

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Σ.Τ.ΕΦ.

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΛΟΦΩΛΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Α.Μ. :37963

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1) ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	σελ. 2
2) ΠΡΟΛΟΓΟΣ	σελ. 3
3) ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	σελ. 4
4) ΣΚΟΠΟΣ	σελ. 5
5) ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	
5.1 Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding. (Yongchao Su, Xueming Hua, Yixiong Wu)	σελ. 6
5.2 Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx Aluminium alloys and their effect on the mechanical properties. (S. Katsas, J. Nikolaou, G. Papadimitriou)	σελ. 17
5.3 Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloys joint properties. (S. Malavrizhi, V. Balasubramanian)	σελ. 28
5.4 Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated dy Mig welding-brazing process. (Hongtao Zhang, Siakyn liu)	σελ.47
6) ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
6.1 Ιστορία του αλουμινίου	σελ. 61
6.2 Ιδιότητες του αλουμινίου	σελ. 62
6.3 Εφαρμογές του αλουμινίου	σελ. 63
6.4 Συμβολισμός προϊόντων του αλουμινίου	σελ. 63
6.5 Παραγωγή του αλουμινίου	σελ. 64
6.6 Κράματα του αλουμινίου	σελ. 73
6.7 Μέθοδοι σκλήρυνσης του αλουμινίου	σελ. 87
6.8 Συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του	σελ. 91
7) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	σελ. 103
8) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 104

2. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το αλουμίνιο είναι υλικό το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και πολλές δεκαετίες στην βιομηχανία και τις κατασκευές. Ωστόσο, ειδικά τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται εντατικά ως κύριο υλικό κατασκευής σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Όμως σε πολλές κατασκευές λόγω της πολυπλοκότητας τους χρειάζεται τα μέρη από το αλουμίνιο να συγκολληθούν μεταξύ τους για να έχουμε την επιθυμητή συναρμογή. Το αλουμίνιο και τα κράματα του μπορούν να συγκολληθούν με αρκετές μεθόδους. Παρά τις πολλές δυσκολίες συγκόλλησης του αλουμινίου, το μέταλλο αυτό σήμερα θεωρείται εύκολα συγκολλούμενο.

Μερικές από τις μεθόδους συγκόλλησης του αλουμινίου είναι με οξυγονοκόλληση, επενδυμένων ηλεκτροδίων για την συγκόλληση τόξου, και στην συνέχεια οι μέθοδοι συγκόλλησης στην ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο (TIG) και με τηκόμενο ηλεκτρόδιο (MIG).

3. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις *ευχαριστίες* και την ευγνωμοσύνη μου στους σε όλους αυτούς που με βοήθησαν να φτάσω σε αυτό επίπεδο, να ολοκληρώσω αυτήν την πτυχιακή εργασία και για όσα μου έχουν προσφέρει κατά την διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων.

Αρχικά αισθάνομαι ανάγκη να ευχαριστήσω και να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέπων αυτής της πτυχιακής εργασίας κ. Κωνσταντίνο Γιαννακόπουλο που με βοήθησε να την ολοκληρώσω, και για τον πολύτιμο χρόνο του που αφιέρωσε με σκοπό να με πληροφορήσει και να με οδηγήσει ώστε να φθάσω σε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα.

Επιπλέον χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Παναγιώτη και Αθανασία, για την βοήθεια που μου πρόσφεραν και επειδή με στήριξαν και πίστεψαν σε εμένα. Επίσης ευχαριστώ τα αδέρφια μου και όλη την οικογένεια μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, το κοντινό μου περιβάλλον και ιδιαίτερα τους συμφοιτητές μου Ανδρέα και Ερωτόκριτο επειδή μαζί καταφέραμε να ολοκληρώσουμε τις σπουδές μας.

4. ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου με τις μεθόδους (TIG,MIG) μέσα από προηγούμενες μελέτες με την βοήθεια δοκιμίων τα οποία θα συγκολληθήκαν με τα κατάλληλα ηλεκτρόδια και υπό τις κατάλληλες συνθήκες, ενώ στην συνέχεια θα πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον υπολογισμό της αντοχής της συγκόλλησης. Απώτερος στόχος δηλαδή αυτής της μελέτης είναι η διαπίστευση της συγκολλητότητας του αλουμινίου και η εύρεση της αντοχής της συγκόλλησης στις μηχανικές καταπονήσεις.

5)ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

5.1) Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding. (Yongchao Su, Xueming Hua, Yixiong Wu)

5.1.1)ΣΥΝΟΨΗ

Φύλλα αλουμινίου 5052 και ήπια γαλβανισμένες λαμαρίνες ενώθηκαν μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης με υπόβαθρο αερίου μετάλλου με μηχανή ρεύματος διπλού παλμού και χρησιμοποιώντας καθαρά σύρματα συγκόλλησης Al, Al-5Si, Al-12Si και Al-4,5 mg (% κ.β.). Η επίδραση των στοιχείων κράματος στη μικροδομή των στρωμάτων των διαμεταλλικών ενώσεων (IMC) που σχηματίζονται μεταξύ της ραφής συγκόλλησης και του χάλυβα, και η αντοχή σε εφελκυσμό των προκύπτοντων αρθρώσεων ερευνήθηκαν. Το πάχος των στρωμάτων IMC σε όλα τα δείγματα διέφεραν κατά μήκος της διατομής του συνδέσμου και το ενδιάμεσο τμήμα της IMC στοιβάδας ήταν παχύτερο από τα κεφαλικά και ριζικά μέρη. Η διάχυση του Si στο Fe_2Al_5 θα μπορούσε να συγκαταστήσει την αύξηση του Fe_2Al_5 στο υπόστρωμα και του στρώματος IMC, και η μηχανική ιδιότητα του συνδέσμου βελτιώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Si στη φάση Fe_2Al_5 . Λόγω της υψηλής ευαισθησίας σε θραύση εν θερμώ του κράματος Al-4,5 mg, δημιουργούνται ρωγμές στη ρίζα του συνδέσμου που γίνονται με ηλεκτρόδιο 4,5 mg Al, με αποτέλεσμα την κακή μηχανική ιδιότητα.

5.1.2)ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην περίπτωση των δύο ανόμοιων υλικών συγκόλλησης Fe-Al, η διαφορά στις φυσικές και χημικές ιδιότητες μεταξύ των κραμάτων χάλυβα και αλουμινίου είναι μεγάλη και ενώνοντας Al στο χάλυβα, αποτελεί μεγάλη πρόκληση, όπως αναφέρουν οι Liu κ.ά. (2006). Οι Song κ.ά. (2009a) και αποκάλυψαν ότι η στιβάδα των εύθραυστων διαμεταλλικών ενώσεων του Fe-Al (IMC) σχηματίζεται εύκολα στη διεπαφή μεταξύ ραφής και του φύλλου χάλυβα, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής στερεάς διαλυτότητας του σιδήρου σε αργίλιο. Οι Kobayashi και Yakou (2002) επεσήμαναν ότι αυτό στρώμα IMC, που αποτελείται κυρίως από εύθραustes Fe_2Al_5 και FeAl_3 φάσεις, ήταν ένας κρίσιμος επιζήμιος παράγοντας για τη μηχανική ιδιότητα του συνδέσμου. Αυτό ήταν επειδή οι ρωγμές είχαν την τάση να προέρχονται από αυτό το στρώμα IMC, ενώ ο σύνδεσμος ήταν υπό τάση εφελκυσμού. Οι Bouayad κ.ά. (2003) παρατήρησαν ότι η ανάπτυξη αυτού του στρώματος IMC διέπεται από τη θερμότητα και το χρόνο. Οι Naoi και Kajihara (2007) έδειξαν ότι το πάχος του στρώματος Fe_2Al_5 θα μπορούσε να εκφραστεί σε συνάρτηση με το χρόνο t ανόπτησης με παραβολική σχέση: $l = K_0 \exp(-Q/RT) t^{-1/2}$, στην οποία K_0 ήταν ο παραβολικός συντελεστής, T ήταν η θερμοκρασία και Q ήταν η ενέργεια ενεργοποίησης. Η μείωση της γραμμικής παροχής θερμότητας κατά τη διαδικασία συγκόλλησης είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση της θερμοκρασίας του μεταλλικού λουτρού, τη μείωση του πάχους του στρώματος IMC και τη βελτίωση της μηχανικής ιδιότητας του συνδέσμου. Η γραμμική θερμική ισχύ εισόδου μπορεί να εκφραστεί ως $Q = UI / v$, όπου το U είναι μέση τάση συγκόλλησης, I είναι το μέσο του ρεύματος συγκόλλησης και το v είναι η ταχύτητα συγκόλλησης. Πέρα από τη μείωση της θερμικής ισχύος εισόδου, τα στοιχεία του κράματος, τα οποία μπορούν να προστεθούν στη ραφή συγκόλλησης μέσω συρμάτων πλήρωσης κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, επίσης επηρεάζουν το πάχος και τη μικρο-σκληρότητα του στρώματος IMC. Οι Lin κ.ά. (2010) που διεξήγαγαν συγκόλληση βολφραμίου αδρανούς αερίου μεταξύ κράματος αλουμινίου 5A06 και συρμάτων πλήρωσης ανοξειδωτου χάλυβα SUS321 με την Al-6Cu (% κ.β., όλες οι ακόλουθες συνθέσεις

στοιχείων είναι αναλογίες βάρους). Το πάχος 3-5m στρώμα IMC, το οποίο αποτελείται κυρίως από FeAl_3 , είχαν κατά μέσο όρο μικρο-σκληρότητα 644,7HV, και η τάση εφελκυσμού του αρμού έφτασε 172,5MPa. Οι Song κ.ά. (2009b) ένωσαν κράμα αλουμινίου 5A06 με ανοξείδωτο χάλυβα AISI 321 με συγκόλληση TIG με καθαρά σύρματα πλήρωσης Al, Al-5Si και Al-12Si, και επεσήμαναν ότι οι προσθήκες Si είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στο να αποφευχθεί η συσσώρευση του στρώματος IMC, και την ελαχιστοποίηση του πάχους του. Οι Dong κ.ά. (2012) ένωσαν φύλλα αλουμινίου σε γαλβανισμένη λαμαρίνα μέσω συγκόλλησης τόξου αερίου βολφραμίου με σύρματα πλήρωσης Al-5Si, Al-12Si, Al-6Cu, Al-10Si-4Cu και Zn-15Al. Διαπιστώθηκε ότι το πάχος του στρώματος IMC μειώνεται και η αντοχή σε εφελκυσμό της άρθρωσης αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Si κατά τη συγκόλληση. Οι Shih και Tu (2007) διερεύνησαν το αντιδραστικό διαμεταλλικό στρώμα σιδήρου-αργιλίου, το οποίο αυξήθηκε στη διεπαφή μεταξύ του υποστρώματος τήξης και του χάλυβα, και διαπίστωσαν ότι το αντιδραστικό στρώμα μιας χαλύβδινης ράβδου 1040 βουτηγμένης σε τήγμα Al-7Si-0.4mg για μια δεδομένη χρονική στιγμή εμβάπτισης σε 973 K, είχε το ελάχιστο πάχος μεταξύ όλων των τηγμάτων, συμπεριλαμβανομένων των καθαρών κραμάτων Al, Al-7Si, Al-1mg και Al-7Si-0,4mg. Η διάχυση του Si μέσα στο αντιδραστικό στρώμα θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά την ικανότητα διάχυσης Al και του άνθρακα και την ταχύτητα της αντίδρασης Al-Fe. Το Mg μπορούσε σταδιακά να χτιστεί επάνω στη διεπαφή μεταξύ του αντιδραστικού στρώματος και του τήγματος, οδηγώντας στο σχηματισμό μιας δυαδικής φάσης διαμεταλλικών Mg-Al για να εμποδίσει την διάχυση του στοιχείου Al εντός του αντιδραστικού στρώματος. Σύμφωνα με έρευνες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι Si και Mg μπορούν να έχουν τη δυνατότητα να αναστείλουν την ανάπτυξη του στρώματος IMC που σχηματίζεται μεταξύ του χάλυβα και του τηγμένου Al. Επιπλέον, τα σύρματα Al-Si και Al-Mg χρησιμοποιούνται συνήθως στη συγκόλληση κραμάτων Al για να βελτιωθεί η ρευστότητα ή οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής συγκόλλησης.

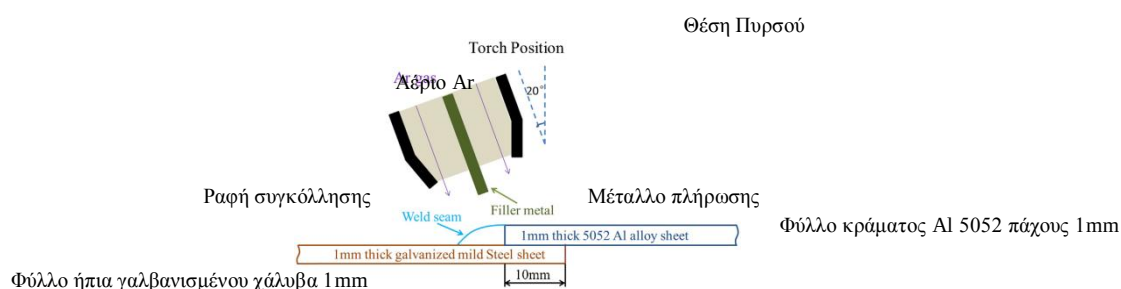
Η ένωση μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης υπόβαθρου αερίου μετάλλου με μηχανή ρεύματος διπλού παλμού μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τη γραμμική είσοδο θερμότητας στη διαδικασία συγκόλλησης λόγω της εναλλασσόμενης κυκλικής πολικότητας και την προσθήκη ενός παλμού ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι Kumar κ.ά. (2009) είχαν αναφέρει ότι αυτή η μέθοδος συγκόλλησης προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση τήξης στο σύρμα, χαμηλή παροχή θερμότητας και ελεγχόμενη διεύθυνση συγκόλλησης. Οι Su κ.ά. (2013) παρατήρησαν ότι η ένωση μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης αερίου μετάλλου με μηχανή ρεύματος διπλού παλμού αποτέλεσε μια πιο εφικτή μέθοδο για την ισχυροποίηση των συνδέσμων Fe-Al. Στο παρόν κείμενο, η ένωση μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης αερίου μετάλλου με μηχανή ρεύματος διπλού παλμού διεξήχθη για να συνδεθούν κράματα Al στον χάλυβα με τη βοήθεια καθαρών συρμάτων πλήρωσης Al, Al-5Si, Al-12Si και Al-4,5 mg. Η επίδραση των στοιχείων του κράματος στο πάχος, τη μορφολογία και τη σύσταση του στρώματος IMC στις ενώσεις εξετάστηκε με αυτή την καινοτόμο μέθοδο.

5.1.3) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Αλουμίνιο	Si 0,25	Fe 0,40	Cu 0,1	Mn 0,1	Mg 2,5	Cr 0,15	Zn 0,1	Ti 0,15	Ισορροπία Al
Χάλυβας	C 0,05	Si 0,02	Mn 0,6	P 0,009	Ισορροπία Fe				

Πίνακας 1: Χημικές συνθέσεις των 5052 κραμάτων Al και των ήπια γαλβανισμένων φύλλων χάλυβα (wt%)

Σύμφωνα με το πρότυπο της μη σιδηρούχου βιομηχανίας της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας, το πάχος των κραμάτων Al που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σωμάτων των οχημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία θα πρέπει να κυμαίνεται από 0,7 έως 2,5 mm. Για το λόγο αυτό, φύλλα από κράμα αλουμινίου 5052, πάχους 1mm και ελαφρός γαλβανισμένη λαμαρίνα, πάχους 1mm που συνήθως εφαρμόζονται σε αυτοκίνητα με διαστάσεις 300 mm × 50 χιλιοστά χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, και οι χημικές τους συνθέσεις απαριθμούνται στον Πίνακα 1. Η επικάλυψη ψευδαργύρου σε γαλβανισμένο μαλακό χάλυβα μπορεί να συμβάλει στην ενίσχυση της διαβροχής του τηγμένου κράματος αλουμινίου και του μετάλλου πλήρωσης πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, όπως αποκαλύπτουν οι Zhang και Liu (2011). Τα μέταλλα πληρώσεως που προσαρμόστηκαν ήταν καθαρά Al (ER1100), Al-5Si (ER4043), Al-12Si (ER4047) και Al-4,5 mg (ER5356), με διάμετρο 1,2 χιλιοστά. Το προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα ήταν καθαρό αργό (99,9%), και η ροή αερίου ήταν 12L/min. Το φύλλο κράματος Al τοποθετήθηκε στην κορυφή του φύλλου χάλυβα με 10 χιλιοστά πλάτος επικάλυψης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας αναδίπλωσης μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης αερίου μετάλλου

Όσον αφορά τη γωνία 20 ° του ακροφυσίου, ο σκοπός ήταν να αποφευχθεί η ανεπαρκής τήξη του φύλλου κράματος Al και η εμφάνιση ρωγμών στη ρίζα συγκόλλησης. Μια περαιτέρω αύξηση της γωνίας του ακροφυσίου θα περιόριζε την παραγωγή της διεπαφής ραφής-χάλυβα. Οι θέσεις συγκόλλησης των μετάλλων βάσης καθαρίστηκαν με ακετόνη πριν από τη συγκόλληση. Οι παράμετροι συγκόλλησης που παρατίθενται στον πίνακα 2 είναι οι βέλτιστες τιμές που διαβεβαιώνουν ότι η θερμοκρασία του μεταλλικού λουτρού θα ήταν περίπου 690 ° C, με βάση προηγούμενων πειραμάτων μας. Μεταλλογραφικά δείγματα των διατομών της συγκόλλησης αποκόπηκαν από τις παραχθείσες αρθρώσεις και γυαλίστηκαν. Τα μεταλλογραφικά δείγματα καταγράφηκαν με οπτικό μικροσκόπιο Zeiss AxioCam MRC5 και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Zeiss ULTRA 55. Δείγματα της δοκιμής της διάτμησης εφελκυσμού ήταν μήκους 100mm και πλάτους 12mm και επίσης αποκόπηκαν από τις παραχθείσες αρθρώσεις Fe-Al. Τα δείγματα είχαν τραβηχτεί από μηχανή δοκιμής Zwick Roell Z020 με σταθερό ρυθμό φόρτωσης 1mm/min.

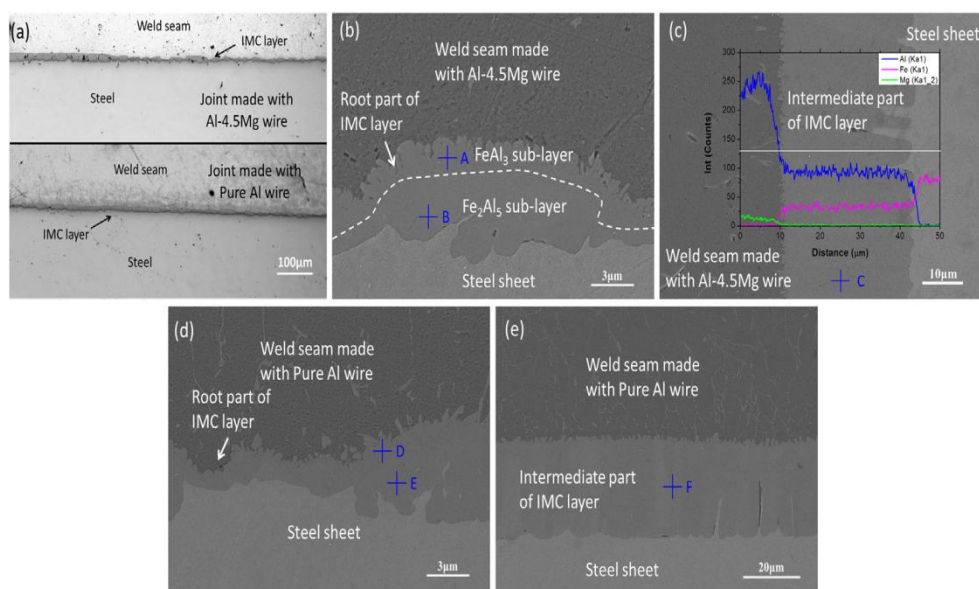
Σύρμα Πλήρωσης	Παράμετροι				
	Ταχύτητα Τροφοδότησης του σύρματος (m/min)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (m/min)	Μέση τιμή τάσης (V)	Μέση τιμή ρεύματος (A)	Συχνότητα υπερ- επιβεβλημένου παλμού ρεύματος (Hz)
Καθαρό Al	3,3	0,5	16,2	55	15
Al-5Mg	4,3	0,5	16,0	55	15
Al-5Si	3,3	0,5	16,2	56	15
Al -12Si	3,3	0,5	16,2	55	15

5.1.4) Αποτελέσματα και ανταλλαγή απόψεων

5.1.4.1) Επίδραση καθαρών ηλεκτροδίων πλήρωσης Al και Al-4,5 mg στη μικροδομή του στρώματος IMC

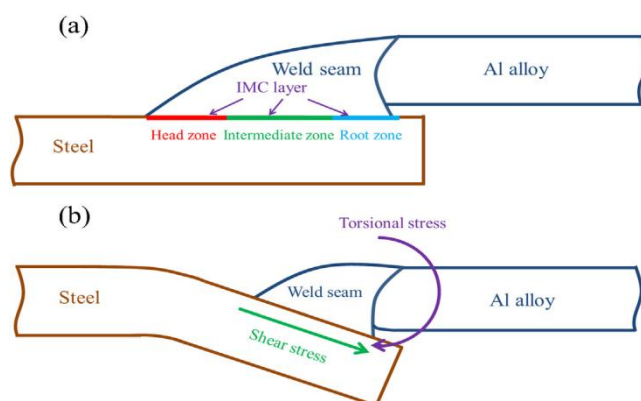
Στις αρθρώσεις που κατασκευάστηκαν με καθαρά ηλεκτρόδια πλήρωσης Al και Al-4,5 mg, το πάχος και η μορφολογία των στρωμάτων IMC διέφεραν κατά μήκος της διατομής των αρθρώσεων, όπως βλέπουμε στην εικόνα 2α. Παρόμοιο φαινόμενο παρατήρησαν οι Mathieu κ.ά. (2007), οι οποίοι χώρισαν το στρώμα IMC σε τρεις διαφορετικές ζώνες ανάλογα με τη διαφορά πάχους κατά μήκος του στρώματος IMC: η κεφαλή, το ενδιάμεσο τμήμα και η ρίζα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3α. Στις αρθρώσεις που κατασκευάστηκαν με ηλεκτρόδια πλήρωσης καθαρού Al και Al-4,5 mg, η ρίζα του στρώματος IMC (περίπου 6-7 χιλιοστά σε μήκος) έχει σχήμα με μορφολογία σφήνας και το πάχος του κυμαίνεται από 2 μm με 7 μm , όπως φαίνεται στην εικόνα 2β και δ. Αντιθέτως, το ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC (περίπου 1-2 χιλιοστά σε μήκος) με σχήμα μορφολογίας σαν πηχάκι είναι περίπου 30 μm πάχους, όπως δείχνει η εικόνα 2γ και ε. Οι Lin κ.ά. (2009) ανακάλυψαν ότι η διεπαφή ραφής-χάλυβα αποτελείται από δύο είδη διαμεταλλικών στρωμάτων. Οι Song κ.ά. (2009a) βρήκαν επίσης ότι η συνδεδεμένη διεπαφή αποτελείται από u-FeAl₃ στην πλευρά αλουμινίου και από m-Fe₂Al₅ στην πλευρά του χάλυβα. Στο παρόν πείραμα, ένα παρόμοιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί στο τμήμα ρίζας του στρώματος IMC επίσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2β. Η διακεκομμένη γραμμή, που ορίζεται στην εικόνα 2β, αποκαλύπτει τη σχέση μεταξύ αυτών των δύο φάσεων. Λόγω της διαφοράς στη μικρο-σκληρότητα μεταξύ FeAl₃ (700HV) και Fe₂Al₅ (1100HV), θα δημιουργηθεί ανάχωμα στη διεπαφή FeAl₃ και Fe₂Al₅ μετά τη διαδικασία στίλβωσης, οδηγώντας έτσι σε αντίθεση με την παρατήρηση SEM. Μια ανάλυση για φασματομετρία της ενέργειας διασποράς (EDS) διεξήχθη επίσης για να αναλύσει τις συνθέσεις των επιμέρους στρωμάτων. Περίπου 5-8 σημεία σε κάθε υπόστρωμα επιλέχθηκαν και τα τυπικά αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3. Τα αποτελέσματα EDS επιβεβαιώνουν ότι αυτά τα δύο υποστρώματα αντιστοιχούν σε FeAl₃ και Fe₂Al₅ φάσεις αντίστοιχα, όπως σημειώνεται και στην εικόνα 2β. Στο ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC, η σύνθεση του στρώματος IMC παραμένει αμετάβλητη με κατεύθυνση κάθετη προς αυτό το στρώμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2γ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα EDS που απαριθμούνται στον Πίνακα 3, το

ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC αποτελείται μόνο από φάση m- Fe_2Al_5 . Το ίδιο πάχος, μορφολογία και σύνθεση του στρώματος IMC σχηματίζονται στις αρθρώσεις που διαμορφώνονται με ηλεκτρόδια πλήρωσης καθαρού Al και Al-4,5 mg και αποδεικνύουν ότι το Mg δεν έχει επίδραση στην ανάπτυξη του στρώματος IMC.



Εικόνα 2: Οπτικές εικόνες (α) των στρωμάτων IMC που κατασκευάστηκαν με ηλεκτρόδια καθαρού Al και Al-4.5Mg, εικόνες SEM (β) ριζικής στρώσης IMC που φτιάχτηκε με σύρμα Al-4.5Mg, (γ) ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC που φτιάχτηκε με σύρμα Al-4.5Mg, (δ) η ρίζα της στρώσης IMC με σύρμα καθαρού Al, και (ε) ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC με σύρμα καθαρού Al.

Οι Su κ.ά. (2013) έδειξαν ότι η παρουσία της φάσης FeAl_3 στα ανόμοια υλικά Fe-Al της συγκόλλησης με τόξο έχει προκύψει από την ανεπαρκή δια-συγχώνευση των στοιχείων Fe και Al. Αυτό οφείλεται στην ταχεία μείωση της θερμοκρασίας του μεταλλικού λουτρού. Στις αρθρώσεις που κατασκευάστηκαν με καθαρά ηλεκτρόδια πλήρωσης Al και Al-4,5 mg, η 30 μm πάχους φάση Fe_2Al_5 αποτελεί το ενδιάμεσο τμήμα του στρώματος IMC, που απεικονίζει ότι η μείωση της θερμοκρασίας στον τομέα αυτό δεν είναι τόσο γρήγορη όσο εκείνης της ριζικής περιοχής. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3α, η ρίζα της ένωσης συνδέει το φύλλο κράματος Al με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου $146.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), έτσι ώστε η στερεοποίηση του λουτρού συγκόλλησης να ξεκινά από τη ρίζα της άρθρωσης. Δηλαδή, το συγκριτικά χαμηλότερο ποσοστό ψύξης στο ενδιάμεσο τμήμα της άρθρωσης προκαλεί επαρκή διάχυση των ατόμων Al και Fe, διευκολύνοντας την ανάπτυξη της φάσης Fe_2Al_5 .



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα των (α) διαφόρων τμημάτων επί του στρώματος IMC, (β) την παραμόρφωση των δειγμάτων εφελκυσμού υπό πίεση εφελκυσμού

5.1.4.2 Επίδραση των συρμάτων πλήρωσης Al-5Si και Al-12Si στη μικροδομή του στρώματος IMC

Η εικόνα 4 δείχνει τις μικροδομές του στρώματος IMC στις ενώσεις που πραγματοποιούνται με ηλεκτρόδια πλήρωσης Al-5Si και Al-12Si. Αυτές οι εικόνες βρίσκονται στο ενδιάμεσο τμήμα των στρωμάτων IMC. Λόγω της ανασταλτικής επίδρασης του ατόμου Si στην ανάπτυξη του στρώματος IMC, η διαφορά του πάχους κατά μήκος του στρώματος IMC σε αυτές τις δύο αρθρώσεις δεν είναι τόσο σημαντική όσο αυτή των αρθρώσεων που κατασκευάζονται με ηλεκτρόδια πλήρωσης καθαρού Al και Al-4,5 mg. Στην εικόνα 4β και γ, τα στρώματα IMC μπορούν να ταξινομηθούν στο υπόστρωμα FeAl_3 κοντά στο Al και στο υπο-στρώμα Fe_2Al_5 από την πλευρά του χάλυβα, γεγονός που επαληθεύεται από τα αποτελέσματα EDS που παρατίθενται στον Πίνακα 4. Οι Shih και Chen (2005) επεσήμαναν ότι η κρυσταλλική ορθορομβική δομή Fe_2Al_5 περιείχε 30 % κενά κατά μήκος του άξονα C, τα οποία έκαναν τη διάχυση Al πολύ πιο γρήγορη, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας οδοντωτής διεπαφής, ή μιας άλλης μορφολογίας μεταξύ του αντιδραστικού στρώματος και του υποστρώματος χάλυβα. Οι Shih και Tu (2007) αποκάλυψαν ότι το Si μπορούσε να διαχυθεί μέσα στο αντιδραστικό στρώμα, να μειώσει σημαντικά την ικανότητα των ατόμων Al να διαχέονται από το τήγμα και να αντιδρούν με το υπόστρωμα χάλυβα. Σε αυτό το πείραμα, το πάχος των στρωμάτων IMC στις ενώσεις που δημιουργούνται με ηλεκτρόδια πλήρωσης Al-5Si και Al-12Si είναι μικρότερη από εκείνο στην ένωση που κατασκευάζεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης καθαρού Al, το οποίο είναι σε αρμονία με τη θεωρία που αναφέρεται παραπάνω.

Βαθμοί	Al	Si	Fe
A	57,25	-	42,75
B	39,07	-	60,93
C	54,71	-	45,29
D	64,91	-	35,09
E	54,69	-	45,31
F	53,84	-	46,16

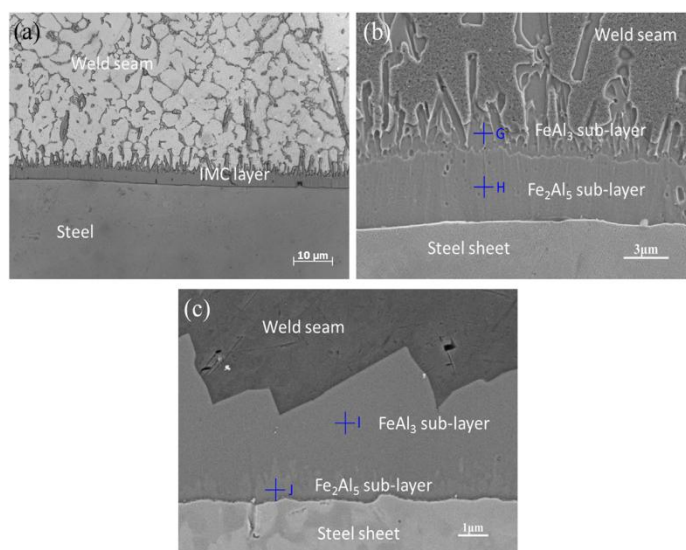
Πίνακας 3: Αποτελέσματα ανάλυσης EDS των σημειωμένων βαθμών της εικόνας 2 (wt%).

Βαθμοί	Al	Si	Fe
G	67,11	3,39	29,49
H	52,67	2,86	44,35
I	58,46	11,61	29,93
J	39,16	4,38	56,52

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ανάλυσης EDS των σημειωμένων βαθμών της εικόνας 4 (wt%).

Οι Song κ.ά. (2009b), επεσήμαναν ότι περισσότερα άτομα Si διαλύονται στο στρώμα IMC για να σχηματίσουν υπερ-κορεσμένο στερεό διάλυμα που προκαλεί την αύξηση της σκληρότητας της φάσης. Η κόλληση των ενώσεων γίνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-5Si και Al-12Si των οποίων το UTS ήταν 125,2MPa και 122,5MPa αντίστοιχα, αλλά η διαφορά πάχους μεταξύ στρωμάτων IMC που φτιάχτηκαν με ηλεκτρόδια πλήρωσης καθαρού Al, Al-5Si και Al-12Si δεν ήταν προφανής. Οι Dong κ.ά. (2012) βρήκαν ότι το πάχος του στρώματος IMC μειώθηκε και ότι η αντοχή εφελκυσμού του αρμού αυξήθηκε ανάλογα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Si κατά τη συγκόλληση. Η συγκόλληση των επόμενων στρώσεων γίνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-5Si και Al-12Si σε 134MPa και 136MPa, αντίστοιχα. Σε αυτό το πείραμα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το πάχος της φάσης Fe_2Al_5 και το στρώμα IMC στο σύνδεσμο που επιτυγχάνεται με σύρμα Al-5Si είναι περίπου 4μm και 7μm, αντίστοιχα. Αντίθετα, η φάση Fe_2Al_5 και το στρώμα IMC στις αρθρώσεις που κατασκευάζεται με σύρμα Al-12Si ήταν αντίστοιχα 1μm και 4μm σε πάχος. Όλες οι αρθρώσεις ελήφθησαν με τις ίδιες παραμέτρους συγκόλλησης και με κοινή διαμόρφωση. Έτσι, η θερμοκρασία του μεταλλικού λουτρού και η διαδικασία στερεοποίησης των αρθρώσεων είναι ίδια, και οι επιρροές τους όσον αφορά το στρώμα IMC μπορούν να εξαλειφθούν. Δηλαδή, οι διαφορές στο πάχος και τη μορφολογία στα στρώματα IMC στην εικόνα 4β και γ αποδίδονται στην ποσότητα του στοιχείου Si. Τα αποτελέσματα EDS που παρατίθενται στον Πίνακα 4 δείχνουν ότι η άρθρωση που γίνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-5Si, η περιεκτικότητα του Si σε υπόστρωμα Fe_2Al_5 και $FeAl_3$ είναι 2,86wt% και 3,39wt%, αντίστοιχα. Σε αρθρώσεις που δημιουργούνται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-12Si, η ποσότητα του

στοιχείο Si στο υπόστρωμα Fe_2Al_5 και υπόστρωμα FeAl_3 είναι αντίστοιχα 4,38wt% και 11,61wt%. Αυτό το αποτέλεσμα καταδεικνύει σαφώς ότι η επίδραση της μείωσης του πάχους βελτιώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Si στη στρώση IMC.



Εικόνα:4. Στρώμα IMC (α και β) με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-5Si, στρώμα IMC με ηλεκτρόδιο πλήρωσης

5.1.4.3)Μηχανικές ιδιότητες

Ο Πίνακας 5 και η εικόνα 5 δείχνουν, αντίστοιχα, τα UTS δειγμάτων εφελκυσμού και τη μικροδομή των κατατετημένων δειγμάτων εφελκυσμού. Η ένωση με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-12Si έχει τα υψηλότερα UTS των 205,70MPa και η συνολική επιμήκυνση 12,65%, και η ρωγή προκύπτει στο μέταλλο βάσης Al. Οι άλλες δύο ενώσεις κατασκευάστηκαν με ηλεκτρόδια πλήρωσης καθαρού Al και Al-5Si με ρωγή στη ραφή συγκόλλησης, και το UTS τους είναι 163,78MPa και 188,75MPa, αντίστοιχα. Η τάση του σημείου UTS να αυξάνεται όποτε μειώνεται το πάχος του στρώματος IMC μπορεί ξεκάθαρα να παρατηρηθεί. Το UTS του συνδέσμου που κατασκευάζεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-4,5 mg είναι το χαμηλότερο, στα 112,47MPa, και η ρωγή εμφανίζεται στο στρώμα IMC.

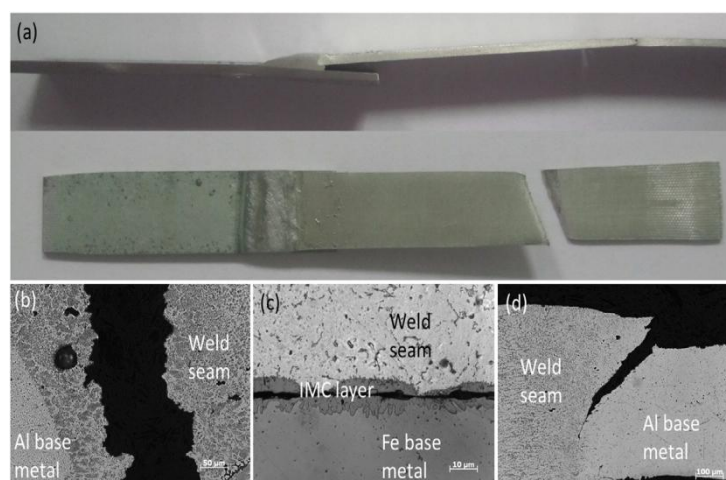
Σύρμα πλήρωσης	UTS(MPA)	A(%)	Τοποθεσία της ρωγμής
Καθαρό Al	163,78	7,15	Ραφή συγκόλλησης
Al-5Mg	112,47	1,11	IMC
Al-5Si	188,75	9,65	Ραφή συγκόλλησης
Al-12Si	205,70	12,65	Μέταλλο βάσης

Πίνακας 5: Αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού των συνδέσεων των ανόμοιων υλικών Fe-Al που κατασκευάστηκαν με ηλεκτρόδια πλήρωσης από καθαρό Al, Al-4,5Mg, Al-5Si και Al-12Si.

Έτσι, γενικά θεωρούσαν πολλοί ότι η μηχανικά ορθή συγκόλληση Fe-Al θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνον όταν το πάχος του στρώματος IMC ήταν κάτω 10_μm, όπως παρατήρησαν οι Zhang κ.ά. (2008). Οι Bozzi κ.ά. (2010) διαπίστωσαν ότι, όταν το πάχος της στρώσης IMC ήταν γύρω 8_μm, μικρο-ρωγμές δημιουργούνταν στο εσωτερικό του στρώματος, αλλά δεν θα μπορούσαν να προκαλέσουν ολικό σπάσιμο. Εάν το στρώμα IMC ήταν πολύ παχύ, οι ρωγμές ξεκινούσαν και πολλαπλασιάζονταν εύκολα μέσα στο εύθραυστο στρώμα IMC. Σε αυτό το πείραμα, αν και το ενδιαμέσο τμήμα του IMC στις συνδέσεις γίνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης καθαρού Al και 30_μm σε πάχος, το δείγμα εφελκυσμού δεν δημιουργεί θραύση στο στρώμα IMC, και η μηχανική ιδιότητα των αρθρώσεων είναι αποδεκτή. Η εικόνα 3β δείχνει την παραμόρφωση της σύνδεσης σε δοκιμή εφελκυσμού. Θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι η ρίζα του στρώματος IMC υποβάλλεται σε διατμητική τάση και ταυτόχρονα σε στρεπτική πίεση, γι' αυτό και είναι το πιο ευάλωτο τμήμα του στρώματος IMC. Οι Zhang και Liu (2011) παρατήρησαν την ρωγμή του αναδιπλωμένου συνδέσμου Fe-Al μετά τη δοκιμή αντοχής, και βρήκαν ότι η πορεία του σπασίματος ξεκινούσε από τη ρίζα του στρώματος IMC. Στην σύνδεση που φτιάχνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης καθαρού Al, το πάχος της ρίζας του στρώματος IMC είναι κάτω από 10_μm. Επιπλέον, οι Gendo κ.ά. (2006) πρότειναν ότι η καλή αντοχή της σύνδεσης θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη δημιουργία στρώματος IMC με ασυνεχές πάχος. Έτσι, η σφηνοειδής μορφολογία του τμήματος της ρίζας του στρώματος IMC μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της μηχανικής ιδιότητας της σύνδεσης. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι το πάχος και η μορφολογία του τμήματος της ρίζας του στρώματος IMC διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αναστολή της παραγωγής ρωγμών, ενώ η επίδραση του ενδιαμέσου τμήματος του στρώματος IMC επί της μηχανικής ιδιότητας της ένωσης είναι συγκριτικά μέτρια.

