

**Α.Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

**ΓΚΙΟΖΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ**

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	5
Κατάλογος πινάκων	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
Εισαγωγή	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ	11
2.1 Το αλουμίνιο	11
2.2 Μέθοδοι παραγωγής του αλουμινίου	12
2.2 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου	15
2.2.1 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου σε περιστρεφόμενους φούρνους	15
2.2.2 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου με φούρνους ανοικτής φλόγας	16
2.3 Τα κράματα αλουμινίου	16
2.3.1 Κράματα αλουμινίου με πυρίτιο (Si).....	17
2.3.2 Κράματα αλουμινίου χαλκού (Al-Cu)	18
2.3.3 Κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο (Al-Mg)	19
2.3.4 Κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο και πυρίτιο	19
2.3.5 Κράματα αλουμινίου νικελίου	20
2.3.6 Κράματα αλουμινίου κασιτέρου.....	21
2.4 Κραμματικά στοιχεία που επηρεάζουν τη μικροδομή του αλουμινίου ...	21
2.4.1 Κράματα αλουμινίου –τιτανίου	21
2.4.2 Κράματα τιτανίου – βορίου- αλουμινίου	22
2.5 Ονομασία κραμάτων αλουμινίου	22
2.5.1 Σύστημα ονομασίας σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου	22
2.5.2 Σύστημα ονομασίας Χυτών κραμάτων αλουμινίου.	23

2.5.3 Ονομασία κραμάτων αλουμινίου με βάση τη σκληρότητα τους	24
2.5.4 Τα χαρακτηριστικά των σειρών των κραμάτων αλουμινίου	27
2.5.4.1 Σειρές κραμάτων 1xxx	27
2.5.4.2 Σειρές κραμάτων 2xxx	28
2.5.4.3 Σειρά κραμάτων 3xxx	28
2.5.4.4 Σειρά κραμάτων 4xxx	28
2.5.4.5 Σειρά κραμάτων 5xxx	29
2.5.4.6 Σειρά κραμάτων 6xxx	29
2.5.4.7 Σειρά κραμάτων 7xxx	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	31
Η ΣΥΓΚΟΛΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	31
3.1 Συγκόλληση μεταλλικού τόξου	31
3.2 Συγκόλληση με μεταλλικό τόξο αέριου (Gas metal arc welding, GMAW)	34
3.3 Συγκόλληση τόξου αέριου βολφραμίου (GTAW).....	36
3.4 Συγκόλληση τριβής ανάδευσης (FSW)	39
3.5 Συγκόλληση με δέσμη laser.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	44
4.1 Συγκόλληση με τριβή ανάδευσης (FSW) σε όμοια κράματα αλουμινίου	44
4.2 Συγκόλληση με τριβή με ανάδευση σε διαφορετικά κράματα αλουμινίου	55
4.3 Άλλες μέθοδοι συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου	67

.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	74
ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	74
5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος συγκόλλησης	74
5.3 Απλοποιημένα κόστη συγκόλλησης.....	76
5.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση για την εκτίμηση κόστους των κραμάτων αλουμινίου.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	82
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
Βιβλιογραφία	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Το διάγραμμα παραγωγής αλουμινίου (http://www.tms.org/pubs/books/4062.chapter2.pdf)	12
Σχήμα 2.2: Διαδικασία πρωτογενούς παραγωγής του αλουμινίου (Kuenen, 2009)	15
Σχήμα 3.1: Διαδικασία συγκόλλησης μεταλλικού τόξου (http://hvacrknowlagedcenter.homestead.com/Stick_Welding.pdf)	32
Σχήμα 3.2 Διαδικασία συγκόλλησης μεταλλικού τόξου με αέριο	34
Σχήμα 3.3: Τυπικά πεδία ρεύματος συγκόλλησης για τη διάμετρο καλωδίου και το ρεύμα συγκόλλησης.	36
Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας GTAW	37
Είναι πιθανόν να χρησιμοποιείται συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα για τη συγκόλληση με GTAW. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεση πολικότητα ή αντίστροφη πολικότητα (Smith, 1998).....	37
Σχήμα 3.5: Η πολικότητα στην GTAW	38
Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης τριβής (FSW).....	40
Σχήμα 4.1: Οι ιδιότητες εφελκυσμού των συνδέσμων όπως μετρήθηκαν από τους Liu et al. (2003).	46
Σχήμα 4.2: Διασταυρωμένες τομές των τυπικών συνδέσμων σε διάφορα βήματα ανάπτυξης α)0,02mm/rev, β)0,07mm/rev, γ) 0,27mm/rev (Liu et al.2003).	47
Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης τριβής σε λεπτή πλάκα. Ένα περιστρεφόμενο (R) σκληρό άκρο με διαστάσεις κατά προσέγγιση ίση με το πάχος πλάκας προωθεί σε τεμάχιο εργασίας με επιλεκτική αντίστροφη ταχύτητα (T) για να δημιουργήσει μια συγκόλληση στερεάς φάσης στην ακραία πλευρά (Liu et al. 1996).....	48
Σχήμα 4.5: Ανάπτυξη της ρωγμής κόπωσης στον αέρα (α) και σε διάλυμα 3.5% NaCl (b) για το κράμα 7050 (Pao et al. 2001).	51
Σχήμα 4.6: Μορφολογία της επιφάνειας κόπωσης της συγκόλλησης σε 3.5% διάλυμα NaCl (Pao et al. 2001).	51
Σχήμα 4.6: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής του μητρικού υλικού στο AA6082-T6 (Frettini and Buffa, 2005).	52

Σχήμα 4.7: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης αναπτυσσόμενης θερμότητας στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).	53
Σχήμα 4.8: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης θερμικής επίδρασης στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).....	54
Σχήμα 4.9: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης nugget στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).	54
Σχήμα 4.10 Διατομή συγκολλήματος από την εργασία των Cavalliere et al (2006) όπου παρατηρείται η ζώνη nugget η ζώνη TMAZ και η ζώνη του βασικού υλικού.....	57
Σχήμα 4.11: Κόκκοι του μητρικού υλικού που εμφανίζεται σε απόσταση 4mm από το κέντρο συγκόλλησης των συνδέσμων στην πλευρά του AA7075 (Cavalliere et al 2006).	58
Σχήμα 4.12: Συνδυασμός των συνδεόμενων υλικών από τους Shigematsu et al (2003).	60
Σχήμα 4.13: α) Διατομές των κραμάτων 5083 και 6061, β) διατομή ανάλογη στην κατεύθυνση συγκόλλησης γ) Διατομή παράλληλη στην κατεύθυνση συγκόλλησης (Shigematsu et al. 2003).....	61
Σχήμα 4.14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης με τριβή (Lee et al. 2003).	62
Σχήμα 4.15: Η μικροδομή των κραμάτων A356 a) και 6061 (b) (Lee et al. 2003).	63
Σχήμα 4.16: Προφίλ σκληρότητας σε μέσα πάχη μεταφοράς προς την κατεύθυνση συγκόλλησης των συγκολλημένων συνδέσμων για διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής όπου στην πλευρά ανάπτυξης σταθεροποιείται το AA2024-T3 (Khodir et al. 2007).....	66
Σχήμα 4.17: Διαστάσεις της διαμόρφωσης συγκολλήσεων (Lakshminarayanan et al., 2009).	68
Σχήμα 4.18: Προφίλ μικροσκληρότητας για τις πλευρικές συγκολλήσεις των κραμάτων 5083 και 6082. Sanchez-Amaya (2009α).....	72
Σχήμα 5.1: Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)	80
Σχήμα 5.2: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)	80

Σχήμα 5.3: Επίδραση της αξονικής φόρτισης στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)	81
--	----

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύστημα καθορισμού σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου	23
Πίνακας 2.2: Σύστημα ονομασίας χυτών κραμάτων αλουμινίου	24
Πίνακας 2.3: Ονομασία βασικών σκληρυνόμενων κραμάτων	25
Πίνακας 3.1: Απαιτούμενες διάμετροι ηλεκτροδίου και εύρος ρεύματος που χρησιμοποιείται στη συγκόλληση με τόξο Ar.	39
Πίνακας 3.2: Βασικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με τριβή	42
Πίνακας 4.1: Χημικές και μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2017-T351 (Liu et al. 2003)	45
Πίνακας 4.2 Μέγεθος εργαλείου συγκόλλησης (Liu et al. 2003).....	45
Πίνακας 4.3: Παράμετροι συγκόλλησης (Liu et al. 2003).....	45
Πίνακας 4.4: Ιδιότητες εφελκυσμού της FSW για το κράμα αλουμινίου 7050 (Pao et al. 2001)	49
Πίνακας 4.5: Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων 2024 και 7075 ως μητρικά υλικά και κατά τη συγκόλληση (Cavalliere et al. 2006).....	58
Πίνακας 4.6: Η χημική σύσταση των κραμάτων στην εργασία των Lee et al. (2003)	62
Πίνακας 4.7: Χημική σύσταση των κραμάτων Al 2024-T3 και 7075-T6 (Khodir, et al. 2007)	64
Πίνακας 4.8: Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al 2024-T3 και 7075-T6 (Khodir, et al. 2007).....	64
Πίνακας 4.9: Συνθήκες συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν από τους Khodir et al. (2007)	65
Πίνακας 4.10: Συνθήκες συγκόλλησης και διαδικασίες (Lakshminarayanan et al., 2009).	68
Πίνακας 4.11: Ιδιότητες εφελκυσμού των συγκολλημάτων (Lakshminarayanan et al., 2009)	69
Πίνακας 4.12: Χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν από τους Sanchez-Amaya (2009α).....	70
Πίνακας 4.13: Παράμετροι λειτουργίας με υψηλής ισχύος δίοδο laser (Sanchez-Amaya 2009α)	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η ύπαρξη του αλουμινίου αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Sir Humphrey Davy στις αρχές της δεκαετίας του 19^{ου} αιώνα ενώ το μέταλλο απομονώθηκε το 1825 από τον Hans Cristian Oesterd. Η εμπορική του διαθεσιμότητα αναφέρεται 40 χρόνια μετά όταν αρχίζει η εξόρυξη του από το μέταλλευμα του βοξίτη. Η μέθοδος εξόρυξης του αλουμινίου αναπτύχθηκε ταυτόχρονα στη Γαλλία και στις ΗΠΑ και αποτελεί τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Το αλουμίνιο είναι ένα δραστικό μέταλλο το οποίο δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση αλλά βρίσκεται στο φλοιό της γης με τη μορφή διαφόρων συστατικών με κύριο το βοξίτη. Η διαδικασία εξόρυξης του αποτελείται από δύο στάδια με το πρώτο να αποτελείται από το διαχωρισμό του οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) από το μέταλλευμα και το δεύτερο περιλαμβάνει την ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας μεταξύ 900 και 1000° C σε κρύολιθο (Na_3AlF_6). Η διαδικασία αυτή δίνει αλουμίνιο που αποτελείται από 5-10% ακαθαρσίες όπως πυρίτιο και σίδηρο οι οποίες απομακρύνονται από μια επιπλέον ηλεκτρολυτική διαδικασία ή με μια μέθοδο πήξης ζώνης που τελικά καταλήγουν στην παραγωγή μετάλλου μεγάλης καθαρότητας (99.99%) (Mathers, 2002).

Το τελικό καθαρό μέταλλο αλουμινίου που επιτυγχάνεται έχει μικρή σχετικά αντοχή και για αυτό έχει περιορισμένη χρήση κυρίως σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Προκειμένου να αυξηθεί η μηχανική του αντοχή το καθαρό αλουμίνιο μετασχηματίζεται σε κράματα με την προσθήκη χαλκού (Cu), μαγγανίου (Mn) μαγνήσιο (Mg) πυρίτιο (Si) και ψευδάργυρο (Zn).

Η συγκόλληση αποτελεί τη διαδικασία σύνδεσης δύο σωμάτων και μπορεί να γίνει με σύζευξη των επιφανειών τους η οποία επιτυγχάνεται λιώνοντας τις δύο επιφάνειες (συγκόλληση διάχυσης) ή ενώνοντας τα δύο κομμάτια υπό συνθήκες πίεσης και θερμότητας (συγκόλληση στερεάς φάσης)

δημιουργώντας έναν μεταλλικό δεσμό στην επιφάνεια των συγκολλούμενων τεμαχίων.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιαστεί το αλουμίνιο και τα κράματα του ως προς τις ιδιότητες τους και τις εφαρμογές τους. Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η συγκόλληση και οι βασικές εφαρμογές της και μέθοδοι πραγματοποίησης της ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της συγκόλλησης του αλουμινίου και των κραμάτων τους όπως αυτή παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία. Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα οικονομικά στοιχεία κόστους της συγκόλλησης του αλουμινίου ενώ στο πέμπτο θα συνοψιστούν τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

2.1 Το αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι το πιο άφθονο μέταλλο και το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο και καλύπτει το 8% της κατά βάρος της στερεάς επιφάνειας της γης. Το αλουμίνιο είναι πολύ δραστικό ως στοιχείο και δεν υπάρχει στη φυσική του κατάσταση ως ελεύθερο μέταλλο αλλά αντίθετα είναι σε ενώσεις με τα υπόλοιπα 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια ένωση στην οποία συναντάται το αλουμίνιο είναι ο βωξίτης ένα μίγμα ενυδατωμένο οξειδίου του αλουμινίου ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) και ενυδατωμένου οξειδίου του σιδήρου (Shakhasiri, 2008).

Στις ράβδους καθαρού αλουμινίου είναι σφικτά ομαδοποιημένα με άλλα άτομα αργιλίου μέσω μιας ελκτικής δύναμης που ονομάζεται μεταλλική συγκόλληση και χαρακτηρίζεται από μια μη προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρονίων και θετικά νουκλεόνια αλουμινίου. Η συγκεκριμένη κινητικότητα των ηλεκτρονίων είναι αυτό που δίνει στο αλουμίνιο την ηλεκτρική και θερμική του αγωγιμότητα ενώ επίσης του προσδίδει μεγάλη ευελιξία και καθιστά εφικτή την κατεργασία του με διάφορες διεργασίες όπως τη χύτευση και την εξέλαση (Aluminium association, 2011).

Συγκριτικά τα οργανικά στοιχεία άνθρακα όπως το ξύλο οι φυσικές ίνες και τα πλαστικά αποτελούνται από μεγάλες ποσότητες άνθρακα υδρογόνου και οξυγόνου και η επαναλαμβανόμενη θέρμανση τους και ψύξη και η μηχανική τους επεξεργασία καταστρέφει τους δεσμούς και τους διαμορφώνει με μεμονωμένα μόρια μεταβάλλοντας τις ιδιότητες του υλικού.

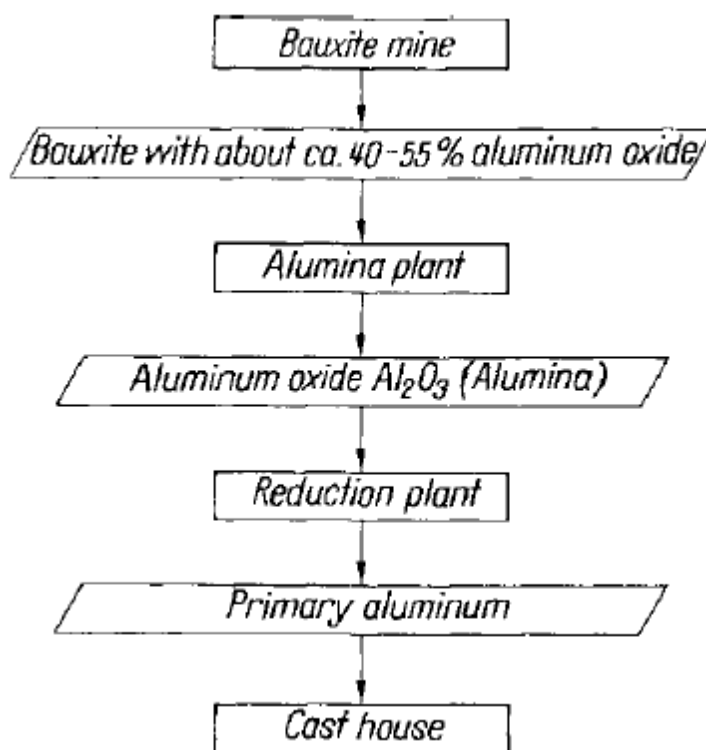
Το αλουμίνιο αποτελεί ένα υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται σε κραματωμένη μορφή. Τα κράματα του αλουμινίου προκύπτουν με την προσθήκη άλλων ατομικών στοιχείων στο καθαρό αλουμίνιο όπως το μαγνήσιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός το μαγγάνιο το πυρίτιο, ο κασσίτερος

κλπ. και η κραμάτωση οδηγεί στην ενίσχυση της μαλακότητας, της δραστικότητας και της ευκαμψίας του αλουμινίου.

Επιπλέον το αλουμίνιο θεωρείται ένα βιώσιμο υλικό αφού όταν παραχθεί μπορεί να ανακυκλωθεί χωρίς να χάνεται η ποιότητα του ενώ επιπλέον μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί στις κατασκευές και στα βιομηχανικά προϊόντα.

2.2 Μέθοδοι παραγωγής του αλουμινίου

Η εξαγωγή του αλουμινίου από τα μεταλλεύματα του και η κατεργασία του σε τελικά προϊόντα αποτελείται από μια σειρά επιτυχών λειτουργιών που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και πραγματοποιούνται σε ξεχωριστές μονάδες όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 2.1: Το διάγραμμα παραγωγής αλουμινίου (<http://www.tms.org/pubs/books/4062.chapter2.pdf>)

Το αλουμίνιο αποτελεί το 8% του φλοιού της γης και είναι το δεύτερο συστατικό του φλοιού της γης μετά το πυρίτιο (27,7%) και πριν από το σίδηρο

(5%). Το μεταλλικό όμως αλουμίνιο δεν βρίσκεται στη φύση ελεύθερο αλλά στις ενώσεις ένυδρων οξειδίων και πυριτιούχων ενώσεων. Το κύριο ορυκτό από το οποίο εξάγεται το αλουμίνιο είναι ο βωξίτης ο οποίος εντοπίζεται κυρίως στις μεσογειακές και τις τροπικές χώρες.

Ο βωξίτης αποτελεί ένα πέτρωμα που αποτελείται από δύο μορφές ένυδρου οξειδίου αλουμινίου δηλαδή από μονοϋδρίδιο του αλουμινίου $\text{AlO}(\text{OH})$ που αποτελεί τον καυστικό βωξίτη ή από το τριϋδρίδιο του αλουμινίου $\text{Al}(\text{OH})_3$ στον λατεριτικό βωξίτη. Εκτός από αυτά τα στοιχεία στον βωξίτη υπάρχει το οξείδιο του σιδήρου που συνήθως αποδίδει ένα κόκκινο-καφέ χρώμα στο πέτρωμα, όπως επίσης και πυριτικές ενώσεις και οξείδιο του πτανίου. Στην κρυσταλλική δομή του βωξίτη επίσης υπάρχει σημαντική ποσότητα νερού.

Η πρωτογενής παραγωγή του αλουμινίου ξεκινά με την παραγωγή της αλουμίνας από το βωξίτη μέσω της διεργασίας Bayer που αποτελεί μια πρότυπη διαδικασία στην οποία χρησιμοποιείται το καυστικό νάτριο για την εξαγωγή του αλουμινίου σε συνθήκες μέσης θερμοκρασίας και πίεσης σε ειδικούς χωνευτές. Η ιλύς που παράγεται από τη συγκεκριμένη διεργασία περιέχει διαλυμένο αργιλικό νάτριο και ένα μίγμα μεταλλικών οξειδίων που ονομάζεται κόκκινη λάσπη και τα οποία απομακρύνονται στους παχυντές. Το αργιλικό διάλυμα ψύχεται και εμποτίζεται με νάτριο για την κρυσταλλοποίηση της ένυδρης αλουμίνας. Οι κρύσταλλοι πλένονται και στην συνέχεια πυρώνονται σε περιστρεφόμενους κλίβανους ή ρευστοποιημένες κλίνες πριν από τη χρήση τους (Kuenen, 2009).

Το πρωτογενές αλουμίνιο μπορεί να παραχθεί από την ηλεκτρολυτική αναγωγή της αλουμίνας (Al_2O_3) που διαλύεται σε ένα τηγμένο λουτρό κυρίως φθοριούχου αλουμινίου σε θερμοκρασία 960°C . Η ηλεκτρολυτική διαδικασία πραγματοποιείται σε χαλύβδινες κυψέλες ενισχυμένες με άνθρακα. Τα ηλεκτρόδια του άνθρακα εκτείνονται σε μια κυψέλη και λειτουργούν ως άνοδοι ενώ η ενίσχυση του άνθρακα αποτελεί την κάθοδο. Στην κάθοδο παράγεται υγρό αλουμίνιο ενώ στην άνοδο αντιδρά οξυγόνο με τον άνθρακα της ανόδου και σχηματίζεται διοξείδιο του άνθρακα. Η ηλεκτρολυτική αντίδραση αναγωγής που λαμβάνει χώρα είναι:

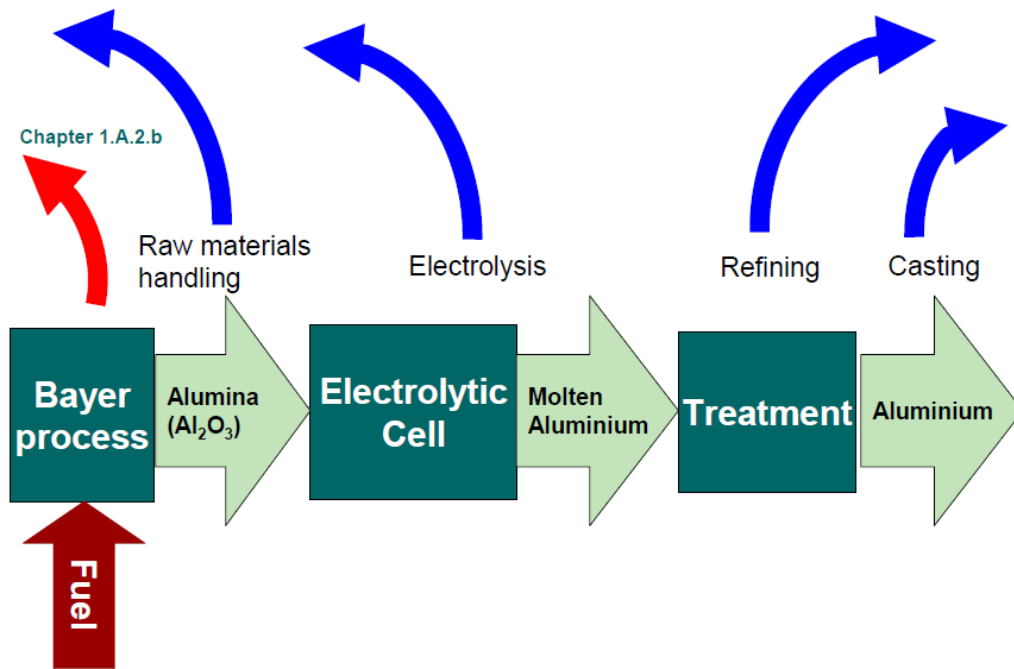


Η αλουμίνα προστίθεται στις κυψέλες έτσι ώστε στο λουτρό πήξης να υπάρχει 2-6% περιεχόμενη αλουμίνα. Στις σύγχρονες μονάδες παραγωγής αλουμινίου οι διαδικασίες παραγωγής είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενες. Τα φθοριούχα στοιχεία προστίθενται στο χαμηλότερο λουτρό πήξης καθιστώντας δυνατή τη λειτουργία των κυψέλων στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το φθοριούχο αλουμίνιο (Al_3F) επίσης προστίθεται για να ουδετεροποιήσει το οξείδιο του νατρίου που υπάρχει ως ακαθαρσία στην αλουμίνα. Το περιεχόμενο του φθοριούχου αλουμινίου στο λουτρό είναι σε περίσσεια και λειτουργεί ως κρυσταλλικό υλικό στις σύγχρονες μονάδες παραγωγής (Kuenen, 2009).

Μετά την ηλεκτρόλυση το μέταλλο καθαρίζεται έτσι ώστε να απομακρυνθούν όλες οι ακαθαρσίες όπως το νάτριο το οξείδιο του ασβεστίου σωματίδια και υδρογόνο. Το στάδιο του καθαρισμού πραγματοποιείται με την έγχυση ενός αερίου σε ένα τηγμένο μέταλλο το οποίο συνήθως είναι τοποθετημένο σε ευθύγραμμο αντιδραστήρα. Το αέριο επεξεργασίας που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις ακαθαρσίες του μετάλλου (European Commission, 2014).

Στο στάδιο του καθαρίσματος παράγονται ρινίσματα που απομακρύνονται από την επιφάνεια του μετάλλου τα οποία ανακυκλώνονται στη δευτερογενή βιομηχανία αλουμινίου.

Οι πλάκες αλουμινίου, οι ράβδοι με μορφή T και τα πρίσματα αλουμινίου που παράγονται είναι προϊόντα χύτευσης η οποία πραγματοποιείται σε υδρόψυκτες μήτρες οι οποίες είναι τοποθετημένες πάνω σε ειδικό τραπέζι συγκράτησης. Το τραπέζι χαμηλώνει καθώς σχηματίζεται η ράβδος. Άλλες μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τις μεταλλικές μήτρες, τη συνεχή χύτευση λεπτών ελασμάτων και τη συνεχή χύτευση μεταλλικών ράβδων. Και σε αυτό το στάδιο παράγονται ρινίσματα αλουμινίου τα οποία απομακρύνονται από την επιφάνεια του τηγμένου μετάλλου.



