2 αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής που διέθεταν. Με τις υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής σε σταθερή ταχύτητα προώθησης αναπτύσσεται μεγαλύτερο ποσό θερμότητας.
- Οι συγκολλήσεις των δοκιμίων A4 και B4 θεωρήθηκαν αποτυχημένες. Η υψηλή ταχύτητα προώθησης 203 mm/min στην οποία πραγματοποιήθηκαν δεν δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες ανάδευσης και ανάμειξης των δύο υλικών. Γενικά, η αυξημένη ταχύτητα προώθησης δεν παρέχει μεγάλη εισροή θερμότητας

στην συγκόλληση με αποτέλεσμα το υλικό να μην πλαστικοποιείται και να μην αναμειγνύεται επαρκώς. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ανώμαλη ροή του υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης. Η μη ομαλή ροή του υλικού στις συγκεκριμένες συγκολλήσεις αποδεικνύεται από το σχηματισμό των “onion rings” που χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνεκτικότητα κι συχνότητα.

- Ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων είναι αυτός του δοκιμίου B2. Η ταχύτητα προώθησης 83mm/min με ταχύτητα συγκόλλησης 1000 rpm δημιούργησαν τις βέλτιστες συνθήκες ανάδευσης των δύο υλικών όπως φαίνεται από το οπτικό μικροσκόπιο. Συγκεκριμένα ο σχηματισμός του “onion rings” στην συγκεκριμένη συγκόλληση έχει την μεγαλύτερη συνοχή ενώ δεν υπάρχουν ατέλειες συγκόλλησης.
- Οι ταχύτητες περιστροφής 590 και 1000 rpm είναι επαρκείς για την αποτελεσματική θέρμανση και πλαστικοποίηση των δύο υλικών.
- Η συγκόλληση A4 θεωρήθηκε αποτυχημένη λόγω της ατέλειας του Kissing Bond που εμφανίστηκε στην ζώνη ανάδευσης. Το συγκεκριμένο ελάττωμα είναι σύνηθες σε συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου. Οφείλεται στην χαμηλή παραγωγή θερμότητας εξαιτίας της υψηλότερης ταχύτητας προώθησης.
- Στο δοκίμιο A4 εξαιτίας της υψηλής θερμότητας που αναπτύσσεται αποβάλλεται υλικό εκατέρωθεν του αποτυπώματος της συγκόλλησης (flash formation).
- Τα αποτελέσματα του μικροσκοπίου έδειξαν την εμφάνιση συγκεκριμένων ενδομεταλλικών φάσεων εξαιτίας του θερμοκρασιακού εύρους που αναπτύσσεται σε συγκόλληση τριβής με ανάδευση.
- Στον πυρήνα της συγκόλλησης παρατηρούνται ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι με μικρότερο μέγεθος από αυτών του μητρικού υλικού, εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης και θέρμανσης στην διάρκεια της συγκόλλησης.
- Επομένως η επιλογή κατάλληλου συνδυασμού παραμέτρων είναι το σημαντικότερο βήμα για την ανάπτυξη μιας ποιοτικής συγκόλλησης.

## 4.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

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

- Μελέτη συγκόλλησης των ανόμοιων κραμάτων 5083-H111 και 6082-T6 ως προς τις ιδιότητες αντοχής σε διάβρωση και σε κόπωση.
- Είναι χρήσιμο να πραγματοποιηθεί συγκόλληση των ανόμοιων κραμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως με χρήση πείρου εργαλείου συγκόλλησης με διαφορετική και πιο σύνθετη γεωμετρία από τον πείρο του εργαλείου συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική. Σκοπός αυτής την διαδικασίας είναι η αξιολόγηση και η μελέτη της επίδρασης του νέου εργαλείου στην μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης ώστε να φανεί αν ο νέος πείρος αναγκάζει το υλικό σε πιο ομαλή ροή.
- Πραγματοποίηση της συγκόλλησης σε χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής (για παράδειγμα 700 rpm) από αυτήν του πειράματος, ώστε να εξεταστεί η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης και να αποφευχθούν ελαττώματα τύπου flash formation.
- Πραγματοποίηση της συγκόλλησης σε διαφορετική γωνία κλίσης από τις 3° μοίρες με σκοπό την βελτιστοποίηση της ανάδευσης του υλικού στην ζώνη συγκόλλησης.
- Επιπλέον λόγω της χαμηλής τήξης του αλουμινίου και των κραμάτων του μπορεί να πραγματοποιηθεί μελέτη και παρατήρηση στην διάχυση θερμότητας κατά την συγκόλληση με σκοπό την βελτίωση της ανάδευσης του υλικού στην ζώνη συγκόλλησης. Η θερμοκρασία είναι μια κρίσιμη παράμετρος καθώς επηρεάζει την ανακρυστάλλωση που πραγματοποιείται στη συγκόλληση.