Αν και το πάχος, η μορφολογία και η σύσταση του στρώματος IMC στις συνδέσεις που γίνονται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-4,5 mg είναι οι ίδιες με αυτές μιας σύνδεσης με ηλεκτρόδιο πλήρωσης καθαρού Al, το UTS της σύνδεσης που γίνεται με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-4,5 mg, είναι μόνο 112,75 MPa, και εντοπίζεται ρωγμή στο στρώμα IMC. Η ασθενής μηχανική ιδιότητα των συνδέσεων αποδίδεται στη ρωγμή θερμότητας που δημιουργείται στην περιοχή δέλτα μεταξύ του μετάλλου βάσης Al, τη ραφή συγκόλλησης και του χάλυβα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6α.

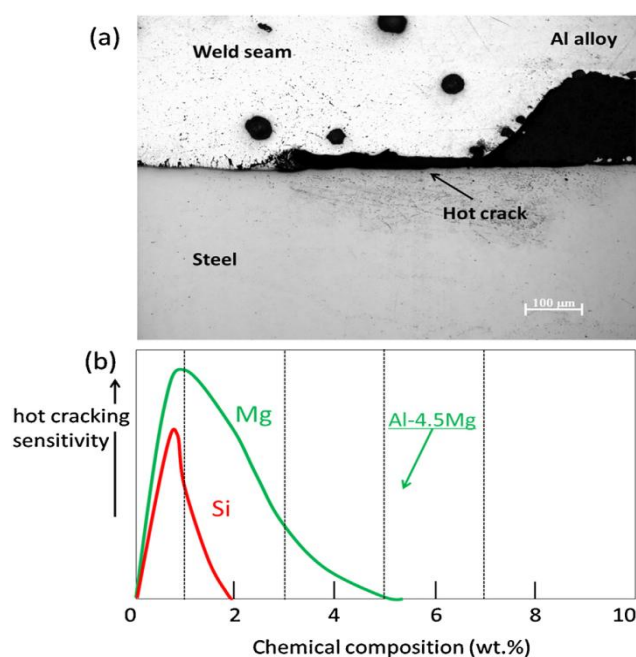
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ίδιες παράμετροι συγκόλλησης και η διαμόρφωση της σύνδεσης εξασφαλίζουν την ισοκατανομή μεταξύ της θερμοκρασίας του μεταλλικού λουτρού, της διαδικασίας στερεοποίησης και της εναπομένουσας πίεσης συγκόλλησης των δοκιμίων. Η εμφάνιση θερμής ρηγματώσεως στις αρθρώσεις που κατασκευάζονται με ηλεκτρόδιο Al -4,5 mg προκαλείται από την προσθήκη του στοιχείου Mg.



Εικόνα 5: Οπτικές εικόνες ραγισμένων δειγμάτων εφελκυσμού που κατασκευάστηκαν με διαφορετικά ηλεκτρόδια πλήρωσης (α) Al-12Si, (β) Al-5Si, (γ) Al-4.5Mg και (δ) καθαρό Al.

Οι Cicala κ.ά. (2005) κατέγραψαν τη σχέση μεταξύ της ευαισθησίας της θερμής ρωγμής και της χημικής σύνθεσης των κραμάτων Al, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6β. Φαίνεται ότι το κράμα Al-4,5 mg εντοπίζεται στο εύρος της ρηγματικής ευαισθησίας.

Ο σχηματισμός θερμής ρηγματώσεως λαμβάνει χώρα στο τελικό στάδιο της στερεοποίησης. Σε αυτό το στάδιο, τα ευτηκτικά υγρά χαμηλής θερμοκρασίας διασπείρονται στα όρια των κόκκων, όπου οι ρωγμές εύκολα προκύπτουν εξαιτίας της πίεσης κατά τη συγκόλληση. Όταν τα ευτηκτικά υγρά είναι επαρκή για να διασπαρθούν στα όρια των κόκκων με τη μορφή δικτύου, οι δημιουργηθείσες θερμές ρωγμές μπορούν να συμπληρωθούν αμέσως από ροές του ευτηκτικού υγρού. Αντίθετα, εάν το Si και η περιεκτικότητα σε Mg είναι στην περιοχή που αποκαλύπτεται στην εικόνα 6β και τα ευτηκτικά υγρά διασπείρονται στα όρια των κόκκων σαν απομονωμένες νησίδες, τότε αυτό το είδος μικροδομής δεν μπορεί να παρεμποδίσει την παραγωγή θερμής ρηγματώσεως.



Εικόνα 6: (α) Η ρωγή στο σύνδεσμο που φτιάχτηκε με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-4.5Mg, (β) ευαισθησία των κραμάτων αλουμινίου σε θερμική ρηγματώση ανάλογα με την περιεκτικότητα σε Si και Mg.

5.1.5) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Λόγω της διαφοράς ρυθμού της ψύξης στη ραφή συγκόλλησης, το πάχος του στρώματος IMC μεταβάλλεται κατά μήκος της διατομής της σύνδεσης, και το ενδιαμέσο τμήμα της στιβάδας IMC είναι παχύτερη από τα κεφαλικά και ριζικά μέρη.

2. Το πάχος και η μορφολογία του τμήματος της ρίζας του στρώματος IMC διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αναστολή της παραγωγής ρωγμών. Η επίδραση του ενδιαμέσου τμήματος του στρώματος IMC επί της μηχανικής ιδιότητας της σύνδεσης είναι συγκριτικά μέτρια.

3. Το Mg δεν μπορεί να συγκρατήσει την αύξηση του στρώματος IMC. Λόγω της επίδρασης της χημικής σύνθεσης του σύρματος Al-4,5 mg, δημιουργείται θερμή ρηγμάτωση στη ρίζα συγκόλλησης και καταλήγει σε κακές μηχανικές ιδιότητες της σύνδεσης.

4. Η προσθήκη του Si μπορεί να μειώσει το πάχος της υποστιβάδας Fe_2Al_5 και το στρώμα IMC διαλύοντας το μέσα σε αυτό και μπλοκάροντας τη διάχυση. Επιπλέον, η επίδραση της μείωσης του πάχους και της μηχανικής ιδιότητας των συνδέσεων βελτιώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας Si στο στρώμα IMC.

5. Η σύνδεση μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης με υπόβαθρο αερίου μετάλλου με μηχανή ρεύματος διπλού παλμού με ηλεκτρόδιο πλήρωσης Al-12Si είναι μια εφικτή μέθοδο για την ενίσχυση της σύνδεσης Fe-Al, η οποία μπορεί να καταστείλει την ανάπτυξη του στρώματος IMC και την παραγωγή θερμικής ρηγμάτωσης. Μπορεί να υποκαταστήσει την αυτό-διάτρητη ήλωση στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, λόγω της βελτίωσης της παραγωγικής αποδοτικότητάς της στο να ενώνει αλουμίνιο και χάλυβα.

5.2) Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx Aluminium alloys and their effect on the mechanical properties. (S. Katsas, J. Nikolaou, G. Papadimitriou)

5.2.1)ΣΥΝΟΨΗ

Στα ναυπηγεία, το κράμα αλουμινίου 5083 συγκολλείται με πολλών-στρώσεων συγκόλληση χρησιμοποιώντας την τεχνική συγκόλλησης μετάλλου αδρανούς αερίου. Αν κατά τον έλεγχο της ακεραιότητας της συγκόλλησης είτε μετά είτε κατά τη διαδικασία διαπιστώνονται ελαττώματα στη περιοχή της συγκόλλησης, συνήθως επιστρατεύονται διορθώσεις που θα αυξάνουν το χρόνο λειτουργίας της κατασκευής.

Η μέθοδος επιδιόρθωσης αφορά την αφαίρεση των πάνω στρώσεων, ανάλογα με το πάχος, και την επανασυγκόλληση υπό τις ίδιες συνθήκες. Σκοπός αυτού του κειμένου είναι η εξέταση των μικροδομικών αλλαγών που συνοδεύουν την επιδιορθωτική συγκόλληση, την οριοθέτηση της επίδρασής τους στις πρωταρχικής σημασίας ιδιότητες τους και τον καθορισμό – αν δύναται – ενός ανώτατου ορίου όσον αφορά τον αριθμό των επιδιορθώσεων.

5.2.2)ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το συνηθισμένο κράμα αλουμινίου 5083 χρησιμοποιείται στην κατασκευή των επιβατικών, εμπορικών και πολεμικών σκαφών. Λόγω της απαιτητικής φύσης των συνθηκών παροχής υπηρεσιών και τα περιβάλλοντα στα οποία λειτουργούν όλα τα πολεμικά πλοία, τα δομικά στοιχεία και οι κατασκευές υποβλήθηκαν σε εξαιρετικά υψηλό επίπεδο φορτίων, τα οποία προκαλούν υποβάθμιση της μικροδομής και μπορούν τελικά να οδηγήσουν σε αποτυχία. Δεδομένου ότι η χρήση του αλουμινίου επεκτείνεται στον τομέα της ναυπηγικής βιομηχανίας, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας έχει πραγματοποιηθεί επικεντρώνοντας κυρίως στις ιδιότητες κόπωσης και την μακροπρόθεσμη απόδοση των συγκολλημένων σημείων. Σειρά δοκιμών κοπώσεως σε διάφορα φορτία διεξάγονται έτσι ώστε να καθοριστεί το μέγιστο όριο της ασφάλειας για συγκολλημένες και δη επιδιορθωμένες συγκολλημένες κατασκευές. Παρ'όλα αυτά, λίγα είναι τα κείμενα που εξετάζουν τις μικροδομικές αλλαγές που συνοδεύουν την αποτυχία της κατασκευής συνδέσμου και που εισάγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης. Ακόμα κι αν το κράμα αργιλίου (AA) 5083 προτιμάται σε ναυπηγικές εφαρμογές για την καλή συγκολλησιμότητά του, αντοχή και υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, η συγκόλληση σκληρυμένων στελεχών κραμάτων είναι γνωστό ότι οδηγεί σε μια ουσιαστικά μειωμένη αντοχή στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ), καθώς η θέρμανση για μερικά δευτερόλεπτα πάνω από 0.7 T m θα εξουδετερώσει την όποια απολαβή σε αντοχή από την εν ψυχρώ σκλήρυνση. Αν και αυτή η πτώση στην αντοχή είναι αναπόφευκτη, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει ληφθεί ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν θα προκύψουν και άλλοι παράγοντες που οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της αντοχής, όπως ελαττώματα συγκόλλησης. Δεδομένου ότι η ζημία κόπωσης σε συστατικά που δέχονται υψηλή πίεση ξεκινά στη διασταύρωση των στοιχείων μικροδομής, σε ασυνέχειες όπως ανοίγματα και συγκολλήσεις, πρέπει κανείς να βεβαιωθεί ότι πριν τεθούν σε λειτουργία, θα είναι χωρίς ατέλειες. Ως εκ

τούτου, αν μετά τη συγκόλληση ή κατά τη διάρκεια της εν λόγω διαδικασίας εντοπιστούν ανωμαλίες στη γύρω περιοχή του συγκολλήματος, συνήθως χρησιμοποιούνται επιδιορθωτικές συγκολλήσεις για να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της επιδιορθωτικής συγκόλλησης είναι αμφίσημη, δεδομένου ότι μπορεί να συνοδεύεται από αύξηση των παραμενουσών πιέσεων, γεωμετρική παραμόρφωση και υποβάθμιση της μικροδομής που προκαλείται από πρόσθετους θερμικούς κύκλους. Στην παρούσα έρευνα ο καθορισμός των μικροδομικών αλλαγών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επιδιορθωτικής συγκόλλησης επιχειρείται μαζί με μια εξακρίβωση της επίδρασής τους στις ιδιότητες με πρωτεύουσα σημασία.

5.2.3) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το υλικό που χρησιμοποιείται στα πειράματα είναι το AA5083-H112 (χημική σύνθεση στον Πίνακα 1). Για να προσομοιώσει μια ενιαία επισκευή, οι δύο πάνω ράχες συγκόλλησης απομακρύνθηκαν μηχανικά και οι πλάκες επισκευάστηκαν με συγκόλληση χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους (Πίνακας 2). Για πολλαπλές επισκευές, οι δύο πάνω ράχες συγκόλλησης επίσης αφαιρέθηκαν και η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρις ότου οι πλάκες επισκευαστούν 4 φορές. Τα συγκολλημένα χωρίς περαιτέρω κατεργασία δείγματα σημειώνονται και αναφέρονται στο παρόν έγγραφο ως AW, ενώ τα επισκευασμένα σημειώνονται με R (Repair) 1-4.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	άλλα
5083	0,40	0,40	-	0,4-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-	0,15
5183	0,25	0,40	0,05	0,6-1,0	4,8-5,2	0,05-5,20	0,25	0,15	0,05	0,15

Πίνακας 1: Χημική σύνθεση wt% του βασικού μετάλλου AA5083 και του σύρματος πλήρωσης AA5183

Τα δείγματα από το βασικό μέταλλο και τη συγκολλημένη περιοχή του AW και R1-R4 ετοιμάστηκαν για την οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπική εξέταση. Για την οπτική μικροσκοπία, ήταν μηχανικώς πακτωμένα και είτε μικρο-ανοδιωμένα χρησιμοποιώντας διάλυμα Barkers σε ένα Struers Lectropol-5 (στην περιοχή της συγκόλλησης για να μετρήσει τις αλλαγές του μεγέθους των κόκκων) ή χαραγμένα με Kellers (στο βασικό μέταλλο για τη μέτρηση της καταβύθισης Mg). Για την ηλεκτρονική μικροσκοπία, από την άλλη πλευρά, ήταν μηχανικώς πακτωμένα και ηλεκτρο-γυαλισμένα με ένα διάλυμα 20% HNO₃-80% μεθανόλης στους 40 °C.

Μηχανήματα μικροσκληρομέτρησης Vickers (HV) επιβλήθηκαν στα προαναφερθέντα δείγματα σε όλα τις τρεις ράχες, χρησιμοποιώντας ένα φορτίο επιβολής 20 g.

Το τελευταίο μέρος της πειραματικής εργασίας περιελάμβανε τις μηχανικές δοκιμές επί των συγκολλημένων δειγμάτων και την ανάλυση του κατάγματος. Δείγματα εφελκυσμού και κάμψης ήταν κατασκευασμένα από πλάκες AW και επισκευασμένων (R1-R4) πλακών. Δύο δείγματα ανά σειρά επισκευασμένων ελέγχθηκαν απέναντι στην ένταση προς θραύση. Η καμπτική ικανότητα της συγκόλλησης εξετάστηκε επίσης με επιβολή φορτίου στην εμπρόσθια και τη ριζική ράχη της συγκόλλησης.

Στρώση	Προθέρμανση	Ρεύμα τόξου (A)	Τάση (V)	Ταχύτητα συγκόλλησης (mm/s)
1 (ρίζα)	100	160	22,9	2,36
2	100	220	26,9	2,36
3(εμπρόσθια)	100	235	27,5	2,36

Πίνακας 2: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην τρι-στρωματική ακολουθία συγκόλλησης

5.2.4) Αποτελέσματα και συζήτηση

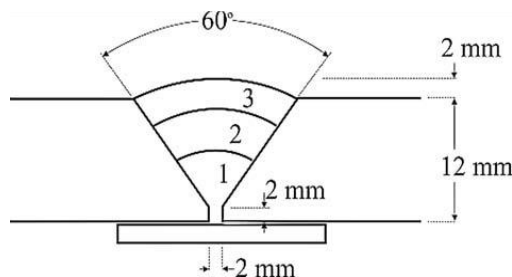
5.2.4.1) Μικροδομή μετά την ανόπτηση

Πριν την εξέταση της συγκόλλησης, μια σειρά διεργασιών ανόπτησης διεξήχθησαν για να εκτιμηθεί η απόκριση βασικών μετάλλων προς τη θερμότητα που εισάγεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Δείγματα από το βασικό μέταλλο θερμάνθηκαν για 10 λεπτά σε θερμοκρασίες κυμαινόμενες από 450 ° C έως το σημείο τήξης και αποσβέστηκαν με νερό.

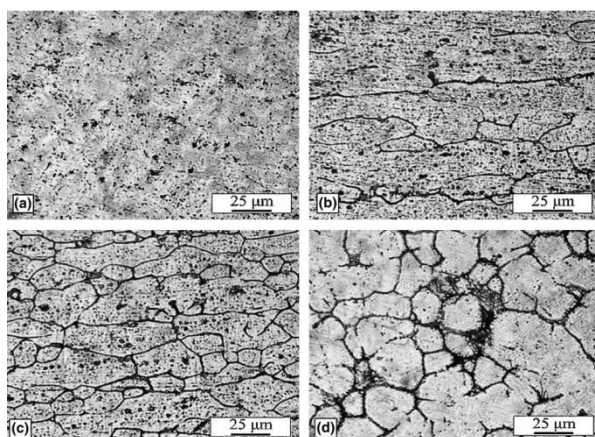
Όσον αφορά την καταβύθιση Mg, η εξέταση των μικρογραφιών έδειξαν ότι μεταξύ 450 και 525 ° C εικόνα 2α, η μικροδομή παρέμεινε αμετάβλητη και αποτελούνταν από ομοιόμορφα διασκορπισμένα κατακρημνίσματα Al_8Mg_5 . Πάνω από 525 ° C εικόνα 2β, τα όρια των κόκκων ήταν πιο εμφανή, διακοσμημένα από το Al_8Mg_5 που καταβυθίστηκε περαιτέρω από στερεό διάλυμα. Μετά από 575 ° C αυτά τα ιζήματα δημιούργησαν συνεχή δίκτυα και στους 600 ° C εικόνα 2γ οι κόκκοι περιβλήθηκαν πλήρως και η μήτρα είχε εξαντληθεί από την φάση σκλήρυνσης. Τέλος, στους περίπου 625 ° C, όπου το κράμα τήκεται, η μήτρα ήταν πρακτικά καθαρή με όλο το Mg να έχει καταβυθιστεί στα όρια των κόκκων εικόνα 2δ.

Η μεταλλογραφική εξέταση έδειξε επίσης αύξηση του μεγέθους του κόκκου και μείωση της σκληρότητας, όσο η θερμοκρασία του υλικού που υπέστη ανόπτηση αυξήθηκε εικόνα 3.

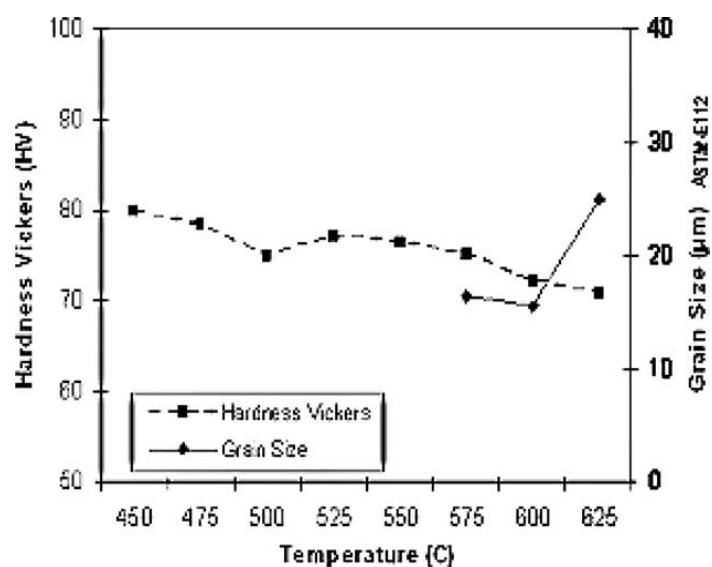
Οι τιμές σκληρότητας του παραγόμενου υλικού στην κατάσταση H-112 ήταν το ίδιο με το υλικό ανόπτησης στους 450 ° C (80 HV), ενώ από 450 ° C έως το σημείο τήξεως υπήρξε μια πτώση 10% εικόνα 3.



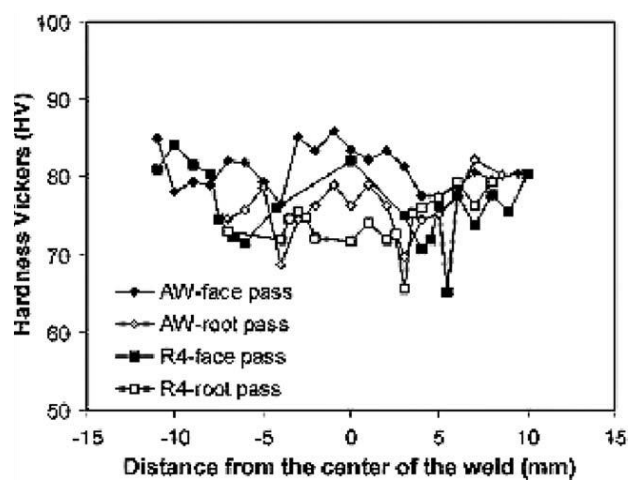
Εικόνα 1: Το σχήμα της συγκόλλησης



Εικόνα 2: Οπτικές μικρογραφίες του βασικού μετάλλου AA5083 μετά από ανόπτηση 10 λεπτών στους (α) 525 °C, (β) 550 °C, (γ) 600 °C, (δ) 625 °C.



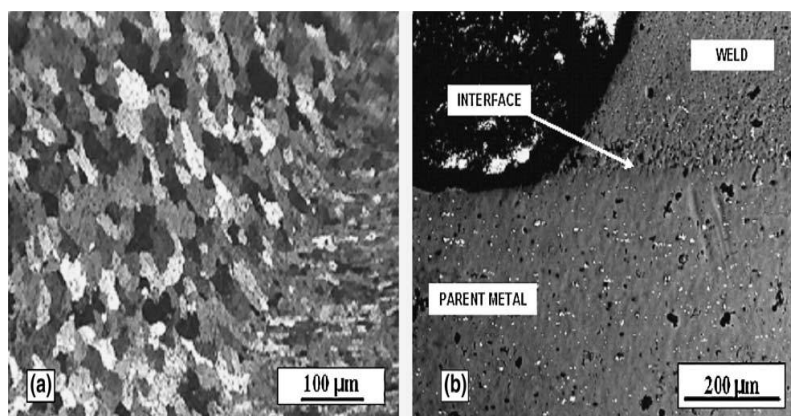
Εικόνα 3: Δοκιμές σκληρότητας και μετρήσεις των μεγεθών των κόκκων έναντι της θερμοκρασίας ανόπτησης για το βασικό μέταλλο.



Εικόνα 4: Προφίλ σκληρότητας επί μήκους των εμπρόσθιων και ριζικών στρωμάτων για δείγματα συγκόλλησης χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (AW) και τετραπλές επισκευαστικές συγκολλήσεις

5.2.4.2. Η μικροδομή μετά τη συγκόλληση

Η εξέταση της μικροδομής επικεντρώθηκε σε δύο διαφορετικά καθεστώτα. Η πρώτη ήταν η HAZ των τριών περασμάτων όπου αναμένεται συνήθως μείωση σκληρότητας. Όπως αναφέρει παραπάνω, κατά τη διάρκεια της επισκευής των δύο πάνω ραχών απομακρύνθηκαν μηχανικά και η διαδικασία συγκόλλησης επαναλήφθηκε. Αυτό σημαίνει ότι μετά από κάθε επισκευή, οι δύο πάνω ράχες στα δείγματα R1-R4 πρέπει να είναι ταυτόσημες με εκείνες του δείγματος AW. Ως αποτέλεσμα της επιλεγθείσας τεχνικής επισκευής, η περιοχή της ριζικής ράχης υποβλήθηκε σε δύο επιπλέον θερμικούς κύκλους. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, η δεύτερη διαδρομή επικεντρώθηκε στην επίδραση που είχαν οι πρόσθετοι θερμικοί κύκλοι στη ριζική ράχη από άποψη του μεγέθους των κόκκων και την εξέλιξη της μικροδομής. Στην εικόνα 4, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι δοκιμές μικρο-σκληρότητας του βασικού μετάλλου AA5083, καθώς και των παρόμοιων, από άποψη χημικής σύνθεσης, συρμάτων πλήρωσης βρίσκεται στην περιοχή από 75-80 HV. Επιπλέον, μια μείωση σκληρότητας είναι προφανές για την περιοχή της HAZ στο δείγμα AW (ρίζα και ράχη) και επίσης στην όψη της ράχης του δείγματος R4. Στη ράχη της ρίζας του δείγματος R4, από την άλλη πλευρά, οι τιμές σκληρότητας είναι γενικά χαμηλές και διάσπαρτες, έτσι ώστε να είναι πολύ δύσκολο να διακρίνει κανείς μια HAZ. Αυτό μπορεί να αποδοθεί κυρίως στην ανακρυστάλλωση της συγκόλλησης και της HAZ που έλαβαν χώρα ως αποτέλεσμα της πρόσθετης θέρμανσης κατά τη διάρκεια των επισκευών.



Εικόνα 5α: οπτική μικρογραφία της διεπαφής μεταξύ του βασικού μετάλλου και την εμπρόσθια στρώση συγκόλλησης του χωρίς μεταγενέστερη επεξεργασία δείγματος (AW). **(β)** Οπίσθια διεσπαρμένη μικρογραφία SEM της ίδιας περιοχής του δείγματος (AW), που δείχνει το πορώδες και την διασπορά των διαμεταλλικών ενώσεων.

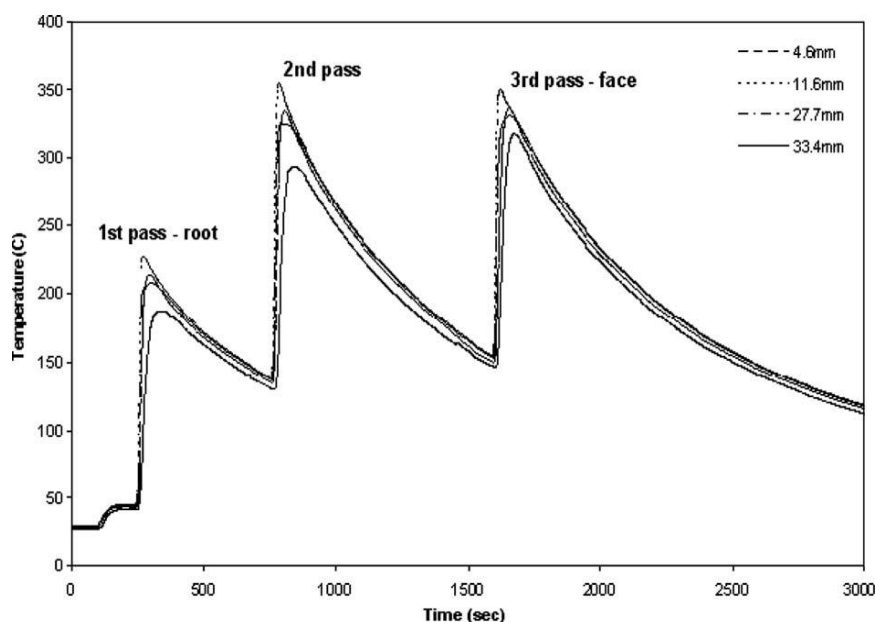
Γενικά, σε όλες τις δοκιμές, η πτώση της σκληρότητας που μετρήθηκε στην HAZ ήταν περίπου 10%, πράγμα που συνάδει με ό, τι άλλοι ερευνητές έχουν παρατηρήσει σε σειρά 5xxx συγκολλημένων κράματων. Αυτή η καταγεγραμμένη πτώση συνεπάγεται την παρουσία μιας υποκείμενης μικροδομικής αλλαγής και ερευνήθηκε.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5α η μετάβαση από το βασικό μέταλλο προς τη συγκόλληση και οι αλλαγές στην σκληρότητα αντιπροσωπεύονται από μια ψυχρή κατεργασμένη μικροδομή στο βασικό μέταλλο, επιμηκυμένοι χονδροειδείς κόκκοι

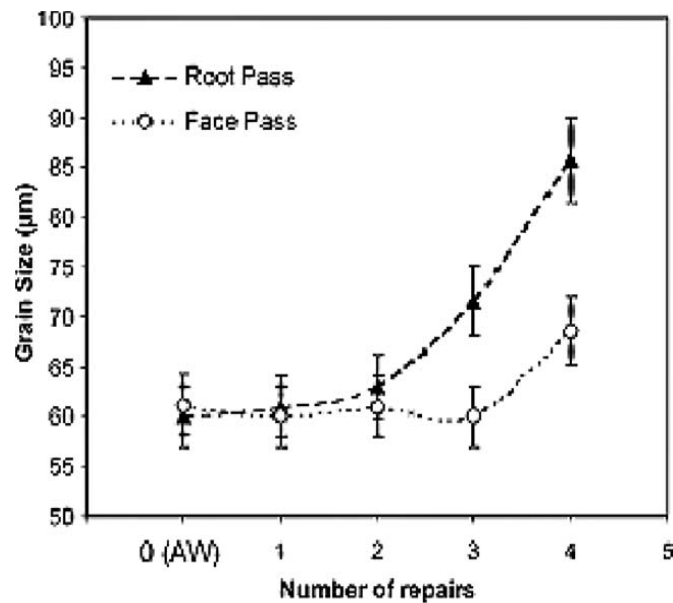
στη HAZ και 65 lm ισοαξονικών κόκκων στη συγκόλληση. Στην εικόνα 5β, μπορεί επίσης να δει κανείς ότι στη διεπαφή της συγκόλλησης, όπου βρίσκεται η HAZ, υπάρχει σημαντική ποσότητα του πορώδους, το οποίο μπορεί να επιδεινώσει μέχρι ένα βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες.

Θερμοστοιχεία (Inconel τύπου-K) που συνδέονται σε διαδοχικές αποστάσεις από το μεταλλικό λούτρο, όσο το δυνατόν πιο κοντά στην HAZ, έδειξαν ότι από την αναμενόμενη υψηλή θερμοκρασία ($> 600^{\circ}\text{C}$) στη διεπαφή με το βασικό μέταλλο, η θερμοκρασία πέφτει στους 360°C , περίπου 500 mm απόστασης από αυτή την περιοχή εικόνα 6. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της HAZ, που εμφανίζεται στην εικόνα 5α, το χονδρότερο μέγεθος των κόκκων που μετρήθηκε ήταν αποτέλεσμα όχι μόνο της επαναλαμβανόμενης θερμοκρασίας μεταξύ 550 και 600°C , αλλά και παραμονή για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα ($> 5\text{ min}$) σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (360°C). Το ίδιο ισχύει για την περιοχή της ρίζας δεδομένου ότι βρίσκεται σε παρόμοιες αποστάσεις από τα ανώτερα στρώματα.

Για να δούμε το αποτέλεσμα που είχαν τα παραπάνω σε αυτόν τον τομέα, εξετάστηκαν πρώτα οι αλλαγές στο μέγεθος των κόκκων και, δεύτερον, η πιθανή εκτράχυνση των παρόντων διαμεταλλικών ενώσεων. Για λόγους σύγκρισης, οι φωτογραφίες τραβήχτηκαν από τη ρίζα και την εμπρόσθια στρώση όλων των δειγμάτων. Στην εικόνα 7, το μέγεθος κόκκου είναι συναρτήσει του αριθμού των επισκευών. Στην εμπρόσθια στρώση, όπως ήταν αναμενόμενο, παρέμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια επισκευών (65 lm). Στη στρώση της ρίζας, από την άλλη πλευρά, υπήρχε μια τάση για ανάπτυξη των κόκκων, όσο ο αριθμός των επισκευών αυξανόταν. Μέχρι τη δεύτερη επισκευή ήταν μέσα στο αναμενόμενο εύρος 60-65 lm, ενώ μετά έφτασε μέχρι 33% για να καταλήξει στα 80 lm στην 4η επισκευή.

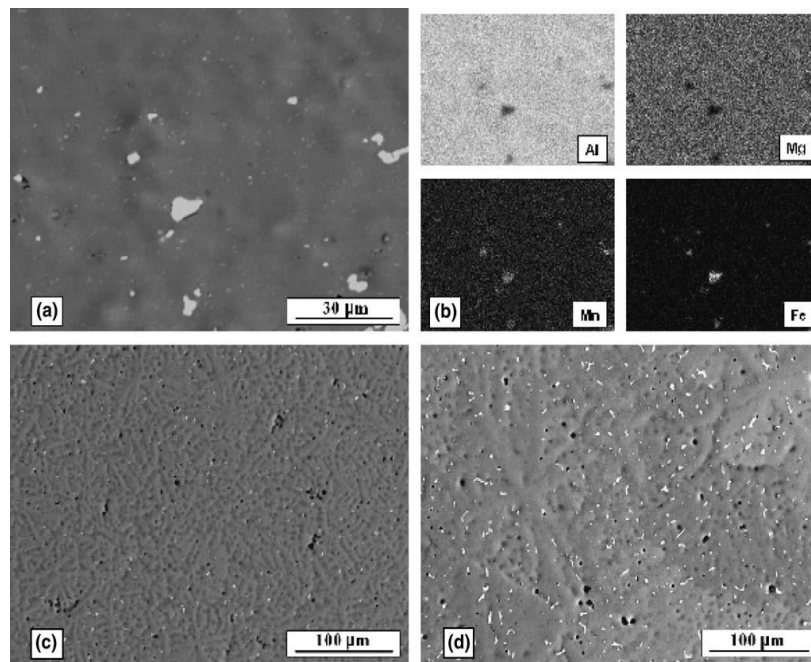


Εικόνα 6: Προφίλ θερμοκρασιών κατά την επίστροφη κάθε στρώματος, καταγεγραμμένο με θερμοστοιχεία που συνδέθηκαν σε διαδοχικές αποστάσεις από το μεταλλικό λούτρο.

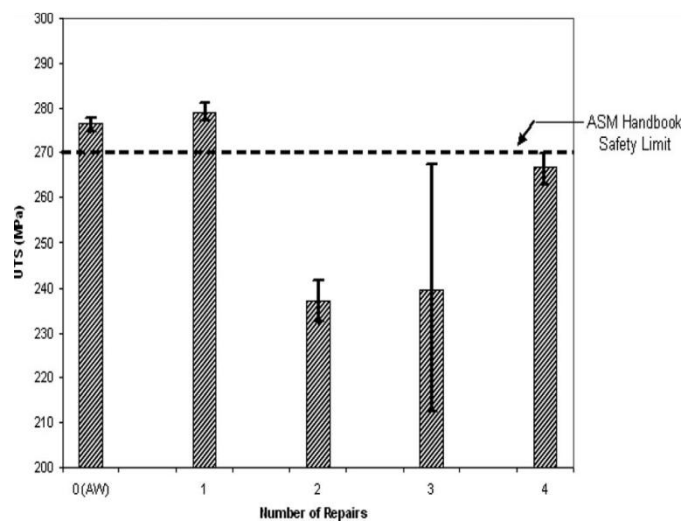


Εικόνα 7: Μέγεθος κόκκων έναντι του αριθμού των επιδιορθώσεων στις περιοχές της ριζικής και εμπρόσθιας συγκόλλησης

Όσον αφορά τις διαμεταλλικές ενώσεις, η παρουσία του σιδήρου και του μαγγανίου στο κράμα είχε ως αποτέλεσμα την καταβύθιση τέτοιων φάσεων. Χάρτες της επιφάνειας και της χημικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν με EDAX-SEM εικόνα 8 α και β, που έδειξαν ότι αυτές οι διαμεταλλικές ενώσεις ήταν είτε Al_6 (MnFe) ή Al_6Mn και Al_3Fe και ήταν παρόντες στο χωρίς μεταγενέστερη επεξεργασία βασικό μέταλλο με μεγέθη που κυμαίνονται μεταξύ 10 και 50 μm . Στη συγκόλληση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των ρυθμών ψύξης που εμπλέκονται στη λεπτότερη διαδικασία παρατηρήθηκαν διαμεταλλικά μεγέθη 1-5 μm εικόνα 8γ. Στη στρώση της ρίζας του δείγματος AW, παρατηρήθηκε μια δενδριτική μικροδομή, μαζί με μια ομοιογενή διασπορά των προαναφερθέντων διαμεταλλικών ενώσεων. Η πρόσθετη θέρμανση εισήγαγε στο στρώμα της ρίζας κατά τη διάρκεια των επισκευών την ανακρυστάλλωση των κόκκων, ενώ εκτράχυνε και ανακατέταξε τις διαμεταλλικές ενώσεις. Είναι προφανές από την εικόνα 8δ ότι μετά την επισκευή των διαμεταλλικών ενώσεων δημιουργούνται σχηματισμοί ζωνών μεταξύ των δενδριτών Al-Mg και το μέγεθός τους αυξήθηκε πάνω από 10 μm . Επιπλέον, ακόμη και αν δεν διεξήχθη ποσοτική ανάλυση του πορώδους, η σύγκριση του σχήματος. 8 γ και δ συνεπάγεται υψηλότερη παρουσία πόρων στα δείγματα επισκευής. Οι αλλαγές που περιγράφονται στη μικροδομή (διαμεταλλικές ενώσεις, ανάπτυξη των κόκκων και το πορώδες) θα μπορούσαν να ραγίσουν τα σημεία εκκίνησης σε συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες θα επηρεάσουν κυρίως τις ιδιότητες κόπωσης και σε μικρότερο βαθμό την αντοχή εφελκυσμού (UTS) της συγκόλλησης. Άρα, αναφέρεται ότι σε μια σύγκριση της επέκτασης των ρωγμών μεταξύ των συγκολλημένων και επισκευασμένων συγκολλημένων πλακών 5083 κατά τη διάρκεια των δοκιμών κόπωσης, παρατηρήθηκε αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των ρωγμών ανάλογα με τον αριθμό των επισκευών και από την αρχή αποτυχία της διαδικασίας.



Εικόνα 8 (α): Οπίσθια-διασκορπισμένη μικρογραφία SEM του βασικού μετάλλου, **(β)** χάρτες της επιφανειακής ανάλυσης της περιοχής που απεικονίζεται στην (α) τα οποία δείχνουν την διασπορά των διαφόρων στοιχείων, **(γ)** Οπίσθια-διασκορπισμένη μικρογραφία της ριζικής στρώσης στο δείγμα AW **(δ)** Οπίσθια-διασκορπισμένη μικρογραφία της ριζικής στρώσης στο δείγμα R4.