Σχήμα 2.2: Διαδικασία πρωτογενούς παραγωγής του αλουμινίου (Kuennen, 2009)

2.2 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου

2.2.1 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου σε περιστρεφόμενους φούρνους

Για τη δευτερογενή παραγωγή αλουμινίου τα υλικά που το περιέχουν όπως τα θραύσματα, τα ρινίσματα της μεταλλουργίας και η σκουριά ετοιμάζονται, χυτεύονται και καθαρίζονται. Οι μονάδες παραγωγής μπορεί να είναι μονάδες τόννευσης και ταξινόμησης για άλλες σκουριές, εγκαταστάσεις ξήρανσης και κατεργασίας τόννευσης και επικάλυψης με έλαια, λιπαντικά και παράγοντες διαχωρισμού μονάδες βαφής για παλιοσίδερα και ειδικότερα παλιοσίδερα τεμαχισμού (European Dioxin Inventory).

Για τη δευτερογενή παραγωγή του αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν φούρνοι με περιστροφικό τύμπανο ή εστία στους οποίους πραγματοποιείται η πήξη των μετάλλων που περιέχουν αλουμίνιο και των υλικών που περιέχουν αργίλιο. Τυπικές θερμοκρασίες πήξης είναι οι 700-750°C. Τυπικές θερμοκρασίες των απόβλητων αερίων είναι οι 1000° C για κανονική λειτουργία. Ο καυστήρας είναι κλειστός κατά την φόρτωση των υλικών στις

θερμοκρασίες που αναπτύσσονται ενώ η καταστροφή των αλογόνων ουσιών δεν είναι δεδομένη.

Το αλουμίνιο που τήκεται στις μονάδες παραγωγής συνήθως υφίσταται κατεργασία σε μετατροπείς για τον καθαρισμό του και την κραματοποίηση του με άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός, το μαγνήσιο το μαγγάνιο κλπ

Οι φούρνοι τήξης μπορούν να τήκουν 0,5-0,7 τόνους ανά ώρα. Στους περιστροφικούς φούρνους με τύμπανα η διαδικασία επανάτηξης διεξάγεται σε ένα στρώμα άλατος. Το μεγαλύτερο μέρος των συμπυκνωμένων συστατικών που εισάγονται στο φούρνο, συλλέγεται από το άλας με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μίγμα άλατος το οποίο μετατρέπεται σε τηγμένο άλας αλουμίνιο και καθαρό οξειδίο του αλουμινίου. Προκειμένου να διατηρηθούν τα επίπεδα του μίγματος άλατος όσο πιο μικρά γίνεται τα υλικά ανακύκλωσης επεξεργάζονται από μηχανικά μέσα έτσι ώστε να μπορούν τα επίπεδα του απαιτούμενου αλατιού να είναι το ελάχιστο.

2.2.2 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου με φούρνους ανοικτής φλόγας

Στους σύγχρονους πολυεπίπεδους φούρνους ανοικτής φλόγας χρησιμοποιούνται υλικά καθαρισμού όπως τα κράματα που τήκονται χωρίς άλας. Αυτοί οι φούρνοι προθερμαίνουν τα απόβλητα των μετάλλων μέχρι τους 400° C και στη συνέχεια τα καίνε παρουσία ατμορίων. Η χρήση των συγκεκριμένων φούρνων αποτελεί μια ιδιαίτερα οικονομική μέθοδο και είναι λιγότερο ενεργοβόρα και για αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για τα κράματα.

2.3 Τα κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο και τα κράματα του όπως ήδη αναφέρθηκε παρουσιάζουν ιδιαίτερο βιομηχανικό ενδιαφέρον εξαιτίας των μηχανικών φυσικών και πβολογικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Οι ιδιότητες τους αυτές περιλαμβάνουν την μεγάλη τους αντοχή το μεγάλο βαθμό φθοράς τους την μεγάλη τους ακαμψία την μεγάλη τους θερμική αντίσταση το συντελεστή θερμικής διαστολής τους και την ικανότητα τους απόσβεσης (Das, et al. 2008). Οι ιδιότητες αυτές οφείλονται στην προσθήκη των κραματικών υλικών στην ψυχρή και θερμική τους κατεργασία. Τα στοιχεία κραμάτωσης

επιλέγονται με βάση την επίδραση τους και την ευκολία προσαρμογής τους στο αλουμίνιο. Τα στοιχεία κραμάτωσης επίσης ταξινομούνται ως πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία, διαμορφωτές μικροδομής και ακαθαρσίες ενώ σε πολλά κράματα οι ακαθαρσίες μπορεί να είναι τα κύρια στοιχεία των κραμάτων.

Τα κύρια κραματικά στοιχεία που συναντώνται στο αλουμίνιο είναι το πυρίτιο ο χαλκός και το μαγνήσιο.

2.3.1 Κράματα αλουμινίου με πυρίτιο (Si).

Το πυρίτιο είναι το πιο σημαντικό κραματικό στοιχείο που χρησιμοποιείται κυρίως στην χύτευση του αλουμινίου (Das et al. 2008). Το πυρίτιο είναι υπεύθυνο για τη χυτευσιμότητα των υλικών, τη χαμηλή του πυκνότητα και τη μικρή διαλυτότητα του στο αλουμίνιο και κατά συνέπεια εκτιμάται ως καθαρό πυρίτιο που είναι ιδιαίτερα σκληρό και βελτιώνει την αντοχή σε φθορά των αντίστοιχων κραμάτων. Το πυρίτιο μειώνει το συντελεστή θερμικής διαστολής των κραμάτων Al-Si ενώ η μηχανική κατεργασία του αλουμινίου είναι μικρή με την προσθήκη του πυριτίου (Total material, 2016).

Ανάλογα με την επί τοις εκατό περιεκτικότητα του πυριτίου στα κράματα Al-Si αυτά διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες τα υποευθητικά (<12% κ.β Si), τα ευθητικά (12-13% κ.β Si) και τα υπερευθητικά (14-25% κ.β Si). Η μελέτη της στερεοποίησης και της μηχανικής συμπεριφοράς των κραμάτων Al-Si ως προς τις συνθήκες χύτευσης τους και το περιεχόμενο πυρίτιο (3-15%) έδειξε πως καθώς αυξάνεται το περιεχόμενο πυρίτιο αυξάνεται ο χρόνος σταθεροποίησης του κράματος ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η θερμοκρασία υγροποίησης του κράματος κατά περίπου 12% ενώ για περιεκτικότητες πυριτίου 3-8% παρατηρείται αύξηση της αντοχής του κράματος η οποία είναι γραμμική για περιεκτικότητες 8-15%. Η μεταβολή αυτή μπορεί να αποδοθεί στην αλλαγή της ευκτητικής φάσης του κράματος σε υπερευκτητική (Abdel-Jaber et al, 2010).

Επιπλέον έχει βρεθεί πως η αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτίου στα κράματα αλουμινίου αυξάνεται η επιμήκυνση τους βαθμιαία η οποία γίνεται μέγιστη για περιεκτικότητα 12% Si. Η ελάχιστη επιμήκυνση του κράματος παρατηρείται για πάχος μήτρας 10mm ενώ όταν η χρησιμοποιούμενη μήτρα

χύτευσης έχει πάχος 30mm παράγεται η μέγιστη επιμήκυνση. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ρυθμό στερεοποίησης. Έχει αναφερθεί ότι η σκληρότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του πυριτίου και καταγράφηκε η μέγιστη τιμή των 70MPa για περιεκτικότητα 12%. Πέρα από αυτήν την περιεκτικότητα η σκληρότητα μειώνεται στα 60MPa καθώς η περιεκτικότητα του Si αυξάνεται στο 15%. Αυτό επίσης σχετίζεται με τη μεταβολή της ευτηκτικής φάσης σε υπερευκτητική. Επίσης αναφέρεται πως δεν υπάρχει σαφής επίδραση του πάχους της μήτρας στην σκληρότητα και η πλήρης ευτυκτική σύσταση διαμορφώνεται πλήρως και κατανέμεται ομοιόμορφα στο κράμα (Abdel-Jaber et al, 2010).

Ο ρυθμός φθοράς και ο συντελεστής τριβής των χυτών κραμάτων Al-Si έχει αποδειχθεί πως μειώνεται το βάρος όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε πυρίτιο πάνω από 10% και στη συνέχεια αυξάνεται απότομα. Η μεγαλύτερη απώλεια βάρους παράγεται με τη χρήση μήτρας πάχους 10mm ενώ η μικρότερη με τη μήτρα των 30mm και οφείλεται στην επίδραση της ψύξης και στην παρουσία των σκληρών σωματιδίων Al_2Si .

2.3.2 Κράματα αλουμινίου χαλκού (Al-Cu)

Η προσθήκη του χαλκού στο αλουμίνιο επιδρά στην αντοχή και στη σκληρότητα των χυτοκραμάτων τόσο κατά τη θερμική κατεργασία όσο και στη μη θερμική κατεργασία στην περιβαλλοντική ατμόσφαιρα και στις μέσες θερμοκρασίες. Επίσης βελτιώνεται η μηχανική κατεργασία των κραμάτων δεδομένου ότι αυξάνεται η σκληρότητα του πλέγματος. Από την άλλη πλευρά ο χαλκός γενικά μειώνει την αντίσταση της διάβρωσης του αλουμινίου στα κράματα αυξάνει τη διάβρωσή τους (Shabestari, and Moemeni, 2004).

Η μελέτη της προσθήκης χαλκού στα κράματα Al-Si-Mg καθώς και η προσθήκη χαλκού (0.2-2.5%) στα κράματα A356 του αλουμινίου που χυτεύτηκαν σε διαφορετικές συνθήκες στερεοποίησης απέδειξε ότι η τάση αντοχής των κραμάτων αυξάνεται με τη θερμική επεξεργασία, το ρυθμό ψύξης και την περιεκτικότητα του χαλκού. Η αύξηση της αντοχής της τάσης προέρχεται από την προσθήκη του χαλκού στο διαδεντρικό χώρο. Έχει αποδειχθεί ότι οι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες εντοπίζονται με γύρω στο

1.5% χαλκό στο κράμα Al-Si-Mg στερεοποιημένο στις μήτρες γραφίτη (Shabestari et al. 2004).

2.3.3 Κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο (Al-Mg)

Το μαγνήσιο δίνει μεγαλύτερη αντοχή στο αλουμίνιο και βελτιώνει τα χαρακτηριστικά της σκληρότητας του αλουμινίου. Τα κράματα μαγνησίου αποδίδουν καλή μηχανική αντοχή και συγκολλησιμότητα ή εξαιρετικά μεγάλη αντοχή (Davis, 1999).

Το πυρίτιο συνδυάζεται με το μαγνήσιο για το σχηματισμό της σκληρής φάσης Mg_2Si . Η μελέτη της επίδρασης της προσθήκης του μαγνησίου στα σωματίδια του γραφίτη στα σύνθετα πλέγματα του αλουμινίου απέδειξε ότι το μαγνήσιο ως επιφανειακό αντιδραστήριο όταν προστεθεί στο εμπορικό αλουμίνιο εμποδίζει τα σωματίδια του γραφίτη από τη συσσωμάτωση και βελτιώνει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πλέγματος του αλουμινίου. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι το περιεχόμενο του γραφίτη αυξάνεται μαζί με την αύξηση του περιεχόμενου μαγνησίου στο κράμα. Τα σωματίδια του γραφίτη κατανέμονται ομοιόμορφα ενώ η συσσωμάτωση του μαγνησίου εμφανίζεται στα κράματα όπου η περιεκτικότητα του είναι μεγαλύτερη από 1% κ.β. Η προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας μαγνησίου μπορεί να ενισχύσει τις μηχανικές ιδιότητες των σωματιδίων του γραφίτη που υπάρχουν στο πλέγμα του κράματος όπως επίσης και την αντοχή στη διάβρωση εξαιτίας της ομοιόμορφης κατανομής των σκληρών σωματιδίων και την μείωση του συντελεστή τριβής (Zhengang.2010).

2.3.4 Κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο και πυρίτιο

Η προσθήκη του μαγνησίου και του πυριτίου στο αλουμίνιο μελετήθηκαν ως προς την επίδραση στις θερμομηχανικές ιδιότητες των συμπιεσμένων αφιλτράριστων σύνθετων SiCp/Al. Η προσθήκη του πυριτίου και του μαγνησίου στο αλουμίνιο αποδείχθηκε ότι βελτιώνουν την υγρασία του SiC στο αλουμίνιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν το πυρίτιο ήταν στο κράμα σε περιεκτικότητα στο κράμα μικρότερη από 6% κ.β ή το περιεχόμενο μαγνήσιο είναι μικρότερο από 4% τα σύνθετα υλικά δείχνουν μικρές φυσικοχημικές ιδιότητες εξαιτίας του μεγάλου πορώδους που οφείλεται στη σχετική πυκνότητα των αφιλτράριστων σύνθετων SiCp/Al που είναι πολύ

μικρή στα σύνθετα υλικά και έχει ως αποτέλεσμα την μικρή διαβρεξιμότητα του κράματος ανάμεσα στο αλουμίνιο και το πυρίτιο. Η αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτίου στο αλουμίνιο ενισχύει το μέτρο ελαστικότητας τη σταθερότητα της θερμικής διαστολής του και τη θερμική αγωγιμότητα των σύνθετων ενώ μειώνει το συντελεστή θερμικής εκτόνωσης των σύνθετων υλικών. Παρόλα αυτά αν η περιεκτικότητα του πυριτίου αυξηθεί πάνω από το 12% η θερμική αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών και η αντοχή στην κάμψη μειώνονται (Ren ,et al., 2007).

Όσον αφορά το μαγνήσιο η βέλτιστη περιεκτικότητα βρέθηκε ίση με 4-8% για την οποία τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν καλές θερμομηχανικές ιδιότητες. Παρόλα αυτά το μαγνήσιο καθώς αυξάνεται σε περιεκτικότητες πάνω από 8% το μεγαλύτερο πορώδες των σύνθετων υλικών προέρχεται από τη χαμηλότερη πίεση του μαγνησίου που οδηγεί τελικά σε χαμηλές θερμομηχανικές ιδιότητες.

2.3.5 Κράματα αλουμινίου νικελίου

Το νικέλιο θεωρείται πως επηρεάζει τη σκληρότητα των κραμάτων αλουμινίου. Έχει αποδειχθεί ότι το νικέλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της θερμής σκληρότητας στα χυτευμένα κράματα αλουμινίου- πυριτίου και κράματα σφυρηλάτησης. Τα μέγιστα πλεονεκτήματα αντιμετωπίζονται από την ανάπτυξη ενός μεγάλου όγκου και της βέλτιστης κατανομής των αλουμινιδίων νικελίου. Η προσθήκη περισσότερης ποσότητας ευτυκτικού πυριτίου δεν ενισχύει θετικά την θερμική σκληρότητα του κράματος ενώ η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας ευτηκτικού νικελίου ενισχύει σημαντικά τη θερμική σκληρότητα (Mohamed, 2013).

Οι Mendez και no Torres (2011) μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης του νικελίου στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου και απέδειξαν πως η μικροδομή των κραμάτων αλουμινίου –νικελίου παρουσιάζει μια ομογενή λεπτή κατανομή ενός διαμεταλλικού υλικού στο πλέγμα αλουμινίου το οποίο είναι το Al_3Ni . Επιπλέον η συμπύεση και οι αντιστάσεις συνοχής επίσης βελτιώνονται εξαιτίας της παρουσίας των διαμεταλλικών συστατικών.

2.3.6 Κράματα αλουμινίου κασσιτέρου

Ο κασσίτερος χρησιμοποιείται στα χυτά κράματα αλουμινίου για τη μείωση της τριβής σε εφαρμογές όπως τα ρουλεμάν και τα κουζινέτα. Τα κραματικά στοιχεία κασσιτέρου σε κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αποδώσουν μακροπρόθεσμη υγρή λίπανση στις ελαστικές επιφάνειες αν οι συγκεκριμένες εφαρμογές βρίσκονται σε λειτουργία.

2.4 Κραματικά στοιχεία που επηρεάζουν τη μικροδομή του αλουμινίου

Η προσθήκη τιτανίου, βορίου στροντίου φωσφόρου βηρυλλίου, μαγγανίου και χρωμίου έχουν ως αποτέλεσμα μεταβολές στη μικροδομή του αλουμινίου.

2.4.1 Κράματα αλουμινίου –τιτανίου

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται η επίδραση του τιτανίου (Ti) στη μικροδομή του DC-AA 3003 κράμα αλουμινίου (Jaradeh, et al. 2005). Έχει αποδειχθεί ότι μερικές ιδιότητες διάβρωσης μπορούν να επιτευχθούν με την αύξηση του τιτανίου στα κράματα αλουμινίου σε ένα επίπεδο πάνω από την κανονική πρακτική για την εκλέπτυνση των κόκκων. Παρόλα αυτά αυξάνοντας το περιεχόμενο του τιτανίου πάνω από το περιεπτηκτικό σημείο το 0.15% μπορεί να επηρεάσει τη λείανση των σωματιδίων και να προκαλέσει δυσκολία στη χύτευση του κράματος.

Επιπλέον έχει μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης Ti σε περιεκτικότητες μέχρι 4% κ.β στα ευτητικά κράματα Al-Si. Η προσθήκη του Ti στα συγκεκριμένα κράματα έχει ως αποτέλεσμα την καθίζηση του διαμεταλλικού συστατικού Al_3Ti που ευθύνεται για την αύξηση της σκληρότητας του διμεταλλικού κράματος. Ανάμεσα στα κράματα που περιέχουν τιτάνιο η αύξηση της περιεκτικότητας του τιτανίου βελτιώνει την αντίσταση τους στη φθορά ως αποτέλεσμα της αύξησης της μικροσκληρότητας του εξαιτίας της παρουσίας της φάσης του Al_3Ti . Παρόλα αυτά τα κράματα αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερους ρυθμούς φθοράς συγκριτικά με τα διμεταλλικά κράματα εξαιτίας της τάσης τους για ψαθυροποίηση και μικρορωγμές οι οποίες δημιουργούνται με την προσθήκη των σωματιδίων Al_3Ti . Η θερμική κατεργασία των κραμάτων που περιέχουν Ti στους 200° C για 6h βελτιώνει περαιτέρω την αντίσταση τους στη φθορά (Saheb et al.,2001).

2.4.2 Κράματα τιτανίου – βορίου- αλουμινίου

Το τιτάνιο και το βόριο (B) χρησιμοποιούνται για τη λείανση των κόκκων αλουμινίου. Το τιτάνιο προστίθεται στα κράματα αλουμινίου και σχηματίζει $TiAl_3$ που συνεισφέρει στο σχηματισμό πρωτογενών δενδριτών αλουμινίου. Ο εκλεπτυσμός των κόκκων είναι καλύτερος όταν χρησιμοποιούνται μαζί το τιτάνιο με το βόριο σχηματίζοντας τριμεταλλικούς καταλύτες αλουμινίου (Elsayed, et al. 2011).

2.5 Ονομασία κραμάτων αλουμινίου

Το αλουμίνιο ως υλικό θεωρείται πως μπορεί να συγκολληθεί εύκολα και μάλιστα θεωρείται ως ένας καλός αντικαταστάτης του χάλυβα για πολλές εφαρμογές. Το πλήθος των κραμάτων του αλουμινίου με τις διαφορετικές του συστάσεις οδήγησε σε μια ομαδοποίηση τους με την ανάλογη σημειολογία του η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια (alcotec.com).

Στη Βόρεια Αμερική η Aluminium Association Inc έχει την ευθύνη για την κατανομή και την καταγραφή των κραμάτων αλουμινίου. Σήμερα είναι καταγεγραμμένα πάνω από 400 σφυρήλατα είδη αλουμινίου και κράματα του και πάνω από 200 κράματα αλουμινίου με την μορφή χυτών και ράβδων (Aluminium Association, 2015, ASTM, B179). Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις συγκολλήσεις αφού βοηθούν τους μηχανικούς συγκόλλησης να σχεδιάζουν καλύτερα την διαδικασία λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία των ρωγμών.

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε διάφορες ομάδες ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υλικών που τα αποτελούν όπως επίσης και την ικανότητα τους να ανταποκρίνονται στη θερμική και μηχανική επεξεργασία των στοιχείων που προστίθενται στο αλουμίνιο. Προκειμένου να είναι εύκολα προσδιορίσιμα αυτά τα χαρακτηριστικά. Τα σφυρήλατα και χυτά κράματα αλουμινίου έχουν διαφορετικό σύστημα καθορισμού. Τα σφυρήλατα ονομάζονται με 4 αριθμούς και τα χυτά με τρία ψηφία και ένα δεκαδικό μέρος.

2.5.1 Σύστημα ονομασίας σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα σφυρήλατα κράματα αλουμινίου ονομάζονται με τέσσερα ψηφία (XXXX). Το πρώτο ψηφίο δείχνει το κύριο κραματικό στοιχείο

του αλουμινίου και συνήθως αποτελεί το ψηφίο που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη σειρά των κραμάτων π.χ. σειρά 1000, 2000 έως τη σειρά 8000.

Πίνακας 2.1: Σύστημα καθορισμού σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου

Σειρά Κράματος	Κύριο κραματικό στοιχείο
1xxx	99% αλουμίνιο
2xxx	Χαλκός
3xxx	Μαγγάνιο
4xxx	Πυρίτιο
5xxx	Μαγνήσιο
6xxx	Μαγνήσιο και πυρίτιο
7xxx	Ψευδάργυρος
8xxx	Άλλα στοιχεία

Το δεύτερο ψηφίο δεν μπορεί να είναι το μηδέν και δείχνει τη διαμόρφωση του ειδικού κράματος και τα δύο τελευταία ψηφία είναι αυθαίρετοι αριθμοί που δίνονται για να προσδιοριστεί το συγκεκριμένο κράμα στη σειρά. Για παράδειγμα στο κράμα 5183 ο αριθμός 5 δείχνει ότι είναι κράμα μαγνησίου – αλουμινίου και το 1 πως αποτελεί την πρώτη διαμόρφωση του αρχικού κράματος 5083 ενώ το 83 το τοποθετεί στην 5xxx σειρά.

Εξαιρέση από αυτόν τον τρόπο ονομασίας αποτελούν τα κράματα της 1xxx σειράς στα οποία τα δύο τελευταία ψηφία δείχνουν πόσο πάνω από το 99% είναι η περιεκτικότητα του αλουμινίου. Για παράδειγμα το κράμα 1350 υποδηλώνει ότι το ποσοστό του καθαρού αλουμινίου είναι 99.50%.

2.5.2 Σύστημα ονομασίας Χυτών κραμάτων αλουμινίου.

Τα χυτά κράματα αλουμινίου ονομάζονται με τρία ψηφία και ένα δεκαδικό δηλαδή η ονομασία τους είναι της μορφής xxx.x. Το πρώτο ψηφίο δείχνει το κύριο κραματικό στοιχείο που προστίθεται στο αλουμίνιο το δεύτερο και το τρίτο ψηφίο είναι τυχαίοι αριθμοί που τοποθετούν το κράμα στη σειρά ενώ το

δεκαδικό ψηφίο δείχνει αν το κράμα είναι χυτό (.0) ή ράβδος (.1 ή .2). Για παράδειγμα στο κράμα A356.0 το γράμμα A δείχνει πως πρόκειται για μια διαμόρφωση του 356.0, ο αριθμός 3 δείχνει ότι περιέχει πυρίτιο και χαλκό και/ή μαγνήσιο, ο αριθμός 56 το τοποθετεί στην Τρίτη σειρά και το .0 υποδηλώνει πως στην τελική του μορφή είναι χυτό και όχι ράβδος.

Πίνακας 2..2: Σύστημα ονομασίας χυτών κραμάτων αλουμινίου

Σειρά κράματος	Κύριο κραματικό στοιχείο
1xx.x	99% καθαρό αλουμίνιο
2xx.x	Χαλκός
3xx.x	Πυρίτιο και Χαλκός ή/ και Μαγνήσιο
4xx.x	Πυρίτιο
5xx.x	Μαγνήσιο
6xx.x	Αχρησιμοποίητη σειρά
7xx.x	Ψευδάργυρος
8xx.x	Κασσίτερος
9xx.x	Άλλα στοιχεία

2.5.3 Ονομασία κραμάτων αλουμινίου με βάση τη σκληρότητα τους

Λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες σειρές των κραμάτων αλουμινίου εντοπίζονται διαφορές στα χαρακτηριστικά τους και στις σχετικές εφαρμογές. Το πρώτο σημείο αναγνώρισης είναι πως ανάμεσα στις διάφορες σειρές εντοπίζονται δύο βασικές κατηγορίες κραμάτων αλουμινίου τα κράματα θερμικής επεξεργασίας και τα κράματα μη θερμικής επεξεργασίας. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική για τις διεργασίες συγκόλλησης σε αυτά τα υλικά.

Οι σειρές 1xxx, 3xxx και 5xxx των χυτών κραμάτων αλουμινίου είναι μη θερμικά επεξεργαζόμενα με μόνο επίπεδη σκληρότητα. Οι σειρές 2xxx, 6xxx και 7xxx είναι θερμικά επεξεργαζόμενα κράματα ενώ η σειρά 4xxx από θερμικά επεξεργαζόμενα και μη θερμικά επεξεργαζόμενα κράματα. Επιπλέον

οι σειρές 2xx.x, 3xx.x, 4xx.x, και η σειρά 7xx.x είναι θερμικά επεξεργαζόμενη (alcotec.com).

