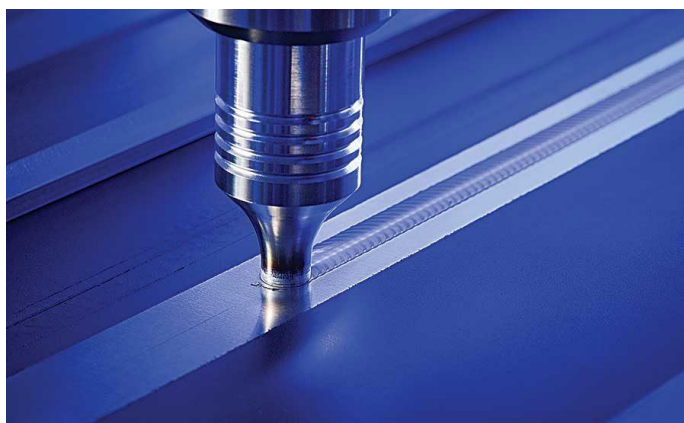




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ,
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.

Συγκολλήσεις Δια Τριβής με Ανάδευση Ανόμοιων Κραμάτων Αλουμινίου 5083 & 6082



Φοιτητής: Συνοδινός Καμήλος Γεράσιμος
Επιβλέπων Καθηγητής : Παπαευθυμίου Σπύρος

ΑΘΗΝΑ, 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ,
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.

Συγκολλήσεις Δια Τριβής με Ανάδευση Ανόμοιων Κραμάτων Αλουμινίου 5083 & 6082



Φοιτητής: Συνοδινός Καμήλος Γεράσιμος
Επιβλέπων Καθηγητής : Παπαευθυμίου Σπύρος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις //2021

Σπ. Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής (επιβλέπων)(Υπογραφή)

Άγγελος Μαρκόπουλος, Καθηγητής(Υπογραφή)

Άνθιμος Ξενίδης, Καθηγητής(Υπογραφή)

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

Περίληψη

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW) είναι μία τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης. Είναι ενεργειακά οικονομική, ευέλικτη και φιλική προς το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου με εφαρμογή στην αεροναυπηγική βιομηχανία, τα οποία διακρίνονται από την υψηλή τους αντοχή, καθώς και άλλων κραμάτων των οποίων η συγκόλληση με συμβατικές τεχνικές είναι δύσκολη. Η FSW θεωρείται η πιο σημαντική εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων, την τελευταία δεκαετία.

Το αλουμίνιο και πιο συγκεκριμένα τα κράματα αλουμινίου σειράς 5XXX & 6XXX, τα οποία αφορούν ναυπηγικά κράματα, επιλέχθηκαν διότι είναι υλικά πολύ ανθεκτικά, με χαμηλό ειδικό βάρος, αδιάβρωτα από τους καιρικούς παράγοντες καθώς και φιλικά προς το περιβάλλον σε βιομηχανικό επίπεδο. Ο προηγούμενος χαρακτηρισμός σχετικά με το περιβάλλον, προκύπτει από το γεγονός ότι το αλουμίνιο όπως και πολλά μεταλλικά υλικά, κατά την τήξη τους και την επαναχύτευση τους εμφανίζουν παρόμοιες ιδιότητες με το αρχικό υλικό, δίνοντας πολλές προοπτικές στην διαδικασία της ανακύκλωσης του. Τέλος, η Ελλάδα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραγωγούς αλουμινίου, τόσο στην παραγωγή όσο και στην επεξεργασία του, συμβάλλοντας σημαντικά στον ΑΕΠ την τελευταία εικοσαετία, γεγονός το οποίο κέντρισε το ενδιαφέρον μου για περαιτέρω ενασχόληση και προσωπική ανάπτυξη στον συγκεκριμένο κλάδο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης σε κράματα αλουμινίου των σειρών 5XXX και 6XXX. Για κάθε συγκόλληση, ακολουθεί μεταλλογραφική προετοιμασία και μεταλλογραφική παρατήρηση. Εν κατακλείδι αξιολογείται η κάθε συγκόλληση και παραθέτονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την μέγιστη δυνατή επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Abstract

Friction Stir Welding is an innovative welding technique which is regarded as a solid-state welding. It is versatile, environmental-friendly and economical. It has various applications in naval and aerospace aluminium alloys with high resistance in fatigue and also in alloys, where their welding is difficult using the classic welding techniques. Friction Stir Welding is said to be one of the most important inventions in the last decade.

Aluminium and its alloys (5xxx & 6xxx) were chosen for this study as they are a very resistant material, with low molecular weight and high corrosion resistance. Additionally, aluminium is known as the “green” material due to its recyclability. Eventually, an extra factor which affected the aforementioned decision is that, Greek aluminium production is very competitive in worldwide production and provides big employment rates during the last two decades, so it would be my pleasure to evolve in this industry.

The main aim of this investigation is to signify the best combination of functional factors in F.S.W. in aluminium alloys 5xxx and 6xxx. For each welding metallographic preparation is ensued. In the end, each welding is evaluated with all the required information and explanations are mentioned.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Πρόλογος.....	12
1. Θεωρητικό Μέρος.....	14
1.1. Αλουμίνιο.....	14
1.2. Ιστορία του Αλουμινίου.....	15
1.3. Αλουμίνιο ως Ενεργειακή Τράπεζα.....	17
1.4. Κράματα Αλουμινίου.....	19
1.4.1. Κράματα χύτευσης αλουμινίου.....	21
1.4.2. Κράματα ΑΙ που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες 23	
1.4.3. Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου.....	22
1.5. Κράματα Αλουμινίου και Προσθήκες Κραματικών Στοιχείων.....	25
1.5.1. Κράματα Αλουμινίου:6082.....	27
1.5.2. Κράματα Αλουμινίου: 5083.....	28
1.6. Συγκόλληση.....	30
1.7. Ιστορική ανασκόπηση.....	30
1.8. Γεωμετρία Σύνδεσης.....	33
1.8.1. Σύνδεση κατά συμβολή ή μετωπική σύνδεση.....	33
1.8.2. Γωνιακή σύνδεση.....	35
1.8.3. Αυχενική σύνδεση.....	35
1.8.4. Σύνδεση κατ' ακμή.....	35
1.9. Συγκολλήσεις σε Αλουμίνιο και των κραμάτων του.....	36
1.10. Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding).....	37
1.10.1. Το εργαλείο.....	38
1.11. Παραγόμενη θερμότητα.....	39
1.12. Μεταλλουργία ζωνών συγκόλλησης.....	41
1.12.1. Ζώνη ανάδευσης [Weld nugget – WNZ (Δ)]:.....	41
1.12.2. Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη [Thermomechanically affected zone - TMAZ 42	
1.12.3. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη [(Heat affected zone – HAZ].....	42
1.12.4. Ζώνη βασικού μετάλλου [Unaffected material – P.M.].....	42
1.12.5. Flow Arm.....	43
1.13. Παράμετροι της Friction Stir Welding.....	43
1.13.1. Ταχύτητα Περιστροφής.....	43

1.13.2.	Επίδραση της ταχύτητας Συγκόλλησης.....	44
1.13.3.	Επίδραση του λόγου των ταχυτήτων συγκόλλησης.....	45
1.13.4.	Επίδραση της Κάθετης Αξονικής Δύναμης.....	45
1.13.5.	Επίδραση της κλίσης εργαλείου συγκόλλησης.....	46
1.14.	Φαινόμενα Δυναμικής Ανακρουστάλλωσης.....	48
1.15.	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης.....	49
1.15.1.	Πλεονεκτήματα της μεθόδου.....	49
1.15.2.	Μειονεκτήματα της Μεθόδου.....	51
2.	Πειραματικό Μέρος.....	52
2.1.	Εξοπλισμός.....	52
2.2.	Μηχανική Προετοιμασία.....	52
2.3.	Κοπή.....	53
2.4.	Εγκιβωτισμός.....	53
2.5.	Λείανση.....	54
2.6.	Στίλβωση.....	54
2.7.	Χημική Προσβολή.....	55
2.8.	Οπτική Μικροσκοπία.....	55
2.9.	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης.....	56
2.10.	Σκληρομέτρηση.....	57
	Κράματα Αλουμινίου 5083 και 6082.....	58
3.	Αποτελέσματα- Συζήτηση.....	61
	Δοκίμιο Α.....	61
	Δοκίμιο Β.....	65
	Δοκίμιο Γ.....	66
	Δοκίμιο Δ.....	68
	Δοκίμιο Ε.....	69
	Δοκίμιο Ζ.....	70
	Δοκίμιο ΣΤ.....	71
	Δοκίμιο Ι.....	72
4.	Συμπεράσματα.....	75
5.	Πίνακας Εικόνων.....	77
6.	Βιβλιογραφία.....	78

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε δύο εργαστήρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το κομμάτι των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε στην Σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατεργασιών, στο οποίο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου καθώς και τον Καθηγητή κ. Δημήτρη Μανωλάκο και τον Διδάκτωρ Ιωάννη Παπαντωνίου, καθώς μας παρείχαν την απαραίτητη υλικοτεχνική υποστήριξη για την εκπόνηση της διπλωματικής άσκησης και για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων με την μέθοδο του Friction Stir Welding.

Στη συνέχεια, το δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας, αυτό της μεταλλογραφίας, πραγματοποιήθηκε στην σχολή των Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, στα εργαστήρια της Μεταλλογνωσίας και της Οπτικής και Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας, χάρη στα οποία πραγματοποιήθηκε η εξέταση των παραγόμενων, από την συγκόλληση δοκιμίων, και η ανάλυση των ιδιοτήτων τους. Σε αυτό το κομμάτι θα ήθελα να ευχαριστήσω σε προσωπικό επίπεδο τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σπύρο Παπαευθυμίου, για την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια του σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου άσκησης, όπως και τους Υποψήφιους Διδάκτορες Μπάνη Αλέξανδρο, Λουκαδάκη Βασίλη και Χάσκη Σπυρίδωνα για όλη τη βοήθεια και στήριξη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

1. Θεωρητικό Μέρος

1.1. Αλουμίνιο

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Τα 200 χρόνια από την βιομηχανική επανάσταση και τα περίπου 100 από την βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου, μοιάζουν σαν ένας κόκκος άμμου στην κλεψύδρα. (1)

Το αλουμίνιο ή αργίλιο είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που συναντάται στον φλοιό της γης. Το αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό βωξίτης που μετά από την εξόρυξή του μετατρέπεται

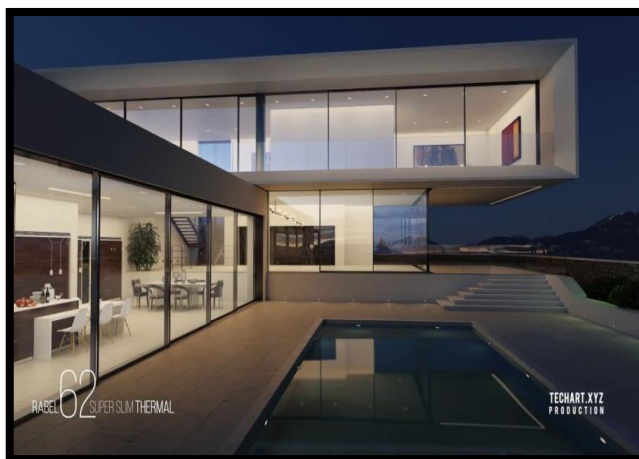


Εικόνα 1, Μετάλλευμα Βωξίτης (90)

σε αλουμίνα και στην συνέχεια με ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε αλουμίνιο, το οποίο είναι μετά τον σίδηρο το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μέταλλο. (2) Σε αντίθεση με τον σίδηρο, τον χαλκό και τον χρυσό, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στη φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες και γι' αυτό το λόγο η απομόνωσή του καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η παραγωγή του έγινε δυνατή μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού. Επιπρόσθετα αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια η παγκόσμια παραγωγή και αξιοποίηση του καθαρού αλουμινίου έχει περάσει τους 50.000.000 τόνους.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθώς και η υψηλή τεχνολογία επεξεργασίας του εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του.

Ανταποκρίνεται στο ακέραιο στις προσδοκίες των μηχανικών και αρχιτεκτόνων τόσο από πλευρά μηχανικών αντοχών όσο και από πλευρά αισθητικής. Η ιδιότητα του να είναι πρακτικά αδιάβρωτο από τους καιρικούς παράγοντες καθιστούν το αλουμίνιο ένα κατάλληλο υλικό τόσο για την κατασκευή πορτών, παραθύρων,



Εικόνα 2, Εφαρμογή του αλουμινίου στην δομική βιομηχανία (44)

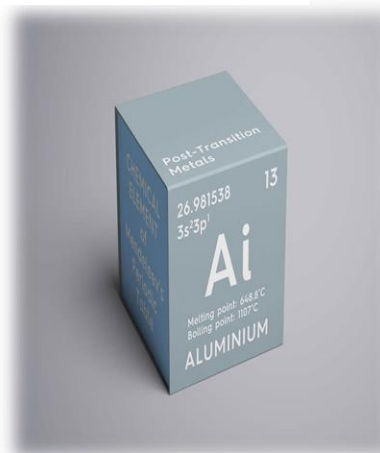
υαλοπετασμάτων, ψευδοροφών, κάγκελων στον τομέα της δομικής βιομηχανίας, όσο και στους τομείς της αεροναυπηγικής βιομηχανίας όπου βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην κατασκευή σημαντικών πλαισίων και εξαρτημάτων σε πλοία και αεροσκάφη. (2)

Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου :

- Ατομικό βάρος 26,98g/mol
- Ατομικός αριθμός 13
- Κρυσταλλική δομή FCC
- Πλευρά μοναδιαίου κελιού = $4,0496 \times 10^{-8} \text{ cm}$
- Πυκνότητα στους $200^\circ\text{C} = 2,71 \text{ g/cm}^3$
- Θερμική αγωγιμότητα = 2,1- 2,3 w/cm*K
- Συντελεστής συστολής (60-100°C) = $(23,5)/(K \cdot 106)$
- Αύξηση όγκου από στερεό σε υγρό = 6,5%
- Σημείο τήξης = 658°C
- Θερμότητα τήξης (λανθάνουσα) = 396 J/g
- Σημείο βρασμού = 2270°C
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα = 34-36 m/ohm*mm²
- Αντίσταση = $2,65 \cdot 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$
- Μέτρο ελαστικότητας = $7,2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$
- Σκληρότητα Mohs = 2.75
- Μέτρο Ελαστικότητας = 70 GPa



Εικόνα 3, Χρήση Αλουμινίου σε Αυτοκινητοβιομηχανία και Αεροβιομηχανία. (91)



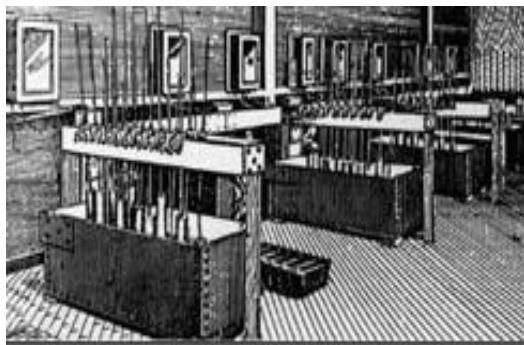
Εικόνα 4, Αλουμίνιο, (39)

1.2. Ιστορία του Αλουμινίου

Το 1825 απομονώθηκε πρώτη φορά ως μέταλλο σε εργαστήριο (Hans Christian Orsted). Αν και το αλουμίνιο δεν έγινε γνωστό παρά μόνο στις αρχές του 19ου αιώνα, παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα με την μορφή του αργίλου σαν πρώτη ύλη για την κατασκευή αγγείων, άλατα περιέχοντα αλουμίνιο για βαφές και φαρμακευτικά παρασκευάσματα. Οι αρχαίοι Κινέζοι, οι Αιγύπτιοι, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι, χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις φυσικές του ενώσεις χωρίς κατά πάσα πιθανότητα να έχουν πλήρη γνώση της ύπαρξης ενός μετάλλου που έδινε τις ειδικές αυτές ιδιότητες στις δημιουργίες τους. Στον μεσαίωνα οι επιστήμονες - αλχημιστές της εποχής, υποπτεύθηκαν την ύπαρξη ενός μετάλλου στον κοινό και τόσο φτηνό άργιλο, που θα τους έδινε την πολυπόθητη λύση δημιουργίας χρυσού με την μετάλλαξή του.

Ο Hans Christian Orsted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο το 1825, με την χρήση χλωριδίου του αλουμινίου (AlCl₃) και

αμάλαμα ποτάσας, ένα μείγμα δηλαδή ποτάσας(KOH) και ψευδαργύρου. Ο Oersted ανεβάζοντας την θερμοκρασία του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης πέτυχε την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, το εναπομείναν δε υλικό ήταν το αλουμίνιο. Έτσι γεννήθηκε το μέταλλο που άλλαξε την ιστορία και συνέβαλε σημαντικά στην πορεία του ανθρώπου στο φεγγάρι, δίνοντάς του παράλληλα την δυνατότητα να μπορεί να εκσφενδονίζει πυραύλους μαζικής καταστροφής κατά του εαυτού του. Η ανακάλυψη



Εικόνα 5, πρώτη εγκατάσταση βιομηχανικής παραγωγής αλουμινίου το 1888 ικανότητας 20 κιλών ημερησίως, στο Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α. (45)

αυτή δεν δημιούργησε παρά "ένα πολύτιμο" μέταλλο, μιας και ήταν πολύ δύσκολη και ακριβή η παραγωγή του. Η διεθνής, χημική ονομασία του νέου μετάλλου είναι "αλουμίνιο" μέχρι και τις μέρες μας. Το ίδιο ίσχυσε και στις ΗΠΑ μέχρι το 1925, όταν η Αμερικανική Εταιρία Χημείας αποφάσισε να αλλάξει το όνομα ξανά σε "aluminium", έτσι ακόμα και σήμερα οι Αμερικάνοι χρησιμοποιούν αυτή την ονομασία, σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο.

Ας δούμε όμως με μια γρήγορη ματιά πως εξελίχθηκε η παραγωγή του μετάλλου από τις αρχές του 19ου αιώνα:

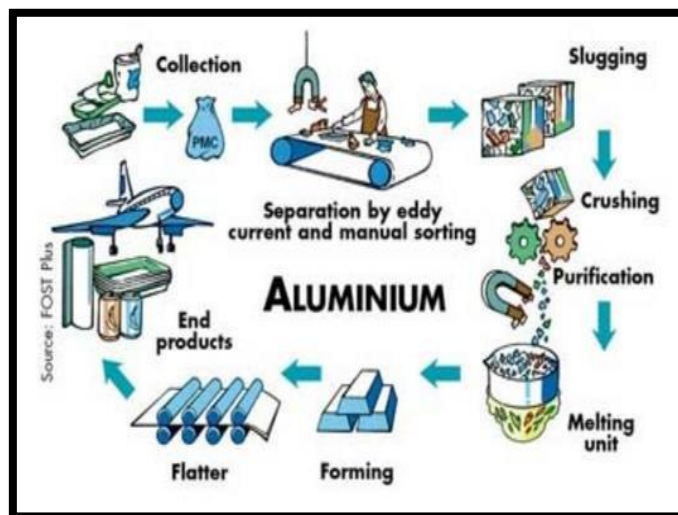
- 1808: Ο Βρετανός Davy ανακαλύπτει την ύπαρξη του μετάλλου
- 1821: Ο P. Berthier ανακαλύπτει κοντά στο χωριό Les Baux στην Γαλλία μια σκληρή, κοκκινωπή ουσία που περιέχει 52 %αλουμίνιο και την ονομάζει Βωξίτη.
- 1825: Ο Δανός Hans Christian Oersted παράγει μια μικρή ποσότητα αλουμινίου χρησιμοποιώντας διάλυμα ποτάσας.
- 1827: Ο Γερμανός Friedrich Wohler ανακοινώνει την ανακάλυψή του για την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου.
- 1845: Ο Wohler ανακάλυψε και κατέγραψε την πυκνότητα του αλουμινίου και μία από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα.
- 1854: Ο Γάλλος Henri Saite-Claire Devile βελτιώνει την μέθοδο του Wohler και παράγει βιομηχανικά αλουμίνιο, για πρώτη φορά στην ιστορία. Η τιμή του μετάλλου ξεπερνά αυτή του χρυσού και της πλατίνας.
- 1855: Μία ράβδος αλουμινίου εκτίθεται στην Διεθνή Έκθεση των Παρισίων μαζί με άλλα πολύτιμα μέταλλα.
- 1886: Δύο νέοι και άγνωστοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall, εφευρίσκουν την μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνιας. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν ξεχωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου.
- 1888: Οι πρώτες εταιρίες παραγωγής αλουμινίου γεννήθηκαν στην Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ.

- 1889: Ο Αυστριακός Friedrich Bayer, γιος του ιδρυτή της περίφημης εταιρίας χημικών ουσιών, εφευρίσκει την μέθοδο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων αλουμίνας από τον βωξίτη.
- 1900: Η ετήσια παραγωγή αλουμινίου σπάει κάθε ρεκόρ, φτάνοντας τους 8 τόνους σε ετήσια βάση.

1.3. Αλουμίνιο ως Ενεργειακή Τράπεζα

Το αλουμίνιο δικαίως χαρακτηρίζεται σαν το "πράσινο" μέταλλο, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις τεχνολογικές αλλά και οικολογικές απαιτήσεις. Εδώ και περίπου 10 χρόνια, η κοινωνία έχει συνειδητοποιήσει το βαρύ περιβαλλοντικό κόστος που επισύρει η ανεξέλεγκτη τεχνολογική ανάπτυξη, με αποκορύφωμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η διεθνής παραγωγή αλουμινίου είναι από τους βασικούς πρωταγωνιστές στην προσπάθεια για μείωση ενέργειας για παραγωγή, περιορισμό και έλεγχο εκπομπών ρύπων και διατήρηση τουλάχιστον της ποιότητας του περιβάλλοντος. Η

ανακύκλωση του αλουμινίου είναι το σημαντικότερο μέσο για την οικονομία ενέργειας και τη μείωση εκπομπών ρύπων. Για να καταδειχθεί η σημαντικότητα της ανακύκλωσης, τονίζεται ότι ενώ για την πρωτογενή παραγωγή 1 κιλού αλουμινίου (ηλεκτρόλυση αλουμίνας από βωξίτη) απαιτείται ενέργεια 14 KWH, για την ανακύκλωση της ίδιας ποσότητας από scrap, απαιτείται μόνο 5% της



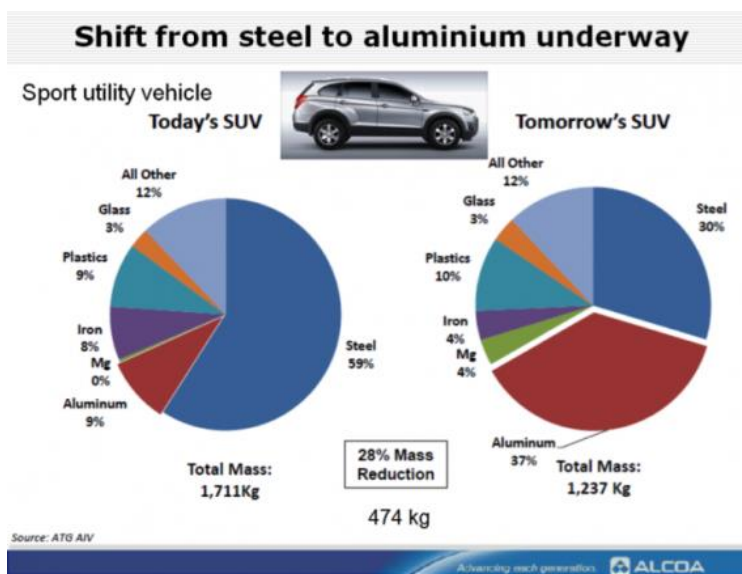
Εικόνα 6, Διαδικασία Ανακύκλωσης Αλουμινίου (1)

ενέργειας της μεθόδου ηλεκτρολύσεως. Η προσπάθεια για οικονομικότερη διεργασία ηλεκτρολύσεως έχει ήδη διεθνώς αποδώσει, επιτυγχάνοντας μείωση ενέργειας κατά 30% σε σχέση με εκείνη που χρειαζόταν προ 30ετίας. Καταβάλλεται προσπάθεια μέσω ενημέρωσης για να επικρατήσει ο όρος χρησιμοποίηση αλουμινίου αντί για κατανάλωση αλουμινίου, ώστε το κοινό να εξοικειωθεί με τις έννοιες περισυλλογής διαχωρισμού και ανακύκλωσης. Η διατήρηση της αξίας του μετάλλου, παράλληλα με το αξιοσημείωτο ποσοστό ανακύκλωσης του αλουμινίου, αποτελούν εξαιρετικά ελκυστικά χαρακτηριστικά που ενισχύουν το προφίλ οικολογίας του αλουμινίου. Υπογραμμίζεται η παραγωγή ίδιας ποιότητας μετάλλου μετά την ανακύκλωσή του. Ο χαρακτηρισμός του σαν "Ενεργειακή Τράπεζα" αποδίδει πλήρως τα παραπάνω. Αλλά και η παραγωγή προϊόντων από αλουμίνιο, έχει σε πολλές περιπτώσεις σημαντική οικολογική επίπτωση, όπως στην Αυτοκινητοβιομηχανία: για κάθε 100 κιλά που μειώνεται το βάρος ενός αυτοκινήτου μεσαίου κυβισμού λόγω χρήσης αλουμινίου αντί χάλυβα, προκύπτει μείωση εκπομπής καυσαερίων ποσότητας 2 τόνων για όλη τη διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου, ενώ στον ίδιο χρόνο η αναμενόμενη οικονομία καυσίμου είναι 900 λίτρα βενζίνης (ελαφρότητα κατασκευής).

Η διάρκεια ζωής υλικών κατασκευασμένων από αλουμίνιο είναι σημαντικά μεγαλύτερη εκείνων από χάλυβα, για λόγους αντοχής στη διάβρωση, ενώ το κόστος συντήρησής τους είναι από ελάχιστο έως αμελητέο. Η τεχνολογία των κραμάτων σε συνδυασμό με την ευκολία υποβιβασμού του πάχους με την έλαση, δίνει νέα διάσταση σε δυνατότητα οικονομίας μετάλλου στις κατασκευές (σκληρότερα κράματα - μικρότερο πάχος). Η ανακύκλωση σαν εφαρμοσμένη βιομηχανική μέθοδος παραγωγής αλουμινίου, έχει ιστορία ζωής στην Ευρώπη από το 1920 περίπου. Το home scrap που προκύπτει κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας στα εργοστάσια παραγωγής, ανακυκλώνεται αμέσως δίνοντας αντίστοιχες κραματικά ποσότητες πλακών από το χυτήριο. Επιπροσθέτως, οι κάθε είδους κατασκευές και προϊόντα αλουμινίου μπορούν να ανακυκλωθούν μετά το τέλος της εφαρμογής τους. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την περισυλλογή, τον κραματικό διαχωρισμό και την ανακύκλωσή τους. Εκτεταμένα δίκτυα περισυλλογής, διαχωρισμού, προεπεξεργασίας και εμπορίας, λειτουργούν ήδη σε όλο τον κόσμο. Σε Ευρωπαϊκή κλίμακα, το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι από εκείνα με τον υψηλότερο βαθμό ανακύκλωσης. Το αλουμίνιο από δομικές εφαρμογές ακολουθεί, ενώ τρίτο σε βαθμό ανακύκλωσης είναι το αλουμίνιο από τα κουτιά μπίρας και αναψυκτικών. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές ανακύκλωσης, προσαρμοσμένες στις διάφορες μορφές ανακυκλώσιμου αλουμινίου, π.χ. άλλη για άβαφο και χονδρού πάχους αλουμίνιο, άλλη για foil αλουμινίου, άλλη για βαμμένο αλουμίνιο. Η ELBAΛ, ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι έχει επενδύσει σημαντικά στον τομέα ανακύκλωση, με μονάδες νέας τεχνολογίας, ενώ παράλληλα προωθεί την πλήρη ανακύκλωση των στερεών προϊόντων του χυτηρίου σε άλλης χρήσης υλικά.

Σε περαιτέρω σύγκριση του αλουμινίου με τον χάλυβα στην αυτοκινητοβιομηχανία, αναφέρεται η δυνατότητα πλέον για δημιουργία εξ ολοκλήρου της καμπίνας από αλουμίνιο, σημειώνοντας μία ακόμη αξιόλογη μείωση βάρους στο αυτοκίνητο. Αυτό δικαιολογεί και τον λόγο για τον οποίο πολύ μεγάλες εταιρίες παραγωγής και διαχείρισης αλουμινίου (Novelis, Aleris, Amag, Constellium) έχουν στραφεί στην

ανάπτυξη και βελτίωση κραμάτων αλουμινίου 5XXX&6XXX, τα οποία εμφανίζουν αντοχή σε εφελκυσμό 2-3 φορές παραπάνω σε σχέση με τα προηγούμενα κράματα. Ο συνδυασμός αντοχής και ολκιμότητας είναι αυτό το οποίο προσπαθούν να πετύχουν οι



βιομηχανίες. Για το σώμα του αυτοκινήτου (καμπίνα, πόρτες κλπ.) χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου-μαγνησίου που υπόκεινται σε εργοσκήρυση και κράματα

αλουμινίου-μαγνησίου-πυριτίου που είναι επιδεικτικά σε σκλήρυνση μέσω θερμικών κατεργασιών.