## 5. Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 Το χημικό στοιχείου του Αργιλίου στον Περιοδικό Πίνακα .....	4
ΕΙΚΟΝΑ 2 Σχηματική απεικόνιση εδροκέντρωμένου κυβικού πλέγματος (FCC) [23] .....	5
ΕΙΚΟΝΑ 3 Διαγράμμα ισορροπίας των φάσεων Αλουμινίου-Χαλκού [107] .....	19
ΕΙΚΟΝΑ 4 Διαγράμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου-Μαγνηίου [107] .....	20
ΕΙΚΟΝΑ 5 Διαγράμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου-Πυριτίου [107] .....	21
ΕΙΚΟΝΑ 6 Διαγράμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Αλουμινίου- Μαγνησίου [105] .....	23
ΕΙΚΟΝΑ 7 Διαγράμμα φάσεων Αλουμινίου-Μαγνησίου-Πυριτίου [107-108] .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 8 Διαγράμμα ισορροπίας διμερούς συστήματος Αλουμινίου-Ψευδαργύρου [107] .....	26
ΕΙΚΟΝΑ 9 (FUNDERBURK,1999) [4] .....	32
ΕΙΚΟΝΑ 10(CRAIG, 2001) [4] .....	32
ΕΙΚΟΝΑ 11 Διατάξεις συγκόλλησης για συγκόλληση τριβής με αναδευση. (A) SQUARE BUTT, (B) EDGE BUTT, (C) T-BUTT JOINT, (D) LAP JOINT, (E) MULTIPLE LAP JOINT, (F) T-LAP JOINT, (G) FILLET JOINT [68] .....	34
ΕΙΚΟΝΑ 12 Σχηματική απεικόνιση της συγκόλλησης με τριβή και αναδευση [11] .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 13 Πλακά υποστήριξης των πακτωμένων τεμαχίων [16] .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 14 Α) Συγκόλληση μετωπική Β) Συγκόλληση με επικάλυψη [102] .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 15 Στάδια κατά τον κύκλο της συγκόλλησης [17] .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 16 Επίδραση ταχύτητας περιστροφής και προώθησης στην παραγόμενη θερμότητα της συγκόλλησης [91] .....	42
ΕΙΚΟΝΑ 17 Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων που ασκούνται κατά της διάρκειας της συγκόλλησης τριβής με αναδευση [89] .....	44
ΕΙΚΟΝΑ 18 Δυνάμεις στον κύκλο της συγκόλλησης [54] .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 19 Βαθός εισαγωγή και κλίση εργαλείου συγκόλλησης [96] .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 20 Σχηματική απεικόνιση εργαλείου F.S.W [11] .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 21 Η επίδραση διαμέτρου του εργαλείου στην παραγόμενη θερμότητα της συγκόλλησης [91] .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 22 Η επίδραση της διαμέτρου του περιαυχενίου στην μέγιστη παραγόμενη θερμοκρασία στην διάρκεια της συγκόλλησης [97] .....	49
ΕΙΚΟΝΑ 23 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τελικής επιφάνειας του περιαυχενίου [69] .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 24 Τύποι περιαυχενίου και πειρού εργαλείου FSW [69] .....	52
ΕΙΚΟΝΑ 25 Κύρτο περιαυχενίο με κυλινδρικό πειρό και στρογγύλο ακρο [68] .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 26 Κυλινδρικός πειρός με επίπεδη ακμή [68] .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 27 Κωνικός πειρός σε κοίλο περιαυχενίο [68] .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 28 Κωνικός πειρός με σταδιακό [68] .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 29 Παραλλαγές του πειρού WHORL [68] .....	55
ΕΙΚΟΝΑ 30 Πειρός τύπου MX TRIFLUTE [68] .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 31 Διαφορετικά είδη πειρού FLARED-TRIFLUTE™ Α) Ουδέτερες σπειρώσεις Β) Αριστεροστροφές σπειρώσεις Γ) Δεξιοστροφές σπειρώσεις Δ) Σύνδυασμος των δύο προηγούμενων [69] .....	57
ΕΙΚΟΝΑ 32 Βασικός σχεδιασμός του πειρού τύπου SKEW-STIR™ [69] .....	57
ΕΙΚΟΝΑ 33 Τα κυριότερα χαρακτηριστικά είδη πειρών εργαλείου συγκόλλησης [69] .....	58
ΕΙΚΟΝΑ 34: (Α) Ροή προκαλούμενη από τον πειρό συγκόλλησης – Δημιουργία κοιλότητας (Β) Ροή προκαλούμενη από τον πειρό αποκλειστικά (Μετακίνηση σε γραμμές) Γ,Δ) Ροή προκαλούμενη από το περιαυχενίο [16] .....	61
ΕΙΚΟΝΑ 35 Α) Πολλαπλές στρώσεις μεταφοράς υλικού από τον πειρό Β) Μεγεθύνση των στρώσεων [16] .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 36 Σχηματισμός ONION RINGS [16] .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 37 Ζώνες μικροδομής συγκόλλησης κραμάτων AA6082-T6 Α) Υλικό βάσης Β) Θερμικά επηρεασμένη ζώνη Γ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη Δ) Ζώνη συγκόλλησης [95] .....	64