Τα θερμικά κατεργαζόμενα κράματα αποκτούν τις βέλτιστες μηχανικές τους ιδιότητες μέσω μιας διαδικασίας θερμικής επεξεργασίας με πιο κοινές να εφαρμόζονται τις μεθόδους θερμικής επεξεργασίας διαλύματος και τεχνητής γήρανσης. Η θερμική επεξεργασία διαλύματος είναι η διαδικασία στην οποία θερμαίνεται το κράμα σε μια μέση θερμοκρασία (περίπου 530° C) προκειμένου τα κραματικά του στοιχεία να μετατραπούν σε διάλυμα. Αυτό ακολουθείται από τη διαδικασία της βαφής συνήθως σε νερό για να παραχθεί ένα υπερκορεσμένο διάλυμα σε θερμοκρασία δωματίου. Η μέθοδος θερμικής κατεργασίας διαλύματος ακολουθείται από γήρανση δηλαδή την καθίζηση ενός μέρους των συστατικών του υπερκορεσμένου διαλύματος προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες.

Τα μη θερμικά κατεργαζόμενα κράματα αποκτούν τις βέλτιστες μηχανικές τους ιδιότητες μέσω της επίπεδης σκλήρυνσης που είναι η μέθοδος που αυξάνει την αντοχή εν ψυχρώ των κραμάτων T6, 6063-T4, 5052-H32, 5083-H112.

Πίνακας 2.3: Ονομασία βασικών σκληρυνόμενων κραμάτων

Γράμμα	Σημασία
F	Όπως διαμορφώνονται. Εφαρμόζεται στα προϊόντα της διαδικασίας σχηματισμού στα οποία δεν υπάρχει ειδικός έλεγχος σε συνθήκες θερμικής κατεργασίας ή κατεργασίας σκληρότητας.
O	Ανόπτηση- Εφαρμόζεται στα προϊόντα που θερμαίνονται για να παράγουν τις συνθήκες μικρότερης αντοχής για τη βελτίωση της ολκιμότητας και της διαστατικής σταθερότητας
H	Βαμμένο στέλεχος- Εφαρμόζεται στα προϊόντα που έχουν ενισχυθεί εν ψυχρώ. Η σκλήρυνση του στελέχους μπορεί να ακολουθείται από θερμική επεξεργασία η οποία οδηγεί σε μείωση της αντοχής. Το H ακολουθείται από δύο ή περισσότερα ψηφία.

W	Διάλυμα που έχει υποστεί θερμική επεξεργασία. Μια ασταθής διαδικασία που εφαρμόζεται μόνο στα κράματα των οποίων η γήρανση διαμορφώνεται αυθόρμητα μετά τη θερμική επεξεργασία.
T	Θερμική επεξεργασία- Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σταθερών κραμάτων εκτός από την F, O ή την H. εφαρμόζεται στα προϊόντα που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία μερικές φορές σε συνδυασμό με διεργασίες σκληρότητας. Το T ακολουθείται από ένα ή δύο ψηφία.

Επιπλέον, για τα σκληρυνόμενα κράματα υπάρχουν δύο υποκατηγορίες την H - Επίπεδη σκληρότητα και T- θερμική επεξεργασία.

Υποδιαιρέσεις της H κατηγορίας –Κατεργασία σκλήρυνσης

Το πρώτο ψηφίο μετά το H υποδηλώνει τη βασική λειτουργία

- H1-Κατεργασία σκλήρυνσης
- H2- Κατεργασία σκλήρυνσης και μερική ανόπτηση
- H3- Κατεργασία σκλήρυνσης και σταθεροποίηση
- H4- Κατεργασία σκλήρυνσης και βαφή

Το δεύτερο ψηφίο μετά το H δείχνει το βαθμό της κατεργασίας σκλήρυνσης

HX2-Το ¼ σκληρυμένο

HX4- Μισή σκληρότητα

HX6- Τα ¾ σκληρυνόμενα

HX8 – Πλήρης σκλήρυνση

HX9- Επιπλέον σκλήρυνση

Υποδιαίρεση T- Θερμική επεξεργασία

T1- φυσική γήρανση μετά από ψύξη μέσω μιας κατεργασίας μέσης θερμοκρασίας όπως η εξέλαση

T2- Εν ψυχρώ κατεργασία μετά από ψύξη από μια κατεργασία διαμόρφωσης και στη συνέχεια φυσική γήρανση

T3- Θερμική επεξεργασία διαλύματος, εν ψυχρώ κατεργασία και φυσική γήρανση

T4- Θερμική επεξεργασία διαλύματος και φυσική γήρανση

T5- τεχνική γήρανση μετά από ψύξη μέσω κατεργασίας διαμόρφωσης μέσης θερμοκρασίας

T6- Θερμική επεξεργασία διαλύματος και τεχνητή γήρανση

T7- Θερμική επεξεργασία διαλύματος και σταθεροποίηση

T8- Θερμική επεξεργασία διαλύματος εν ψυχρώ κατεργασία και τεχνητή γήρανση

T9- Θερμική επεξεργασία διαλύματος τεχνητή γήρανση και εν ψυχρώ κατεργασία

T10-Εν ψυχρώ κατεργασία μετά από ψύξη σε κατεργασίες διαμόρφωσης μέσης θερμοκρασίας και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση.

Τα επιπλέον ψηφία υποδεικνύουν ανακούφιση τάσης.

2.5.4 Τα χαρακτηριστικά των σειρών των κραμάτων αλουμινίου

2.5.4.1 Σειρές κραμάτων 1xxx

Τα κράματα της συγκεκριμένης σειράς δεν υφίστανται θερμική επεξεργασία και συνήθως αναφέρεται ως σειρά καθαρού αλουμινίου επειδή στη σύστασή τους έχουν τουλάχιστον 99% αλουμίνιο. Τα κράματα της σειράς αυτής είναι συγκολλησιμα αλλά πάρα το εύρος του σημείου τήξης τους απαιτούν περιορισμούς προκειμένου να συμμετέχουν σε διαδικασίες συγκόλλησης. Όταν τα κράματα αυτής της σειράς θεωρούνται για διαμόρφωση επιλέγονται εξαιτίας της αντοχής τους στην διάβρωση και την καλή τους ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα κράματα της πρώτης σειράς έχουν φτωχές μηχανικές ιδιότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γενικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Τα κράματα της σειράς αυτής συχνά συγκολλούνται με υλικά

γεμίσματος ή με άλλα κράματα της τέταρτης σειράς ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

2.5.4.2 Σειρές κραμάτων 2xxx

Τα κράματα αυτά περιέχουν χαλκό σε περιεκτικότητα 0,7-6,8% παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή και εξαιτίας της μεγάλης τους απόδοσης χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδυναμική και στην αεροναυτική. Παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή σε όλα τα εύρη θερμοκρασιών. Μερικά από τα κράματα αυτής της σειράς δεν μπορούν να συγκολληθούν με την μέθοδο του τόξου επειδή είναι ευπαθή προς τη θερμή διάσπαση και τη διάβρωση παρόλα αυτά κάποια από τα κράματα αυτής της σειράς μπορούν να συγκολληθούν επιτυχώς με τη σωστή διαδικασία. Συνήθως τα κράματα αυτά συγκολλούνται με άλλα της ίδιας σειράς ή με κράματα της τέταρτης σειράς που περιέχουν πυρίτιο ή πυρίτιο και χαλκό.

2.5.4.3 Σειρά κραμάτων 3xxx

Τα κράματα της τρίτης σειράς είναι μη θερμικά επεξεργασμένα και σε αυτά ανήκουν τα κράματα αλουμινίου – μαγγανίου που έχουν διαμορφώσιμη αντοχή, καλή αντίσταση στη διάβρωση καλή διαμορφωσιμότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέσες θερμοκρασίες. Τα κράματα της τρίτης σειράς μπορούν να συγκολληθούν με κράματα της 1xxx, 4xxx και 5xxx σειράς ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται.

2.5.4.4 Σειρά κραμάτων 4xxx

Τα κράματα της συγκεκριμένης σειράς είναι κράματα αλουμινίου/ πυριτίου και είναι η μόνη σειρά που περιλαμβάνει θερμικά κατεργαζόμενα και μη θερμικά κατεργαζόμενα κράματα. Το πυρίτιο όπως ήδη αναφέρθηκε όταν προστίθεται στο αλουμίνιο μειώνει το σημείο πήξης του και βελτιώνει τη ρευστότητα του κατά την πήξη. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι επιθυμητά για υλικά γεμίσματος που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση. Κατά συνέπεια τα κράματα της συγκεκριμένης σειράς χρησιμοποιούνται ως υλικά γεμίσματος. Το πυρίτιο ανεξάρτητα από το αλουμίνιο δεν μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία όμως ένα πλήθος από αυτά τα κράματα πυριτίου έχουν σχεδιαστεί για να τους

προστίθενται μαγνήσιο ή χαλκός που τα ενισχύει για να υποστούν θερμική επεξεργασία διαλύματος.

2.5.4.5 Σειρά κραμάτων 5xxx

Τα κράματα της πέμπτης σειράς είναι κράματα αλουμινίου/ μαγνησίου και έχουν την μεγαλύτερη αντοχή από τα μη θερμικά επεξεργασμένα κράματα. Επιπλέον η συγκεκριμένη σειρά κραμάτων είναι συγκολλησιμη και για αυτό χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές όπως δοχεία πίεσης γέφυρες και κτήρια. Τα κράματα μαγνησίου μπορούν να συγκολληθούν με κράματα γεμίσματος που επιλέγονται ανάλογα με το ποσοστό του μαγνησίου στο βασικό υλικό και την εφαρμογή του συγκολλημένου προϊόντος. Τα κράματα με περιεκτικότητα σε μαγνήσιο δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές σε μέσες θερμοκρασίες εξαιτίας της ευαισθησίας τους προς τη διάβρωση. Τα κράματα με περιεκτικότητα σε μαγνήσιο μικρότερη από 2,5% συγκολλούνται επιτυχώς με τα κράματα της πέμπτης και της τέταρτης σειράς.

2.5.4.6 Σειρά κραμάτων 6xxx

Τα κράματα της έκτης σειράς αποτελούνται από αλουμίνιο/ μαγνήσιο- πυρίτιο και συναντώνται συνήθως στη βιομηχανία συγκολλήσεων και συμμετέχουν σε πολλά δομικά στοιχεία. Η προσθήκη του μαγνησίου και του πυριτίου στο αλουμίνιο παράγει ένα κράμα που μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία διαλύματος προκειμένου να βελτιωθεί η αντοχή του. Αυτά τα κράματα παρουσιάζουν ρωγμές κατά την στερεοποίηση τους και για αυτό δεν μπορούν να συγκολληθούν με τόξο. Η προσθήκη του κατάλληλου γεμίσματος κατά τη συγκόλληση με τόξο είναι σημαντική προκειμένου να διαλυθεί το υλικό βάσης και αποτρέψει τη δημιουργία ρωγμών. Συγκολλούνται με τα κράματα 4xxx και 5xxx ανάλογα με τις εφαρμογές.

2.5.4.7 Σειρά κραμάτων 7xxx

Αυτά είναι τα κράματα αλουμινίου/ ψευδαργύρου και παρουσιάζουν τη μέγιστη αντοχή από τα κράματα αλουμινίου. Αυτά τα κράματα συχνά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης απόδοσης όπως την αεροδυναμική και αεροναυτική. Σε αυτή τη σειρά περιλαμβάνονται κράματα που δεν μπορούν να συγκολληθούν με τη μέθοδο του τόξου αλλά και κράματα που συγκολλούνται επιτυχώς με τη μέθοδο του τόξου.

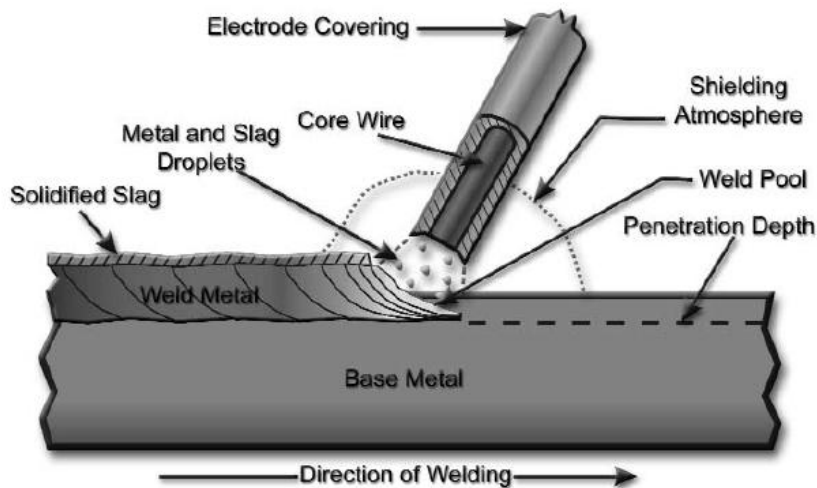
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΣΥΓΚΟΛΗΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Οι διαδικασίες της συγκόλλησης είναι βασικές για την κατασκευή ενός μεγάλου πλήθους προϊόντων όπως είναι η κατασκευή πλαισίων, τα δοχεία πίεσης τα στοιχεία του αυτοκινήτου και κάθε προϊόν που παράγεται ως συγκολλητό στοιχείο. Παρόλα αυτά οι διαδικασίες της συγκόλλησης είναι γενικά ακριβές και απαιτούν μεγάλο μέρος επένδυσης χρόνου και η επιτυχία της εξαρτάται από την εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών που εξαρτώνται από το υλικό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού το βαθμό της επιθυμητής λείανσης και το είδος της εφαρμογής. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν οι κυριότερες μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου.

3.1 Συγκόλληση μεταλλικού τόξου

Αυτή η μέθοδος συγκόλλησης συγκολλά δύο μέταλλα με τη βοήθεια της θερμότητας. Η θερμότητα παράγεται με ένα ηλεκτρικό τόξο που παράγεται από το ηλεκτρόδιο και τα υλικά. Η σταθερότητα του τόξου καθορίζεται από την απόσταση ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στο υλικό και ονομάζεται *συγκόλληση ράβδου*.



Σχήμα 3.1: Διαδικασία συγκόλλησης μεταλλικού τόξου (http://hvacrknowledgecenter.homestead.com/Stick_Welding.pdf)

Κατά τη διαδικασία αυτή ο συγκρατητής του ηλεκτροδίου συνδέεται στο ένα άκρο με πηγή ισχύος με τη χρήση καλωδίου συγκόλλησης. Ένα δεύτερο καλώδιο συνδέεται στο άλλο άκρο και ανάλογα τη σύνδεση είναι δυνατό να επιτυγχάνεται άμεση πολικότητα ή αντίστροφη. Το κύριο καλώδιο του επικαλυμμένου ηλεκτροδίου άγει το ηλεκτρικό ρεύμα και δημιουργεί το μέταλλο ως γέμισμα για τη συγκόλληση.

Η θερμότητα του τόξου λιώνει το κύριο καλώδιο και το κάλυμμα στην άκρη του ηλεκτροδίου. Το τηγμένο υλικό μεταφέρεται στο βασικό υλικό με τη μορφή σταγόνας και αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή συγκόλλησης και στερεοποιεί το υλικό βάσης. Η ροή επειδή έχει μικρή πυκνότητα επιπλέει στην επιφάνεια της δεξαμενής συγκόλλησης και στερεοποιείται ως στρώμα σκουριάς στην επιφάνεια του συγκολλημένου μετάλλου.

Η επικάλυψη του ηλεκτροδίου περιλαμβάνει διάφορα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την προστασία την αποξείδωση τη σταθεροποίηση του τόξου και την προσθήκη των κραματικών στοιχείων. Υπάρχουν τέσσερα είδη επικάλυψης (Porter and Esterling, 1992):

- Κυτταρινούχο που αποτελείται από 20% ρουτήλιο, 10-20% κυτταρίνη 15-30% χαλαζία, 0-15% ανθρακικά άλατα και 5-10% σιδηρομαγγάνιο που προωθεί την προστασία

- Ρουτήλιο που αποτελείται από 40-60% ρουτήλιο, 15-20% υαλοβάμβακα, 0-15% ανθρακούχα, 5-10% σιδηρομαγνήσιο, 0-5% οργανικά και χρησιμοποιείται για το σχηματισμό σκωρίας κυρίως για προστασία από τη σκουριά και παρουσιάζει μεγάλη περιεκτικότητα στις εναποθέσεις συγκολλήσεων.
- Οξύ που αποτελείται από σιδηρομετάλλευμα και μέταλλευμα μαγγανίου, υαλοβάμβακα, σύνθετα πυριτιούχα και ανθρακούχα σιδηρομαγνανικά τα οποία έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε υδρογόνο και δημιουργούν μεγάλη ποσότητα σκουρίας στη συγκόλληση.
- Βασική επικάλυψη που αποτελείται από 20-50% ανθρακικό ασβέστιο 20-40% φθορίτη, 0-5% χαλαζία 0-10% ρουτήλιο και 5-10% σιδηροκράματα. Η συγκεκριμένη επικάλυψη έχει μικρή περιεκτικότητα σε υδρογόνο και διατηρεί στεγνά τα ηλεκτρόδια.

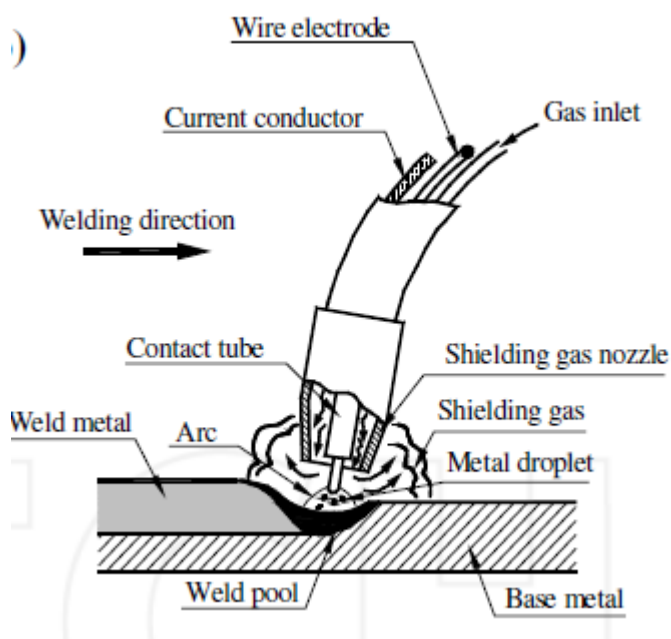
Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας η επικάλυψη του ηλεκτροδίου αντιδρά στην ελαχιστοποίηση των παραγόμενων οξειδίων που παράγονται κατά τη διαδικασία της σύντηξης και στον καθαρισμό του συγκολλημένου μετάλλου. Επίσης η σκουριά σχηματίζεται κατά την διαδικασία της στερεοποίησης προστατεύει το συγκολλημένο μέταλλο ειδικά όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή. Το ηλεκτρικό τόξο παράγεται με τον ιονισμό των αερίων που άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι σταθεροποιητές τόξου είναι στοιχεία που διασπώνται σε ιόντα στο τόξο με τη μορφή οξαλικού καυστικού καλίου και ανθρακικό λίθιο. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται και βελτιώνεται η αγωγή του ρεύματος σε μαλακότερη μορφή. Επιπρόσθετα η επικάλυψη του ηλεκτροδίου προωθεί τα κραματικά στοιχεία και/ ή τα μεταλλικά σωματίδια στο συγκολλημένο μέταλλο. Τα κραματικά στοιχεία έχουν την τάση να ελέγξουν την χημική σύσταση του συγκολλημένου μετάλλου ενώ τα μεταλλικά σωματίδια αυξάνουν το ρυθμό εναπόθεσης.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι είναι φορητή και είναι πιο φθηνή από τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στην συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συντήρηση, στην επισκευή των λειτουργιών στην παραγωγή των δομών ή στα δοχεία πίεσης. Όμως στη συντήρηση της συγκόλλησης των κραμάτων

αλουμινίου και του πιτανίου, η διαδικασία συγκόλλησης δεν έχει ικανοποιητικό βαθμό καθαρισμού εξαιτίας του αερίου που παράγεται από την επικάλυψη και το οποίο δεν είναι αρκετό για να επιτευχθούν συγκολλήσεις χωρίς αταξίες και ασυνέχειες. Από την άλλη ο ρυθμός εναπόθεσης είναι περιορισμένος επειδή τα ηλεκτρόδια μπορεί να μεταβληθούν συνεχώς εξαιτίας του μήκους τους.

3.2 Συγκόλληση με μεταλλικό τόξο αερίου (Gas metal arc welding, GMAW)

Στη συγκεκριμένη μέθοδο τήκονται και συνδυάζονται μέταλλα με τη θέρμανση ηλεκτρικού τόξου που δημιουργείται ανάμεσα σε ένα συνεχές καλώδιο και τα μέταλλα που πρέπει να συγκολληθούν. Στην περίπτωση των κραμάτων αλουμινίου δεν υπάρχουν σιδηρούχα κράματα και χάλυβας, αέριο Ar ή μίγματα Ar και Ηλίου ενώ για το χάλυβα το αέριο που χρησιμοποιείται είναι το CO₂. Όταν χρησιμοποιείται ένα αδρανές αέριο η διαδικασία είναι γνωστή ως MIG (Metal Inert Gas) και ως MAG (Metal Active Gas) όταν χρησιμοποιείται ενεργό αέριο μετάλλου. Η διαδικασία συγκόλλησης με μεταλλικό τόξο είναι μια από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους συγκόλλησης για τα κράματα αλουμινίου (Linkon Electric)..



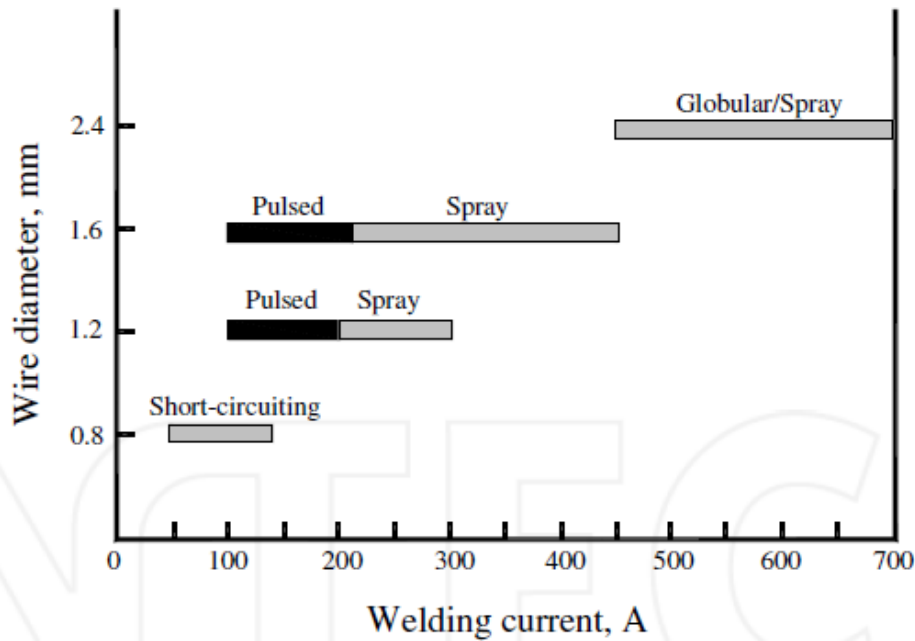
Σχήμα 3.2 Διαδικασία συγκόλλησης μεταλλικού τόξου με αέριο

Όταν ως τόξο χρησιμοποιείται το αέριο αργό η ενέργεια τόξου έχει μικρότερη διάδοση από το τόξο του ηλίου εξαιτίας της μικρότερης θερμικής αγωγιμότητας του αργού. Αυτός ο λόγος βοηθάει να πετυχαίνεται μια μεταλλική μετάδοση πιο σταθερή και ένα αξονικό τόξο πλάσμα αργού (Schweighardt, F., 2007).

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης στη διαδικασία συγκόλλησης GMAW (Kou, 2003): η σφαιρική μεταβίβαση, ο ψεκασμός και με μεταφορά βραχυκυκλώματος.

Στη σφαιρική μεταβίβαση οι μεταλλικές σταγόνες είναι μεγαλύτερες από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου και μεταφέρεται μέσω του αέριου πλάσματος και επηρεάζονται από τη βαρυτική δύναμη. Ένα χαρακτηριστικό της σφαιρικής μεταβίβασης είναι ότι τείνει να παρουσιάσει σταγόνες και ακανόνιστο τόξο. Αυτός ο τύπος της μεταφοράς μετάλλου είναι παρών σε χαμηλά επίπεδα ρεύματος ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο αέριο. Παρόλα αυτά όταν χρησιμοποιεί το διοξειδίο ή το ήλιο η μεταφορά σφαιρών μπορεί να επιτευχθεί σε όλα τα ισχύοντα επίπεδα.