Εν κατακλείδι, αναφέρεται ότι σύμφωνα με μελέτες που έγιναν το 2017, από το CAR(Car Automotive Research), το ποσοστό του χάλυβα σε αυτοκίνητα το 2020 θα είναι περίπου στο 15%, ενώ αναμένεται ότι το 2040 θα έχει μειωθεί στο 5%. Παράδειγμα αποτελεί η Ferrari, η οποία έχει ήδη αναφέρει χρήση αλουμινίου με κεραμικά σωματίδια, επιτυγχάνοντας μείωση του βάρους σε ποσοστό της τάξης του 15-20%, καθώς και την αντικατάσταση του χάλυβα(CFRP), υπογραμμίζοντας ότι σε περίπτωση σύγκρουσης το αλουμίνιο είναι πιο ασφαλές και εύκολο στην επιδιόρθωση. (1)

1.4. Κράματα Αλουμινίου

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

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

Πίνακας 1, Κράματα Διαμόρφωσης

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

(β) Στη δεύτερη περίπτωση (κράματα χύτευσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, επίσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από το κωδικό.

Πίνακας 2,Κράματα Χύτευσης

Κωδικός	Κύρια Προσθήκη
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και χαλκός ή μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

Το δεύτερο μέρος της κωδικοποιημένης ονομασίας, τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης, όσο και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί

Πίνακας 3.Κράματα- Κύρια Επεξεργασία

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

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

1.4.1.Κράματα χύτευσης αλουμινίου

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

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

- η καλή ευχυτότητα
- η απουσία ρηγματώσεων και η ομοιόμορφη κατανομή του πορώδους, αν υπάρχει, με σκοπό την εύκολη μηχανική επεξεργασία για απομάκρυνση του (ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση)
- η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων
- η καλή αντοχή εν θερμώ και η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Γενικά, οι μικροδομές και, κατ' επέκταση, οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών εξαρτώνται κυρίως, από την ταχύτητα στερεοποίησης, άρα και από τη μέθοδο χύτευσης. Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης, απ' ό,τι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν

ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι, τις θερμοκρασίες χύτευσης. Τα κυριότερα κράματα χύτευσης του αλουμινίου είναι:

- Κράματα αλουμινίου της σειράς 2XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται, πλέον, σπάνια, λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 3XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Si, κράματα Al-Si-Cu. Τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα είναι τα πρώτα. Αυτά περιέχουν πυρίτιο, σε ποσοστό 5-20%κ.β., αν και τις περισσότερες φορές προτιμώνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Προσθήκη Mg, σε ποσοστό 0,3-1% ή Cu, σε ποσοστό 3-5%, βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al-Si. Κράματα Al-Si-Cu, η περιεκτικότητα των οποίων σε Si είναι γειτονική της ευτηκτικής σύστασης (12,7% Si), παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η ρύθμιση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών επιτυγχάνεται με συνδυασμό διαφόρων μηχανισμών: με τη δημιουργία στερεού διαλύματος, α φάσης, με τη διασπορά φάσης β και με τη ρύθμιση των συνθηκών στερεοποίησης (επίδραση στο μέγεθος των κόκκων και στο είδος των σχηματιζόμενων ευτηκτικών).
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 5XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Mg. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλασσινό περιβάλλον, στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα
- Κράματα αλουμινίου της σειράς 7XX.X. Πρόκειται για κράματα Al-Zn και κράματα Al-Zn-Mg. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση, Επιπλέον, υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης επηρεάζει σε μικρό ποσοστό τις μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.

1.4.2. Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

Κράματα Al που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.

Πρόκειται για τα κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή ενδομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000.**

Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστον 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι

κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρό και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν θαυμάσια ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα ενώ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συρμάτων καλωδίων κ.λ.π. Οι κυριότερες ακαθαρσίες σε αυτά τα κράματα είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό έως 1%.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000.**

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το Mn. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al που είναι 1,8% στους 659°C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία. Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση Al₆Mn. Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεσομεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία της Al₆Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος. Τα κράματα Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000.**

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο σε ποσοστά μικρότερα από 4%. Τα κράματα της σειράς 5000 παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος, όμως, της ολκιμότητας τους. Όταν βρίσκονται στη μεταλλουργική κατάσταση O, μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρό ή εν θερμώ. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στη περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

1.4.3. Κράματα Al που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000. Τα κράματα 2000 βρίσκουν εφαρμογή σε δομικά στοιχεία αεροσκαφών και πλαισίων φορτηγών, σε σκελετούς οικοδομών, κοχλίες και αθλητικά είδη [1]. Τα κράματα της σειράς 6000 βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε συγκολλητές κατασκευές και στη ναυπηγική ενώ εκείνα της σειράς 7000 στις σιδηροδρομικές μεταφορές, στην αεροναυπηγική και στη κατασκευή όπλων και βαλβίδων.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000.**

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6-6,3% και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl₂ και

CuMgAl_2 , που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% ευνοεί το σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας. Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Εάν ωστόσο, προστεθεί συγχρόνως, και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους 230°C. Τα κράματα της σειράς 2000, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και η συγκόλληση τους είναι δύσκολη, διότι οι ζώνες γειτονικά προς τη περιοχή συγκόλλησης, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα οι μηχανικές τους ιδιότητες να υποβαμίζονται σημαντικά.

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000.**

Πρόκειται για κράματα Al-Mg-Si. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στο σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία, συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si, όπως π.χ. στο κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση. Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Οι προσθήκες αυτές συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση, που προκαλεί. Τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και μπορούν να συγκολληθούν εύκολα, συγχρόνως δε, παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150°C. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. (4)

- **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000.**

Πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg και για κράματα Al-Zn-Mg-Cu. Τα κράματα αυτά μετά από συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες απ' όλα τα κράματα αλουμινίου. Το ποσοστό Zn μεταβάλλεται από 4% έως 8% και εκείνο του Mg από 1% έως 3%. Η επιτυγχανόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn_2 . Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης. Ωστόσο, η παρουσία χαλκού μειώνει την εμβαπτότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al-Mg-Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%, βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητα τους. Τα κράματα της σειράς 7000 υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησης τους, της καλής τους εμβαπτότητας, (ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα) και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης

(γύρω στους 160°C). Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς 7000 δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλληση τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητα τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή (έως 120°C), καθώς η θερμοκρασία διαλυτοποίησης των ενισχυτικών ενώσεων MgZn₂ είναι 130°C. Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή σε διάβρωση. (4)

1.5. Κράματα Αλουμινίου και Προσθήκες Κραματικών Στοιχείων

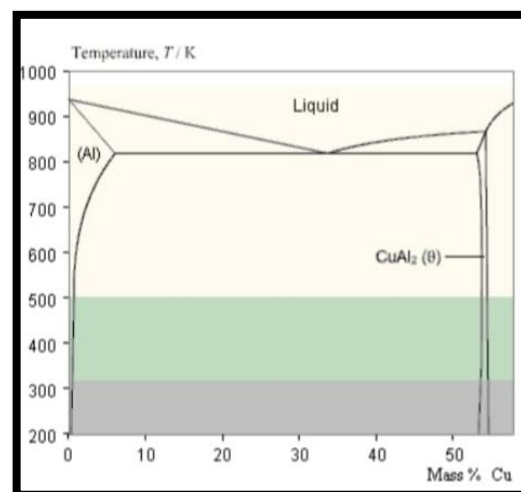
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται. Οι τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, και η παρουσία και άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει την διαλυτότητα. Προσθήκες μεγαλύτερες από τη μέγιστη διαλυτότητα πολλές φορές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

Πίνακας 4, Προσθήκες Κραματικών Στοιχείων

Προσθήκη	% κ/β	% άτομα	Θερμοκρασία °C
Cu	5,6	2,5	548
Mg	14,9	16,3	450
Mn	1,8	0,9	671
Si	1,6	1,6	577
Zn	82,8	66,4	382
Mg ₂ Si	1,8	1,9	595

Ακολουθούν τα διμερή διαγράμματα φάσεων.

Από όλα τα κύρια κραματικά στοιχεία μόνο ο ψευδάργυρος έχει αξιοσημείωτη 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.



Εικόνα 8, Διάγραμμα Al-Cu (125)

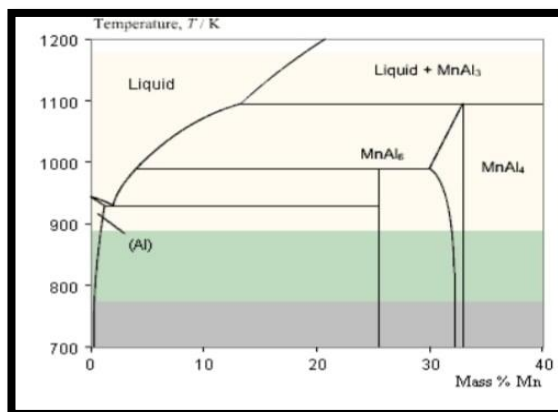
Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σαν κύριο κραματικό στοιχείο, ή μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες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

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.

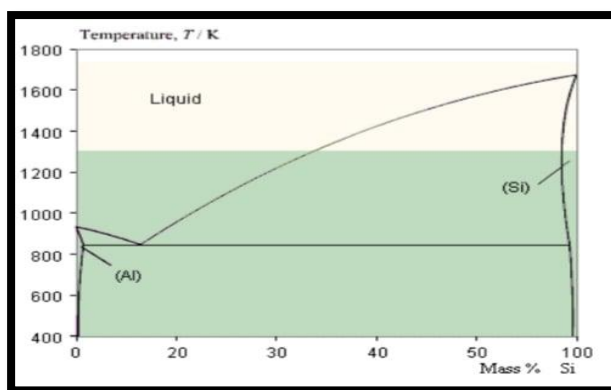
Το πυρίτιο μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει την ρευστότητα του αλουμινίου. Αυξάνει επίσης σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.

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

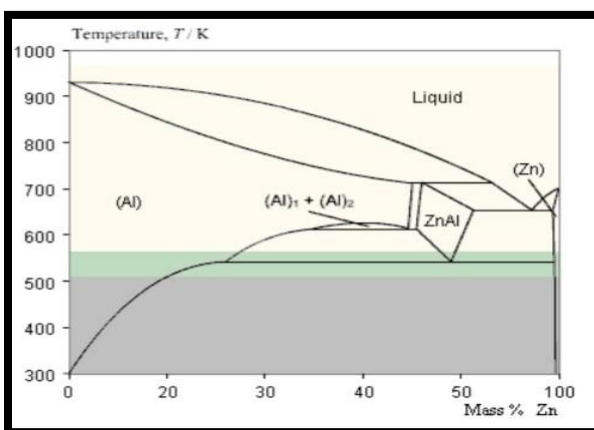
Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα AlMg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και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



Εικόνα 10, Διάγραμμα Αλουμινίου-Μαγγανίου (125)

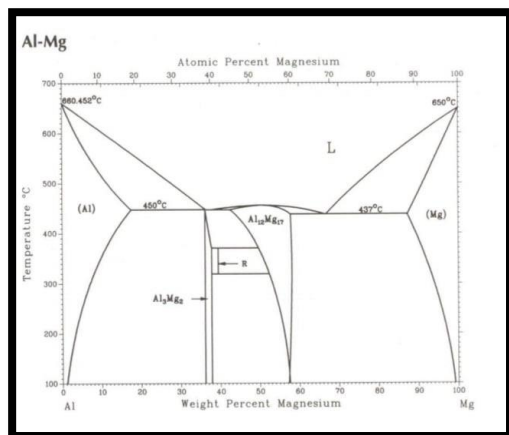


Εικόνα 11, Διάγραμμα Al-Mn (125)



Εικόνα 13, Διάγραμμα Αλουμινίου-Ψευδαργύρου (125)

ενίσχυση της αντοχής. (Ακολουθεί εκτενέστερη ανάπτυξη του συγκεκριμένου διαγράμματος στο Πειραματικό Κομμάτι της Εργασίας.)



Εικόνα 14, Διάγραμμα Αλουμινίου-Μαγνησίου (125)

1.5.1. Κράματα Αλουμινίου:6082

Σύμφωνα με τους N. Bayat, T. Carlberg και M. Cieslar (4) στα κράματα αλουμινίου (Al) ο σίδηρος (Fe) είναι η συνηθέστερη ακαθαρσία που εμφανίζεται ως ενδομεταλλική φάση των Al-Fe, Al-Fe-Si και Al-Fe-MnSi ανάλογα με τις συνθέσεις του κράματος (5). Η διαλυτότητα σε στερεή φάση του σιδήρου (Fe) στο αλουμίνιο (Al) είναι πολύ χαμηλή με αποτέλεσμα εμπορικά κράματα αλουμινίου (Al) να φέρουν πρωτεύοντα κατακρημνίσματα σιδήρου (Fe). Στα κράματα αλουμινίου (Al) σειράς 6XXX με προσθήκες των στοιχείων σιδήρου (Fe), μαγγανίου (Mn) και πυριτίου (Si) σχηματίζονται φάσεις β - Al_5FeSi , α - $Al_{12}(FexMn(1-x))_3Si$ και Mg_2Si κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης (6) (6). Οι μικροδομές που σχηματίζονται είναι κυρίως δενδριτικές και μεταξύ των βραχιόνων των δενδριτών σχηματίζονται η φάση β -AlFeSi και τα χονδρόκοκκα σωματίδια Mg_2Si . Η φάση β -AlFeSi είναι συνήθως υπεύθυνη για θερμές ρωγματώσεις και επιφανειακά ελαττώματα, που έχουν ως αποτέλεσμα κακή τελική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της εξέλασης. Η ιδανική μικροδομή θα πρέπει να έχει ομοιόμορφη δομή με χαμηλές παραμένουσες τάσεις, ελάχιστη ποσότητα διμεταλλικών φάσεων β -AlFeSi και σωματιδίων Mg_2Si (8). Σύμφωνα με τον Moreira (5) σε κράματα όπως το AA6082 η κύρια ενίσχυση είναι το φάσης β'' - Mg_5Si_6 . Για το λόγο αυτό σύμφωνα με τον Y.BIROL (5) η επεξεργασία των αλουμινίων AlMgSi αρχίζει πάντα με έναν κύκλο ομογενοποίησης με αποτέλεσμα τα παραγόμενα ελάσματα να έχουν καλύτερη τελική επιφάνεια και υψηλότερες ιδιότητες εφελκυσμού. Το υπόλοιπο της επεξεργασίας ομογενοποίησης αποτελείται από δύο κρίσιμα βήματα: εμβάπτιση ακολουθούμενη από ψύξη με ελεγχόμενο ρυθμό (10). Το δενδριτικό δίκτυο πλακών β -AlFeSi αντικαθίσταται από στρογγυλά σωματίδια α -AlFeSi (8) (11) (12) (13)]. Η μεσομεταλλική ένωση Mg_2Si και οι χονδροειδείς ευτηκτικές φάσεις κατακρημνίζονται (8) (11)]. Τόσο το μέγεθος όσο και ο αριθμός των β' -κατακρημνισμάτων (Mg_2Si) αυξάνονται με μείωση της θερμοκρασίας. Η αύξηση είναι αξιοσημείωτη από τους 400°C έως τους 350°C αλλά εξασθενεί σε περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας. Η ακολουθία κατακρήμνισης στα κράματα AlMgSi περιγράφεται ικανοποιητικά σύμφωνα με την εξής ακολουθία :

Υπέρκορο στερεό διάλυμα \rightarrow G.P zones \rightarrow β'' \rightarrow β' \rightarrow Si \rightarrow β [12-20].

Ως εκ τούτου, ο σχηματισμός των G.P zones ξεκινάει περίπου στους 160°C με συνεπακόλουθη δημιουργία της β'' μετασταθούς φάσης γύρω στους 230°C που είναι υπεύθυνη για τις μέγιστες τιμές σκληρότητάς που λαμβάνονται σε κράματα 6082-T6. Η γειτονική κορυφή στο διάγραμμα παράγεται από το σχηματισμό της β' μετασταθούς φάσης (Mg₂Si), ενώ παράλληλα πραγματοποιείται καταβύθιση της περισσειας του Si. (15)

Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνεται και από τους N. Bayat, T. Carlberg και M. Cieslar [70], οι οποίοι αναφέρουν πως η κατακρήμνιση των σωματιδίων Mg₂Si λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία 250°C. Τα σωματίδια Mg₂Si κατακρημνίζονται όχι μόνο σε μήτρα αλουμινίου (Al), αλλά επίσης στην επιφάνεια των διμεταλλικών σωματιδίων. Τα σωματίδια Mg₂Si είναι λεπτά (20-50 nm) και στρογγυλά στην αρχή της ομογενοποίησης και γίνονται πιο χοντρά με την αύξηση της θερμοκρασίας και του χρόνου. Η πυρήνωση μιας νέας φάσης (α-σωματίδια) ξεκινά στους 300°C. Στο στάδιο αυτό ο ρυθμός ανάπτυξης των νέων φάσεων είναι περίπου 2 nm / s. Αρχίζουν να αναπτύσσονται και στις δύο πλευρές του αρχικού πλακοειδούς σωματιδίου μέχρι να αρχίσουν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους στο κέντρο. Στο τελικό στάδιο ολόκληρο το σωματίδιο σε σχήμα βελόνας μετασχηματίζεται πλήρως σε αρκετά περισσότερα ή λιγότερο στρογγυλοποιημένα σωματίδια μιας νέας φάσης. Επίσης φαίνεται πως η κρυσταλλική δομή αλλάζει από μονοκλινική σε BBC κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας. Ακολουθεί η χημική σύσταση του κράματος 6082. (15)

Πίνακας 5, Χημική Σύσταση 6082

%	0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.2	0.1	0.25	Balance
Χημ. Στ.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al

1.5.2. Κράματα Αλουμινίου: 5083

Από το διάγραμμα Αλουμινίου – Μαγνησίου φαίνεται ότι η μέγιστη διαλυτότητα του μαγνησίου στο αλουμίνιο είναι πάνω από 15% κατά βάρος, ενώ σε θερμοκρασία δωματίου η τιμή αυτή διαμορφώνεται περί το 3%. Συνεπώς καθώς οι τυπικές περιεκτικότητες για το δεδομένο κράμα κυμαίνονται από 4% – 5% αναμένεται να υπάρχει συμμετοχή κατακρημνισμάτων της εδροκεντρωμένης, Al₃Mg₂ φάσης, γνωστής και ως β φάσης. Αναφέρεται ωστόσο, ότι η κατακρήμνιση της, απαιτεί εκτεταμένα χρονικά διαστήματα παραμονής σε εύρος 50 – 280°C και παρατηρείται στα όρια των κόκκων και έχουν αρνητική επίδραση στην αντοχή σε διάβρωση του υλικού (55). Η αντίδραση κατακρήμνισης τους είναι η εξής:

Υπέρκορεσμένο Στερεό Διάλυμα Απόψυξη → GP Ζώνες → β'' 4 → β' 5 → β6
Αντίδραση 1: Μεταλλουργική αντίδραση σχηματισμού κατακρημνισμάτων της β φάσης (56; 55)

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

Συγκολλήσεις Δια Τριβής με Ανάδευση Ανόμοιων Κραμάτων Αλουμινίου 5083 & 6082

1. (Mn,Fe)Al₆
2. (Cr,Fe)Al₇
3. Mg₃Mn₂Al₁₂

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι τα κράματα τις σειρές 5XXX έχουν μέτρια μηχανική αντοχή, η οποία όμως βελτιώνεται με ενδοτράχυνση εις βάρος της ολκιμότητας τους. Ακολουθεί η χημική Σύσταση του 5083 (15)

Πίνακας 6, Χημική Σύσταση 5083

Χημικό Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
%	1.07	0.28	0.04	0.7	1.15	0.024	0.04	0.015	Bal. (50)

1.6. Συγκόλληση

Με τον όρο **συνδέσεις (joining ή fastening)** αναφερόμαστε σε πολυάριθμες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να ενώσουν και να μορφοποιήσουν σε ενιαίο σύνολο επιμέρους τεμάχια, εξαρτήματα, κ.λπ. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης του μεγάλου αριθμού των μεθόδων σύνδεσης, όμως μια πρώτη θεμελιακή κατηγοριοποίηση αναφέρεται στη διάκριση μεταξύ μεταλλουργικών συνδέσεων (συγκολλήσεις) και μηχανικών συνδέσεων (ηλώσεις, κοχλιώσεις, συνδέσεις συναρμογής/πίεσης κλπ). Οι συνδέσεις διακρίνονται επίσης σε μόνιμες (μη λυόμενες) και λυόμενες. Οι συγκολλήσεις και οι ηλώσεις ανήκουν στις μόνιμες συνδέσεις ενώ οι κοχλιώσεις στις λυόμενες συνδέσεις. Η τεχνολογία των συγκολλήσεων, όπως την γνωρίζουμε και τη χρησιμοποιούμε σήμερα άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη του προηγούμενου αιώνα. Η ανάπτυξη αυτή βασίστηκε τόσο σε πρωτοποριακές ιδέες που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα σε διάφορες επιστημονικές περιοχές, όσο και στις άοκνες προσπάθειες πρακτικών ανθρώπων για την επίλυση καθημερινών και πρακτικών προβλημάτων. Με τον όρο συγκόλληση χαρακτηρίζεται η ένωση δύο ή περισσοτέρων μεταλλικών τεμαχίων με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιείται μεταξύ τους μεταλλουργική σύνδεση, ενώ σύμφωνα με την ευρωπαϊκή σύσταση «ECCC Recommendations» από το κεφάλαιο «Terms and terminology for welding processes and weld configurations» (1), ως συγκόλληση ορίζεται η ένωση δύο ή περισσοτέρων τεμαχίων με θερμότητα ή πίεση ή συνδυασμό των δύο έτσι ώστε τα υλικά να σχηματίζουν μία συνέχεια με ή χωρίς την χρήση υλικού πλήρωσης.



Εικόνα 15, Διαδικασία Συγκόλλησης. (126)

Λέγοντας **συγκόλληση** εννοούμε τη μέθοδο, κατά την οποία δύο υλικά, συνήθως μέταλλα, συνδέονται μόνιμα μεταξύ τους μέσω τοπικής πρόσφυσης, που επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας, πίεσης και μεταλλουργικών συνθηκών. Επειδή ο συνδυασμός θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να κυμαίνεται από υψηλή θερμοκρασία με καθόλου πίεση μέχρι υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία, η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί με μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων συγκόλλησης. (17)

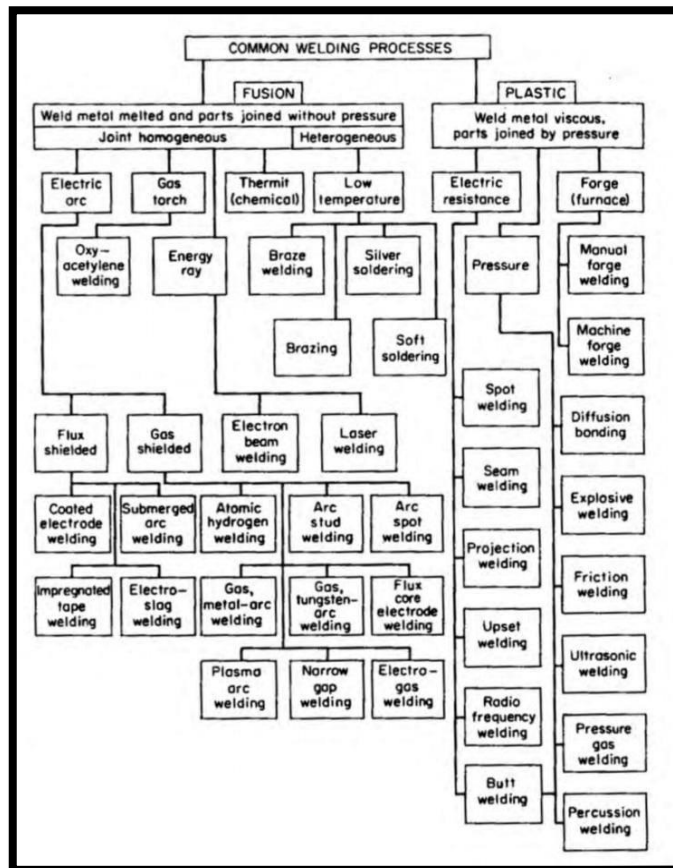
1.7. Ιστορική ανασκόπηση

Σήμερα ξέρουμε ότι η συγκόλληση μπρούτζου και η κασιπέρου ήταν γνωστές από την Εποχή του Χαλκού (7.000 με 1.000 π.Χ.), όπου η χρήση τους ήταν κυρίως για την κατασκευή κοσμημάτων και ειδών οικιακής χρήσης. Μπορούμε να πούμε ότι η τέχνη της κασιτεροκόλλησης χρυσού που ήταν γνωστή στο Ουρ της αρχαίας Μεσοποταμίας (Σουμερία) 5.000 χρόνια πριν, είναι ίδια με την τέχνη που

χρησιμοποιείται σήμερα στην Ευρώπη. (15) Παραδείγματα αποτελούν τα αντικείμενα που έχουν βρεθεί στην περιοχή , όπως σπαθιά συνδεδεμένα με σκληρή συγκόλληση (3.000π.Χ.), καθώς και ένα χρυσό κύπελλο διπλού τοιχώματος με χάλκινη λωρίδα γύρω από την περιφέρεια και ένα χρυσό κύπελλο με μία συρμάτινη στριφτή λαβή συγκολλημένη στην εξωτερική του πλευρά (τάφος Σουμερίας Βασίλισσας Puabi,3.000 π.Χ.). (1)

Η συγκόλληση με σφυρηλάτηση, μία ξεχασμένη τεχνική σήμερα, θεωρείται ως ο πρόδρομος των παραδοσιακών μεθόδων συγκόλλησης. Παραδείγματα εφαρμογής της τεχνικής αυτής σε χρυσό βρίσκονται σε μουσεία σε όλο τον κόσμο , ενώ μερικά από τα αντικείμενα χρονολογούνται από το μέσο της χάλκινης εποχής. Για την ίδια περίοδο υπάρχουν ακόμα ενδείξεις συγκόλλησης σιδήρου με σφυρηλάτηση, όπως προκύπτει από την ανακάλυψη ενός μικροσκοπικού σιδερένιου προσκέφαλου, βάρους μόλις 45 γραμμαρίων, στο εσωτερικό τα χρυσής σαρκοφάγου του Τουταγχαμόνα που χρονολογείται από το 1.350 π.Χ. . Το αντικείμενο αυτό φαίνεται ότι έχει κατασκευαστεί από δύο η περισσότερα κομμάτια σιδήρου, τα οποία συγκολλήθηκαν μεταξύ τους με κάποια δυσκολία. Επίσης, στον τάφο του Vizier Rekh-mi-re στις Θήβες (Αίγυπτος), βρέθηκε τοιχογραφία που απεικονίζει μία διαδικασία συγκόλλησης χάλκινων αντικειμένων (1.475 π.Χ.). (1)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλά μουσεία μπορεί κανείς να δει σήμερα αντικείμενα τα οποία έχουν προφανώς συγκολληθεί και που χρονολογούνται από του πρώτους αιώνες της Εποχής του Σιδήρου(1.200 π.Χ. -800 π.Χ.). Την εποχή αυτή, οι Αιγύπτιοι και άλλες φυλές της Ανατολικής Μεσογείου χρησιμοποιούσαν με επιτυχία τη συγκόλλησης με σφυρηλάτηση μεταξύ σιδηρούχων τεμαχίων. Παράδειγμα αποτελούν τα τέσσερα μικρά κουτιά συναρμολογημένα από φύλλα χρυσού με συγκόλλησης επικάλυψης μέσω πίεσης σφυρηλάτησης, που βρέθηκε στην κομητεία Roskommon, στην Ιρλανδία (1.000 π.Χ.-500 π.Χ) .Τον 7^ο αιώνα π.Χ., ο Γλαύκος ο Χίος, αρχαίος γλύπτης και περίφημος μεταλλουργός, εφηύρε πρώτος την τέχνη του να ενώνει δύο κομμάτια σιδήρου μεταξύ τους. Θεωρείται ο πρώτος άνθρωπος που πέτυχε συγκόλληση στον ελλαδικό χώρο. Όπως αναφέρει και ο Ηρόδοτος:



Εικόνα 16, Μέθοδοι συγκολλήσεων

«ὄτι Γλαῦκος τις Σάμιος πρῶτος σιδήρου κόλλησιν ἐξεῦρε»

Το 280 π.Χ. ανεγέρθηκε ο Κολοσσός της Ρόδου, που πιθανόν είναι η πρώτη μεγάλη σιδερένια κατασκευή. Ο σιδερένιος σκελετός του Κολοσσού της Ρόδου ήταν καλυμμένος από φύλλα μπρούντζου. Σύμφωνα με τον αρχαίο Έλληνα μαθηματικό Φίλωνα, οι πάνω από 40 μέτρα μήκος σιδερένιες ράβδοι, που ζύγιζαν περίπου 7,5 τόνους, φαίνεται ότι είχαν ενωθεί μεταξύ τους σε κατάλληλα σημεία με «σφυρηλάτηση χρησιμοποιώντας Κυκλώπεια δύναμη» .