ΕΙΚΟΝΑ 38 ΖΩΝΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW) ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ AA6082-T6 [94] .....	65
ΕΙΚΟΝΑ 39 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ (56) .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 40 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥΝΕΛ [54] .....	74
ΕΙΚΟΝΑ 41 ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΥΠΟΥ "FLASH" ΜΑΖΙ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ [63] .....	76
ΕΙΚΟΝΑ 42 ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ KISSING BOND ΣΤΟ SEM [65] .....	77
ΕΙΚΟΝΑ 43 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΕΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ[98] ..	79
ΕΙΚΟΝΑ 44 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΕΥΗΟΛΕ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ AA2219/AA7075 [100] .....	80
ΕΙΚΟΝΑ 45 Η ΤΑΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΝΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΧΡΟΝΙΑ[103] .....	81
ΕΙΚΟΝΑ 46 ΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΟΥΝΕΛ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΜΕ FSW ΣΤΟ FORD GT[74] .....	82
ΕΙΚΟΝΑ 47 ΔΟΜΙΚΑ ΜΕΡΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ .....	83
ΕΙΚΟΝΑ 48 Α) ΤΑΧΥΠΛΑΟ DESTRIERO Β) ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΣΚΛΗΡΟΥ ΚΥΤΟΥΣ ΤΑΧΥΠΛΑΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ [44] .....	84
ΕΙΚΟΝΑ 49 ΠΛΟΙΟ SUPER LINER OGASAWARA [74] .....	84
ΕΙΚΟΝΑ 50 ΑΠΟΘΗΚΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΥΡΑΥΛΟΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΣΚΑΦΗ [44] .....	85
ΕΙΚΟΝΑ 51 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ STRINGER ΚΑΙ SPAR ΣΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΕΝΙΑ ΠΑΝΕΛ ΤΗΣ ΚΑΜΠΙΝΑΣ[74] .....	86
ΕΙΚΟΝΑ 52 [44] .....	87
ΕΙΚΟΝΑ 53 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕ FSW ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ[75] .....	88
ΕΙΚΟΝΑ 54 [76] .....	89
ΕΙΚΟΝΑ 55 ΣΕΙΡΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ( ΌΠΟΥ Τ ΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΙΚΟΣ ΠΕΙΡΟΣ ΚΑΙ Π ΓΙΑ ΠΕΝΤΑΓΩΝΙΚΟΣ ΠΕΙΡΟΣ) .....	90
ΕΙΚΟΝΑ 56 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	90
ΕΙΚΟΝΑ 57: Α) ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ - ΚΑΘΕΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΦΡΕΖΟΜΗΧΑΝΗ ΤΥΠΟΥ ‘KEARNEY TRECKER HORIZONTAL MILLING MACHINE TYPE No. 3CE’ Β) ΒΑΣΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ – ΠΑΚΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	94
ΕΙΚΟΝΑ 58: ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ..	94
ΕΙΚΟΝΑ 59: ΜΗΧΑΝΗ ΛΕΙΑΝΣΗΣ ΥΔΡΟΨΥΚΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΥΠΟΥ “STUERS, DP-U2” ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ .....	99
ΕΙΚΟΝΑ 60:Α) ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ ΣΑΡΩΣΗΣ Β) ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ SEM ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ ΤΥΠΟΥ JEOL JSM 6380LV .....	102
ΕΙΚΟΝΑ 61: ΔΟΚΙΜΙΟ B4 ΑΤΕΛΕΙΑ ΤΥΠΟΥ "FLASH" .....	103
ΕΙΚΟΝΑ 62 ΠΥΡΗΝΑΣ ΖΩΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A2 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 Α)ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x10,0 Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x20,0 Γ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x50,0 .....	104
ΕΙΚΟΝΑ 63 ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ A2 ΔΟΚΙΜΙΟΥ Α) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x50,0 .....	105
ΕΙΚΟΝΑ 64 ΠΥΡΗΝΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A2 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 .....	106
ΕΙΚΟΝΑ 65 ΕΙΚΟΝΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A1 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ 52 Α) ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x20,0 Β)ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x50,0 .....	107
ΕΙΚΟΝΑ 66 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A3 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 .....	108
ΕΙΚΟΝΑ 67 ΠΥΡΗΝΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A3 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 .....	108
ΕΙΚΟΝΑ 68 ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ Α)ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x10,0 Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x20,0 .....	109
ΕΙΚΟΝΑ 69 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x50,0 .....	110
ΕΙΚΟΝΑ 70 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΜΗΤΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x10,0 .....	110
ΕΙΚΟΝΑ 71 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 Α) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Γ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ .....	111
ΕΙΚΟΝΑ 72 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ A7 ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 Α) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 Γ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 .....	113
ΕΙΚΟΝΑ 73 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 Α,Β,Γ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 .....	114
ΕΙΚΟΝΑ 74 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 Α) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x10,0 Γ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x20,0 Δ) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x20,0 ...	116
ΕΙΚΟΝΑ 75 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x2,5 Α) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 Β) ΣΕ ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x5,0 .....	117