Από την άλλη η μεταφορά με σπρέι πραγματοποιείται σε μεγαλύτερα επίπεδα ρεύματος. Οι σταγόνες του μετάλλου μεταφέρονται μέσω του τόξου κάτω από την επίδραση μιας ηλεκτρομαγνητικής δύναμης σε μεγαλύτερη συχνότητα από την σφαιρική μεταφορά. Σε αυτήν την κατάσταση μεταφοράς το μέταλλο τροφοδοτείται με σταθερό τρόπο και ελαχιστοποιούνται οι ψιχάλες. Το κρίσιμο επίπεδο ρεύματος εξαρτάται από το υλικό τη διάμετρο του ηλεκτροδίου και το είδος του αερίου. Στη μεταφορά με βραχυκύκλωμα το τηγμένο μέταλλο στο ηλεκτρόδιο μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο στη δεξαμενή συγκόλλησης όταν αγγίζει την επιφάνεια της δεξαμενής όταν πραγματοποιείται το βραχυκύκλωμα. Το βραχυκύκλωμα σχετίζεται με τα χαμηλότερα επίπεδα ρεύματος και μικρές διαμέτρους ηλεκτροδίου. Αυτή η μορφή μεταφοράς παράγει ένα μικρό και γρήγορα ψυχόμενη δεξαμενή συγκόλλησης που είναι επιθυμητή για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, για συγκόλληση εκτός θέσης και τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων.



Σχήμα 3.3: Τυπικά πεδία ρεύματος συγκόλλησης για τη διάμετρο καλωδίου και το ρεύμα συγκόλλησης.

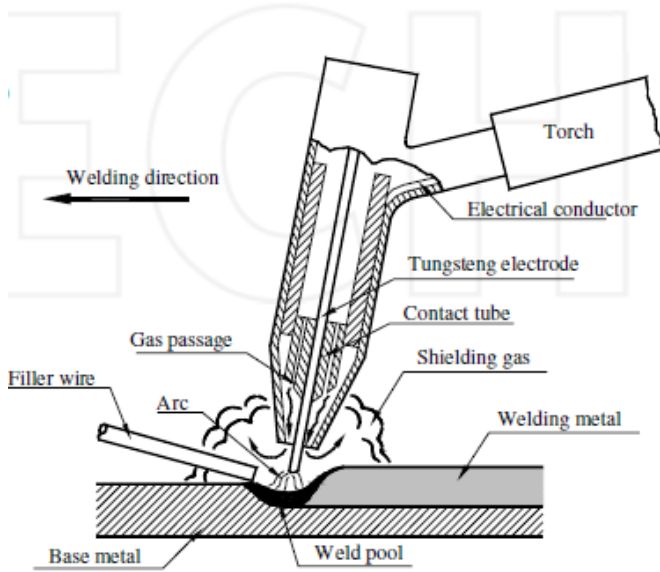
Τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης σε σχέση με την SMAW είναι:

- Δεν υπάρχει παραγωγή σκουριάς
- Είναι δυνατόν να αποδωθούν συγκολλήματα σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης
- Ο ρυθμός εναπόθεσης είναι διπλάσιος από τον αντίστοιχο ρυθμό της SMAW
- Η ποιότητα των συγκολλήματων είναι πολύ καλή
- Είναι πιθανόν να υπάρχουν υλικά συγκόλλησης με μεταφορά με βραχυκύκλωμα που τείνει να βελτιώσει τις διαδικασίες επισκευής και συντήρησης.

3.3 Συγκόλληση τόξου αέριου βολφραμίου (GTAW)

Αυτή είναι μια διαδικασία συγκόλλησης στην οποία το μέταλλο λιώνει με θερμότητα μέσω ενός ηλεκτρικού τόξου με ένα μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο. Η διαδικασία συγκόλλησης με αέριο βολφράμιο περιλαμβάνει ένα

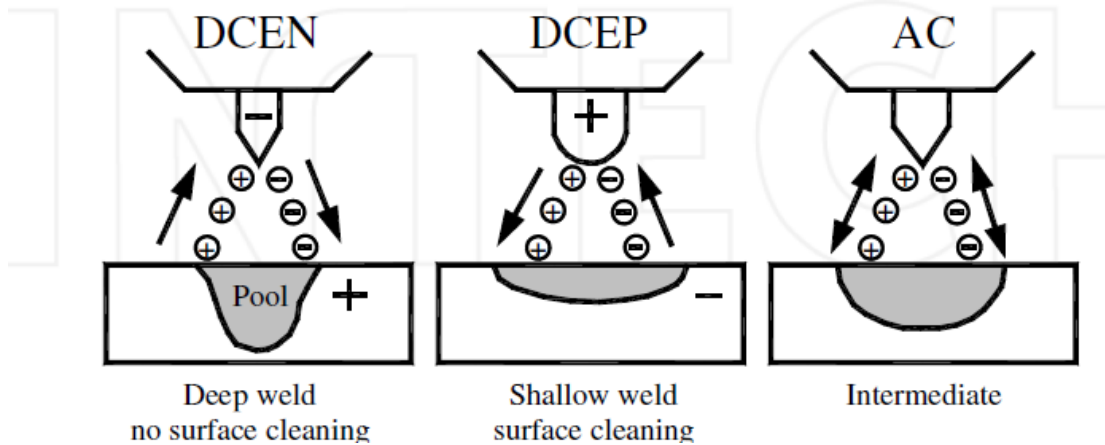
αδρανές ή ενεργό αέριο που προστατεύει το ηλεκτρόδιο και το μέταλλο συγκόλλησης.



Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας GTAW

Είναι πιθανόν να χρησιμοποιείται συνεχές ή εναλλασόμενο ρεύμα για τη συγκόλληση με GTAW. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεση πολικότητα ή αντίστροφη πολικότητα (Smith, 1998).

Η συνεχής πολικότητα είναι η πιο συχνή που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GTAW. Σε αυτήν την περίπτωση το ηλεκτρόδιο συνδέεται στον αρνητικό πόλο της πηγής θερμότητας και τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το ηλεκτρόδιο και επιταχύνονται μέσω της μετάδοσης τους από το τόξο. Αυτή η επίδραση παράγει υψηλό ποσό θερμότητας στο κομμάτι εργασίας και κατά συνέπεια παρουσιάζει καλή διείσδυση και ένα σχετικά ευρύ σχήμα συγκόλλησης (Smith, 1998).



Σχήμα 3.5: Η πολικότητα στην GTAW

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η αντίθετη πολικότητα το ηλεκτρόδιο συνδέεται στον θετικό πόλο της πηγής θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή η επίδραση της θερμότητας εξαιτίας του βομβαρδισμού των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη στο ηλεκτρόδιο σε σχέση με το κομμάτι εργασίας που οδηγεί σε ένα μεγάλα χοντρά και ρηχά συγκολλητά σε σχέση με αυτά που παράγονται με τη συνεχή πολικότητα. Σε αυτήν την περίπτωση εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης ενέργειας στο ηλεκτρόδιο είναι απαραίτητο να δημιουργείται μικρότερου πάχους διάμετρος και ένα σύστημα ψύξης για τον περιορισμό της τήξης του ηλεκτροδίου. Η επίδραση του βομβαρδισμού με θετικά ιόντα αδρανούς αερίου απομακρύνει το φιλμ του οξειδίου και δημιουργεί τον καθαρισμό της επιφάνειας συγκόλλησης. Κατά συνέπεια η αντίστροφη πολικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκολλητά υλικά που είναι ανθεκτικά σε οξείδια αλουμινίου και μαγνησίου αν δεν απαιτείται βαθιά δεισδυση.

Όταν χρησιμοποιείται το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι πιθανόν να επιτευχθεί ένας καλός συνδυασμός των περιοριζόμενων οξειδίων και δεισδυση. Η πολικότητα αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη στα κράματα του αλουμινίου (Miller, 2013).

Για τη συγκόλληση με τόξο βολφραμίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα ηλεκτρόδια. Σε αυτά περιλαμβάνονται το καθαρό βολφράμιο και τα κράματα βολφραμίου με οξείδιο του θορίου (ThO_2) ή οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2) τα οποία προστίθενται για τη βελτίωση της ανάφλεξης του τόξου και

οδηγούν σε αύξηση του ηλεκτροδίου. Τα τελευταία χρόνια έχουν προστεθεί μερικά κραματικά στοιχεία όπως η δημήτρια και το λανθάνιο που επίσης αυξάνουν τη ζωή του ηλεκτροδίου και τείνουν να μειώσουν τον κίνδυνο της ακτινοβολίας που παράγεται από τη χρήση των ηλεκτροδίων του θορίου. Τα ηλεκτρόδια του ψευδαργύρου προτιμώνται για χρήση εναλασσόμενου ρεύματος επειδή έχουν μεγαλύτερο σημείο τήξης από το καθαρό βολφράμιο και τα οξειδία βολφραμίου- θορίου (Miller, 2013).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης θεωρείται πως το άκρο του ηλεκτροδίου είναι ημισφαιρικό γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία επειδή η σταθερότητα του τόξου εξαρτάται από ένα καλύτερο τρόπο της γεωμετρίας του άκρου. Οι διάμετροι των ηλεκτροδίων μεταβάλλονται από 0,3- 6.4mm (Miller, 2013).

Πίνακας 3.1: Απαιτούμενες διάμετροι ηλεκτροδίου και εύρος ρεύματος που χρησιμοποιείται στη συγκόλληση με τόξο Ar.

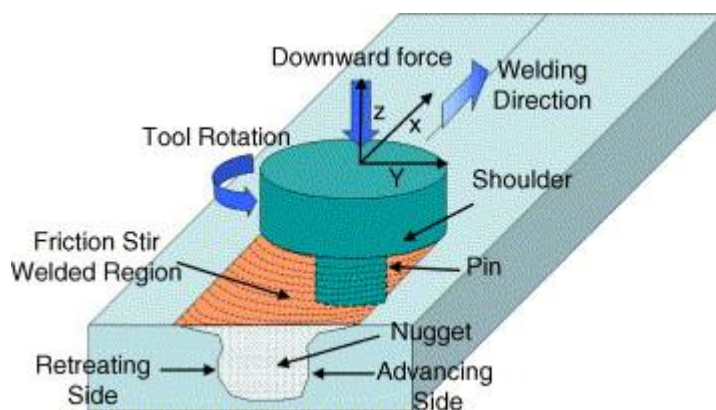
Διάμετρος ηλεκτροδίου mm	Ρεύμα, A
1	20-50
1.6	50-80
2.4	80-160
3.2	160-225
4th	225-330
5	330-400
6.4	400-550

3.4 Συγκόλληση τριβής ανάδευσης (FSW)

Η δυσκολία της κατασκευής ανθεκτικών συγκολλητών τεμαχίων υψηλής αντοχής, κόπωσης και τριβής στα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική όπως τα υψηλής κραμάτωσης 2XXX και 7XXX παρεμποδίζουν τη χρήση τους σε εφαρμογές της αεροναυπηγικής. Αυτά τα κράματα του αλουμινίου γενικά χαρακτηρίζονται ως μη συγκολλησίμα εξαιτίας της μικρής μικροδομής στερεοποίησης και το πορώδες τους στη ζώνη διάχυσης. Επίσης η απώλεια των μηχανικών ιδιοτήτων όπως συγκρίνεται με

τα υλικά βάσης είναι πολύ σημαντική. Αυτοί οι παράγοντες συνδέουν τα κράματα με συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης που δεν είναι ιδιαίτερα πρακτικές. Μερικά κράματα αλουμινίου μπορεί να είναι ανθεκτικά στη συγκόλληση αλλά η προετοιμασία της επιφάνειας είναι ακριβή με τα επιφανειακά οξειδία να είναι ένα από τα σημαντικά προβλήματα στη συγκόλληση.

Η συγκόλληση με τριβή ανάδευσης (friction stir welding, FSW) ανακαλύφθηκε το 1991 στο Ηνωμένο Βασίλειο ως μια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης και αρχικά εφαρμόστηκε στα κράματα αλουμινίου (Thomas, 1991). Το βασικό αντικείμενο της συγκεκριμένης συγκόλλησης βασίζεται στο ότι ένα μη αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο με ειδικά σχεδιασμένο άκρο που εισέρχεται στις επαπτόμενες άκρες των φύλλων ή των πλακών που πρόκειται να συγκολληθούν και μετατοπίζονται κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης.



Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης τριβής (FSW)

Το εργαλείο της συγκόλλησης έχει διπλό ρόλο. Από τη μια θερμαίνει το τεμάχιο εργασίας και από την άλλη δημιουργεί την κατάλληλη κίνηση για να παραχθεί η σύνδεση. Η θερμότητα που αναπτύσσεται σχετίζεται με την τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στο εργαλείο και στο τεμάχιο εργασίας και την πλαστική παραμόρφωση του τεμαχίου εργασίας. Η τοπικά αναπτυσσόμενη θερμότητα μαλακώνει το υλικό γύρω από το άκρο και συνδυάζει την περιστροφή του εργαλείου και η μετάδοση οδηγεί στην κίνηση του υλικού από την μπροστινή μεριά του άκρου του εργαλείου προς το πίσω μέρος. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας παράγεται ένας σύνδεσμος σε στερεά

κατάσταση. Εξαιτίας των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου η κίνηση του υλικού γύρω από το άκρο του εργαλείου μπορεί να είναι σύνθετη (London et al. 2001). Κατά την διαδικασία FSW το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την παραγωγή λεπτόκοκκων ισοαξονικών ανακρυσταλλωμένων σπόρων (Rhodes, 1997). Η τέλεια μικροδομή στη συγκόλληση τριβής παράγει καλές μηχανικές ιδιότητες.

Η ακριβής διαδικασία της συγκόλλησης με τριβή περιγράφηκε από τους Fratini and Buffa (2005). Σύμφωνα με αυτούς το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης επιτυγχάνεται με την διείδυση ενός ειδικά σχεδιασμένου άκρου στις άκρες των ελασμάτων που πρόκειται να συγκολληθούν. Το εργαλείο χαρακτηρίζεται από μια μικρή γωνία (θ) που περιορίζει την επαφή ανάμεσα στον κορμό του εργαλείου και τα ελάσματα συγκόλλησης περίπου στο μισό του κορμού του εργαλείου. Καθώς το άκρο εισέρχεται στα ελάσματα τα λευκά υλικά υποβαθμίζονται σε μια τοπική εξέλαση μέχρι να επιτευχθεί η επαφή με το εργαλείο. Η περιστροφή του εργαλείου προκαλεί αύξηση στη θερμοκρασία του υλικού εξαιτίας της αναπτυσσόμενης τριβής με αποτέλεσμα να μειώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού και να μαλακώνει.

Η FSW θεωρείται ως η πιο σημαντική ανάπτυξη στη μεταλλική σύνδεση την τελευταία δεκαετία και αποτελεί μια «πράσινη» τεχνολογία εξαιτίας της ενεργειακής της απόδοσης, την φιλικότητα του προς το περιβάλλον και την εύκολη εφαρμογή της. Συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης η FSW καταναλώνει σημαντικά μικρότερα ποσά ενέργειας. Δεν χρησιμοποιείται αέριο κάλυψης ή ροή και κατά συνέπεια η συνολική διεργασία είναι φιλική προς το περιβάλλον. Η σύνδεση δεν περιλαμβάνει καμία χρήση υλικού γεμίσματος και κατά συνέπεια κάθε κράμα αλουμινίου μπορεί να συνδεθεί χωρίς ανησυχία για τη συμβατότητα της σύστασης όπως συμβαίνει με τη συγκόλληση διάχυσης. Όταν τα επιθυμητά ανόμοια κράματα αλουμινίου και σύνθετα μπορούν να συνδεθούν εύκολα (Murr, et al. 1998).

Αντίθετα με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης που συνήθως εφαρμόζονται σε μικρά αξονοσυμμετρικά τμήματα που μπορούν να περιστρέφονται και να ωθούνται αντίθετα προς τη σύνδεση η συγκόλληση

τριβής μπορεί να εφαρμόζεται σε διάφορους τύπους συνδέσμων όπως αρθρώσεις, πίσω συνδέσεις, συνδέσμους τύπου T κλπ.(Dawes, C.J., and Thomas, W.M, 1996).

Πίνακας 3.2: Βασικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με τριβή

Πλεονεκτήματα Μεταλλουργίας	Πλεονεκτήματα Περιβάλλοντος	Ενεργειακά πλεονεκτήματα
Διαδικασία Φάσης	Στερεάς	Χρήση βελτιωμένων υλικών επιτρέπει τη μείωση στο βάρος
Χαμηλή παραμόρφωση του αντικείμενου εργασίας	Καμία επιφάνεια δεν χρειάζεται καθαρισμό	Μόνο το 2.5% της ενέργειας χρειάζεται στην συγκόλληση με laser
Καλή σταθερότητα και επαναληψιμότητα	Περιορισμός των αποβλήτων λείανσης	Μείωση της κατανάλωσης καυσίμου σε αερόσκαφος μικρού βάρους αυτοκίνητα και πλοία
Καμία κραμματικών απώλεια στοιχείων	Αποθήκευση αναλώσιμων υλικών όπως καλώδια και αέρια	
Τέλεια μικροδομή		
Απουσία ρωγμών		
Αντικατάσταση πολλαπλών μερών που συνδέονται με συνδέσμους		

Πρόσφατα η συγκόλληση με τριβή αναπτύχθηκε από τους Mishra et al. (2001) ως γενικό εργαλείο για τη διαμόρφωση της μικροδομής με βάση τις βασικές αρχές της FSW. Σε αυτήν την περίπτωση ένα περιστρεφόμενο εργαλείο εισέρχεται σε ένα μονολιθικό τεμάχιο εργασίας για τοπική διαμόρφωση μικροδομής γεγονός που ενισχύει τις ειδικές ιδιότητες του κράματος.

3.5 Συγκόλληση με δέσμη laser

Η συγκόλληση με δέσμη laser αποτελεί μια σύγχρονη τεχνολογία πολλά υποσχόμενη για το βιομηχανικό τομέα εξαιτίας της δυνατότητας που παρέχει για τη σύνδεση και την επισκευή διαφόρων υλικών. Σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες συγκόλλησης παρουσιάζει το μειονέκτημα του

υψηλότερου κόστους λόγω του ακριβού εξοπλισμού που απαιτεί όπως επίσης απαιτεί και μεγάλη ακρίβεια στον προσανατολισμό της δέσμης και των τεμαχίων γεγονός που δημιουργεί περιορισμούς στην εφαρμογή της. Παρόλα αυτά υπερταίρουν τα πλεονεκτήματα της όπως η χαμηλή παραγωγή θερμότητας, η μεγάλη ικανότητα συγκέντρωσης σε συγκεκριμένο μέρος της δέσμης, η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, η ευελιξία της μεθόδου, η ποιότητα του συγκολλήματος και ο μεγάλος ρυθμός παραγωγής (Sanchez-Amaya, 2009).

Η συγκόλληση με δέσμη laser μπορεί να διεξαχθεί θεωρώντας δύο διαφορετικές περιοχές (Sanchez-Amaya, 2009): μέσω διείσδυσης και με αγωγή. Η περιοχή διείσδυσης πραγματοποιείται σε μεγαλύτερες πυκνότητες ισχύος και οδηγεί σε ευρύτερες ζώνες συγκόλλησης από τη ζώνη αγωγής. Η συγκόλληση στην περιοχή διείσδυσης δημιουργεί συνήθως συγκολλήσεις με μεγάλο πορώδες εξαιτίας της εισαγωγής αερίου κατά την στερεοποίηση του συγκολλήματος (Akther, et al. 2007).

Αντίθετα στην περιοχή της αγωγής η συγκεκριμένη συγκόλληση είναι πιο σταθερή διαδικασία εξαιτίας της εξάτμισης του μετάλλου που λαμβάνει χώρα σε μικρότερα επίπεδα συγκριτικά με την περιοχή διείσδυσης (Sanchez-Amaya, 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

4.1 Συγκόλληση με τριβή ανάδευσης (FSW) σε όμοια κράματα αλουμινίου

Όπως ήδη αναφέρθηκε η συγκόλληση με τριβή είναι μια διαδικασία συγκόλλησης στερεάς φάσης στην οποία το μέταλλο που συγκολλείται δεν τήκεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας έτσι ώστε η ρωγμή και το πορώδες συχνά σχετίζεται με τον περιορισμό των διαδικασιών συγκόλλησης σύντηξης (Dawes and Thomas, 1996). Παρόλα αυτά πολλές μελέτες έχουν δημοσιευτεί σχετικά με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής και τις μηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων συγκόλλησης με τριβή και έχουν δείξει ότι η FSW μέθοδος οδηγεί σε μαλάκωμα των συνδέσμων των θερμικά κατεργαζόμενων κραμάτων όπως το 2014-T651 (Dawes et al. 2000), 2024-T351 (Storbeck et al. 1999), το 7075-T651 (Mahoney, et al. 1999), εξαιτίας της διάλυσης της ανάπτυξης των στοιχείων ενδυνάμωσης των δεσμών κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου συγκόλλησης με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των συνδέσμων. Κατά συνέπεια θεωρείται σημαντική η μελέτη της επίδρασης των διαδικασιών συγκόλλησης στις μηχανικές ιδιότητες των συνδέσμων και ο καθορισμός των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστης ποιότητας συγκόλληση.

Στα κράματα αλουμινίου της σειράς 2XXX αναφέρεται η μελέτη των θερμικά κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου 2014-T651, 2024-T3, 2024-T351 και 2024-T6 στη συγκόλληση με τριβή με στόχο την εξέταση των ιδιοτήτων τάσης και των θέσεων ρωγμών στους συνδέσμους (Manguson, and Kalman, 2000). Έχει αποδειχθεί ότι τα κράματα αλουμινίου 2017-T351 είναι κράματα της σειράς 2xxx τα οποία δεν έχουν υποστεί συγκόλληση με τριβή. Οι Liu et al.(2003) εφάρμοσαν το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης στο κράμα 2017-T351 και εστίασαν στη σχέση των ιδιοτήτων τάσεων και στην ανάπτυξη ρωγμών στους συνδέσμους με τις παραμέτρους συγκόλλησης προκειμένου

να οριστούν να καθοριστούν οι παράμετροι της συγκόλλησης τριβής και να εντοπίσουν τις αδύναμες τοποθεσίες σύνδεσης.

Το υλικό βάσης που χρησιμοποίησαν ήταν το κράμα αλουμινίου 2017-T351 σε μορφή πλάκας πάχους 5mm του οποίου η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες φαίνονται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας.4.1: Χημικές και μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2017-T351 (Liu et al. 2003)

Chemical compositions (wt.%)								
Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Cr
Balance	0.52	0.29	4.29	0.60	0.58	0.02	0.08	0.02

Mechanical properties		
Tensile strength (MPa)	Proof strength, 0.2% (MPa)	Elongation (%)
428.1	319.2	23.8

Η πλάκα του κράματος κόπηκε και διαμορφώθηκε σε ορθογώνια δείγματα συγκόλλησης με μήκος 300mm και πλάτος 80mm τα οποία συγκολλήθηκαν κατά μήκος σε μηχανήμα συγκόλλησης τριβής για το οποίο το μέγεθος του εργαλείου και οι παράμετροι συγκόλλησης φαίνονται στους πίνακες 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2 Μέγεθος εργαλείου συγκόλλησης (Liu et al. 2003)

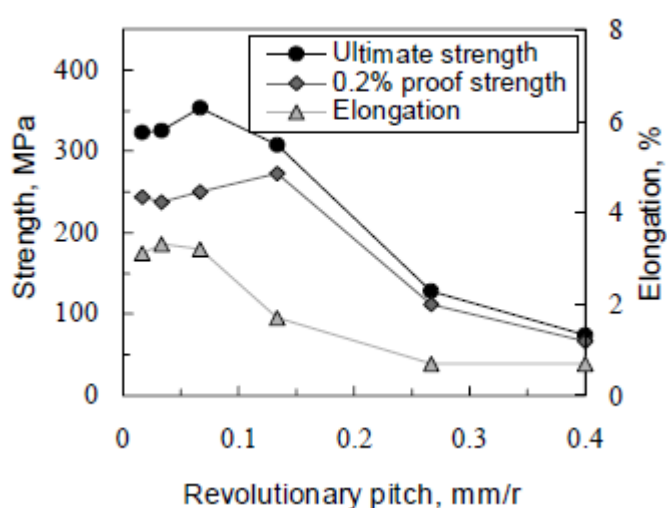
Tool size (mm)			
Shoulder diameter	Pin diameter	Pin length	Tool tilt (°)
15	6	4.7	3

Πίνακας 4.3: Παράμετροι συγκόλλησης (Liu et al. 2003)

Welding parameters		
Rotation speed (rpm)	Welding speed (mm/min)	Revolutionary pitch (mm/rev)
1500	25–600	0.02–0.40

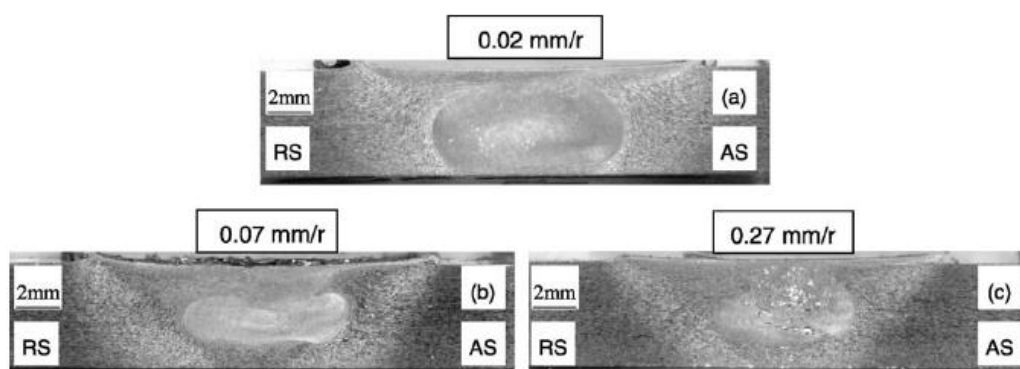
Μετά τη συγκόλληση οι σύνδεσμοι διασταυρώνονταν ανάλογα με την κατεύθυνση συγκόλλησης για μεταλλουργικές αναλύσεις και δοκιμές τάσεις χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο κοπής ηλεκτρικής αποφόρτισης. Οι διασταυρώσεις των μεταλλογραφικών ειδών γυαλίστηκαν με ίχνη αλουμίνας εμποτισμένο με αντιδραστήριο Keller που αποτελούταν από 150ml νερό 3 ml νιτρικό οξύ και 6 ml υδροχλωρικό οξύ στους 0o C για περίπου 10sec και παρατηρήθηκαν στην οπτική μικροσκοπία.