Το 60 μ.Χ., ο Γάιος Πλίνιος Σεκούνδος, Ρωμαίος φυσικός , φιλόσοφος και ιστοριογράφος, γράφει για τη συγκόλληση του χρυσού και τα άλατα που παρασκευάζονταν για την τήξη. Περιγράφει το χρώμα οξειδία του μετάλλου και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ευκολία ή δυσκολία της συγκόλλησης. Πολύ αργότερα γύρω στα 400 μ.Χ. κατασκευάζεται η μεγάλη συγκολλητή κατασκευή βάρους περίπου 6 τόνων και ύψους 23 πόδια και 4 ίντσες. Πρόκειται για τον Σιδήρου Πυλώνα στο Νέο Δελχί της Ινδίας. Ανάλογες κατασκευές έγιναν εκείνη την περίοδο στην Ρώμη, στην Σκανδιναβία και στην Αγγλία. Το 1540 στη Βενετία, εκδίδεται η “Pirotechnia” του Ιταλού μεταλλουργού Vannoxio Biringuccio. Στην “Pirotechnia”, ο Biringuccio περιγράφει διάφορες τεχνικές συγκολλήσεων, όπως τον τρόπο συγκόλλησης θραυσμένων αντικειμένων όπως πριόνι, δρεπάνι , σπαθί με αργυρό, βόρακα ή θρυμματισμένο γυαλί.

Τέλος η βελτίωση των μεθόδων παραγωγής σιδήρου από τον 16ο αιώνα και ιδιαίτερα η ευρεία χρήση του χυτοσιδήρου, περιόρισαν την εφαρμογή της συγκόλλησης στους σιδεράδες και στους κοσμηματοποιούς. Άλλες μέθοδοι ένωσης, όπως με βίδες ή καρφιά, βρήκαν μεγάλη εφαρμογή σε νέες κατασκευές, όπως γέφυρες και τρένα. Η ανάπτυξη των σημερινών μεθόδων συγκόλλησης προέκυψε από την ανάγκη επίτευξης συνεχών ραφών σε μεγάλα χαλύβδινα ελάσματα. Ωστόσο με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας παρατηρείται ολοένα και περισσότερο η κλίση προς τις συγκολλήσεις όταν πλέον αναφερόμαστε στην ένωση δύο ή περισσότερων υλικών μεταξύ τους. (15)

Στη συνέχεια ακολουθούν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία εμφανίζουν οι συγκολλήσεις σε σχέση με άλλους τρόπους σύνδεσης όπως οι κοχλιώσεις ή ηλώσεις: (18)

Πίνακας 7,Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Συγκολλήσεων

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Βελτίωση αντοχής της σύνδεσης (στις συγκολλήσεις μπορούμε να φτάσουμε το 100% της αντοχής του βασικού υλικού)	Πιθανότητα δημιουργίας σφαλμάτων (πόροι, εγκλείσματα, ρωγμές)
Μείωση ηχορύπανσης	Δυσκολία συγκόλλησης ορισμένων κραμάτων (χάλυβες υψηλής αντοχής, τιτάνιο κλπ.)
Πλήρης στεγανότητα της συνδέσεις	Μη αξιοπιστία των μη καταστρεπτικών ελέγχων συγκολλήσεων κατά 100 %
Οικονομία του υλικού, αναφέρεται συγκεκριμένα ότι σε περιπτώσεις πλοίων	Δημιουργία παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων –στρεβλώσεων (

η μείωση του βάρους αγγίζει το 20%	επίδραση στα φαινόμενα θραύσης, λυγισμού, κλπ.)
Μεγάλη ποικιλία γεωμετριών	Είναι μη αντιστρεπτές συνδέσεις
Απλούστερες κατασκευές	Απαιτούν τεχνίτες (συγκολλητές) με ιδιαίτερες ικανότητες
Μείωση χρόνου και κόστους κατασκευής	Η υλοποίηση τους μπορεί να προϋποθέτει προθέρμανση ή μεταθέρμανση των προς συγκόλληση υλικών
	Δυσκολία σύλληψης ρωγμών (δεν είναι πάντοτε ορατές)

1.8. Γεωμετρία Σύνδεσης

Ανάλογα με τη σχετική θέση των προς συγκόλληση τεμαχίων προκύπτουν διάφορες γεωμετρίες συναρμογών, από τις οποίες διακρίνονται πέντε βασικοί γεωμετρικοί τύποι σύνδεσης (joint types) μεταξύ δύο μελών. Πιο συγκεκριμένα είναι η:

- Σύνδεση κατά συμβολή (butt joint)
- Γωνιακή σύνδεση (corner joint)
- Σύνδεση T (T - joint)
- Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint)
- Σύνδεση κατά ακμή (edge joint) Κάθε ένας από τους παραπάνω γεωμετρικούς τύπους σύνδεσης μπορεί προφανώς να υλοποιηθεί με διάφορες μεθόδους συγκόλλησης. (15)

1.8.1. Σύνδεση κατά συμβολή ή μετωπική σύνδεση

Η **μετωπική σύνδεση (butt joint)** αφορά τη σύνδεση μεταξύ δύο ελασμάτων που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Οι μετωπικές συγκολλήσεις , ανάλογα με την προετοιμασία των ακμών των ελασμάτων που θα συνδεθούν (πάχος και σχετική θέση). Διακρίνονται σε κλειστού τύπου, ανοικτού τύπου, τύπου V,X,J,U.

Η **μετωπική συγκόλληση κλειστού τύπου ή κλειστής συμβολής** πραγματοποιείται όταν οι ακμές των υπό συγκόλληση ελασμάτων έρχονται σε επαφή χωρίς καμία διαμόρφωση. Η συγκόλληση μπορεί να γίνει από τη μία ή και από τις δύο πλευρές . Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η συγκόλληση ελασμάτων πάχους μέχρι 3 χιλιοστών από την μία πλευρά ή 5 -6 χιλιοστών και από τις δύο πλευρές.

Η **μετωπική συγκόλληση ανοικτού τύπου ή ανοικτής συμβολής** πραγματοποιείται με απομάκρυνση των ακμών των ελασμάτων, έτσι ώστε να δημιουργείται διάκενο (gap) μεταξύ τους, συνήθως ίσο προς το μισό του πάχους τους. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η συγκόλληση ελασμάτων πάχους μέχρι 6 χιλιοστά και από τις 2 πλευρές. Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή η αμφίπλευρη συγκόλληση, είναι δυνατόν να γίνει συγκόλληση πλήρους διεϊσδυσης των ελασμάτων από τη μία μόνο πλευρά, με την βοήθεια επικαλύπτρας. Συνήθως χρησιμοποιείται επικαλύπτρα σε μορφή ταινίας. Πρόκειται για ταινία σε μορφή

ελάσματος πάχους 3 ή 4 χιλιοστών από το ίδιο υλικό ή υλικό συμβατό με αυτό των ελασμάτων, η οποία παραμένει στη θέση της και μετά το πέρας της συγκόλλησης. Σκοπός της είναι η συγκράτηση του τηγμένου μετάλλου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η συγκόλληση ελασμάτων πάχους μέχρι 16 χιλιοστών. Ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων, το διάκενο κυμαίνεται από 6 μέχρι 10 χιλιοστά. Ωστόσο αναφέρεται η ύπαρξη δύο ειδών επικαλύπτρας από τα οποία η μία είναι η επικαλύπτρα μορφής διαμορφωμένης ράβδου και η άλλη είναι η κεραμική επικαλύπτρα. Η πρώτη μπορεί να είναι από χαλκό ή από κάποιο άλλο υλικό υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, δεν ενσωματώνεται μέσα στην ένωση και απομακρύνεται μετά το πέρας της συγκόλλησης, η δεύτερη μπορεί να έχει μορφή ράβδου ή ταινίας και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις λεπτών εργασιών, εργασιών με ομαλό εσωτερικό προφίλ που απαιτείται απομάκρυνση μετά το πέρας της συγκόλλησης.

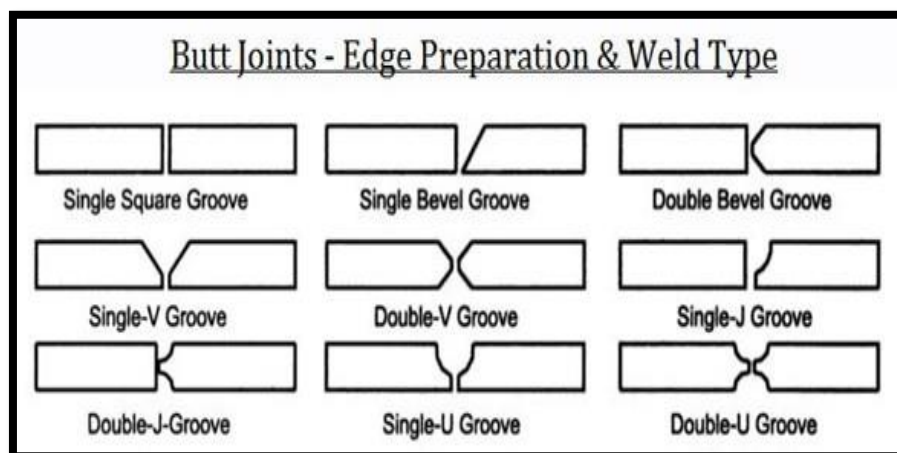
Η μετωπική συγκόλληση τύπου V (single –V & single bevel groove) πραγματοποιείται σε περιπτώσεις μεγαλύτερων παχών ελασμάτων, με κατάλληλη διαμόρφωση των ακμών τους. Στην τυπική συγκόλληση τύπου V, οι ακμές των ελασμάτων διαμορφώνονται, έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία φ και τα ελάσματα να πλησιάζουν σε απόσταση g μεταξύ τους, όπου g η απόσταση μεταξύ των προς συγκόλληση δοκιμίων. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η αποφυγή των λεπτών ακμών των ελασμάτων, τότε διαμορφώνεται και αυχένας. Για μεγάλα ανοίγματα είναι επιβεβλημένη η χρήση επικαλύπτρας.

Η συγκόλληση τύπου X – διπλού v (double-V or double bevel groove) πραγματοποιείται σε πολύ παχιά ελάσματα, όταν η διαμόρφωση τύπου V οδηγεί σε πολύ μεγάλες ποσότητες προστιθέμενου μετάλλου, ενώ συγχρόνως η συγκόλληση από τη μία μόνο πλευρά δημιουργεί μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Με τη συγκόλληση αυτού του τύπου μπορούν να συγκολληθούν ελάσματα απεριορίστου πάχους. Η μόνη δυσκολία στην συγκεκριμένη μορφή εμφανίζεται στην διαμόρφωση των ακμών.

Η συγκόλληση τύπου J (single –J and double –J groove) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ελάσματα κάθε πάχους.

Η συγκόλληση τύπου U (single –U and double –U groove) πραγματοποιείται στην περίπτωση που οι ακμές του αυχένα των ελασμάτων έρχονται σε τέλεια επαφή.

Στην περίπτωση οροφιαίας συγκόλλησης, η γωνία φ είναι ίση με 20°. Ο τύπος αυτός χρησιμοποι



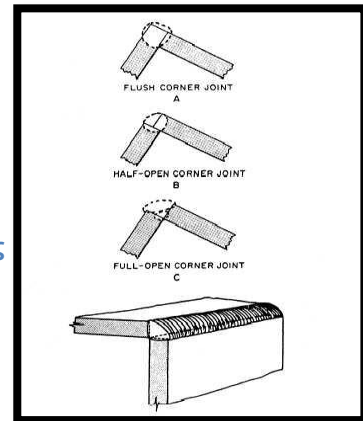
Εικόνα 17, Μορφές Butt Joint (127)

είται κυρίως σε ελάσματα πάχους πάνω από 20 mm. Η αμφίπλευρη U χρησιμοποιείται για την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων. Παρακάτω ακολουθεί εικόνα με όλες τους προαναφερόμενους τρόπους μετωπικής συγκόλλησης.

1.8.2. Γωνιακή σύνδεση

Η γωνιακή σύνδεση (corner joint) αφορά στη σύνδεση μεταξύ δύο ελασμάτων που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία περίπου 90°. Η μορφή της γωνιακής ραφής μπορεί να είναι κυρτή, επίπεδη ή κοίλη. Επίσης μπορεί να λαμβάνει χώρα από τη μία ή και από τις δύο πλευρές. Παρακάτω στην εικόνα παρουσιάζονται και άλλα είδη γωνιακής

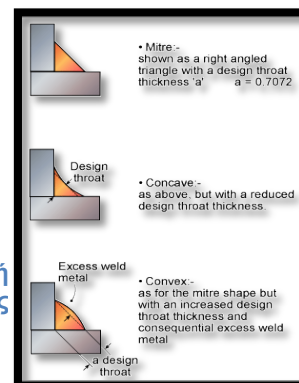
Εικόνα 18, Μορφή Γωνιακής Σύνδεσης (125)



1.8.3. Αυχενική σύνδεση

Η αυχενική σύνδεση ή σύνδεση τύπου ταφ (fillet weld or tee joint) είναι ο συνηθέστερος τύπος συγκόλλησης που εφαρμόζεται στη ναυπηγική. Θεωρητικά, η γωνία που σχηματίζει το μέταλλο συγκόλλησης με κάθε έλασμα είναι 45°. Δεν απαιτείται προετοιμασία των ακμών, εκτός από εξαιρετικές περιπτώσεις όπου η συγκόλληση δεν πρέπει να προεξέχει, ακόμα, δεν απαιτείται η ύπαρξη διακένου μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων. Η αντοχή της συγκόλλησης εξαρτάται από το πάχος a , με την προϋπόθεση επαρκούς διεύθυνσης. Επειδή συνήθως τα ελάσματα βρίσκονται σε γωνία 90° μεταξύ τους, εξασφαλίζεται εξαιρετική ευχέρεια συγκόλλησης και ορατότητα σε όλες τις θέσεις.

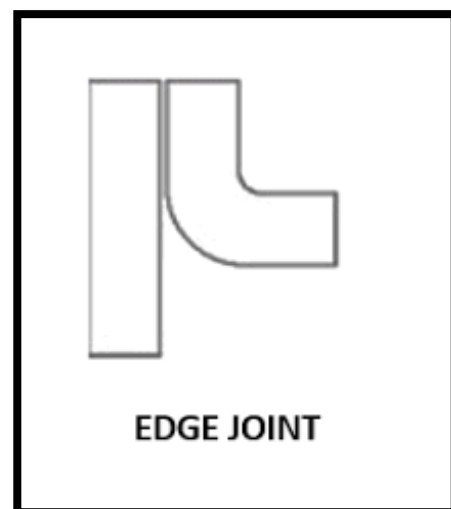
Εικόνα 19, Μορφή Αυχενικής Σύνδεσης (128)



1.8.4. Σύνδεση κατ' ακμή

Η σύνδεση κατ' ακμή (edge joint) αφορά τη σύνδεση μεταξύ των ακμών δύο ή περισσότερων παράλληλων ή περίπου παράλληλων ελασμάτων. Σε αυτό το είδος σύνδεση, το μέταλλο συγκόλλησης καλύπτει μέρος μόνο του συνολικού πάχους των σε επαφή ακμών. Για αυτόν τον λόγο, η σύνδεση κατ' ακμή δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε κατασκευές που βρίσκονται υπό τάση. (15)

Εικόνα 20, Μορφή Σύνδεσης κατ' ακμής. (125)



1.9. Συγκολλήσεις σε Αλουμίνιο και των κραμάτων του

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο που συναντάται πολύ συχνά στις κατασκευές και επομένως και στις συγκολλήσεις, είτε σε καθαρή μορφή είτε σε μορφή κράματος. Στην καθαρή του μορφή το αλουμίνιο είναι ελαφρύ και όλκιμο. Η καθαρότητα του και το ποσοστό ενδοτράχυνσης που υφίσταται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του, επηρεάζουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Η μεγάλη του χημική συγγένεια με το οξυγόνο οδηγεί στην άμεση οξειδωση του στην ατμόσφαιρα και στη δημιουργία ενός επιφανειακού, λεπτού και συνεχούς στρώματος Al_2O_3 . Το στρώμα αυτό προσφέρει στο μέταλλο αντιδιαβρωτική προστασία, καθώς και παθητικοποιεί την επιφάνεια, καθιστώντας την αδιαπέραστη από το οξυγόνο.

Το καθαρό αλουμίνιο, αλλά και τα κράματα του, μπορούν να συγκολληθούν εύκολα, ωστόσο υπάρχουν ορισμένες προϋποθέσεις για μία καλή συγκόλληση, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Όλα τα κράματα αλουμινίου είναι ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά τη διάρκεια του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης, δημιουργείται θερμικά επηρεασμένη ζώνη, που αντιστοιχεί σε μία περιοχή όπου το υλικό έχει «μαλακώσει». Το επίπεδο της μείωσης της σκληρότητας εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

- Το κράμα αλουμινίου
- Τη θερμοκρασία
- Τη μέθοδο συγκόλλησης
- Τις παραμέτρους συγκόλλησης

Τα κράματα του αλουμινίου, που επιδέχονται θερμική κατεργασία, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υπεργήρανσης (overaging) όταν συγκολλούνται. Οι αντιδράσεις της γήρανσης, που λαμβάνουν χώρα στο μέταλλο συγκόλλησης και στην ΘΕΖ είναι υπεύθυνες για την ανάπτυξη ή μη υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων στα ισχυροποιημένα με κατακρήμνιση υλικά. Η σύσταση του υλικού πλήρωσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς μπορεί να προκαλέσει έντονη ρηγμάτωση στο μέταλλο συγκόλλησης, κυρίως στην περίπτωση θερμικώς κατεργάσιμων υλικών. Η κατάσταση αυτή μπορεί να αποφευχθεί με χρήση μη –θερμικά κατεργάσιμων υλικών πλήρωσης όπως $Al-5\%Si$ και $Al-5\%Mg$. Όταν όμως χρησιμοποιούνται τέτοιους είδους υλικά, η αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης μειώνεται σε σχέση με αυτή του μετάλλου βάσης και δεδομένου ότι η περιοχή της συγκόλλησης ελάχιστα ανταποκρίνεται σε θερμική κατεργασία, αυτό δεν μπορεί να διορθωθεί, ακόμη και μετά από πλήρη διαλυτοποίηση στα φάση α και επακόλουθη γήρανση. Τέλος, μία απλή κατεργασία κατακρήμνισης μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες της σύνδεσης χωρίς να απαιτείται πλήρης θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση. Όταν ένα υλικό παρουσιάζει πλήρως θερμική κατεργασία εμφανίζει τρεις ξεχωριστές περιοχές μέσα στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

1. Μία περιοχή που βρίσκεται δίπλα στη ραφή. Εκεί, η θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία SOLVUS του κράματος και τα κατακρημνίσματα υφίστανται διαλυτοποίηση
2. Μία περιοχή στην άκρη της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, αντιδιαμετρικά από τη ραφή. Εκεί η μέγιστη θερμοκρασία μόλις υπερβαίνει (ή και όχι) τη

θερμοκρασία γήρανσης. Παρατηρούνται πολύ μικρές αλλαγές στο δομή και στις ιδιότητες.

3. Μία ενδιάμεση περιοχή (μεταξύ των δύο παραπάνω). Εκεί η θερμότητα συγκόλλησης συνήθως προκαλεί υπεργήρανση. Το υλικό γίνεται πιο μαλακό.

Εάν πραγματοποιηθεί κάποια κατεργασία τεχνητής γήρανσης μετά το πέρας της συγκόλλησης είναι πιθανόν να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση του μεγέθους των κατακρημνισμάτων, με αποτέλεσμα να μειωθεί η αντοχή. Η πλήρης αντοχή της συγκόλλησης μπορεί να ανακτηθεί με μία σειρά κατεργασιών η οποία περιλαμβάνει, διαλυτοποίηση, απότομη ψύξη και τεχνητή γήρανση. Γενικά προτιμάται η χρήση προς συγκόλληση ελασμάτων που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σκλήρυνσης μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος ή πλήρως ανοπτημένων ελασμάτων. Όμως θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Έτσι, για μεγάλες συγκολλητές κατασκευές μπορεί να μην διατίθενται ικανοί σε μεγέθους φούρνοι, ώστε να πραγματοποιείται η θερμική κατεργασία.

1.10. Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding)

Η **συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW)** είναι μία μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης η οποία εισήχθη από το Ινστιτούτο Συγκόλλησης στην Μεγάλη Βρετανία το 1991(The Welding Institute- TWI), και θεωρείται από τις πλέον σημαντικές εξελίξεις στη σύνδεση μετάλλων τα τελευταία χρόνια. Η βάση της μεθόδου, έχει ως εξής: οι προς συγκόλληση μεταλλικές πλάκες τοποθετούνται παράπλευρα και υποστηρίζονται από μία πλάκα υποστήριξης. Ένα μη **καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο** εργαλείο με περιαυχένιο που καταλήγει σε έναν ειδικά σχεδιασμένο πείρο βυθίζεται στο σημείο επαφής των πλακών και περιστρέφεται ενώ παράλληλα κινείται και κατά μήκος της επαφής. Οι προς συγκόλληση πλάκες βρίσκονται πακτωμένες προκειμένου να παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η θερμότητα που παράγεται μέσω τριβής στην επαφή του περιαυχενίου με το δοκίμιο «μαλακώνει» το προς συγκόλληση μέταλλο, ενώ η θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται πρέπει να είναι μικρότερη από την θερμοκρασία τήξης του υλικού, καθώς αναφερόμαστε σε μία τεχνική συγκόλλησης **στερεάς** κατάστασης. Κατά την κίνηση του εργαλείου στην κατεύθυνση της συγκόλλησης λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση και καθώς το υλικό μεταφέρεται από την εμπρόσθια στην οπίσθια άκρη του εργαλείου πραγματοποιείται η σύνδεση. Στις συγκολλούμενες πλάκες διακρίνονται η πλευρά προώθησης (το ήμισυ όπου η κατεύθυνση της περιστροφής είναι ίδια με την κατεύθυνση της συγκόλλησης) και η πλευρά υποχώρησης. Αυτή η διαφορά δύναται να οδηγήσει σε ασυμμετρία στη ροή του υλικού, στη μεταφορά της θερμότητας και στις ιδιότητες μεταξύ των δύο πλευρών. (17)

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αρχικά χρησιμοποιήθηκε για κράματα αλουμινίου όμως τα τελευταία χρόνια η μέθοδος εφαρμόζεται και σε άλλα μεταλλικά κράματα. Η μέθοδος έχει βρει ευρεία χρήση στη διαστημική τεχνολογία όπου χρησιμοποιούνται αλουμίνια υψηλής αντοχής. Επίσης ολοένα και αυξάνονται οι

εφαρμογές στη ναυπηγική, την κατασκευαστική βιομηχανία, τους σιδηροδρόμους και τη βιομηχανία αυτοκινήτων. Η μέθοδος έδωσε λύση στην ανάγκη συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής που μέχρι πρότινος θεωρούνταν ασύμφορο ή αδύνατο να συγκολληθούν με συμβατικές μεθόδους.

1.10.1. Το εργαλείο

Ο ρόλος του εργαλείου στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι διπλός. Αφενός παράγει θερμότητα, μέσω της τριβής του πείρου και του δοκιμίου, αφετέρου προκαλεί την ανάδευση των δύο υλικών. Η παραγόμενη θερμότητα είναι υπεύθυνη για την πλαστικοποίηση των υλικών. Εν γένει χρησιμοποιούνται κοίλα περιαιχένια και πείροι με σπείρωμα. Η γεωμετρία του εργαλείου επηρεάζει τη ροή του



Εικόνα 21, Πείρος (129)

υλικού, την παραγωγή θερμότητας, την απαιτούμενη δύναμη, και την ομοιογένεια της ραφής. Ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα και ακολουθώντας τα πειραματικά και ερευνητικά συμπεράσματα που αποσαφηνίζουν το ρόλο της γεωμετρίας του εργαλείου στην κάθε πτυχή της κατεργασίας, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι εργαλείων. (4)

Η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στην κατεργασία της συγκόλλησης. Από αυτήν εξαρτάται η ποιότητα της συγκόλλησης, καθώς και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί. Το εργαλείο έχει δύο βασικούς σκοπούς : αρχικά να θερμαίνει τοπικά και, στη συνέχεια, να βοηθά στη ροή του υλικού. Το σχετικό μέγεθος τόσο του πείρου (κεφαλής) όσο και του περιαιχενίου παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή θερμότητας (λόγω τριβής). Η σχεδίαση του εργαλείου επηρεάζει, επίσης, τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού.

Το υλικό του εργαλείου συγκόλλησης διαφέρει ανάλογα με το προς συγκόλληση υλικό και το προσδόκιμο ζωής τους εργαλείου. Για παράδειγμα , για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιούνται εργαλεία από θερμικά κατεργασμένους χάλυβες , ενώ για συγκολλήσεις χαλύβων χρησιμοποιούνται εργαλεία από πυρίμαχα υλικά (W W+Re) και αντιτριβικά (νιτρίδια του B και του Si). Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού εργαλείου είναι :

- Αντοχή σε θλιπτικά φορτία (κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες)
- Καλές μηχανικές ιδιότητες, διατήρηση διαστάσεων και αντοχή σε ερπυσμό
- Αντοχή σε θερμομηχανική κόπωση (ανταπόκριση σε εναλλαγές θερμικών κύκλων)

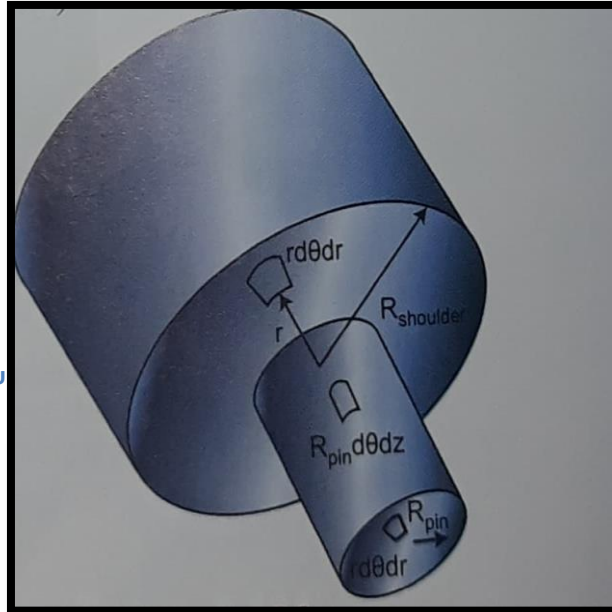
- Καμία αντίδραση κατά την επαφή του με το μέταλλο συγκόλλησης
- Αυξημένη δυσθραυστότητα
- Χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής (μείωση θερμικών τάσεων)
- Απλή κατασκευή
- Χαμηλό κόστος

1.11. Παραγόμενη θερμότητα

Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί με τους εξής τρόπους, υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε τρεις επιφάνειες.

Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω του υπολογισμού της συνολικής θερμότητας, όπου η παραγόμενη θερμότητα ισούται με το γινόμενο της δύναμης και της σχετικής ταχύτητας. (18)

Εικόνα 22, Γεωμετρία του Εργαλείου (18)



Εξίσωση 1, Παραγόμενη Θερμότητα, σε σχέση με την αξονική δύναμη

$Q = [(1-\delta)\eta\tau + \delta\mu_f P](rd\theta dr)(\omega r - U\sin\theta)$, όπου :

- δ = συντελεστής ολίσθησης(fractional slip)
- η = μηχανικός βαθμός απόδοσης (mechanical efficiency)
- τ = διατμητική τάση (shear yield strength)
- r, θ =κυλινδρικές συντεταγμένες
- μ_f = συντελεστής τριβής(coefficient of friction)
- P = κατακόρυφη πίεση (axial pressure)
- ω = περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)
- U = ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed)

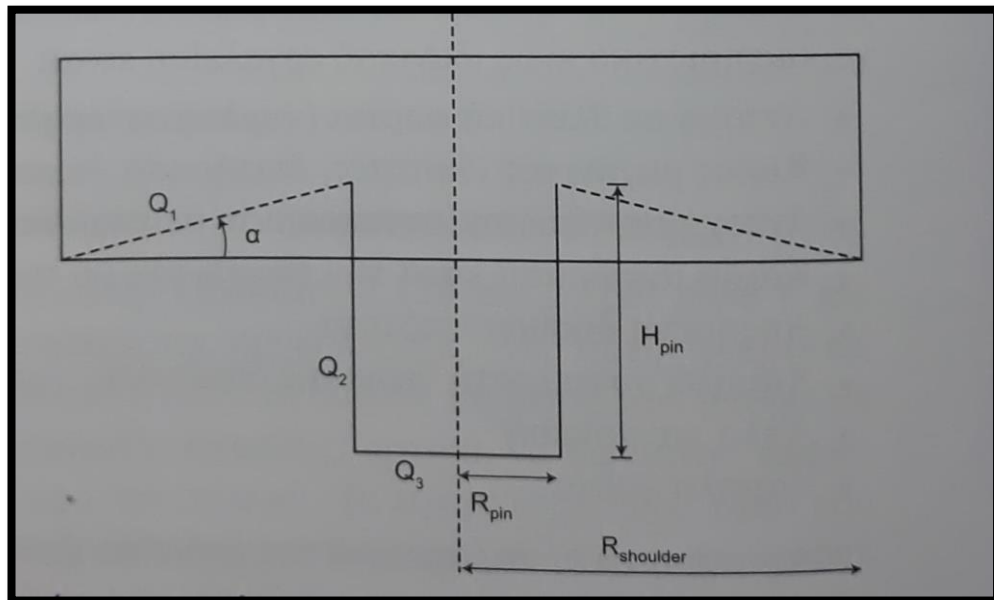
Ο δεύτερος τρόπος αφορά τον υπολογισμό της θερμότητας κάθε επιφάνειας ξεχωριστά όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα : (17)

- $Q_1 = 2\pi(1 + \tan \alpha)T_{\text{shear}} (R_{\text{shoulder}}^3 - R_{\text{pin}}^3)$
- $Q_2 = 2(\pi T_{\text{shear}} R_{\text{pin}}^2 \omega)$
- $Q_3 = 2/3 (\pi T_{\text{shear}} R_{\text{pin}}^3 \omega)$

- $Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Εξίσωση 2, Παραγόμενη Θερμότητα σε σχέση με την επιφάνεια του εργαλείου

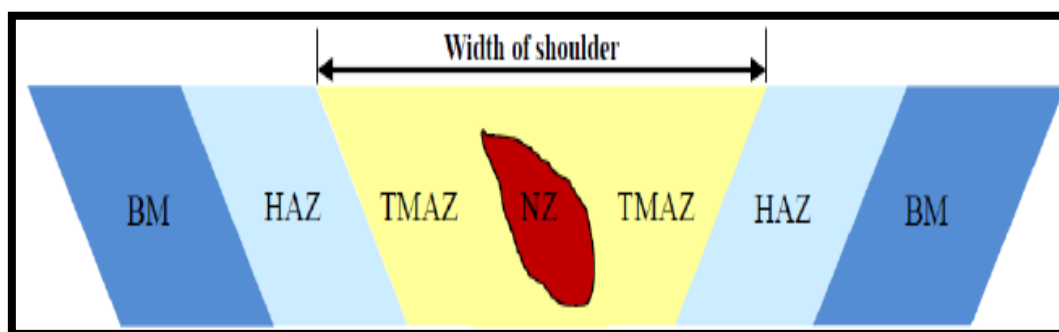
Τα εργαλεία Whorl και MX-triflute έχουν μικρότερο όγκο πείρου σε σχέση με τα κυλινδρικά εργαλεία, και κάνουν εφικτή τη συγκόλληση μεγαλύτερου πάχους. Το σπείρωμα στην γεωμετρία Whorl διευκολύνει τη ροή του υλικού, ενώ το σωληνοειδές στο MX triflute αυξάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ εργαλείου-δοκιμίου κάτι που αυξάνει την παραγωγή θερμότητας, τη πλαστικοποίηση και τη ροή του υλικού. Έτσι, καθώς επιτυγχάνεται ισχυρότερη ανάδευση, μειώνεται η δύναμη που προκαλεί την εγκάρσια κίνηση του εργαλείου και η στρέψη συγκόλλησης (16). Τα εργαλεία Flared triflute και A-skew σχεδιάστηκαν προκειμένου να επιτευχθεί πιο πλατιά ραφή. Και οι δύο αυτές γεωμετρίες αυξάνουν την έκταση της ανάδευσης δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για ραφές μεγαλύτερου πλάτους και βελτιώνουν την ποιότητα στη ρίζα της συγκόλλησης. Τέλος το re-stir εργαλείο που περιοδικά περιστρέφεται αντίθετα με την κατεύθυνση της περιστροφής σχεδιάστηκε προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα ασυμμετρίας στην παραγωγή της θερμότητας και τη ροή του υλικού. (18)



Εικόνα 23, Γεωμετρία Πείρου (18)

1.12. Μεταλλουργία ζωνών συγκόλλησης

Οι συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον στην μικροδομή του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ο πείρος ή κεφαλή του εργαλείου συγκόλλησης δημιουργεί την **ζώνη ανάδευσης (WNZ)**. Αριστερά και δεξιά της ζώνης ανάδευσης ακολουθεί η **θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ)** και έπειτα, η **θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ)**, ενώ στο τέλος διακρίνουμε το **βασικό μέταλλο (BM)**.



Εικόνα 24, Παραγόμενες Ζώνες Συγκόλλησης (125)

Η μικροδομή μιας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η θερμοκρασία εξαρτάται από:

- Την περιστροφική κίνηση του εργαλείου.
- Το σχεδιασμό του εργαλείου (γεωμετρία εργαλείου).
- Την οριζόντια ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου.
- Την κάθετη πίεση από το περιαιχένιο.
- Το υλικό κατεργασίας (δύο τεμάχια) Τα παραπάνω καθιστούν δύσκολη την περιγραφή της μικροδομής του κατεργαζόμενου δοκιμίου. Λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών σχημάτων που μπορεί να έχει η κεφαλή, η κίνηση του υλικού είναι αρκετά σύνθετη.

Κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε θερμοκρασίες αρκετά κοντά στις θερμοκρασίες τήξης, με αποτέλεσμα, τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής. Η λεπτόκοκκη αυτή μικροδομή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση προσδίδει στο μέταλλο αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες.

Η στερεάς κατάστασης φύση της συγκόλλησης αυτής σε συνδυασμό με το ασυνήθιστο εργαλείο συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα μία ιδιαίτερα χαρακτηριστική μικροδομή. Η μικροδομή αυτή αποτελείται από 5 ζώνες συγκόλλησης, οι οποίες παρατηρούνται στο προαναφερόμενο σχήμα. (18)

1.12.1. Ζώνη ανάδευσης [Weld nugget – WNZ (Δ)]:

Η ζώνη ανάδευσης ή πυρήνας συγκόλλησης που αποτελεί την περιοχή η οποία βρίσκεται στη θέση όπου εφαρμόζεται ο πείρος συγκόλλησης. Ο πυρήνας συγκόλλησης έχει μέγιστο πλάτος ίσο με τη διάμετρο του περιαιχενίου και μέγιστο ύψος περίπου ίσο με το μήκος του πείρου. Το μέγεθος και το σχήμα του πυρήνα

συγκόλλησης εξαρτάται σημαντικά από την παραγόμενη θερμότητα, καθώς και από το μέγεθος και την γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης. Αποτελεί ουσιαστικά μία θερμομηχανικά επηρεασμένη και δυναμικά ανακρυσταλλωμένη περιοχή, η οποία αποτελείται από ισοαξονικούς κόκκους με πολύ μικρό μέγεθος. Το μέγεθος των κόκκων του WN είναι συνήθως μικρότερο από αυτό του μητρικού υλικό, αλλά αυτό εξαρτάται κυρίως από την κατάσταση στην οποία έχει διαμορφωθεί το υλικό (πχ, Ο Η111, Η14 κ.τ.λ.), άρα και κατά συνέπεια από το είδος της δυναμικής ανακρυστάλλωσης που θα πραγματοποιηθεί (3). Επιπροσθέτως χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής είναι η πιθανή εμφάνιση μια δακτυλοειδούς δομής αποτελούμενης από παραμορφωμένους ομόκεντρους κύκλους, η οποία όμως δεν εμφανίζεται πάντα, καθώς επηρεάζεται άμεσα από τις παραμέτρους τις διαδικασίας (περισσότερο από την ταχύτητα περιστροφής και τον πείρο) και είναι καθοδηγούμενη και πλήρως εξαρτώμενη από την δημιουργούμενη ροή υλικού (4) (5).

1.12.2. Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη [Thermomechanically affected zone – TMAZ]

Στην περιοχή αυτή το εργαλείο, θα επιδράσει πάνω στο υλικό, όπως επίσης και η θερμότητα που αναπτύσσεται, ενώ η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται εκατέρωθεν το πυρήνα συγκόλλησης. Η ζώνη αυτή αποτελείται από παραμορφωμένους κόκκους σχετικά μικρού μεγέθους. Διαφέρει από τον πυρήνα συγκόλλησης καθώς :

- Παρατηρούνται κόκκοι διαφορετικής μορφολογίας από αυτούς του πυρήνα συγκόλλησης
- Αναπτύσσονται διαφορετικά φαινόμενα δυναμικής επαναφοράς , τα οποία συνήθως είναι η δυναμική αποκατάσταση ή η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση λόγω των διαφορετικών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και ασκούμενων παραμορφώσεων. (3), (6).

1.12.3. Θερμικά επηρεασμένη ζώνη [(Heat affected zone – HAZ]

Η συγκεκριμένη ζώνη βρίσκεται σε όλα τα είδη συγκόλλησης με τη διαφορά ότι κατά την FSW εμφανίζει πολύ καλύτερες ιδιότητες λόγω των μικρότερων αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών (17) .Η ζώνη αυτή επηρεάζεται μόνο θερμικά, χωρίς να υφίσταται ανακρυστάλλωση ή πλαστική παραμόρφωση. Εμφανίζει κόκκους μεγαλύτερους από αυτούς του υλικού βάσης , ενώ στην ζώνη αυτή μπορεί να συμβεί στατική ανακρυστάλλωση ή μεγέθυνση των κόκκων, λόγω διάχυσης (3).

1.12.4. Ζώνη βασικού μετάλλου [Unaffected material – P.M.]

Η περιοχή αυτή, βρίσκεται μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης, δεν έχει παραμορφωθεί και παρόλο που θα υποβληθεί στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης, δεν έχουμε καμία μεταβολή στην δομή του μετάλλου, γιατί η

Θερμότητα που αναπτύσσεται είναι πολύ χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες παραμένουν ίδιες με το αρχικό υλικό.

1.12.5. Flow Arm

Το Flow Arm, είναι μία περιοχή η οποία βρίσκεται άνωθεν του πυρήνα συγκόλλησης, η οποία όμως εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση της μεταφερόμενης ροής υλικού από την υποχωρούσα προς την προωθούμενη πλευρά, συνεπώς και δεν είναι πάντα υπαρκτή. Κατά συνέπεια αποτελείται από μία θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη με αρκετά παραμορφωμένους κόκκους και απαρτίζεται από υλικό το οποίο βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά.

1.13. Παράμετροι της Friction Stir Welding

Η F.S.W., όπως και οι περισσότερες κατεργασίες επηρεάζονται σημαντικά από διάφορες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί έχουν καθοριστικό ρόλο στην παραγόμενη θερμότητα, άρα και στις μεταλλουργικές συνθήκες που θα προκύψουν, επηρεάζοντας την ποιότητα, τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων δοκιμίων. Οι προαναφερόμενοι παράγοντες είναι οι εξής: (15)

- Ταχύτητα περιστροφής
- Ταχύτητα συγκόλλησης
 - Πείρος
 - Περιαιχένιο
- Κάθετη αξονική δύναμη
- Επιλογή του κράματος για την προωθούμενη ή υποχωρούσα πλευρά
- Κλίση του εργαλείου συγκόλλησης
- Υλικό της τράπεζας υποστήριξης

1.13.1. Ταχύτητα Περιστροφής

Αποτελεί μία εκ των δύο βασικότερων παραμέτρων κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Η περιστροφή του εργαλείου συγκόλλησης είναι αυτή η οποία προκαλεί την ανάμειξη του υλικού. Μέσω της περιστροφής ωστόσο, επιτυγχάνεται και η ανάπτυξη θερμότητας η οποία με την σειρά της προκαλεί την πλαστικοποίηση των δύο προς συγκόλλησης υλικών. Οι υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής ωστόσο, επιφέρουν και ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών, λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού παραγόμενης θερμότητας μέσω της τριβής .

Η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα και την έκταση του πυρήνα συγκόλλησης. Σε αρκετά υψηλές ταχύτητες περιστροφής παρατηρείται στην άνω επιφάνεια της συγκόλλησης και εκατέρωθεν του «αποτυπώματος» του εργαλείου, επιπλέον υλικό που έχει προωθηθεί εκεί από τον πυρήνα συγκόλλησης, εξ αιτίας της υψηλής ταχύτητας περιστροφής και θερμότητας επηρεάζοντας άμεσα την ροή του υλικού. Το υλικό ωστόσο εξέρχεται του πυρήνα δημιουργώντας ασυνέχεια και επηρεάζοντας αρνητικά την συγκόλληση. Ακόμα

αξιοσημείωτη είναι η επιφάνεια η οποία καταλαμβάνει κάθε ζώνη συγκόλλησης επηρεασμένη από την ταχύτητας περιστροφής.

Η συγκεκριμένη ωστόσο παράμετρος επηρεάζει και την τοποθεσία θραύσης του υλικού, αφού με αύξησή της, η περιοχή παραμόρφωσης πλαταίνει και η τοποθεσία μέγιστης παραμόρφωσης μετατοπίζεται από την υποχωρούσα στην προωθούμενη πλευρά (2). Στον μεταλλουργικό τομέα, οι πολύ υψηλές ταχύτητες περιστροφής (10.000 RPM) ευνοούν την αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης και συνεπώς επηρεάζουν τη δυναμική ανακρυστάλλωση στον πυρήνα συγκόλλησης. Ακόμα όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος απόψυξη μετά την συγκόλλησης επηρεάζοντας άμεσα τον σχηματισμό των κατακρημνισμάτων και της αναμενόμενης μικροδομής του υλικού. (2)

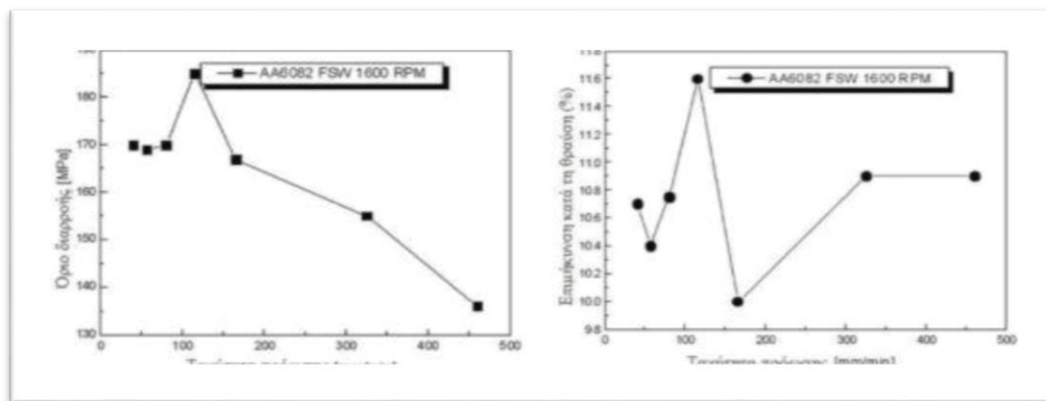
1.13.2. Επίδραση της ταχύτητας Συγκόλλησης

Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι η δεύτερη σπουδαιότερη παράμετρος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και είναι υπεύθυνη για την κίνηση του υπό ανάδευση υλικού από το μπροστά στο πίσω μέρος του πείρου συγκόλλησης, ολοκληρώνοντας τη διαδικασία (3). Αποτελεί και αυτή μία παράμετρο που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμική παροχή άρα και την ποιότητα της μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί και το ότι αυξάνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται ο διαθέσιμος χρόνος (περισσότερα rpm ανά στροφή του εργαλείου) προς παραγωγή θερμότητας και έτσι μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία ανόπτησης και ο μικρός απαιτούμενος χρόνος για μεγέθυνση των κόκκων (4).

Ο Cavaliere και οι συνεργάτες του (5), παρατήρησαν ότι με αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης, αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό το όριο διαρροής της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε κράματα αλουμινίου 6082, μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή, της οποίας η υπερβολή οδηγεί μείωση του.

Η ολκιμότητα της συγκόλλησης ακολουθεί την ίδια περίπου πορεία με το όριο διαρροής, αλλά, από μία τιμή ταχύτητας συγκόλλησης και μετά αρχίζει να παρουσιάζει ξανά αύξηση. Από ανάλυση που πραγματοποιήθηκε (6), συμπεραίνεται ότι η παράμετρος αυτή, έχει την μεγαλύτερη στατιστική επίδραση στις ιδιότητες εφελκυσμού των συγκολλήσεων FSW. Παρόμοια αποτελέσματα ως προς το μέγεθος κόκκων, τη σκληρότητα, τις μηχανικές ιδιότητες και την ταχύτητα συγκόλλησης έχουν παρατηρηθεί και σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση υπερκραμάτων νικελίου (Inconel 600) και κραμάτων μαγνησίου (26) (27).

Σε χαμηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης, ο πυρήνας συγκόλλησης παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση με αυτόν που δημιουργείται από υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει γιατί σε χαμηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης, η παραγωγή θερμότητας, ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη, οδηγώντας σε καλύτερη θερμοκρασιακή κατανομή και αποτελεσματικότερη ανακρυστάλλωση (4).



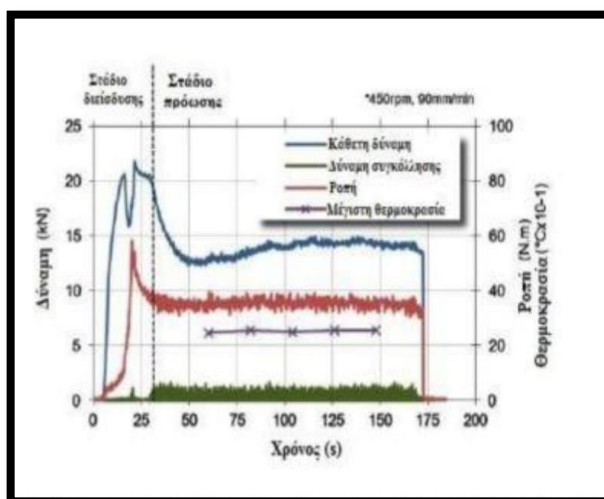
Εικόνα 25, Σχέση Ορίου Διαρροής και Ταχύτητας Πρόωσης της Συγκόλλησης. (15)

1.13.3. Επίδραση του λόγου των ταχυτήτων συγκόλλησης

Ο λόγος των ταχυτήτων πρόωσης (V) και περιστροφής (ω) αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο της FSW. Ο Seidel και οι συνεργάτες του (7), αναφέρουν ότι ο λόγος V/ω (πρόωση του εργαλείου ανά περιστροφή), ο οποίος ορίζεται ως “weld pitch”, σχετίζεται με την ειδική ενέργεια συγκόλλησης (specific weld energy, Joules/m). Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια ανά μονάδα μήκους αυξάνεται, καθώς το weld pitch μειώνεται (7). Επομένως, συγκολλήσεις με χαμηλό «weld pitch», χαρακτηρίζονται ως θερμές συγκολλήσεις, ενώ αντίστοιχα εκείνες με το υψηλό ως ψυχρές συγκολλήσεις (7). Ουσιαστικά με την μείωση του, επιτυγχάνεται η αύξηση της θερμικής παροχής. Το «weld pitch» αποτελεί ένα χαρακτηριστικό το οποίο επηρεάζει αρκετά την διαδικασία της συγκόλλησης, καθώς έχει άμεση επιρροή στην ροή του υλικού, τις ατέλειες και τέλος τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς η αύξηση του, σημαίνει αύξηση του ορίου διαρροής και της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού. Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τον Seidel και τους συνεργάτες του για συγκολλήσεις με το ίδιο «weld pitch», αυτή με την υψηλότερη ταχύτητα πρόωσης και περιστροφής θα είναι ψυχρότερες σε σχέση με αυτές που έχουν χαμηλότερες, λόγω της μικρότερης έκθεσης στην διαδικασία της τριβής (7).

1.13.4. Επίδραση της Κάθετης Αξονικής Δύναμης

Η κάθετη αξονική δύναμη που ασκεί το εργαλείο στα προς συγκόλληση τεμάχια, η οποία αντιστοιχεί κιάλας στο βάθος διείσδυσης, ασκεί με την σειρά της μεγάλη επίδραση στην ποιότητα της συγκόλλησης. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι η κάθετη δύναμη πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η απαραίτητη τριβή του εργαλείου αλλά και η ανάπτυξη της απαραίτητης θερμότητας. Πρέπει να αναφερθεί ότι η παράμετρος αυτή δεν είναι



Εικόνα 26, Σχέση Δύναμης-Χρόνου παραμονής και Θερμοκρασίας, κατά την Συγκόλληση (15)

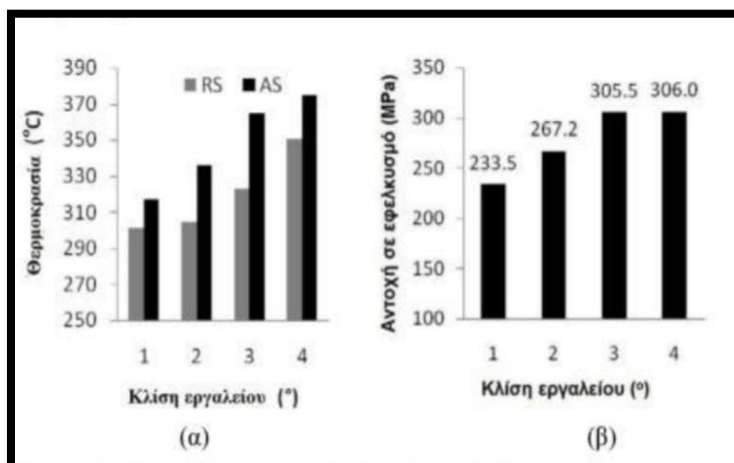
σταθερή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό δυνάμεων ασκούνται κατά τη διάρκεια της διείσδυσης του εργαλείου σε σχέση με την συνέχεια της συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα (8). Η κάθετη αξονική δύναμη επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της συγκόλλησης στο κομμάτι των ατελειών, το μέγεθος των κόκκων, άρα και με την σειρά τους τις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου υλικού (9).

Συνεπώς η ακατάλληλη τιμή της αξονικής δύναμης επηρεάζει ως εξής την συγκόλληση :

- Στην περίπτωση που η αξονική δύναμη είναι μικρότερη της απαραίτητης:
 - Η μέγιστη θερμοκρασία εντός του πυρήνα συγκόλλησης είναι αρκετά μικρή και κατά συνέπεια η δυναμική ανακρυστάλλωση δεν ολοκληρώνεται
 - Πιθανή δημιουργία ατελειών τύπου «τούνελ» (**tunnel effect**) , η οποία παρατηρείται στην κάτω επιφάνεια του πυρήνα συγκόλλησης και οφείλεται στην μη επαρκή ανάδευση.
 - Ατέλεια τύπου μη πλήρωσης της επιφάνειας (**lack of surface**)
- Στην περίπτωση της υπερβολικής αξονικής δύναμης :
 - Εμφανίζεται το φαινόμενο της εξώθησης υλικού (flash) εκατέρωθεν του αποτυπώματος συγκόλλησης, το οποίο προέρχεται από τον πυρήνα συγκόλλησης και είναι υλικό από την δημιουργία μικρό-πορώδους εντός αυτής της ζώνης, καθώς και της εκλέπτυνση του πάχους της συγκόλλησης.

1.13.5. Επίδραση της κλίσης εργαλείου συγκόλλησης

Κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση μία πολύ σημαντική παράμετρος αποτελεί η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 0-2°. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη διεθνή βιβλιογραφία η επίδραση αυτής της παραμέτρου



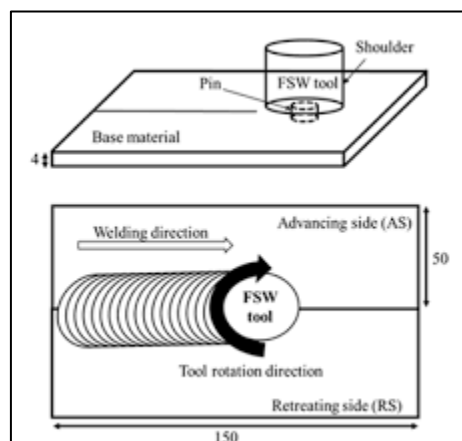
στη FSW δεν έχει μελετηθεί εκτενώς. Η παράμετρος αυτή, η οποία επηρεάζει σημαντικά τη ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση, επιβεβαιώνει ότι με την κατάλληλη επιλογή το περιαυχένιο ελέγχει το υπό ανάδευση

Εικόνα 27, Θερμοκρασία στην προωθούμενη (AS) και την υποχωρούσα πλευρά (RS), της επιφάνειας υποστήριξης του συγκολλημένου κράματος 7 mm από το κέντρο συγκόλλησης για κλίση εργαλείου 1,2,3 και 4. Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού για κλίση εργαλείου 1,2,3 και 4° (10).

υλικό και το μεταφέρει αποτελεσματικά σύμφωνα με την φορά της συγκόλλησης (3). Άρα φυσικό και επόμενο να επηρεάζονται όλοι οι μεταλλουργικοί μηχανισμοί καθώς και ο ρυθμός απόψυξης.

Η κλίση του εργαλείου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αναπτυσσόμενη θερμότητα κατά τη συγκόλληση. Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της κλίσης του εργαλείου προκαλεί και αύξηση της θερμότητας (10). Επιπροσθέτως, η κλίση επηρεάζει και την ποιότητα της συγκόλλησης αφού όσο αυξάνεται η κλίση μειώνεται το μέγεθος των ατελειών (στην προκειμένη περίπτωση το tunnel-defect), έχοντας ως επακόλουθο την αύξηση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Αντίθετα η σκληρότητα, δεν επηρεάζεται από την κλίση (10).

Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος αναφέρεται συχνά, ο οποίος όμως παρόλο που δεν βρίσκεται στις βασικές παραμέτρους του συγκεκριμένου τύπου συγκόλλησης έχει δημιουργήσει έντονο ενδιαφέρον όλων των ερευνών είναι η φορά (υποχωρούσα ή προωθούμενη) που θα υφίσταται το κάθε κράμα.



Εικόνα 28, Advanced & Retreating Side (125)

Οι απόψεις δίστανται σχετικά με το ποιο κράμα θα πρέπει να βρίσκεται στην κάθε πλευρά, καθώς αρκετοί αναφέρουν ότι το πιο «μαλακό» υλικό θα πρέπει να βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη ανάμειξη.

Οι συγκολλήσεις όπου το κράμα αλουμινίου AA6082 ήταν τοποθετημένο στην προωθούμενη πλευρά παρουσίασαν σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά ανάμειξης στη ζώνη ανάδευσης συγκριτικά με τις συγκολλήσεις όπου το κράμα AA6082 ήταν τοποθετημένο στην υποχωρούσα πλευρά σύμφωνα με σύμφωνα με την μελέτη του. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του Larsson αλλά υποστηρίζεται από τον Kumagai (11)& (12). Συμπερασματικά, λοιπόν, διαπιστώνουμε ότι ανάλογα με την πλευρά τοποθέτησης των κραμάτων κατά τις συγκολλήσεις FSW, αλλάζουν τα φαινόμενα ροής των υλικών και κατ' επέκταση οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής συγκόλλησης, ενώ δεν υπάρχει σαφής προσανατολισμός μεταξύ των ερευνητών για τη βέλτιστη πλευρά τοποθέτησης.

Σύμφωνα με τον Guo και τους συνεργάτες του, η θέση των υλικών FSW ανόμοιων κραμάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο έντονη ασυμμετρία στην κατανομή θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται καθώς τα υλικά στην υποχωρούσα και προωθούμενη πλευρά έχουν διαφορετικά μοντέλα ροής ενώ ταυτόχρονα τα δύο κράματα έχουν μεταξύ τους πολύ διαφορετικές μορφές ροής. (13)

Γενικά, κατά τη συγκόλληση διά τριβής με ανάδευση (FSW) το υλικό που βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά, μεταφέρεται πολύ λιγότερο γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης πριν την ψύξη του πυρήνα σε σύγκριση με το υλικό που βρίσκεται στην προωθούμενη πλευρά. Το αποτέλεσμα της μελέτης του Guo

επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη του (14), πάνω στις συγκολλήσεις διά τριβής με ανάδευση ανόμοιων κραμάτων AA5051-H32 και AA6061-T6. Καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα υλικά αναμίχθηκαν καλύτερα όταν το κράμα αλουμινίου AA5052-H32 (μαλακότερο) ήταν στην προωθούμενη πλευρά από τη περίπτωση του κράματος αλουμινίου AA6061-T6 στην προωθούμενη πλευρά. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται σύμφωνα με τη μελέτη του Lee και των συνεργατών του (15) (16), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι υψηλότερες διαμήκεις ιδιότητες εφελκυσμού της συγκόλλησης (παράλληλη προς την κατεύθυνση FSW) αποκτήθηκαν όταν ένα σχετικά μαλακότερο υλικό τοποθετήθηκε στη πλευρά προώθησης καθώς το κυρίαρχο υλικό στη ζώνη συγκόλλησης προέρχεται κυρίως από τη σκληρότερη πλευρά που υποχωρεί.