Εικόνα 9: UTS έναντι των αριθμών των επισκευών συγκόλλησης. Οι τιμές είναι σε συνάρτηση με τη μέση τιμή της δυο δοκιμών που εφαρμόστηκαν επί κάθε συγκόλλησης

5.2.4.3) Μηχανικές ιδιότητες

Σε αυτή την ενότητα εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων συγκόλλησης και επιδιορθωτικής συγκόλλησης. Δύο δείγματα ανά σειρά συγκόλλησης υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό και κάμψη. Ακόμη και αν οι ιδιότητες κόπωσης είναι πολύ πιο σημαντικές από ό, τι τα UTS κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής, έχει αναφερθεί στο παρελθόν ότι η αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να συνδέεται με καλύτερες ιδιότητες κόπωσης των συγκολλημένων κραμάτων αλουμινίου και ως εκ τούτου, μια άμεση συσχέτιση είναι δυνατή. Επιπλέον, οι δοκιμές εφελκυσμού μπορούν να εξασφαλίσουν ότι οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής, όπως αυτές ορίζονται από τις προδιαγραφές ASTM, τηρούνται και μετά την επιδιόρθωση. Για συγκολλήσεις AA, η ελάχιστη προϋπόθεση αντοχής είναι η ίδια με εκείνη του βασικού μετάλλου, που ορίζεται σε 270 MPa για το AA5083. Όσον αφορά τις ιδιότητες κάμψης, αυτές ελέγχθηκαν με τυπικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων, οι οποίες χρησιμοποιούνται επίσης στα ναυπηγεία όταν απαιτείται ταχεία επιθεώρηση για τυχόν ελαττώματα στη συγκόλληση. Στην εικόνα 9 προβάλλονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού. Από τα δείγματα που εξετάστηκαν, μόνο το AW και το R1 ήταν πάνω από το όριο ασφαλείας των 270 MPa. Όσον αφορά τις συγκολλήσεις που απέτυχαν να περάσουν το όριο ασφάλειας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα από τα δύο R3 και τα δύο δείγματα R4 έχουν συνεπείς τιμές UTS κυμαινόμενες 10 MPa κάτω από τα 270 MPa. Όσον αφορά αυτά που απέτυχαν σε πολύ πρώιμο στάδιο, μακρο-ελέγχος της επιφάνειας του κατάγματος αποκάλυψε την έλλειψη ελαττωμάτων στη σύντηξη, συνήθως κατά τη διεπαφή μεταξύ του πρώτου (ρίζα) και το δεύτερου στρώματος. Ως εκ τούτου, οι σημαντικά χαμηλότερες τιμές UTS σε αυτά τα δείγματα ήταν περισσότερο αποτέλεσμα των ελαττωμάτων συγκόλλησης που προκλήθηκαν από τον χειριστή και λιγότερο της μικροδομικής αλλαγής που συνόδευε τις επισκευές (βλέπε πίνακα 3).

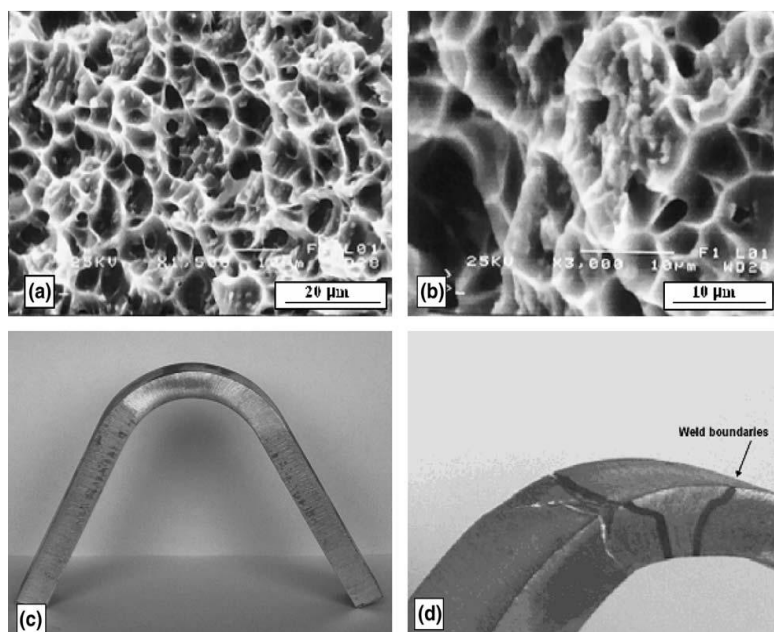
Δείγμα	Κάμψη (επιβολή φορτίου)
Aw1	Πέτυχε (ρίζα)
Aw2	Πέτυχε
R11	Πέτυχε
R12	Πέτυχε
R21	Απέτυχε
R22	Απέτυχε
R31	Απέτυχε
R32	Πέτυχε
R41	Πέτυχε
R42	Πέτυχε

Πίνακας 3

Η ανάλυση της θραύσης των δειγμάτων εφελκυσμού, αποκάλυψε μια παρόμοια επιφάνεια θραύσης σε όλα αυτά, εκτός από τα R21, R22 και R31, όπου η έλλειψη της σύντηξης οδήγησε σε πρόωρη αποτυχία λόγω της μείωσης στην περιοχή του φορτίου. Η επιφάνεια συνήθως αποτελούταν από επιμήκη κοιλώματα, με μοτίβο που δείχνει την ανεπάρκεια μέσω όλκιμων μηχανισμών των ρωγμών εικόνα 10α. Σε υψηλότερες μεγεθύνσεις εικόνα 10β εκτέθηκαν επίσης οι εύθραυστες διακρυσταλλικές περιοχές. Επικεντρωμένη λεπτομερής χημική ανάλυση σε αυτές τις περιοχές έδειξαν υψηλή συγκέντρωση Mg, η οποία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ίσως ήταν τα ιζήματα Al_8Mg_5 που παρατηρήθηκαν κατά την οπτική ανάλυση μικροσκοπίας στα όρια των κόκκων εικόνα 1.

Στα ναυπηγεία μία συγκόλληση θεωρείται επαρκής και αποδεκτή, εάν μετά την πλήρη κάμψη του δείγματος δεν ανιχνεύονται επιφανειακές ρωγμές. Μετά τις δοκιμές κάμψης και σύμφωνα με τις δοκιμές εφελκυσμού, τόσο το R2 και το R3 με το φορτίο που επιβαρύνει τη στρώση της ρίζας απέτυχαν. Σε αυτά τα δείγματα οι ρωγμές πολλαπλασιάζονται είτε από την εμπρόσθια HAZ ή τη στρώση της ρίζας και εξαπλώνονται σε όλο το δείγμα εικόνα 10δ. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι η κάμψη απέτυχε να συμπίπτει με τις αντίστοιχα χαμηλές τιμές UTS στα δείγματα εφελκυσμού (Πίνακας 3). Επιθεώρηση της επιφάνειάς τους εξέθεσε και πάλι την έλλειψη ελαττωμάτων στη σύντηξη. Για παράδειγμα, το δείγμα R3 όπου το μη συνενωμένο στρώμα βρέθηκε μεταξύ της πρώτης και δεύτερης ράχης κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, απέτυχε όταν το φορτίο επιβλήθηκε στη ρίζα και έτσι πλησιέστερα στο ελάττωμα.

Παράλληλη μελέτη των αποτελεσμάτων των μηχανικών δοκιμών άφησε να εννοηθεί ότι αν δεν υπάρχουν σοβαρά ελαττώματα συγκόλλησης παρόντα, οι συγκολλήσεις συμπεριφέρονται με συνεπείς τιμές UTS μόνο μερικά MPa κάτω από το όριο ασφαλείας. Είναι προφανές από τον Πίνακα 3 ότι, ενώ οι τιμές UTS μετά από 3 επισκευές (R3) είναι κάτω από το όριο ασφαλείας, τα ίδια δείγματα περνούν επιτυχώς τις δοκιμές κάμψης.



Εικόνα 10α: Μικρογραφία SEM της ραγισμένης επιφάνειας – δείγματος AW (β) Υψηλότερη μεγέθυνση της προηγούμενης μικρογραφίας επικεντρώνοντας στις περιοχές ψαθυρής θραύσης, ειδικά στα ιζήματα Al_8Mg_5 (γ) φωτογραφία του δείγματος R1 μετά τη δοκιμή κάμψης (πέτυχε) (δ) φωτογραφία του δείγματος R2 μετά τη δοκιμή κάμψης (απέτυχε) – ρωγή που προώθησε η HAZ.

5.2.5) Συμπεράσματα

Στο κείμενο αυτό, διερευνάται η επίδραση των μικροδομικών αλλαγών που συνοδεύουν μια κοινή τεχνική επισκευαστικής συγκόλλησης, επί των μηχανικών ιδιοτήτων. Με βάση την ανάλυση που περιγράφεται παραπάνω, τα ακόλουθα συμπεράσματα συνάγονται:

- Η θέρμανση του βασικού μετάλλου (AA5083) κοντά στο σημείο τήξεως οδήγησε σε φαινόμενα μεγέθυνσης των κόκκων και τον σχηματισμό διαδοχικών δικτύων ιζήματος στα όρια των κόκκων.
- Η θέρμανση του βασικού μετάλλου (AA5083) κοντά στο σημείο τήξης προκάλεσε 10% πτώση στη σκληρότητα σε σύγκριση με το χωρίς μεταγενέστερη επεξεργασία βασικό μέταλλο. Η μικροδομή που παρατηρείται στην HAZ ήταν το αποτέλεσμα της επαναλαμβανόμενης θέρμανσης μεταξύ 550 και 600 ° C στο λουτρό τήξης του σημείου συγκόλλησης.
- Η μικροδομή των δύο πάνω στρώματων στη συγκόλληση ήταν παρόμοια μετά από κάθε επισκευή και είχαν όμοιου μεγέθους κόκκους και τιμές σκληρότητας.
- Στο χαμηλότερο στρώμα συγκόλλησης, το μέγεθος του κόκκου αυξήθηκε ανάλογα με τον αριθμό των επισκευών.
- Στο χαμηλότερο στρώμα της συγκόλλησης, το μέγεθος του διαμεταλλικού Fe-Mn και η ποσότητα του πορώδους αυξήθηκε με τον αριθμό των επισκευών.
- Οι πρόσθετες θερμικοί κύκλοι μετά από κάθε επισκευή οδήγησαν σε μαλάκωμα του κατώτερου στρώματος και του γειτονικού βασικού μετάλλου.
- Τα χωρίς μεταγενέστερη επεξεργασία συγκολλημένα και τα επιδιορθωμένα συγκολλημένα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού. Μετά την πρώτη επισκευή, οι τιμές UTS έπεσαν κάτω από το όριο ασφαλείας των 270 MPa.
- Τα UTS των αποτυχημένων δειγμάτων, δεν είχαν ελαττωμάτων σύντηξης και ήταν κοντά στο όριο ασφαλείας.
- Στα κομμάτια που δεν απουσίαζαν ελαττώματα σύντηξης, τα χωρίς μεταγενέστερη επεξεργασία συγκολλημένα δοκίμια και όλα τα επισκευασμένα συγκολλημένα δοκίμια πέρασαν με επιτυχία τις δοκιμές κάμψης.
- Η επίδραση των μεταβολών της μικροδομής, που παρατηρήθηκε μετά την επισκευαστική συγκόλληση κυρίως στο στρώμα της ρίζας (μεγέθυνση κόκκων, αύξηση διαμεταλλικών ενώσεων, πορώδες), επί των μηχανικών ιδιοτήτων αντιπροσωπεύεται από μια μείωση των 10 MPa. Αυτή η μείωση είναι επαρκής, όσον αφορά τα εξετασθέντα συγκολλημένα δείγματα, για τη μείωση των τιμών UTS κάτω από το ελάχιστο όριο ασφαλείας.

5.3) Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloys joint properties. (S. Malavrizhi, V. Balasubramanian)

5.3.1)Σύνοψη

Τετραγωνισμένα δοκίμια από κράμα αλουμινίου AA2219 συγκολλήθηκαν μετωπικά χωρίς να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο πλήρωσης εκτελώντας διαδικασίες συγκόλλησης όπως συγκόλληση με τόξο σε αδρανή ατμόσφαιρα με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο (GTAW), με μέθοδο συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW) και συγκόλληση τριβής (FSW). Οι επιδράσεις των τριών μεθόδων συγκόλλησης στην συμπεριφορά εφελκυσμού, κόπωσης και διάβρωσης αποτέλεσαν αντικείμενο εξέτασης. Πραγματοποιήθηκε μικροδομική ανάλυση χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο και μικροσκόπιο ηλεκτρονίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι σύνδεσμοι FSW παρουσιάζουν ανώτερες ιδιότητες εφελκυσμού και κόπωσης σε σύγκριση με συνδέσμους EBW και GTAW. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι συγκολλήσεις τριβής παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή στη διάβρωση από τους συνδέσμους EBW και GTAW. Αυτό οφείλεται κυρίως στη παρουσία λεπτότερων κόκκων και την ομοιόμορφη διανομή των ενδυναμωτικών ιζημάτων στο συγκολλημένο μέταλλο των συνδέσμων FSW.

5.3.2)Εισαγωγή

Το κράμα AA2219 είναι ένα τριαδικό κράμα Al-Cu-Mn με άριστες κρυογενικές ιδιότητες. Έχει μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων όπως καλή συγκολλησιμότητα και συγκεκριμένη υψηλή αντοχή. Η προτεινόμενες διαδικασίες συγκόλλησης για κράμα αλουμινίου AA2219 συνήθως είναι η συγκόλληση τόξου με προστατευτική ατμόσφαιρα (GMAW) και η συγκόλληση με τόξο σε αδρανή ατμόσφαιρα με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο (GTAW), γεγονός που οφείλεται στη σχετικά εύκολη εφαρμογή τους και την καλύτερη από πλευράς οικονομίας επιλογή. Η συγκόλληση με εκτόξευση πλάσματος (PAW) με θετική πολικότητα ηλεκτροδίου και ρεύμα υψηλής τάσης επιτρέπει στις συγκολλήσεις αλουμινίου να συνδεθούν οικονομικά με άριστη ποιότητα συγκόλλησης. Σε σύγκριση με ηλεκτρικά τόξα, η δέσμη ηλεκτρονίων χαρακτηρίζεται από μια υψηλότερη σε πυκνότητα ισχύς η οποία και επιτρέπει ταχύτητα συγκόλλησης περισσότερο από 1m/min της μιας στρώσης των συγκολλήσεων των τετραγωνισμένων δοκιμίων πάχους μέχρι περίπου 8mm σε επίπεδη θέση στη συγκόλληση. Οι συγκολλήσεις με δέσμη ηλεκτρονίων των περισσότερων συγκολλησιμων υλικών συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων αλουμινίου, παρουσιάζουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τις συγκολλήσεις που κατασκευάζονται με GTAW.

Αν και το κράμα AA2219 έχει καλύτερη συγκολλησιμότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους κραμάτων αλουμινίου, παρουσιάζει χαμηλή αντοχή στα σημεία των συγκολλήσεων. Αυτό ισχύει τόσο σε αυτογενείς συγκολλήσεις όσο και σε εκείνες που συγκολλούνται με το ίδιο ηλεκτρόδιο πλήρωσης. Η απώλεια της αντοχής είναι εξαιτίας της τήξης και της ταχύτατης επαναστερεοποίησης, που καθιστά όλα τα ενισχυτικά ιζήματα διαλυτά με αποτέλεσμα το υλικό να είναι τόσο καλό όσο και ένα χυτό υλικό διαλυτού διαχωρισμού και με κόκκους σε μεγάλες στήλες. Σε σύγκριση με πολλές διαδικασίες συγκόλλησης τήξης που κατά κόρον εφαρμόζονται για τη

σύνδεση διαρθρωτικών κραμάτων, η συγκόλληση τριβής (FSW) αποτελεί μια αναδυόμενη διαδικασία στερεάς σύνδεσης όπου το υλικό που υπόκειται σε συγκόλληση δεν λιώνει ούτε αναδιαμορφώνεται. Επίσης, η διαδικασία FSW εφαρμόζεται ευρέως για την σύνδεση των περισσότερων κραμάτων αλουμινίου καθώς παρατηρείται ότι προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα απ' ό, τι η συγκόλληση τήξης χάρη στην έλλειψη τήξης του βασικού μετάλλου. Κατά τη συγκόλληση, η θερμότητα τριβής που συνδέεται με τον θερμικό κύκλο διαφέρει κατά την εγκάρσια κατεύθυνση της συγκόλλησης. Η υψηλότερη θερμοκρασία που έχει καταγραφεί στη ζώνη FSP προκαλεί αλλοιώσεις στην διανομή των ιζημάτων που βρίσκονται στο μέταλλο βάσης εξαιτίας της ανάμειξης του πλαστικοποιημένου υλικού. Αυτές οι εναλλαγές στη διάδοση της θερμότητας και θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία συγκόλλησης τροποποιούν την αντοχή και την ολκιμότητα των συνδέσμων. Στην παρούσα έρευνα έγινε σύγκριση στις ιδιότητες εφελκυσμού, κόπωσης και διατρητικής διάβρωσης των συγκολλήσεων κράματος αλουμινίου AA2219 που κατασκευάστηκαν με GTAW, EBW και FSW.

5.3.3) Πειραματική διαδικασία

Οι τετράγωνες πλάκες από κράμα αλουμινίου AA2219-T87 κόπηκαν και υπέστησαν μηχανική επεξεργασία για να προκύψουν οι διαστάσεις 300mm x 150mm x 5mm δημιουργώντας τομές και λείες επιφάνειες με σιδηροπρίονο ισχύος. Η χημική σύνθεση του μετάλλου βάσης καταγράφεται στον Πίνακα 1. Οι τετράγωνες πλάκες προετοιμάστηκαν για να συγκολληθούν μετωπικά με την μέθοδο των GTAW, EBW και FSW χωρίς την προσθήκη ηλεκτροδίων πλήρωσης, και οι διαστάσεις φαίνονται στο Σχ. 1 (α). Οι συγκολλήσεις GTAW πραγματοποιήθηκαν με μηχανή συγκόλλησης Lincoln (HPIA) με ισχύς 400 A. Οι σύνδεσμοι EBW πραγματοποιήθηκαν με μια μηχανή συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων (Techmeta, Γαλλίας) με ισχύς 100 kV. Οι σύνδεσμοι FSW πραγματοποιήθηκαν με μια μηχανή συγκόλλησης FSW κατασκευασμένη και ανεπτυγμένη από τους ιδίους (11 190 W, 3000 r/min, 5 kN) χρησιμοποιώντας ένα μη-αναλώμενο εργαλείο από σκληρό χάλυβα. Οι συνθήκες συγκόλλησης βελτιστοποιήθηκαν για την χωρίς ελαττώματα κατασκευή των συγκολλήσεων. Οι συνθήκες συγκόλλησης και οι παράμετροι της διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Cu	Mn	Fe	Zr	V	Si	Ti	Zn	Al
6,33	0,34	0,13	0,12	0,07	0,06	0,04	0,02	Bal

Πίνακας 2.3.1: Χημική σύνθεση του μετάλλου βάσης (ποσοστό κατά βάρος, %)

Παράμετρος	GTAW	EBW	ESW
Ρεύμα	150A	51MAa	
Τάση	30V	50KV	
Ταχύτητα	3mm/s	16mm/s	
Πόλωση	AC	DC	I
Κενό	I	10pa	
Προστατευτικό αέριο	99,99% Ar	i	I
Ρυθμός ροής αερίου	14 L/min	I	I
Ταχύτητα περιστροφής εργαλείου			1400r/min
Ταχύτητα συγκόλλησης			1,5mm/s
Αξονικά δύναμη			12KN
Στοιχεία του εργαλείου FSW			Πύρος με σπείρωμα μεγέθους $d6\text{mm} \times 4,8\text{mm}$ κατασκευασμένο από χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα

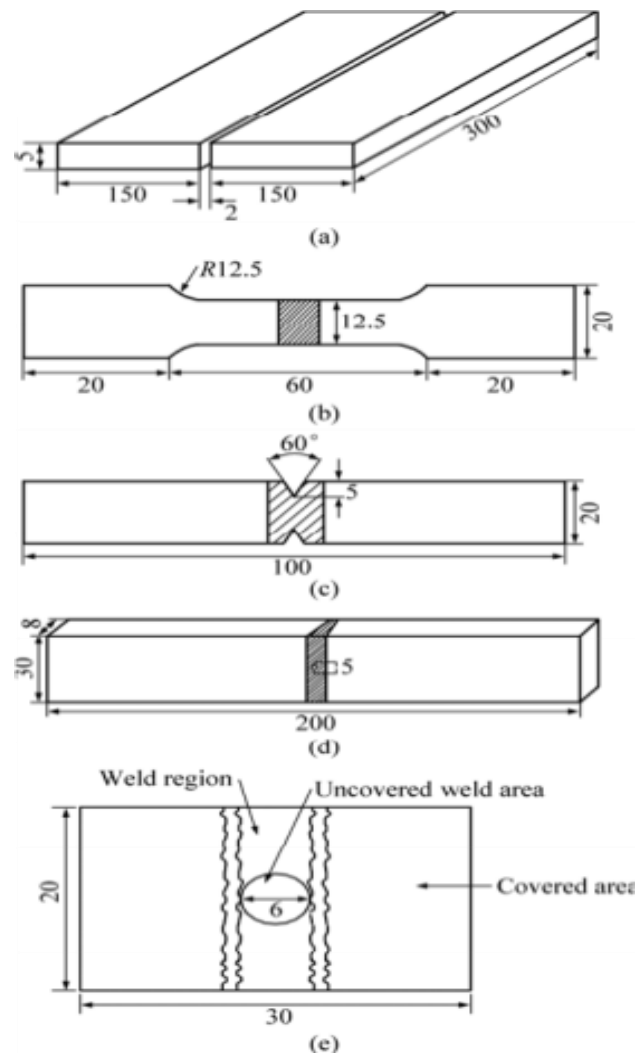
Πίνακας 2.3.2: Συνθήκες συγκόλλησης και παράμετροι διαδικασίας

Τα συγκολλημένα δοκίμια κόπηκαν σε λεπτές φέτες με μια πριονοκορδέλα και μετά υπέστησαν μηχανική επεξεργασία ώστε να ικανοποιούν τις απαιτούμενες διαστάσεις. Δυο είδη δειγμάτων δοκιμής εφελκυσμού προετοιμάστηκαν, δοκίμια με ίδιο ύψος και πλάτος σε όλο το μήκος της συγκόλλησης εικόνα:1(β) και δοκίμια με κατεργασμένη εγκοπή γωνία βάθους 5mm και 60° στο σημείο της συγκόλλησης εικόνα:1(γ), σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM E8M-04. Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε μια ηλεκτρο-μηχανικά ελεγχόμενη πολλαπλής χρήσεως μηχανή δοκιμών στα 100 kN (FIE, Ινδίας, UNITECH 94001). Εξετάστηκαν από το δοκίμιο με τις ίδιες διαστάσεις σε όλο το μήκος του το 0,2% του ορίου διαρροής, η οριακή αντοχή σε εφελκυσμό, η επιμήκυνση και η αποδοτικότητα του συνδέσμου βάση των διαστάσεων που παρουσιάζονται στην εικόνα:1(β). Η εφελκυστική αντοχή της συγκόλλησης με την εγκοπή γωνία βάθους 5mm εξετάστηκε με βάση το δείγμα που οι διαστάσεις φαίνονται στην εικόνα:1(γ).

Συγκολλημένα δοκίμια των ίδιων διαστάσεων σε όλο το μήκος τους εξετάστηκαν στην εγκάρσια κατεύθυνση (προς την κατεύθυνση συγκόλλησης) ώστε να

αξιολογηθεί αντοχή σε κόπωση, και οι διαστάσεις φαίνονται στην εικόνα:1(β). Τα συγκολλητά δοκίμια με την κατεργασμένη εγκοπή εξετάστηκαν για συγκέντρωση των τάσεων που οδηγεί σε κόπωση και ο δείκτης ευαισθησίας και οι διαστάσεις παρατίθενται στην εικόνα:1(γ). Τα πειράματα δοκιμών κόπωσης διεξήχθησαν κάτω από μονοαξονικές συνθήκες φορτίων εφελκυσμού (λόγο τάσεων=0) και χρησιμοποιώντας σερβο-υδραυλική μηχανή δοκιμής κόπωσης (INSTRON, H.B, Μοντέλο: 8801). Σε κάθε επίπεδο τάσης τρία δείγματα εξετάστηκαν και η μέση αξία των αποτελεσμάτων των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για να χαραχθούν καμπύλες $S\ddot{U}N$.

Δοκίμια προετοιμάστηκαν για την εξέταση ανάπτυξης ρωγμών θραυστικής έντασης (CCT) στις διαστάσεις που εμφανίζονται στην εικόνα:1(δ). Τα δοκίμια που προέκυψαν από τις συγκολλήσεις μονής στρώσης μειώθηκαν σε πάχος 4 mm με διαδικασίες διαμόρφωσης και λείανσης για να αποκτήσουν επίπεδες και αναλόγως σκληρές επιφάνειες. Η εγκοπή επιτεύχθηκε μηχανικώς στην περιοχή της μεταλλικής συγκόλλησης στο επιθυμητό μήκος χρησιμοποιώντας μια μηχανή ηλεκτρικής ισχύος (EDM) ηλεκτροδίου κοπής. Οι διαδικασίες για την προετοιμασία των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές AST, E647-04.



Εικόνα 2.3.1: Διαστάσεις διαφόρων δειγμάτων δοκιμής (Μονάδα: mm): α) Δοκίμια έτοιμα προς συγκόλληση, β) δοκίμιο εφελκυσμού/κόπωσης με ίδιες διαστάσεις στο μήκος συγκόλλησης, γ) δείγμα εφελκυσμού/κόπωσης με εσοχή γωνία 5mm, δ) δείγμα δοκιμής αντοχής θραύσης (CCT), ε) δείγμα δοκιμής διάβρωσης.

Η δοκιμή ανάπτυξης ρωγμών διεξήχθη χρησιμοποιώντας μια σερβο-υδραυλικά ελεγχόμενη μηχανή UTM ισχύς 100 kN (INSTRON, HB, Μοντέλο: 8801) με συχνότητα 10 Hz κάτω από συνεχές πλάτος φόρτωσης (λόγος τάσεων= $z_{min}/z_{max}=0$). Τα πειράματα ανάπτυξης ρωγμών διεξήχθησαν σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα τάσης των 25, 50, 75 και 100 MPa, αντίστοιχα. Πριν την φόρτωση, η επιφάνεια του δείγματος λειάνθηκε με μεταλλογραφικές διαδικασίες και φωτίστηκε αναλόγως ώστε να επιτρέψει την μέτρηση της ανάπτυξης των ρωγμών. Χρησιμοποιήθηκε ένα μικροσκόπιο (MINTUTOYA, Μοντέλο 5010) για την παρατήρηση της ανάπτυξης των ρωγμών με ακρίβεια 0,01 mm. Σε αυτήν την έρευνα, ο εφαρμοζόμενος κύκλος τάσης ήταν σε κατάσταση έλξης (το ελάχιστο της τάσης διατηρήθηκε στο μηδέν) καθώς η κατάσταση συμπίεσης συνήθως σφραγίζει τη ρωγμή κόπωσης. Τα σημεία των δεδομένων που μετρήθηκαν με ακρίβεια των 0,01 mm τοποθετήθηκαν με λεία καμπύλη στη μορφή της ρωγμής μήκους L σε αριθμό κύκλων N.

Για την δοκιμή για σημάδια διάβρωσης, δείγματα με μέγεθος 20 mm x 30 mm προετοιμάστηκαν για να έρθουν σε έκθεση της κυκλικής περιοχής με διάμετρο 6 mm στην περιοχή συγκόλλησης προς τον ηλεκτρολύτη. Η υπόλοιπη περιοχή καλύφθηκε με βερνίκι που είναι ανθεκτικό στα οξέα. Οι τυποποιημένες μεταλλογραφικές διαδικασίες ακολουθήθηκαν κατά την προετοιμασία των δειγμάτων. Οι διαστάσεις του δείγματος παρουσιάζονται στην εικόνα:1(ε).

Ένα μηχάνημα δοκιμής μικροσκληρυνσης Vicker (Shimadzu, Ιαπωνία) χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της σκληρυνσης επί του συνδέσμου κάτω από φορτίο 0,49 N. Η μικροδομική ανάλυση διεξήχθη χρησιμοποιώντας ένα οπτικό μικροσκόπιο φωτός (MEIJI, Ιαπωνία, Μοντέλο: ML7100) ενσωματωμένο με λογισμικό ανάλυσης εικόνας (Clemex-Vision). Τα δείγματα προς μικροσκοπική ανάλυση κατατμήθηκαν στο επιθυμητό μέγεθος του αποτελούμενου από το μέταλλο συγκόλλησης συνδέσμου, οι περιοχές HAZ και μετάλλου βάσης λειάνθηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές βαθμίδες χαρτιού σμυρίδας. Μια τελική λείανση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια ένωση διαμαντιού με μέγεθος σωματιδίου 1 μm στο μηχάνημα στίλβωσης με δίσκο. Τα δείγματα χαράχθηκαν με αντιδραστήριο Kellers για να αποκαλυφθεί η μικροδομή.

Καθώς οι περισσότεροι σύνδεσμοι είχαν αποτύχει στην περιοχή συγκόλλησης, μόνο η ζώνη συγκόλλησης των συνδέσμων αναλύθηκε χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο εκπομπής (PHILIPS, Μοντέλο: CM20) για να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και τη διανομή των ιζημάτων. Διεξήχθη επίσης ανάλυση με ακτίνες X της διασποράς ηλεκτρονίων ώστε να αναγνωριστεί η σύνθεση των συγκεκριμένων ιζημάτων. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (JEOL, Ιαπωνία, Μοντέλο: 5610LV) σε υψηλή μεγέθυνση χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της μορφολογίας των ρωγμών των δειγμάτων της δοκιμής εφελκυσμού για να καθοριστεί η φύση της ρωγμής.

Ιδιότητα	BM	GTAW	EBW	ESW
Όριο διαρροής MPa	390	220	265	305
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό MPa	470	242	304	342
Επιμήκυνση %	15,0	8,8	10,4	12,2
Μείωση εμβαδού διατομής %	10,5	6,2	7,5	8,6
Αντοχή δοκιμίου με εσοχή σε εφελκυσμό MPa	442	182	243	291
Λόγος αντοχής δοκιμίου με εσοχή	0,93	0,75	0,80	0,85
Αποδοτικότητα συγκόλλησης	I	51	64	72

Πίνακας 2.3.3. Ιδιότητες εγκάρσιου εφελκυσμού των συγκολλημένων συνδέσμων

5.3.4)Αποτελέσματα

5.3.4.1)Ιδιότητες εφελκυσμού

Οι ιδιότητες του εγκάρσιου εφελκυσμού των πειραματικά αξιολογημένων συνδέσμων από κράμα αλουμινίου AA2219 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και όλα τα στοιχεία είναι οι μέσες τιμές των τριών μετρημένων τιμών. Το μη-συγκολλημένο βασικό μέταλλο παρουσιάζει αντοχή θραύσης και αντοχή εφελκυσμού 390 και 470 MPa, αντίστοιχα. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, οι σύνδεσμοι GTAW παρουσιάζουν την χαμηλότερη αντοχή θραύσης και αντοχή εφελκυσμού στα 220 και 242 MPa, αντίστοιχα. Αυτό υπονοεί μια μείωση κατά 50 % στις τιμές αντοχής λόγω της συγκόλλησης GTA. Οι σύνδεσμοι FSW παρουσιάζουν την μέγιστη αντοχή θραύσης και αντοχή εφελκυσμού στα 305 και 342 MPa, αντίστοιχα. Αν και αυτές οι τιμές είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του βασικού μετάλλου, οι τιμές αντοχής είναι ωστόσο 40% υψηλότερες από εκείνες των συνδέσμων GTAW. Οι σύνδεσμοι EBW παρουσιάζουν αντοχή θραύσης και αντοχή εφελκυσμού στα 265 και 304 MPa, αντίστοιχα, τιμές οι οποίες είναι 30% υψηλότερες από εκείνες των συνδέσμων GTAW και 15% χαμηλότερες από εκείνες των FSW συνδέσμων.

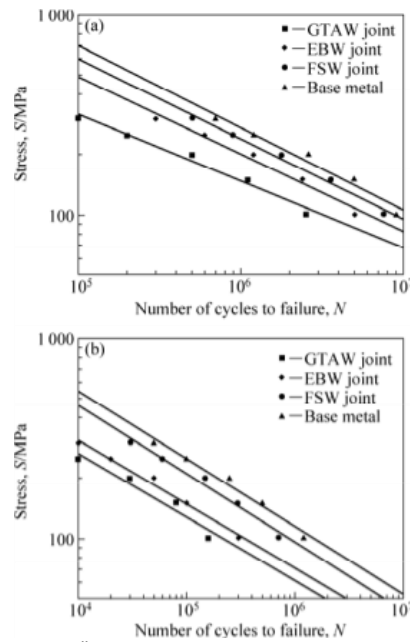
Το μη-συγκολλημένο βασικό μέταλλο δείχνει μια επιμήκυνση και μείωση στην επιφάνεια διατομής (CSA) 15% και 10,5% αντίστοιχα. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, οι σύνδεσμοι GTAW παρουσιάζουν την μικρότερη επιμήκυνση και μείωση στην επιφάνεια διατομής 8,8% και 6,2%, αντίστοιχα. Αυτό

υπονοεί ότι υπάρχει μια μείωση 40% στις τιμές ολκιμότητας εξαιτίας της συγκόλλησης GTA. Οι σύνδεσμοι FSW παρουσιάζουν την υψηλότερη τιμή επιμήκυνσης και μείωσης στην επιφάνεια διατομής στα 12,2% και 8,6%, αντίστοιχα. Αν και αυτές οι τιμές είναι χαμηλότερες από εκείνες του βασικού μετάλλου, οι τιμές επιμήκυνσης είναι 40% υψηλότερες από εκείνες των συνδέσμων GTAW. Οι σύνδεσμοι EBW επίσης παρουσιάζουν επιμήκυνση και μείωση στην επιφάνεια διατομής στα 10,4% και 7,5%, αντίστοιχα, τιμές οι οποίες είναι 20% υψηλότερες από εκείνες των συνδέσμων GTAW και 15% χαμηλότερες από εκείνες των συνδέσμων FSW.

Ο λόγος της αντοχής στον εφελκυσμό με εσοχή (NSR) είναι ο λόγος μεταξύ της αντοχής εφελκυσμού του δοκιμίου με εγκοπή και εκείνου του δοκιμίου που είναι επίπεδο. Η τιμή NSR της μη-συγκολλημένης πλάκας βάσης και των συγκολλημένων συνδέσμων είναι λιγότερο από 1. Από αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το κράμα AA2219 είναι ευαίσθητο στις εγκοπές και άρα ανήκει στην κατηγορία των υλικών με ευθραυστότητα σε εγκοπές. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, οι σύνδεσμοι FSW παρουσιάζουν την μεγαλύτερη τιμή NSR στα 0,85 (η ευαισθησία εγκοπής είναι χαμηλότερη) και οι σύνδεσμοι GTAW παρουσιάζουν την χαμηλότερη τιμή NSR των 0,75 (η ευαισθησία εγκοπής είναι υψηλότερη). Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, οι σύνδεσμοι FSW παρουσιάζουν την υψηλότερη αποδοτικότητα του συνδέσμου στα 72%, τιμή η οποία είναι 20% υψηλότερη από εκείνη των συνδέσμων GTAW και 12% υψηλότερη από εκείνη των συνδέσμων EBW.

5.3.4.2) Ιδιότητες κόπωσης

Η εικόνα 2 δείχνει τις καμπύλες $S\ddot{U}N$ των δοκιμίων με εγκοπή και αυτών χωρίς εγκοπή. Η επίδραση των διαδικασιών συγκόλλησης στη διάρκεια της αντοχής σε κόπωση των συνδέσμων παρουσιάζεται μέσα από αυτούς τους αριθμούς. Όταν συγκρίνεται η αντοχή κόπωσης των διαφορετικών συνδέσμων συγκόλλησης που υποβλήθηκαν σε παρόμοια φόρτωση, κρίνεται σκόπιμο να εκφραστεί η αντοχή κόπωσης με όρους της συγκεκριμένης διάρκειας ζωής που αντιστοιχούν αναλόγων στις εντάσεις, επί της μέσης τιμής της καμπύλης $S\ddot{U}N$. Η επιλογή της συγκρίσιμης διάρκειας είναι αυθαίρετη -2×10^6 κύκλοι εφαρμόζονται – και πράγματι κάποιοι κωδικοί σχεδίασης αναφέρονται στις δικές τους καμπύλες $S\ddot{U}N$ με όρους που ανταποκρίνονται στο εύρος της έντασης. Για τους λόγους αυτούς, στην παρούσα έρευνα, η αντοχή κόπωσης στους 2×10^6 κύκλους αποτέλεσε το όριο αντοχής για την διεξαγωγή σύγκρισης. Το όριο αντοχής αξιολογήθηκε σε όλους τους συνδέσμους και παρατίθεται στον Πίνακα 4.



Εικόνα 2.3.2: Καμπύλες S $\ddot{U}$ N των οδοντωτών (β) και μη-οδοντωτών δειγμάτων (α).

Είδος συνδέσμου	Αντοχή κόπωσης δοκιμών χωρίς εγκοπή σε $2 \cdot 10^6$ κύκλους/MPa	Αντοχή κόπωσης δοκιμών με εγκοπή σε $2 \cdot 10^6$ κύκλους/MPa	Συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων σε κόπωση Kf	Συντελεστής ευαισθησίας εγκοπής q
BM	200	110	1,82	0,33
GTAW	110	50	3,21	0,75
EBW	150	55	2,73	0,69
FSW	180	80	2,19	0,48

Πίνακας 2.3.4. Ιδιότητες κόπωσης των συνδέσμων

Η αντοχή κόπωσης του μη-συγκολλημένου συνδέσμου από κράμα αλουμινίου AA2219 είναι 200 MPa. Και οι τρεις διαδικασίες απεδείχθησαν κρίσιμες για την αντοχή κόπωσης του κράματος αλουμινίου AA2219, όπως διαφαίνεται και στην εικόνα: 2.3.,2(α). Από τους τρεις αυτούς συνδέσμους, οι σύνδεσμοι που κατασκευάστηκαν με διαδικασία FSW παρουσίασαν πολύ υψηλή αντοχή κόπωσης. Η αντοχή κόπωσης του συνδέσμου FSW είναι 180 MPa, τιμή η οποία είναι 10% χαμηλότερη σε σύγκριση με εκείνη του μετάλλου βάσης. Οι σύνδεσμοι EBW παρουσιάζουν μια αντοχή κόπωσης στα 150 MPa, η οποία είναι 25% χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή του μετάλλου βάσης. Οι σύνδεσμοι GTAW εμφανίζουν την χαμηλότερη αντοχής κόπωσης στα 110 MPa, η οποία είναι 45% χαμηλότερη από εκείνη του μετάλλου βάσης.