ΕΙΚΟΝΑ 76 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ SPECTRUM 1.	118
ΕΙΚΟΝΑ 77 ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΟΣ SPECTRUM 1 ΣΤΗΝ ΖΩΝΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ	119
ΕΙΚΟΝΑ 78 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ	120
ΕΙΚΟΝΑ 79 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΥ ΜΗΤΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ SPECTRUM 1	121
ΕΙΚΟΝΑ 80 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΗΤΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ SPECTRUM 2	122

## Βιβλιογραφία

- 1. Nilesh Kumar, Rajiv S. Mishra, Wei Yuan, Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials, 2015**
- 2. Δημήτριος Ι. Παντελής , Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων», Αθήνα: Εκδόσεις Τσιόλα 2017**
- 3. Janak Singh, Rakesh Kumar, D.G. Mahto, Friction Stir Welding: Developments and Trends ,2013**
- 4. P. Kah, A. Jibril, J. Martikainen and R. Suoranta, Process Possibility of Welding Thin Alluminium Alloys, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol7(2012), No.3, 232-42**
- 5. M. MILIČIĆ, P. GLADOVIĆ, R. BOJANIĆ, T. SAVKOVIĆ, N. STOJIĆ Friction Stir Welding (FSW) Process of Copper Alloys , ISSN 0543-5846 METABK 55(1) 107-110 (2016)**
- 6. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling, C. C. Bampton., Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. Scripta materialia 36 (1997) 1, 69-75.**
- 7. Mandeep Singh Sidhu, Sukhpal Singh Chatha Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume2, Issue12, December 2012)**

**8. Neeraj Kumar, Virender Kumar** A STUDY ON FRICTION STIR WELDING OF VARIOUS ALUMINIUM ALLOYS, International Journal of Advance research, Ideas and Innovations in Technology, ISSN:2554-132X (Volume2, Issue 5)

**9. H. R. Shercliff and P. A. Colegrove:** in 'Mathematical modelling of weld phenomena 6', (ed. H. Cerjak), The Institute of Metals, 2002, 927-974

**10. Gilbertand Elwin** Aluminium Alloy Casting: (Properties, Processes and Applications), Chapter 5 The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminium casting. ASM International, Ohio, pp. 6-9, 2004

**11. Rajiv S. Mishra Z.Y. Ma** Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78, Reports: A Review Journal 2005

**12 L. Kamble,** Understanding the Fixture Design for friction stir welding research experiments, Materials today: PROCEEDINGS, pp. 1277-1284, 2017

**13 W. M. Thomas, P. L. Threadgill, E. D. Nicholas.** Feasibility of friction stir welding steel, Science and Technology of Welding and Joining 4 (1999) 6, 365-372.