Με τη συγκεκριμένη διαδικασία οι Liu et al. (2003) απέδειξαν ότι στους συνδέσμους συγκόλλησης με τριβή δημιουργείται μια μαλακή περιοχή που αποτελείται από ένα συγκολλητό και μια θερμικά επηρεασμένη ζώνη στο κράμα 2017-T351. Ως αποτέλεσμα της διεργασίας αποδείχθηκε ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού των συνδέσμων είναι μικρότερες από αυτές του βασικού υλικού. Οι παράμετροι συγκόλλησης επιδρούν σημαντικά στις ιδιότητες εφελκυσμού και τοποθεσίες ρωγμής των συνδέσμων. Όταν το αναπτυσσόμενο βήμα είναι μεγαλύτερο από μια καθορισμένη πηγή μερικές αταξίες οπών αναπτύσσονται στους συνδέσμους και οι ιδιότητες εφελκυσμού στους συνδέσμους είναι σημαντικά μικρότερες ενώ οι σύνδεσμοι παρουσιάζουν ρωγμές στο κέντρο συγκόλλησης.



Σχήμα 4.1: Οι ιδιότητες εφελκυσμού των συνδέσμων όπως μετρήθηκαν από τους Liu et al. (2003).

Απέδειξαν επίσης πως αν το αναπτυσσόμενο βήμα είναι μικρότερο από τη συγκεκριμένη τιμή δεν σχηματίζονται αταξίες στους συνδέσμους οι ιδιότητες εφελκυσμού των συνδέσμων είναι σε συγκριτικά υψηλότερα επίπεδα και οι ρωγμές των συνδέσμων εμφανίζονται στη διεπιφάνεια μεταξύ των συγκολλήσεων και της θερμικά αναπτυσσόμενης ζώνης. Σε συνθήκες βέλπστου βήματος 0.07mm η σύνθετη αντοχή του συνδέσμου είναι μέγιστη ισοδύναμα με το 82% του βασικού υλικού (Liu et al. 2003).



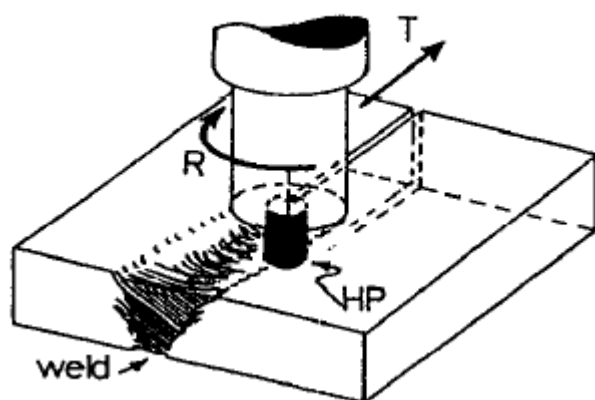
Σχήμα 4.2: Διασταυρωμένες τομές των τυπικών συνδέσμων σε διάφορα βήματα ανάπτυξης α)0.02mm/rev, β)0,07mm/rev, γ) 0,27mm/rev (Liu et al.2003).

Σε άλλη τους εργασία οι Liu et al. (1997) χρησιμοποίησαν την ελαφρά μεταλλογραφία και ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης (TEM) για να χαρακτηριστούν οι μικροδομές στη συγκόλληση με τριβή και τα συγκρίναν με τη μικροδομή των κραμάτων 6061-T6. Επίσης μετρήσανε τη σχετική μικροσκληρότητα που προέρχεται από το τεμάχιο εργασίας και μέσω της ζώνης συγκόλλησης (Liu et al. 1996).

Η πλάκα που χρησιμοποιήθηκε από κράμα αλουμινίου 6061-T6 για μια σειρά πειραμάτων συγκόλλησης με τριβή. Οι σειρές αντικριστές συγκολλήσεις και προσομοίωση συγκολλήσεων στα τμήματα στερεάς πλάκας όταν διεξάγονται όπως απεικονίζονται σχηματικά στο Σχήμα 3.2 με περιστροφικές ταχύτητες από 300 έως 1000rpm και μεταβατικές ταχύτητες των 0.15- 0.25 cm/sec. Το επισκληρυμένο άκρο συγκόλλησης με άνθρακα είχε διάμετρο 0,63cm και το μήκος του 0,58cm. Η διάμετρος τσοκ ήταν 1,25cm και οι διατομές

συγκόλλησης είναι γειωμένες γυαλισμένες και εμποτισμένες σε αντιδραστήριο Keller για την οπτική μεταλλογραφία. Τα λεπτά είδη είχαν αποκοπεί από αυτές τις διατομές σε διάφορες θέσεις μέσα και έξω από τη ζώνη συγκόλλησης γειωμένο σε πάχος 0.2μm μηχανικά λακάκια και δίσκους 3mm που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρονική μικροσκοπία (TEM) (Liu et al. 1996).

Η ζώνη συγκόλλησης τριβής στο αλουμίνιο 6061-T6 χαρακτηρίστηκε από τους Liu et al (1996) σε μια δυναμική μικροδομή ανακρυστάλλωσης. Τα σωματίδια δεύτερης φάσης στο τεμάχιο εργασίας είναι προσαρτημένα στη ζώνη συγκόλλησης όπου η εναπομείνουσα σκληρότητα μεταβάλλεται από 55 VHN κοντά στην κορυφή συγκόλλησης έως τα 65 VHN στο κάτω μέρος της συγκόλλησης αντίθετα με τη σκληρότητα του τεμαχίου εργασίας που κυμαίνεται ανάμεσα στα 85 με 110 VHN. Επιπλέον αποδείχθηκε πως η ζώνη συγκόλλησης έχει μέγεθος κόκκων 10μm αντίθετα με τα 100μm στο τεμάχιο εργασίας. Παρόλα αυτά εμφανίζονται γύρω από το τεμάχιο εργασίας σύνθετα φαινόμενα καθίζησης που σχετίζονται με τη ζώνη μετάβασης ανάμεσα στο τεμάχιο εργασίας και στην πραγματική ζώνη συγκόλλησης (Liu et al. 1996).



Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης τριβής σε λεπτή πλάκα. Ένα περιστρεφόμενο (R) σκληρό άκρο με διαστάσεις κατά προσέγγιση ίση με το πάχος πλάκας προωθεί σε τεμάχιο εργασίας με επιλεκτική αντίστροφη ταχύτητα (T) για να δημιουργήσει μια συγκόλληση στερεάς φάσης στην ακραία πλευρά (Liu et al. 1996).

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 όπως το 7050 χρησιμοποιούνται ευρέως στις κύριες δομές της στρατιωτικής αεροβιομηχανίας. Αυτή η κατηγορία των κραμάτων αλουμινίου είναι δύσκολο να συγκολληθεί με τις κλασσικές μεθόδους συγκόλλησης εξαιτίας της δένδριτικής τους δομής που σχηματίζεται στη ζώνη σύντηξης και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Κατά συνέπεια η συγκόλληση σύντηξης για τα κράματα της σειράς 7000 δεν ενδείκνυται και η σύνδεση τους προτιμάται να γίνεται με τη συγκόλληση τριβής (Dawes and Thomas, 1996).

Οι Pao et al. (2001) μελέτησαν την επίδραση της συγκόλλησης τριβής στη ρωγμή κόπωσης των κραμάτων 7050-T7451 και εκτίμησαν το ρυθμό ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης στη συγκόλληση τη ζώνη θερμικής ανάπτυξης και στο βασικό υλικό τόσο στον αέρα όσο και σε διάλυμα NaCl 3.5%.

Οι Pao et al. (2001) χρησιμοποίησαν ως αρχικό υλικό πλάκες 7050-T7451 που συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με συγκόλληση τριβής. Η κατεύθυνση της συγκόλλησης ήταν παράλληλη στην περιστροφική διεύθυνση των πλακών 7050. Η ταχύτητα περιστροφής του άκρου ήταν 400rpm και το άκρο μετακινούνταν με ταχύτητα 100mm/min. Η ονομαστική χημική σύσταση κατά βάρος του κράματος 7050 ήταν Al-6.2Zn-2.3Cu-2.25Mg-0.12Zr. ακολουθώντας τη διαδικασία συγκόλλησης με τριβή η πλάκα του κράματος 7050 υπέστη γήρανση στους 121° C για 24 ώρες προκειμένου να επανακαθαριστεί και να ανακτηθεί η αντοχή του κράματος στο συγκόλλημα.

Πίνακας 4.4: Ιδιότητες εφελκυσμού της FSW για το κράμα αλουμινίου 7050 (Pao et al. 2001)

Condition	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	(%) Elongation
Base (T74)	490	558	16.7
As-FSW	303	427	5.7
FSW + 12°C/24 h	310	421	3.2

Οι μικροδομές του συγκολλήματος εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας οπτική μικροσκοπία και TEM ανάλυση ενώ οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της γραμμής συγκολλήματος εξετάζοντας

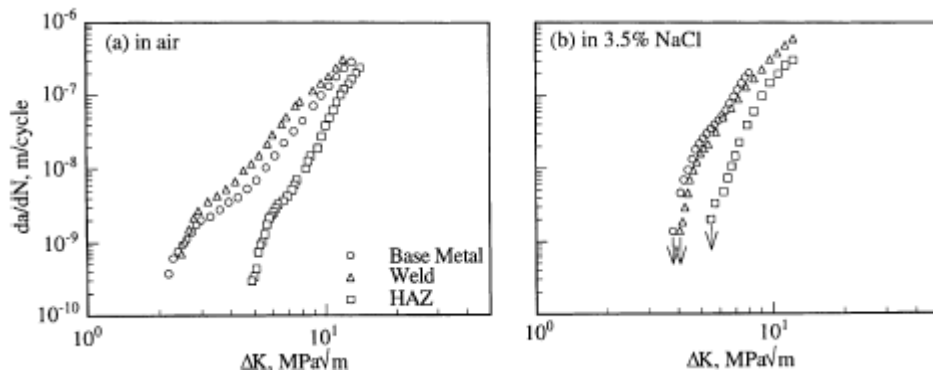
την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων και της μικροδομής στα γηρασμένα και στα κανονικά τεμάχια του κράματος.

Για τη μελέτη της ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης χρησιμοποιήθηκαν δείγματα με πάχος 5,9mm και πλάτος 38,1mm τα οποία κατευθύνονταν στην αντίθετη κατεύθυνση και υπέστησαν συγκόλληση με γήρανση. Η γραμμή ανάπτυξης της ρωγμής ήταν παράλληλη στην κατεύθυνση συγκόλλησης. Τα πλευρικά αυλάκια με βάθος ίσο με 5% πάχους εισήχθησαν στις δυο πλευρές του δείγματος κόπωσης για να ενισχυθεί ο περιορισμός. Η αρχική εγκοπή δημιουργήθηκε στο κέντρο του συγκολλήματος 9.5mm (αναπαριστώντας τη ζώνη αναπτυσσόμενης θερμότητας) από το κέντρο του συγκολλήματος ή 50mm από το κέντρο του συγκολλήματος (αναπαριστώντας το βασικό υλικό).

Τα πειράματα ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης έγιναν με βάση το ASTM E647 στον αέρα και σε ένα διάλυμα 3.5% διάλυμα NaCl με συχνότητα κυκλικού φορτίου 5Hz ενώ μια κυματοειδής μορφή και ένα λόγο φορτίου $R=0.10$. Για κάθε συνθήκη πραγματοποιήσαν συνεχή δοκιμές ρωγμής κόπωσης (Pao et al. 2001).

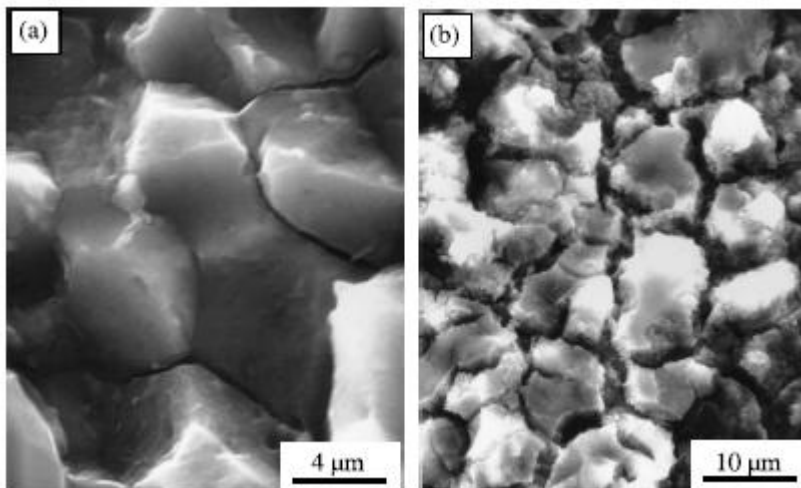
Οι μικροδομές της συγκόλλησης με τριβή διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τη δομή του συγκολλήματος και τη δομή της ζώνης ανάπτυξης της θερμότητας. Το συγκόλλημα αποτελείται από ομοιόμορφους ισοαξονικούς κόκκους που προέρχονται από τη δυναμική ανακρυσταλλοποίηση που προκαλείται από το συνδυασμό της μηχανικής υποβάθμισης και τη θερμότητα τριβής στο κράμα. Εξαιτίας των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο συγκόλλημα και οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία διάλυσης των κραμάτων της σειράς 7000 των κραμάτων αλουμινίου το Mg διαλύεται κατά μήκος του πλέγματος (Pao et al. 2001).

Έξω από το συγκόλλημα αναπτύσσεται η ζώνη θερμότητας της οποίας η δομή των κόκκων δεν κατανέμεται από τη συγκόλληση τριβής και είναι παρόμοια με αυτή του βασικού μετάλλου. Από την μελέτη της ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης στο βασικό υλικό στο συγκόλλημα και στη ζώνη θερμότητας για τα δύο είδη συγκόλλησης με τριβή (με γήρανση και χωρίς) αποδείχθηκε ότι η καμπύλη κόπωσης αποτελείται από δύο περιοχές και περιγράφονται από μια γραμμική σχέση (Pao et al. 2001).



Σχήμα 4.5: Ανάπτυξη της ρωγμής κόπωσης στον αέρα (α) και σε διάλυμα 3.5% NaCl (β) για το κράμα 7050 (Pao et al. 2001).

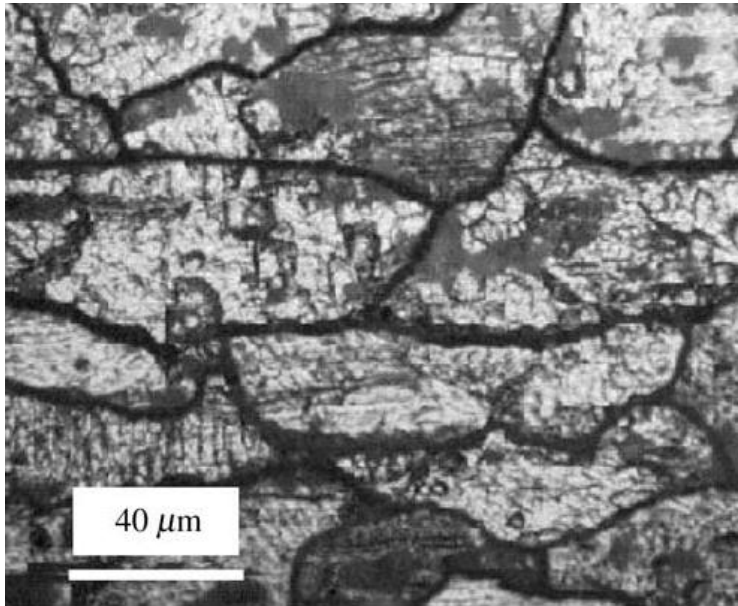
Επιπλέον οι Pao et al. (2001) χαρακτήρισαν την απόκριση της ρωγμής κόπωσης και την διάβρωση σε διάφορες περιοχές συγκόλλησης του κράματος 7050. Απέδειξαν πως οι ρυθμοί ανάπτυξης της κόπωσης είναι υψηλοί στη ζώνη συγκόλλησης στον αέρα και σαφώς μικρότεροι στο διάλυμα 3.5% NaCl.



Σχήμα 4.6: Μορφολογία της επιφάνειας κόπωσης της συγκόλλησης σε 3.5% διάλυμα NaCl (Pao et al. 2001).

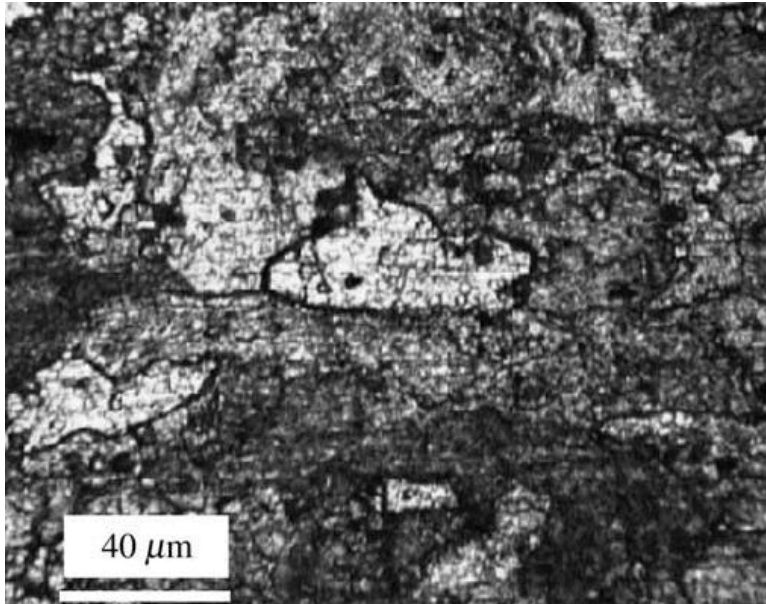
Οι Fratini and Buffa (2005) μελέτησαν την μικροδομή της συγκόλλησης δύο ελασμάτων AA6082-T6 και διαπίστωσαν την ύπαρξη των ακόλουθων περιοχών:

- *Μητρικό υλικό:* Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει παραμόρφωση υλικού και το υλικό δεν επηρεάζεται από τη ροή θερμότητας σε όρους μικροδομής ή μηχανικών ιδιοτήτων και εμφανίζει μέσο μέγεθος κόκκων 80μm.



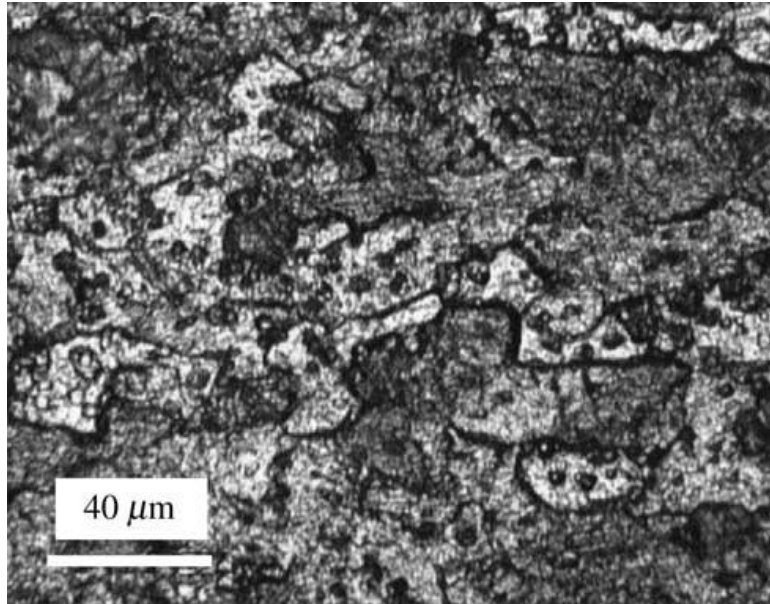
Σχήμα 4.6: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής του μητρικού υλικού στο AA6082-T6 (Frettini and Buffa, 2005).

- *Η ζώνη ανάπτυξης θερμότητας (Heat affected zone):* Σε αυτήν την περιοχή το υλικό υπάγεται σε ένα θερμικό κύκλο που διαμορφώνει τη μικροδομή και παράλληλα τις μηχανικές ιδιότητες αλλά δεν εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση.



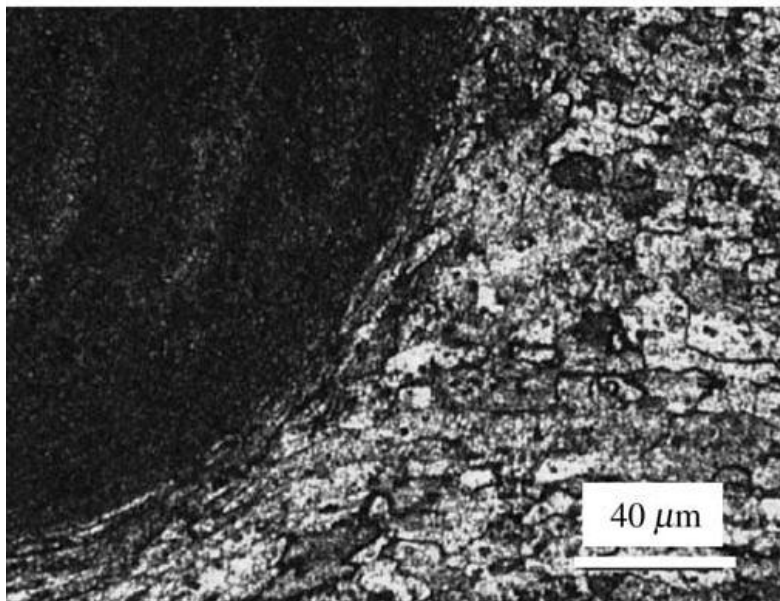
Σχήμα 4.7: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης αναπτυσσόμενης θερμότητας στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).

- *Ζώνη θερμομηχανικής επίδρασης (TMAZ).* Σε αυτήν την περιοχή το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά από το εργαλείο και η ροή θερμότητας επιδρά στο υλικό. Στην περίπτωση του αλουμινίου δεν παρατηρείται ανακρυσταλλοποίηση ενώ αντίθετα υπάρχει εκτεταμένη παραμόρφωση.



Σχήμα 4.8: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης θερμικής επίδρασης στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).

-*Nugget*: Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται ανακρυσταλλοποίηση στην TMAZ και οι αρχικοί κόκκοι αντικαθίστανται με ειδικά ισοαξονικά ανακρυσταλλοποιημένους κόκκους που έχουν ονομαστική διάμετρο της τάξης των μικρομέτρων.



Σχήμα 4.9: Οπτική αναπαράσταση της περιοχής της ζώνης nugget στο AA6082-T6 (Fratini and Buffa, 2005).

4.2 Συγκόλληση με τριβή με ανάδευση σε διαφορετικά κράματα αλουμινίου

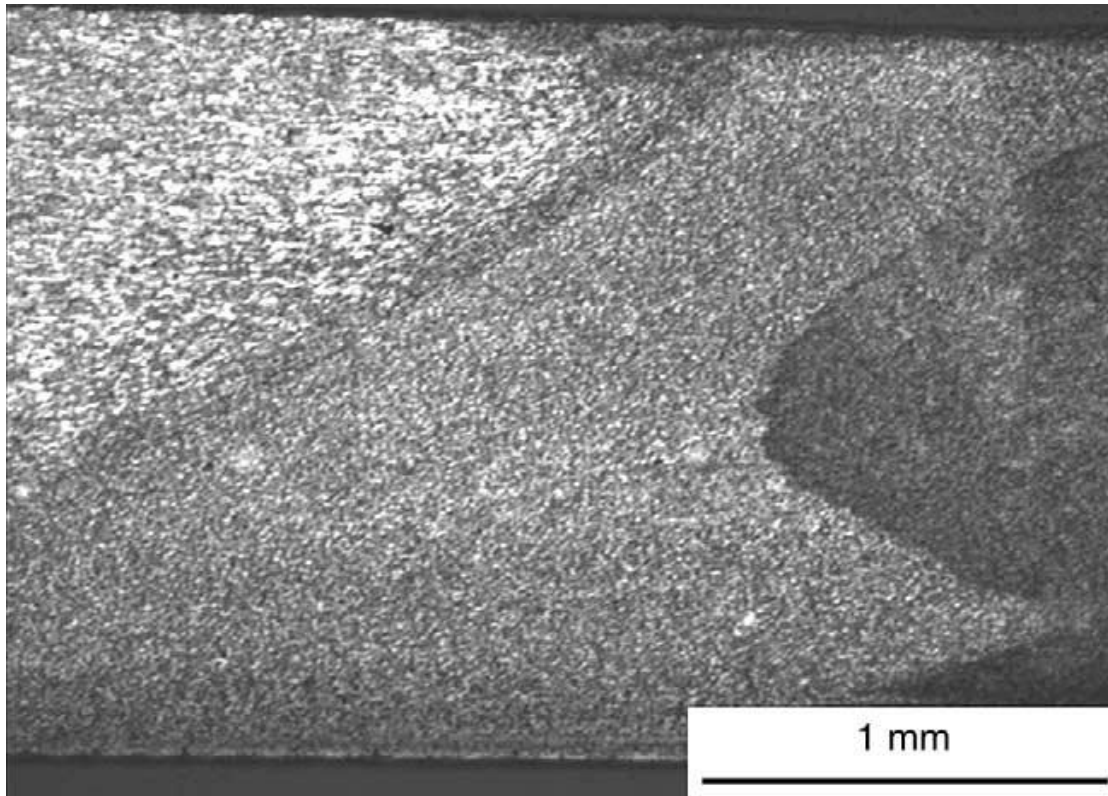
Μερικά από τα κράματα αλουμινίου μπορεί να συγκολληθούν με μεθόδους τεχνικής αντίστασης κατά τις οποίες υπάρχει μια εκτεταμένη Παρασκευή της επιφάνειας και ελεγχόμενος σχηματισμός του οξειδίου. Η μέθοδος συγκόλλησης με τριβή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα κράματα αλουμινίου θεωρώντας την δημιουργία υπεροξειδίων στην επιφάνεια η οποία δεν υφίσταται υποβάθμιση για την οξείδωση και καμία διαδικασία καθαρισμού δεν θεωρείται απαραίτητη να εφαρμοστεί πριν τη συγκόλληση. Επιπλέον η συγκεκριμένη μέθοδος αντιμετωπίζει προβλήματα όπως την ύπαρξη φάσεων στερεοποίησης και του σχηματισμού πορώδους που εμφανίζονται στη συγκόλληση σύντηξης. Επί του παρόντος η συγκόλληση με τριβή χρησιμοποιείται σε μεγάλες γραμμές παραγωγής για τη συγκόλληση παρόμοιων υλικών ενώ λίγες είναι οι αναφορές που εξετάζουν τη μέθοδο για τη συγκόλληση ανόμοιων ποσοστών (Shigematsu et al. 2003).