Η επίδραση των εγκοπών στην αντοχή κόπωσης καθορίζεται από τη σύγκριση των καμπύλων S $\ddot{U}$ N των δοκιμών με εγκοπή και μη. Τα στοιχεία των δοκιμών με εγκοπή συνήθως απεικονίζονται με όρους ονομαστικής έντασης που βασίζεται στο τμήμα δικτύωσης του δείγματος. Η επίδραση της εγκοπής στην μείωση του ορίου

κόπωσης εκφράζεται από το συντελεστή μείωσης της αντοχής κόπωσης ή το συντελεστή εγκοπής κόπωσης K_f . Ο συντελεστής κόπωσης εγκοπής για όλους τους συνδέσμους αξιολογείται με βάση την ακόλουθη παράσταση και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4:

K_f = όριο κόπωσης του δοκιμίου χωρίς εγκοπή / όριο κόπωσης του δοκιμίου με εγκοπή (1)

Η ευαισθησία εγκοπής του υλικού που υφίσταται κόπωση εκφράζεται με έναν συντελεστή ευαισθησία εγκοπής q το οποίο υπολογίζεται ως:

$$q = (K_f - 1) / (K_t - 1) \quad (2)$$

όπου K_t είναι ο θεωρητικός συντελεστής συγκέντρωσης έντασης και είναι ο λόγος της μέγιστης έντασης προς την ονομαστική ένταση. Χρησιμοποιώντας την άνω παράσταση, ο συντελεστής ευαισθησίας της κόπωσης εγκοπής ' q ' υπολογίζεται για όλους τους συνδέσμους και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Ο συντελεστής κόπωσης εγκοπής του μη συγκολλημένου κράματος αλουμινίου AA2219 είναι 1,82, και αυτός του συγκολλημένου συνδέσμου (AW) είναι 2,73. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, ο σύνδεσμος που κατασκευάστηκε με τη διαδικασία FSW παρουσιάζει πολύ χαμηλό συντελεστή κόπωσης εγκοπής και ο σύνδεσμος που κατασκευάστηκε με διαδικασία GTAW εμφανίζει πολύ υψηλό συντελεστή κόπωσης εγκοπής. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο συντελεστή ευαισθησίας εγκοπής καθώς προκύπτει από τις τιμές του συντελεστή κόπωσης εγκοπής. Γενικά, όταν ο συντελεστής κόπωσης εγκοπής είναι χαμηλότερος, τότε η διάρκεια ζωής της κόπωσης των συνδέσμων είναι υψηλότερη και αντιστρόφως.

5.3.4.3) Συμπεριφορά της ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης

Οι καταγεγραμμένες διαφοροποιήσεις στο μήκος των ρωγμών ($2a$) και τον αντίστοιχον αριθμόν κύκλων (N) που υπέστησαν κάτω από τη δράση του συγκεκριμένου εύρους εφαρμοσμένης έντασης για όλους τους συνδέσμους καταγράφονται στην εικόνα 2.3.3. Οι μηχανικές θραύσης που βασίζονται στην εξίσωση έντασης του Paris χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων ως:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

όπου da/dN είναι ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών, ΔK είναι το εύρος του συντελεστή τάσεων καταπόνησης (SIF) και C και m είναι σταθερές τιμές.

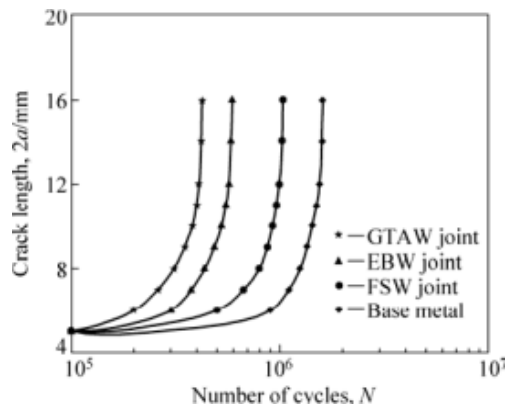
Η τιμή SIF ΔK υπολογίζεται από διαφορετικό μήκος ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης $2a$ ως:

$$\Delta K = I (\Delta \sigma) \sqrt{a} \quad (4)$$

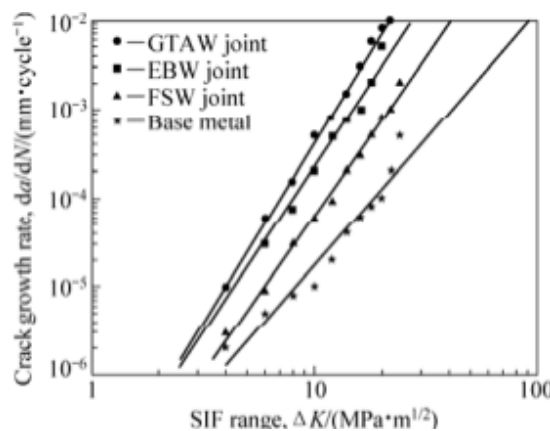
όπου I είναι ο γεωμετρικός συντελεστής για το δείγμα CCT, το $\Delta \sigma$ είναι η εφαρμοζόμενη ένταση, που υπολογίζεται ως:

$$I = F(Z) = \sec\{(I)/2\} \quad (5)$$

όπου $Z = a/W$ και W είναι το πάχος του δείγματος.



Εικόνα 2.3: 3: Καμπύλες της ανάπτυξης ρωγμών στους συνδέσμους με εφαρμοσμένη ένταση 100 MPa.



Εικόνα 2.3.4: Σχέση μεταξύ του ρυθμού ανάπτυξης ρωγμών και του εύρους SIF.

Ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών da/dN υπολογίζεται για σταθερή κατάσταση αύξησης του μήκους της ρωγμής η οποία είναι έναντι του σχετικού αριθμού των κύκλων διάχυσης. Εξήγηση επ' αυτού έγινε σε προηγούμενο τμήμα. Η σχέση μεταξύ του εύρους SIF και τον αντίστοιχο ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών για όλους τους συνδέσμους εμφανίζεται στην εικόνα 2.3 4. Τα σημεία των στοιχείων που σχεδιάστηκαν στο γράφημα αντιστοιχούν στο δεύτερο στάδιο της σιγμοειδούς σχέσης του Paris (10^{16} προς 10^{13} mm/κύκλο). Ο εκθέτης m που είναι η κλίση της γραμμής στη συνάρτηση log-log, και η τομή C της γραμμής προσδιορίστηκαν και φαίνονται στον Πίνακα 5.

Είδος συνδέσμου	Εκθέτης της ανάπτυξης ρωγμών m	Τεταγμένη $C/10^{18}$	Όριο του εύρους SIF $aK_{th}/(MPa \cdot m^{1/2})$	Κρίσιμο εύρος SIF, $\Delta K_{Cr}/(MPa \cdot m^{1/2})$
BM	2,85	2,44	4,0	30
GTAW	4,10	3,40	2,3	10
EBW	3,76	3,98	2,5	12
FSW	3,75	1,68	3,0	20

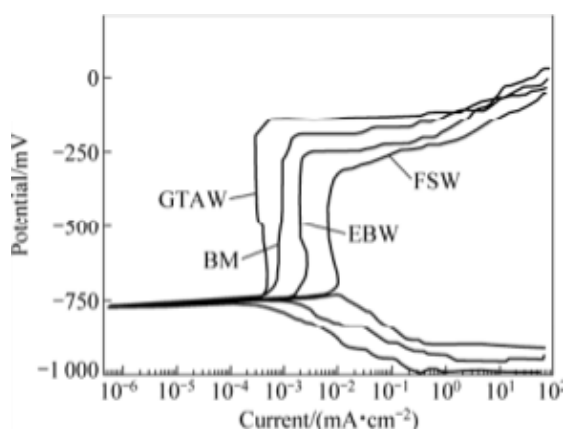
Πίνακας 5. Παράμετροι ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης

Σε μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών, περίπου 10^{13} mm/κύκλο, προκύπτει ασταθής ανάπτυξη ρωγμών και έτσι, η αντίστοιχη τιμή $\dot{a}K$ λαμβάνεται ως το κρίσιμο SIF εύρος ($\dot{a}K_{Cr}$). Σε χαμηλότερο ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών (κάτω από 10^{16} mm/κύκλο) η ανάπτυξη των ρωγμών φαίνεται να είναι αδρανής και έτσι η αντίστοιχη τιμή $\dot{a}K$ λαμβάνεται ως το όριο SIF ($\dot{a}K_{th}$). Οι τιμές των $\dot{a}K_{Cr}$ και $\dot{a}K_{th}$ αξιολογήθηκαν για όλους του συνδέσμους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Ο εκθέτης των ρωγμών ανάπτυξης m το οποίο απορρέει από της σχέση που υπάρχει μεταξύ του ρυθμού ανάπτυξης (da/dN) και του εύρους SIF, αποτελεί σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης των υλικών καθώς καθορίζει τη διάρκεια της ζωής προσαύξησης των ρωγμών κόπωσης των υλικών. Ο εκθέτης της ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης μη συγκολλημένου κράματος αλουμινίου AA2219 είναι 2,85. Από αυτούς τους τρεις συνδέσμους, ο σύνδεσμος FSW παρουσιάζει έναν πολύ χαμηλό εκθέτη ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης. Ο εκθέτης του συνδέσμου FSW είναι 3,57, το οποίο είναι περίπου 25% υψηλότερος από εκείνον του μετάλλου βάσης. Ο εκθέτης ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης στον σύνδεσμο EBW είναι 3,76, το οποίο είναι 33% υψηλότερος από εκείνον του μετάλλου βάσης. Ο εκθέτης της ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης του συνδέσμου GTAW είναι 4,10, το οποίο είναι 45% υψηλότερος από εκείνον του μετάλλου βάσης. Όταν ο εκθέτης της ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης είναι μεγαλύτερος, τότε ο ρυθμός της ανάπτυξης ρωγμών θα είναι υψηλότερος και η αντίστοιχη διάρκεια της κόπωσης θα είναι χαμηλότερη.

5.3.3.4) Συμπεριφορά της διατρητικής διάβρωσης

Οι μελέτες επί της πόλωσης των δειγμάτων συγκόλλησης διεξήχθησαν σε μη-απαερωθέν διάλυμα NaCl 3,5% με τιμές pH 4, 7 και 11. Ποτενσιοστάτης (Gill AC) χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με πρότυπο κυττάρων ASTM και προσωπικό υπολογιστή. Οι καμπύλες της τυπικής πόλωσης ποτενσιοστάτη για τους συγκολλημένους συνδέσμους ελήφθησαν ξεχωριστά και τότε καταρτίστηκαν σε μια συγκεκριμένη σειρά, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Η δυνατότητα διάβρωσης (i_{pit}) λαμβάνεται ως το κριτήριο σύγκρισης της αντοχής στην διατρητική διάβρωση. Οι τιμές i_{pit} για όλους τους συνδέσμους καθορίστηκαν πειραματικά και οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Οι σύνδεσμοι που παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές αρνητικής δυνατότητας (δηλαδή υψηλότερη θετική δυνατότητα) για διατρητική δυνατότητα θεωρούνται πιο ανθεκτικοί στη διάβρωση.



Εικόνα 2.3.5: Καμπύλες πόλωσης που ελήφθησαν σε 3,5% NaCl διάλυμα με pH 4.

Είδος συνδέσμου	BM	GTAW	EBW	FSW
pH=4	i200	i145	i250	i350
pH=7	i475	i425	i525	i575
pH=11	i575	i530	i620	i700

Πίνακας 6:Πιθανές τιμές διάδρωσης των συνδέσμων (mV)

5.3.3.5)Σκληρότητα

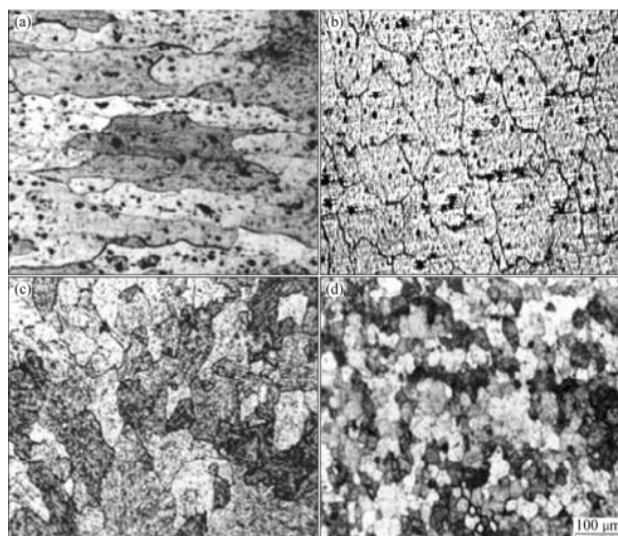
Το μέταλλο βάσης (μη συγκολλημένο μέταλλο βάσης) στην αρχική του T₈₇ κατάσταση παρουσιάζει μια σκληρότητα 140 HV. Η σκληρότητα μειώνεται σημαντικά στο συγκολλημένο μέταλλο, ασχέτως της διαδικασίας συγκόλλησης που προτιμάται. Αυτό είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους εμφανίζονται αποτυχίες σε αμετάβλητες περιοχές στο συγκολλημένο μέταλλο. Ο σύνδεσμος GTAW εμφανίζει τη χαμηλότερη σκληρότητα των 90 HV στο κέντρο του συνδέσμου. Αυτό υπονοεί ότι η σκληρότητα μειώνεται κατά 50 HV στο κέντρο της συγκόλλησης εξαιτίας της θερμότητας συγκόλλησης. Ο σύνδεσμος FSW παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή σκληρότητας των 110 HV στο κέντρο συγκόλλησης. Αν και αυτή η τιμή είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη του μετάλλου βάσης, είναι 20 HV υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου GTAW και 5 HV υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου EBW.

5.3.3.6)Μικροδομή

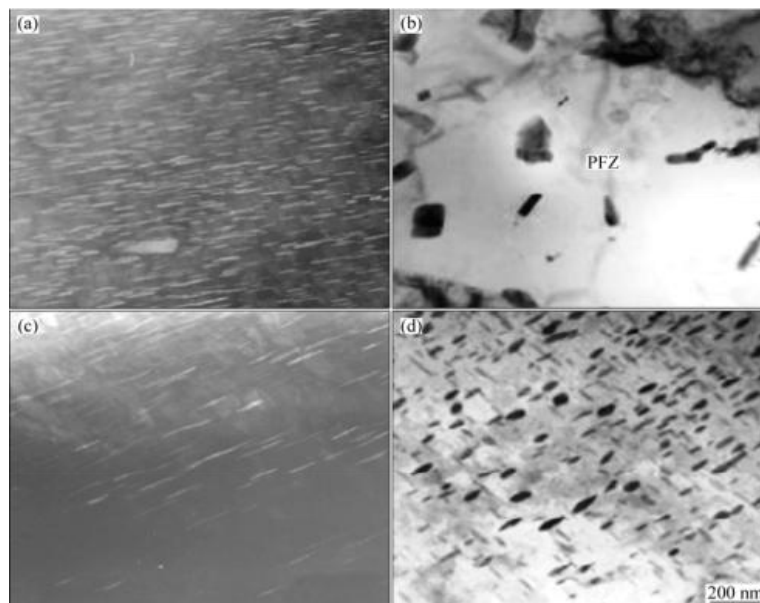
Οπτικές μικρογραφίες των συνδέσμων στο μέταλλο συγκόλλησης παρουσιάζονται στην εικόνα 6. Το μέταλλο βάσης περιλαμβάνει τραχείς και επιμήκεις κόκκους κατά την φορά κύλισης (εικόνα 6.α). Το μέταλλο συγκόλλησης του συνδέσμου GTAW περιλαμβάνει τραχείς και επιμήκεις κόκκους κατά την φορά της συγκόλλησης (εικόνα 6.β). Το μέταλλο συγκόλλησης του συνδέσμου EBW περιέχει μικρότερους κόκκους από το σύνδεσμο GTAW (εικόνα 6.γ). Το μέταλλο συγκόλλησης του συνδέσμου FSW περιέχει πιο λεπτούς κόκκους (εικόνα 6.δ) σε σύγκριση με τους συνδέσμους GTAW και EBW. Ωστόσο, το μέγεθος και η διασπορά των ενδυναμωτικών ίζημάτων δεν φαίνονται καθαρά στις οπτικές μικρογραφίες, και έτσι, το μέταλλο συγκόλλησης αναλύθηκε περαιτέρω χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό μικροσκόπιο εκπομπής. Το ισομερώς διαδεδομένο λεπτό ίζημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.α είναι ένας από τους λόγους για την υψηλότερη αντοχή του κράματος αλουμινίου AA2219. Στο σύνδεσμο GTAW, τα ιζήματα είναι τελείως διαλυμένα στη μήτρα και πολύ λίγα σωματίδια είναι εμφανή όπως βλέπουμε στην εικόνα 7.β. Το συγκολλημένο μέταλλο του συνδέσμου EBW περνάει από ένα γρήγορο ρυθμό ψύξης και το τελικό υλικό μοιάζει με διαλυμένο (υγροποιημένο) υλικό (βλ. εικόνα 7.γ) με ελάχιστο ποσό μη-διαλυμένων ιζημάτων. Στο σύνδεσμο FSW τα σωματίδια είναι λεπτά και ομοιόμορφα διασκορπισμένα σε όλη τη μήτρα (βλ. εικόνα 7.δ), που σχεδόν ταιριάζει με τη μικρογραφία του μετάλλου βάσης.

Διεξήχθη μια ανάλυση με ηλεκτρονική διάχυση ακτίνας X (EDAX) για την εντοπισμό των ιζημάτων. Η εικόνα 8 δείχνει τα αποτελέσματα της EDAX και επιβεβαιώνεται ότι όλα τα ιζήματα είναι τύπου Al-Cu. Τα υπόλοιπα ιζήματα στο συγκολλημένο χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σύνδεσμο GTAW (εικόνα 8.α) περιέχει 5,2% χαλκό και 94,4% αλουμίνιο (επί τοις εκατό κατά βάρος). Τα αδιάλυτα ιζήματα στο συγκολλημένο χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σύνδεσμο EBW περιέχει 8% χαλκό και 92% αλουμίνιο (εικόνα 8.β). Τα ιζήματα του συγκολλημένου χωρίς περαιτέρω επεξεργασία συνδέσμου FFSW (εικόνα 8.γ) περιέχει 14,7% χαλκό και 85,3% αλουμίνιο.

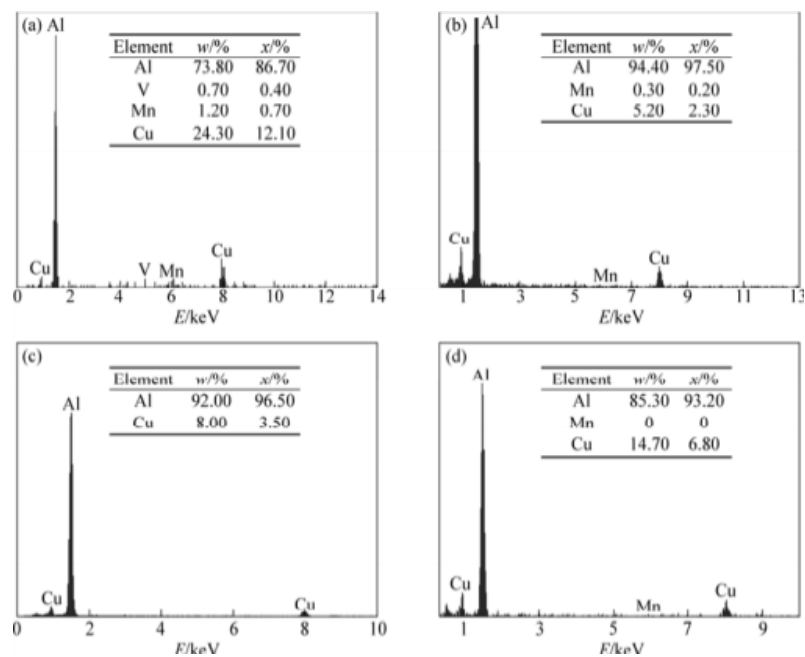
Η εικόνα 9 δείχνει την εξαρθρωτική δομή των κυττάρων που παρατηρείται στην περιοχή συγκόλλησης σε υψηλή ευκρίνεια. Ο συγκολλημένος χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σύνδεσμος GTAW (εικόνα 9.β) δείχνει ισομερή διαστήματα και λιγότερη πυκνή εξαρθρωτική δομή κυττάρων στην περιοχή συγκόλλησης. Ο συγκολλημένος χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σύνδεσμος EBW (εικόνα 9.γ) παρουσιάζει ισομερή διαστήματα και λιγότερη πυκνή εξαρθρωτική δομή κυττάρων στην περιοχή συγκόλλησης. Ο συγκολλημένος χωρίς περαιτέρω επεξεργασία σύνδεσμος FSW εμφανίζει (εικόνα 9.δ) κοντινά διαστήματα και πυκνή εξαρθρωτική δομή κυττάρων.



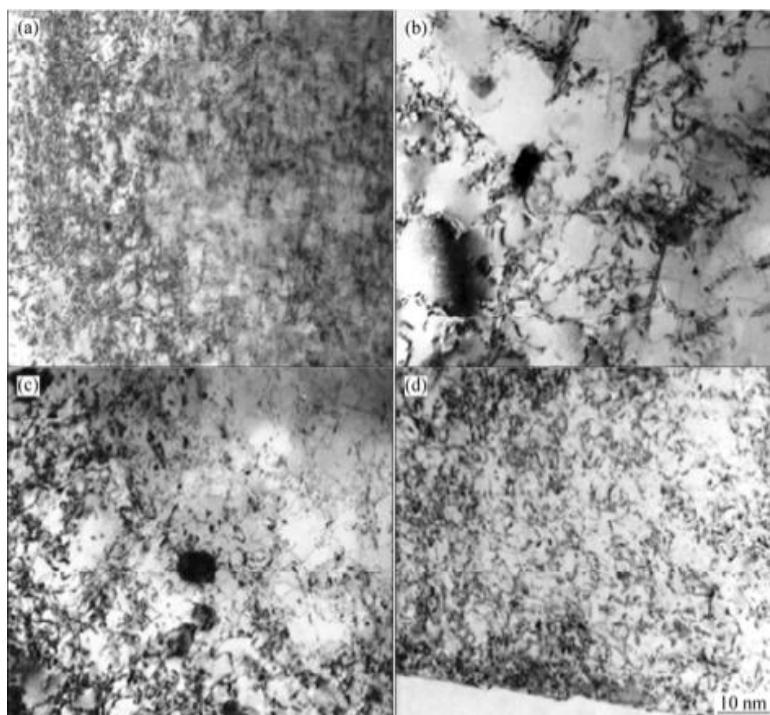
Εικόνα 6. Οπτικές μικρογραφίες α) του μετάλλου βάσης, β) συγκόλληση με τόξο με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο, γ) συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW), και δ) συγκόλληση με τριβή ανάδευσης.



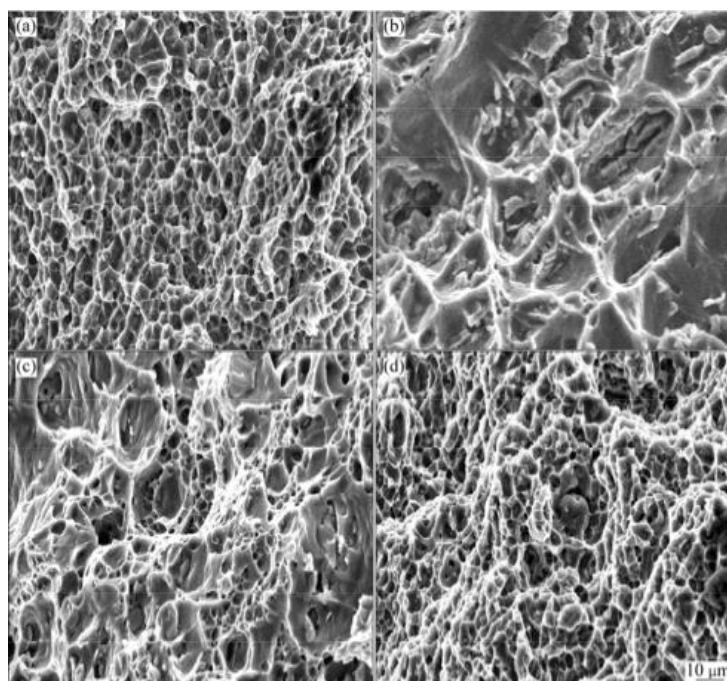
Εικόνα 7. Εικόνες TEM α) του μετάλλου βάσης, β) μέταλλο συγκόλλησης με τόξο με ηλεκτρόδιο βολφραμίου, γ) μέταλλο συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων και δ) μέταλλο συγκόλλησης με τριβή ανάδευσης.



Εικόνα 8. Αποτελέσματα EDAX α) του μετάλλου βάσης, β) συγκόλλησης με τόξο με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο, γ) συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων, και δ) συγκόλλησης με τριβή ανάδευσης.



Εικόνα 9. Εικόνες TEM της παραμόρφωσης στην κυτταρική δομή α) του μετάλλου βάσης, β) συγκόλλησης με τόξο με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο, γ) συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων, και δ) συγκόλλησης με τριβή ανάδευσης.



Εικόνα 10. Ρηγματική απεικόνιση των δειγμάτων εφελκυσμού με SEM: α) του μετάλλου βάσης, β) συγκόλλησης με τόξο με ηλεκτρόδιο από βολφράμιο, γ) συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων, και δ) συγκόλλησης με τριβή ανάδευσης.

5.3.3.7)Επιφάνεια Θραύσης

Οι ρηγματικές απεικονίσεις των δειγμάτων κόπωσης φαίνονται στην εικόνα 10 και πάντα αποτελούνται από εξογκώματα, το οποίο υποδεικνύει ότι τα περισσότερα δοκίμια χωρίς εγκοπή αποτυγχάνουν στη συμπεριφορά ολκιμότητας κάτω από τη δράση φορτίων εφελκυσμού. Τα λεπτά εξογκώματα είναι το κλασσικό χαρακτηριστικό καθαρά όλκιμης θραύσης και αυτό το χαρακτηριστικό επικυρώνει την υψηλή ολκιμότητα που παρουσιάζει το μέταλλο βάσης (εικόνα 10.α) κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Τραχεία και επιμήκη εξογκώματα φαίνονται στο σύνδεσμο GTAW (εικόνα 10.β). Τα εξογκώματα είναι μεγαλύτερα και επίμηκη στο σύνδεσμο EBW (εικόνα 10.γ) αλλά μικρότερα από εκείνα στους συνδέσμους GTAW. Τα εξογκώματα είναι πιο λεπτά στο σύνδεσμο FSW (εικόνα 10.δ) σε σύγκριση με τους άλλους συνδέσμους.

5.3.4)Αποτελέσματα και συζήτηση

5.3.4.1)Επίδραση της διαδικασίας συγκόλλησης στις ιδιότητες εφελκυσμού

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται φανερό ότι οι ιδιότητες του εγκάρσιου εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου AA2219 μειώνονται κατά τις διαδικασίες συγκόλλησης. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, ο σύνδεσμος FSW δείχνει ανώτερες ιδιότητες εφελκυσμού σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και GTAW. Τα περισσότερα δείγματα εφελκυσμού αποτυγχάνουν στην περιοχή συγκόλλησης, πράγμα που υποδεικνύει ότι η περιοχή συγκόλλησης είναι πιο ευάλωτη από τις άλλες περιοχές. Επίσης, καθίσταται εμφανές από την δοκιμή σκληρότητας ότι η περιοχή συγκόλλησης είναι λιγότερο σκληρή απ' ό,τι άλλες περιοχές.

Το μέγεθος και η διάδοση ιζημάτων CuAl_2 παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των ιδιοτήτων και της σκληρότητας των συγκολλήσεων κράματος AA2219. Λεπτά και ομοιόμορφα διασκορπισμένα ιζήματα CuAl_2 συνδράμουν στην αντοχή του βασικού υλικού AA2219 (εικόνα 4.α). Αυτά τα ενδυναμωτικά ιζήματα σχηματίζονται εξαιτίας της θεραπείας διαλύματος και την επακόλουθη τεχνητή γήρανση. Κατά τη συγκόλληση GTA αυτά τα ιζήματα θεωρούνται ότι διαλύονται και ότι το μέταλλο συγκόλλησης θα πρέπει να παραμένει χωρίς ιζήματα (εικόνα 7.β). Ωστόσο, εξαιτίας των υψηλών ρυθμών ψύξης που πραγματοποιούνται στην EBW συγκόλληση, κάποια ιζήματα παραμένουν αδιάλυτα και λίγα από αυτά επιβιώνουν σε μορφή βελόνας σε όλη τη μήτρα (εικόνα 7.γ). Αλλά στο σύνδεσμο FSW δεν υπάρχει τήξη και έτσι δεν υπάρχει διάλυση των ιζημάτων στη μήτρα. Ωστόσο, τα ιζήματα είναι επιμήκη εξαιτίας της αναδευτικής δράσης του στρεφόμενου εργαλείου (εικόνα 7.δ).

Τα ιζήματα αποτελούνται από Cu και Al και δεν υπάρχει καμιά δυνατότητα σχηματισμού άλλων ιζημάτων καθώς δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα κράμα πλήρωσης. Οι VAIDYANATHAN κ. α. είχαν προηγουμένως καταδείξει ότι στα πολύ πρώιμα στάδια τα ιζήματα είναι στρογγυλά. Έτσι, είναι δυνατόν τα σωματίδια των ιζημάτων στο μέταλλο EBW να προκύπτουν από την φυσική γήρανση του μετάλλου συγκόλλησης αφού έλιωσαν τελείως κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Υπάρχει ελαφριά σκλήρυνση των ιζημάτων εξαιτίας της θερμότητας συγκόλλησης στην περίπτωση των συγκολλήσεων EB.

Ο BONDAREV βρήκε ότι η θρόμβωση των δευτερογενών σωματιδίων σε σύνδεσμο GTAW θα μπορούσε επίσης να εξηγήσει την χαμηλότερη αντοχή σε σχέση με το σύνδεσμο EBW. Δεν υπάρχει λεπτό στρώμα οξειδίου και πόροι στο σύνδεσμο

EBW και η δομή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) έχει σχετικά μεταβληθεί, ενώ η δομική και χημική ετερογένεια στην περιοχή τήξης είναι χαμηλότερη. Έτσι, η αντοχή εφελκυσμού του συνδέσμου είναι 20% μεγαλύτερη από εκείνη του GTAW. Τόσο το GTAW όσο και το EBW καταλήγουν σε μια ζώνη χωρίς ιζήματα (PFZ) εξαιτίας της θεραπείας διαλύματος της ζώνης συγκόλλησης από επαρκή θερμική εισροή που προκαλείται από τον θερμικό κύκλο κατά τη συγκόλληση. Καθώς η PFZ είναι μαλακή, η συγκέντρωση παραμόρφωσης θα είναι εξαιρετικά υψηλή αν και η μακροσκοπική παραμόρφωση είναι πολύ χαμηλή. Αυτό παράγει κενά τα οποία μετά επεκτείνονται και μετά συγχωνεύονται επί της PFZ αφήνοντας πίσω τους μια τραχεία δομή με εξογκώματα. Έτσι, η μήτρα της ζώνης συγκόλλησης που αποτελείται από ζώνη χωρίς ιζήματα έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλότερη σκληρότητα στη ζώνη συγκόλλησης σε σύγκριση με το σύνδεσμο FSW με αντίστοιχες φτωχές ιδιότητες εφελκυσμού.

Λεπτοί ισοαξονικοί κόκκοι στην περιοχή FSW υποδεικνύουν ότι μια δυναμική επανακρυσταλλοποίηση έλαβε χώρα κατά τη συγκόλληση FSW εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης σε ανεβασμένη θερμοκρασία. Σε κράματα θερμικής κατεργασίας, οι στατικές ιδιότητες των συγκολλημένων τριβής ανάδευσης εξαρτώνται από τη διάδοση των ενδυναμωτικών ιζημάτων παρά από το μέγεθος των κόκκων. Η θερμότητα της τριβής και η μηχανική επεξεργασία του υλικού στη ζώνη συγκόλλησης καταλήγει σε τραχεία και συσσωματωμένα ιζήματα σε κάποιες περιοχές και η διάδοση ελάχιστων ιζημάτων σε σχήμα βελόνας στο ψήγμα συγκόλλησης, το οποίο οδηγεί σε σημαντική μαλάκυνση σε αντίθεση με το μέταλλο βάσης. Αυτό μειώνει σημαντικά τη σκληρότητα στους συνδέσμους και αποδίδει χαμηλότερη αντοχή εφελκυσμού από το μέταλλο βάσης.

5.3.4.2) Επίδραση των διαδικασιών συγκόλλησης στις ιδιότητες κόπωσης

Από τα αποτελέσματα κόπωσης φαίνεται καθαρά ότι οι ιδιότητες κόπωσης του κράματος αλουμινίου AA2219 μειώνονται σημαντικά κατά τις διαδικασίες συγκόλλησης. Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους ο σύνδεσμος FSW παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά κόπωσης σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και GTAW. Οι λόγοι για την καλύτερη συμπεριφορά κόπωσης του συνδέσμου FSW είναι:

- 1) ανώτερες ιδιότητες εφελκυσμού των συγκολλημένων συνδέσμων,
- 2) ευνοϊκή μικροδομή στην περιοχή συγκόλλησης και
- 3) προτιμότερο μέγεθος και διανομή των ενδυναμωτικών ιδιοτήτων.

Ο σύνδεσμος FSW με υψηλότερη αντοχή απόδοσης και αντοχή εφελκυσμού χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση του ορίου αντοχής αυτών των συνδέσμων, και έτσι η έναρξη των ρωγμών κόπωσης καθυστερεί. Μεγαλύτερη επιμήκυνση (υψηλότερη ολκιμότητα) των συνδέσμων FSW μεταδίδει επίσης μεγαλύτερη αντίσταση στην διάδοση ρωγμών κόπωσης και έτσι, ο ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης είναι σχετικά αργός. Η συνδυαστική επίδραση της μεγαλύτερης αντοχής απόδοσης και της υψηλότερης ολκιμότητας του συνδέσμου FSW προσφέρει αυξημένη αντίσταση στην έναρξη ρωγμών και τη διάδοση ρωγμών και έτσι, η συμπεριφορά κόπωσης του συνδέσμου FSW είναι ανώτερη σε σύγκριση με τους άλλους συνδέσμους. Ομοίως, τα ομοιόμορφα διασκορπισμένα, πολύ λεπτά σωματίδια μπορεί να εμποδίσουν την ανάπτυξη των ρωγμών κόπωσης και έτσι, καθυστερεί ο

ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης και εν συνεχεία η αντίσταση στην διάδοση των ρωγμών κόπωσης αυξάνεται σε σύγκριση με άλλους συνδέσμους.

Στο μέταλλο συγκόλλησης με τη χαμηλότερη αντοχή, όπως στην περίπτωση του συνδέσμου GTAW, επειδή η παραμόρφωση και η απόδοση επικεντρώνεται κυρίως στη ζώνη συγκόλλησης του μετάλλου, η επέκταση της πλαστικής ζώνης περιορίζεται στο μέταλλο συγκόλλησης. Μόλις η πλαστική ζώνη φτάσει τη γραμμή τήξης, η πλαστικότητα συνεχίζει να αναπτύσσεται κατά τη διεπαφή μεταξύ του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης. Η τριαξονική κατάσταση έντασης είναι υψηλή στο μέταλλο συγκόλλησης και η ανάπαυση του υλικού είναι φτωχή. Η κινητήρια δύναμη των ρωγμών που είναι απαραίτητη για την επέκταση των ρωγμών είναι μικρή, και έτσι η ανθεκτικότητα στις ρωγμές του μετάλλου συγκόλλησης με χαμηλότερη αντοχή δεν είναι υψηλή. Από την άλλη, αν η αντοχή στο μέταλλο συγκόλλησης είναι λίγο-πολύ ίση με εκείνη του μετάλλου βάσης, όπως στην περίπτωση του συνδέσμου FSW, τότε η πλαστική ζώνη μπορεί εύκολα να επεκταθεί στο μέταλλο βάσης διότι η παραμόρφωση και απόδοση λαμβάνει χώρα τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης όσο και στο μέταλλο βάσης. Η ανάπαυση έντασης μπορεί εύκολα να λάβει χώρα στην κορυφαία περιοχή ρωγμών, έτσι περισσότερη κινητήρια δύναμη ρωγμών χρειάζεται για την επέκταση των ρωγμών και την ανθεκτικότητα στις ρωγμές του συγκολλημένου μετάλλου με την υψηλότερη αντοχή να είναι μεγαλύτερη από εκείνη της χαμηλότερης αντοχής. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τους οποίους ο σύνδεσμος FSW παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά κόπωσης.

Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, η περιοχή συγκόλλησης του συνδέσμου FSW αποτελείται από λεπτότερους δυναμικά επανακρυσταλλοποιημένους κόκκους (ως αποτέλεσμα της θερμομηχανικής επεξεργασίας που προκλήθηκε από τη διαδικασία) απ' ό, τι οι σύνδεσμοι GTAW και EBW. Ο σύνδεσμος GTAW περιέχει πιο τραχείς και επιμήκεις κόκκους στην περιοχή συγκόλλησης (ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμικής εισροής κατά τη διαδικασία συγκόλλησης). Το υλικό με τους λεπτότερους κόκκους προφανώς έχει μια μεγαλύτερη περιοχή για το όριο κόκκων, το οποίο με τη σειρά του θα προσφέρει περισσότερη αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης. Τα όρια των κόκκων που είναι πλούσια με αποθηκευμένη ενέργεια προσφέρουν περισσότερη αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης απ' ό, τι στο εσωτερικό των κόκκων. Αυτό μπορεί να είναι ένας από τους λόγους της ανώτερης αντίστασης στην ανάπτυξη των ρωγμών κόπωσης στους συνδέσμους FSW σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και GTAW.

Η αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης δεν επηρεάζεται μόνο από το μέγεθος των κόκκων αλλά και από το μέγεθος και τη διάδοση των ενδυναμωτικών ιζημάτων στους συγκολλημένους συνδέσμους. Ο σύνδεσμος FSW περιέχει λεπτούς κόκκους και ομοιόμορφα διασκορπισμένα ιζήματα σε όλη τη μήτρα σε σχέση με τους συνδέσμους EBW και GTAW. Η PFZ είναι πολύ μικρή στο σύνδεσμο FSW, το οποίο αποδίδεται στον ανώτερο εφελκυσμό και τη σκληρότητα των συνδέσμων FSW. Τα ομοιόμορφα διασκορπισμένα, πολύ λεπτά σωματίδια μπορεί να εμποδίζουν την ανάπτυξη ρωγμών κόπωσης και έτσι, ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών κόπωσης καθυστερεί και εν συνεχεία η αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών κόπωσης αυξάνεται σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και GTAW. Η συνδυαστική επίδραση των πολύ λεπτών, δυναμικά επανακρυσταλλοποιημένων κόκκων και τα ομοιόμορφα διασκορπισμένα ενδυναμωτικά ιζήματα αυξάνουν την αντίσταση στην έναρξη των ρωγμών και την διασπορά, και έτσι, η συμπεριφορά κόπωσης του συνδέσμου FSW είναι ανώτερη σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και GTAW.

5.3.4.3) Επίδραση των διαδικασιών στην συμπεριφορά διάβρωσης

Διμεταλλικά όπως CuAl_2 , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ και $(\text{Al}_2\text{Cu})_6(\text{Fe}_2\text{Cu})$ αποτελούν τα σημεία έναρξης για την διάβρωση των κραμάτων Al-Cu . Η διάβρωση οφείλεται στην τοπική διάλυση της μήτρας ή τα διμεταλλικά εξαιτίας του γαλβανικού ζευγαρώματος μεταξύ των διμεταλλικών και της βάσης. Τα διμεταλλικά περιέχουν Cu και Fe τα οποία είναι καθοδικά όσον αφορά τη βάση και προωθούν τη διάλυση της βάσης, ενώ διμεταλλικά εμπλουτισμένα με Cu είναι ανοδικά όσον αφορά τη βάση.