**14. H. W. Zhang, Z. Zhang, J. T. Chen,** The finite element simulation of the friction stir welding process, Materials Science and Engineering A 403 (2005), 340-348.

**15. Vikas Gupta, Vineet Kumar Goel, Rajesh Bansal,** Friction Stir Welding: A Review International Journal of Technical Research Vol.2, Issue2, 2013

**16. K. Kumar Satish V. Kailas,** The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, Materials Science and Engineering: A Volume 485, Issues 1–2, 25 June 2008, Pages 367-374

**17. R. Mishra,** Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering: R: Reports, pp. 1-78, 31 August 2005.

- 18. Vikas Gupta, Vineet Goel, Rajesh Bansal**, Identifing Parameters Affecting Friction Stir Welding Process, International Journal of Technical Research Vol.2, Issue2, 2013
- 19. G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini** (Mater. Sci. Eng. A, 419 (2006), pp. 381-388)
- 20. M Grujicic, T He1, G Arakere, H V Yalavarthy, C-F Yen, and B A. Cheeseman**, Fully coupled thermomechanical finite element analysis of material evolution during friction-stir welding of AA5083, ASM International, Materials Park, Ohio,2003, pp.203-211
- 21.Reynolds, AP**, Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. Science and technology of welding and joining, Vol. 5 (2),2000, 120 – 124
- 22.Σπύρος Α. Παπαευθυμίου**, Τεχνολογία υλικών 2017, Β' ΕΚΔΟΣΗ, Εκπαιδευτικό κείμενο για Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού
- 23. Somya Somalina Panda** Aluminum Alloys in Automotive Application, Technical report, Faculty of Mechanical Engineering, Gdansk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering , Gdansk University of Technology)
- 24.** <https://www.metalsupermarkets.com/aluminum-and-the-auto-industry/>
- 25. C.M. Nagaraj**, M.Sc. thesis, Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, 2004.
- 26. S. Chen**, Texture evolution and deformation mechanism in friction stir welding of 2219Al, Materials Science and Engineering: A, pp. 267-277, 26 August 2014
- 27. Pengfei Yu, ChuanSong, WuLeiShi** Analysis and characterization of dynamic recrystallization and grain structure evolution in friction stir welding of aluminum plates

- 28. H. R. Shercliff and P. A. Colegrove:** in 'Friction stir welding and processing', (ed. R. S. Mishra et al.), ASM International, 2007, 187-217; Materials Park, OH, [9].
- 29. P. A. Colegrove and H. R. Shercliff,** CFD modelling of friction stir welding of thick plate 7449 aluminium alloy, *Sci. Technol.*
- 30. J. Schneider, R. Beshears, A.C. Nunes Jr. Mater. Sci. Eng. A,** 435–436 (2006), pp. 297-304
- 31. Jr Davis** Alloying: Understanding the Basics Aluminium and Aluminium Alloy, p351-416
- 32. Thomas, WM. Nicholas, ED.Needham, JC; Murch, MG.Temple-Smith, P.Dawes, CJ.** Friction-stir butt welding, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991)
- 33. Moreira P. M. G. P., Santos T. Tavares S. M. O, Richter-Trummer V.** 2009. Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials and Design*, Vol. 30, pp.180–187.
- 34. Y.C. Chen, K. Nakata,** Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys -(*Materials and Design* 30 (2009) 469–474).
- 35. L. Fratini, G. Buffa, D. Palmeri, J. Hua, R. Shivpuri,** *J. Eng. Mater. Technol.* 128 (2006) 228–235.
- 36. K.N. Krishnan,** *Mater. Sci. Eng. A* 327 (2002) 246–251.
- 37. Kita-Shinagawa and Shinagawa-ku,** 2011. Arc welding of nonferrous metal, third ed. Kobe Steel Ltd, Tokyo, pp 2-31