1.14. Φαινόμενα Δυναμικής Ανακρυστάλλωσης

Τα φαινόμενα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης προέρχονται από την τάση που έχει κάθε υλικό να ελαττώσει την εσωτερική ενέργεια της μικροδομής του που έχει αυξηθεί επειδή οι διαταραχές συσσωρεύονται στη διογκωμένη περιοχή των ορίων των κόκκων με αποτέλεσμα την περαιτέρω σκλήρυνση του υλικού. Αυτό συμβαίνει διαμέσου της δημιουργίας νέων κόκκων με σχετικά μικρότερη πυκνότητα διαταραχών στο εσωτερικό τους. Υπάρχουν τρία είδη δυναμικής ανακρυστάλλωσης

- Η ασυνεχής δυναμική αποκρυστάλλωση (Discontinuous dynamic recrystallization-DDRX) η οποία περιλαμβάνει το σχηματισμό πυρήνων ανακρυσταλλωμένων κόκκων και την επακόλουθη ανάπτυξη αυτών. Σε υλικά με εδροκέντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή και υψηλή ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης, όπως είναι το υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο, η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση περιορίζεται από τη δυναμική αποκατάσταση (dynamic recovery) χωρίς αυτό να αποκλείει το γεγονός της εμφάνισης ασυνεχούς δυναμικής ανακρυστάλλωσης σε υψηλές θερμοκρασίες και σε περιπτώσεις που το υλικό παραμορφώνεται υπό συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου Z.
- Η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Continuous dynamic recrystallization-CDRX) κατά την οποία παρατηρείται αύξηση της γωνίας αποπροσανατολισμού των υποκόκκων από το εσωτερικό του κόκκου προς τα όριά του και τελικά διακριτοποίηση των υποκόκκων μέσω δημιουργίας νέων κόκκων. Για μικρά επίπεδα παραμόρφωσης του υλικού οι διαταραχές αρχίζουν να συσσωρεύονται στα υπάρχοντα όρια των κόκκων και σε μικρότερο βαθμό σε αυτά των υποκόκκων. Καθώς η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και με το ποσοστό των διαταραχών οι οποίοι συσσωρεύονται στα όρια των υποκόκκων οι οποίοι έχουν αρχικά χαμηλή γωνία αποπροσανατολισμού. Η γωνία αποπροσανατολισμού των υποκόκκων αυξάνεται λόγω της συσσώρευσης των διαταραχών στα όρια τους και τελικά αυτοί αποσχίζονται και μετατρέπονται σε κόκκους.
- Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (Geometric dynamic recrystallization- GDRX) όπου τα αρχικά όρια των κόκκων αναπτύσσουν οδοντώσεις και τελικά διαχωρίζονται όταν το μήκος κύματος των

οδοντώσεων εξισωθεί με το μέγεθος των υποκόκκων. Σε ορισμένες περιπτώσεις η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση δρα συνεργατικά με τη συνεχή ή τη γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση

1.15. Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της μεθόδου σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης.

Κάθε μέθοδος συγκόλλησης διακατέχεται από συγκεκριμένες λειτουργίες και χαρακτηριστικά. Οι προαναφερόμενες λειτουργίες και χαρακτηριστικά προβάλλουν τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Ακολουθούν τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της FSW σε σύγκριση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης.

1.15.1. Πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Άριστες Μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων.

Σε διάφορες εργασίες που έχουν γίνει με στόχο την σύγκριση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευσης και της T.I.G., παρατηρήθηκε ότι οι συγκολλήσεις FSW παρουσίαζαν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα, το όριο διαρροής, αντοχή σε εφελκυσμό και η επιμήκυνση (39). Το συγκεκριμένο φαινόμενο προκύπτει από την λεπτότερη μικροδομή που παρατηρείται αλλά και στις χαμηλότερες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Επίσης αναφέρεται ότι παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις συγκολλήσεις P-GTAW & MIG . [(40)& (41)]

Καλύτερη αντοχή σε διάβρωση σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

Σε διάφορες μελέτες που έγιναν σχετικά με την διάβρωση με βελονισμούς σε συγκολλήσεις FSW και MIG, παρατηρήθηκε ότι η πρώτη τεχνική συγκόλλησης επιφέρει πολύ μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση, αρκετά κοντά σε αυτές του μετάλλου βάσης. Επίσης παρατηρήθηκε πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση με βελονισμούς και σε ρηγμάτωση υπό μηχανική καταπόνηση σε σχέση με συγκολλήσεις GTAW. (42)& (43)

Μικρές Παραμορφώσεις ακόμη και για συγκολλήσεις μεγάλου μήκους.

Η FSW χρησιμοποιείται σε κράματα αλουμινίου λόγω των μικρών παραμενουσών τάσεων καθώς και των μικρών ρυθμών παραμόρφωσης που επιφέρουν. (GIAN). Η συγκράτηση των τεμαχίων επίσης συμβάλλει στην μείωση των διαφορών ειδών παραμόρφωσης. (1)

Απουσίες ατελειών που προέρχονται από την τήξη.

Μιας και πρόκειται για συγκόλληση στερεάς κατάστασης, αποφεύγονται όλες οι πιθανές ατέλειες που δημιουργούνται σε συνθήκες τήξης [τύπος φιλιού, τύπος αυλακίου κ.α.]. (27)

Δυνατότητα συγκόλλησης υλικών όπου οι συμβατικές μέθοδοι συγκόλλησης υστερούν.

Αναφέρεται ότι η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου 2XXX & 7XXX είναι αρκετά δύσκολη με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, ενώ καθίσταται δυνατή μέσω του FSW εμφανίζοντας πολύ καλές ιδιότητες (1). Επιπλέον μέσω της χρήσης FSW είναι δυνατή η συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων, είτε πρόκειται για αλουμινίου[], είτε για αλουμινίου-χάλυβα, είτε για αλουμινίου-τιτανίου[(44), (45), (46), (47)]. Οι συγκολλήσεις τήξης είναι δύσκολες στα προηγούμενα παραδείγματα λόγω του διαφορετικού σημείου τήξης που εμφανίζουν τα υλικά .

Πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία

Λόγω των ισχυρών δυνάμεων που παρατηρούνται, το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης αδυνατεί να εφαρμοστεί χειρωνακτικά, οπότε και αυτοματοποιείται (3).

Δυνατότητα εφαρμογής σε όλες τις γεωμετρικές θέσεις και τύπους συγκόλλησης.

Πραγματοποιείται σε ευθεία και καμπύλη τροχιά, ενώ εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους συγκόλλησης, μετωπικές τύπου Τα(Ταφ) κ.α. (48)& (49)

Απουσία αναλώσιμων υλικών

Εξαιρετικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδους είναι η απουσία αναλώσιμων υλικών που εμφανίζονται σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης, όπως προστατευτικά αέρια ή μέταλλο προσθήκης. Επίσης τα εργαλεία της FSW είναι μη καταναλισκόμενα.

Δεν απαιτείται μηχανουργική προετοιμασία .

Σε σχέση με την MIG η οποία χρήζει της δημιουργίας λοξοτομής των προς συγκόλλησης τεμαχίων, η FSW δεν απαιτεί καμία τέτοια προετοιμασία .

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που εμφανίζει η FSW είναι :

- Χαμηλό Κόστος εγκατάστασης και εκπαίδευσης προσωπικού
- Μεγάλα ποσοστά ενεργειακής απόδοσης
- Φιλική προς το περιβάλλον Ευκολία χειρισμού
- Ακριβής εξωτερικός έλεγχος
- Δυνατότητα Επανάληψη
- Εξαιρετικές μεταλλουργικές ιδιότητες στην περιοχή της συγκόλλησης
- Λεπτομερής δομή
- Καμία απώλεια υλικού
- Δεν υπάρχει ρηγμάτωση κατά τη στερεοποίηση
- Καλή σταθερότητα διαστάσεων και επανάληψη της διαδικασίας

- Μειωμένη στρέβλωση του δοκιμίου
- Δεν χρησιμοποιούνται αέρια προστασίας, διαλύτες
- Δεν απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας
- Ελάχιστη ρύπανση
- Απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας (ενδεικτικά, μόνο το 2,5% της απαιτούμενης ενέργειας για συγκόλληση με laser)
- Δίνει τη δυνατότητα για μείωση του βάρους των κατασκευών καθώς δίνει τη δυνατότητα για συγκόλληση διαφορετικών παχών

1.15.2. Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Μιας και πρόκειται για σχετικά καινούργια τεχνική συγκόλλησης, δεν έχει μελετηθεί εις βάθος, συνεπώς φέρει διάφορα μειονεκτήματα βασισμένα στην μη επαρκή εμπειρία και βιβλιογραφία που διαθέτουμε για αυτήν.

Δημιουργία οπής πείρου

Με το πέρας της συγκόλλησης παρατηρείται τρύπα κατά την έξοδο του πείρου (rinhole or exit hole). Ωστόσο αναφέρονται διάφορες ενθαρρυντικές έρευνες σχετικά με την κίνηση και την γεωμετρία του πείρου για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου.

Ισχυρό σύστημα συγκρότησης τεμαχίων

Όπως έχει αναφερθεί, απαιτούνται ισχυρές δυνάμεις για την πάκτωση των δοκιμίων ώστε να μην κινούνται κατά το πέρας της συγκόλλησης.

Μικρές ταχύτητες συγκόλλησης

Στην συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης, η ταχύτητα συγκόλλησης αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο. Είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη της απαιτούμενης θερμοκρασίας πλαστικοποίησης του υλικού.

Μεγάλο κόστος εξοπλισμού

Παρά το μικρό κόστος συντήρησης και εκπαίδευσης για την χρήση μηχανών FSW, οι ίδιες μηχανές FSW αφορούν ένα μεγάλο κομμάτι του επενδυτικού σχεδιασμού και οι τιμές ποικίλουν σε αρκετά εκατομμύρια δολάρια. (44)

Φθορά των εργαλείων

Όπως αναφέρθηκε στα πλεονεκτήματα της FSW, ο συγκεκριμένος τύπος συγκόλλησης δεν διαθέτει καταναλισκόμενα εργαλεία. Ωστόσο σε περίπτωση συγκόλλησης κραμάτων υψηλής αντοχής τα εργαλεία υπόκεινται σε μεγάλη φθορά και η αντικατάστασή τους χαρακτηρίζεται αρκετά ακριβή.

2. Πειραματικό Μέρος

2.1. Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων συγκόλλησης με την τεχνική Friction Stir Welding χρησιμοποιήθηκε φρέζα μετάλλου (milling machine) κατάλληλα τροποποιημένη του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στις παρακάτω συνθήκες συγκόλλησης:

Πίνακας 8, Δοκίμια-Συνδυασμοί Παραμέτρων F.S.W.

Δοκίμια	Ταχύτητα Πρόωσης (χιλιοστά/Λεπτό)	Ταχύτητα Περιστροφής(Στροφές/Λεπτό)
A	13	590
B	13	1000
Γ	32	590
Δ	32	1000
E	51	590
Z	51	1000
ΣΤ	83	590
Ι	83	1000



Η επιλογή των συγκεκριμένων τιμών αφορούν την μελέτη ενός μεγάλου μέρους παραμέτρων προκειμένου να εξεταστούν διάφορες συνθήκες, η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων, καθώς και οι επιπτώσεις των διαφόρων συνθηκών στις παραγόμενες φάσεις των κραμάτων.

Εικόνα 29, Μηχανή F.S.W. (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών).

2.2. Μηχανική Προετοιμασία

Η μηχανική προετοιμασία των δοκιμών αφορά αρχικά την δημιουργία οπών στις πλάκες. Οι πλάκες πακτώνονται για την αποφυγή τυχόν μετακινήσεων, λόγω των ισχυρών δυνάμεων που δημιουργούνται κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Ύστερα ακολουθεί η τοποθέτηση της κάθε πλάκας στην μηχανή συγκόλλησης, η επιλογή του κατάλληλου πείρου συγκόλλησης και η εφαρμογή των εκάστοτε συνθηκών συγκόλλησης σε κάθε δοκίμιο αντίστοιχα, με τέλος της πραγματοποίησης της συγκόλλησης. Οι χρόνοι συγκόλλησης σε κάθε δοκίμιο εξαρτώνται από τις παραμέτρους αντίστοιχα.

Στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, λόγω του Butt Joint και τα δύο κράματα υφίστανται ταυτόχρονα και τις δύο πλευρές, συνεπώς είναι από τις

ελάχιστες φορές που ο συγκεκριμένος παράγοντας δεν μας επηρεάζει. Αξίζει να αναφερθεί η προσοχή που πρέπει να δίνεται από τους χειριστές της μηχανής σε όλο το εύρος της συγκόλλησης, στην παραγόμενη θερμότητα, τόσο στα δοκίμια, όσο και στα περισσότερα εξαρτήματα του μηχανισμού συγκόλλησης.

Ακολουθεί η μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων με σκοπό την εξέταση τους στο μικροσκόπιο, για τυχόν ατέλειες που δεν είναι εμφανείς με γυμνό μάτι, καθώς και για την μελέτη των παραγόμενων φάσεων και τον χαρακτηρισμό της εκάστοτε συγκόλλησης.

2.3. Κοπή

Με στόχο την εξέταση των δοκιμίων, απαιτείται η κατάλληλη προετοιμασία τους. Πιο συγκεκριμένα η μεταλλογραφική τους προετοιμασία ξεκινάει με την διαδικασία της κοπής του δοκιμίου. Η διαδικασία της κοπής βασίζεται στην επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού μέρους (ικανοποιητικό μέγεθος ώστε να είναι εύκολη η εξέταση στο μικροσκόπιο, αλλά και ή σκληρομέτρηση του) του δοκιμίου το οποίο θα τεθεί υπό εξέταση, καθώς είναι αδύνατη αλλά και αντί-οικονομική η εξέταση ολόκληρού του δοκιμίου. Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία για την αποκάλυψη της δομής, τέμνουμε το δοκίμιο στο κατάλληλο μέγεθος. Η μικροδομή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή κατά την διαδικασία της κοπής παρά σε κάποιο άλλο βήμα της προετοιμασίας. Η αλλαγή μπορεί να επέλθει από υπερβολική θερμότητα, μηχανική παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι λεγόμενες «τεχνητές μικροδομές» που προκύπτουν σ' αυτήν την περίπτωση είναι πιθανόν να μην επιτρέψουν την αποκάλυψη της πραγματικής δομής. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει η ζώνη παραμόρφωσης να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή, με την χρήση λειαντικού τροχού εκχόνδρισης ώστε η επιφάνεια εξέτασης να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην μητρική κατάσταση της.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση από κάθε πλάκα κόπτεται περίπου στο κέντρο και απομονώνεται ένα κομμάτι μήκους 3 εκατοστών. Επιλέγεται το κέντρο της πλάκας για την κοπή του αντιπροσωπευτικού δοκιμίου καθώς στο συγκεκριμένο σημείο αναμένουμε την πιο ομαλή και ήπια κατάσταση συγκόλλησης, ενώ αποφεύγονται ανωμαλίες όπως η είσοδος και έξοδος του πείρου με τις ανάλογες εκβολές μάζας που παρατηρούνται (Ribbon Flash).

2.4. Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή του δοκιμίου, ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Κατά την διαδικασία του εγκιβωτισμού πραγματοποιείται η βύθιση του δοκιμίου με κατάλληλο υλικό, σε κατάλληλο σχήμα, με σκοπό την δημιουργία ενός πρότυπου δοκιμίου για τις μετέπειτα διεργασίες. Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγουμε ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση, τα οποία συνήθως απαντώνται σε εποξικά υλικά.

Τα συγκεκριμένα δοκίμια έχουν αρκετά μεγάλες διαστάσεις και λόγω αυτού χαρακτηρίζεται εύκολος ο χειρισμός τους στα μετέπειτα στάδια, συνεπώς δεν απαιτείται εγκιβωτισμός.

2.5. Λείανση

Μέσω της λείανσης προετοιμάζουμε την επιφάνεια του δοκιμίου . Όπως αναφέραμε παραπάνω ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για το κόψιμο του υλικού, η δομή της επιφάνειας έχει αλλοιωθεί σε κάποιο βαθμό. Το κατεστραμμένο στρώμα απομακρύνεται χρησιμοποιώντας σταδιακά χαρτιά λείανσης με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους. Κατά την διάρκεια της λείανσης είναι απαραίτητη η συνεχόμενη παροχή νερού, για τον καθαρισμό του δίσκου καθώς και την ψύξη του δοκιμίου. Για να έχουμε ένα επίπεδο δοκίμιο με ελάχιστη παραμόρφωση συγκρατούμε το δοκίμιο με τα ακροδάχτυλα, όσο το δυνατόν πιο κοντά στον λειαντικό τροχό και χρησιμοποιούμε μέτρια δύναμη για την συγκράτηση του. Εξετάζουμε την επιφάνεια περιοδικά για να καθορίσουμε εάν έχουν εξαλειφθεί οι αυλώσεις από τον προηγούμενο δίσκο. Η λείανση συνεχίζεται δύο με τρεις φορές από τον χρόνο που απαιτείται για την εξαφάνιση των προηγούμενων γραμμών λείανσης. Αν κατά την διάρκεια της λείανσης προκύψει κάποιο σφάλμα πρέπει να αυξηθεί η ασκούμενη δύναμη και να μην χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκο χαρτί. Το δοκίμιο πρέπει να παραμείνει στον δίσκο που δημιουργήθηκε το ελάττωμα ή να επιστρέψει στον προηγούμενο. Το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται κατά 90° μεταξύ με το πέρασ κάθε σταδίου. Κατά την αλλαγή των χαρτιών το δοκίμιο πρέπει να είναι υγρό για να αποφύγουμε τυχόν ολίσθηση. Επίσης πρέπει να ξεπλένεται πριν προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, για να μην μολυνθούν τα λειαντικά χαρτιά με κόκκους από τους πιο χονδρόκοκκους λειαντικά χαρτιά. Μετά από κάθε στάδιο η διαδικασία καθαρισμού που ακολουθεί είναι καθαρισμός του δοκιμίου με βαμβάκι και νερό, ενώ στη συνέχεια περιχύνεται με αιθανόλη και στεγνώνεται με εμφύσηση θερμού αέρα.

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

1. 220 grit./ (SiC/inch²).
2. 500grit. / (SiC/inch²).
3. 1200grit. / (SiC/inch²).

2.6. Στίλβωση

Η στίλβωση γίνεται με τις κατάλληλες διαμαντόπαστες σε πανί τύπου DP-Mol και με τη χρήση κατάλληλου υγρού στίλβωσης της DP. Κάθε βήμα της στίλβωσης διήρκεσε 10-15 λεπτά . Κατά την διάρκεια του γυαλίσματος περιστρέφουμε το δοκίμιο κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού. Κατά την μετάβαση από τον ένα δίσκο στον άλλο το δοκίμιο καθαρίζεται με ένα βρεγμένο βαμβάκι και ξεπλένεται με οινόπνευμα. Το δοκίμιο στεγνώνεται στο τέλος της διαδικασίας με ρεύμα θερμού αέρα. Οι πάστες που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

- DP PASTE M 3mm της εταιρίας STRUERS
- DP PASTE M 1mm της εταιρίας STRUERS

Στην περίπτωση στίλβωσης αλουμινίου τα δοκίμια χρειάζονται επιπλέον στίλβωση, λόγω της ευαίσθητης επιφάνειας τους. Ως αποτέλεσμα, η παρατήρηση του δοκιμίου στο μικροσκόπιο μετά την λείανση στο δίσκο, με τους κόκκους διαμαντιού

1μm της αδαμαντόπαστας, αποκαλύπτει ότι δεν έχουν εξαλειφθεί όλες οι γραμμές λείανσης. Οι γραμμές αυτές εξαλείφονται με στίλβωση του δοκιμίου με διάλυμα colloidal silica 0,1μm,(OP-U), για μη σιδηρούχα υλικά. Το OP-U είναι υγρό και τροφοδοτείται στον κατάλληλο πάνινο δίσκο. Στη διάρκεια της λείανσης παίζει τον ρόλο του λειαντικού υλικού καθώς και του υγρού ψύξης. Το δοκίμιο είναι πλέον έτοιμο για χημική προσβολή.

2.7. Χημική Προσβολή

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρησή του στο οπτικό μικροσκόπιο. Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά στιλβωμένη επίπεδη επιφάνεια, από υλικό ελεύθερο από τις αλλαγές που μπορεί να προκλήθηκαν από επιφανειακή παραμόρφωση, από ροή των υλικών ή από γραμμές λείανσης. Παρ' ότι μερικές πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν από το στιλβωμένο δοκίμιο, η μικροδομή συνήθως αποκαλύπτεται (γίνεται ορατή) μόνο μετά από χημική προσβολή. Μόνο χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν διαφορά στην ικανότητα ανάκλασης τους 10% ή περισσότερο, είναι δυνατόν, να είναι ορατά χωρίς χημική προσβολή. Αυτό ισχύει για μικρογραφικά συστατικά με μεγάλες χρωματικές διαφορές ή μεγάλες διαφορές στην σκληρότητα, οι οποίες προκαλούν τον σχηματισμό ανάγλυφης επιφάνειας. Ρωγμές, πόροι, οπές και μη μεταλλικά εγκλείσματα μπορούν επίσης να παρατηρηθούν χωρίς χημική προσβολή. Ένα δοκίμιο, το οποίο είναι μόνο στιλβωμένο συχνά, δεν αποκαλύπτει την μικροδομή του, διότι το φως αντανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις ομοίμορφα. Το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να ξεχωρίσει πολύ μικρές διαφορές στην ανακλαστικότητα, οπότε πρέπει να δημιουργηθεί στην εικόνα αντίθεση (contrast). Οι μεταλλογραφικές μέθοδοι αντίθεσης συμπεριλαμβάνουν ηλεκτροχημικές και χημικές τεχνικές προσβολής. Για τη χημική προσβολή, χρησιμοποιήθηκε το χημικό Keller's (2.5mL HNO₃, 1.5mL HCl, 1mL HF, 95mL H₂O). Επειδή η μία σειρά αλουμινίου προσβαλλόταν πιο δύσκολα από την άλλη, έγινε προσεκτική απόθεση του χημικού στο ένα υλικό μόνο με τη χρήση βαμβακιού. Ύστερα από αναμονή 40 δευτερολέπτων, ολόκληρο το δοκίμιο βυθίστηκε στο Keller's για 20 δευτερόλεπτα. Μόλις τελειώσει ο χρόνος, τα δοκίμια γρήγορα ξεπλένονται με νερό και καθαρίζονται όπως προηγουμένως. Με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου, παρατηρήθηκε η μικροδομή ώστε να σιγουρευτούμε ότι έχουν εμφανιστεί οι κόκκοι και των δύο υλικών.

2.8. Οπτική Μικροσκοπία

Το οπτικό μικροσκόπιο αποτελεί πιο σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη της μεταλλογραφίας. Ενώ, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης (TEM) και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) ξεπερνούν δύο από τους σημαντικότερους περιορισμούς του οπτικού μικροσκοπίου-την ανάλυση και το βάθος του πεδίου-δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν την σημασία του. Όντως, οι περιορισμοί των μικροσκοπίων TEM και SEM αποτελούν τα ισχυρά σημεία του

οπτικού μικροσκοπίου και αντίστροφα, έτσι ώστε οι τεχνικές οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας να είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές. Σε κάθε μελέτη υλικών, η πιο σωστή διαδικασία είναι η αρχή της εξέτασης να γίνει πρώτα σε μακροσκοπικό επίπεδο, πριν προχωρήσει σε μικροσκοπικές λεπτομέρειες. Η απλή οπτική εξέταση, ίσως μακροσκοπικής προσβολής, πρέπει να προηγείται της μεγέθυνσης.

Όλες οι παρατηρήσεις στο μικροσκόπιο πρέπει να ξεκινάνε με μια μικρή μεγέθυνση όπως αυτή των 100X, η οποία θα ακολουθηθεί σταδιακά από μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, έτσι ώστε να εκτιμηθούν ικανοποιητικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μικροδομής. Με αυτόν τον τρόπο, τα συνήθη ή μη χαρακτηριστικά της δομής μπορούν να διακριθούν και να αναγνωρισθεί η σπουδαιότητά τους. Η οπτική μικροσκοπία έχει άπειρες εφαρμογές. Η πιο σημαντική εφαρμογή της είναι ο καθορισμός των δομικών φάσεων και η σύσταση της κύριας μάζας του μετάλλου. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας, επειδή η δομή και η σύσταση του υλικού, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Στην μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε προσβολή, είτε μετά από προσβολή ή και στις δύο καταστάσεις. Συγκεκριμένα συστατικά μπορούν να παρατηρηθούν πιο εύκολα αν είναι απλώς γυαλισμένη η επιφάνεια, επειδή δεν σκιαγραφούνται με την χημική προσβολή. Εγκλείσματα, νιτρίδια, ορισμένα καρβίδια και ενδομεταλλικές φάσεις μπορούν να παρατηρηθούν και χωρίς χημική προσβολή. Εκτός από τα εγκλείσματα, οι υπόλοιπες φάσεις μπορούν να εξεταστούν με μεγαλύτερη ευκολία αν κατά την διάρκεια το τελικού σταδίου γυαλίσματος επέλθει κάποιος βαθμός αποκατάστασης της επιφάνειας του δοκιμίου. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση και μετάφραση της μικροδομής, χωρίς επιπλοκές από σφάλματα (artifacts). Τα δοκίμια τα οποία αντιδρούν στο πολωμένο φως, όπως τα υλικά με μη-κυβικές δομές, γενικά εξετάζονται χωρίς χημική προσβολή. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις η χημική προσβολή πρέπει γίνει, για είναι δυνατή η παρατήρηση της μικροδομής. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα διάλυμα προσβολής γενικής χρήσης, για την αποκάλυψη των ορίων των κόκκων και των φάσεων που υπάρχουν και στην συνέχεια ακολουθεί επιλεκτική προσβολή των φάσεων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Υπάρχουν αμέτρητες μικροσκοπικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρατήρηση της μικροδομής των υλικών, και αυτές οι τεχνικές παράγουν εικόνες οι οποίες έχουν την ανάλυση και την αντίθεση που είναι απαραίτητη για την παρατήρηση των μικροσκοπικών δομικών λεπτομερειών.

2.9. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έδωσε λύση στο πρόβλημα της μικρής μεγέθυνσης του οπτικού μικροσκοπίου. Η λειτουργία του στηρίζεται στην αρχή ότι υπό ορισμένες συνθήκες ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν φως πολύ μικρού μήκους κύματος. Η δέσμη ηλεκτρονίων έχει μήκος κύματος περίπου 100.000 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός. Αυτό σημαίνει ότι η ευκρίνεια μπορεί να αυξηθεί σημαντικά ακόμη και για πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις. Αν και η αρχή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι όμοια με αυτή του

οπτικού η εμφάνισή του είναι εντελώς διαφορετική. Είναι πολύ μεγαλύτερο σε μέγεθος επειδή χρειάζονται τα συγκροτήματα παραγωγής και ελέγχου της ηλεκτρονικής δέσμης. Το όλο σύστημα πρέπει να βρίσκεται σε υψηλό κενό διότι ο αέρας επηρεάζει την κίνηση των ηλεκτρονίων. Οι φακοί του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι ισχυρά μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται από πηνία και η εικόνα εστιάζεται με μεταβολή της εντάσεως των μαγνητικών πεδίων, ενώ στο οπτικό μικροσκόπιο η εστίαση γίνεται διά μεταβολής της αποστάσεως μεταξύ των φακών. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από θερμαινόμενη κάθοδο βολφραμίου επιταχύνονται από την άνοδο και σχηματίζουν δέσμη υψηλής ταχύτητας. Ένα σύγχρονο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης μπορεί να δώσει μεγεθύνσεις έως 350.000X. Για κάθε δοκίμιο παρατίθενται ξεχωριστά τα σχόλια και οι παρατηρήσεις από την ηλεκτρονική μικροσκοπία στο κεφάλαιο των «Παρατηρήσεων».

2.10. Σκληρομέτρηση

Η μέθοδος-Vickers είναι παρεμφερής της μεθόδου Brinell. Θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα δοκίμια είναι λεπτά και από πολύ σκληρό υλικό όπως επίσης και αν έχουν δεχτεί οποιαδήποτε επιφανειακή θερμική κατεργασία και η επιφάνεια τους έχει καταστεί πολύ σκληρή. Αυτή η μέθοδος ελέγχου της σκληρότητας είναι γνωστή και ως μέθοδος της αδαμάντινης πυραμίδας και αυτό γιατί στη μέθοδο αυτή το εκτυπωτικό άκρο είναι μια πολύ καλά λειασμένη αδαμάντινη πυραμίδα. Βασίζεται στην αργή επιβολή ενός φορτίου, μέσω ενός αδαμάντινου διεισδυτή, σε ένα δοκίμιο το οποίο έχει υποστεί πολύ καλή λείανση, Ο διεισδυτής έχει σχήμα κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία απέναντι εδρών 136°. Το φορτίο κυμαίνεται από 1 έως 120 Kgr και ο χρόνος εφαρμογής του είναι περίπου 10-15 δευτερόλεπτα. Η μέτρηση της σκληρότητας του δοκιμίου γίνεται από την μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος φωτισμού και μεγεθυντικών φακών (51).

Τεχνικά χαρακτηριστικά της σκληρομέτρησης Vickers :

- Πρόκειται για μια μέθοδο μέτρησης σκληρότητας που υπαγορεύεται από τα πρότυπα ISO 6507, ASTM E92, ASTM E384.
- Η μέθοδος Vickers έχει ένα εύρος δοκιμαστικού φορτίου από 1 gf έως 120 kgf σύμφωνα με την ASTM, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές σκληρότητας σε όλες τις κλίμακες φορτίου
- Είναι μια οπτική μέθοδος. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της εσοχής που απομένει από το διεισδυτή στο δοκίμιο μετράται για να προσδιοριστεί η τιμή της σκληρότητας του..
- Σχήμα και υλικό διεισδυτή: Ο διεισδυτής είναι μια ισόπλευρη πυραμίδα (με τετραγωνική βάση) από διαμάντι με επίπεδη γωνία 136 °.