Στο σύνδεσμο GTAW, λιγότερα ιζήματα υπάρχουν εξαιτίας της μερικής διάλυσης των ιζημάτων κατά τη συγκόλλησης και έτσι, τα διαθέσιμα σημεία προτιμώμενης πυρηνοποίησης για τη διάβρωση είναι λιγότερα. Αυτό μπορεί να είναι ο λόγος πίσω από την καλύτερη αντίσταση του συνδέσμου GTAW στην διάβρωση σε σύγκριση με τους συνδέσμους EBW και FSW. Αλλά στο σύνδεσμο EBW ο σχηματισμός των ιζημάτων είναι αναπόφευκτος εξαιτίας των παραπάνω λόγων και έτσι, τα σημεία προτιμώμενης πυρηνοποίησης για την διάβρωση είναι σχετικά περισσότερα από εκείνα των συνδέσμων GTAW. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη φτωχή αντίσταση στη διάβρωση του συνδέσμου EBW σε σύγκριση με το σύνδεσμο GTAW. Στο σύνδεσμο FSW τα διμεταλλικά είναι πιο λεπτά σε μέγεθος και περισσότερα σε αριθμούς σε σύγκριση με εκείνους στους συνδέσμους GTAW και EBW εξαιτίας της θερμομηχανικής επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν διαθέσιμα περισσότερα σημεία έναρξης για τη διάβρωση και αυτό μπορεί να είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους υπάρχει μειωμένη αντίσταση στη διάβρωση των συνδέσμων FSW.

5.3.5) Συμπεράσματα

1) Από τους τρεις συγκολλημένους συνδέσμους, ο σύνδεσμος FSW δείχνει ανώτερες ιδιότητες εφελκυσμού και κόπωσης, αλλά ο σύνδεσμος GTAW παρουσιάζει καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση σε σύγκριση με τους αντίστοιχους συνδέσμους.

2) Ο σύνδεσμος FSW παρουσιάζει την υψηλότερη αποδοτικότητα συνδέσμου στο 70% το οποίο είναι 20% υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου GTAW και 12% υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου EBW. Η αντοχή κόπωσης του συνδέσμου FSW είναι 180 MPa, το οποίο είναι 20% υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου EBW και 60% υψηλότερη από εκείνη του συνδέσμου GTAW. Ο σύνδεσμος GTAW εμφανίζει υψηλότερη αντίσταση στη διατρητική διάβρωση από τους συνδέσμους EBW και FSW.

3) Ο σχηματισμός λεπτών ισοαξονικών κόκκων (εξαιτίας της δυναμικής επανακρυσταλλοποίησης), μικρότερης ζώνης χωρίς ιζήματα και πυκνή εξαρθρωτική δομή κυττάρων στην περιοχή συγκόλλησης είναι οι κύριοι λόγοι πίσω από τις ανώτερες ιδιότητες εφελκυσμού και κόπωσης των συνδέσμων FSW και την μειωμένη αντίσταση στη διατρητική διάβρωση στους συνδέσμους FSW.

5.4)Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding-brazing process. (Hongtao Zhang, Jiakun Liu)

5.4.1)Σύνοψη

Κράματα αλουμινίου 2B50 και ανοξείδωτου χάλυβα 1Cr18Ni9Ti συγκολλήθηκαν με επικάλυψη στο σύνδεσμο με τη μέθοδο MIG χρησιμοποιώντας μέταλλο πλήρωσης Al-Si 4043. Εξετάστηκε η επίδραση της επαργιλιωμένης επίστρωσης και της επίστρωσης γαλβανισμένου ψευδαργύρου επί της επαλειψιμότητας του τηγμένου μετάλλου. Η επαργιλιωμένη επίστρωση είχε περιορισμένη επίδραση στην προώθηση της εμφάνισης επιφάνειας συγκόλλησης και παρουσιάστηκαν εμφανείς μικρο-ρωγμές ανάμεσα στη στρώση της χημικής ένωσης και την πλευρά του χάλυβα. Η ρωγμή σε δοκιμές εφελκυσμού εμφανιζόταν στη στρώση της ενδοσύνδεσης με χαμηλή δύναμη εφελκυσμού, περίπου 60MPa. Οι συνδέσμοι ανάμεσα στο κράμα αλουμινίου και του γαλβανισμένου χάλυβα είχαν καλή εμφάνιση στην επιφάνεια και η διαμεταλλική ένωση στην περιοχή της ζώνης τήξης κοντά στη ενδοσύνδεση της σύνδεσης ήταν Al₄.5FeSi. Το πάχος της στρώσης της διαμεταλλικής ένωσης κυμαινόταν από 5_μ με 15_μ ανάλογα με την εισαγόμενη θερμότητα και η ανώτατη δύναμη εφελκυσμού της συγκόλλησης με επικάλυψη μπορούσε να φτάσει 193.6MPa όταν η εισαγόμενη θερμότητα είναι στα 0.846KJ/cm.

5.4.2)Εισαγωγή

Η σύνδεση ανόμοιων μετάλλων προσφέρει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τα πλεονεκτήματα διάφορων υλικών που συχνά προσφέρουν μια ολική δομή με μοναδική μηχανική ιδιότητα. Ο άργιλος μπορεί να μειώσει το βάρος των δομικών μερών χάρη στο ελαφρύ του βάρος ενώ ο ανοξείδωτος χάλυβας έχει υψηλή δύναμη και άριστη αντοχή στη διάβρωση. Υβριδικές δομές από κράμα αλουμινίου και ανοξείδωτο χάλυβα συστήνονται για διαστημικά αεροσκάφη, αυτοκίνητα και ατμόπλοια για την βελτίωση χαμηλής κατανάλωσης καυσίμων, την αύξηση της απόστασης της πτήσης και τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με την μείωση του βάρους [1-3]. Έτσι, τα τελευταία χρόνια η ένωση κράματος αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα έχει αναδειχθεί σε ένα δημοφιλές πεδίο έρευνας. Αποτελεί, επίσης, μεγάλη πρόκληση η ένωση αυτών των δυο υλικών εξαιτίας των σημείων τήξης τους, της σχεδόν μηδενικής στερεάς διαλυτότητας του σιδήρου σε άργιλο και του σχηματισμού εύθραυστων διαμεταλλικών ενώσεων Al-Fe σε ανεβασμένες θερμοκρασίες [4-6]. Επίσης, οι διαφορές στις θερμοφυσικές ιδιότητες όπως συντελεστής διαστολής, αγωγιμότητα, και μια συγκεκριμένη θερμότητα μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερικές τάσεις μετά από συγκόλληση τήξης, η οποία προκαλεί πάρα πολλές ρωγμές με αποτυχία ευθραυστότητας κατά τη λειτουργία [7,8]. Για να πραγματοποιηθεί η πραγματική χρήση αυτών των υβριδικών δομών, είναι απαραίτητες οι μέθοδοι σύνδεσης ανόμοιων μεταλλικών αρθρώσεων για αλουμίνιο/χάλυβα.

Κάποιες έρευνες έχουν χρησιμοποιήσει διαδικασίες συγκόλλησης στερεής κατάστασης και τήξης για να ενώσουν αλουμίνιο και χάλυβα. Αυτές οι διαδικασίες συγκόλλησης συμπεριέλαβαν συγκόλληση με διάχυση [9], συγκόλληση τριβής [10],

ηλεκτρομαγνητική συγκόλληση επίπτωσης [11], τοπικής αντοχής συγκόλληση [12], συγκόλληση επίπτωσης [13], συγκόλληση με παλμικά ιονισμένα δοκάρια [14], συγκόλληση με λείζερ με τη μέθοδο της κλειδαρότρυπας [15], υπέρηχη συγκόλληση άκρων [16] και τεχνολογία συγκόλλησης σε κενό [17]. Ωστόσο, κάποιες από αυτές τις μεθόδους χρειάζονται αρκετά υψηλή πίεση ή ακριβά σύνεργα ενώ άλλες μέθοδοι δεν θα μπορούσαν να εγγυηθούν την μηχανική ιδιότητα του συνδέσμου εξαιτίας της παραγωγής υπερβολικών θραυσμάτων στις διαμεταλλικές ενώσεις. Έτσι, η υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλή σε κόστος μέθοδος για την σύνδεση αποτελεί ακόμα βασικός στόχος για την ένωση αργίλου και χάλυβα κατά την προώθηση της χρήσης υβριδικών κατασκευών.

Σε αυτήν την έρευνα, κατασκευάστηκαν με επιτυχία σύνδεσμοι με επικάλυψη από ανόμοιο κράμα αλουμινίου/ ανοξειδώτου χάλυβα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συγκόλλησης MIG ενώ μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών στρωμάτων στην εμφάνιση της επιφάνειας των συγκολλησεων. Η μικροδομή και η φασική δομή των συνδέσμων, ιδίως οι διαμεταλλικές ενώσεις, αναλύθηκαν με OM, SEM, TEM και XRD, ενώ συζητήθηκε η συμπεριφορά των συνδέσμων όσον αφορά την παρουσίαση ρωγμών κατά τις δοκιμές εφελκυσμού ακολουθώντας την πορεία ραγίσματος.

5.4.3) Υλικά και πειραματική διαδικασία

5.4.3.1) Υλικά

Χρησιμοποιήθηκαν φύλλα κράματος αλουμινίου 2B50 και ανοξειδώτου χάλυβα 1Cr18Ni9Ti με πάχος 1.0 mm. Οι χημικές συνθέσεις των δυο μετάλλων βάσης περιγράφονται στους Πίνακες 1 και 2.

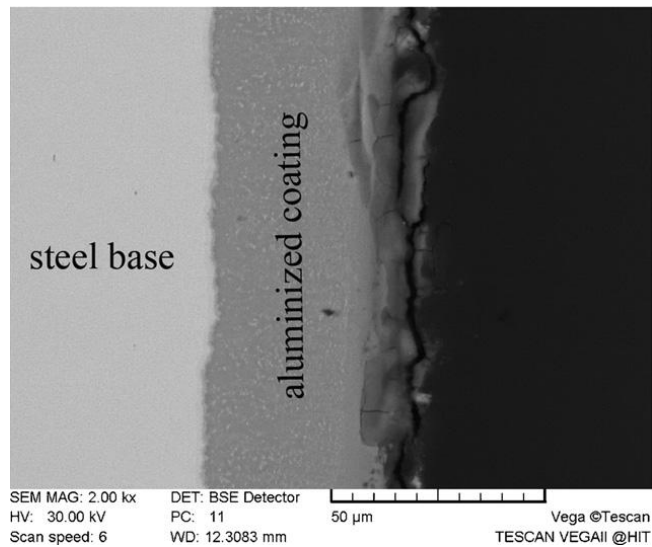
Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg	Ni	Cr	Ti	Al
0,7-1,2	0,7	1,8-2,6	0,4-0,8	0,3	0,4-0,8	0,1	0,01-0,2	0,02-0,1	Bal

Πίνακας 1 Χημική σύνθεση κράματος αλουμινίου 2B50 (wt.%)

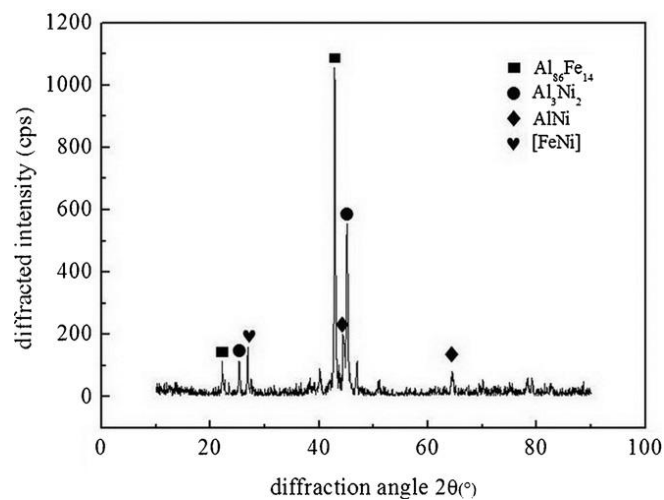
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0,7-1,2	≤1,0	≤2,0	≤0,035	0,03	9,0-12,0	17,0-19,0	Bal

Πίνακας 2 Χημική σύνθεση ανοξειδώτου χάλυβα 1Cr18Ni9Ti (wt.%)

Το πείραμα χωρίστηκε σε δυο ομάδες. Στην πρώτη ομάδα, τα φύλλα χάλυβα καλύφθηκαν με αλουμίνιο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ζεστής εμβάπτισης ώσπου να δημιουργηθεί μια στρώση αλουμινίου με πάχος 50_μm. Η SEM φωτογραφία της επίστρωσης από αλουμίνιο εμφανίζεται στην εικόνα 1 Η εικόνα 2 απεικονίζει το αποτέλεσμα της ανάλυσης της περίθλασης ακτίνων X (XRD), το οποίο έδειξε ότι η επίστρωση από αλουμίνιο αποτελούνταν από φάση $Al_{13}Fe_4$ και φάσεις Al-Ni. Στη δεύτερη ομάδα, τα φύλλα χάλυβα υπέστησαν γαλβανισμό για να παραχθεί επίστρωση ψευδαργύρου με πάχος 15_μm στην επιφάνεια του χάλυβα. Ως μέταλλο πλήρωσης χρησιμοποιήθηκε σύρμα Al-Si 4043 με διάμετρο 1,2mm, του οποίου η χημική σύνθεση παρατίθεται στον Πίνακα 3, ενώ το αργό επιλέχθηκε ως προστατευτικό αέριο.



Εικόνα 1: Φωτογραφία SEM της επίστρωσης αλουμινίου



Εικόνα 2: Ανάλυση XRD της επίστρωσης αλουμινίου

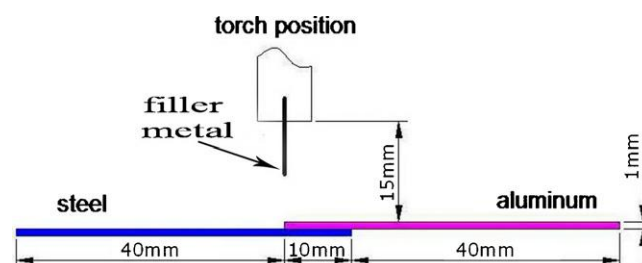
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
4,5-6,0	0,8	0,3	0,05	0,05	0,1	0,2	Bal

Πίνακας 3 Χημική σύνθεση σύρματος Al-Si 4043 (wt.%)

5.4.3.2) Πειραματικές διαδικασίες

Οι διαστάσεις των πλακών ήταν 50mm x 200mm x 1mm. Το λεπτό στρώμα οξειδίου στην περιοχή της συγκόλλησης αφαιρέθηκε πριν την συγκόλληση με γυαλόχαρτο. Οι σύνδεσμοι μεταξύ αυτών των δυο υλικών κατασκευάστηκαν με

μέθοδο συγκόλλησης MIG με επικάλυψη των ελασμάτων, τοποθετώντας ένα φύλλο αλουμινίου πάνω από αυτό του χάλυβα, όπως απεικονίζεται και στο σχηματικό διάγραμμα της εικόνας 3. Οι παράμετροι συγκόλλησης των δυο ομάδων παρουσιάζονται τους Πίνακες 4 και 5.



Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας συγκόλλησης MIG

	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Θερμική εισροή (kJ/cm)
Περίπτωση 1	18,8	44	70	0,709
Περίπτωση 2	14,9	56	60	0,834
Περίπτωση 3	15,0	55	50	0,990

Πίνακας 4 Παράμετροι συγκόλλησης της ομάδας 1 (αργιλιούχος χάλυβας)

	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Ταχύτητα (cm/min)	Θερμική εισροή (kJ/cm)
Περίπτωση 4	15,0	56	80	0,630
Περίπτωση 5	15,1	55	70	0,725
Περίπτωση 6	15,1	56	60	0,846
Περίπτωση 7	15,0	55	50	0,990
Περίπτωση 8	15,0	56	40	1,26

Πίνακας 5 Παράμετροι συγκόλλησης της ομάδας 2 (γαλβανισμένος χάλυβας)

Μεταλλογραφικά δείγματα της εγκάρσιας τομής των συγκολλήσεων κόπηκαν και μετά λειάνθηκαν με γυαλόχαρτα των βαθμών 240, 400, 600, 800, 1000 σε SiC. Ένα διάλυμα (1ml HF+1.5ml HCl+2.5ml HNO₃ +95ml H₂O) χρησιμοποιήθηκε για

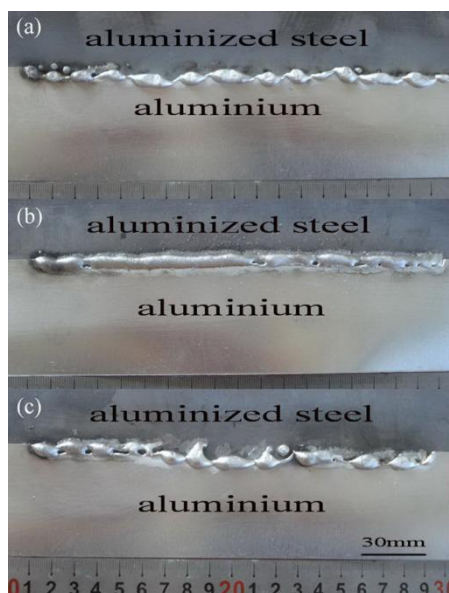
εγγάραξη των μεταλλογραφικών δειγμάτων ώστε να αποκαλυφθεί η γενική μικροδομή των συνδέσμων. Παρατηρήθηκαν τα μεταλλογραφικά δείγματα με οπτικό μικροσκόπιο (OM) και με μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM). Ένα λεπτό κομμάτι αφαιρέθηκε από την περιοχή κοντά στην διεπιφανειακή στρώση, και τότε υπέστη εκλέπτυνση με αντλία πλάσματος ώστε να παρατηρηθεί. Η παρατήρηση έγινε με μικροσκοπία με εκπομπή ηλεκτρονίων (TEM) το οποίο χρησιμοποιούσε φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς (EDS). Τρία δείγματα εφελκυσμού αφαιρέθηκαν από κάθε συγκόλληση ώστε να αξιολογηθεί η μηχανική ιδιότητα των συνδέσμων, με ρυθμό φόρτωσης 1mm/min.

5.4.3. Αποτελέσματα και συζήτηση

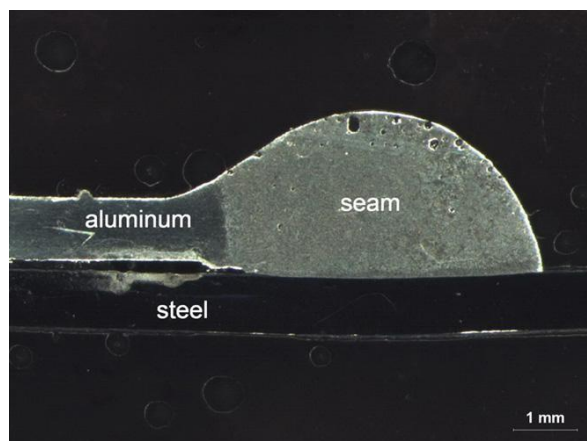
5.4.3.1) Ομάδα 1: σύνδεσμοι κράματος αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα επιστρωμένου με αλουμίνιο

5.4.3.1.1) Εμφάνιση των συγκολλήσεων και εγκάρσιο πρότυπο του συνδέσμου

Η εικόνα 4 δείχνει τις εμφανίσεις των συνδέσμων μεταξύ φύλλων αργιλιούχου χάλυβα και κράματος αλουμινίου που κατασκευάστηκαν από διαφορετικές εισροές θερμότητας. Ο βαθμός διάδοσης του τήγματος αλουμινίου στην επιφάνεια του χάλυβα ήταν περιορισμένος. Αν και υπήρχαν ακόμα κάποιες περιοχές χωρίς τήξη, η εμφάνιση της συγκόλλησης ήταν καλύτερη όταν η θερμική εισροή ήταν 0,834 KJ/cm. Η εικόνα 5 δείχνει την τυπική εγκάρσια τομή του υπ' αρ. 2 συνδέσμου και η γωνία διαβροχής ήταν μεγάλη στις περίπου 80°.



Εικόνα 4. Εμφάνιση των συνδέσμων κάτω από διαφορετικές θερμικές εισροές (α) 0,709KJ/cm, (β) 0,834KJ/cm, (γ) 0,990KJ/cm



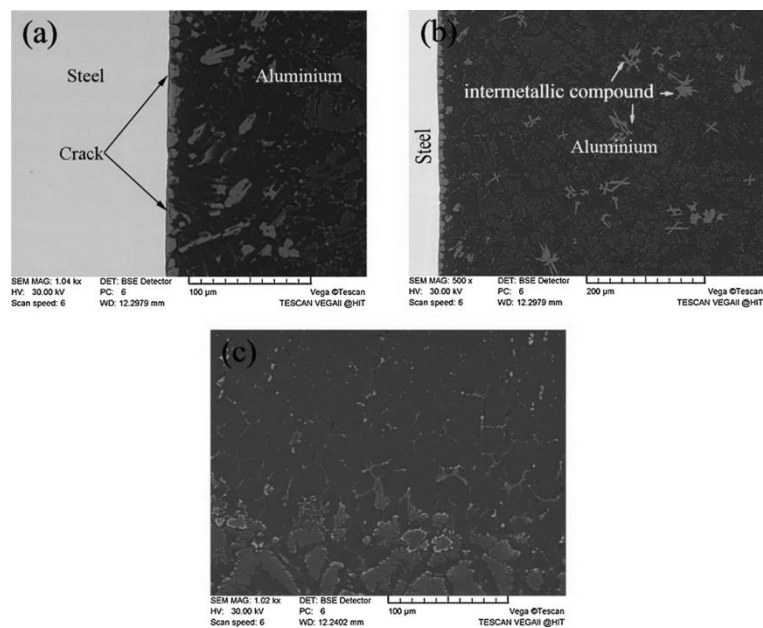
Εικόνα 5. Το μοτίβο της εγκάρσιας τομής

5.4.3.1.2. Φασική σύνθεση και μικροδομή του συνδέσμου

Η εικόνα 6 δείχνει την εικόνα οπισθοσκέδασης ηλεκτρονίων (BSE) του υπ' αρ. 2 συνδέσμου σε διάφορα σημεία. Η στρώση της διεπιφανειακής χημικής ένωσης έχει πάχος περίπου 10 μ m. Δεν υπάρχουν εμφανείς μικρο-ρωγμές μεταξύ του στρώματος της ένωσης και την πλευρά του χάλυβα. Μεγάλα ανομοιόμορφα κομμάτια των διαμεταλλικών ενώσεων διείσδυσαν στη ζώνη τήξης μετά τον κατακερματισμό. Η χημική σύσταση των φραγμάτων της ένωσης στη ζώνη τήξης καταγράφονται στην εικόνα 6 (β) και αναλύθηκαν με EDS. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης παρατίθεται στον Πίνακα 6. Η ζώνη τήξης αποτελείται κυρίως από εύτηκτη δομή Al-Si και φάση m-Al. Στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη της πλευράς του αλουμινίου η ενδυναμωτική φάση εξαφανίστηκε και τα κραματικά στοιχεία εμπλουτίστηκαν στα όρια κόκκων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6 (γ).

Στοιχεία	wt. %	at. %
Al	57,26	71,57
Si	3,8	4,56
Cr	7,85	5,09
Fe	31,05	18,78

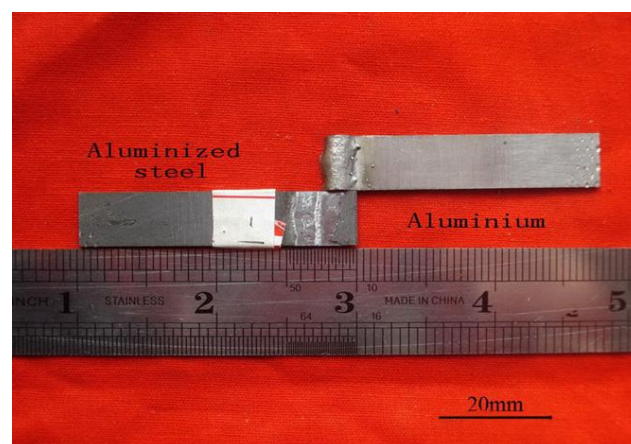
Πίνακας 6 Αποτελέσματα EDS των συνδέσμων στη ζώνη τήξης



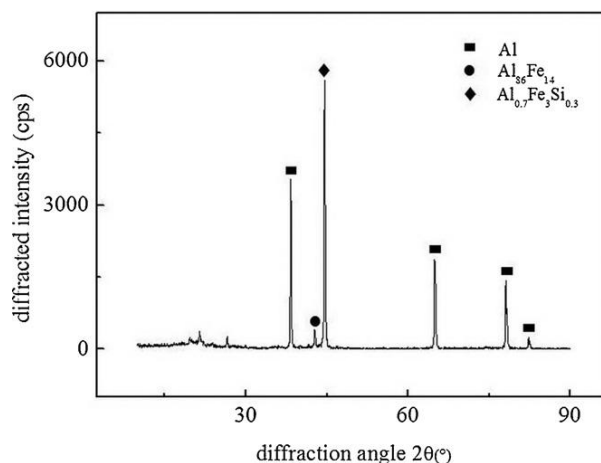
Εικόνα 6. Σχεδίαση ηλεκτρονίων του υπ'αρ. 2 συνδέσμου σε διάφορες περιοχές (α) στρώση διεπιφανειακής ένωσης, (β) ζώνη τήξης, (γ) θερμικά επηρεασμένη ζώνη

5.4.3.1.3. Ευθραυστότητα των συνδέσμων κατά τις δοκιμές εφελκυσμού

Ρωγμές εμφάνισε η σύνδεση μεταξύ της ζώνης τήξης και του μέταλλου βάσης χάλυβα όπως βλέπουμε στην εικόνα 7 με ένταση εφελκυσμού στα 60 MPa. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση XRD της επιφάνειας της ρωγμής στην πλευρά του αλουμινίου επιβεβαίωσε ότι η διεπιφανειακή στρώση περιείχε φάσεις $\text{Al}_{18}\text{Fe}_{14}$ και $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$ όπως φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 7. Πορεία ρωγμής του δείγματος εφελκυσμού



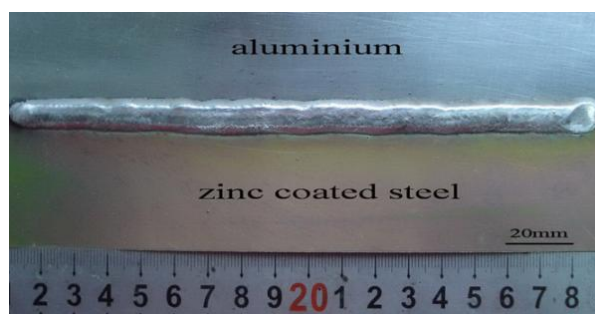
Εικόνα 8. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD της επιφάνειας της ρωγμής από την πλευρά του αλουμινίου

5.4.3.2 Ομάδα 2: σύνδεσμοι κράματος αλουμινίου και γαλβανισμένου ανοξειδώτου χάλυβα

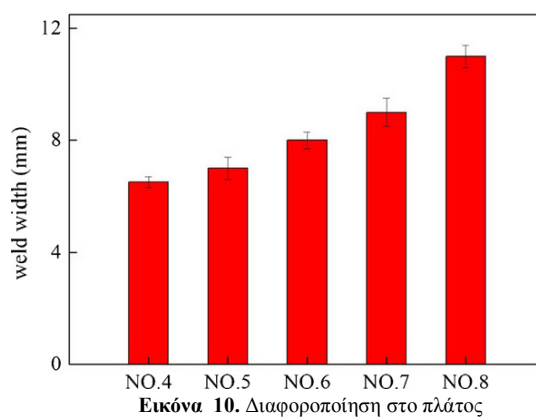
5.4.3.2.1 Εμφάνιση και εγκάρσιο πρότυπο των συνδέσμων

Συνεχής και ομοιόμορφη συγκόλληση κατασκευάστηκε κάτω από διάφορες θερμικές εισροές συγκόλλησης. Η εικόνα 9 δείχνει την εμφάνιση της συγκόλλησης του υπ' αρ. 6 συνδέσμου. Η εικόνα 10 δείχνει την διαφοροποίηση του πλάτους συγκόλλησης ανάλογα με τις θερμικές εισροές συγκόλλησης. Το πλάτος συγκόλλησης προφανώς αυξήθηκε ανάλογα με την αύξηση της θερμικής εισροής κατά τη συγκόλληση.

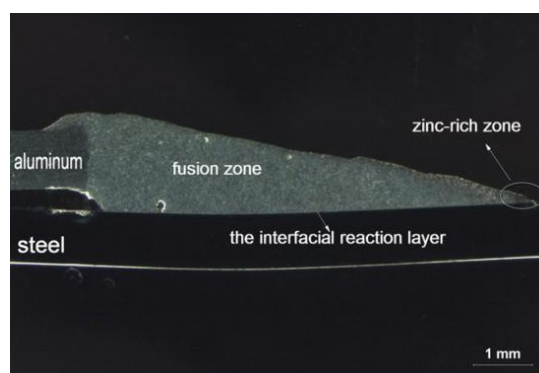
Η εικόνα 11 δείχνει την τυπική εγκάρσια διατομή του υπ' αρ. 6 συνδέσμου και τη διάδοση του υγρού μετάλλου πλήρωσης που χρειάζεται για τον σχηματισμό ενός γερού συνδέσμου. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής, ο σύνδεσμος μπορεί να χωριστεί: στη ζώνη τήξης, το στρώμα διεπιφανειακής αντίδρασης και την εμπλουτισμένη σε ψευδάργυρο ζώνη.



Εικόνα 9. Εμφάνιση του υπ' αρ. 6 συνδέσμου



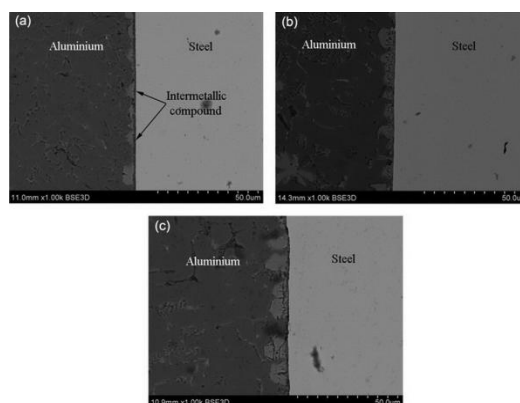
Εικόνα 10. Διαφοροποίηση στο πλάτος



Εικόνα 11. Εγκάρσια τομή του υπ' αρ. 6 αναδωλωμένου συνδέσμου

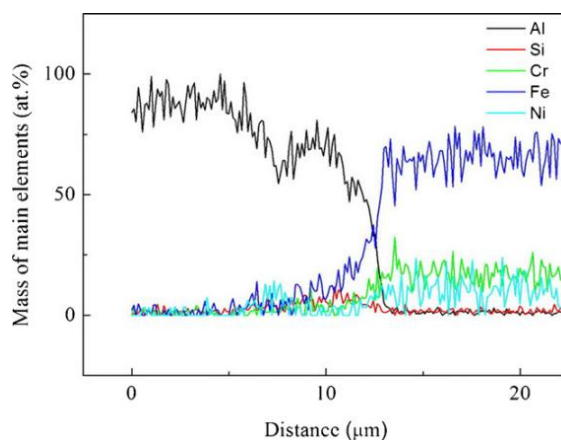
5.4.3.2.2. Στρώμα διαμεταλλικής ένωσης που σχηματίζεται στην διεπιφάνεια

Η εικόνα 12 δείχνει τις φωτογραφίες BSE της στρώσης της διαμεταλλικής ένωσης των συνδέσμων που προέκυψαν από διάφορες θερμικές εισροές. Η διεπιφάνεια μεταξύ του αλουμινίου και του ενδιάμεσου στρώματος είναι κυματιστή, ενώ η διεπιφάνεια μεταξύ του ενδιάμεσου στρώματος και του χάλυβα είναι σχετικά επίπεδη. Το πάχος του διαμεταλλικού στρώματος δεν ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος της διεπιφάνειας ραφής-χάλυβα, η οποία κυμαινόταν από περίπου 5_μ μέχρι 15_μ, ανάλογα με τις παραμέτρους της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

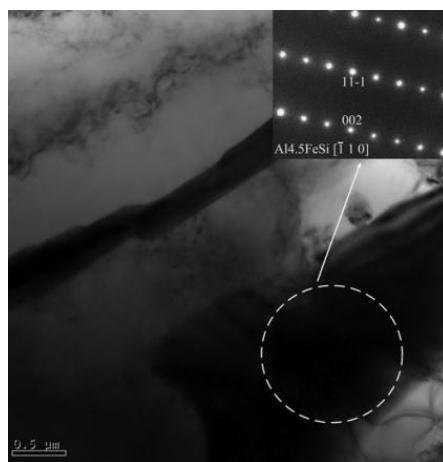


Εικόνα 12. Φωτογραφίες BSE της διεπιφανειακής στρώσης (α) Αρ. 4, (β), Αρ. 6, (γ) Αρ. 8.

Η εικόνα 13 δείχνει την EDS ανάλυση της διεπιφανειακής στρώσης ραφής-χάλυβα στη γραμμή σάρωσης του υπ' αρ. 6 συνδέσμου, του οποίου η θερμική εισροή είναι μέση. Το μέσο του πάχους παρουσιάζεται στα λιγότερα από 10 μm . Τα ίχνη από το EDS υποδεικνύουν ότι κάποιο ποσό της ενδοδιάχυσης εμφανίστηκε κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Από την πλευρά της ραφής προς την πλευρά του χάλυβα, η περιεκτικότητα σε Al στη στρώση επίδρασης μειώθηκε από 73,71 at.% σε 50,36at.%, ενώ αυτό του Fe στη στρώση επίδρασης αυξήθηκε από 12,65at.% σε 29,92at.%. Ένα μικρό ποσό Cr, Ni και Si εμφανίστηκε στη στρώση επίδρασης. Ωστόσο, δεν εμφανίζεται Zn επειδή εξατμίζεται σε μεγάλο ρυθμό κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό σημείο βρασμού.



Εικόνα 13. Ανάλυση της γραμμικής σάρωσης της διεπιφανειακής στρώσης ραφής-χάλυβα του υπ'αρ. 6.



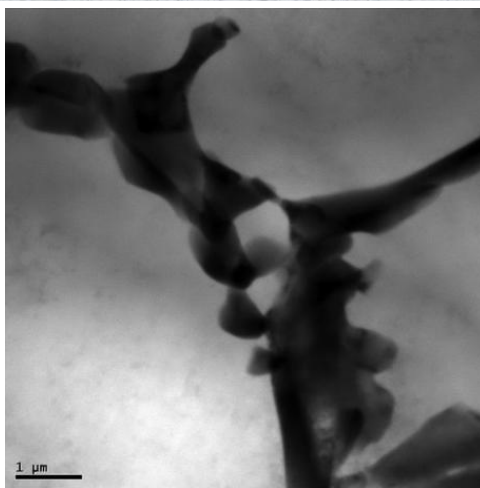
Εικόνα 14. Τυπικό πεδίο λάμψης TEM και πρότυπο SAED της διεπιφανειακής διαμεταλλικής ένωσης.

Για να ξεκαθαριστεί η λεπτομερής δομή του στρώματος επίδρασης, παρατηρήθηκε επίσης η διεπιφάνεια του συνδέσμου με TEM. Η εικόνα 14 δείχνει το τυπικό πεδίο λάμψης της εικόνας της φάσης της διαμεταλλικής ένωσης που καταγράφηκε στην περιοχή της ραφής κοντά στην διεπιφάνεια του συνδέσμου.

Σύμφωνα με την ανάλυση των προτύπων περίθλασης ηλεκτρονίων, διαπιστώθηκε ότι η διεπιφανειακή στρώση αποτελούταν κυρίως από φάση $\text{Al}_{4.5}\text{FeSi}$.

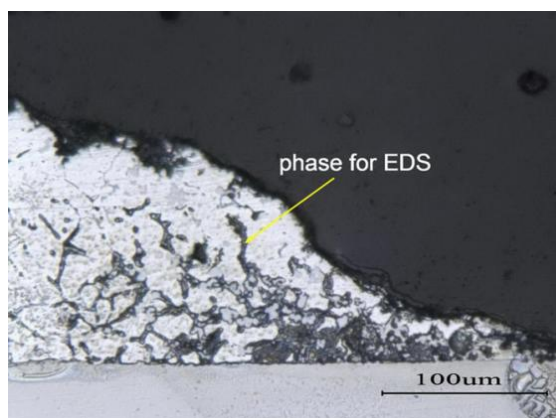
5.4.3.2.3. Ζώνη τήξης και εμπλουτισμένη από ψευδάργυρο ζώνη

Η εικόνα 15 δείχνει την μεταλλογραφική φωτογραφία της ζώνης τήξης που σχηματίστηκε από το τηγμένο σύρμα πλήρωσης και τη βάση μετάλλου του κράματος αλουμινίου. Από την εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε ένα ομογενές συγκολλημένο μέταλλο. Το μέταλλο πλήρωσης περιείχε ένα συγκεκριμένο ποσό Si, καταδεικνύοντας ένα φαινόμενο εμπλουτισμού στο όριο των κόκκων σύμφωνα με την εικόνα 16.



Εικόνα 16. Εμπλουτισμός Si στα όρια των κόκκων (εικόνα πεδίου λάμψης).

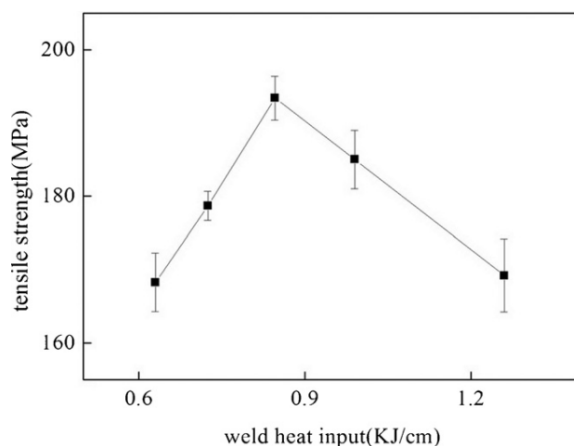
Υπάρχει μια προφανώς διαφορετική ζώνη από οβάλ λευκού στην άκρη της συγκόλλησης όπως δείχνει η εικόνα 11 και η BSE εικόνα αυτής της ζώνης παρατίθεται στην εικόνα 17. Ο Πίνακας 7 δείχνει τις συνθέσεις αυτής της φάσης με ανάλυση EDS όπως καταγράφεται στην εικόνα 17 και η άκρη της συγκόλλησης αποτελείται κυρίως από εύτηκτες φάσεις Al-Zn.



Εικόνα 17. Εμπλουτισμένη με ψευδάργυρο ζώνη στο δάχτυλο συγκόλλησης.