- 38. Cary, H. and Helzer, C.** 2004. Modern Welding Technology. Prentic-Hall Inc., pp. 429-442
- 39. Greenwood, N. and Earnshaw, A.** 1984. Chemistry of the elements. Pergamon, Oxford, p.243
- 40. Δημήτρης Ι. Παντελής, Γρηγόρης Δ. Χρυσουλάκης.** Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών. Αθήνα : Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008
- 41. Mike, B. and Jim, B.** 2009. Successfully welding sheet metal with GMAW and GTAW, Miller Electric MfgCo, <http://www.millerwelds.com/resources/articles/sheet-metal-MIG-TIG-GMAW-GTAW/>, Accessed on: 26/11/2012
- 42. Praveen, P. and Yarlaga P.K.** 2005. Pulsed Arc Metal Welding (GMAW-P) for newer challenge in welding of Aluminium Alloys. In: International. Manufacturing Leader Forum “Global Competitive Manufacturing”, Australia, Section 2.1 and 3.1. pp.2,4
- 43. Pritchard, J.E. and Laub, R.** 1991. Joining aluminium for airborne electronics. Vac Aero International Inc. Hitchcock, 26/11/2012
- 44. J. Gilbert Kaufman** Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, The Materials Information Society, 2000
- 45. Kavin Kumar** ALUMINIUM ALLOY, SELECTION AND APPLICATION, The Aluminium Association, 1998,
- 46. Chaitanya Sharma, Dheerendra Kumar Dwivedi, Pradeep Kumar.** Effects of welding parameters on microstructure and mechanical properties on friction stir welded joints of AA7039 aluminium. 2012.
- 47. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H.,** Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties “, Progress in Materials Science 53 (2008) page, 980-1023



**48. Rowe C.E.D. and Thomas Wayne**, Advances in tooling materials for friction stir welding, TWI and Cedar Metals Ltd., Page 1 of 11

**49. Xunhonga Wang, Kuaishe Wang**, Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy, Materials Science and Engineering A 431 (2006) 114– 117.

**50. Grujicic M., Arakere G., Yen C.F., and Cheeseman B.A.**, Computational Investigation of Hardness Evolution During Friction-Stir Welding of AA5083 and AA2139 Aluminum Alloys, Journal of Materials Engineering and Performance Volume 20(7) October 2011— 1097-1108

**51. Sakthivel T. & Sengar G.S. & Mukhopadhyay J.**, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum, Int J Adv. Manuf Technol (2009)43:468 – 473

**52. Fratini L. & Buffa G. & Shivpuri R.**, In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints, Int J Adv. Manuf Technol (2009)43:664 – 670

**53. H.Su, C.S.Wu, A.Pittner, M.Retgmeier.**, Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding, Journal Of Manufacturing Processes. October 2013, Pages 495-500

**54. Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, Zahid A. Khan Suha K. Shihab**, Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys, Journal of Alloys and Compounds 5 November 2015, Pages 360-367

**55. T.L. Dickerson, H.R. Shercliff, H. Schmidt** Proc 4th Int Symp on Friction Stir Welding, Park City, UT, USA, TWI (2003)

- 56. Hua-Bin Chen, Keng Yan, Tao Lin, Shan-Ben Chen, Cheng-Yu Jiang, Yong Zhao** The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. 2006, Materials Science and Engineering A 433, σσ. 64-69.
- 57. R. Zettler, T. Vugrin, M. Schmucker** Effects and defects of friction stir welds D. Lohwasser, Z. Chen (Eds.), Friction Stir Welding from Basics to Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (2010), pp. 245-265
- 58. Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumur, T. Komazaki, K. Nakata** Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy Mat. Sci. Eng. A, 415 (2006)
- 59. Neetesh Soni, Sangam Chandrashekhar, A. Kumar, V.R. Chary** Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review, International Journal of Engineering and Management Research, 2007
- 60. Xiaopeng Hou, Xinqi Yang, Lei Cui, Guang Zhou** “Influence of joint geometry on defects and mechanical properties of friction stir welded AA6061-T4 T-joints”, Materials and design 53 (2014) 106-117
- 61. Yong Zhao, Lilong Zhou, Qingzhao Wang, Keng Yan, Jiasheng Zou,** “Defects and tensile properties of 6013 aluminum alloy T-joints by friction stir welding”, Materials and Design 57 (2014) 146-155
- 62. Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumara, T. Komazaki, K. Nakata,** “Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy”, Materials science and engineering A 415 (2006) 250-254
- 63. P. Podrzal, B. Jerman, D.Klobcar,** “Welding defects in friction stir welding”, Metabk 54(2) 387-389 (2015)
- 64. A.Suresh Babu, C.Devanathan,** An Overview of Friction Stir Welding, IJRMET Vol. 3, Issue 2, May - Oct 2013