Κράματα Αλουμινίου 5083 και 6082

Σε αυτό το κομμάτι ακολουθεί ανάλυση των δύο μητρικών υλικών ως σημεία αναφοράς, ώστε να είναι εφικτή αργότερα η συσχέτιση και η σύγκριση τους με τα παραγόμενα δοκίμια.

Κράμα 5083:

Από χημική ανάλυση στο κράμα αλουμινίου 5083 προκύπτουν τα εξής :

Πίνακας 9, Χημική Ανάλυση, Spectrum 15

Element	Weight%	Atomic%
Mg K	2.90	3.20
Al K	97.10	96.80
Totals	100.00	

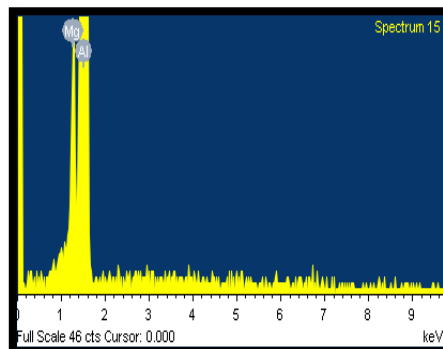
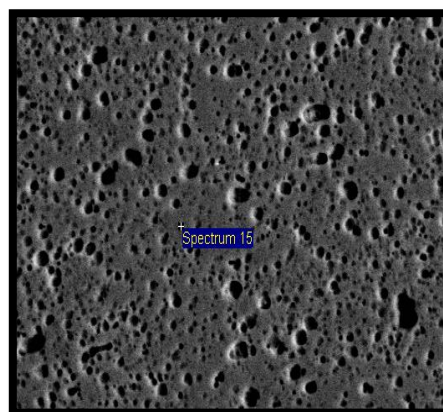
Παρατηρείται από στην χημική ανάλυση στη μήτρα του δοκιμίου η ύπαρξη ποσοστού αλουμινίου και μαγνησίου, όπως ήταν αναμενόμενο από την χημική σύσταση του υλικού. Παρατηρείται επίσης η ύπαρξη κατακρημνισμάτων διάσπαρτα στη μήτρα του υλικού.

Ωστόσο σε χημική ανάλυση που εφαρμόστηκε σε κατακρήμνισμα του μητρικού υλικού παρατηρήθηκαν και ποσοστά άλλων στοιχείων όπως αναμέναμε. Πιο συγκεκριμένα :

Πίνακας 10, Χημική Ανάλυση, Spectrum 24

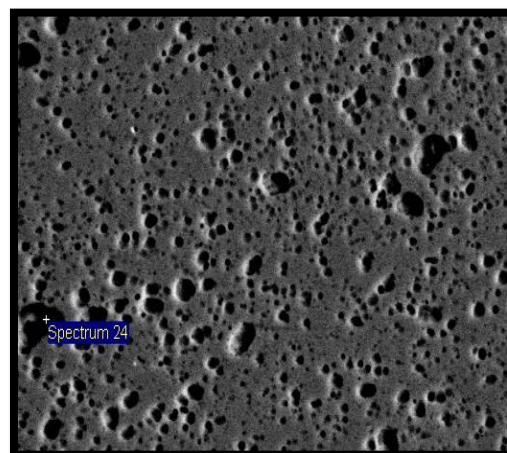
Element	Weight %	Atomic %
Mg K	1.43	2.06
Al K	54.17	70.16
Cr K	1.00	0.68
Fe K	42.85	26.81

Εικόνα 30, S.E.M., Μήτρα Κράματος 5083



Εικόνα 28, S.E.M., Χημική Ανάλυση τυχαίου σημείου της Μήτρας 5083

Εικόνα 29, S.E.M., Κατακρήμνισμα, στο κράμα Αλουμινίου 5083

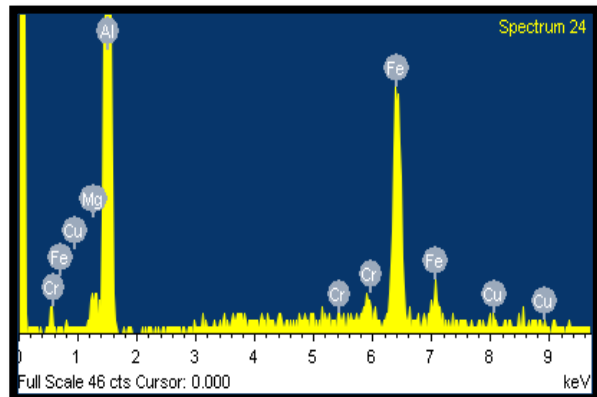


Συγκολλήσεις Δια Τριβής με Ανάδευση Ανόμοιων Κραμάτων Αλουμινίου 5083 & 6082

Cu K	0.54	0.30
Totals	100.00	

Η ύπαρξη αυτών των στοιχείων στις συγκεκριμένες τιμές αναφέρεται σε φάσεις όπως :

- $(Mn,Fe)Al_6$
- $(Cr,Fe)Al_7$
- Mg_2Al_3
- $Mg_3Mn_2Al_{12}$



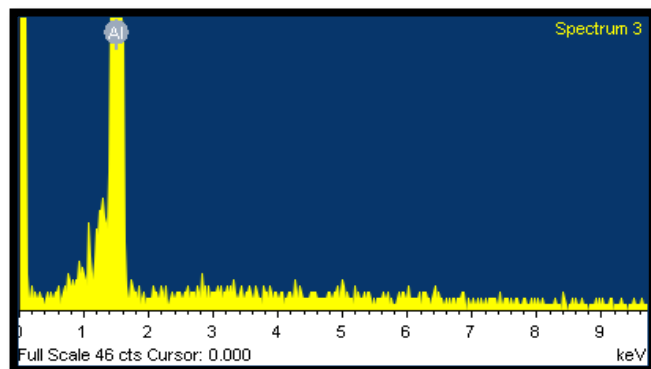
Εικόνα 31, S.E.M., Χημική Ανάλυση στο Κατακρήνισμα του κράματος Αλουμινίου 5083

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, είναι δυνατή η ύπαρξη όλων των προαναφερόμενων φάσεων λόγω των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Η εικόνα :28, αναφέρεται σε κατακρήνισμά της φάσης $(Mn,Fe)Al_6$.

Για το κράμα αλουμινίου **6082** ακολουθεί χημική ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας :

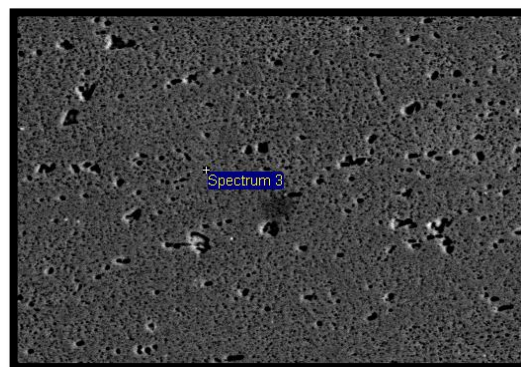
Πίνακας 11, Χημική Ανάλυση Spectrum 3

Element	Weight %	Atomic %
Al K	100.00	100.00
Totals	100.00	



Εικόνα 32, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας κράματος Αλουμινίου 6082

Η πλήρης ύπαρξη αλουμινίου χαρακτηρίζεται δεκτική και αναμενόμενη, όπως και επίσης τυχόν ύπαρξη μαγνησίου καθώς αποτελούν τα δύο κύρια συστατικά της ομάδας 6XXX. Στην συνέχεια σε χημική ανάλυση σε τυχαία κατακρήνισμα (Εικόνα:35) σημειώνονται σημαντικές τιμές

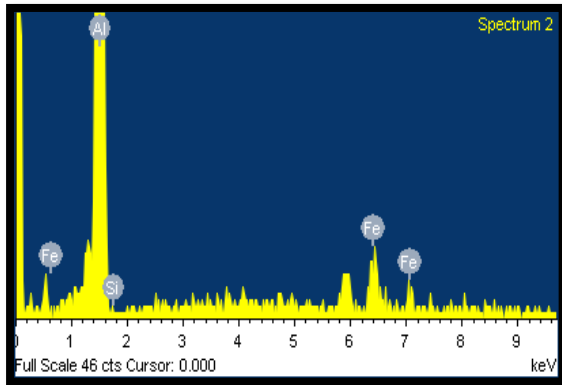


Εικόνα 33, S.E.M. Μήτρα κράματος αλουμινίου 6082

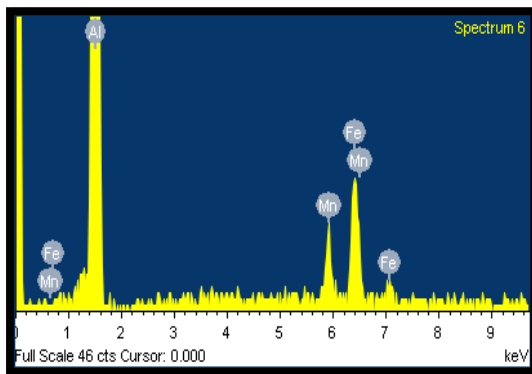
Συγκολλήσεις Δια Τριβής με Ανάδευση Ανόμοιων Κραμάτων Αλουμινίου 5083 & 6082

πυριπίου και σιδήρου, πιθανότατα σωματίδια β-φάσης.

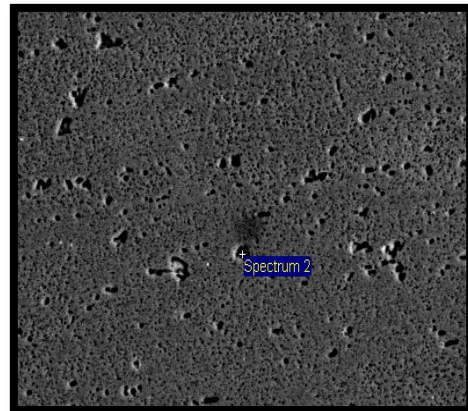
Ταυτόχρονα σε άλλο τυχαίο κατακρήνισμα εμφανίζονται ποσοστά Al, Mg και Fe, τα οποία εκφράζουν την φάση $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe}_x\text{Mn}_{(1-x)})_3\text{Si}_5$ (Εικόνες:32,35) .



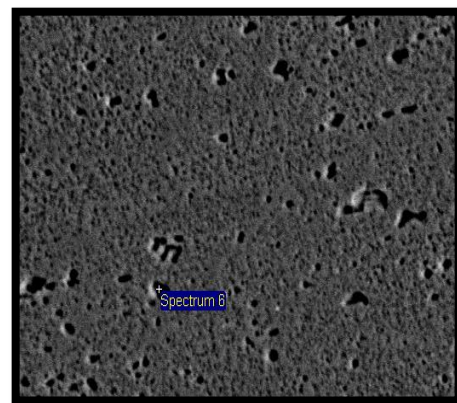
Εικόνα 34, S.E.M., Χημική Ανάλυση κατακρήνισματος σε κρέμα Αλουμινίου 6082(Spectrum 2).



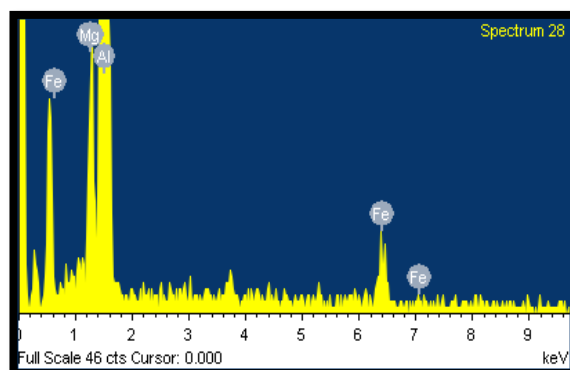
Εικόνα 35, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο κατακρήνισμα σε κρέμα αλουμινίου 6082



Εικόνα 36, S.E.M., Χημική Ανάλυση κατακρήνισματος σε κρέμα Αλουμινίου 6082(Spectrum 6).



Εικόνα 38, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε κρέμα αλουμινίου 6082, πιθανότατα φάσης -α.

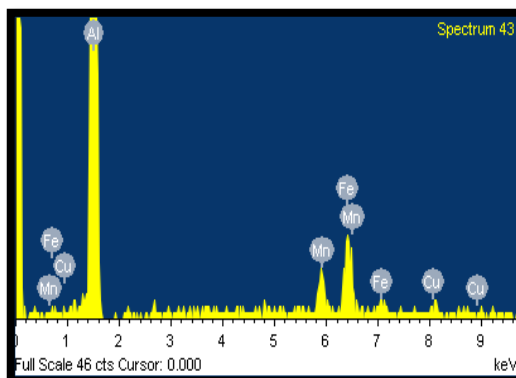


Εικόνα 37, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο κατακρήνισμα σε κρέμα αλουμινίου 6082

3. Αποτελέσματα- Συζήτηση

Δοκίμιο Α

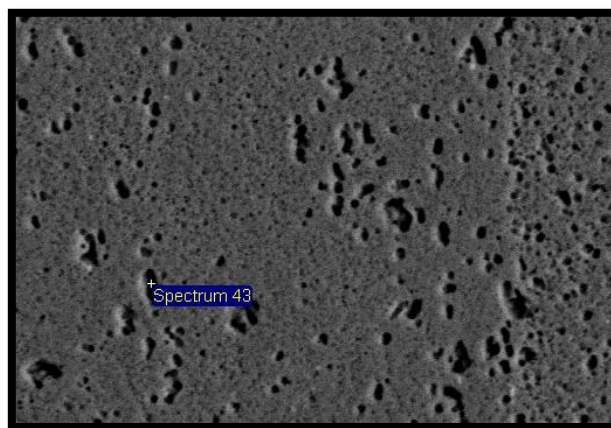
Όπως έχει αναπτυχθεί παραπάνω, σε κράματα αλουμινίου 6082, ο σίδηρος είναι η συνηθέστερη μορφή ακαθαρσίας που εμφανίζεται ως διμεταλλική φάση Al-Fe, Al-Fe-Si & Al-Fe-Mn-Si, εξαρτώμενες πάντα από τις συνθέσεις του κράματος. Πιο συγκεκριμένα λόγω του μικρού ποσοστού Fe που υπάρχει στο κράμα αναμένουμε τον σχηματισμό των σωματιδίων β-Al₅FeSi, α-Al₁₂(Fe_xMn_(1-x))₃Si και Mg₂Si, κατά την διάρκεια της στερεοποίησης. (57)



Εικόνα 38, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε Κατακρήμνισμά Α' δοκιμίου

Πίνακας 12, Χημική Ανάλυση Spectrum 43

Element	Weight%	Atomics %
Al K	73.55	85.32
Mn K	5.98	3.41
Fe K	17.47	9.79
Cu K	3.00	1.48
Totals	100.00	

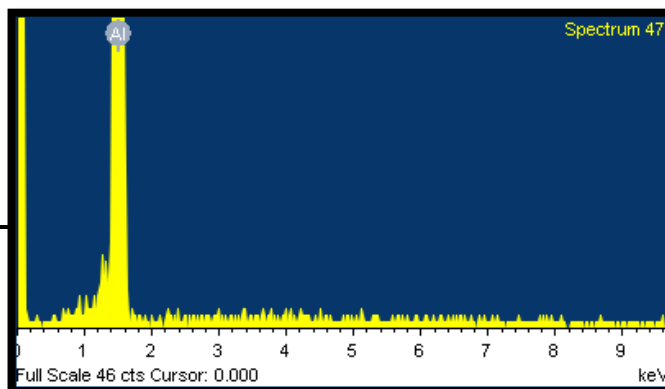


Εικόνα 39, S.E.M., Επιλογή Κατακρημνίσματος Α' Δοκιμίου

Το συγκεκριμένο σημείο χημικής ανάλυσης αφορά την μήτρα, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από το ποσοστό αλουμινίου.

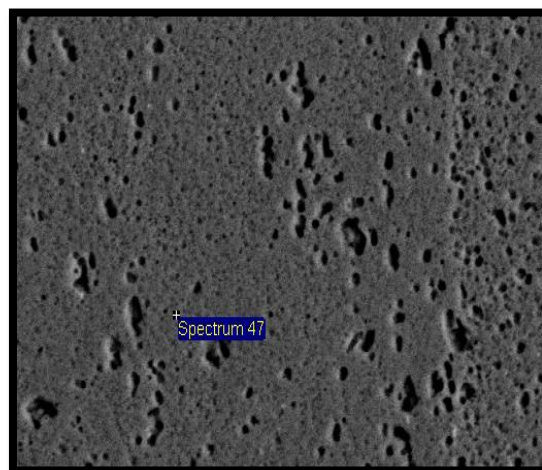
Πίνακας 13, Χημική Ανάλυση Spectrum 47

Element	Weight %	Atomic %
Al K	100.00	100.00
Totals	100.00	



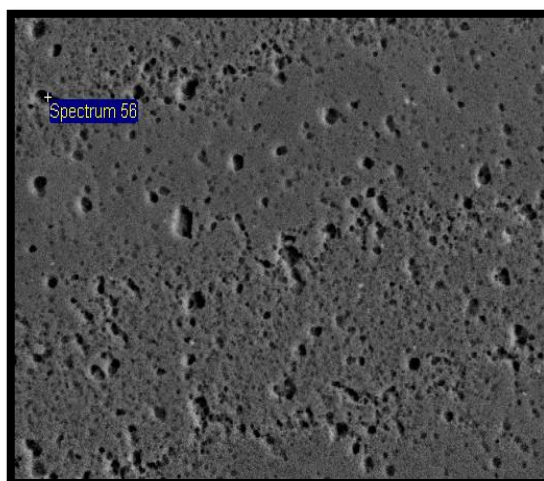
Εικόνα 40, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της Μήτρας Α' Δοκιμίου

Δεξιά στην εικόνα παρατηρείται μία νοητή ευθεία μετά την οποία παρατηρούμε ότι τα κατακρήμνισματα είναι αρκετά πιο μικρά καθώς και πιο πυκνά. Εκεί ακριβώς είναι το όριο της Θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και σύμφωνα με τα προαναφερόμενα γεγονότα αναμένουμε σε αυτά τα σημεία να έχουμε μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή, λόγω της παρεμποδιζόμενης διάδοσης των διαταραχών. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα θα επιβεβαιωθούν από τις ακόλουθες σκληρομετρήσεις.



Εικόνα 41, S.E.M., Επιλογή σε τυχαίο σημείο της Μήτρας Α' Δοκίμιου

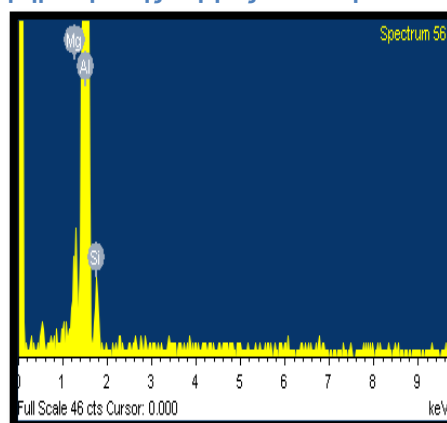
Στη συνέχεια σε διαφορετική μέτρηση που έγινε, πάλι παρατηρούμε τα όρια των ζωνών, ενώ αυτή τη φορά η χημική σύσταση απευθύνεται σε φάση η οποία περιέχει πυρίτιο, προερχόμενη από το αλουμίνιο της σειράς 6XXX. Πιθανότητα μπορεί να είναι σωματίδια και των 3 φάσεων ($\alpha, \beta, \text{Mg}_2\text{Si}$), καθώς τα κράματα δεν έχουν υπερβεί την θερμοκρασία των 450°C από την φύση της συγκόλλησης, άρα είναι εντός του θερμοκρασιακού εύρους δημιουργίας τους.



Εικόνα 42, S.E.M., Επιλογή σε τυχαίο κατακρήμνισμα της Μήτρας Α' Δοκίμιου

Πίνακας 14, Χημική Ανάλυση Spectrum 56

Element	Weight %	Atomic %
Mg K	2.34	2.60
Al K	92.42	92.37
Si K	5.24	5.03
Totals	100.00	



Εικόνα 43, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε κατακρήμνισμα Α' Δοκίμιου

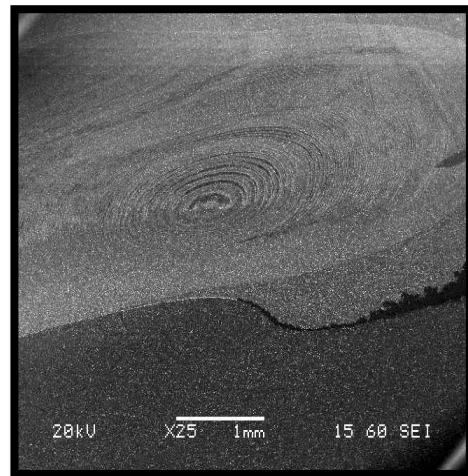
Ωστόσο παρ όλου που δεν είναι ευδιάκριτα όρια και η ύπαρξη των κόκκων, παρατηρείται η ύπαρξη νοητών γραμμών εντός των οποίων είναι χαρακτηριστική η μεγαλύτερη πυκνότητα των κατακρημνισμάτων και των διαταραχών.

Από τις Μικρογραφίες (44,45) της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας έχουμε :

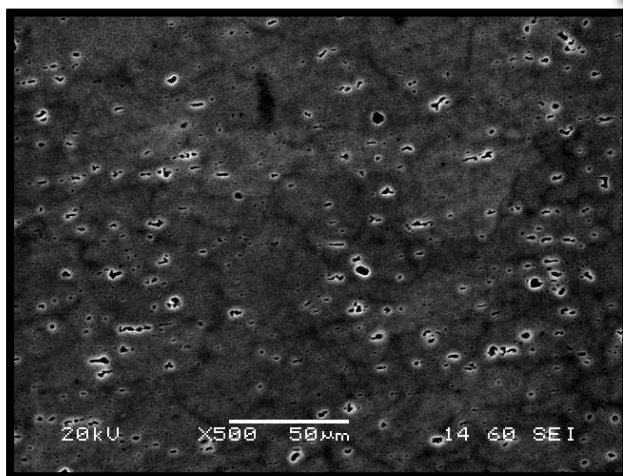
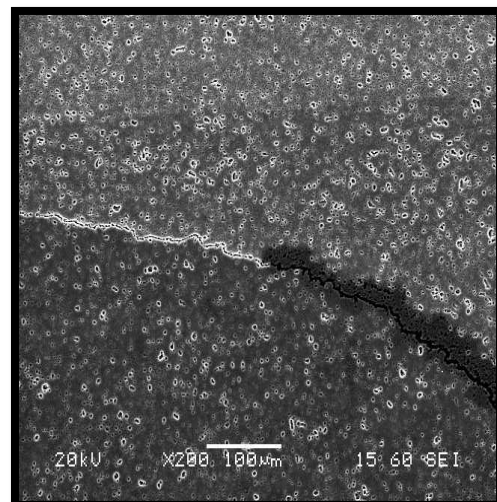
Είναι ευδιάκριτη η ροική κίνηση του υλικού, η οποία πραγματεύεται την καλή μεταφορά και ανακατανομή του υλικού . Ταυτόχρονα παρατηρείται ότι η ασυνέχεια των δύο υλικών είναι κοντά στην ζώνη της συγκόλλησης οπότε για λόγους ασφάλειας η συγκόλληση απορρίπτεται.

Η σκιά(Εικόνα 44), στο τέλος της φωτογραφίας πιθανότητα είναι από την προσβολή του δοκιμίου.

Με την χρήση των οπισσοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων παρατηρούνται οι κόκκοι του υλικού, ενώ τα κατακρημνίσματα βρίσκονται πεπλατυσμένα λόγω της κίνησης του πείρου με μέγεθος περίπου 5 μm .



Εικόνα 45, S.E.M., Μεγέθυνση στο Σημείο Ασυνέχειας των δύο υλικών

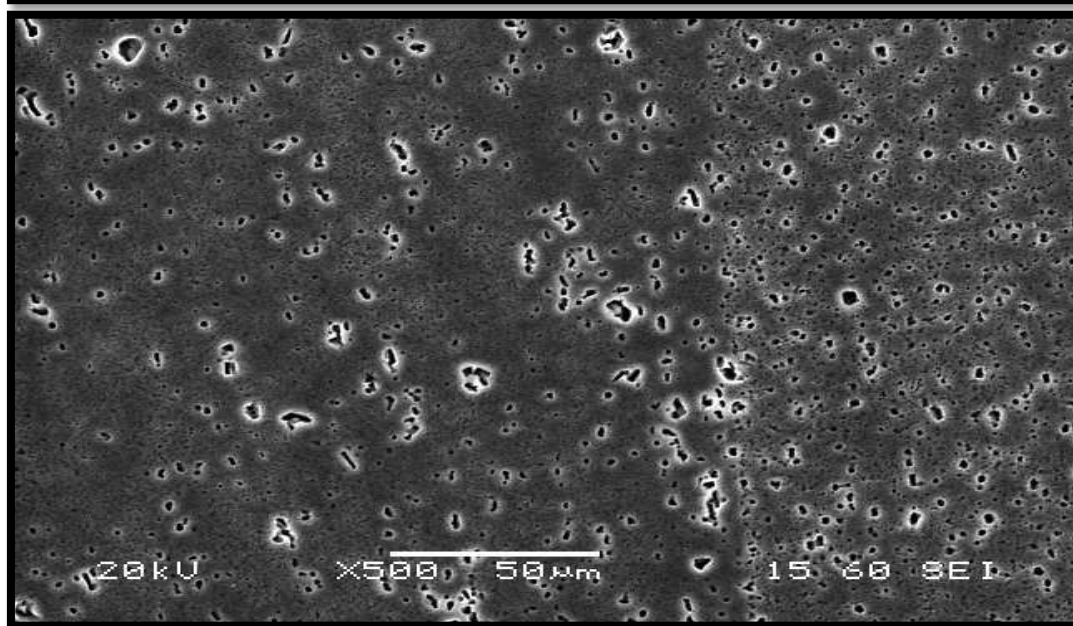
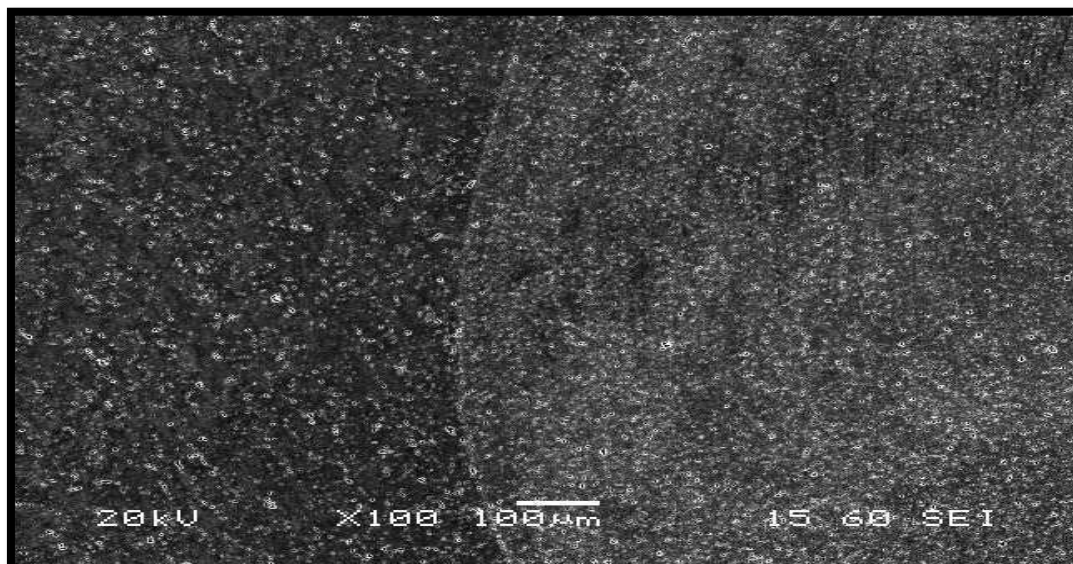


Εικόνα 46, S.E.M., Χρήση οπισσοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων για την παρατήρηση των κατακρημνισμάτων και των κόκκων .

Στην συγκεκριμένη εικόνα(46), υπάρχει μεγέθυνση στο σημείο ασυνέχειας κατά το οποίο είναι εμφανείς η νοητή γραμμή της συγκόλλησης και ουσιαστικά είναι αντιληπτή η μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Από τις εικόνες είναι ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ της ζώνης συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Επίσης αξίζει να αναφερθεί η διαφορά πυκνότητας και μεγέθους των κατακρημνισμάτων που υπάρχει μεταξύ των δύο προαναφερόμενων ζωνών.

Εικόνα 47 S.E.M., όρια μηχανικά (αριστερή μεριά) και θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης(δεξιά μεριά)

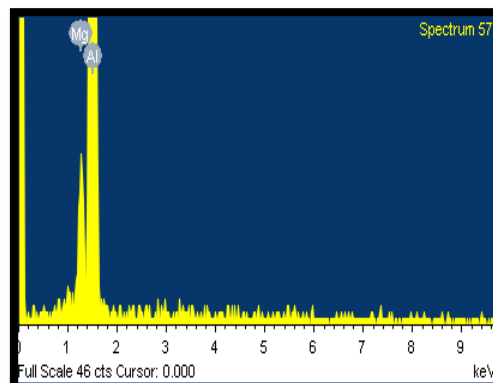


Εικόνα 48 S.E.M., Μεγέθυνση στην Εικόνα 48, για την συσχέτιση του μεγέθους των κατακρημνισμάτων στις 2 ζώνες.