5.4.3.2.4. Ιδιότητα εφελκυσμού και αποτυχία περιοχής

Η αντοχή εφελκυσμού των διάφορων συνδέσμων ανάλογα με τις διάφορες θερμικές εισροές καταγράφεται στην εικόνα 18. Η μεγαλύτερη αντοχή εφελκυσμού μπορούσε να φτάσει τα 193,6 MPa όταν η θερμική εισροή είναι στα 0,846 KJ/cm και ρωγμή παρουσιάστηκε κοντά στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη όπως μας δείχνει η εικόνα 19.

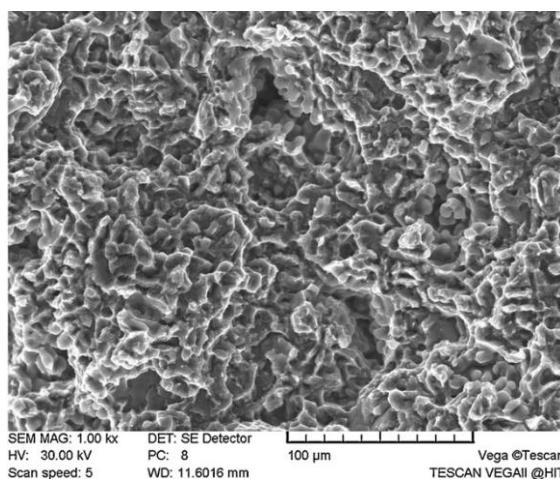


Εικόνα 18. Αντοχή εφελκυσμού της συγκόλλησης υπό διάφορες θερμικές εισροές

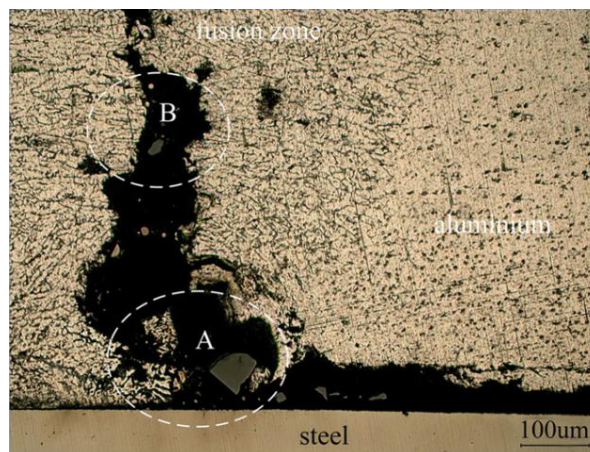


Εικόνα 19. Η πορεία της ρωγμής στο σύνδεσμο.

Το Σχ. 20 δείχνει τη φωτογραφία SEM της επιφάνειας της ρωγμής η οποία παρουσιάζει χαρακτηριστικό όλκιμης θραύσης. Σε δοκιμές εφελκυσμού, η ρωγμή ξεκινούσε από τη ζώνη Α, επεκτεινόταν κατά τη ζώνη τήξης Β η οποία πλησιάζει τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, όπως δείχνει το Σχ. 21. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλείται από τη διάδοση της ενδυναμωτικής φάσης και το μέγεθος των κόκκων στη ζώνη τήξης κοντά στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Όταν η θερμική εισροή ήταν χαμηλότερη, μια μικρή ποσότητα κατεργασμένου μετάλλου βάσης αλουμινίου υπέστη τήξη και η ενδυναμωτική φάση στο μέταλλο βάσης που διαλύθηκε στη ζώνη τήξης τηρώντας τις αναλογίες μειώθηκε. Η μαλάκυνση της ζώνης τήξης πρωτίστως καθορίζει την αντοχή εφελκυσμού του συνδέσμου. Όταν η θερμική εισροή αυξήθηκε ως ένα συγκεκριμένο βαθμό, αυξήθηκε το μέγεθος των κόκκων στη ζώνη τήξης κοντά στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μειώθηκε η αντοχή εφελκυσμού του συνδέσμου, επίσης. Έτσι, η θερμική εισροή είχε σημαντική επίδραση στη μηχανική αντοχή των συνδέσμων. Για το λόγο αυτό, για να βελτιωθεί η ποιότητα του συνδέσμου πρέπει να ληφθεί μια κατάλληλη θερμική εισροή η οποία, όχι μόνο θα αποτρέψει το σχηματισμό εύθραυστων διαμεταλλικών ενώσεων, αλλά θα βελτιώσει επίσης τη μικροδομή της ζώνης τήξης κοντά στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 20. SEM φωτογραφία της ρωγμής στην πλευρά του αλουμινίου.



Εικόνα 21. Η πορεία της ρωγμής στο υπ' αρ. 6 σύνδεσμο.

5.4.4. Συμπεράσματα

Σύνδεσμοι ανόμοιων μετάλλων ανάμεσα σε κράμα αλουμινίου 2B50 και ανοξείδωτου χάλυβα κατασκευάστηκαν με σκληρή συγκόλληση MIG με βοηθητική επίστρωση που προωθεί την ιδιότητα διαβροχής του μετάλλου πλήρωσης. Εξετάστηκε η εμφάνιση και το εγκάρσιο πρότυπο και τα χαρακτηριστικά της μικροδομής των συνδέσμων. Τα μεγαλύτερα συμπεράσματα αυτής της έρευνας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Η επίστρωση από αλουμίνιο είχε περιορισμένη επίδραση στην προώθηση της ιδιότητας διαβροχής του μετάλλου πλήρωσης αλουμινίου. Υπήρχαν πολλές διαμεταλλικές ενώσεις στην επιφάνεια του εξαργγλισμένου χάλυβα, μέρος του οποίου έλιωσε ενώ το άλλο μέρος των ενώσεων διείσδυσε στη ζώνη τήξης μετά τον κατακερματισμό ως αποτέλεσμα της θερμικής εισροής συγκόλλησης. Υπάρχουν εμφανείς μικρο-ρωγμές ανάμεσα στη στρώση της ένωσης και τη βάση μετάλλου χάλυβα. Ρωγμές εμφανίστηκαν στη διεπιφανειακή στρώση ραφής/χάλυβα, με την αντοχή εφελκυσμού στον αναδιπλωμένο σύνδεσμο να φτάνει τα 60MPa.

Αποκτήθηκαν γεροί σύνδεσμοι ανόμοιων μετάλλων ανάμεσα σε κράμα αλουμινίου και γαλβανισμένου χάλυβα με άριστη εμφάνιση διαμόρφωσης. Οι σύνδεσμοι είχαν τρεις εμφανείς περιοχές: τη ζώνη τήξης, τη διεπιφανειακή στρώση αντίδρασης και την εμπλουτισμένη με ψευδάργυρο ζώνη, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά φάσης. Μια λεπτή ασυνεχή ενδιάμεση στρώση παρατηρήθηκε ξεκάθαρα στην διεπιφάνεια συγκόλλησης, το πάχος της οποίας κυμαινόταν από περίπου 5_μm σε 15_μm, ανάλογα με την θερμική εισροή κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Η διαμεταλλική ένωση στην περιοχή της ραφής κοντά στη διεπιφάνεια συγκόλλησης ήταν $Al_{4.5}FeSi$. Η μέση αντοχή εφελκυσμού του αναδιπλωμένου συνδέσμου έφτανε τα 193,6MPa, όταν η θερμική εισροή έφτανε τα 0,846KJ/cm και η ρωγμή εμφανιζόταν στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη κοντά στη συγκόλληση.

6. ΓΕΝΙΚΑ

6.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Το αλουμίνιο σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα. Το αλουμίνιο αν και χρησιμοποιούνταν από αρχαιοτάτων χρόνων, η ανακάλυψη και η παραγωγή του στην σύγχρονη ιστορία έγινε δυνατή μόνο μετά την ανακάλυψη και την ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και μόνο όταν η χημεία αποχωρίστηκε το φάντασμα της αλχημείας. Το αλουμίνιο όπως αναφέρθηκε λίγο πιο πάνω χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα με την μορφή αργιλίου σαν πρώτη ύλη για την κατασκευή αγγείων, άλατα περιέχοντα στο αλουμίνιο για βαφές και φαρμακευτικά παρασκευάσματα. Οι αρχαίοι Έλληνες, οι Ρωμαίοι, οι Κινέζοι και οι Αιγύπτιοι κατά πάσα πιθανότητα χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις φυσικές του ενώσεις χωρίς να γνωρίζουν την ύπαρξη ενός νέου μετάλλου που έδινε αυτές τις ειδικές ιδιότητες στις κατασκευές τους.



Εικόνα 5.1:αλουμίνιο 1

Το 1761 ο Morveau παρατήρησε το μέταλλο όχι στην καθαρή του μορφή και του έδωσε το όνομα *alume*. Στην συνέχεια ο Davy και το 1807 πρότεινε το όνομα *aluminum* ο όρος ο οποίος χρησιμοποιείται ακόμα στην βόρειο Αμερική. Το 1825 ο Hans Oersted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο. Στις επόμενες δεκαετίες το αλουμίνιο εξελίχθηκε ραγδαία και περίπου το 1900 παρήχθησαν σε ετήσια βάση 8 τόνοι αλουμίνιο σπάζοντας κάθε ρεκόρ. Τελικά το όνομα αλουμίνιο υιοθετήθηκε και από τον οργανισμό IUPAC με την τελευταία συλλαβή της λέξης να είναι η ίδια σχεδόν με τα υπόλοιπα στοιχεία σε *ium*. Τέλος αλουμίνιο λεγόταν και στην Αμερική μέχρι το 1925, όπου το αμερικάνικο πανεπιστήμιο αποφάσισε να αλλάξει το όνομα σε αργίλιος σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο.[1],[2]

6.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο και έχει αρκετά καλή αγωγιμότητα. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η σημασία του για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη παρουσιάζει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Επίσης, παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση λόγω του σχηματισμού ενός προσκολλημένου οξειδίου του αλουμινίου. Το αλουμίνιο είναι το τρίτο αφθονότερο στοιχείο στον γήινο φλοιό. Επίσης είναι το χημικό στοιχείο της 3ης ομάδας στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων και αποτελείται από 14 νετρόνια και 13 πρωτόνια. Το αλουμίνιο έχει ασημή ανοιχτό χρώμα. Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ αργυρόχρωμο μέταλλο. Το ατομικό του βάρος είναι 26,9815, κρυσταλλώνεται σε δομή κυβικού εδροκεντρωμένου, λιώνει σε θερμοκρασία 660°C (1.220°F), εξατμίζεται σε θερμοκρασία 2.467°C (4.473°F), και έχει ειδικό βάρος 2,7(kg/m³ ή g/cm³). Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Έτσι, καθαρό αλουμίνιο σε ποσοστό 99,996% έχει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 49 MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	Στοιχεία	Μον. μέτρ.
Ατομικό βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20 °C)	2,6898	gr/cm ³
Σημείο Τήξη	660,2	°C
Γραμμική διαστολή (0-100 °C)	23,5X10 ⁻⁶	(m/m)/°C
Ηλεκτρική Αντίσταση (20 °C)	2,69	μΩcm
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	68,3	GPa
Μέτρο Στρέψης (G)	25,5	GPa

Εικόνα 5.2:ιδιότητες αλουμινίου

Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά αντιδρόν. Στην επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό συνεχές επιφανειακό στρώμα Al₂O₃ το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό.

Επιπλέον, είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ μορφοποιείται χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Κράματα αυτού με μικρά ποσοστά χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου και πυριτίου αλλά και άλλων κραματικών στοιχείων, του προσδίδουν ιδιαίτερα ξεχωριστές και χρήσιμες ιδιότητες.

6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μια συγκεκριμένη ποσότητα μάζας αλουμινίου, ζυγίζει περίπου το 1/3 της ίδιας μάζας από σίδηρο. Ο συνδυασμός του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος με την υψηλή αντιδιαβρωτική αντοχή του, το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δομική και αρχιτεκτονική (τόσο ως δομικό όσο και ως διακοσμητικό υλικό), αλλά και στην κατασκευή αυτοκινήτων, τρένων, αεροπλάνων, πλοίων και γενικότερα σε εφαρμογές, όπου απαιτείται μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. μεταφορά εμπορευμάτων, υγρών καυσίμων κ.λ.π.). Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς του, χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκευών μαγειρικής, ως περιτύλιγμα τροφίμων, αλλά και στην κατασκευή πιστονιών για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Έχει το 75% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού, αλλά μόνο το μισό βάρος ενός ιδίου αγωγού. Κατά συνέπεια, ένας αγωγός αλουμινίου είναι πιο μεγάλος σε διάμετρο από έναν αντίστοιχο από χαλκό, αλλά εξακολουθεί να είναι πιο ελαφρύς και θεωρείται καταλληλότερος για μεγάλους μήκους γραμμές μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης (αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται πλέον για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχης των 700,000V ή και περισσότερο). Οι πυρηνικές ιδιότητες του αργιλίου είναι πρακτικού ενδιαφέροντος. Στους πρώτους πυρηνικούς αντιδραστήρες, το αργίλιο ήταν αποκλειστικά για τις προστατευτικές θήκες γύρω από τα στοιχεία καυσίμων ουράνιου και ως αγωγός για τη διεύθυνση του ψυκτικού μέσου.



Εικόνα 5.3:κουφώματα αλουμινίου 1

6.4 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Οι διάφοροι παραγωγοί αλουμινίου για να μιλάνε την ίδια γλώσσα μεταξύ τους για τα προϊόντα του αλουμινίου έχουν συμφωνήσει στις παρακάτω οχτώ κύριες σειρές συμβολισμού.

Σειρά 1000: προϊόντα αλουμινίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο >99%. **Σειρά 2000:** κράματα αλουμινίου και Χαλκού. **Σειρά 3000:** κράματα αλουμινίου και Μαγνησίου. **Σειρά 4000:** κράματα αλουμινίου και Πυριτίου. **Σειρά 5000:** κράματα αλουμινίου και Μαγνησίου. **Σειρά 6000:** κράματα αλουμινίου και Μαγνησίου-Πυριτίου **Σειρά 7000:** κράματα αλουμινίου και Ψευδαργύρου. **Σειρά 8000:** όσα δεν περιλαμβάνονται στα παραπάνω. [3],[4],[5]

6.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Για να παραχθεί το αλουμίνιο πρέπει πρώτα να εξασφαλίσουν την λειτουργία τους κάποιες άλλες βιομηχανίες οι οποίες θα διοχετεύσουν τις πρώτες ύλες που χρειάζονται. Ξεκινώντας από τα ορυχεία βωξίτη και του άνθρακα, από το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παραγωγής σόδας φτάνουμε στην βιομηχανία παραγωγής αλουμινίου όπου όλα τα παραπάνω χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή του αλουμινίου. Ύστερα από την παραγωγή του το αλουμίνιο εξέρχεται από την εταιρία σε μορφή πλακών ή στηλών οι οποίες στην συνέχεια σε άλλα επιμέρους εργοστάσια χρησιμοποιούνται για την κατασκευή προϊόντων.



Εικόνα 5.4:εργοστάσιο παραγωγής αλουμινίου

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ

Οι κύριες και βασικές πρώτες ύλες για την παραγωγή της αλουμίνας είναι ο βωξίτης, το νερό, η σόδα, ο ασβέστης, το πετρέλαιο, η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και άλλα πρόσθετα βελτιωτικά. Ο βωξίτης διαχωρίζεται σε 3 βασικά στάδια: 1) την αλουμίνα ή οξείδιο του αλουμινίου, 2) το οξείδιο του σιδήρου, και 3) το οξείδιο του πυριτίου. Ένας βωξίτης είναι καλής ποιότητας όταν η περιεκτικότητά του σε αλουμίνα είναι υψηλή και η περιεκτικότητά σε οξείδιο του πυριτίου είναι χαμηλή.

Α) ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΑΣ

Η παραγωγή της αλουμίνας βασίζεται στη μέθοδο που πρώτος ανέπτυξε το 1890 ο Αυστριακός χημικός Bayer. Βασίζεται στην ικανότητα που έχει το καυστικό διάλυμα κάτω από ορισμένες συνθήκες, να προσβάλει τον βωξίτη και να διαλύει την αλουμίνα. Τα άλλα συστατικά, κυρίως ο σίδηρος, μένουν αδιάλυτα ή σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις. Από το όνομα του Bayer έχει πάρει το όνομα και η μέθοδος προσβολής. Η μέθοδος αυτή είναι πλέον διαδεδομένη και εφαρμόζεται στα εργοστάσια παραγωγής αλουμίνας με διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των βωξιτών και τη τεχνολογία.

Η παραγωγή της αλουμίνας διακρίνεται σε δύο βασικές φάσεις:

Φάση 1: διαχωρισμός της αλουμίνας από τα άλλα συστατικά του βωξίτη.

Για να διαχωριστεί το οξείδιο του αλουμινίου από τα άλλα συστατικά του βωξίτη, γίνεται εκμετάλλευση της ιδιότητας του να διαλύεται (με ορισμένες συνθήκες) σε διάλυμα σόδας, ενώ τα άλλα συστατικά παραμένουν αδιάλυτα ή σχηματίζουν αδιάλυτες ενώσεις, υπό μορφή ερυθράς λάσπης. Οι συνθήκες αυτές είναι:

- 1) Καλά αλεσμένος βωξίτης με την προσθήκη ασβέστη
- 2) Διάλυμα σόδας περιεκτικότητας $>220\text{gr/lit}$ και σε ορισμένη αναλογία ως προς το βάρος του βωξίτη,
- 3) Υψηλή θερμοκρασία ($256\text{-}258^{\circ}\text{C}$) που έχει σαν συνέπεια τη χρήση συσκευών υψηλής πίεσης,
- 4) Διάρκεια παραμονής 1 ώρας περίπου.

Φάση 2: επανάκτησης της αλουμίνας από το διάλυμα σόδας.

Για την επανάκτηση της αλουμίνας από το διάλυμα σόδας, αντιστρέφουμε τις συνθήκες που ήταν ευνοϊκές για τη διάλυση της. Δηλαδή:

- 1) Αραίωση του διαλύματος σόδας,
- 2) Χαμηλή θερμοκρασία γύρω στους $58\text{-}60^{\circ}\text{C}$ (ανάλογα με την ποιότητα της αλουμίνας),
- 3) Εμβολιασμός με κρυσταλλωμένη ένυδρο αλουμίνα, για την διευκόλυνση της αντιδράσεως,
- 4) Μεγάλος χρόνος παραμονής, που κυμαίνεται γύρω στις 30-36 ώρες.

Για την πραγματοποίηση των δύο φάσεων, το διάλυμα την σόδας χρησιμοποιείται και ως μεταφορικό μέσον της αλουμίνας, την οποία παίρνει στην πρώτη φάση και την αποδίδει στην συνέχεια στην δεύτερη φάση. Το διάλυμα της σόδας, μετά το τέλος της πρώτης φάσεως, αραιώνεται για να κρυσταλλωθεί η αλουμίνα, ενώ στην συνέχεια συμπυκνώνεται στην εξάτμιση για να χρησιμοποιηθεί εκ νέου στην πρώτη φάση, κλείνοντας έτσι τον κύκλο παραγωγής. Βγαίνοντας πυρακτωμένη στους 640°C οδηγείτε στην αερογλισσιέρα δηλ. ένα κανάλι που κάνει υποπίεση και αφού δημιουργηθεί ανάδευση κατευθύνεται στα silo 5000t και 4000t. Η ένυδρη αλουμίνα πηγαίνει για πρώτη ύλη άλλων προϊόντων όπως φυτοφάρμακα, λιπάσματα, είδη υγιεινής κ.α.

Εκτός από τις δύο αυτές φάσεις του κύκλου παραγωγής, έχουμε κι άλλες ενδιάμεσες φάσεις, οι οποίες προετοιμάζουν τις πρώτες ή συμπληρώνουν αυτές.

Β)ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο παράγεται με την ηλεκτρολυτική διάσπαση της αλουμίνας(Al_2O_3), η οποία παράγεται από το βωξίτη, μέσα σε τηγμένο κρυολιθικό λουτρό ($\text{AlF}_3 \cdot 3\text{NaF}$) και η οποία εισάγεται μέσα στο λουτρό της λεκάνης σε μικρές ποσότητες όπου διαλύεται και με την διέλαση του ηλεκτρικού ρεύματος διασπάται σε αλουμίνιο και οξυγόνο. το αλουμίνιο σαν ρευστό πλέον επικάθεται στον πυθμένα της λεκάνης όπου και χυτεύεται περιοδικά μια αρκετά μεγάλη ποσότητα και μεταφέρεται στο χυτήριο για την επεξεργασία και μορφοποίηση του. Το οξυγόνο απελευθερώνεται προς την άνοδο της λεκάνης, αντιδρά με τον άνθρακα των ανόδων και σχηματίζει CO_2 . Για τον λόγο αυτό οι άνοδοι φθείρονται και χρειάζονται περιοδική αντικατάσταση.

Λεκάνη ηλεκτρόλυσης

Η λεκάνη ηλεκτρόλυσης αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια:

- 1)την άνοδο που καίγεται από το οξυγόνο και παράγεται CO_2
- 2)την κάθοδο όπου επικάθεται το ρευστό αλουμίνιο.

Κατασκευαστικά η λεκάνη αποτελείται από το σιδερένιο περίβλημα στερεωμένο στο έδαφος και το εσωτερικό του (δάπεδο και πλευρά) κτίζεται με τούβλα πυρίμαχα και μονωτικά.

Τα καθοδικά μπλόκα είναι από άνθρακα και στην κάτω πλευρά φέρουν σιδερένια ράβδο για την απαγωγή του ρεύματος προς την επόμενη λεκάνη και τοποθετούνται πάνω από τις επιστρώσεις των τούβλων του δαπέδου. Αυτά αποτελούν τον πυθμένα της λεκάνης όπου επικάθεται το ρευστό αλουμίνιο και είναι το αρνητικό (-) μέρος της λεκάνης. Για την καλύτερη προστασία των τούβλων και των κενών που υπάρχουν, χρησιμοποιείται ανθρακοπολτός (μπρασκάς).

Το ανοδικό σύστημα που είναι και το θετικό (+) ηλεκτρόδιο της λεκάνης, αποτελείται από το πλαίσιο, τις ανόδους και τους σφιγκτήρες των ανόδων. Στην υπερδομή της λεκάνης που αποτελείται από χαλύβδινα δοκάρια, είναι εγκατεστημένο το σύστημα τροφοδοσίας με αλουμίνα και φθοριούχα προϊόντα (σιλό αλουμίνας, φθόριο, κρούστας, διατηρητής, σωλήνες πεπιεσμένου αέρα και τα διάφορα ηλεκτρονικά και ηλεκτρολογικά ερμάρια. Επίσης για την προστασία του περιβάλλοντος υπάρχουν τα δύο σκέπαστρα της λεκάνης που δεν επιτρέπουν τα αέρια

να εξέρχονται, αλλά συλλέγονται με αγωγούς και κατευθύνονται προς τις εγκαταστάσεις προστασίας περιβάλλοντος.



Εικόνα 5.5:Λεκάνες ηλεκτρόλυσης αλουμινίου

ΣΕΙΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι λεκάνες ηλεκτρόλυσης είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες εν σειρά. Το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα φεύγοντας από την κάθοδο της μιας λεκάνης πηγαίνει στην άνοδο της επόμενης λεκάνης, διατρέχοντας κατ' αυτόν τον τρόπο όλες τις λεκάνες. Είναι δηλαδή ένα σύνολο λεκανών συνδεδεμένων μεταξύ τους και ονομάζεται “σειρά ηλεκτρόλυσης”.

Για την μεταφορά ρεύματος από τον υποσταθμό του αλουμινίου προς τις λεκάνες, καθώς και από λεκάνη σε λεκάνη, υπάρχουν αγωγοί από αλουμίνιο που τροφοδοτούν τις λεκάνες από 2 σημεία (εσωτερική-εξωτερική κεφαλή λεκάνης).

ΤΟ ΛΟΥΤΡΟ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Η καθαρή αλουμίνα λειώνει στους 2000°C . Επομένως, για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτρολυτική παραγωγή του αλουμινίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηλεκτρολύτη μέσα στον οποίο θα διαλυθεί κατ' αρχάς η αλουμίνα (Al_2O_3) και μετά θα γίνει η διάσπασή της.

Ο ηλεκτρολύτης αυτός πρέπει να έχει πολλές ιδιότητες, όπως:

- 1) Να διαλύει καλά την αλουμίνα
- 2) Να είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος
- 3) Να έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το υγρό αλουμίνιο

4)Να έχει ο ίδιος υψηλότερη τάση διάσπασης από το αλουμίνιο, για να μη διασπάται πρώτο.

Όλες αυτές τις ιδιότητες τις συγκεντρώνει το λουτρό της λεκάνης που βασικά είναι μείγμα δυο φθοριούχων προϊόντων, του AlF_3 και του NaF (που δίνουν περίπου την σύνθεση του κρυόλιθου $[AlF \cdot 3NaF]$ και αποτελεί ο κρυόλιθος το 80% της σύνθεσης του λουτρού της λεκάνης). Ακόμη μέσα στο λουτρό υπάρχουν και αλλά φθοριούχα όπως AlF_3 σε περίσσεια και με ανάλογες ποσότητες CaF_2, LiF, Al_2O_3 .

Το λουτρό και το μέταλλο διατηρούνται μέσα στη λεκάνη σε ρευστή κατάσταση και σε θερμοκρασία $950^\circ C$. Το μεν μέταλλο σαν βαρύτερο καταλαμβάνει τον χώρο του πυθμένα την λεκάνης, το δε λουτρό σαν ελαφρύτερο βρίσκεται πάνω από αυτό, ενώ ένα μικρό μέρος της κάτω επιφάνειας όλων των ανόδων της λεκάνης είναι εμβαπτισμένο στο λουτρό (για το υποχρεωτικό πέρασμα του ρεύματος προς την κάθοδο). Το κανονικό ύψος λουτρού πρέπει να είναι 18-19 εκ. Μεγαλύτερο ύψος σημαίνει αφαίρεση ποσότητας λουτρού, ενώ μικρότερο προσθήκη ποσότητα ρευστού λουτρού.

ΤΑΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ

Στα άκρα κάθε λεκάνης ηλεκτρόλυσης εφαρμόζεται τάση 4V. Τα 4 αυτά βολτ όμως δεν χρησιμοποιούνται όλα για την διάσπαση της αλουμίνης, αλλά από αυτά, τα 2,35V είναι διάφορες απώλειες κατά την διαδρομή του ρεύματος στη λεκάνη και μόνο το 1,65V είναι η ωφέλιμη τάση διάσπασης της αλουμίνης.

ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 1 ΤΟΝΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή 1 τόνου αλουμινίου είναι:

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1) Αλουμίνη | 2 τόνοι (από 4 βωξίτη) |
| 2) Άνοδοι | 412 κιλά |
| 3) Φθοριούχα προϊόντα | 18 κιλά |
| 4) Ηλεκτρική ενέργεια | 13.500KWH |

Εκτός της αλουμίνης, οι υπόλοιπες μπορεί να μεταβάλλονται ως προς το μέγεθος τους κατά την λειτουργία της λεκάνης.

ΑΝΟΔΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ Ή ΚΑΥΣΗ

Κατά τη λειτουργία της λεκάνης δημιουργείται ένα φαινόμενο που ονομάζεται ανοδικό φαινόμενο ή καύση. Είναι στιγμή όπου η περιεκτικότητα της διαλυμένης αλουμίνης στο λουτρό ελαττώθηκε στα όρια περίπου του 1,5% και εμφανίζεται το ανοδικό φαινόμενο που εκδηλώνεται με την αύξηση της τάσης της λεκάνης που μπορεί να φτάσει και 40V.

Σ' αυτήν την χαμηλή περιεκτικότητα του λουτρού σε αλουμίνη, τα ιόντα του οξυγόνου δεν υπάρχουν σε αρκετή ποσότητα μέσα στο λουτρό με αποτέλεσμα να γίνονται διάφορες αντιδράσεις με τα φθοριούχα προϊόντα και να παράγονται αέρια τα

οποία συσσωρεύονται κάτω από τις ανόδους που προοδευτικά καλύπτουν όλη την κάτω επιφάνεια των ανόδων καθιστώντας έτσι δύσκολη την διέλευση του ρεύματος προς την κάθοδο. Η ανοδική πυκνότητα του ρεύματος αυξάνει και τάση αυξάνεται συνεχώς μέχρι να προσεγγίσει μια τιμή, πολλές φορές και 40V, που θα είναι αρκετή για να διαπεράσει το μονωτικό στρώμα αερίου.

Αυτό το φαινόμενο που δημιουργείται, καλείται ανοδικό φαινόμενο ή καύση. Η καύση δεν πρέπει να παραμείνει επί μακρόν χωρίς καμία επέμβαση, γιατί υπάρχει υπερβολική κατανάλωση σε KWH και ακόμη κίνδυνος να τρυπήσει η λεκάνη σε κάποιο σημείο της με αποτέλεσμα ανεπιθύμητης ροής μετάλλου και λουτρού ή και στην χειρότερη περίπτωση σταμάτημα της σειράς (διακοπή ηλεκτρικού κυκλώματος).

Η απάλειψη της καύσης επιτυγχάνεται με την ανακίνηση του λουτρού που δημιουργείται από το αυτόματο ανεβοκατέβασμα του ανοδικού πλαισίου από ειδικό πρόγραμμα του M/Y, απελευθερώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το μονωτικό αέριο. Επίσης ξεκινά αυτόματα και μια τροφοδοσία της λεκάνης με αλουμίνια με σκοπό την αύξηση της περιεκτικότητας της αλουμίνιας στο λουτρό πάνω από 3,5%. Έτσι η λεκάνη επανέρχεται πάλι στην κανονική της λειτουργία.

ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΑΛΟΥΜΙΝΑ

Η λεκάνη σε τακτά χρονικά διαστήματα πρέπει να τροφοδοτείται με μια ποσότητα αλουμίνιας και ανάλογα πάντα με την περιεκτικότητα της υπάρχουσας διαλυμένης αλουμίνιας στο λουτρό.

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας η λεκάνη τροφοδοτείται με λιγότερη αλουμίνη από αυτή που θεωρητικά καταναλώνει για κάποιο χρονικό διάστημα. Εισάγεται στο λουτρό της μια σταθερή ποσότητα αλουμίνιας της τάξεως του 1 κιλού ανά 2 λεπτά περίπου από μια τρύπα τροφοδοσίας επάνω στην κρούστα της λεκάνης για τις σειρές Α-Β και 2 για την σειρά Γ, διατηρούμενες πάντα ανοιχτές από βερνέ πνευματικά, προσαρμοσμένα στην υπερδομή της λεκάνης και μετά από εντολή προγράμματος.

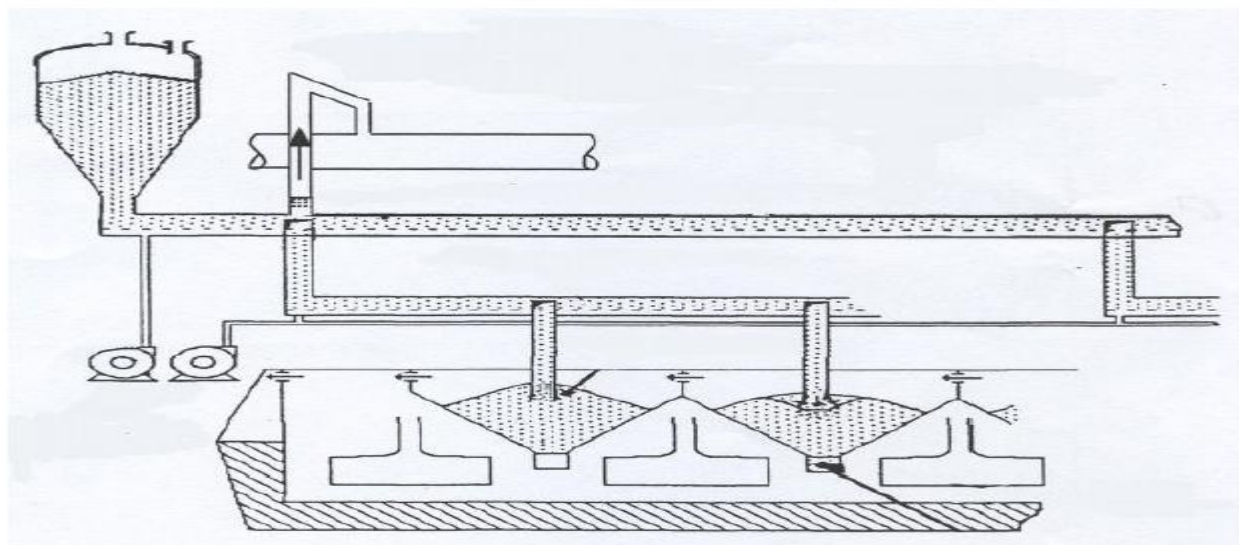
Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η λεκάνη πρέπει να τροφοδοτηθεί με περισσότερη αλουμίνη από αυτήν που καταναλώνει όπως, περίπτωση καύσης, ανύψωση πλαισίου κ.λ.π. ή και ακόμη με διακοπή τροφοδοσίας για ορισμένο χρονικό διάστημα, αποφεύγοντας έτσι ανεπιθύμητες καταστάσεις στη λεκάνη (αποφυγή λασπώματος του πυθμένα από αδιάλυτη αλουμίνη).

Για τις ανάγκες λοιπόν της τροφοδοσίας της λεκάνης υπάρχουν 5 είδη τροφοδοσίας με αλουμίνη, όπου ο χρόνος και η διάρκεια της κάθε δόσης είναι διαφορετικός για κάθε περίπτωση.

Αυτά ονομάζονται σαν:

- 1) Απλή τροφοδοσία
- 2) Ενισχυμένη τροφοδοσίας
- 3) Υπερενισχυμένη τροφοδοσία
- 4) Μηδενική τροφοδοσία
- 5) Μειωμένη τροφοδοσία

Η όλη ρύθμιση της τροφοδοσίας γίνεται και ελέγχεται από ειδικό πρόγραμμα του Μ/Υ της λεκάνης.



Εικόνα 5.6:Τροφοδοσία λεκάνης ηλεκτρόλυσης

Γ) ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Για την παραγωγή των προϊόντων αλουμινίου στο χυτήριο χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε 4 κατηγορίες: Μέταλλα, Μητρικά κράματα, Συλλιπάσματα, Αέρια.

Οι πρώτες κατηγορίες βρίσκονται αποθηκευμένες στην αποθήκη του χυτηρίου στη βορινή πλευρά, δίπλα στον ανεμιστήρα του Φ.Ο.4 καθώς και στο στεγασμένο χώρο της δραστηριότητας Μεταφορών.

Τα αέρια βρίσκονται αποθηκευμένα στις δεξαμενές Αργού και Αζώτου στην βορινή πλευρά του χυτηρίου και στο σταθμό Χλωρίου στην νότια πλευρά του χυτηρίου.

Περιγραφή πρώτων υλών

1)ΜΕΤΑΛΛΑ

πυρίτιο
μαγνήσιο
μαγνήσιο ηλεκτρολυτικό
ψευδάργυρος
.
.
.

2)ΜΗΤΡΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

αλουμίνιο-σίδηρος 80% (AF80)
αλουμίνιο-μαγγάνιο 80% (AM80)
αλουμίνιο-τιτάνιο5%-βόριο1%
αλουμίνιο-τιτάνιο 10% (AT10)
αλουμίνιο-χρώμιο 20% (AC 20)
αλουμίνιο-βόριο 4% (AB 4)
αλουμίνιο-χαλκός 50% (AU 50)

3)ΣΥΛΛΙΠΑΣΜΑΤΑ
SODEXAL
EG20
.

4)ΑΕΡΙΑ
άζωτο
αργόν
χλώριο

ΦΟΥΡΝΟΙ

Το χυτήριο διαθέτει έξι φούρνους επεξεργασίας μετάλλου. Ονομάζονται φούρνοι επεξεργασίας γιατί μέσα σ' αυτούς επεξεργαζόμαστε το αλουμίνιο. Επίσης ονομάζονται φούρνοι πετρελαίου γιατί χρησιμοποιείται σαν καύσιμο το πετρέλαιο. Υπάρχουν οκτώ φούρνοι.

Οι φούρνοι 1 και 2 έχουν χωρητικότητα 45 τόνων.

Οι φούρνοι 4 και 5 έχουν χωρητικότητα 28 τόνων.

Οι φούρνοι 7 και 8 έχουν χωρητικότητα 40 τόνων.

Οι φούρνοι πετρελαίου αποτελούνται από εξής κύρια σημεία:

- 1) Εξωτερικό περίβλημα
- 2) Πυρίμαχη επένδυση
- 3) Υδραυλικό εξοπλισμό
- 4) Εξοπλισμός θέρμανσης
- 5) Εξοπλισμό μέτρησης κα ρύθμισης της θερμοκρασίας

ΦΟΥΡΝΟΙ SNIF

Το σύνολο των πλακών και κολώνων της παραγωγής επεξεργάζεται με τη μέθοδο SNIF ή ALPUR εξασφαλίζοντας πολύ καλή ποιότητα μετάλλου με σταθερά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα. Η μέθοδος SNIF μας επιτρέπει της απομάκρυνση από το ρευστό αλουμίνιο: του υδρογόνου, των μη μεταλλικών συστατικών και εγκλεισμάτων και των αλκαλικών μετάλλων (Νάτριο, Ασβέστιο και Λίθιο). Η απομάκρυνση των παραπάνω γίνεται με μικρές φυσαλίδες μίγματος Αργόν και Χλωρίου και έντονο ανακάτεμα του μετάλλου.

Το συγκρότημα SNIF αποτελείται από:

- 1) Φούρνο καθαρισμού θερμαινόμενο με αντιστάσεις
- 2) Ρότορες και στάτορες διοχέτευσης των αερίων
- 3) Χειριστήριο ελέγχου παροχής και πίεσεως των αερίων
- 4) Χειριστήριο ελέγχου θερμοκρασίας μετάλλου και αντιστάσεων
- 5) Εγκατάσταση αερίων Αργόν, Χλωρίου, Αζώτου, Αέρος.

ΦΟΥΡΝΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ALPUR

Ο φούρνος καθαρισμού μετάλλου ALPUR παρέχει τα ίδια ποιοτικά αποτελέσματα με την εγκατάσταση SNIF, όσον αφορά τον καθαρισμό του ρευστού μετάλλου. Διαφοροποιείται μόνο στα παρακάτω βασικά σημεία:

- 1) Το ρευστό μέταλλο έρχεται σε επαφή με πυρίμαχη επένδυση.
- 2) Η διατήρηση της θερμοκρασίας γίνεται με βυθιζόμενες στο ρευστό μέταλλο αντιστάσεις προστατευμένες με ειδικό περίβλημα.
- 3) Η εγκατάσταση είναι ανατρεπόμενη και μπορεί να αδειάσει πλήρως το περιεχόμενο της.

ΚΕΡΑΜΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ

Εκτός από τη μέθοδο SNIF και ALPUR, στη χύτευση πλακών χρησιμοποιούμε και κεραμικό φίλτρο. Το κεραμικό φίλτρο είναι μια πλάκα διαστάσεων από πορώδες κεραμικό υλικό μέσα από το οποίο υποχρεώνεται να περάσει το ρευστό μέταλλο λίγο πριν τη στερεοποίηση του στην εγκατάσταση χύτευσης.