Οι Cavaliere et al (2006) μελέτησαν τις επιτεύξιμες μηχανικές ιδιότητες και μικροδομικές ανόμοιων συγκολλημένων ελασμάτων κραμάτων αλουμινίου 2024-T3 και 7075-T6 με τη γραμμική σύνδεση να είναι ανάλογη με την περιστροφική κατεύθυνση. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται για συγκόλληση ελάσματα κράματος αλουμινίου 2024 και 7075 σε συνθήκες συγκόλλησης με τριβή. Και τα δύο ελάσματα είχαν συγκεκριμένο πάχος 2,5mm ενώ η διαμήκης κατεύθυνση της γραμμής FSW ήταν ανάλογη προς την περιστροφική διεύθυνση του κράματος 2024 και παράλληλη προς την περιστροφική διεύθυνση του κράματος 7075. Η συγκεκριμένη επιλογή σύνδεσης έγινε προκειμένου να επιτευχθεί ο κύριος μηχανικός συνδυασμός με βάση τις συμβατικές δοκιμές συγκόλλησης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Η ταχύτητα συγκόλλησης ήταν 2,67mm/sec σύμφωνα με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους συγκόλλησης. Το εργαλείο συγκόλλησης στερεώθηκε στον περιστρεφόμενο άξονα προς την αντίθετη κατεύθυνση των δεικτών του ρολογιού ενώ τα τεμάχια στερεώθηκαν στο πίσω μέρος. Το άκρο του εργαλείου έχει διάμετρο 6mm και μήκος 2,5mm.

Το προφίλ σκληρότητας Vicker για τη ζώνη συγκόλλησης προσδιορίστηκε στη διατομή συγκόλλησης με σκληρόμετρο vicker φορτίου 200gf για 15s. Οι μηχανικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα είδη με βαθμονομημένες διαστάσεις μήκους 40mm και 16mm πάχους. Όλα τα είδη επιτεύχθηκαν μέσω του μηχανήματος ηλεκτρικής αποφόρτισης. Το αξονικό φορτίο που εφαρμόστηκε ήταν ανάλογο στη γραμμή συγκόλλησης. Οι δοκιμές τάσης πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να εκτιμηθούν οι στατικές ιδιότητες των συγκολλημένων συνδέσμων. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία ρεύματος χρησιμοποιώντας μια υδραυλική μηχανή δοκιμών με φορτίο 100kN, η ταχύτητα τίθεται στα 0,1mm/min σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-E8 και ένα εργαλείο επιμύκησης (Cavalliere et al. 2006).

Οι δοκιμές κόπωσης πραγματοποιήθηκαν σε αξονικό έλεγχο πλάτους ($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.1$). Η συχνότητα εργασίας ήταν 75Hz και όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε αστοχία ενώ ο σχεδιασμός είδους καλύπτει τις απαιτήσεις των προτύπων. Η προκύπτουσα μικροδομή εξετάστηκε με τη βοήθεια της οπτικής μικροσκοπίας αποκαλύπτοντας τη δομή των κόκκων και τις διαφορές της κατανομής των καθιζημάτων που παράγονται από τη διαδικασία.

Η οπτική παρατήρηση της συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου 2024 και 7075 απέδειξαν ότι υφίσταται ο κλασικός σχηματισμός της ελλειπτικής με μορφή «κρεμμυδιού» (onion) δομή στο κέντρο της συγκόλλησης γεγονός που επιβεβαιώνεται από τη μικροδομή με τους ανακρυσταλλοποιημένους κόκκους. Επιπλέον εντοπίζεται η θερμομηχανική ζώνη (TMAZ) (Cavalliere, et al. 2006).

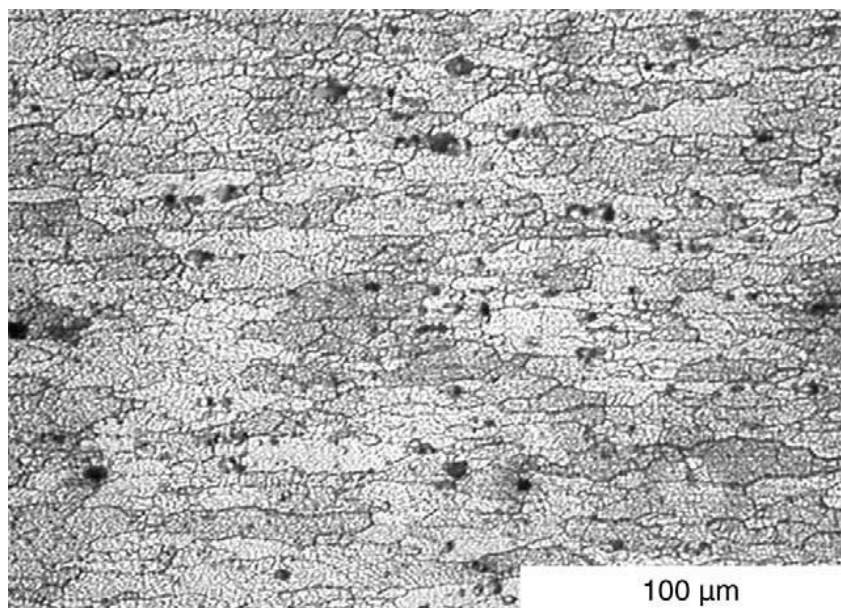


Σχήμα 4.10 Διατομή συγκολλήματος από την εργασία των Cavalliere et al (2006) όπου παρατηρείται η ζώνη nugget η ζώνη TMAZ και η ζώνη του βασικού υλικού.

Όσον αφορά στις μετρήσεις σκληρότητας η μέγιστη τιμή (150Hv) παρατηρείται στο κέντρο συγκόλλησης ενώ το προφίλ μικροσκληρότητας αυξάνεται τόσο στην πλευρά του κράματος 2024 όσο και στο 7075.

Η ζώνη nugget αναπτύσσεται 2mm μακριά από το κέντρο συγκόλλησης προς την πλευρά του AA2024 και αποτελείται από ομοιόμορφους και ισοαξονικούς κόκκους. Τα αποτελέσματα των Cavalliere et al. (2006) βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και υποδεικνύουν πως όσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες αναπτύσσονται στο υλικό και πλαστικές παραμορφώσεις τόσο μικρότεροι κόκκοι σχηματίζονται σε σχέση με το βασικό υλικό. Επιπλέον στην πλευρά του AA7075 η διάσταση των κόκκων αυξάνει σημαντικά και ο προσανατολισμός οδηγεί σε λιγότερο ισοαξονικό χαρακτήρα. Ειδικότερα σε απόσταση 4mm από το κέντρο συγκόλλησης εμφανίζονται κόκκοι εναπομείναντος μητρικού υλικού και η ζώνη αυτή αντιστοιχεί στην

Ζώνη Αναπτυσσόμενης Θερμότητας όπου η σκληρότητα είναι μικρότερη από αυτή του μητρικού υλικού.



Σχήμα 4.11: Κόκκοι του μητρικού υλικού που εμφανίζεται σε απόσταση 4mm από το κέντρο συγκόλλησης των συνδέσμων στην πλευρά του AA7075 (Cavalliere et al 2006).

Στην ίδια εργασία οι Cavalliere et al. (2006) σύγκριναν τις μηχανικές ιδιότητες των μητρικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση.

Πίνακας 4.5: Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων 2024 και 7075 ως μητρικά υλικά και κατά τη συγκόλληση (Cavalliere et al. 2006)

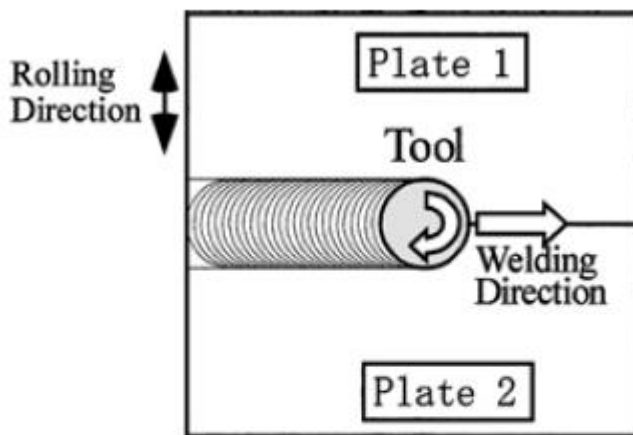
Material	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	E (GPa)
AA2024	380	490	17	72.4
AA7075	503	572	11	71
2024-7075 FSW	325	424	6	54

Τα συγκολλημένα είδη δείχνουν μικρότερες τάσεις κατά 0.2% και περιορισμένη επιμήκηση σε σχέση με το μητρικό υλικό. Όλα τα δοκιμαζόμενα δοκίμια υπόκεινται σε κόπωση πίσω από τη ζώνη συγκόλλησης προς το υλικό 2024 γεγονός που βρίσκεται σε συμφωνία με τη συμπεριφορά

απόκριση του κέντρου συγκόλλησης οδηγεί σε μεγαλύτερα κέντρα και αναπτυσσόμενες ζώνες θερμότητας σε σχέση με το μητρικό υλικό εξαιτίας των διαφορών στις διαστάσεις των κόκκων και τη συγκέντρωση των καθιζάμενων στοιχείων στην διεπιφάνεια συγκόλλησης (Cavalliere et al. 2006).

Επιπλέον οι Cavalliere et al. (2006) μελέτησαν τις δυναμικές ιδιότητες των υλικών μέσω πειραμάτων κόπωσης. Η παρουσία της γραμμής συγκόλλησης με τριβή μειώνει τη συμπεριφορά κόπωσης αλλά η σύγκριση με το μητρικό υλικό επιτρέπει τον καθορισμό της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης ως εναλλακτική τεχνολογία σύνδεσης των κραμάτων αλουμινίου.

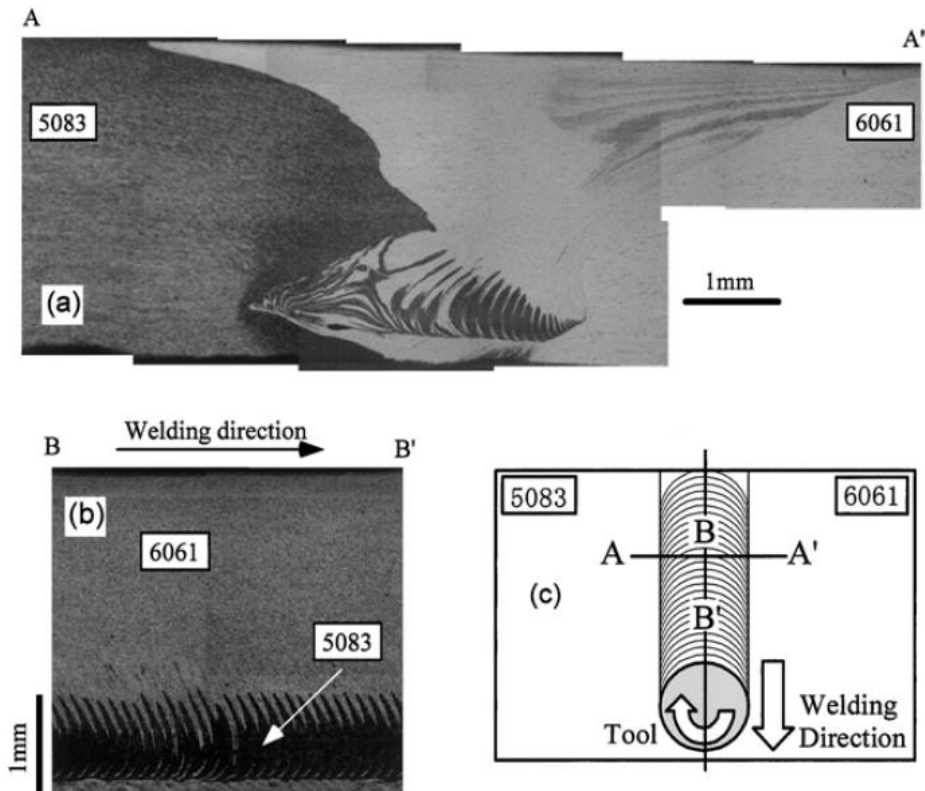
Οι Shigematsu et al (2003) εφάρμοσαν την μέθοδο συγκόλλησης με τριβή στα κράματα αλουμινίου 5083 και 6061 και μελέτησαν τις ιδιότητες της μικροδομής και τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημάτων. Για την μελέτη τους χρησιμοποίησαν πλάκες πάχους 3mm κράμματος 5083 (0,4%Si, 0.4%Fe, 0.4% Mn, 4% Mg) και κράματος 6061-T6 (0,7% Si, 0.7% Fe, 0.1% Mn, 1% Mg, 0.4% Cu, 0.1%Cr). Η διάμετρος του στελέχους του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 10mm ενώ η διάμετρος του εσωτερικού άκρου του εργαλείου ήταν 3mm και το ύψος του 2,8mm. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου ήταν 890rpm και 1540rpm ενώ οι ταχύτητες κίνησης της τράπεζας ήταν 118-155mm/min. Οι μικροδομές των δειγμάτων εξετάστηκαν με οπτική μικροσκοπία ενώ τα προφίλ μικροσκληρότητας Vickers και οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων εκτιμήθηκαν με δοκιμές τάσης.



No	Plate 1	Plate 2
No. 1	5083	5083
No. 2	6061	6061
No. 3	6061	5083

Σχήμα 4.12: Συνδυασμός των συνδεόμενων υλικών από τους Shigematsu et al (2003).

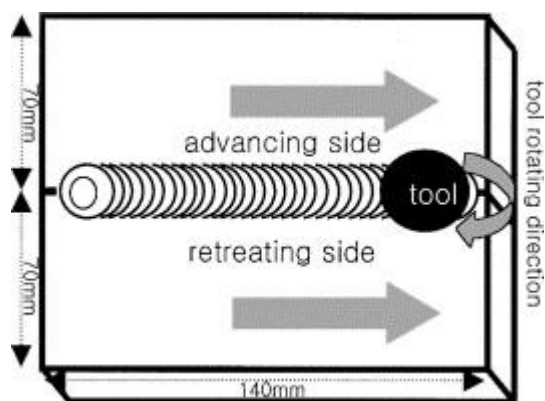
Τα κράματα 5083 και 6061 έχουν διαφορετική συμπεριφορά συγκόλλησης με αποτέλεσμα η ροή του μετάλλου από τις δύο πλευρές να είναι ορατή στη ζώνη συγκόλλησης. Όπως απέδειξαν οι Shigematsu et al (2003) στην πάνω πλευρά τα δύο κράματα αλουμινίου είναι ξεκάθαρα διαχωρισμένα ενώ αντίθετα ένα σύνθετο στρώμα δομής που αποτελείται από τα δύο κράματα εντοπίζεται στο κάτω τμήμα της συγκόλλησης. Η δομή αυτή αποδίδεται στην μεταφορική κίνηση του περιστροφικού εργαλείου και το βάθος του εισερχόμενου εργαλείου.



Σχήμα 4.13: α) Διατομές των κραμάτων 5083 και 6061, β) διατομή ανάλογη στην κατεύθυνση συγκόλλησης γ) Διατομή παράλληλη στην κατεύθυνση συγκόλλησης (Shigematsu et al. 2003).

Από τις μετρήσεις σκληρότητας οι Shigematsu et al. (2003) απέδειξαν πως στη ζώνη σύνδεσης των κραμάτων 5083-5083 η σκληρότητα ήταν μεγαλύτερη από την αρχική τιμή εξαιτίας της ομοιόρφης κατανομής των κόκκων. Παρόλα αυτά στη ζώνη σύνδεσης των 6061-6061 η σκληρότητα μειώνεται απότομα. Η σκληρότητα εξαρτάται από την κατανομή των ιζημάτων όπως το Mg_2Si . Η μικρή σκληρότητα αποδίδεται στην επαναδιάταξη των ιζημάτων κατά την συγκόλληση με τριβή. Στην περίπτωση της συγκόλλησης με γήρανση η σκληρότητα στη διεπιφάνεια των συνδεόμενων τεμαχίων αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του χρόνου γήρανσης. Παρόλα αυτά επισημαίνεται πως έξω από την περιοχή nugget δεν είναι εφικτή η ανάκτηση της σκληρότητας ενώ αποδεικνύεται πως η διάλυση των ιζημάτων συμβαίνει σπάνια στην ζώνη ανάπτυξης θερμότητας κατά την συγκόλληση με τριβή και η ανάπτυξη των κόκκων αποτελεί παράγοντα επίδρασης για τη σκληρότητα.

Οι Lee et al (2003) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου 3056 και 6061 που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο συγκόλλησης με τριβή σε διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης. Και οι δύο πλευρές της ζώνης συγκόλλησης διαιρούνται στη ζώνη επανεκατεργασίας και στην αναπτυσσόμενη ζώνη λόγω της σχέσης ανάμεσα στην κατεύθυνση περιστροφής του εργαλείου και στην κατεύθυνση μετατόπισης της τράπεζας.



Σχήμα 4.14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης με τριβή (Lee et al. 2003).

Οι Lee et al. (2003) στην εργασία τους χρησιμοποίησαν τα κράματα αλουμινίου A356 και 6061 με μήκος 147mm, πλάτος 70mm και πάχος 4mm.

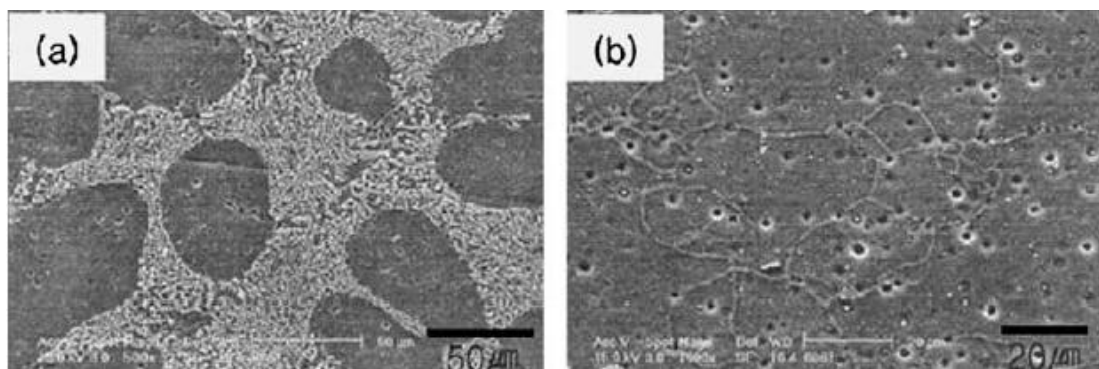
Πίνακας 4.6: Η χημική σύσταση των κραμάτων στην εργασία των Lee et al. (2003)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A356	7.006	0.136	0.096	0.002	0.25	0.008	0.05	0.154	Bal.
6061	0.567	0.173	0.212	0.031	0.92	0.066	0.021	0.018	Bal.

Στη συγκεκριμένη εργασία ως παράμετρος συγκόλλησης θεωρήθηκε μόνο η ταχύτητα η οποία μεταβαλλόταν από 87 έως 267mm/min. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου ήταν 1600rpm και η γωνία του 3° . Το εργαλείο συγκόλλησης περιστρεφόταν στην αντίθετη με το ρολόι κατεύθυνση και μεταφέρονταν. Το προφίλ σκληρότητας Vickers της ζώνης συγκόλλησης μετρήθηκε σε μια διατομή και ανάλογα προς τη διεύθυνση συγκόλλησης χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο σκληρόμετρο με 100gf φορτίο για 10s. Οι δοκιμές τάσης διεξήχθησαν σε θερμοκρασία δωματίου και

πραγματοποιήθηκαν στην κατεύθυνση της συγκόλλησης με μηχάνημα ηλεκτρονικής αποφόρτισης. Τέλος οι μεταβολές της μικροδομής από τη ζώνη συγκόλλησης προς το μητρικό υλικό εξετάστηκαν με την οπτική μικροσκοπία και την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) (Lee et al. 2003).

Οι Lee et al. (2003) απέδειξαν πως η συγκόλληση των δύο κραμάτων επιτυγχάνεται χωρίς να εμφανίζεται πορώδης ή αταξίες σε οποιαδήποτε πλευρά της συγκόλλησης χωρίς να εξαρτώνται από τις συνθήκες συγκόλλησης. Από την οπτική μικροσκοπία αποδεικνύεται πως όταν τα κράματα A356 τοποθετούνται στην ζώνη επανεκατεργασίας καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης ανάδευσης και το ίδιο συμβαίνει όταν σε αυτήν τοποθετείται το κράμα 6061. Κατά συνέπεια η μακροδομή της ζώνης ανάδευσης εξαρτάται από τα υλικά που στερεοποιούνται στην πλευρά της επανεκατεργασίας και μερικώς από τα υλικά στην πλευρά ανάδευσης. Επιπλέον η μικροδομή των κραμάτων απέδειξε ότι το κράμα A356 αποτελείται από την α - φάση και την ευτυχτική δομή του Al-Si. Η αρχική α - φάση καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από την ευτυχτική δομή επειδή το A356 κράμα περιέχει μικρότερη περιεκτικότητα Si σε σχέση με το Al-Si. Από την άλλη αποδείχθηκε πως το κράμα αλουμινίου 6061 έχει ισοαξονική δομή με μέσο μέγεθος κόκκων 15-20 μm .



Σχήμα 4.15: Η μικροδομή των κραμάτων A356 a) και 6061 (b) (Lee et al. 2003).

Από την εργασία των Lee et al. (2003) συνοπτικά προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα: α) Οι μικροδομές των συγκολλήσεων των κραμάτων A356 /6061Al είναι ο συνδυασμός των μικροδομών των δύο κραμάτων. Η

δακτυλοειδής μορφή με τη μορφή «κρεμμυδιού» αναπτύσσεται στη ζώνη ανάμιξης. Β) Η μικροδομή της ζώνης ανάδευσης αποτελείται κυρίως από τα υλικά που σταθεροποιούνται στην πλευρά επανεπεξεργασίας και γ) οι μηχανικές ιδιότητες της ζώνης ανάδευσης είναι μεγαλύτερες όταν το κράμα 6061 σταθεροποιείται στην πλευρά επανεπεξεργασίας γεγονός που σχετίζεται με τη σύνθετη μικροδομή της ζώνης ανάδευσης.

Οι Khodir et al. (2007) μελέτησαν τις επιδράσεις της ταχύτητας περιστροφής και της σταθεροποίησης της θέσης ενός υλικού στη μικροδομή, στην κατανομή της σκληρότητας και τις ιδιότητες εφελκυσμού για τα κράματα 2024-T3 και 7075-T6 που συγκολλούνται με τη μέθοδο της τριβής. Για τους σκοπούς της εργασίας τους χρησιμοποίησαν πλάκες των δύο κραμάτων αλουμινίου 2024-T3 και 7075-T6 με πάχος 3mm και πραγματοποίησαν τη συγκόλληση με χαλύβδινο εργαλείο με κορμό 12mm και καθετήρα σπειρώματος 4mm.

Πίνακας 4.7: Χημική σύσταση των κραμάτων Al 2024-T3 και 7075-T6 (Khodir, et al. 2007)

Materials	Chemical compositions (mass %)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA2024-T3	0.01	0.08	5.35	0.67	2.07	0.09	0.04	0.05	Bal.
AA7075-T6	0.01	0.08	2.4	0.09	2.52	0.21	7.99	0.06	Bal.

Πίνακας 4.8: Μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al 2024-T3 και 7075-T6 (Khodir, et al. 2007)

Materials	Mechanical properties at room temperature		
	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
AA2024-T3	327	461	29.5
AA7075-T6	498	593	17.7

Ο οριζόντιος άξονας ήταν στραμένος κατά 3° σε σχέση με τον κάθετο. Η ταχύτητα συγκόλλησης διατηρούνταν σταθερή στα 100mm/min και οι ταχύτητες περιστροφής ήταν 400, 800, 1200, 1600 και 2000min⁻¹ ενώ για

κάθε συνθήκη συγκόλλησης μεταβάλλονταν η τοποθέτηση των δύο κραματικών πλακών.