Δοκίμιο Β

Πίνακας 15, Χημική Ανάλυση Spectrum 57

Element	Weight%	Atomic%
Mg K	3.55	3.92
Al K	96.45	96.08
Totals	100.00	

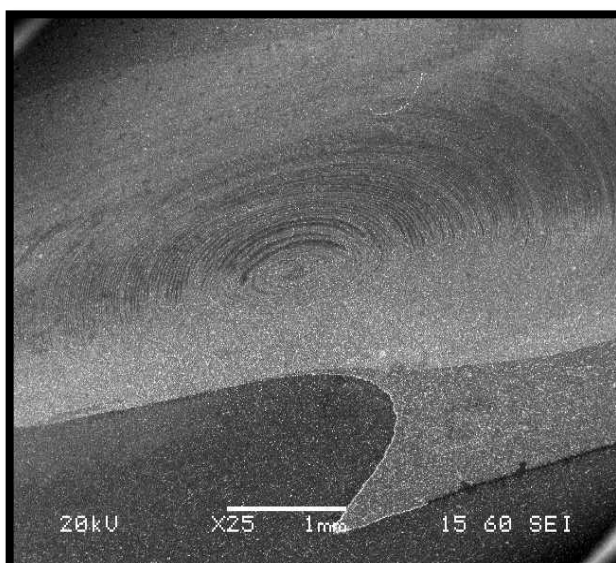


Εικόνα 49, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας του Β' Δοκίμιο.

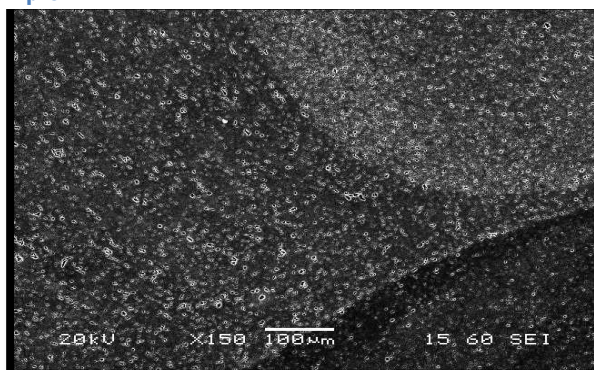
Στο δεύτερο δοκίμιο δεν παρατηρούνται καθόλου διαφορές σε σχέση με το πρώτο, ενώ σχεδόν όλες οι χημικές αναλύσεις δίνουν μόνο ποσοστά αλουμινίου και μαγνησίου. Ωστόσο όλες οι φάσεις που υπάρχουν στο προηγούμενο δοκίμιο αναμένονται να εμφανίζονται και σε αυτό καθώς σε αυτό το δοκίμιο, λόγω της μεγαλύτερης περιστροφικής κίνησης του πείρου έχουμε μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας, άρα και σίγουρη εμφάνιση των φάσεων α και β .

Σύμφωνα με την εικόνα παρατηρείται πάλι η γραμμή ροής της συγκόλλησης στην οποία όμως η γραμμή ασυνέχειας είναι αρκετά πιο μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης. Άρα θεωρείται επιτυχημένη η συγκεκριμένη συγκόλληση. Η διαφορά στις δύο συγκολλήσεις προκύπτει από την διαφορά στην παραγόμενη θερμότητα η οποία παράγεται. Στο δεύτερο δοκίμιο στο οποίο έχουμε 1000 στροφές/λεπτό έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή και πρόσδοση θερμότητας, λόγω της μεγαλύτερης στροφορμής, η οποία προκαλεί μεγαλύτερη ανάμειξη των δύο υλικών και μεγαλύτερη ομοιογένεια.

Τέλος είναι ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ των δύο ζωνών συγκόλλησης (W.N-T.M.Z.), ενώ είναι εμφανής πάλι



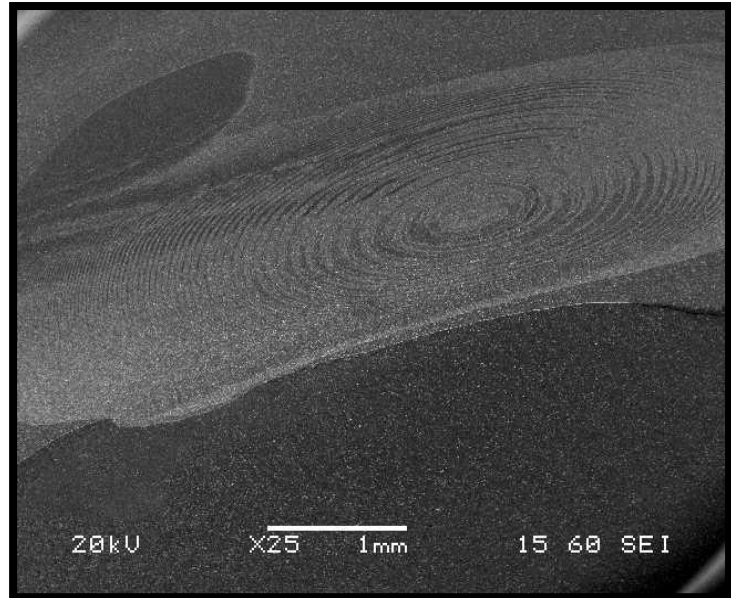
Εικόνα 50, S.E.M., Συγκόλληση και Ροϊκές Γραμμές Β' Δοκίμιο



η διαφορά στο μέγεθος και την πυκνότητα των κατακρημνισμάτων(Εικόνα 52)

Δοκίμιο Γ

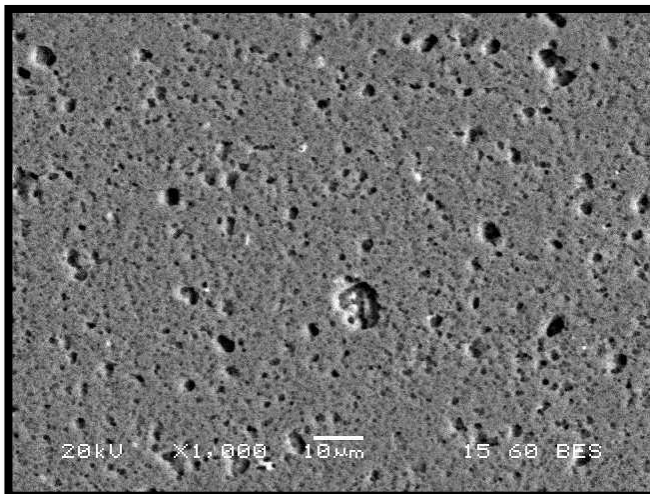
Από φωτογραφίες της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας παρατηρείται ότι το μέγεθος των κατακρημνισμάτων δεν ξεπερνάει τα 10 μm. Επίσης η γραμμή ασυνέχεια βρίσκεται αρκετά κοντά με το όριο της συγκόλλησης, οπότε για λόγους ασφαλείας η συγκόλληση απορρίπτεται. Οι γραμμές ροής που ακολουθούν τα δύο υλικά παρατηρούμε ότι είναι πιο έντονες σε σχέση με των δύο προηγούμενων δοκιμίων.



Εικόνα 39. Φωτογραφία μέσω χρήσης S.E.M. από την ζώνη συγκόλλησης.

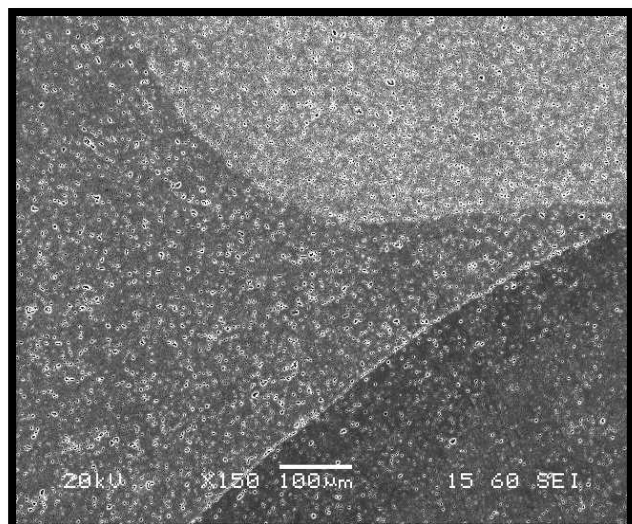
Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης που εφαρμόζεται λόγω των πιο έντονων διαταραχών που προκαλούνται.

Ταυτόχρονα είναι ευδιάκριτα, τόσο τα όρια μεταξύ της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης συγκόλλησης, όσο και η διαφορά



στην πυκνότητα και το μέγεθος των κατακρημνισμάτων των δύο προαναφερόμενων ζωνών.

Εικόνα 40, S.E.M., Θερμομηχανικά, και Μηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη.

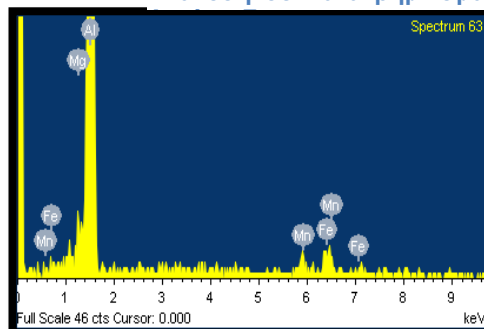


Σε χημική ανάλυση που έγινε στην ζώνη συγκόλλησης στο συγκεκριμένο δοκίμιο, σε πιθανό κατακρήμνισμα :

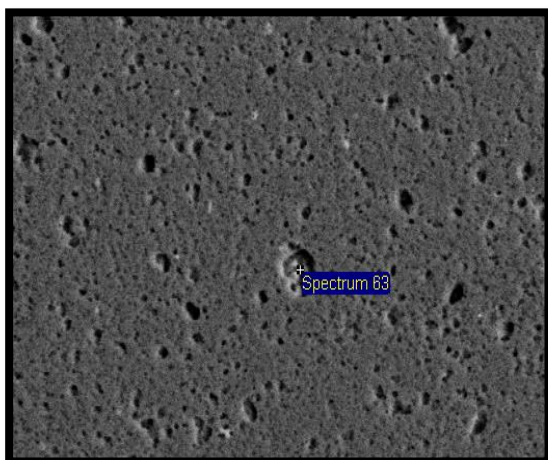
Πίνακας 16, Χημική Ανάλυση Spectrum 63

Element	Weight%	Atomic%
Mg K	0.79	0.90
Al K	92.37	95.66
Mn K	1.96	1.00
Fe K	4.88	2.44
Totals	100.00	

Εικόνα 41, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε Κατακρήμνισμα.

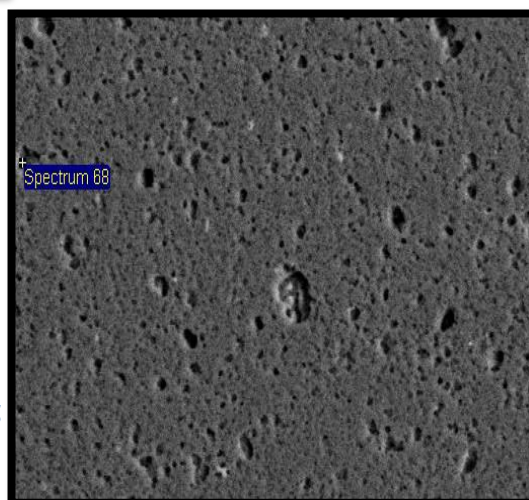


Στο συγκριμένο δοκίμιο, παρατηρείται ακόμα πιο μικρό μέγεθος κατακρημνισμάτων . αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης κατά την οποία δεν προσδίδεται ο απαραίτητος χρόνος παραμονής σε συγκριμένη θερμότητα ώστε να αναπτυχθούν οι κόκκοι. Χημική ανάλυση στην μήτρα του υλικού μας δίνει μεγάλο ποσοστό αλουμινίου, όπως ακριβώς αναμένεται, ενώ τα διάφορα ποσοστά σιδήρου οφείλονται σε σωματίδια φάσης α-β ή Mg₂Si



προσδίδεται ο απαραίτητος χρόνος παραμονής σε συγκριμένη θερμότητα ώστε να αναπτυχθούν οι κόκκοι. Χημική ανάλυση στην μήτρα του υλικού μας δίνει μεγάλο ποσοστό αλουμινίου, όπως ακριβώς αναμένεται, ενώ τα διάφορα ποσοστά σιδήρου οφείλονται σε σωματίδια φάσης α-β ή Mg₂Si

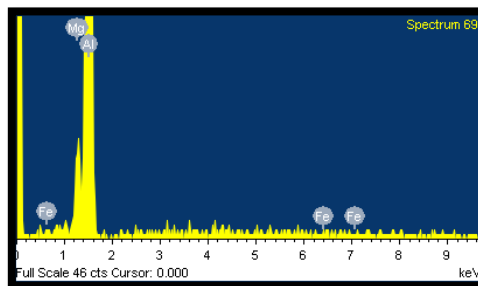
Εικόνα 42, S.E.M., Τυχαίες Επιλογές Κατακρημνισμάτων για Χημικές Αναλύσεις .Δοκίμιο Γ



Εικόνα 43, S.E.M., Τυχαίες Επιλογές Κατακρημνισμάτων για Χημικές Αναλύσεις

Δοκίμιο Δ

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο αξίζει να αναφερθεί η μεγαλύτερη εμφάνιση σιδήρου σε όλες τις χημικές αναλύσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός κατά το οποίο ο σίδηρος αποτελεί την συνηθέστερη μορφή ακαθαρσίας στα κράματα αλουμινίου 6XXX. Επίσης λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής θερμότητας που έχουμε λόγω των περισσότερων στρωφών/λεπτό, δικαιολογείται η μεγαλύτερη παρουσία σιδήρου.

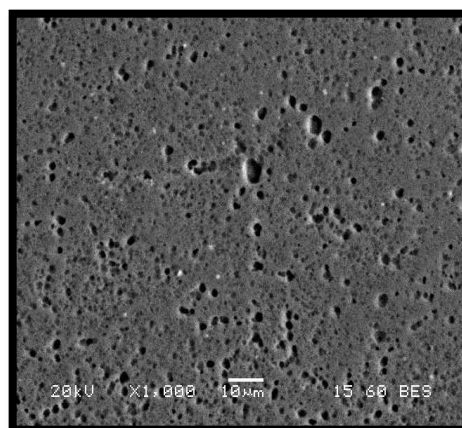


Εικόνα 44, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας .Δοκίμιο Δ

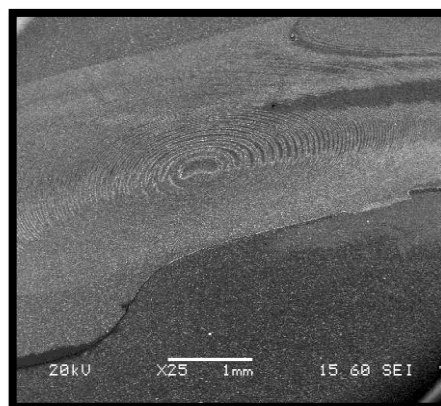
Πίνακας 17, Χημική Ανάλυση Spectrum 69

Element	Weight %	Atomic %
Mg K	2.25	2.50
Al K	97.20	97.23
Fe K	0.55	0.27
Totals	100.00	

Για το μέγεθος των καρβιδίων, παρατηρείται ότι δεν ξεπερνάει τα 10 μm, μικρότερα από τα 2 πρώτα δοκίμια. Η συγκεκριμένη διαφορά προκύπτει από την διαφορετική ταχύτητα συγκόλλησης. Στα δύο πρώτα δοκίμια δεδομένου της μικρότερης ταχύτητας συγκόλλησης τα δοκίμια υφίστανται περισσότερο χρόνο την επαφή με τον πείρο, αναπτύσσοντας περισσότερη θερμότητα, δικαιολογώντας έτσι το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων και κατακρημνισμάτων. Επίσης από εικόνες στο σημείο συγκόλλησης παρατηρούμε ότι η γραμμή ασυνέχειας είναι στα όρια της ζώνης συγκόλλησης, συνεπώς και η συγκόλληση απορρίπτεται. Είναι ευδιάκριτες οι ροϊκές γραμμές κατά μήκος του κέντρου της συγκόλλησης κάτι το οποίο όπως έχει αναφερθεί συμβολίζει την καλή ανάμειξη των δύο υλικών.



Εικόνα 46, S.E.M., Μήτρα Υλικού. Δοκίμιο Δ



Εικόνα 45, Συγκόλληση και Ροϊκές Γραμμές. Δοκίμιο Δ

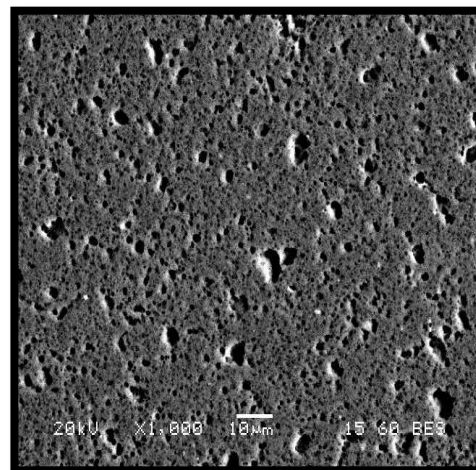
Δοκίμιο Ε

Σε φωτογραφία από την ηλεκτρονική μικροσκοπία παρατηρούμε ότι το μέγεθος των κατακρημνισμάτων ποικίλει με το μέγιστο να είναι 10μm σύμφωνα με την κλίμακα. Σε χημικές αναλύσεις που έγιναν στα ευμεγέθη κατακρημνίσματα, κατά κύρια λόγω, όλα μας έδιναν ποσοστά αλουμινίου, σιδήρου και μαγνησίου, παρόμοια με τα παρακάτω.

Πίνακας 18, Χημική Ανάλυση Spectrum 39

Element	Weight%	Atomic%
Mg K	1.61	1.79
Al K	98.03	98.04
Fe K	0.36	0.17
Totals	100.00	

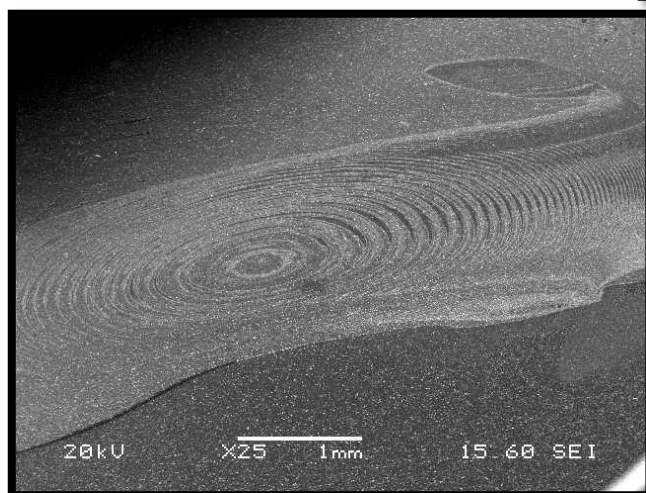
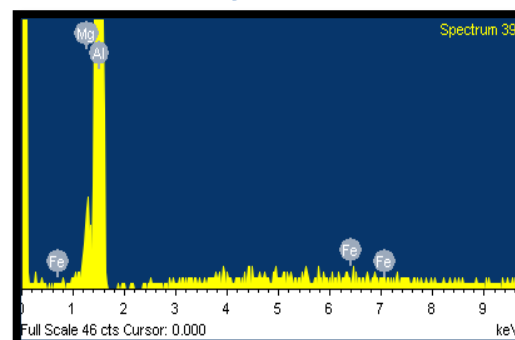
Εικόνα 47, S.E.M., Μήτρα υλικού . Δοκίμιο Ε



Κατά κύριο λόγω πρόκειται για σωματίδια της α-φάσης.

Προς χαρακτηρισμό της συγκόλλησης, παρατηρείται πιο έντονη η ανάπτυξη των ροικών γραμμών των δύο υλικών στο κέντρο της συγκόλλησης. Η γραμμή ασυνέχειας των δύο υλικών παρατηρείται ότι βρίσκεται εντός της συγκόλλησης, συνεπώς και απορρίπτεται.

Εικόνα 48, S.E.M., Χημική Ανάλυση Κατακρημνίσματος, Δοκίμιο Ε



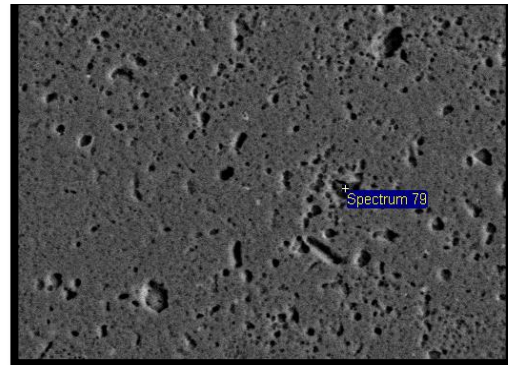
Αναφέρεται ότι πάνω δεξιά εξαφανίζονται οι ροικές γραμμές, κάτι το οποίο οφείλεται στην σχετικά υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης.

Εικόνα 49, S.E.M., Συγκόλληση και ανάπτυξη Ροικών Γραμμών, Δοκίμιο Ε

Δοκίμιο Z

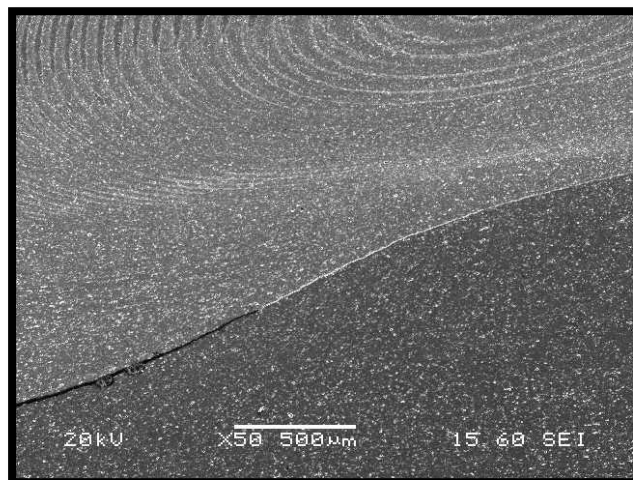
Σε χημική ανάλυση στο συγκεκριμένο δοκίμιο λαμβάνονται πάλι παρόμοια αποτελέσματα αναφερόμενα σε ποσοστά αλουμινίου, μαγνησίου και σιδήρου.

Εικόνα 50, S.E.M., Επιλογή τυχαίου Κατακρημνίσματος .Δοκίμιο Z



Πίνακας 19, Χημική Ανάλυση, Spectrum 79

Element	Weight%	Atomic%
Al K	66.51	80.37
Mn K	8.21	4.87
Fe K	25.28	14.76
Totals	100.00	

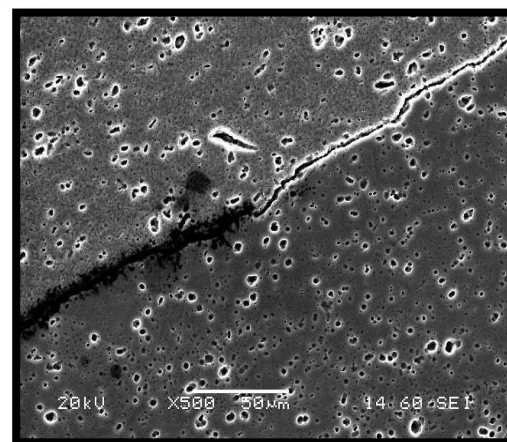


Η γραμμή ασυνέχειας βρίσκεται πάλι εντός του πεδίου συγκόλλησης, συνεπώς και το δοκίμιο απορρίπτεται. Παράλληλα από μεγέθυνση της Εικόνας :51, στο σημείο ασυνέχεια παρατηρείται η διαφορά στη φορά κίνησης των κατακρημνισμάτων. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να αναφερθεί ότι τα κατακρημνίσματα στην

Εικόνα 52, S.E.M., Ροϊκές γραμμές και Ζώνη ασυνέχειας. Δοκίμιο Z

θερμομηχανική επηρεασμένη ζώνη συγκόλλησης τείνουν να ακολουθούν της περιστροφική κίνηση του πείρου συγκόλλησης. Τα κατακρημνίσματα μοιάζουν να βρίσκονται κυκλικά στο χώρο, πιθανότατα περικρυσταλλικά αναπτυσσόμενα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης, δεν είναι τόσο εύκολη η παρατήρηση των κόκκοι λόγω των

διαταραχών που προκαλούνται.



Εικόνα 51, S.E.M., Μεγέθυνση στο σημείο ασυνέχεια των δύο υλικών .Δοκίμιο Z

Δοκίμιο ΣΤ

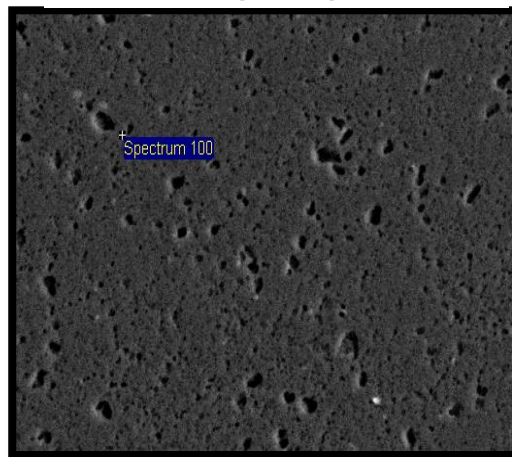
Από χημικές αναλύσεις πάλι λαμβάνονται ποσοστά αλουμινίου, μαγνησίου και σιδήρου, χωρίς καμία ιδιαίτερη διαφορά

Εικόνα 53, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας, Δοκίμιο ΣΤ

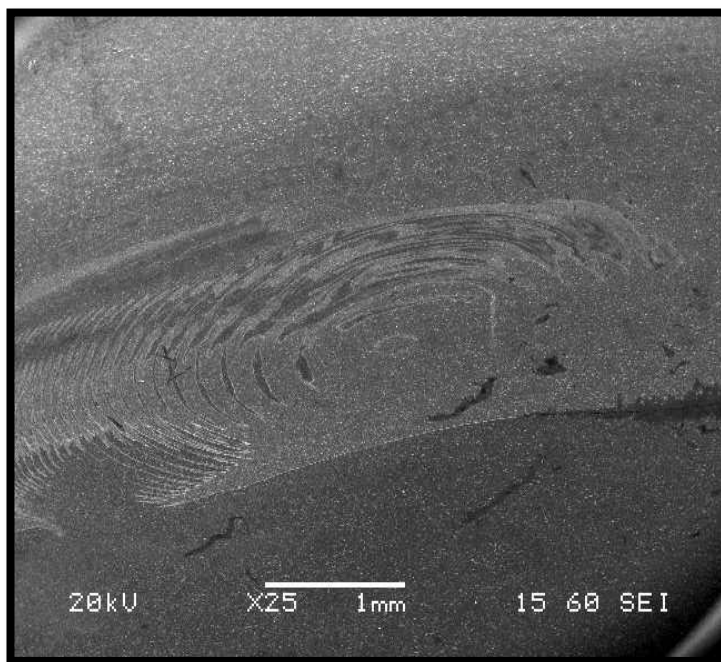
στις αναλογίες.

Πίνακας 20, Χημική Ανάλυση Spectrum 100

Element	Weight %	Atomic %
Al	91.61	95.73
Mn	3.45	1.77
Fe	4.94	2.50
Totals	100.00	



Δεν παρατηρείται καμία αξιοσημείωτη διαφορά ούτε στο μέγεθος ούτε στην πυκνότητα των κατακρημνισμάτων. Από την άλλη μεριά, στη συγκόλληση παρατηρούμε ότι η γραμμή ασυνέχειας των δύο υλικών βρίσκεται εντός, ενώ οι γραμμές ροής δεν υπάρχουν σε ένα μεγάλο κομμάτι τις εικονιζόμενης συγκόλλησης(Εικόνα 54).



Εικόνα 54, S.E.M., Ζώνη Συγκόλλησης ΣΤ' Δοκίμιο

Το προαναφερόμενο γεγονός οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, καθώς δεν επιτυγχάνεται ομαλή ανάμειξη των δύο υλικών. Η συγκόλληση του συγκεκριμένου δοκιμίου απορρίπτεται. Διάφορες σκουρόχρωμες περιοχές οφείλονται σε υπερβολική προσβολή του δοκιμίου. Επίσης δεν υπάρχουν διακριτά όρια μεταξύ των ζωνών συγκολλήσεων σε σχέση με τα άλλα δοκίμια.