Το αποτέλεσμα είναι να συγκρατούνται από το φίλτρο εγκλείσματα που βρίσκονται στο ρευστό μέταλλο. Το φίλτρο αντικαθίσταται μετά από ένα ορισμένο αριθμό χυτεύσεων.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Το χυτήριο διαθέτει τέσσερις εγκαταστάσεις χύτευσης.

Εγκατάσταση Α: τροφοδοτείται από τους φούρνους 1 και 2 και μπορεί να παράγει κολόνες, πλάκες και ταφ.

Εγκατάσταση Β: τροφοδοτείται από τους φούρνους 4 και 5 και μπορεί να παράγει κολόνες, πλάκες και ταφ.

Εγκατάσταση Γ: τροφοδοτείται από το φούρνο 5 μπορεί να παράγει κολόνες, πλάκες και ταφ.

Εγκατάσταση Δ: τροφοδοτείται από τους φούρνους 7 και 8 και μπορεί να παράγει κολόνες, πλάκες και ταφ.

ΣΥΝΕΧΗΣ ΦΟΥΡΝΟΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ομογενοποίηση είναι μια θερμική κατεργασία που πραγματοποιείται σε όλες σχεδόν τις κολόνες που παράγουμε στο χυτήριο. Σκοπό έχει να μετασχηματίσει τη μεταλλουργική δομή των κολόνων έτσι ώστε να μπορούν να δώσουν:

- 1) καλή επιδεκτικότητα στη διέλαση
- 2) καλή επιφανειακή όψη μετά την διέλαση
- 3) καλά μηχανικά χαρακτηριστικά στα παραγόμενα προϊόντα.

Η εγκατάσταση είναι αυτόματη και περιλαμβάνει:

- 1) χώρο ξεκαλουπώματος κολόνων
- 2) χώρο για οπτικό έλεγχο κολόνων

- 3)πριόνι για το πριόνισμα των άκρων για τις μακριές κολόνες και του κεφαλιού για τις κοντές κολόνες
- 4)συνεχή φούρνο ομογενοποίησης και θαλάμου ψύξης
- 5)πλήρες πόστο πριονίσματος των κοντών κολόνων, δεματοποίησης, ζύγιση, δεματοποίησης και αποθήκευσης όλων των κολόνων
- 6)τα απαραίτητα συστήματα μεταφοράς.

ΦΟΥΡΝΟΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ Η4

Υπάρχει ένας αυτόνομος ηλεκτρικός φούρνος ομογενοποίησης χωρητικότητας περίπου 40 τόνων μέσα στον οποίο η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με ανεμιστήρες και με δυναμικότητα ομογενοποίησης και με δυναμικότητα 40 ανά 24ωρο με τον αντίστοιχο θάλαμο ψύξης που χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις.

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ,ΑΕΡΑ,ΑΕΡΙΩΝ

Το χυτήριο για την λειτουργία του εξυπηρετείται με διάφορα κυκλώματα υγρών και αερίων μέσω σωληνώσεων.

- 1) Κύκλωμα νερού. Χρησιμοποιείται στη χύτευση. Πρόκειται για νερό που έχει ειδική κατεργασία αποσκλήρυνσης και επανακυκλώνεται.
- 2) Κύκλωμα νερού ψύξης. Πρόκειται για νερό που κυκλοφορεί στους ενναλάκτες για την ψύξη του νερού χύτευσης.
- 3) Κύκλωμα αέρα. Χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις εγκαταστάσεις. Πρόκειται για πεπιεσμένο αέρα που παράγεται από τους αεροσυμπιεστές του εργοστάσιου αλουμινίου που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα, έξω από το κτίριο του χυτηρίου. Σε περίπτωση βλάβης το σύστημα είναι συνδεδεμένο με τους αεροσυμπιεστές στο χώρο των αδρανών αερίων.
- 4) Κυκλώματα αερίων. Αργόν, άζωτο, χλώριο. Χρησιμοποιούνται κυρίως στα SNIF και ALPUR.

ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Οι φούρνοι πετρελαίου χρησιμοποιούνται για το καύσιμο βαρύ πετρέλαιο. Το πετρέλαιο φυλάσσεται σε δεξαμενή και από κει μέσω σωληνώσεων τροφοδοτεί τους φούρνους πετρελαίου. Οι σωληνώσεις θερμαίνονται με ατμό από το εργοστάσιο αλουμινίου.[6]

6.6 ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο μέταλλο. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι το αλουμίνιο παραμορφώνεται ελαστικά τρεις φορές περισσότερο από τον χάλυβα, κάτω από αντίστοιχη φόρτιση. Αυτή η ιδιότητα δεν βελτιώνεται σημαντικά με την κραμάτωση. Επίσης το αλουμίνιο και τα κράματα του κρατούν την

ολκιμότητα τους και δεν γίνονται ψαθυρά ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που δεν συμβαίνει με τον χάλυβα και το τιτάνιο.

Σαν τα περισσότερα μέταλλα ενισχύεται με ψυχρηλασία. Ακόμη περισσότερο δε, ενισχύεται με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία.

Το καθαρό αλουμίνιο χρησιμοποιείται για ηλεκτρικούς αγωγούς, χημικό εξοπλισμό και σα φύλλο με διάφορες εφαρμογές. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς (εκλέπτυνση κόκκου, μετασχηματισμό).

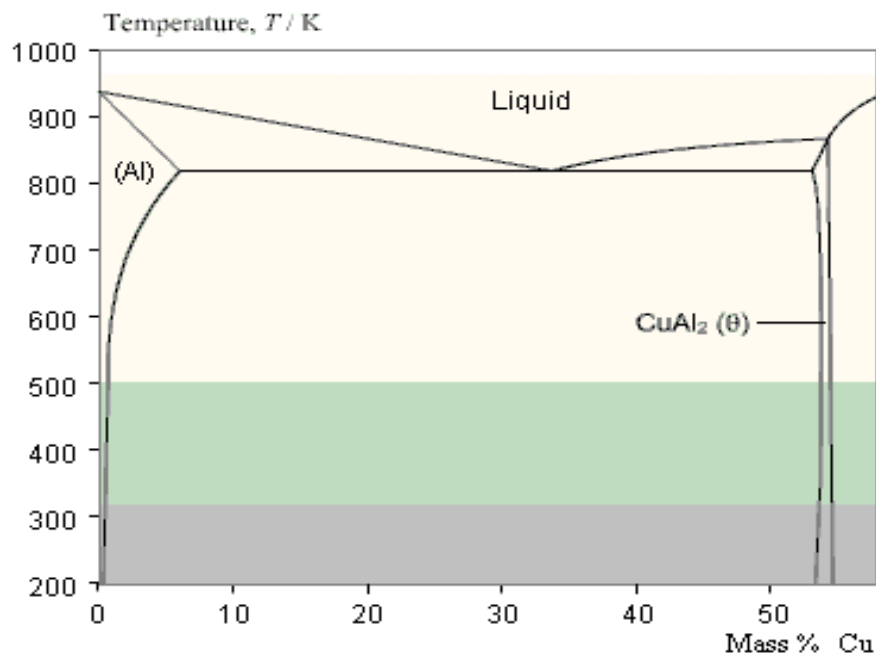
Η εικόνα 5.6 δείχνει τη μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει την διαλυτότητα. Προσθήκες μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαλυτότητα πολλές φορές γίνονται, ειδικά με το πυρίτιο και αυτό έχει σα συνέπεια τη παρουσία ετερογενών σωματιδίων στο στερεό διάλυμα.

Προσθήκη	% κ/β	% άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	745
Mg	14,9	16,3	569
Mn	1,8	0,9	944
Si	1,6	1,6	798
Zn	82,8	66,4	447
Mg₂Si	1,8	1,9	740
MgZn₂	16,9	9,6	614

Εικόνα 5.7:Μέγιστη διαλυτότητα κραματικών στοιχείων στο αλουμίνιο

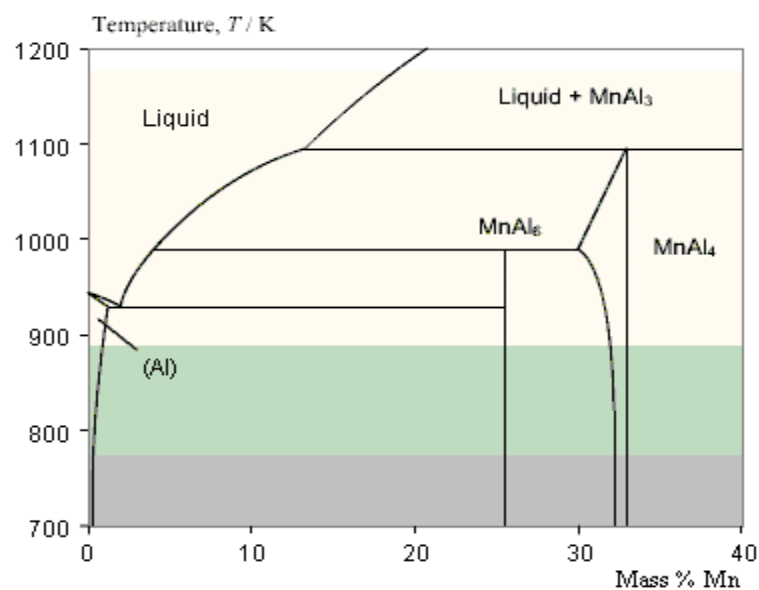
Στη συνέχεια δίνονται τα διμερή διαγράμματα φάσεων. Από όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία μόνο ο ψευδάργυρος έχει σημαντική διαλυτότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μάλιστα λίγες μονάδες. Έτσι κάτω από συνθήκες ισορροπίας οι περισσότερες κραματικές προσθήκες βρίσκονται διεσπαρμένες στη μήτρα του αλουμινίου και το ενισχύουν με διασπορά. Πάντως δεν επιδέχονται όλα τα κράματα θερμική κατεργασία και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση με ψυχρηλασία. Παρουσιάζονται στη συνέχεια οι επιδράσεις των κραματικών προσθηκών στο αλουμίνιο αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι σπάνια τα κράματα είναι διμερή και συνήθως μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία προστίθενται για να προσδώσουν ειδικές ιδιότητες.

Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σα κύριο κραματικό στοιχείο, η μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.



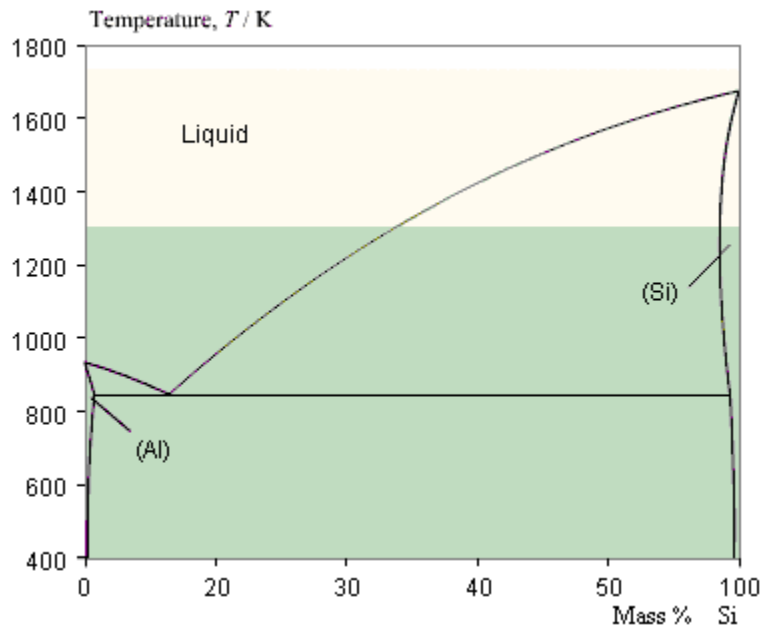
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Cu

Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά ή μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.



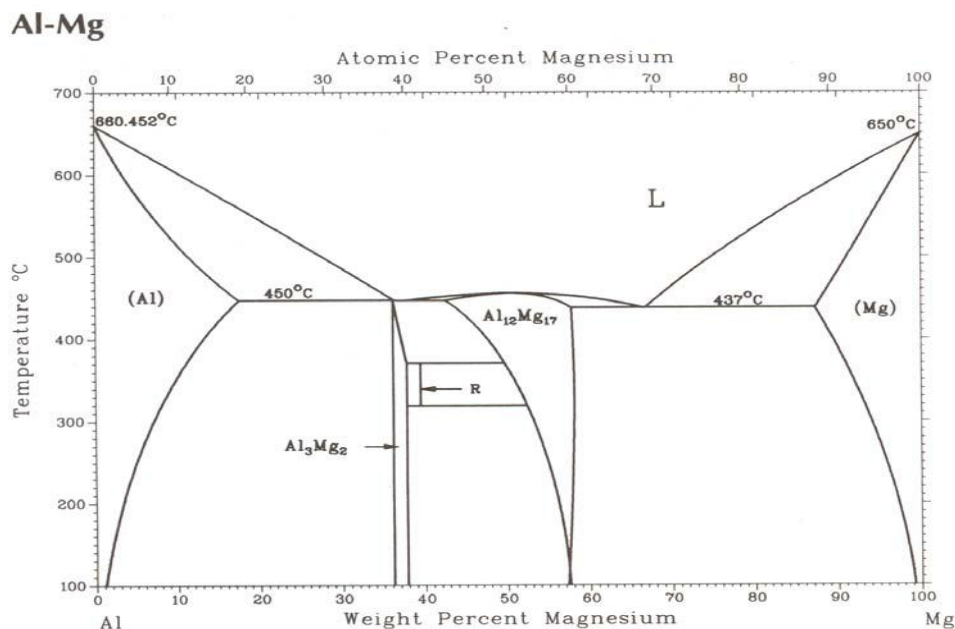
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Mn

Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει την ρευστότητα του αλουμινίου. Αυξάνει επίσης σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.



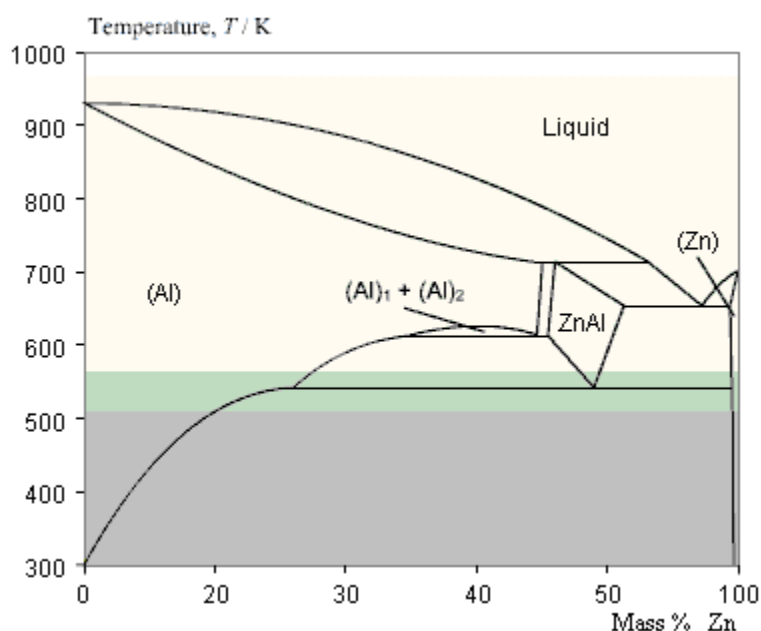
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Si

Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al-Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Mg

Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτευτικά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης, παράγει κράματα που έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ των κραμάτων του αλουμινίου.



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Al-Zn

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

ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)

1xxx Καθαρό Αλουμίνιο

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Mpa

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al). Μερικοί τύποι, σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων ή φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας.



5.13



5.14



5.15

Εικ.5.13 Εγκατάσταση ηλεκτρικών αγωγών αλουμινίου με Al 1350.

Εικ.5.14 Αλουμινόχαρτο για τρόφιμα και φάρμακα από καθαρό αλουμίνιο 1100

Εικ.5.15 Αλουμινόχαρτο με έντυπο για τρόφιμα και ποτά από 1060 ή 1100

2xxx Κράματα Al-Cu

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα τραίνα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186- 427 Mpa

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται ή επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα ή πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται.

Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες.



5.16



5.17



5.18

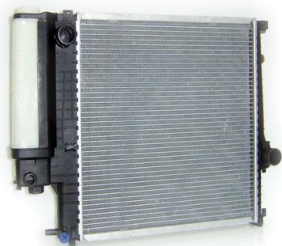
Εικ.5.16 Η εσωτερική κατασκευή των αεροσκαφών περιλαμβάνει διατομές και φύλλα των σειρών 2xxx και 7xxx (2024, 2124 και 2618). Το εξωτερικό φύλλο μπορεί να είναι Alclad 2024 ή 2618. Επένδυση με υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο (Alclad) προσδίδει προστασία σε διάβρωση στα κράματα Al-Cu τα οποία διαφορετικά θα μαυρίσουν με τον καιρό.

Εικ.5.17 Σε καρότσες φορτηγών και βυτίων χρησιμοποιούνται διατομές από κράματα σειράς 2xxx.

Εικ.5.18 Οι αποθήκες καυσίμου και οι πύραυλοι προώθησης του διαστημικού λεωφορείου είναι από κράματα 2xxx αρχικά 2219 και 2419 και τώρα τελευταία από κράμα Al-Li 2195.

3xxx Κράματα Al-Mn

- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα, παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Μέτρια αντοχή.
- Χρησιμοποιείται για αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασία και εφαρμογές στέγης και πλαϊνών τοιχωμάτων.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110-282 Mpa



5.19



5.20



5.21

Εικ.5.19 Εναλλάκτες θερμότητας αυτοκινήτων είναι από κράμα σαν το 3002.

Εικ.5.20 Κράμα 3003 σε εναλλάκτη θερμότητας εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρισμού.

Εικ.5.21 Το σώμα από τα τενεκεδάκια των αναψυκτικών είναι από κράμα 3004 ή 3104, το περισσότερο παραγόμενο κράμα στη βιομηχανία.

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα

βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς.

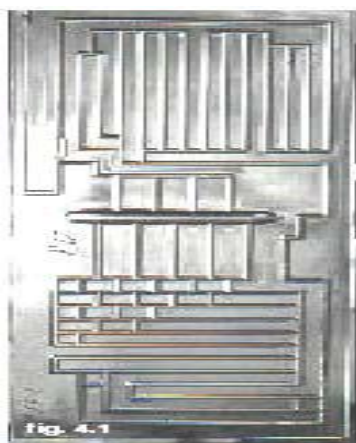
Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

4xxx Κράματα Al-Si

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Καλά χαρακτηριστικά ροής , μέτρια αντοχή.
- Πιστόνια , σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172- 380 Mpa

Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx , το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα.

Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην ψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών , στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται. Οι σειρά 4xxx και τα κράματα της που χρησιμοποιούνται ευρέως αντιπροσωπεύονται από τις παρακάτω εφαρμογές:



5.22

Εικ.5.22 Σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού με επιχαλκωμένο κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε Si.



5.23

Εικ.5.23 Κράμα 4043: Το πιο ευρέως διαδεδομένο σύρμα συγκόλλησης.

5xxx Κράματα

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση καλή συγκολλησιμότητα και καλή δυσκαμψία. Ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρυογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 5052, 5083, 5754.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172-380 Mpa

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυξηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0°K . Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270°C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα.



5.24



5.25



5.27



5.26

Εικ.5.24 Μεγάλα ταχύπλοα έχουν το κύτος επενδυμένο με κράμα 5083 όπως και το κατάστρωμα και την ανωδομή.

Εικ.5.25 Το κράμα 5083 είναι το βασικό υλικό κατασκευής των σφαιρών διαμέτρου 125 ft για την θαλάσσια μεταφορά υγρού φυσικού αερίου. Η κατασκευή είναι όλη συγκολλητή και το πάχος στην οριζόντια διάμετρο είναι 200 περίπου mm.

Εικ.5.26 Εξέδρες άντλησης πετρελαίου. Οι απαιτήσεις σε διάβρωση λόγω της υψηλής υγρασίας και έκθεσης στο νερό καλύπτονται από συγκολλητές κατασκευές με κράματα 5454, 5086 και 5083.

Εικ.5.27 Στη βιομηχανία αυτοκινήτου η ποσότητα του 5754 κράματος σε μορφή φύλλων αυξάνει συνεχώς

Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανισιακές εφαρμογές (φτερά, καπό αυτοκινήτου κ.λ.π.).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100 °C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

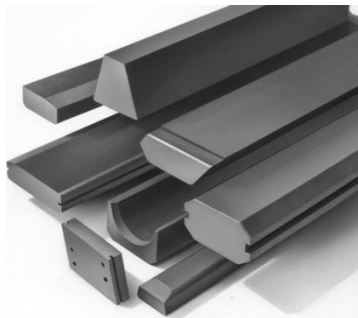
6xxx Κράματα Al-Mg-Si

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, εξαιρετική ολκιμότητα, ενδιάμεση αντοχή.
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125- 400 Mpa

Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή.

Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Foresmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της.

Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τραίνου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς: 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα 6111 για panel πλαισίων αυτοκινήτου και 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς. Οι πιο σπουδαίες εφαρμογές για κράματα Al-Mg-Si είναι:



5.27



5.28



5.29

Εικ.5.27 Η δυνατότητα των διελάσιμων κραμάτων Al-Mg-Si να μπαίνουν όπου τα χρειάζεσαι.

Εικ.5.28 Τα νέα τραίνα Mag-Lev που αναπτύσσονται στην Ευρώπη και Ιαπωνία χρησιμοποιούν τα κράματα 6061 και 6063 για τα σώματα των βαγονιών.

Εικ.5.29 Διατομές κραμάτων σειράς 6xxx κατασκευάζουν τον εσωτερικό σκελετό μοτοσυκλετών και αυτοκινήτων (η εικόνα είναι από το Audi A8).

7xxx Κράματα Al-Zn

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Πολύ μεγάλη αντοχή, τύποι εξαιρετικής ακαμψίας.
- Εφαρμογές αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005, 7075, 7475, 7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Mpa

Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας.

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια.

Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται ή αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6.

Εφαρμογές των κραμάτων σειράς 7xxx περιλαμβάνουν:



5.30

Εικ.5.30 Κατασκευές αεροσκαφών από φύλλα ή διατομές σειράς 7xxx: Τύποι 7075-T73 ή 7050 η 7475.



5.31

Εικ.5.31 Προφυλακτήρες αυτοκινήτων από 7029 ή 7129 μειώνουν το βάρος του αυτοκινήτου και βελτιώνουν την κατανάλωση του.

8xxx Κράματα Al-με άλλα στοιχεία.

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αγωγιμότητα και αντοχή, σκληρότητα.
- Ηλεκτρικές εφαρμογές και αεροδιαστημικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017,8176,8081,8280,8090.
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117-241 Mpa

Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017). Το Li στο 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

Σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως πυριτίου και χαλκού. Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια σημαντική ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε άγριο, κοφτερό και εύθραυστο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Οι μεγάλες ετερογενείς δομές δεν έχουν καλές αντοχές σε κόπωση. Καλές μεταλλουργικές και χυτευτικές τεχνικές μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα. Η επιμήκυνση και η αντοχή, ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνικές χύτευσης ακόμη δεν μπορούν να προλάβουν τα χυτευτικά σφάλματα.

2xx.x Κράματα Al-Cu

- Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) και στο «χώμα».

- Υψηλές αντοχές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- Εφαρμογές για αεροσκάφη, αυτοκίνητα και μηχανές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-450 Mpa

Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα είναι το 201.0/AlCu4Ti (Ντουραλουμίνιο) που επιδέχεται θερμική κατεργασία. Η χυτευσιμότητα του περιορίζεται λόγω της τάσης σχηματισμού μικροπορώδους και «θερμών σταγόνων» (hot tears) έτσι καλύτερα ταιριάζει στις μεθόδους επενδυμένων κελυφών. Η μεγάλη του αντοχή σε κάμψη το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στη κατασκευή αεροσκαφών.

Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα π.χ. κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200 °C.



Εικ.5.31. Φτερά προσγείωσης (landing flaps) και άλλα εξαρτήματα αεροσκαφών κατασκευάζονται από 201.0 ή A356.0 κράματα

3xx.x Κράματα Al-Si+Cu ή Mg

- Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα
- Εξαιρετική χυτευσιμότητα (εύροια), υψηλή αντοχή, μερικά δε κράματα με υψηλή αντοχή σε κάμψη.
- Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες ηλεκτρολογικά εξαρτήματα.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0.

- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει το υψηλό σε πυρίτιο ποσοστό, όπως και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες πρέπει να προστεθεί και μια ποικιλία υψηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά 3xx.x μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, από «χώμα» και χυτόπρεσσα μέχρι πολύπλοκα «κοχύλια» και με τις μεθόδους του χαμένου κεριού και του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου καθώς και τις πολύ νέες «θιξοχύτευση» και χύτευση squeeze.

Μεταξύ των περισσότερο γνωστών είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «χώμα» και «κοχύλι», 360.0, 380.0/A380.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το κράμα 332.0 είναι επίσης ένα πολύ διαδεδομένο κράμα που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά σχεδόν από ανακύκλωση.



5.32

Εικ.5.32 Πλαίσιο από υπερσυμπιεστή από 356.0.



5.33

Εικ.5.33 Το κιβώτιο ταχυτήτων επιβατηγού αυτοκινήτου σε χυτόπρεσσα από 380.0 κράμα.

4xx.x Κράματα Al-Si

- Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε «χώμα» «κοχύλι» και χυτόπρεσσα.
- Εξαιρετική χυτευσιμότητα πολύ καλή για περίπλοκα χυτά.
- Πλαίσια γραφομηχανών, εξοπλισμός οδοντιατρείου, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570°C). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση.

5xx.x Κράματα Al-Mg

Πρόκειται για κράματα Al-Mg. Το κυριότερο πλεονέκτημα τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, -στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

7xx.x Κράματα Al-Zn

Πρόκειται για κράματα Al-Zn αλλά και Al-Zn-Mg. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι'αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης λίγο επηρεάζει τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.[7],[8].

6.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

A) ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΕΛΑΤΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Η μέθοδος της σκλήρυνσης με ελάττωση του μεγέθους των κόκκων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές, όπως με ταχεία στερεοποίηση, ενδοτράχυνση και ανακρυστάλλωση. Το μέγεθος των κόκκων ή η μέση διάμετρος των κόκκων, σε πολυκρυσταλλικό μέταλλο επιδρά στις μηχανικές του ιδιότητες. Γειτονικοί, εφραπτόμενοι ο ένας του άλλου, κόκκοι έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς και, κατ'ανάγκη, κοινά περατωτικά όρια.

Κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης, η διεύθυνση της μετακίνησης του επιπέδου ολίσθησης ή της διαταραχής πραγματοποιείτε διαμέσου των κοινών αυτών περατωτικών ορίων, από τον ένα κόκκο προς τον άλλο κόκκο. Το κοινό όριο των κόκκων επενεργεί ως εμπόδιο στη μετακίνηση της διαταραχής για δύο λόγους:

- Η δυσκολία στη μετακίνηση της διαταραχής είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο εντονότερη είναι η διαφορά του προσανατολισμού των δύο γειτονικών κόκκων.
- Όσο εντονότερη είναι η αταξία δομής εντός της περιοχής των περατωτικών ορίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ασυνέχεια των επιπέδων ολίσθησης και, κατ'επέκταση, η δυσκολία μετακίνησης της διαταραχής.

Β)ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗ

Όταν τα μέταλλα υφίστανται μηχανικές καταπονήσεις (π.χ. εφελκυσμό, διάτμηση κλπ), οι διαταραχές μετακινούνται στο εσωτερικό τους. Πολλοί κρύσταλλοι έχουν διάφορα επίπεδα ολίσθησης. Οι υφιστάμενες διαταραχές στα επίπεδα αυτά, που τέμνονται μεταξύ τους, αντιδρούν και εμποδίζουν η μία τη μετακίνηση της άλλης, με συνέπεια την κατά τόπους συσσώρευσή τους, στη μάζα του υλικού. Η πυκνότητα των διαταραχών αυξάνεται με την επιβαλλόμενη παραμόρφωση μέχρι $\sim 10^{10}$ - 10^{12} διαταραχές/cm², διότι όλες οι διαταραχές δεν είναι δυνατόν να εξαφανισθούν μετακινούμενες προς την επιφάνεια ή τα περατωτικά όρια των κόκκων, ή να αλληλοαναιρεθούν λόγω του αντίθετου πρόσημού τους.

Μετά την εν ψυχρό κατεργασία τους, τα μέταλλα που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση, παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από την αρχική, υψηλότερα όρια διαρροής και θραύσης, και μικρότερη πλαστικότητα και συσθραυστότητα. Λόγω της υψηλής του σκληρότητας και της μικρής του πλαστικότητας, το ενδοτραχυμένο μέταλλο, πιθανόν, να ρωγματοωθεί.

Αποτέλεσμα της μηχανικής καταπόνησης είναι λοιπόν, η σκλήρυνση του υλικού με ενδοτράχυνση, γεγονός που, συχνά, είναι ανεπιθύμητο. Όταν, παράδειγμα, το υλικό υποβάλλεται σε διέλαση, η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση λόγω ενδοτράχυνσης είναι δυνατό να αυξηθεί τόσο, ώστε η τάση διαρροής να πάρει τιμές που να υπαγορεύουν την ανάγκη ενδιάμεσης ανόπτησης.

Η θεωρητική ανάλυση του φαινομένου της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση είναι δύσκολη. Η συνεισφορά της ενδοτράχυνσης στη συνολική αντίσταση, λόγω της παρεμπόδισης της κίνησης των διαταραχών, είναι σημαντική και αυξάνεται με την παραμόρφωση.

Κατά την ενδοτράχυνση του μετάλλου, π.χ. με έλαση, οι κόκκοι του υλικού παραμορφώνονται, επιμηκυνόμενοι κατά τη διεύθυνση της έλασης. Οι κόκκοι που έχουν επιμηκυνθεί κατά κοινή διεύθυνση σχηματίζουν ιστό. Μακροσκοπικά, το υλικό είναι ανισότροπο και παρουσιάζει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες κατά την διεύθυνση κάθετη ή παράλληλη προς την κοινή διεύθυνση του ιστού. Ωστόσο, κάθε κόκκος διατηρεί συνεχή κρυσταλλική δομή, ενώ η παραμόρφωσή του ολίσθησης ολόκληρων πλεγματικών επιπέδων. Έτσι, ενώ τα όρια των κόκκων παραμορφώνονται, ο κόκκος διατηρεί τον όγκο του.

Σε μικροσκοπική κλίμακα, στους παραμορφωμένους κόκκους παραμένει αποθηκευμένη ενέργεια, η οποία εκδηλώνεται με την εμφάνιση εσωτερικών μηχανικών τάσεων. Κατά την ενδοτράχυνση, η παραμόρφωση του υλικού δεν είναι ομοιογενής, δηλαδή, η τιμή της ειδικής παραμόρφωσης δεν είναι ίδια σε όλα τα τμήματα ή τους κόκκους του μετάλλου. Έτσι, μετά την εν ψυχρό παραμόρφωση, τα διάφορα τμήματα του μετάλλου τείνουν να επανέλθουν μερικώς στο αρχικό τους σχήμα, αλλά κατά διαφορετικά ποσοστά. Αναπτύσσονται, έτσι μεταξύ τους εσωτερικές μηχανικές τάσεις.

Μπορούμε, λοιπόν, να ορίσουμε την ενδοτράχυνση ως εν ψυχρό, πλαστική παραμόρφωση του υλικού, που οφείλεται στην ανάπτυξη εσωτερικών μηχανικών

τάσεων, οφειλόμενων στη δημιουργία ιστού, από ανομοιογενώς παραμορφωμένους κόκκους.

Ο βαθμός της εν ψυχρό πλαστικής παραμόρφωσης εκφράζεται ως % ποσοστό της ψυχρής κατεργασίας. Στην Ευρώπη, χρησιμοποιείται ο όρος βαθμός ενδοτράχυνσης (e), και στις Η.Π.Α., ο όρος συντελεστής ελάττωσης της διατομής (n), οι οποίοι ορίζονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$A) \quad e = \frac{A_o - A_d}{A_d} \times 100 \qquad B) \quad n = \frac{A_o - A_d}{A_d} \times 100$$

Όπου

A_o , η διατομή του υλικού πριν την παραμόρφωση και

A_d , η διατομή του υλικού μετά την παραμόρφωση.

Ο βαθμός ενδοτράχυνσης (e) μεταβάλλεται από το μηδέν έως το άπειρο και προφανώς μεταξύ των e και n, ισχύει η σχέση:

$$e = \frac{n}{1-n}$$

Γ)ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΕΡΕΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

Γενικά, η σκλήρυνση με δημιουργία στερεού διαλύματος είναι δυνατό να έχει πολλές αιτίες, όλες όμως συνδέονται με την παρεμπόδιση της μετακίνησης των διαταραχών, δηλαδή με κάποια δύναμη τροχοπέδης που θα πρέπει να υπερνικηθεί από κάποια αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης, υποβοηθούμενης, ενδεχόμενα, από θερμική ενέργεια. Αυτή η δύναμη τροχοπέδης προέρχεται από την αντίδραση μεταξύ διαταραχών κα ξένων στοιχείων προσθήκης του διαλύματος σε θέσεις ένθετης τοποθέτησης ή των στοιχείων αντικατάστασης. Τα υπερκαθαρά μέταλλα είναι, σχεδόν πάντοτε, μαλακότερα και λιγότερο στιβαρά από τα αντίστοιχα κράματά τους.

Τα άτομα κραμάτωσης ή ακαθαρσιών εισβάλλουν στο μητρικό κρυσταλλικό πλέγμα, δημιουργώντας στερεό διάλυμα προσθήκης ή αντικατάστασης και αποτέλεσμα αυτής της εισβολής είναι η πρόκληση ενός πεδίου παραμορφώσεων του πλέγματος, το οποίο παρεμποδίζει τη μετακίνηση των διαταραχών.

Ένα άτομο προσθήκης ή ακαθαρσίας, μικρότερου μεγέθους από το άτομο του μητρικού πλέγματος το οποίο αντικαθιστά, ασκεί εφελκυστικές τάσεις στα γειτονικά άτομα του πλέγματος.

Τα εισβάλλοντα άτομα τοποθετούνται γύρω από τις διαταραχές, με τέτοιο τρόπο ώστε να προκληθεί μείωση της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης, δηλαδή να εξουδετερωθεί μέρος της ενέργειας παραμόρφωσης του πλέγματος που περιβάλλει μια διαταραχή. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, ένα άτομο ακαθαρσίας μικρότερου μεγέθους από εκείνο ενός ατόμου του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος, τοποθετείτε

σε σημείο για το οποίο, η εφελκυστική παραμόρφωση του πλέγματος εξουδετερώνει μερικώς τη θλιπτική του, λόγω της διαταραχής, παραμόρφωση. Για την διαταραχή ακμής, αυτό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση αυτού του ατόμου διπλα στη γραμμή της διαταραχής και πάνω από το επίπεδο ολίσθησης.

Η αντίσταση σε ολίσθηση είναι μεγαλύτερη, όταν υπάρχουν ξένα άτομα εντός του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος, επειδή η συνολική παραμόρφωση του πλέγματος αυξάνεται. Έτσι, στα κράματα στερεού διαλύματος, εν αντιθέσει προς τα καθαρά μέταλλα, γίνεται απαραίτητη η επιβολή μια μεγαλύτερης τάσης, προκειμένου να αρχίσει και να συνεχισθεί η πλαστική παραμόρφωση. Οι διαταραχές αγκυρώνονται από τα ξένα άτομα ένθετης τοποθέτησης και η μετακίνησή τους καθίσταται εξαιρετικά δυσχερής. Το διάγραμμα εφελκυσμού στην περίπτωση αυτή εμφανίζει διπλό όριο διαρροής: ένα ανώτερο και ένα κατώτερο. Το ανώτερο όριο αντιστοιχεί στη τάση που απαιτείται για την δημιουργία νέων διαταραχών στα όρια των κόκκων, ενώ οι υπάρχουσες διαταραχές αγκυρώνονται στα άτομα του άνθρακα. Το κατώτερο όριο αντιστοιχεί στην τάση που απαιτείται για τη μετακίνηση των νέων διαταραχών.

Η θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού σκλήρυνσης με τη δημιουργία στερεού διαλύματος είναι πολύπλοκη. Ωστόσο, η τιμή του ορίου διαρροής σε διάτμηση (τ_y) έχει αποδειχθεί ότι είναι ανάλογη της ποσότητας $\varepsilon_s^{3/2}C^{1/2}$:

$$\tau_y \propto \varepsilon_s^{3/2} C^{1/2}$$

Όπου

C η συγκέντρωση του ξένου στοιχείου προσθήκης και
 ε_s ένας όρος που εξαρτάται από την αρμονική συνύπαρξη, διαλύτη και διαλυόμενου στοιχείου.

Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, οι διαταραχές έχουν την τάση να καμπυλώνονται εντός των πεδίων τάσεων, η ανάπτυξη των οποίων οφείλεται στα άτομα της προσθήκης. Οι διαταραχές επηρεάζονται από τη μέση καταπόνηση του μητρικού, που έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση διατμητικής τάσης διαρροής, ανεξάρτητης της θερμοκρασίας, η τιμή της οποίας δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_y \approx \frac{1}{4} (G\eta N)^{4/3}$$

Όπου

G το μέτρο της διάτμησης,
 η ο παράγοντας που αντικατοπτρίζει το αποτέλεσμα της διαφοράς μεγέθους των ατόμων διαλύτη και διαλυόμενου στοιχείου, δηλαδή την επίδραση του μεγέθους των ξένων ατόμων και N η ατομική συγκέντρωση του στοιχείου προσθήκης.

Επίδραση της σκλήρυνσης με δημιουργία στερεού διαλύματος, στις ιδιότητες των καθαρών μετάλλων και κραμάτων

- Το όριο διαρροής, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και η σκληρότητα του κράματος είναι μεγαλύτερες από εκείνες του καθαρού μετάλλου.
- Σχεδόν πάντα η ολκιμότητα το κράματος είναι μικρότερη εκείνης του καθαρού μετάλλου, εκτός από σπάνιες περιπτώσεις.
- Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του κράματος είναι πολύ μικρότερη εκείνης του καθαρού μετάλλου. Συνεπώς, δε συνιστάτε η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω καλωδίων από κράματα αλουμινίου.
- Η αντίσταση σε ερπυσμό βελτιώνεται με προσθήκη διαλυόμενου στοιχείου και ενισχύεται η αντοχή του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά, οι υψηλές θερμοκρασίες δεν προκαλούν καταστρεπτικές αλλαγές στις ιδιότητες κραμάτων που έχουν υποστεί σκλήρυνση με δημιουργία στέρεου διαλύματος.