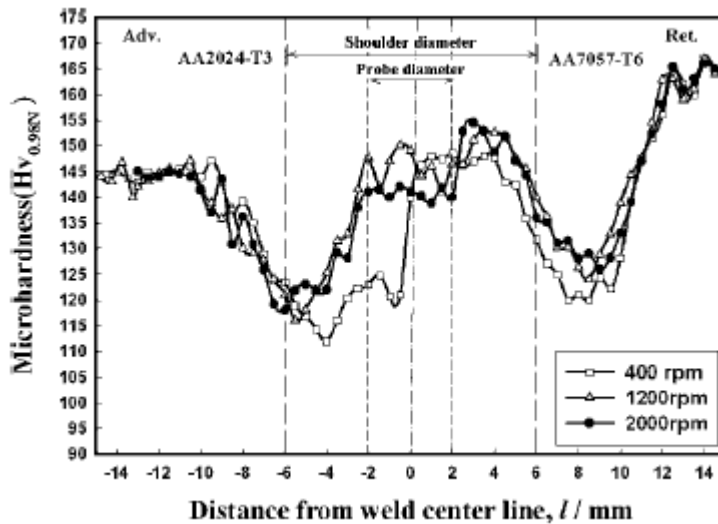
Πίνακας 4.9: Συνθήκες συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν από τους Khodir et al. (2007)

Sample number	Welding speed mm/min	Rotation speed (min ⁻¹)	Probe diameter (mm)	Shoulder Diameter (mm)	Advancing side	Retreating side
1	100	400	4	12	AA2024-T3	7075-T6
2		800				
3		1200				
4		1600				
5		2000				
6		400			7075-T6	AA2024-T3
7		800				
8		1200				
9		1600				
10		2000				

Στη συγκεκριμένη εργασία για ταχύτητα περιστροφής 400min⁻¹ δεν παρατηρήθηκε ανάμιξη των δύο κραμάτων στην ζώνη ανάμιξης ενώ παρατηρήθηκε ένα όριο ανάμεσα τους το οποίο ήταν ανεξάρτητο από τη δεδομένη τοποθέτηση των υλικών. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί στην δομή ανάμιξης και ένας δακτύλιος σε σχήμα «κρεμμυδιού» σχηματίζεται με την περιοδική μεταβολή του μεγέθους των ισοαξονικών κόκκων και την ετερογενή κατανομή των κραματικών στοιχείων στη ζώνη ανάμιξης. Για ταχύτητα περιστροφής 2000min⁻¹ ο δακτύλιος εξαφανίζεται και η σύσταση της ζώνης ανάμιξης από το υλικό που τοποθετείται στη θέση ανάπτυξης. Επιπλέον αποδείχθηκε πως το μέσο μέγεθος των κόκκων στη ζώνη ανάμιξης αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας περιστροφής ανεξάρτητα από τις σταθερές τοποθετήσεις των υλικών (Khodir et al. 2007).

Στα 400min⁻¹ ταχύτητα περιστροφής επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σκληρότητα στη ζώνη ανάμιξης του κράματος 7075-T6 ενώ δεν πραγματοποιείται ανάμιξη των δύο κραμάτων. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η σκληρότητα αυξάνεται και παρατηρείται διακύμανση στη ζώνη ανάμιξης εξαιτίας του σχηματισμού του δακτυλίου. Η ελάχιστη σκληρότητα παρατηρήθηκε στη ζώνη

ανάπτυξης θερμότητας στο κράμα 2024-T3 και οι τιμές της αυξάνονται απότομα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 4.16: Προφίλ σκληρότητας σε μέσα πάχη μεταφοράς προς την κατεύθυνση συγκόλλησης των συγκολλημένων συνδέσμων για διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής όπου στην πλευρά ανάπτυξης σταθεροποιείται το AA2024-T3 (Khodir et al. 2007).

Για ταχύτητα περιστροφής 2000min^{-1} η σκληρότητα στη ζώνη ανάμιξης αυξάνεται απότομα όταν στην πλευρά ανάπτυξης τοποθετείται το 7075-T6. Στην περίπτωση των δοκιμών εφελκυσμού οι σύνδεσμοι αταξιών – ελεύθερων συνδέσμων υπόκεινται σε κόπωση στην ζώνη ανάπτυξης θερμότητας στην πλευρά του AA2024-T3 ενώ οι αταξίες που περιέχουν συνδέσμος υπόκεινται σε κόπωση στη ζώνη ανάμιξης. Η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού των 423MPa επιτυγχάνεται για ταχύτητα περιστροφής 1200min^{-1} όταν το 2024-T3 κράμα αλουμινίου βρίσκεται στην πλευρά ανάπτυξης.

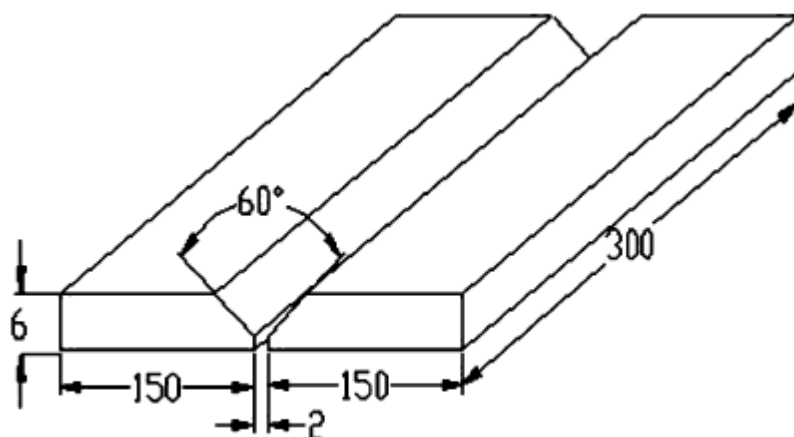
Οι ιδιότητες εφελκυσμού στην διαμήκη κατεύθυνση στη ζώνη ανάμιξης δείχνουν μεγαλύτερες τιμές όταν τα κράματα 7075-T6 βρισκόταν στην πλευρά προώθησης. Η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού των 491MPa επιτεύχθηκαν στα 1200min^{-1} της ταχύτητας περιστροφής όταν τα κράματα 7075-T6 Al τοποθέτηκε στην πλευρά προώθησης (Khodir et.al., 2007).

4.3 Άλλες μέθοδοι συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου

Όπως ήδη αναφέρθηκε η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξαιτίας της ανάγκης περιορισμού του υψηλού κόστους που σχετίζεται με την δημιουργία συνδέσεων. Παρόλα αυτά πολλά από τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική δεν προτείνονται ως κατάλληλα για την συγκόλληση σύντηξης. Στα ιδιαίτερα προβλήματα που αφορούν την συγκολλησιμότητα τους περιλαμβάνονται οι ρωγμές στερεοποίησης μέσα στη ζώνη σύντηξης, οι ρωγμές υγροποίησης στα όρια ανάμεσα στη ζώνη σύντηξης και στη ζώνη ανάπτυξης θερμότητας καθώς και η μικρή απόδοση διάβρωσης (Davis, 1993). Αυτά τα προβλήματα εντοπίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό στα κράματα της 2xxx και της 7xxx σειράς καθώς αυτά τα υλικά έχουν μεγαλύτερο σημείο πήξης και σχηματίζουν ευηλεκτρικές φάσεις χαμηλού σημείου τήξης.

Οι ρωγμές στερεοποίησης πραγματοποιούνται όταν οι θερμικές τάσεις που δημιουργούνται κατά την ψύξη πραγματοποιείται η αντοχή του στερεοποιημένου συγκολλημένου μετάλλου (David, et al. 2003). Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται και μειώνουν την τάση ρωγμής στερεοποίησης περιλαμβάνουν την μεταβολή της σύστασης συγκόλλησης, μέσω της προσθήκης ενός καλωδίου γεμίματος την κλειστή διαδικασία ελέγχου και τον έλεγχο της δομής κόκκων μέσα στη ζώνη σύντηξης (Davis, 1993).

Οι Lakshminarayanan et al. (2009) μελέτησαν την επίδραση διαφόρων τεχνικών συγκόλλησης όπως τη GTAW, GMAW και FSW στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου AA6061. Οι διαδικασίες συγκόλλησης με αέριο τόξο βολφραμίου (GTAW) και μεταλλικό τόξο συγκόλλησης (GMAW) προτιμώνται ως διαδικασία συγκόλλησης εξαιτίας την εύκολης εφαρμογής τους και το φθηνότερο κόστος τους. Για την πραγματοποίηση της εργασίας τους χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικές πλάκες Al6061 οι οποίες διαμορφώθηκαν σε διαστάσεις 300mm x 150mm προκειμένου να υποστούν συγκόλληση GTA και GMA. Η κατεύθυνση συγκόλλησης ήταν η ίδια με την κατεύθυνση περιστροφής.



a Single 'V' butt joint

Σχήμα 4.17: Διαστάσεις της διαμόρφωσης συγκολλήσεων (Lakshminarayanan et al., 2009).

Για τις συγκολλήσεις GTA και GMA χρησιμοποιήθηκε γέμισμα από κράμα AA4043 και αέριο αργό.

Πίνακας 4.10: Συνθήκες συγκόλλησης και διαδικασίες (Lakshminarayanan et al., 2009).

Process	GMAW	GTAW
Welding machine	Lincoln, USA	Lincoln, USA
Tungsten electrode diameter (mm)	–	3
Filler rod/wire diameter (mm)	1.6	3.0
Voltage (volts)	20	20
Current (amps)	190	175
Welding speed (mm/min)	110	130
Heat input (kJ/mm)	2.021	1.212
Shielding gas	Argon	Argon
Gas flow rate (lit/min)	16	16
Tool rotational speed (rpm)	–	–
Axial force (kN)	–	–
Tool pin profile	–	–
Tool shoulder diameter (mm)	–	–
Pin diameter (mm)	–	–
Pin length (mm)	–	–

Στη συγκεκριμένη εργασία (Lakshminarayanan et al., 2009) αποδείχθηκε ότι οι συγκολλήσεις GTA και GMA παρουσιάζουν μικρότερες τιμές αντοχής από

την συγκόλληση FSW. Επιπλέον η σκληρότητα είναι μικρότερη στην περιοχή του συγκολλημένου μετάλλου συγκριτικά με τις περιοχές ανάπτυξης θερμότητας και του βασικού υλικού ανεξάρτητα από την τεχνική συγκόλλησης που χρησιμοποιείται. Στις συνδέσεις GMAW καταγράφεται μικρή σκληρότητα ενώ η μεγαλύτερη παρατηρείται στην συγκόλληση με τριβή.

Πίνακας 4.11: Ιδιότητες εφελκυσμού των συγκολλημάτων (Lakshminarayanan et al., 2009)

Joint Type	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in c.s.a (%)	Notch tensile strength (MPa)	Notch strength ratio (NSR)	Joint Efficiency (%)	Weld region hardness (VHN)
GMAW	141	163	8.4	5.80	175	1.073	48.80	58
GTAW	188	211	11.8	8.26	228	1.091	62.57	70
FSW	224	248	14.2	9.56	279	1.125	74.25	85

Τέλος ο σχηματισμός τέλειων ισοαξονικών κόκκων και η ομοιόμορφη κατανομή παρατηρείται στην περιοχή συγκόλλησης γεγονός που αποδίδει μεγαλύτερες ιδιότητες εφελκυσμού στη FSW σε σχέση με τις άλλες δύο εξεταζόμενες μεθόδους.

Οι Norman et al. (2003) μελέτησαν την ενίσχυση των κραμάτων αλουμινίου AA2024 και AA7475 με σκάνδιο προκειμένου να προσδιορίσουν την ικανότητα συγκόλλησης τους. Με τη βοήθεια της μεταλλογραφίας εξετάστηκε κατά το πόσο η προσθήκη σκανδίου μπορεί να βελτιώσει τη δομή της ζώνης σύντηξης ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι αναλύσεις DSC και XRD για τη μελέτη της επίδρασης του προστιθέμενου σκανδίου στο σχηματισμό φάσης στην ψύξη των κραμάτων.

Τα κράματα με ελεύθερη προσθήκη σκανδίου είχαν ονομαστικές συστάσεις σε AA2024 και AA7475 $Al/4.5\%Cu/1.5\%Mg$ και $Al/5.5\%Zn/2.2\%Mg/1.5\%Cu$. Η προσθήκη του σκανδίου έγινε στα τήγματα των κραμάτων με τη χρήση ενός κράματος $Al-2\%Sc$ με δεδομένες συγκεντρώσεις 0-0,8% κ.β. Το σκάνδιο προστέθηκε είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με 0,12% Ti και 0,15% Zr. Οι διαφορετικές κραματικές συστάσεις χυτεύθηκαν σε ειδικές μήτρες που παράγουν ρυθμούς ψύξης από 10K/sec στην κορυφή της μήτρας έως

100K/sec κοντά στο άκρο της μήτρας. Η πραγματική σύσταση των κραμάτων προσδιορίστηκε με ανάλυση των ψυχόμενων κραμάτων μετά τη χύτευση. Μετά τη χύτευση δείγματα ελήφθησαν από τρεις θέσεις κατά μήκος της χύτευσης που ανταποκρίνεται σε διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης

Στην εργασία των Norman et al. (2003) μελετήθηκε η προσθήκη σκανδίου σε χυτευμένα κράματα ως προς τη μικροδομή τους. Τα μεγέθη των κόκκων ήταν ομοιόμορφα στην περίπτωση των κραμάτων της σειράς 7000 και χρειάζεται μικρή ποσότητα σκανδίου προκειμένου να επιτευχθεί μέγεθος 25μm στα 100K/s. Η λείανση των κόκκων επιτυγχάνεται εξαιτίας της ιζηματοποίησης του κυβικού Li_2Al_3Sc ως κύρια σωματίδια στο τήγμα. Στο κράμα 2024 η προσθήκη του σκανδίου αποδείχθηκε πως προκαλεί αλληλεπίδραση με το χαλκό οδηγώντας σε μεταβολή του τρόπου στερεοποίησης.

Η συγκόλληση με δέσμη laser είναι πιο δύσκολη στα κράματα αλουμινίου σε σχέση με τα κράματα του χάλυβα εξαιτίας της μεγάλης τους αντανάκλαστικότητα, τη μεγαλύτερη τους θερμική αγωγιμότητα και τη μικρότερη τους πυκνότητα (Pierron et al. 2007).

Οι Sanchez-Amaya (2009α) μελέτησαν τη συγκόλληση με τη μέθοδο laser των κραμάτων του αλουμινίου 5083 και 6082. Η δίοδος της δέσμης laser που χρησιμοποιήθηκε είχε μέγιστη ισχύ 2.8kW προκειμένου να δημιουργηθούν συγκολλήσεις στα άκρα με μεγαλύτερη διείσδυση στη ζώνη αγωγής. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα κράματα αλουμινίου 5083-T0 και 6082-T6 με χημική σύσταση που φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.12: Χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν από τους Sanchez-Amaya (2009α)

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Pb	Ti	Ga	V	Al
5083-T0	0.1	0.30	0.02	0.50	4.22	-	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	94.73
6082-T6	1.03	0.34	0.06	0.57	0.87	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	-	97.04

Τα ελάσματα των συγκεκριμένων κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν από τους Sanchez-Amaya (2009α) είχαν πάχος 3mm για το 5083 και 4mm στην περίπτωση του 6082 και κόπηκαν σε μικρότερα δείγματα με μήκος 70mm και πλάτος 14mm. Πριν τη συγκόλληση αυτά τα τεμάχια εργασίας ανακατεύτηκαν με λευκά σωματίδια corindon προκειμένου να αυξηθεί σημαντικά η ικανότητα των κραμάτων στην απορρόφηση της ακτινοβολίας και να μειωθεί το επίπεδο αντανακλαστικότητας του κράματος. Επιπλέον με την ανάμιξη αυτή ενισχύεται η αντίσταση στη διάβρωση. Μετά την ανάμιξη τα συγκολλημένα άκρα των δειγμάτων γυαλίστηκαν με γυαλόχαρτο και η επιφάνεια τους καθαρίστηκε στη συνέχεια με ακετόνη και υπέστη κατεργασία με laser. Οι πλευρικές συγκολλήσεις των κραμάτων πραγματοποιήθηκαν με δέσμη δίοδου laser μέγιστης ισχύος 2.8 kW.

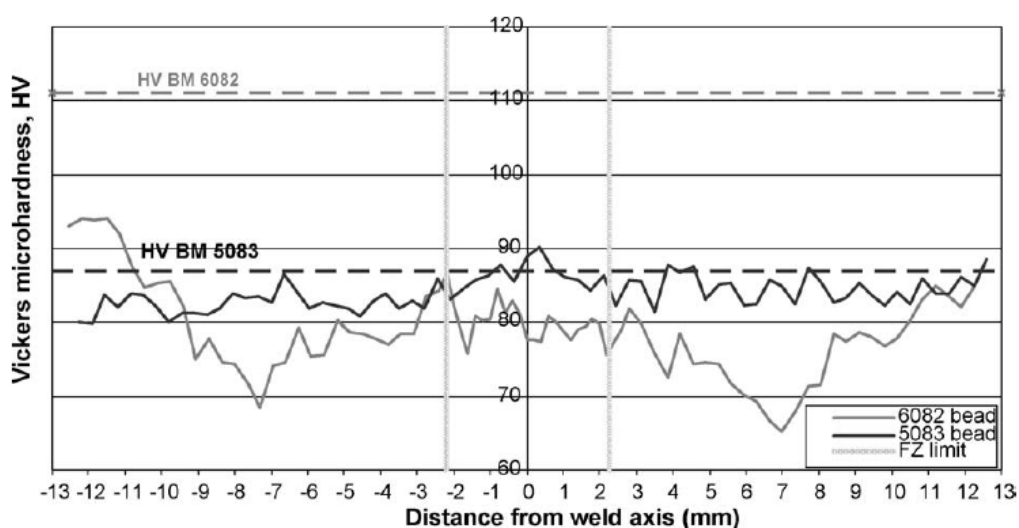
Πίνακας 4.13: Παράμετροι λειτουργίας με υψηλής ισχύος δίοδο laser (Sanchez-Amaya 2009α)

Laser beam configuration	Unit	Value
Emission mode	–	Continuous wave
Laser light wavelength	nm	940 ± 10, 808 ± 10
Laser power	W	1500–2750
Focus diameter	mm	2.04
Focal position	–	At specimen surface
Working distance	mm	69.3
Spot size on surface	mm ²	2.2 × 1.7
Weld bead length	mm	60

Αποδείχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία ότι πετυχαίνονται πλευρικές συγκολλήσεις με μεγαλύτερη διείσδυση που φτάνει το βάθος των 3mm στο κράμα 5083 και μέχρι 2.3mm στην περίπτωση του 6082. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες οι τιμές διείσδυσης του 5083 είναι μέχρι και 40% μεγαλύτερη από το 6082 γεγονός που σχετίζεται με τις θερμικές ιδιότητες των κραμάτων οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από την ποσότητα των κραματικών στοιχείων. Επιπλέον διατυπώθηκε μια έκφραση που σχετίζεται με το βάθος της συγκόλλησης την ισχύ του laser και τον ρυθμό επεξεργασίας. Η συγκεκριμένη εξίσωση περιέχει συντελεστές ο προσδιορισμός των οποίων γίνεται από την προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων για το βάθος διείσδυσης της

συγκόλλησης. Οι τιμές διείδυσης που προέκυψαν βρίσκονται σε συμφωνία με τις πλευρικές συγκολλήσεις και στα δύο εξεταζόμενα κράματα (Sanchez-Amaya 2009α).

Στην ίδια εργασία (Sanchez-Amaya 2009α) μελετήθηκε η μικροδομή, η μικροσκληρότητα και η αντίσταση στη διάβρωση των πλευρικών συγκολλήσεων. Αποδείχθηκε ότι η μικροδομή είναι παρόμοια και για τα δύο κράματα σε όλες τις εξεταζόμενες συνθήκες. Επιπλέον θεωρείται πως η ζώνη σύντηξης χαρακτηρίζεται από δύο περιοχές: την εξωτερική στην οποία αναπτύσσεται μια δενδριτική δομή και στην εσωτερική με την κανονική ιζηματοποίηση των δευτερεύοντων φάσεων στο στερεό διάλυμα πλέγματος των κραμάτων αλουμινίου που εξετάζονται. Τέλος αποδείχθηκε πως και στα δύο κράματα η μικροσκληρότητα της ζώνης σύντηξης είναι μεγαλύτερη από αυτή του υλικού βάσης.



Σχήμα 4.18: Προφίλ μικροσκληρότητας για τις πλευρικές συγκολλήσεις των κραμάτων 5083 και 6082. Sanchez-Amaya (2009α)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το κόστος της διαδικασίας συγκόλλησης αποτελεί σημαντική παράμετρο για το σχεδιασμό της διεργασίας. Υπάρχουν τρεις απλές μέθοδοι για την εκτίμηση του κόστους που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη εργασία: το κόστος ανά μονάδα, το κόστος ανά μήκος συγκόλλησης και το κόστος ανά μέθοδο.

Το ερώτημα που τίθεται συχνά στις βιομηχανίες που ασχολούνται με τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου είναι κατά πόσο είναι εφικτή η εκτίμηση του κόστους της συγκεκριμένης διεργασίας και σε τι ποσοστό αυτή συνεισφέρει στο συνολικό κόστος της παραγωγής ενός προϊόντος (Miller, 2004).

Η γνώση των παραγόντων που επηρεάζουν τα κόστη συγκόλλησης μπορούν να βοηθήσουν μια εταιρεία να εστιάσει στις ενέργειες που πρέπει να ληφθούν έτσι ώστε να περιοριστεί το κόστος βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα της. Ένα ακριβές μοντέλο κόστους διευκολύνει τις συγκρίσεις μεταξύ των κατασκευαστικών εναλλακτικών ενώ ένα σωστό μοντέλο κόστους διευκολύνει την εκτίμηση των κερδών που επιτυγχάνονται με την αυτοματοποίηση της διεργασίας.

5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος συγκόλλησης

Σύμφωνα με τον Miller (2004) κάθε απόφαση για την υλοποίηση συγκόλλησης μπορεί να θεωρηθεί πως επηρεάζει το συνολικό κόστος της διεργασίας. Όσο περισσότεροι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του κόστους τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα λαμβάνονται. Επίσης θεωρώντας όλους τους σχετικούς παράγοντες αυξάνονται οι δυνατότητες μείωσης του κόστους. Ο καθορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν το κόστος συγκόλλησης γίνεται μέσω της απάντησης της ερώτησης « *Το κόστος αυτό θα υπήρχε αν το τεμάχιο δεν υφίσταται τη συγκόλληση?*». Απαντώντας αυτήν την

ερώτηση οι παράγοντες που μπορούν να θεωρηθούν ως καθοριστικοί για τις συγκολλήσεις είναι:

- Χρόνος για την προετοιμασία της σύνδεσης
- Χρόνος για την προετοιμασία του υλικού που θα υποστεί συγκόλληση
- Χρόνος συναρμολόγησης
- Χρόνος προθέρμανσης της σύνδεσης
- Χρόνος για στερέωση
- Χρόνος για τοποθέτηση
- Χρόνος για συγκόλληση
- Χρόνος για απομάκρυνση σκουριάς
- Χρόνος για απομάκρυνση σταγονιδίων
- Χρόνος επιθεώρησης
- Χρόνος για αλλαγή ηλεκτροδίων
- Χρόνος μετακίνησης συγκολλητή από τη μια θέση στην άλλη
- Χρόνος αλλαγής των ρυθμίσεων συγκόλλησης
- Χρόνος που σπαταλάει το προσωπικό για άσχετους λόγους
- Χρόνος επιδιόρθωσης αταξιών συγκόλλησης
- Κόστη που σχετίζονται με την ανακούφιση των τάσεων
- Κόστος ηλεκτροδίων
- Κόστος υλικών θωράκισης
- Κόστος ηλεκτρικής ισχύος
- Κόστος αέριου καυσίμου για προθέρμανση

Από τους προαναφερόμενους παράγοντες οι περισσότεροι είναι χρονικοί παράγοντες εξαιτίας του γεγονότος πως εκτός αν η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη ο χρόνος σχετίζεται με τις διαδικασίες συγκόλλησης καθώς και το κόστος του προσωπικού για την εφαρμογή της διαδικασίας.

5.3 Απλοποιημένα κόστη συγκόλλησης

Υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του κόστους συγκόλλησης (Miller, 2004): η απλή και η σύνθετη. Η σύνθετη προσέγγιση περιλαμβάνει υπολογιστικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη όλους τους παράγοντες. Τόσο τα σύνθετα όσο και τα απλοποιημένα μοντέλα υπολογισμού του κόστους περιέχουν ανακρίβειες αλλά και πάλι προβλέπουν με ιδιαίτερη ακρίβεια το κόστος.