- 65. H.B. Chen, K. Yan, T. Lin, S.B. Chen, C.Y. Jiang, Y. Zhao** The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds Mater. Sci. Eng. A, 433 (2006), pp. 64-69
- 66. A. Oosterkamp, L.D. Oosterkamp, A. Nordeide** ‘KB’ Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys Weld. J., 83 (8) (2004) pp225-231
- 67. Paul Kah, Richard Rajan, Jukka Martikainen and Reimo Suoranta** “Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys” International Journal of Mechanical and Materials Engineering (2015) 10:26
- 68. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney**, Friction Stir Welding and Processing, s.l. : ASM International, 2007
- 69.** Review of tools for friction stir welding and processing, **Xinjin Cao, Simon Larose, P.Wanjara**, Canadian Metallurgical Quarterly The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science Volume 51, 2012, σσ 250-261
- 70. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch,**P. Temple-Smith and C. J. Dawes: GB Patent no. 9125978?8, 1991
- 71. C. J. Dawes, P. L. Threadgill, E. J. R. Spurgin and D. G. Staines:** ‘Development of the new friction stir technique for welding aluminum phase II’, TWI member report, Cambridge, UK, 1995.
- 72. W. M. Thomas, E. D. Nicholas and S. D. Smith:** ‘Friction stir welding-tool developments’, Proc. TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions, 213; 2001, Warrendale, PA, TMS
- 73. W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris and R. de Frias:** ‘Friction stir welding – tools and developments’, Weld. World, 2002, 47, (11–12), 10–17
- 74. Daniela Lohwasser and Zhan Chen** Friction stir Welding From basics to applications, (Eds.), 2010

- 75. Vivek Patel, Wenya Li, Guoqing Wang, Feifan Wang, Achilles Vairis and Pengliang Niu** Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy Combinations: State-of-the-Art, 2019
- 76. Magalhães, V.M.; Leitão, C.; Rodrigues, D.M.** Friction stir welding industrialization and research status. *Sci. Technol. Weld. Joining* 2017, 23, 400–409.
- 77. Kasman, S. Kahraman, F. Emiralioglu, A.** A Case Study for the Welding of Dissimilar EN AW 6082 and EN AW 5083 Aluminum Alloys by Friction Stir Welding. *Metals* 2016
- 78. Beytullah Gungor, Erdinc Kaluc, Emel Taban ,Aydin Sik** ,Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys, *Materials & Design (1980-2015)* Volume 56, April 2014, Pages 84-90
- 79. Anil Kumar, H M, et al.** “Experimental Study on Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminium Alloys (5083-H111 and 6082-T6) to Investigate the Mechanical Properties.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 330, Mar. 2018, p. 012076, 10.1088/1757- 899x/330/1/012076. Accessed 10 Jan. 2020.
- 80. C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling, C. C. Bampton.** Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta materialia* 36 (1997) 1, 69-75.
- 81. K. J. Colligan.** 2010. The friction stir welding process: an overview. In D. L. and Z. Chen, ed. *Friction stir welding From basics to applications*. USA: Woodhead Publishing Limited: 15–28.
- 82. P. Cavaliere, A. Squillace, F. Panella** Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding, *J Mater Process Technol*, 200 (2008) (2008), pp. 364-372