Δ)ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ ΛΟΓΟ ΓΥΡΑΝΣΗΣ

Η αντοχή και η σκληρότητα ορισμένων κραμάτων μπορεί να ενισχυθεί με το σχηματισμό εξαιρετικά μικρός και ομοιόμορφα διασκορπισμένων σωματιδίων μιας άλλης φάσης, εντός του αρχικού μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σκλήρυνση με κατακρήμνιση και τα μικρά σωματίδια της νέας φάσης καλούνται κατακρημνίσματα. Ο όρος σκλήρυνση με γήρανση χρησιμοποιείται προκειμένου ναδειχθεί ότι στην εν λόγω διαδικασία, η ενίσχυση εξελίσσεται χρονικά, καθώς το κράμα γερνά. Τα σπουδαιότερα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι τα κράματα αλουμινίου-χαλκού, αλουμινίου-μαγνησίου-πιριτίου και αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου.[9]

6.8 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

A) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΤΗΤΑ

Το αλουμίνιο είναι μέταλλο με μεγάλη πλαστικότητα, υψηλή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (35MS/m) και θερμική (0,209KW/m.C⁰), μεγάλη θερμική διαστολή και σημαντική συστολή σε όγκο (7%). Η πυκνότητα του αλουμινίου είναι 2,7 g/cm², ενώ η θερμοκρασία τήξης 658C⁰.

Οι φυσικές ιδιότητες πολύ μεγάλης κατηγορίας των κραμάτων αλουμινίου είναι διαφοροποιημένες. Παρά ταύτα, σε γενική όψη πλησιάζουν πολύ στις ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου.

Το αλουμίνιο και τα κράματα του προμηθεύονται για την πλαστική κατεργασία και ως χυτά. Οι κατηγορίες αυτών των δύο περιπτώσεων είναι πολλές και οι μηχανικές ιδιότητες τους εξαρτώνται από:

- Τη χημική σύσταση
- Το βαθμό σκλήρυνσής τους με πλαστική κατεργασία
- Τη θερμική κατεργασία.

ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΤΗΤΑ

Η συγκολλητότητα του αλουμινίου καθορίζεται από πολλές φυσικές και χημικές ιδιότητες του. Μεγάλη σημασία για τη διαδικασία συγκόλλησης έχουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

- Ο μεγάλος χημικός δεσμός του αλουμινίου με το οξυγόνο, κατά την επαφή του αλουμινίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα αμέσως επικαλύπτεται με το στρώμα του οξειδίου του αλουμινίου (Al₂O₃), με πυκνότητα 3,9/cm³, που δύσκολα τήκεται (2040⁰C), δεν είναι αναγωγικό και δύσκολα διαλύεται. Άρα, στη θερμοκρασία τήξης του Al (658⁰C), το Al₂O₃ παραμένει σε στερεή κατάσταση, αποκλείοντας τη δυνατότητα συγκόλλησης με τη φλόγα ασετυλίνης-οξυγόνου.
- Η ευπάθεια για το πορώδες αερίου, η μεγάλη ικανότητα του λιωμένου αλουμινίου για τη διάλυση του υδρογόνου πέφτει απότομα με την πτώση της θερμοκρασίας, που αποτελεί ουσιώδες πρόβλημα για τις μεθόδους συγκόλλησης με μεγάλη εστίαση της θερμότητας (η πηγή του υδρογόνου που δημιουργεί το πορώδες είναι: η υγρασία από την ατμόσφαιρα και τα συγκολλημένα υλικά οι λιπαρές ακαθαρσίες, τα εγκλωβισμένα αέρια κατά τη διαδικασία παρασκευής του αλουμινίου κ.α.)

- Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, δυσχεραίνει την τοπική ρευστοποίηση του μετάλλου.
- Ο υψηλός συντελεστής θερμικής γραμμικής διαστολής και η μεγάλη συστολή σε όγκο, κύριο αίτιο ανάπτυξης κατά τη διαδικασία συγκόλλησης σημαντικών τάσεων, παραμορφώσεων των συγκολλητών εξαρτημάτων και ρηγματώσεων των κολλήσεων.
- Οι πολύ χαμηλές ιδιότητες αντοχής του αλουμινίου σε θερμοκρασία άνω των 500°C.
- Η έλλειψη εναλλαγής χρωμάτων κατά την θέρμανση του αλουμινίου, δυσχέρεια καθορισμού του βαθμού θέρμανσης του μετάλλου και του σημείου τήξης.

Η συγκολλητότητα των κραμάτων αλουμινίου, εκτός από τις παραπάνω αναφερθείσες ιδιότητες, καθορίζεται και από τους εξής καθοριστικούς παράγοντες: τη χημική σύσταση του μητρικού υλικού και του πρόσθετου καθώς και από τις μεθόδους συγκόλλησης. Παραδεκτά ως συγκολλούμενες κατηγορίες αλουμινίου και των κραμάτων του δίνονται στην εικόνα 5.34.

Τα κράματα τύπου Al-Mg-Si υπάγονται στα κράματα που σκληρύνονται με τη θερμική κατεργασία υπερκορεσμού και γήρανσης. Οι συγκολλητές συνδέσεις εκτελούμενες σε αυτά τα υλικά παρουσιάζουν τάση για ρηγματώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ή αμέσως μετά το τέλος της συγκόλλησης και, ακόμη, κατά τη συναρμολόγηση ή κατά τη λειτουργία της κατασκευής.

Στην ανάπτυξη των ρηγματώσεων, ανεξάρτητα από τη μεταλλουργική και τεχνολογική συγκολλητότητα, μεγάλη επίδραση ασκεί η εκτελεστική συγκολλητότητα. Κατά κανόνα, στις δικτυωτές και πλαισίου κατασκευές συγκροτημάτων μεγάλης δυσκαμψίας και ισχυρής συγκέντρωσης τάσεων, όπως και στις δυναμικές και εναλλασσόμενες φορτίσεις, δύσκολα αποφεύγονται οι ρηγματώσεις. Για κρίσιμες καταστάσεις, μπορεί, μερικές φορές, να φανεί χρήσιμο το εναποτιθέμενο υλικό τύπου AlSi5, με μεγάλη ανθεκτικότητα σε θραύση. Για δεδομένο, όμως, κατασκευαστικό συγκρότημα, για την ανθεκτικότητα σε θραύση αποφασίζει, καταρχήν, η σωστή επιλογή του κράματος Al και η ορθολογική λύση των συγκολλούμενων κόμβων.

Τύπος υλικού	Συμβολισμός	Καθορισμός συγκολλητότητας	Μέθοδος συγκόλλησης
Αλουμίνιο διύλισης Και μεταλλουργικό	Al 99,90 Al 99,95	Συγκολλούμενα	GMA (MIG) EH ¹
	Al 99,8 Al 99,7 Al 99,5 Al 99,0	Εύκολα συγκολλούμενα	GTA (TIG) GMA (MIG) EH ¹
Κράματα αλουμινίου τύπου Al-Mn	Al Mn2	Καλώς συγκολλούμενα	GTA (TIG) GMA (MIG)
Κράματα αλουμινίου τύπου Al-Mg	Al Mg1	Συγκολλούμενο	GTA (TIG) GMA (MIG)
	Al Mg2	Συγκολλούμενο	GTA (TIG) GMA (MIG)
	Al Mg3 Al Mg4 Mn Al Mg5	Συγκολλούμενα	GTA (TIG) GMA (MIG)
Κράματα αλουμινίου τύπου Al-Zn-Mg	Al Zn5 Mg1	Συγκολλούμενο	GTA (TIG) GMA (MIG)
Κράματα αλουμινίου τύπου Al-Mg-Si	Al Mg Si AlMg1Si1Mn AlMgSiCu	Περιορισμένη Συγκολλητικότητα	GTA (TIG) GMA (MIG)
Χυτευτικά κράματα αλουμινίου τύπου Al-Mn	Al Si7 Mg Al Si9 Mg Al Si11	Εύκολα συγκολλούμενα	GTA (TIG) GMA (MIG) EH ¹
	AlSi13Mg1CuNi Al Si21 Cu Ni	Συγκολλούμενα	GTA (TIG) GMA (MIG)
1) Επενδυμένα ηλεκτρόδια			

Εικόνα 5.34: Συγκολλούμενες κατηγορίες αλουμινίου και κραμάτων του.

Β)ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Παρά τις πολλές αναφερθείσες δυσκολίες συγκόλλησης του αλουμινίου, το μέταλλο αυτό σήμερα θεωρείται εύκολα συγκολλούμενο. Επιρροή πάνω του έχει η γενική πρόοδος των συγκολλήσεων, ενώ, ιδιαίτερα, η επεξεργασία, καταρχήν, των συλλιπασμάτων για την οξυγονοκόλληση και των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση τόξου, και στη συνέχεια, οι μέθοδοι συγκόλλησης στην ατμόσφαιρα του αργού με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο (TIG) και με τηκόμενο ηλεκτρόδιο (MIG). Αναμφίβολα είναι τα πλεονεκτήματα των μεθόδων TIG και MIG (σήμερα ονομαζόμενες αντίστοιχα GTA και GMA). Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες τώρα που η βιομηχανία πρακτικά περιόρισε τη χρησιμοποίηση των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, παρά την οποία τεχνική και οικονομική ανταγωνιστικότητα.

Κάθε μέθοδος συγκόλλησης του αλουμινίου παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνικά και οικονομικά, τα οποία η βιομηχανική πρακτική τα εκμεταλλεύεται καταλλήλως. Με τη σύνθετη έννοια της συγκόλλησης:

- Η οξυγονοκόλληση ακόμη και του καθαρού αλουμινίου και ιδιαίτερα των κραμάτων αλουμινίου αποτελεί παρελθόν, για τους εξής λόγους:
 - 1) Ανάγκη χρησιμοποίησης συλπιπασμάτων, τα οποία στην περίπτωση παραμονής τους, ακόμη και ως ίχνη, αποτελούν σημαντικό κίνδυνο διάβρωσης.
 - 2) Θραύση των κολλήσεων κατά τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και καθαρού αλουμινίου, στην περίπτωση πολλαπλών στρώσεων.
 - 3) Μεγάλος περιορισμός συγκόλλησης με εναποτιθέμενο υλικό διαφορετικής χημικής σύστασης και θερμοκρασία τήξης από το μητρικό υλικό (αναγκαία κατά τη συγκόλληση υλικών δύσκολα συγκολλούμενων)
 - 4) Δυσκολίες συγκόλλησης διαφόρων τύπων αυχενικών συνδέσεων, εξαιτίας της πολυπλοκότητας της κατασκευής (π.χ. οι εσωτερικές συγκολλήσεις σε διάφορα δοχεία).
- Το ανθρακούχο ηλεκτρόδιο ποτέ δεν ήταν μέθοδος αξιόλογη, εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας των συνδέσεων, και σήμερα έχει μόνο ιστορική σημασία.
- Το επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο έχει περιορισμένη εφαρμογή στις τεχνολογικές κατασκευές.
- Το ημικαλυμμένο τόξο (ημιβυθιζόμενο τόξο) που επεξεργάστηκε στην πρώην ΕΣΣΔ και βρήκε μόνο εκεί εφαρμογή, η μέθοδος αυτή εξασφάλισε μεγάλη απόδοση, αλλά παρουσίαζε ευπάθεια στην υγρασία (υδροσκοπικό συλλίπασμα).
- Το μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα του αργού είναι σήμερα η πλέον διαδεδομένη μέθοδος συγκόλλησης του αλουμινίου.
- Το τηκόμενο σύρμα ηλεκτροδίου στην ατμόσφαιρα του αργού έχει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή και μαζί με τη μέθοδο GTA επικρατεί στη βιομηχανική πρακτική.
- Το πλάσμα δεν μπορεί να είναι ανταγωνιστικό των μεθόδων, όπως της GTA και GMA. Επειδή είναι περίπου 1,1-1,6 φορές ακριβότερο, απαιτεί πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας μεγάλη ακρίβεια προετοιμασίας των άκρων των εξαρτημάτων κ.α.
- Η δέσμη ηλεκτρονίων ακόμη σπάνια χρησιμοποιείται, έχει, όμως, προοπτική ανάπτυξης στην παραγωγή μεγάλων σειρών και στις εξειδικευμένες κατασκευές.
- Η δέσμη laser αυξάνει αλματωδώς την εφαρμογή στις τεχνολογικές κατασκευές.

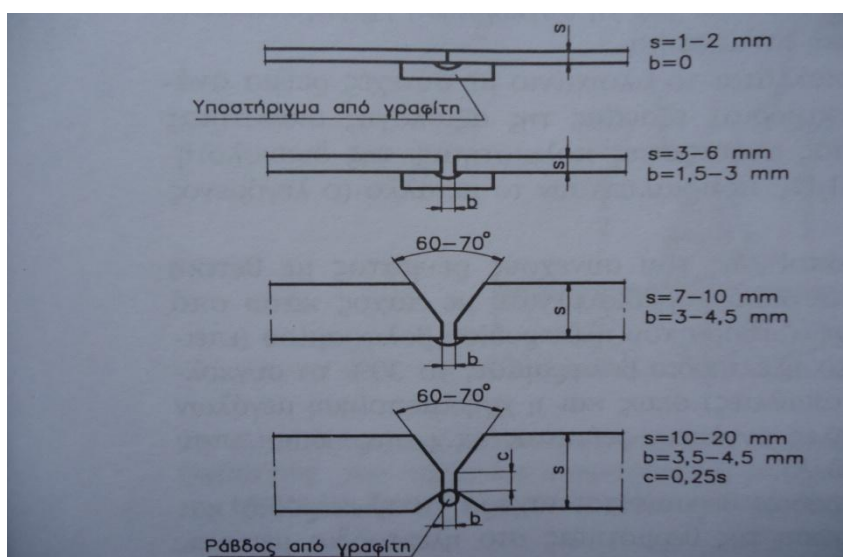
Βάση των αναφερθέντων και των τρεχουσών αναγκών της βιομηχανίας, πιο αναλυτική περιγραφή χρειάζεται μόνο η συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο όπως και οι μέθοδοι GTA και GMA.

Γ) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΕΠΕΝΔΕΔΥΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ

Η συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, όπως συζητήθηκε, έχει περιορισμένη εφαρμογή, επειδή οι μέθοδοι GTA και GMAτην εκτοπίζουν συστηματικά, λόγω περισσότερων πλεονεκτημάτων τους.

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία της διαδικασίας και η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης. Οι ιδιότητες αντοχής σωστά εκτελούμενων συνδέσεων είναι, επίσης, ικανοποιητικές, αποκτούν R_m δεδομένης κατηγορίας αλουμινίου σε κατάσταση ανακρυστάλλωσης, με γωνία κάμψης πάντα ίση με 180° .

Μειονέκτημα των εκτελούμενων συνδέσεων με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια αποτελεί το μικρό και, μερικές φορές, το μακροπορόδες των κολλήσεων, εμφανιζόμενο στη μεταβατική ζώνη αλλά και κάτω από το μέτωπο της κόλλησης. Η υψηλή θερμοκρασία του τόξου προξενεί την υπερθέρμανση εξίσου του εναποτιθέμενου και του μητρικού υλικού, με τη σύγχρονη ατμοποίηση στοιχείων της επένδυσης. Η υπερθέρμανση αυτή επιδρά στην αύξηση της απορροφητικότητας των αερίων από το ρευστό μέταλλο. Οι μικροπόροι δεν ελαττώνουν τις ιδιότητες αντοχής της σύνδεσης, χειροτερεύουν, όμως, την ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Η σφυρηλάτηση των κολλήσεων κάπως ομαλοποιεί την πτώση της ανθεκτικότητας στη διάβρωση αλλά δεν την αποκλείει ολικά.



Εικόνα 5.35: Τρόποι προετοιμασίας των άκρων των ελασμάτων αλουμινίου για τη συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.

Ακόμη πιο επικίνδυνο είναι όσον αφορά τους μακροπόρους, οι οποίοι μπορούν να εμφανισθούν στην κόλληση, όταν η επένδυση των ηλεκτροδίων είναι υγρή ή όταν τα παχιά ελάσματα συγκολλούνται χωρίς αρχική προθέρμανση (ή πολύ σύντομη ψύξη της κόλλησης – το υδρογόνο δεν προλαβαίνει να εξέλθει).

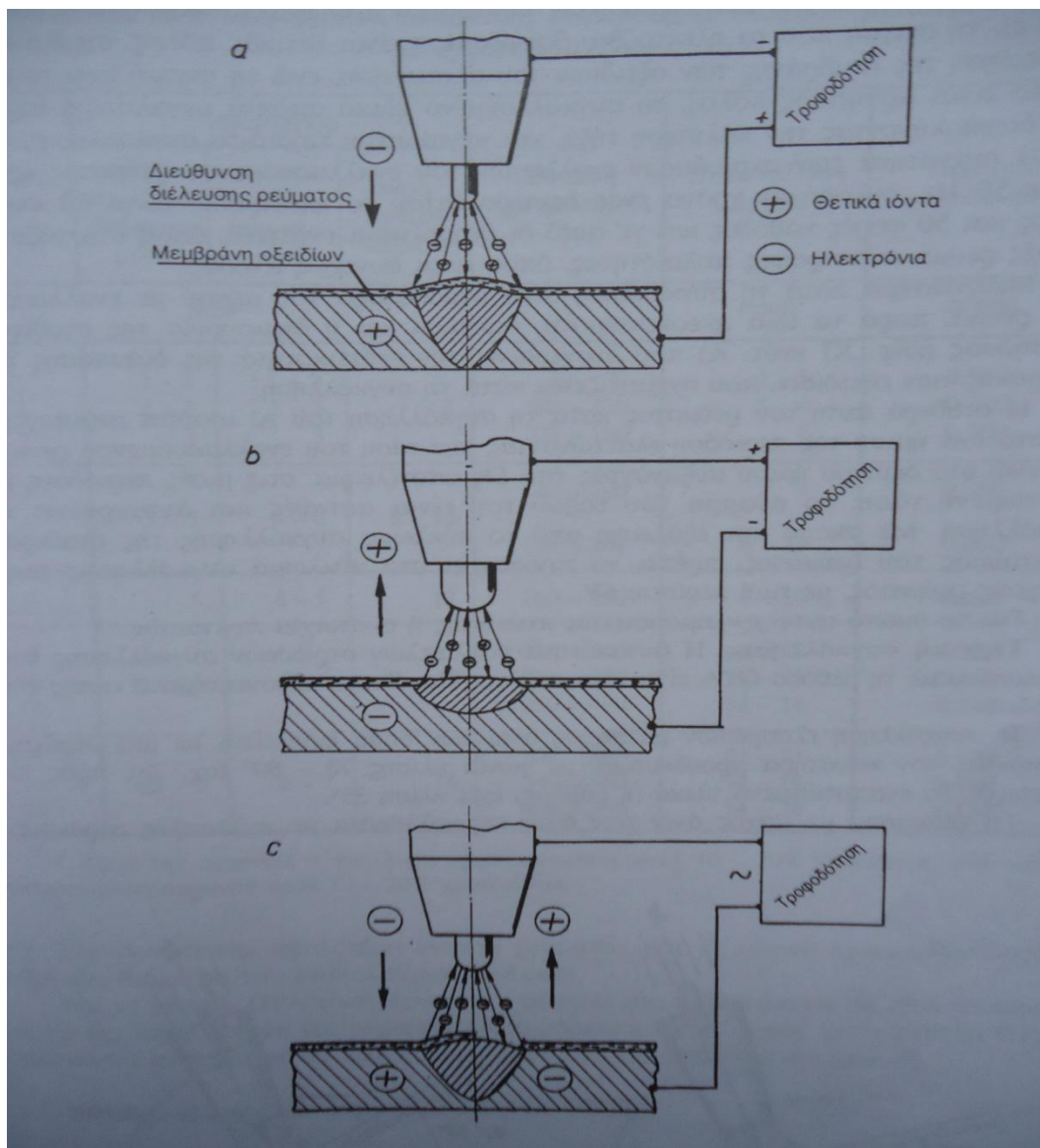
Η συγκόλληση διενεργείται αποκλειστικά με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα, με τη χρήση πηγής ρεύματος φθίνουσας στατικής χαρακτηριστικής. Τα άκρα των ελασμάτων, ανάλογα με το πάχος, προετοιμάζονται κατά τρόπο που φαίνεται στην εικόνα 5.35. Ωφελιμότερο είναι η συγκόλληση να διενεργείται με υποστήριγμα γραφίτη. Τα ελάσματα άνω των 5mm πρέπει πριν την συγκόλληση να προθερμαίνονται στη θερμοκρασία των 200-250°C.

Δ) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ (TIG)

Η συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του γίνεται με τη μέθοδο GTA, η οποία είναι σήμερα η τελειότερη μέθοδος, που επιτρέπει, καταρχήν, την ολική εξάλειψη των συλλιπασμάτων, τα οποία επιδρούν διαβρωτικά στη συγκολλητή σύνδεση.

Για αυτό το είδος της συγκόλλησης χρησιμοποιείται συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα με θετική πολικότητα. Ιδιαίτερα ωφέλιμο θα ήταν να συγκολλάται το αλουμίνιο με συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας (συν (+) στο ηλεκτρόδιο), εξαιτίας της αξιόλογης ικανότητας διάσπασης με το τόξο συνεχούς ρεύματος ανάστροφης πολικότητας, της δυσκολοτηκόμενης μεμβράνης των οξειδίων του Al_2O_3 , που καλύπτουν το μέταλλο (ο λεγόμενος καθοδικός καθαρισμός) (εικ.5.36b).

Η πρακτική δυνατότητα χρησιμοποίησης του συνεχούς ρεύματος με θετική πολικότητα αφορά αποκλειστικά στη συγκόλληση αλουμινίου με πάχος κάτω από 1mm. Η κύρια αιτία είναι η αρκετά ταχεία φθορά του ηλεκτροδίου βολφραμίου (επειδή το 50% της θερμότητας το δέχεται το ηλεκτρόδιο βολφραμίου, το 30% το συγκολλούμενο αντικείμενο και το 20% είναι απώλειες) όπως και η χρησιμοποίηση μεγάλων διαμέτρων των ηλεκτροδίων, με χαμηλές εντάσεις ρεύματος (π.χ. περ. 6mm, που αντιστοιχεί σε ρεύμα με ένταση περ. 130A). Κατά τη σύνδεση “+” στο ηλεκτρόδιο, θερμαίνεται ισχυρά το ηλεκτρόδιο και συνήθως καίγεται. Η μεγάλη συγκέντρωση της θερμότητας στο ηλεκτρόδιο μειώνει, επίσης, την ελαστικότητα και τη σταθερότητα του τόξου. Κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα και με ανάστροφη πολικότητα, το συγκολλούμενο υλικό διατηρεί μόλις το 30% της ελκυσόμενης θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης, το σχηματισμό επίπεδης κόλλησης, πλατιάς και με μικρό βάθος διείσδυσης. Παρόμοιες ιδιότητες κονιοποίησης της μεμβράνης Al_2O_3 έχει, επίσης και το εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο εμφανίζεται ωφελιμότερο (μικρότερη θέρμανση του ηλεκτροδίου βολφραμίου) και χρησιμοποιείται σήμερα για τη συγκόλληση του αλουμινίου, με τη μέθοδο GTA.



Εικόνα 5.36: Επίδραση της πολικότητας συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου στην κατανομή της θερμότητας του τόξου και η αφαίρεση της μεμβράνης των οξειδίων: α) συνεχές ρεύμα κανονικής πολικότητας, β) συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας, γ) εναλλασσόμενο ρεύμα.

Με το αποτέλεσμα των περιοδικών μεταβολών του εναλλασσόμενου ρεύματος (εικόνα 5.36c) τη στιγμή που το ηλεκτρόδιο βολφραμίου είναι θετικός πόλος, συμβαίνει η κονιοποίηση της μεμβράνης των οξειδίων του αλουμινίου, ενώ τη στιγμή που το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικός πόλος, το συγκολλούμενο υλικό αποκτά μεγαλύτερη θερμότητα, διευκολύνοντας την καλύτερη τήξη, και μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης.

Η συχνότητα των περιοδικών εναλλαγών του εναλλασσόμενου ρεύματος ισούται με 50 Hz, δηλαδή σε χρόνο ενός δευτερολέπτου το ηλεκτρόδιο είναι 50 φορές άνοδος και 50 φορές κάθοδος και γι' αυτό δε θερμαίνεται εντατικά, όπως στο τόξο με συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας, όπου είναι συνεχώς άνοδος.

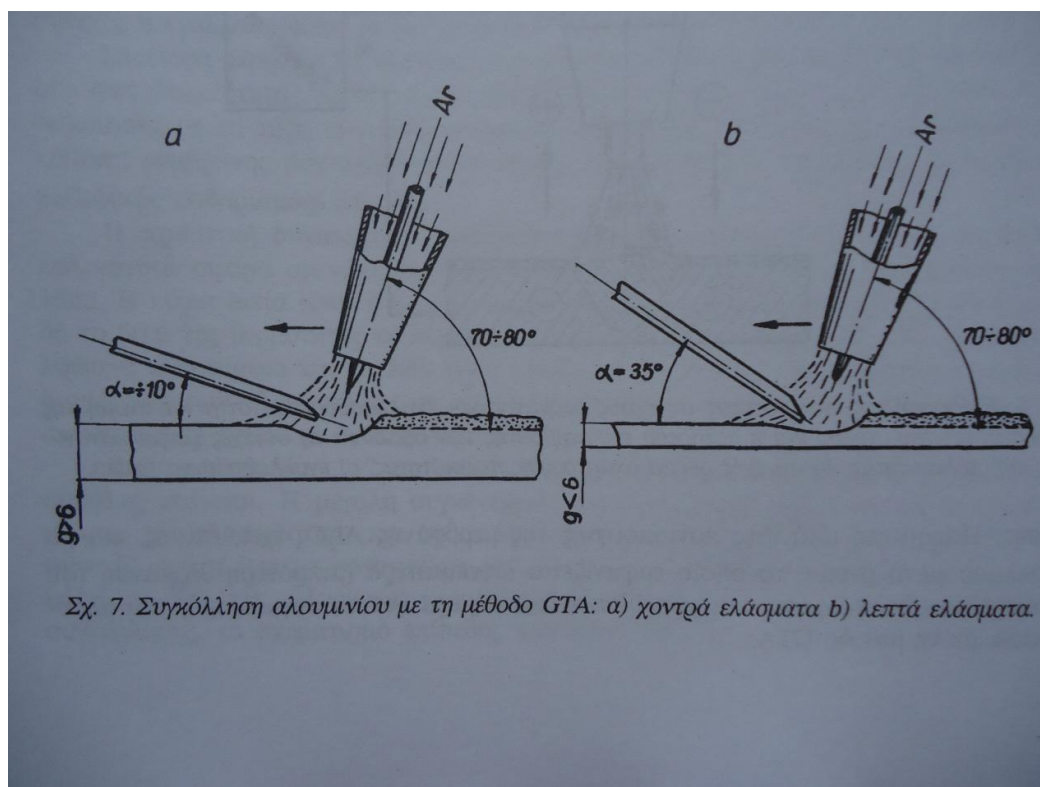
Μειονέκτημα κατά τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα του αργού με εναλλασσόμενο ρεύμα, παράτα ίδια πλεονεκτήματα, αποτελεί και η δημιουργία

της σταθεράς συνιστώσας που δυσχεραίνει την εντατικότητα της διάσπασης της μεμβράνης των οξειδίων, που σχηματίζεται κατά τη συγκόλληση.

Η σταθερά αυτή του ρεύματος κατά τη συγκόλληση του αλουμινίου ισούται περίπου με 6V, στο ένα ήμισυ της περιόδου ελαττώνοντας την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ στο δεύτερο ήμισυ αυξάνοντάς την. Ως αποτέλεσμα, στις μισές περιόδους με ελαττωμένη τάση, το άναμμα του τόξου του είναι ασταθές και δυσχεραίνει τη συγκόλληση. Με σκοπό την αξάλειψη από το κύκλωμα συγκόλλησης της σταθεράς συνιστώσας του ρεύματος, πρέπει να προσαχθεί στο κύκλωμα συγκόλλησης τάση συνεχούς ρεύματος, με τιμή περίπου 6V. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται πυκνωτής ή συστοιχία πυκνωτών.

Τεχνική συγκόλλησης. Η δυνατότητα πολλαπλών στρώσεων συγκόλλησης του αλουμινίου με τη μέθοδο GTA είναι ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου.

Η συγκόλληση ελασμάτων με πάχος άνω των 6mm εκτελείται με μία στρώση, οδηγώντας τον καυστήρα προοδευτικά, με γωνία κλίσης $70-80^\circ$ (εικόνα 5.37), προς τα αριστερά. Το εναποτιθέμενο υλικό έχει κλίση 35° . Τα ελάσματα με πάχος άνω των 6mm συγκολλώνονται με πολλαπλές στρώσεις, (εικόνα 5.37).



Σχ. 7. Συγκόλληση αλουμινίου με τη μέθοδο GTA: α) χοντρά ελάσματα β) λεπτά ελάσματα.

Εικόνα 5.37: Συγκόλληση αλουμινίου με τη μέθοδο GTA α) χοντρά ελάσματα β) λεπτά ελάσματα.

Με τη μέθοδο GTA είναι δυνατόν η συγκόλληση να εκτελείται σε εξαναγκασμένες θέσεις, όπως τοίχου και ουρανού. Οι παράμετροι συγκόλλησης με τη μέθοδο GTA επιλέγονται ανάλογα με το πάχος των συγκολλούμενων ελασμάτων (εικόνα 5.38).

Πάχος Υλικού	Διάμετρος			Ένταση ρεύματος	Κατανάλωση αργού	Ταχύτητα συγκόλλησης
	ηλε- κτροδίου βολφρα- μίου	εναπο- τιθέμε- νου υλι-κού	ακρο- φυσίου αερίου			
mm				A	l/min	m/min
1	1-2	1,5-2	8	30-70	4-5	0,380
2	2-3	2-3		80-120	5-6	0,320
3	3	3		100-150	6	0,300
4	3-5	3-4	8-16	120-200	8	0,280
5				130-200	8-10	0,280
6	5	4-5	12	160-250	8-10	0,250
8	5-6,5	4-6	12-16	220-340	10-12	0,200
10				220-360	10-12	0,150
12				250-400	12-14	0,120
15	6,5-8	6-7	16	300-450	12-14	0,120
20				340-500	14-16	0,120
25				400-500	14-16	0,120

Εικόνα 5.38: Παράμετροι μεταοπικής συγκόλλησης ελαφρών μετάλλων με τη μέθοδο GTA.

Ε) ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ GMA (MIG)

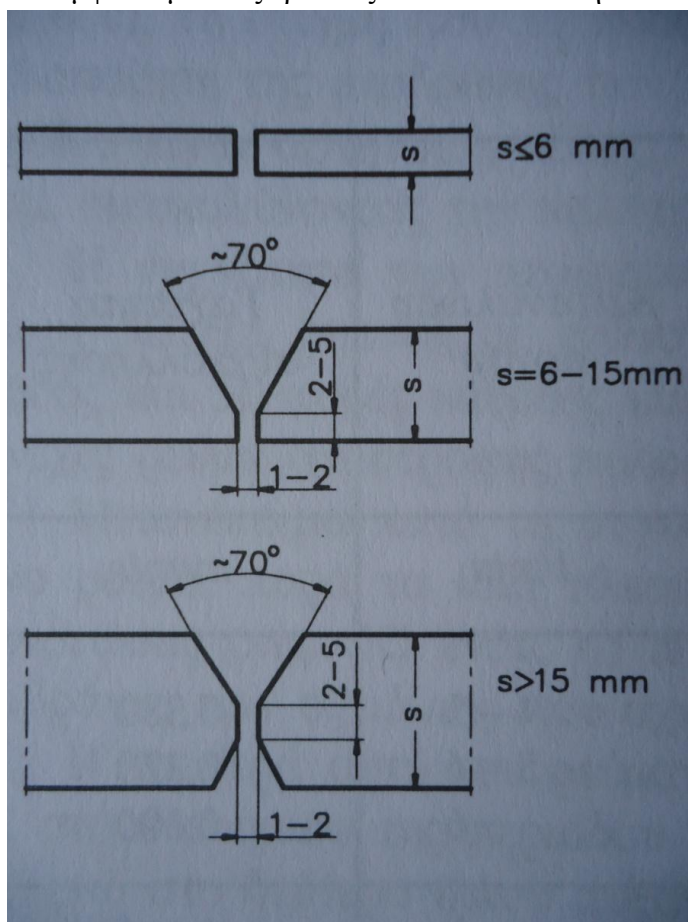
Το τόξο του συνεχούς ρεύματος, αναμμένο στην ατμόσφαιρα του αργού, χαρακτηρίζεται από την ιδιαίτερη ικανότητα διάσπασης της μεμβράνης των οξειδίων του αλουμινίου. Το φαινόμενο αυτό αποτέλεσε της ιδεώδη υπόθεση για τη συγκόλληση με τη μέθοδο GMA. Στη θέση του με τηκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου χρησιμοποιείται το τηκόμενο ηλεκτρόδιο, τροφοδοτούμενο μηχανικά κατά συνεχή τρόπο στον καυστήρα συγκόλλησης. Το τόξο ανάβεται ανάμεσα στο συγκολλούμενο υλικό και στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο, που συγχρόνως αποτελεί και το εναποτιθέμενο υλικό.

Η προστασία του λουτρού συγκόλλησης από την οξειδωτική δράση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι η ροή του αργού, διερχόμενο από το ακροφύσιο γύρω στο ηλεκτρόδιο. Ως συνέπεια της χρησιμοποίησης του συνεχούς ρεύματος με θετική πολικότητα, έχουμε τη διαδικασία του εντατικού καθοδικού καθαρισμού, η οποία εγγυάται την ιδανική διάσπαση της μεμβράνης των οξειδίων Al_2O_3 .

Η μέθοδος GMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ημιαυτόματα και αυτόματα παραλλαγή, με υψηλή απόδοση. Η πυκνότητα του ρεύματος πρέπει να διατηρείται στα όρια 100-200A ανά 1mm της διαμέτρου του σύρματος ηλεκτροδίου. Χάρη της μεγάλης ταχύτητας συγκόλλησης (αρκετές φορές μεγαλύτερη απ' ό τι με τη μέθοδο GTA), είναι σήμερα μία από τις πιο οικονομικές μεθόδους συγκόλλησης.

Πρακτικά, με τη μέθοδο GMA, συγκολλούνται ελάσματα με πάχος μέχρι 4mm και άνω. Η συγκόλληση λεπτών ελασμάτων απαιτεί τη χρησιμοποίηση συρμάτων με

διαμέτρους κάτω από 1,6mm. Η προετοιμασία των άκρων των ελασμάτων, ανάλογα με το πάχος, διενεργείται σύμφωνα με τους τρόπους που δίνονται στην εικόνα 5.39.



Εικόνα 5.39: Τρόποι προετοιμασίας των άκρων για τη συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου με τη μέθοδο GMA.

Το πιστόλι οδηγείται από τα αριστερά προς τα δεξιά, διατηρώντας το σχεδόν κάθετα προς την επιφάνεια των συγκολλούμενων ελασμάτων. Η απόσταση του πιστολιού από το υλικό δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20mm. Τα ελάσματα κάτω των 6mm συγκολλούνται με ένα στρώμα, ενώ πάνω απ' αυτό το πάχος με πολλαπλά στρώματα. Οι παράμετροι συγκόλλησης με τη μέθοδο GMA δίνονται στην εικόνα 5.40. [10]

Πάχος ελάσματος mm	Σύρμα ηλεκτρο- δίου Φ mm	Ρεύμα συγκόλ- λησης I A	Τάση τόξο υ U V	Ταχύτητα τροφοδοσί- ας σύρματος V _{τρ} m/min	Κατανάλω- ση αργού l/min	Ταχύτητα συγκόλληση- ς V _{συγ} mm/min
2	0,8	90-130	22- 24	7,5	12	700
3	1,0	100- 150	22- 24	6,0	14	650
4	1,2	150- 200	24- 25	5,0	14	600
5	1,6	180- 240	24- 25	4,6	15	600
6	1,6	220- 270	24- 25	5,0	15	600
8	2,0	250- 300	25- 26	4,8	18	550
10	2,0	280- 320	26- 28	5,0	18	500
12	2,4	300- 380	26- 28	3,8	18	450
29	2,4	350- 400	26- 28	4,0	20	300

Εικόνα 5.40: Παράμετροι μετωπικής συγκόλλησης ελασμάτων αλουμινίου, με τη μέθοδο GMA (MIG).

7)ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία μελέτησα τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων κραμάτων του αλουμινίου. Οι συγκολλήσεις στα κράματα του αλουμινίου είχαν πραγματοποιηθεί με τις μεθόδους MIG με υπόβαθρο αδρανούς αερίου, GTAW βολφραμίου με υπόβαθρο αδρανούς αερίου, FBW δέσμης ηλεκτρονίων και FSW συγκόλληση τριβής. Στην πρώτη μελέτη συγκολλήθηκαν δοκίμια κραμάτων αλουμινίου με δοκίμια χάλυβα. Στην δεύτερη συγκολλήθηκαν δοκίμια κραμάτων αλουμινίου σειράς 5xxx. Στην τρίτη δοκίμια κραμάτων αλουμινίου σειράς 2219 και στην τέταρτη δοκίμια αλουμινίου με δοκίμια ανοξείδωτου χάλυβα. Στις περιπτώσεις που οι συγκολλήσεις έγιναν μεταξύ δοκιμίων αλουμινίου παρατηρήθηκε πως οι συγκολλήσεις ήταν επιτυχείς. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στα συγκολλημένα τεμάχια για να εξεταστούν οι μηχανικές ιδιότητες ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων. Άρα τα κράματα αλουμινίου έχουν καλή συγκολλητότητα. Στις περιπτώσεις που οι συγκολλήσεις έγιναν μεταξύ δοκιμίων κραμάτων αλουμινίου και δοκιμίων χάλυβα ή ανοξείδωτου χάλυβα κατά τις δοκιμές που έγιναν για να εξεταστούν οι μηχανικές ιδιότητες παρατηρήθηκε πως τα σημεία συγκόλλησης δεν ήταν τόσο αξιόπιστα. Οι μηχανικές ιδιότητες σε κάποιες δοκιμές ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων όμως σε κάποιες άλλες όχι.

9)ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] George E. Totten – D. Scott Mackenzie, Handbook of Aluminum, Marcel Dekker Inc.,2003.(1)

[2] <http://www.atem-oe.gr/alouminio-plirofories/istorika-stoixeia-alouminio/viomixaniki-paragogi-alouminiou.html>

[3] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης- Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Παπασωτηρίου, 2008.(561)

[4] www.elval.gr

[5] George E. Totten – D. Scott Mackenzie, Handbook of Aluminum, Marcel Dekker Inc.,2003.(33)

[6] George E. Totten – D. Scott Mackenzie, Handbook of Aluminum, Marcel Dekker Inc.,2003.(14)

[7] The aluminum Association, Aluminum Alloy, The aluminum Association Inc., 1998.(7)

[8] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης- Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Παπασωτηρίου, 2008.(563)

[9] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης- Δημήτρης Ι. Παντελής, Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Παπασωτηρίου, 2008.(427)

[10]Θ.Α. Διαμαντουδης, Συγκολλήσεις μετάλλων, Θ.Α. Διαμαντουδης Α έκδοση 2000.(562)

[11] Regis Blondeau, Metallurgy and Mechanics of Welding,Lavoisier, 2001, Iste Ltd, 2008

[12] Γ.Ν. Χαιδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Εκδόσεις Τζιόλα 2007.

[13] www.alumil.gr