Στα απλοποιημένα μοντέλα τα κόστη της συγκόλλησης εκτιμώνται με βάση το εργατικό κόστος και τα επιπλέον κόστη καθώς και με το κόστος των αναλώσιμων υλικών για τη συγκόλληση και τα υλικά θωράκισης που χρησιμοποιούνται. Στα επιπλέον κόστη συνήθως περιλαμβάνονται το κόστος εξοπλισμού επίβλεψης, το έμμεσο εργατικό κόστος κλπ. Στα απλοποιημένα μοντέλα υπολογισμού του κόστους τα υπεράνω κόστη συμπεριλαμβάνονται στο άμεσο εργατικό κόστος. Η βασική σχέση υπολογισμού του κόστους συγκόλλησης είναι:

Κόστος συγκόλλησης=Εργατικό κόστος+Κόστος αναλωσίμων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε ο Miller (2004) συμπεριλαμβάνει στους παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος συγκόλλησης διάφορους χρόνους που δεν σχετίζονται άμεσα με τη συγκόλληση. Η γενική παραδοχή που γίνεται είναι πως κάθε καθυστέρηση στη διαδικασία συγκόλλησης είναι επιβάρυνση κόστους αφού στην ουσία εκφράζει τη μη πραγματοποίηση της συγκόλλησης. Για την ακρίβεια των υπολογισμών λαμβάνεται υπόψη ο λόγος των ώρων που δαπανώνται στη συγκόλληση προς τις συνολικές ώρες εργασίας ο οποίος ονομάζεται συντελεστής λειτουργίας.

5.4 Βιβλιογραφική επισκόπηση για την εκτίμηση κόστους των κραμάτων αλουμινίου

Οι Mononen et al. (2003) συνεκρίναν την συγκόλληση με τριβή και τη συγκόλληση με μεταλλικό τόξο και απέδειξαν πως ο χρόνος παραγωγής για τη συγκόλληση με τριβή ήταν το 82% του θεωρούμενου χρόνου παραγωγής για τη συγκόλληση με μεταλλικό τόξο ενώ οι χρόνοι παραγωγής επίσης αποδείχθηκε ότι είναι συνάρτηση των παραμέτρων λειτουργίας του μηχανήματος συγκόλλησης και για την FSW βρέθηκε ότι κυμαίνεται από 22-70% του αντίστοιχου χρόνου στη MIG.

Οι Chodhuri et al. (2014) προσπάθησαν να αναπτύξουν ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση του κόστους της συγκόλλησης του κράματος AA6061 με τη μέθοδο τριβής (FSW) στο οποίο συμπεριέλαβαν τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συγκεκριμένη μέθοδο όπως την ταχύτητα περιστροφής την ταχύτητα συγκόλλησης και το φορτίο καθώς και την επίδραση των παραμέτρων αυτών στις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημάτος. Στόχος για την βελτιστοποίηση του κόστους θεωρήθηκε ότι επιτυγχάνεται με τη μείωση του χρόνου κατεργασίας της συγκόλλησης.

Οι υπολογισμοί του κόστους που πραγματοποιήθηκαν από τους Chodhuri et al. (2014) έγιναν για κράμα αλουμινίου AA 6061 σε μορφή πλακών με μήκος 300mm , 200mm πλάτος και 3mm πάχος. Οι παράμετροι λειτουργίας ελήφθησαν από τη θεωρητική μελέτη της συγκόλλησης. Οι ρυθμιζόμενες παράμετροι και οι επιδράσεις τους τοποθετούνται στην ορθογώνια μήτρα Taguchi (OA) ενώ οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης εκτιμήθηκαν από τη μελέτη των κύριων επιδράσεων κάθε θεωρούμενης παραμέτρου. Ο υπολογισμός του κόστους έγινε με βάση την ακόλουθη μεθοδολογία στην οποία ο υπολογισμός βασίζεται σε διάφορα στοιχεία κόστους που αφορούν στην συγκόλληση με τριβή.

Κόστος συγκόλλησης=Εργατικό κόστος (C_{LC})+Κόστος μηχανήματος (C_{MC})+Κόστος εργαλείων (C_{TC})+Κόστος ισχύος (C_{PC})+Κόστος υλικού (C_{mt})+Κόστος προ-διάτρησης (C_D)+Σταθερό κόστος (που δεν υπολογίζεται).

Ο χρόνος στον οποίο πραγματοποιείται η σύνδεση με συγκόλληση (WT) δίνεται από τη σχέση:

$WT = \text{Μήκος διαδρομής συγκόλλησης (L) / Ρυθμός τροφοδοσίας (F) + Βάθος διείδυσης (D) / ταχύτητα διείδυσης εισόδου (F) + Χρόνος παραμονής (T_d)$

Όπου L είναι το μήκος συγκόλλησης (mm),

F ο ρυθμός τροφοδοσίας (mm/min),

n ο αριθμός των περασμάτων συγκόλλησης,

d το βάθος διείδυσης (mm).

$T_d = \text{χρόνος παραμονής (min)}$

$WT = \text{χρόνος συγκόλλησης (min)}$

OF= συντελεστής λειτουργίας= 0,8

CL= κόστος εργασίας (Rs/hr)

TW= χρόνος για την προετοιμασία της συγκόλλησης

TS= χρόνος έναρξης (min)

CM= ρυθμός κατεργασίας (Rs/hr)

$T_{ch} = \text{Χρόνος αλλαγής εργαλείου (min)}$

MR=αξιοπιστία κατεργασίας (θεωρείται 95%)

Ο χρόνος ζωής του εργαλείου δίνεται από τη σχέση Chodhuri et al. (2014) :

$$\text{Χρόνος ζωής εργαλείου (TL)} = Q \times \left[\frac{60 \times C_t}{Cm} + T_{ch} \right] \times \left(\frac{1-n'}{n'} \right) \quad (5.1)$$

$$\text{Λόγος κοπής (Q)} = \left(\frac{\theta}{360} \right) \times L + L_{tot} \quad (5.2)$$

Όπου L είναι το μήκος της συγκόλλησης (mm), CT το μοναδιαίο κόστος του εργαλείου (Rs/tool), CM ο ρυθμός κατεργασίας (Rs/hr) και θ η γωνία

εμπλοκής ($^{\circ}$), T_{ch} ο χρόνος αλλαγής του εργαλείου και n' ο εκθέτης διάρκειας ζωής του εργαλείου Taylor που λαμβάνεται ίσος με 0.1.

Το συνολικό μήκος της συγκόλλησης δίνεται από τη σχέση:

L_{tot} =Μήκος συγκολληματος+οδηγός+ άνω μέρος διαδρομής (inches)

L_{tot} =μήκος συγκόλλησης + διάμετρος στελέχους

Η ισχύς που απαιτείται για τη συγκόλληση του AA6061 υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση (Chodhuri et al. 2014):

$$\text{Ισχύς (P)}= 1.33 \times 4 \times \mu \times F_x \times \pi \times \omega \times r_s \quad (5.3)$$

Όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής

F_x το φορτίο

P η ισχύς (kW)

ω η ταχύτητα του άξονα

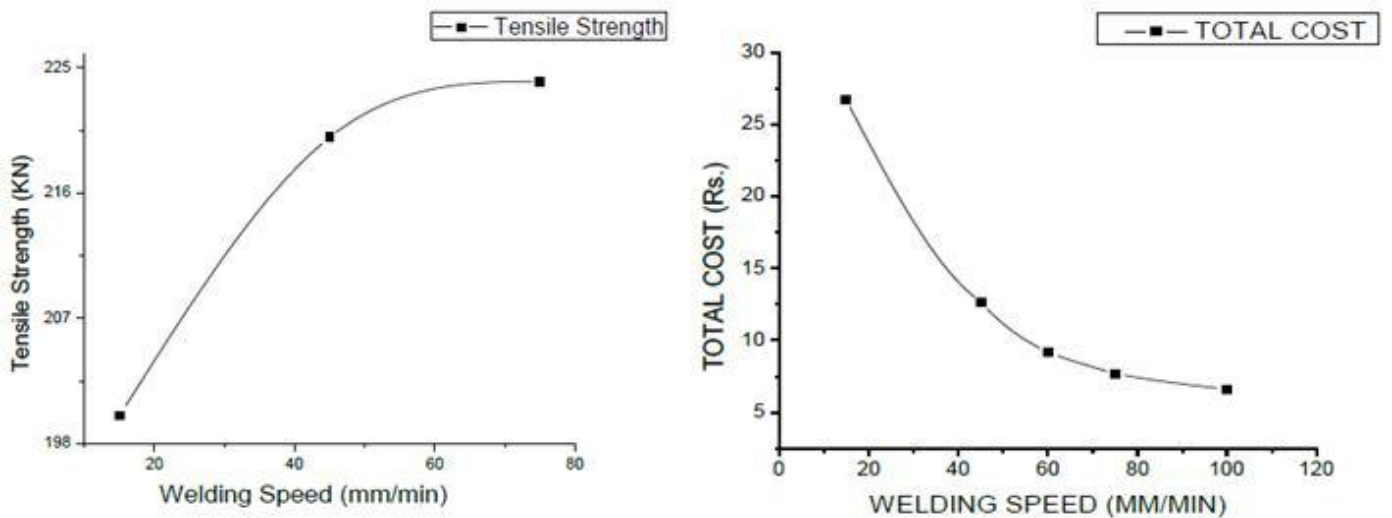
n ο αριθμός των περασμάτων

MR η αξιοπιστία του μηχανήματος που θεωρείται ίση με 93%

C_p το κόστος της ισχύος (Rs/kWh)

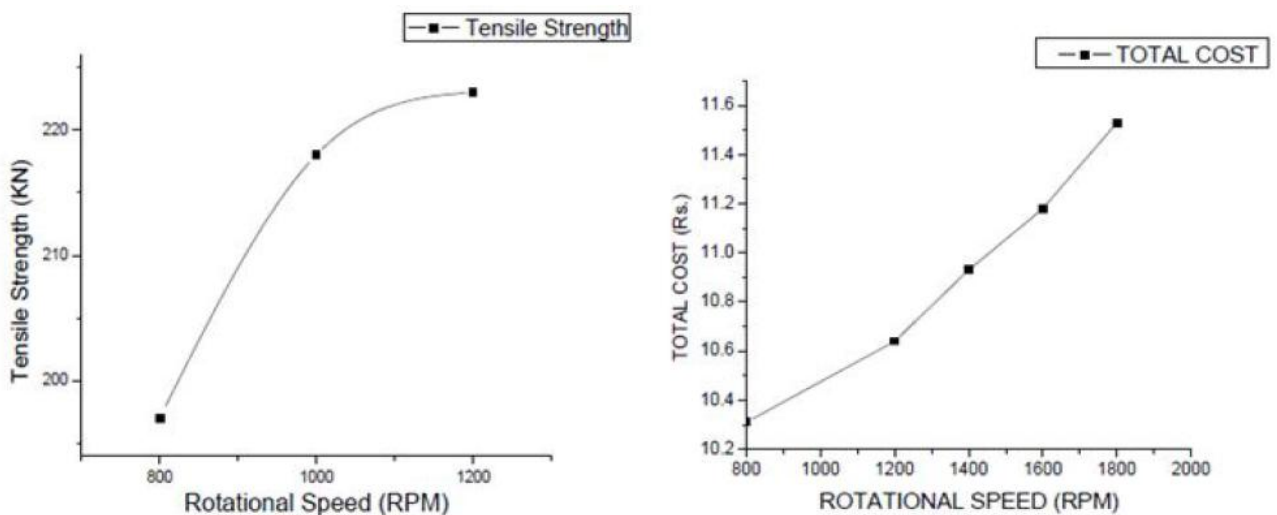
Οι Chodhuri et al. (2014) απέδειξαν ότι οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης για το AA6061 είναι: ταχύτητα περιστροφής =1200rpm, ταχύτητα μεταφοράς =75mm/min και αξονική δύναμη =7kN ενώ καθορίζουν ως σημαντικότερη παράμετρο της συγκόλλησης την μεταφορική κίνηση του εργαλείου. Το μοντέλο κόστους που ανέπτυξαν για τη συγκόλληση με τριβή έχει διάφορες αβεβαιότητες στις υποθέσεις που λαμβάνει υπόψη γεγονός που δικαιολογείται από το ότι δεν υπάρχουν παρόμοιες εργασίες στη βιβλιογραφία.

Επιπλέον οι Chodhuri et al. (2014) απέδειξαν πως η ταχύτητα συγκόλλησης επιδρά στον εφελκυσμό του κράματος AA6061 και συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης τόσο μικρότερη είναι η τάση εφελκυσμού για το κράμα και τόσο μεγαλύτερο το κόστος.



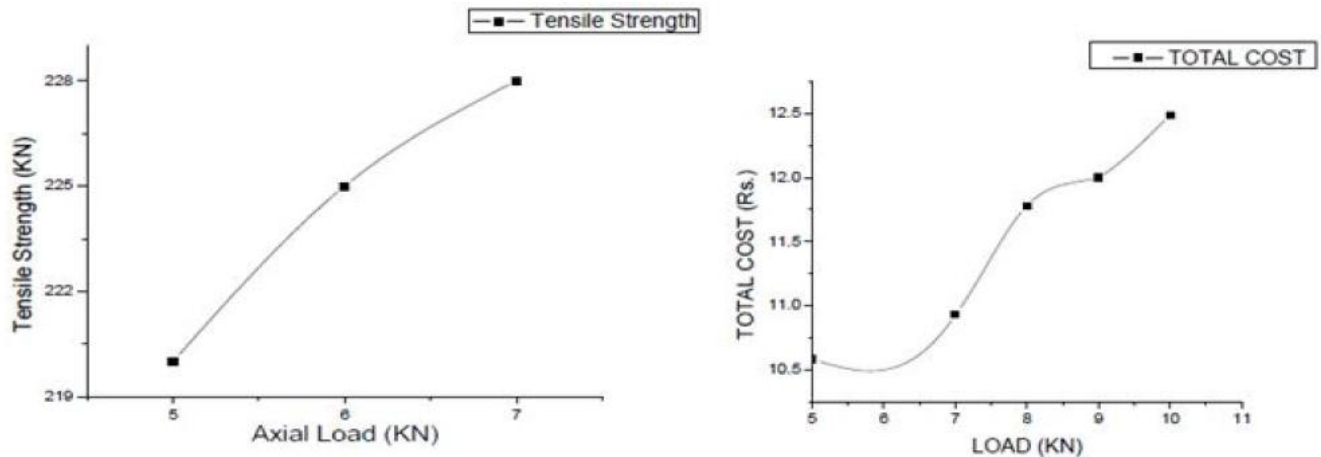
Σχήμα 5.1: Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)

Όσον αφορά στην επίδραση της ταχύτητας περιστροφής αποδείχθηκε πως όσο μικρότερη είναι παράγεται μικρότερο ποσό θερμότητας ανά μονάδα μήκους γεγονός που οδηγεί στη μείωση της τάσης εφελκυσμού στη συγκόλληση. Για υψηλές ταχύτητες περιστροφής αυξάνεται η παραγωγή θερμότητας και αντίστοιχα μειώνεται η τάση εφελκυσμού της σύνδεσης. Η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στο συνολικό κόστος είναι αμελητέα.



Σχήμα 5.2: Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)

Η αξονική δύναμη ευθύνεται για το βάθος διείσδυσης του εργαλείου στο τεμάχιο εργασίας και αποδείχθηκε πως για μικρά αξονικά φορτία η τάση εφελκυσμού στη συγκόλληση με τριβή είναι μικρότερη ενώ όσο αυτή αυξάνεται τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση εφελκυσμού και παράλληλα μειώνεται



το κόστος.

Σχήμα 5.3: Επίδραση της αξονικής φόρτισης στην τάση εφελκυσμού και στο συνολικό κόστος (Chodhuri et al. 2014)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να μελετηθεί η κατεργασία της συγκόλλησης στα κράματα αλουμινίου μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Από την μελέτη της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι υπάρχουν διάφορες μέθοδοι συγκολλήσεων με την συγκόλληση με τριβή να αποτελεί μια από τις πιο προτιμητέες μεθόδους συγκόλλησης για τα κράματα αλουμινίου, εξαιτίας της ευελιξίας εφαρμογής της και το μικρότερο κόστος της. Η συγκόλληση τριβής μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάμεσα σε ίδιας σύστασης κράματα ή και διαφορετικής.

Από την μελέτη της μικροδομής διαφόρων κραμάτων αλουμινίου προκύπτει ότι αυτή είναι κοκκοειδής και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες περιοχές με συνηθέστερη την ζώνη ανάπτυξης θερμότητας στην οποία επικεντρώνονται οι περισσότερες εργασίες στε διεθνές επίπεδο.

Η μικροσκληρότητα και η αντίσταση στη διάβρωση είναι παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση μπορεί όμως να βελτιωθεί με την μεταβολή των συνθηκών συγκόλλησης.

Το κόστος της συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου όπως και όλων των μετάλλων που συγκολλούνται. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αναφορές σχετικά με την εκτίμηση του κόστους συγκόλλησης στα κράματα αλουμινίου και οι ελάχιστες αναφορές που υπάρχουν είναι ποιοτικές και δεν εξάγουν μια σαφή εικόνα για το κόστος της συγκεκριμένης κατεργασίας.

Βιβλιογραφία

N. Abe, M. Tsukamoto, K. M. Maeda, K. Namba, J. Morimoto, 2006. Aluminum alloy welding by using a high power direct diode laser, Journal of Laser Applications 18 (4), 289–293.

Abdel-Jaber, G.T., Omran, A. M., Abdelrazek K., Fujii, M., Seki, M., Yoshida, A. 2010. An Investigation into Solidification and Mechanical Properties Behavior of Al-Si Casting Alloys, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering,10, 30-36.

R. Akhter, L. Ivanchev, H.P. Burger, 2007. Effect of pre/post T6 heat treatment on the mechanical properties of laser welded SSM cast A356 aluminium alloy, Materials Science and Engineering A 447 192–196.

Aluminium Association, 2011. Aluminium the element of sustainability. http://www.aluminum.org/sites/default/files/Aluminum_The_Element_of_Sustainability.pdf

Aluminium Association, 2015. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, http://www.aluminum.org/sites/default/files/TEAL_1_OL_2015.pdf

ASTM B179-14 Standard Specification for Aluminum Alloys in Ingot and Molten Forms for Castings from All Casting Processes

Cary,H.M. 1994. “Modern Welding Technology,” Third Edition, Regents/Prentice Hall Book Company, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

Cavalliere, P., Nobile, R., Panella, F.W., Squillace, A., 2006. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, International Journal of machine tools and manufacture, 46, 588-594.

Chonduri, B., Durgapassad, K., Debrarma, S., Majumder, A., Saha, S.C., 2014. Parametric optimization and cost estimation of AA6061 weldment in friction stir welding, International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2, 1-8.

Das S., Mondal D.P., Sawla S., Ramkrishnan N.; 2008. Synergic effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of an Al–Si alloy under varying loads and abrasive sizes, Wear, 264,pp. 47–59

J.R. Davis (Ed.), 1993. ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys, ASM International, Metals Park, OH.

Davis, J. R., 1999. Corrosion of Aluminum and Aluminum alloys, Ohio,ASM International

David, S.,A, Babu, S.S., Vitek, J.M., 2003. Welding: Solidification and Microstructure, JOM <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0306/David-0306.html>

Dawes, C.J., Thomas, W.M., 1996. Friction stir process welds aluminum alloys. The process produces low-distortion, high-quality, low-cost welds on aluminum, Welding Journal, 75, 41-45.

M.G. Dawes, S.A. Karger, T.L. Dickerson, J. Przyoatek, 2000. Strength and fracture toughness of friction stir welds in aluminum alloys, in: Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Paper No. S2-P1, Gothenburg, Sweden, TWI Ltd. and IVF, June 2000

Elsayed, A., Ravidran, C., Murty, B.S., 2011. Effect of Aluminum-Titanium-Boron Based Grain Refiners on AZ91E Magnesium Alloy Grain Size and Microstructure, International Journal of Metacasting, 5, 29-41

European Commision, 2014. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)

http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf

European Dioxin Inventory, Secondary Aluminium production, <http://ec.europa.eu/environment/archives/dioxin/pdf/stage1/secaluminium.pdf>

Fratini, L., Buff, G., 2005. CDRX modelling in friction stir welding of aluminium alloys, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 1188-1194.

Hernández-Méndez,F.,. Altamira no-Torres,A. 2011. Effect of Nickel Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum-Based Alloys., Materials Science Forum, 691, 10-14.

Jaradeh,M., Carlberg, T.2005 “Effect of titanium additions on the microstructure of DC-cast aluminium alloys”, Materials Science and Engineering A 413–414 277–282

Khodir, S.A, Shibayanagi, T., 2007. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Aluminum Joints of AA2024-T3 and AA7075-T6, Materials Transaction, 48, 1928-1937.

Kou, S., 2003. Welding Metallurgy (Second Edition), John Wiley and Sons, United States of America.

Kuenen, J.,2009 Aluminium production, EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009

Lakshminarayanan, A.K., Balasubramanian, V., Elangovan, K., 2009. Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints, Int J Adv Manuf Technol, 40:286–296

Lee, W.B., Yeon, Y.M., Jung, S.B., 2003. The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials, Scripta Materialia 49, 423–428.

Linkon Electric, Gas metal arc welding,
[http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGG MAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGG_MAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf)

Liu, G., Murr, L.E., Niou, C-S., McClure, J.C., Vega, F.R., 1996. Microstructural Aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 Aluminium, Scripta Material, 37, 355-361..

Liu, H.J., Fujii, H., Maeda, M., Nogi, K., 2003. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 142, 692-696.

B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Ca-labrese and D. Waldron, 2001. “High Strain Rate Superplasticity in Thick Section 7050 Aluminum Created by Friction Stir Processing,” Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28 September, 2001.

M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, 1998. Properties of friction stir welded 7075-T651 aluminum, Metall. Mater. Trans. A 29, 1955–1964.

L. Magnusson, L. Kallman, 2000. Mechanical properties of friction stir welds in thin sheet of aluminum 2024, 6013 and 7475, in: Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Paper No. S2-P3, Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI Ltd.and IVF.

Miller, 2013. Guidelines for gas tungsten arc welding, (GTAW),
www.Miller-Welds.com

Miller, D.K., 2004. Determining the cost of welding, Welding Design
http://weldingdesign.com/processes/news/wdf_10760

Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFadden, S.X., Mara, N.A., Mukherjee, A.K., 2001. Friction Stir Processing: A New Grain Refinement

Technique to Achieve High Strain Rate Superplasticity in Commercial Alloys, Materials Science Forum, 357-359, 507-514

Mohamed, J.S., 2013. Influence of nickel addition and effect of heat treatment on aluminium silicon piston alloys, International Journal of Science and Research 4, 781-786

Murr, L.E., Ying, L., Flores, R.D., Trillo, E., McClure, J.C., 1998. Intercalation vortices and related microstructural features in the friction-stir welding of dissimilar metals, Materials Research Innovations, 2, 150-163.

Pao, P.S., Gill, S.J., Feng, C.R., Sankaran, K.K., 2001. Corrosion fatigue crack growth in friction stir welded Al7050. Scripta Matera 45, 605-612.

N. Pierron, P. Sallamand, S. Mattei, 2007. Study of magnesium and aluminium alloys absorption coefficient during Nd:YAG laser interaction, Applied Surface Science 253 (6), 3208–3214.

Porter, D.A., Easterling, K.E., 1992. Phase Transformations in Metals and Alloys, Third Edition (Revised Reprint), CRC Press.

C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, 1997. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, Scripta Materials, 36, 68-75.

Ren ,S., He,X., Qu,X., Humail,I.S., Li, Y.,2007 “ Effect of Mg and Si in the aluminum on the thermo-mechanical properties of pressureless infiltrated SiCp/Al composites Composites” Science and Technology 67, 2103–2113

Sackhasiri, 2008. Aluminium. Chemical of the week.
<http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/pdf/aluminum.pdf>

N. Saheb , T. Laoui , A.R. Daud, M. Harun , S. Radiman, R. Yahaya 2001. “Influence of Ti addition on wear properties of Al–Si eutectic alloys” Wear 249, 656–662

J.M. Sanchez-Amaya, T. Delgado, J.J. De Damborenea, V. Lopez, F.J. Botana, 2009. Laser welding of AA 5083 samples by high power diode laser, Science and Technology of Welding and Joining 14 , 78–86.

J.M. Sanchez-Amaya, Delgado, T., Gonzalez-Rovira, L., Botana, F.J., 2009a. Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime, Applied Surface Science 255, 9512–9521

Schweighardt, F., 2007. Choosing shielding gases for arc welding.
<http://www.thefabricator.com/article/consumables/choosing-shielding-gases-for-arc-welding>

Shabestari, S.G., Moemeni, H. 2004. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys Journal of Materials Processing Technology 153–154, 193–198

I. Shigematsu, Y.J. Kwon, K. Suzuki, T. Imai, N. Saito, 2003. Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, Journal of Materials Science Letters 22, 353–356.

Smith, L., 1998. The fundamentals of gas tungsten arc welding: Preparation, consumables, and equipment necessary for the process,
<http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/the-fundamentals-of-gas-tungsten-arc-welding--preparation-consumables-and-equipment-necessary-for-the-process>

A.V. Strombeck, J.F.D. Santos, F. Torster, P. Laureano, M. Kocak, 1999. Fracture toughness behaviour of FSW joints on aluminum alloys, in: Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Paper No. S9-P1, California, USA, June 1999, TWI Ltd.

W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. 1991. Patent Application No. 9125978.8

Total Materia, 2016. Aluminum-Silicon Alloys,
<http://www.totalmateria.com/Article80.htm>.

Zhengang L., Guoyin Z., Hongjie L., Yihan L. and Guangchun Y. J.2010. Influence of Mg addition on graphite particle distribution in the Aluminum alloy matrix composites Mater. Sci. Technol., 2010, 26(3), 244-250.

<http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/understanding-the-alloys-of-aluminum.cfm>