- 83. W.S.Miller ,LZhuang,J Botemma,A.J Wittebrood, P De Smet,A Haszler A Vieregge**, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry Materials Science and Engineering: A , Volume 280, Issue1 , 15 March 2000, Pages 37-49
- 84. Miklos Tisza,Imre Czinege** Comparative Study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts,2018 International Journal of Lightweight Materials and Manufacture
- 85. Lotus Engineering** An Assessment of Mass Reduction Opportunities for 2017–2020 Model Year Vehicle Programs International Council on Clean Transportation (2010), p. 308 March 2010
- 86. Sang-Woo Song, Sang-Hoon Lee, Byung-Chul Kim, Tae-Jin Yoon<sup>2</sup>, Nam-Kyu Kim, In-Bae Kim and Chung-Yun Kang**, “Liquation Cracking of Dissimilar Aluminum Alloys during Friction Stir Welding”, Materials Transactions, Vol. 52, No. 2 (2011) pp. 254 to 257.
- 87. Rajamanickam N., Balusamy V., Madjusudhanna Reddy G., Natarajan K.** Effects of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds. 2009.
- 88. Trimble D., Monaghan J., O'Donnell.** Force generation during friction stir welding of AA2024-T3. 2012.
- 89. Abhijit Banik, Barnik Saha Roy, John Deb Barma, Subhash C. Saha.** 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-T6.2017, Journal of Manufacturing Processes, σσ. 395- 404.
- 90. M. Muthu Krishnan, J. Maniraj R. Deepak, K. Anganan.** Prediction of optimum welding parameters for FSW of aluminum alloys AA6063 and A319 using RSM and ANN. Ongole, India: Elsevier Ltd., 2016. Processing of Materials, Minerals and Energy. σσ. 716-723.

- 91. Rajneesh KUMAR, Kanwer SINGH, Sunil PANDEY** Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume22, Issue 2, 2012, pp288-298
- 92. K. Elangovan, V. Balasubramanian** Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. 2007, Materials Science and Engineering, σσ. 7-18.
- 93. H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K.Nogi** Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050 - H24 aluminium alloy2003, Science and Technology of Welding and Joining vol.6, σσ. 450-454.
- 94. Νικόλαος Μ. Δανιόλος**, «Μελέτη 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.
- 95. Livan Fratini Gianluca Buffa** CDRX modelling in friction stir welding of aluminium alloys International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issue 10, August 2005, Pages 1188-1194
- 96. Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee, Zahid Akhtar Khan.** Friction Stir Welding: Dissimilar Aluminum Alloys. s.l. : CRC Press, 2017.
- 97. M. Mehta, A.Adora, A. De, T. Debroy** Tool Geometry for Friction Stir Welding - Optimum Shoulder Diameter. 2011, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International .
- 98. A J Leonard, S A Lockyer** “Flaws in friction stir welds”, 4th international symposium on friction stir welding, Park City, Utah, USA, 2003

- 99. Takehiko Watanabe, Hirofumi Takayama, Atsushi Yanagisawa** “Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding”, *Journal of Materials Processing Technology* 178 (2006) 342–349
- 100. B. Han, Y. Huang, S. Lv, L. Wan, J. Feng, G. Fu** AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding *Mater. Des.*, 51 (2013), pp. 25-33
- 101. Omolayo M.Ikumapayi Esther T.Akinlabia** Recent Advances In Keyhole Defects Repairs Via Refilling Friction Stir Spot Welding, *Materials Today: Proceedings*, Volume 18, Part 7, 2019, Pages 2201-2208
- 102. Asif Iqbal, Noor Zaman Khan, Arshad Noor Siddiquee** Friction Stir Welding of different Joint Configurations: A review., *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, σσ. 19-24, 2015
- 103. Christian Castella**, Self hardening aluminium alloys for automotive applications, 2015
- 104. Goran Djukanovic**, Aluminium Insider, Aluminium Use in Automobiles to Increase Significantly, 2016
- 105. M. Emany, Amin Bahrami, M.I. Pech-Canul.** The effects of extra Si and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-15% Mg2Si in-situ composite. 2012.
- 106. Dhanalakshmi Palanisamy, Chandan Srivastava, Giridhar Madras, Kamario Chattopadhyay** High-temperature transformation pathways for metastable ferromagnetic binary Heusler (Al-55 at.%Mn) alloy. 2017, *J Mater Sci*, σσ. 4109-4119.
- 107.ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 4.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ- 4.1.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)** [http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a\\_aluminum\\_alloys.pdf](http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf)

**108. Ning, J. L., et al.** “Grain Refinement in as Cast Al–Mg–Mn Alloy during High Temperature Equal Channel Angular Pressing.” *Materials Science and Technology*, vol. 25, no. 7, July 2009, pp. 820–828, 10.1179/174328408x365757.