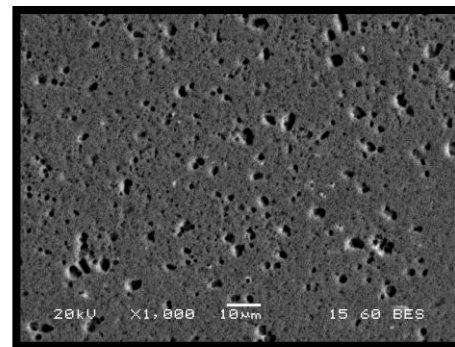
Δοκίμιο I

Από χημική ανάλυση που έγινε στο συγκεκριμένο δοκίμιο μέσω της χρήσης S.E.M.:

Πίνακας 21, Χημική Ανάλυση Spectrum103

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

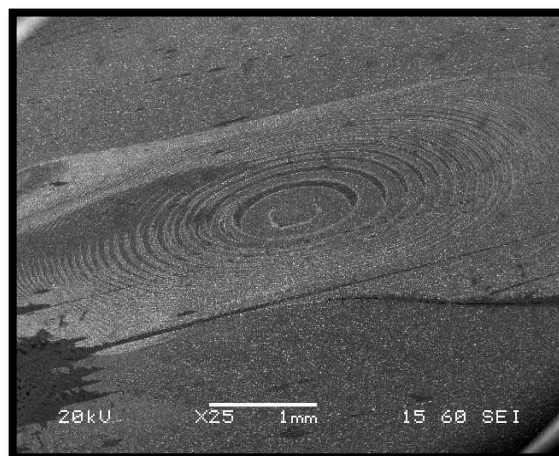
Η ύπαρξη Μαγγανίου οφείλεται πιθανότατα σε κάποια φάση του κράματος 5083, καθώς σε αυτό υπάρχουν φάσεις που το επιφέρουν. ($Mg_3Mn_2Al_{12}$). Από παρεμφερή φωτογραφία, το μέγεθος και η πυκνότητα των κατακρημνισμάτων δεν εμφανίζει καμία ιδιαίτερη διαφορά σε σχέση με τα αναμενόμενα.



Όσο αφορά την συγκόλληση, παρατηρείται ότι έχει μεγαλύτερη

ομοιογένεια σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο. Αυτό δικαιολογείται από την μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής αναπτύσσεται περισσότερη θερμότητα συνεπώς, παρά την μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, προκαλείται μεγαλύτερη ομοιογένεια μεταξύ των δύο υλικών.

Εικόνα 56, S.E.M., Επιλογή τυχαίου Κατακρημνίσματος, I' Δοκίμιο



Εικόνα 57, S.E.M., Ζώνη Συγκόλλησης I' Δοκίμιο

Πάλι εμφανίζονται περιοχές που δεν υπάρχει ομαλή ανάμειξη, ωστόσο όμως βρίσκεται σε καλύτερη κατάσταση από το προηγούμενο δοκίμιο. Η γραμμή ασυνέχειας βρίσκεται εντός της συγκόλλησης συνεπώς και η συγκόλληση απορρίπτεται. Ο μεγάλος δακτύλιος στο κέντρο οφείλεται στην έντονη διαταραχή που υφίσταται το υλικό καθώς υφίσταται

τις πιο έντονες συνθήκες(μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης –μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής).

Τελειώνοντας το κομμάτι του SEM είναι άξιο να αναφερθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αδύνατη η παρουσία φωτογραφιών του οπτικού μικροσκοπίου λόγω απουσίας φωτογραφικής μηχανής. Ωστόσο αξίζει να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις οι οποίες αφορούν όλα τα δοκίμια :

- Σε όλα τα δοκίμια είναι ευδιάκριτο το αποτύπωμα του πείρου και με γυμνό μάτι, χωρίς όμως να ξεχωρίζουν οι ζώνες συγκόλλησης.
- Στον πυρήνα συγκόλλησης παρατηρείται ανακρυσταλλωμένη μικροδομή ,με μέγεθος κόκκου μικρότερο από αυτό του μητρικού υλικού, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης και της θέρμανσης που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.
- Στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη έχουμε ανάπτυξη τόσο θερμικών όσο και μηχανικών φαινομένων. Οι κόκκοι του υλικού επιμηκύνονται γύρω από τον πυρήνα συγκόλλησης, ενώ πλέον αποκτούνε μια δακτυλιοειδή δομή.
- Είναι ευδιάκριτα τα όρια όλων των ζωνών συγκόλλησης στο μικροσκόπιο ,όχι όμως το flow arm, καθώς δημιουργείται μόνο στην υποχωρούσα πλευρά του δοκιμίου, κάτι το οποίο στην περίπτωση του Lap Fillet Joint δεν υφίσταται.

Από τα αποτελέσματα και τις μετρήσεις του S.E.M. παρατηρούμε ότι τα περισσότερα δοκίμια έχουν παραπλήσια αποτελέσματα, ανεξαρτήτως αν τα περισσότερα από αυτά (6/8) απορρίπτονται. Οι παραγόμενες φάσεις και το μέγεθος των κόκκων είναι αρκετά κοντά στα αναμενόμενα χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με τις ζώνες συγκόλλησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι μόνο σε δύο δοκίμια (E, ΣΤ) η γραμμή ασυνέχειας βρίσκεται εντός της συγκόλλησης των δύο υλικών. Αυτό γίνεται στα δοκίμια στα οποία έχουμε σχετικά μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, με την μειωμένη ταχύτητα περιστροφής. Αυτό πιθανότατα έχει ως αποτέλεσμα την μην απαιτούμενη ανάπτυξη θερμότητας , άρα και την όχι τόσο καλή ανάμειξη τους. Τα άλλα δοκίμια από αυτά που απορρίπτονται, εμφανίζουν την γραμμή ασυνέχειας «κοντά» στην ζώνη συγκόλλησης, οπότε και απορρίπτονται για λόγους ασφάλειας στην μορφή του Lap Fillet Joint.

Σε σύγκριση με την μελέτη του κ. Δανόλιου Νικόλαου (30) σε παρόμοια κράματα αλουμινίου, έχουν επιλεχθεί ως βέλτιστες συνθήκες οι:

- Ταχύτητα περιστροφής :750 στροφές/λεπτό
- Ταχύτητα συγκόλλησης: 60mm/ λεπτό

Οι συνθήκες αυτές είναι ενδιάμεσες από αυτές των δοκιμών ΣΤ και Ι. Πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη που παρατηρείται στο μέγεθος των κόκκων στην ΘΕΖ είναι παρόμοια με αυτή που σημειώθηκε και στα δικά μας δοκίμια. Ταυτόχρονα επιβεβαιώνεται η μη ανάπτυξη των κόκκων στην Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη , λόγω της μη αναπτυγμένης θερμότητας στο συγκεκριμένο κομμάτι συγκόλλησης, άρα και της μη θερμικής ανακρυστάλλωσης.

Σε σύγκριση με την μελέτη του κ. Χριστακόπουλου (38), η οποία βασίστηκε στην μελέτη διαφόρων παραμέτρων συγκόλλησης στα ίδια κράματα αλουμινίου, αναφέρει τις διαφορετικές τιμές σκληρότητας στα δοκίμια ανάλογα με το AS & RS που βρίσκονται τα δοκίμια. Στην παρούσα εργασία στην οποία τα δοκίμια βρίσκονται σε Lap Fillet Joint, όπως έχει αναφερθεί, δεν αντιμετωπίζουμε τέτοια προβλήματα καθώς και τα δύο δοκίμια επιδέχονται και τις δύο πλευρές ταυτόχρονα.

Τέλος, καθώς είναι η αδύνατη η σκληρομέτρηση των δοκιμίων λόγω του covid-19 και περιορισμού της πρόσβασης στα εργαστήρια της σχολής, παρατηρώντας την ομοιότητα των μικροδομών που εμφανίζουν, η παρούσα εργασία με τις δύο προαναφερόμενες, θα ήταν εύλογο να υποτεθεί ότι οι σκληρομετρήσεις των δοκιμίων θα είναι παραπλήσιες. Το γεγονός ότι κάποια δοκίμια απορρίπτονται στην παρούσα εργασία, οφείλεται στην διαφορετική γεωμετρία συγκόλλησης και όχι στο μεταλλουργικό κομμάτι της συγκόλλησης.

4. Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και ο έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, σε συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης FSW και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα κράματα αλουμινίου 5083 και 6082 συγκολλήθηκαν σε θέση Lap Fillet Joint και κρίνονται για τις παραγόμενες μηχανικές ιδιότητες και την μικροδομή τους. Τα βασικότερα συμπεράσματα είναι :

1. Όλες οι συγκολλήσεις φαινομενικά είναι επιτυχημένες καθώς έχει επιτευχθεί η συσσωμάτωση των 2 υλικών. Ωστόσο για λόγους ασφάλειας απορρίπτονται οι συγκολλήσεις όπου η γραμμή ασυνέχειας βρίσκεται εντός ή κοντά της ζώνης συγκόλλησης.
2. Παρατηρούμε ότι σε όλα τα δοκίμια υπάρχει αρκετό παραγόμενο υλικό στα όρια της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, στο α δοκίμιο, λόγω της πολύ αργής ταχύτητας συγκόλλησης σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής, υπάρχει αρκετό παραπάνω παραγόμενο υλικό στα όρια της συγκόλλησης(Ribbon Flesh). Αυτή η ανομοιογένεια είναι ανεπιθύμητη, πόσο μάλλον στο συγκεκριμένο δοκίμιο που είναι αρκετά πιο έντονο, καθώς πέρα από την απώλεια υλικού, απαιτείται περαιτέρω μηχανική επεξεργασία του υλικού για την διόρθωση του (κοπή, λείανση), κάτι το οποίο σε βιομηχανική κλίμακα είναι ασύμφορο.
3. Σε πολλά δοκίμια, παρατηρείται ότι μεταξύ των δύο κραμάτων αλουμινίου υπάρχει σημείο στο οποίο δεν φτάνει η συγκόλληση(σημείο ασυνέχειας) ,συνεπώς κατά την διάρκεια της λείανσης και της στίλβωσης ήταν δυνατή η εισχώρηση νερού και η έξοδος του από το πλάι. Αυτό μπορεί να προβεί καταστροφικό σε περίπτωση διαβρωτικών υγρών (π.χ. θαλασσινό νερό) μέσω της δημιουργίας οξειδίων στο εσωτερικό των δοκιμίων.
4. Σε όλα τα δοκίμια παρατηρείται η δημιουργία τρύπας κατά την έξοδο του πείρου, κάτι το οποίο αποτελεί ένα σύνηθες πρόβλημα σε συγκολλήσεις FSW.
5. Σε όλα τα δοκίμια είναι ευδιάκριτη η δημιουργία ζωνών.
6. Απαραίτητος είναι ο ιδανικός συνδυασμός ταχύτητας συγκόλλησης και ταχύτητα περιστροφής για τα βέλτιστα αποτελέσματα.
7. Η παραγόμενη θερμοκρασία συγκόλλησης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην δημιουργεί μεγέθυνση των κόκκων επηρεάζοντας δυσμενώς τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.
8. Σε όλες τις εικόνες από το μικροσκόπιο παρατηρούμε ότι στο κέντρο της συγκόλλησης η πρώτες γραμμές ροής είναι πιο μεγάλες σε πάχος από τις επόμενες. Αυτό οφείλεται στην είσοδο του πείρου και την ανάμειξη του υλικού μέσω των διαταραχών ,χωρίς όμως να επηρεάζει αρνητικά την ροή των δύο υλικών.
9. Από την μικροσκόπια παρατηρούμε ότι είναι ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ της ζώνης συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης.
10. Μεταξύ των 2 προαναφερόμενων ζωνών είναι φανερό ότι υπάρχει διαφορά τόσο στο σχήμα των κατακρημνισμάτων όσο και στην φορά κίνησης τους.

11. Μεταξύ των ζωνών τα κατακρημνίσματα έχουν πιο μικρό μέγεθος σχετικά με τη ζώνη συγκόλλησης και είναι πιο πυκνά, εμποδίζοντας έτσι την πυκνότητα των διαταραχών.
12. Λόγω του συγκεκριμένου θερμοκρασιακού εύρους που αναπτύσσεται, κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, αναμένονται συγκεκριμένες ενδομεταλλικές φάσεις και μέγεθος κόκκων
13. Παρατηρούμε ότι στα δύο τελευταία δοκίμια υπάρχει μεγάλη ανομοιογένεια στην κυκλική ροή του υλικού κοντά στη ζώνη συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης κατά την οποία δεν δίνεται ο απαραίτητος χρόνος για την ομαλή ανακατανομή των δύο υλικών.
14. Ο Βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων είναι αυτός του δοκιμίου Β.

5. Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1, Μετάλλευμα Βωξίτης (90)	14
Εικόνα 2, Εφαρμογή του αλουμινίου στην δομική βιομηχανία (44)	14
Εικόνα 3, Χρήση Αλουμινίου σε Αυτοκινητοβιομηχανία και Αεροβιομηχανία. (91) ...	15
Εικόνα 4, Αλουμίνιο, (39).....	15
Εικόνα 5, <i>πρώτη εγκατάσταση βιομηχανικής παραγωγής αλουμινίου το 1888</i> <i>ικανότητας 20 κιλών ημερησίως, στο Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α. (45)</i>	16
Εικόνα 6, Διαδικασία Ανακύκλωσης Αλουμινίου (1).....	17
Εικόνα 7, Αλουμίνιο και Αυτοκίνητο (91).....	18
Εικόνα 8, Διάγραμμα Al-Cu	25
Εικόνα 9, Διάγραμμα Αλουμινίου-Χαλκού.....	25
Εικόνα 10, Διάγραμμα Αλουμινίου-Μαγνανίου.....	26
Εικόνα 11, Διάγραμμα Al-Mn	26
Εικόνα 12, Διάγραμμα Αλουμινίου-Πυριτίου	26
Εικόνα 13, Διάγραμμα Αλουμινίου-Ψευδαργύρου.....	26
Εικόνα 14, Διάγραμμα Αλουμινίου-Μαγνησίου	27
Εικόνα 15, Διαδικασία Συγκόλλησης.....	30
Εικόνα 16, Μέθοδοι συγκολλήσεων (προέλευση: Doyle et al., 1985).....	31
Εικόνα 17, Μορφές Butt Joint	34
Εικόνα 18, Μορφή Γωνιακής Σύνδεσης	35
Εικόνα 19, Μορφή Αυχενικής Σύνδεσης	35
Εικόνα 20, Μορφή Σύνδεσης κατ' ακμής.	35
Εικόνα 21, Πείρος.....	38
Εικόνα 22, Γεωμετρία του Εργαλείου.....	39
Εικόνα 23, Γεωμετρία Πείρου	40
Εικόνα 24, Παραγόμενες Ζώνες Συγκόλλησης	41
Εικόνα 25, Σχέση Ορίου Διαρροής και Ταχύτητας Πρόωσης της Συγκόλλησης.	45
Εικόνα 26, Σχέση Δύναμης-Χρόνου παραμονής και Θερμοκρασίας, κατά την Συγκόλληση	45
Εικόνα 27, Θερμοκρασία στην προωθούμενη (AS) και την υποχωρούσα πλευρά (RS), της επιφάνειας υποστήριξης του συγκολλημένου κράματος 7 mm από το κέντρο συγκόλλησης για κλίση εργαλείου 1,2,3 και 4. Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού για κλίση εργαλείου 1,2,3 και 4 ^ο (10).....	46
Εικόνα 28, Advanced & Retreating Side.....	47
Εικόνα 29, Μηχανή F.S.W. (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών).....	52
Εικόνα 30, S.E.M., Μήτρα Κράματος 5083.....	58
Εικόνα 31, S.E.M., Χημική Ανάλυση στο Κατακρήνισμα του κράματος Αλουμινίου 5083.....	59
Εικόνα 32, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας κράματος Αλουμινίου 6082.....	59
Εικόνα 33, S.E.M. Μήτρα κράματος αλουμινίου 6082.....	59
Εικόνα 34, S.E.M., Χημική Ανάλυση κατακρημνίσματος σε κράμα Αλουμινίου 6082(Spectrum 2).....	60
Εικόνα 35, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο κατακρημνισμό σε κράμα αλουμινίου 6082.....	60
Εικόνα 36, S.E.M., Χημική Ανάλυση κατακρημνίσματος σε κράμα Αλουμινίου 6082(Spectrum 6).....	60

Εικόνα 37 ,S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο κατακρήμνισμα σε κράμα αλουμινίου 6082.....	60
Εικόνα 38, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε κράμα αλουμινίου 6082, πιθανότατα φάσης – α.....	60
Εικόνα 39. Φωτογραφία μέσω χρήσης S.E.M. από την ζώνη συγκόλλησης.	66
Εικόνα 40, S.E.M., Θερμομηχανικά, και Μηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη.	66
Εικόνα 41, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε Κατακρήμνισμα. Δοκίμιο Γ	67
Εικόνα 42, S.E.M.,Τυχαίες Επιλογές Κατακρημνισμάτων για Χημικές Αναλύσεις .Δοκίμιο Γ	67
Εικόνα 43, S.E.M.,Τυχαίες Επιλογές Κατακρημνισμάτων για Χημικές Αναλύσεις .Δοκίμιο Γ	67
Εικόνα 44, S.E.M.,Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας .Δοκίμιο Δ.....	68
Εικόνα 45,Συγκόλληση και Ροϊκές Γραμμές. Δοκίμιο Δ	68
Εικόνα 46, , S.E.M., Μήτρα Υλικού. Δοκίμιο Δ.....	68
Εικόνα 47, S.E.M., Μήτρα υλικού . Δοκίμιο Ε	69
Εικόνα 48, S.E.M.,Χημική Ανάλυση Κατακρημνίσματος, Δοκίμιο Ε.....	69
Εικόνα 49, S.E.M., Συγκόλληση και ανάπτυξη Ροϊκών Γραμμών,Δοκίμιο Ε.....	69
Εικόνα 50, S.E.M.,Επιλογή τυχαίου Κατακρημνίσματος .Δοκίμιο Ζ.....	70
Εικόνα 51 ,S.E.M.,Μεγέθυνση στο σημείο ασυνέχεια των δύο υλικών .Δοκίμιο Ζ....	70
Εικόνα 52, S.E.M.,Ροϊκές γραμμές και Ζώνη ασυνέχειας. Δοκίμιο Ζ	70
Εικόνα 53, S.E.M., Χημική Ανάλυση σε τυχαίο σημείο της μήτρας, Δοκίμιο ΣΤ.....	71
Εικόνα 54 ,S.E.M.,Συγκόλληση Στ' Δοκιμίου.....	71
Εικόνα 55, S.E.M., Επιλογή τυχαίου Κατακρημνίσματος ,I' Δοκίμιο	72
Εικόνα 56, S.E.M.,Ζώνη Συγκόλλησης I'Δοκίμιο.....	72

6. Βιβλιογραφία

1. **Δημήτρης Ι. Παντελής, Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Ν.Χαϊδεμενόπουλος.** *Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων.*
2. **Elangovan K., Balasubramanian V.** *Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy,"Materials Science and Engineering.* 2007.
3. **Mishra R.S., mA z.y.** *Friction Stir Welding and Processing,Materials Science and Engineering.* 2005.
4. **Chaitanya Sharma, Dheerendra Kumar Dwivedi , Pradeep Kumar.** *Effects of welding paameters on microstructure and mechanical properties on friction stir welded joints of AA7039 aluminium.* 2012.

5. **Cavaliere P., Squillace A., Panella F.** *Effects of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding*, "Journal of Materials Processing Technology". 2008.
6. **Rajamanickam N., Balusamy V., Madjusudhanna Reddy G., Natarajan K.** *Effects of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds*. 2009.
7. **Seidel T.U., Reynolds A.P.** *Visualization of the material flow in AA2195 Friction Stir Welds using a marker insert technique* . 2001.
8. **Trimble D., Monaghan J., O'Donnell.** *Force generation during friction stir welding of AA2024-T3*. 2012.
9. **Razal Rose A., Manisekar K., Balasubramanian V.** *Effects of axial force on microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ61A magnesium alloy* . 2011.
10. **Myhayatet N., Zubaydi A., Sulistijono, Yuliadi, M.Z.** *Effects of tool tilt angle and toll plunge depth on mechanical properties of friction stir welded AA 5083 joints*, *Applied Mechanics and Materials*. 2014.
11. **Larsson, H.** *2nd Int. Symp. on Friction Stir Welding*. 2000.
12. **Kumagai.** *3rd Int. Symp. on "Friction Stir Welding"*. 2001.
13. **Guo J.F., Chen H.C., Sun C.N. , Bi G., Sun Z., Wei J.** *Friction Stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters* . 2014.
14. **Park, S.** «Effect of material locations on properties of friction stir welding joints of dissimilar aluminium alloys. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 4 December 2013.]
15. **S.PARK.** Effect of material locations on properties of frictios stir welding joints of dissimilar aluminium alloys. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 4 December 2013.]
16. **Lee., W.** *The mechanical properties related to the domintant microstructure in the weld of dissimilar formed Al alloy joints by friction stir welding* . 2003.
17. **Humphreys, F.** *Recrysttallization and Related phenomena*,. Netherlands : s.n., 1995.
18. **Huang, K.** *A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials*,. December ,2016.
19. **Dohertya, R.** *Current issues in recrystallization: a review*,» *Materials Science and Engineering*. November 1997.
20. **Galiyev, A.** *Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy*. April 2001.

21. **Dehgham-Manshadi, A.** *Hot deformation and recrystallization of austenitic stainless steel: Part 1 .dynamic recrystallization* . June 2008.
22. **Luton, M.** *Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation.* August 1969.
23. **Blaz, L.** *Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of copper.* July 2013.
24. **Ponge, D.** *Necklace formation during dynamic recrystallization: Mechanisms and impact on flow behavior.* December 1998.
25. **Ohashi.** *Effect of initial grain size on dynamic recrystallization of pure nickel.* April 1990.
26. **Gourdet, S.** *A model of continuous dynamic recrystallization.* May 2003.
27. **Huang, Y.** *Measurements of grain boundary mobility during recrystallization of a single-phase aluminum alloy.* May 1999.
28. **Liu, W.** *Effect of grain orientation on microstructures during hot deformation of AA 3104 aluminum alloy by plane strain compression* . September 2001.
29. **Qing, L.** *On deformation-induced continuous recrystallization in a superplastic AlLiCuMgZr alloy.* July 1992.
30. **Sakai.** *Effect of initial microstructures on grain refinement in a stainless steel by large strain deformation* . February 2003.
31. **Kassner, M.** *Dislocation microstructure of aluminum deformed to very large steady-state creep strains* . May 1987.
32. **Wusatowska-Sarnek.** *Nucleation and microtexture development under dynamic recrystallization of copper* . January 2012.
33. **Henshall, G.** *Dynamic restoration mechanisms in Al-5.8 At. Pct Mg deformed to large strains in Al-Mg alloys by conventional rolling.* October 2002.
34. **Gholinia, A.** *Production of ultra-fine grain microstructures in Al-Mg alloys by conventional rolling.* 2002.
35. **Jiang, L.** *Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding* . 2008.
36. **Solberg, J.** *«Influence of ultra-high strains at elevated temperatures on the microstructure of aluminum* . 1989.
37. **Y.G.Kim, H.Fujii,T.Tsamura,T.Komazaki,K.Nakata.** *Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy,Materials Science and Engineerint.*

38. **Hua-Bin Chen, Keng Yan , Tao Lin , Shan-Ben Chen, Cheng-Yu Jiang ,.** *The investigation of typical weldig defects for 5456 aluminium alloy friction stir welds.* 2006.
39. **Zao J., Jiang F., Jian H., Wen K., Jiang L., Chen X.** *Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al-Mg-Sc alloy plates .* 2010.
40. **Padmanaban G., Balasubramanian V.** *Metallurgical characterization of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints .* 2011.
41. **Moreira P.M.G.P., Santos T., Tavares S.M.O.,Richer Trummer V., Vilaca P.,de Castro P.M.S.T.** *Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6.* 2009.
42. **Maggiolino S., Schmid C.** *Corrosion resistance in FSW and MIG welding techniques of AA6XXX.* 2008.
43. **Mishra R.S., Ma Z.Y.** *Friction Stir Welding and Processing .* 2005.
44. **Aydin H., Bayram A., Durgun I.** *The effects of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joint .* 2010.
45. **Hatamleha O., Hill M., Forth S., Garcia D.** *Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminium alloy joint at elevated and cryogenic temperatures.* 2009.
46. **Fratini L., Buffa G., Shivpuri R.** *Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints.* 2010.
47. **Fuller C., Mahoney M., Calabrese M., Micono L.** *Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al frictrion stir welds.* 2010.
48. **Hou X., YangX., Cui L., Zhou G.** *Influences of joint geometry on defects and mechanical properties of friction stir welded AA6061-T4 T-joints.* 2014.
49. **Cui G.R., Ma Z.Y., Li S.X.** *The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al-Mg alloy.* 2009.
50. **Βασίλης, Λουκαδάκης.** Προσομοίωση Μικροδομής και Κρυσταλλογραφικού Ιστού κατά την Θερμή Έλαση του AA5182. 2020.
51. **ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ, ΤΑΡΑΝΗ.** ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ VICKERS ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ. ΙΟΥΝΙΟΣ 2010.
52. Αλουμίνιου : Το υλικό του 20ου αιώνα . <https://www.alfan.gr/wp-content/uploads/2016/04/%CF%80%CF%81%CE%BF%CE%AD%CE%BB%CE%B5%CF%85%CF%83%CE%B7->

[%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%85%CE%BC%CE%B9%CE%BD%CE%AF%CE%BF%CF%85.pdf](#). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 26 Φεβρουάριος 2020.]

53. **ΕΥΘΥΜΙΑ, ΝΙΚΟΛΑΟΥ-ΚΑΤΡΗ. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ.** ΚΑΒΑΛΑ : s.n., 2009.

54. **Davis, J.R.** Alloying: Understanding the Basics.

55. ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.
http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf. [Ηλεκτρονικό]
[Παραπομπή: Τετάρτη ,4 Μάρτιος 2020.]

56. **ΕΡΕΥΝΩΝ, ΙΔΡΥΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.** Η βιομηχανία αλουμινίου στην Ελλάδα.
http://iobe.gr/docs/research/RES_05_F_27032019_PRE.pdf. [Ηλεκτρονικό]
www.iobe.gr, 27 Μάρτιος 2019. [Παραπομπή: 6 Μάρτιος 2020.]

57. **Λωσταράκου, Αναστάσιου Ν. ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΔΡΥΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΡΟΦΙΛ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.** 2006.

58. **ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΚΑΛΟΦΩΛΙΑΣ. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.**

59. ΣΕΚΑ, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ.
<https://seka.org.gr/istoria-tou-alouminiou/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 31 3 2020.]

60. Αλουμίνια της Ελλάδος. <https://www.alhellas.com/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 31 3 2020.]

61. MOULDING. <https://moulding.gr/heat-affected-zone/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 31 3 2020.]

62. ASSEMBLY. <https://www.assemblymag.com/gdpr-policy?url=https%3A%2F%2Fwww.assemblymag.com%2Farticles%2F94007-friction-stir-welding-expands-its-reach>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 16 11 2020.]

63. **A.Vinoth Jebaraj, K.V.V.Aditya, T. Sampath Kumar.** Mechanical and corrosion behaviour of aluminum alloy 5083 and its weldment for marine applications. 2019.

64. **Παντελής, Δημήτρης.**

65. —.

66. **Arici A, Selale S.** Effects of toll tilt angle on tensile strenght and fracture locations of friction stir welding of polyethylene ,*Science and Technology of Welding and Joining*. 2007.

67. **U., Barlas Z. Ozsarac.** Effects of FSW Parametrs on Joint Properties of AlMg3 ALLOY ,*Welding Journal*. 2012.

68. **Ming Der J, Wei-Jen-DerL.** *Joint Properties of tilted angles of spin for 6061 aluminium alloys in friction stir weld experiments*, *Consumer Electronics, Communication and Newtowrks*. 2012.
69. **A. Kostka, R. S. Coelho, J.dos Santos, and A. R. Pyzalla.** *Microstructure of friction stir welding of aluminium alloy to magnesium alloy*, *Scripta Materialia*. 2009.
70. **balasubramanian, S. Malarvizhi and V.** *Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio(D/T) on stir zone formation and tensile properites of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminium -AZ31B magnesium alloys* .
71. **R.Zettler, A. A. M. Da Silva , S.Rodriguyes , A. Blanco and J. F. Dos Santos.** *Dissimilar Al to Mg alloy friction stir welds ,* " *Advanced Enginering Materials* . 2006.
72. **Kou, V. Firouzdor and S.** *Al-to-Mg friction stir welding: Effect of material position, travel speed, and rotation speed,*"*Metallurgical and Materials Transactions*. 2010.
73. **Forcellese, M. Simoncini and A.** *Effects of the welding parameters and tool configuration on micro-mechanical properties of similar and dissimilar FSWed joints in AA5754 and AZ31 thin sheets,*"*Materials & Desing*. 2012.
74. **Y. J. Kwon, I. Shigematsu, and N.Saito.** *Dissimilar Friction stir welding between magnesium and aluminium alloys,*"*Materials Letters*. 2008.
75. **Jagadeesha, C.B.** *Dissimilar friction stir wedling between aluminium aloy and magnesium alloy at low rotational speed,*"*Materials Science and Engineering*. 2014.
76. **YanD., Wu A., Silvanus J., Shi Q.** *Predicting residual distortion of aluminium alloy stiffened sheet after friction stir welding by numerical simulation* . 2011.
77. **Yanushkevich, Z.** *Microstructural evolution of a 304-type austenitic stainless steel during rolling*. January 2015.
78. **Dehghan-Manshadi, A.** *Dependency of Recrystallization Mechanism to the Initial Grain Size*. December 2008.
79. **Sitdikov, O.** *Grain refinement in coarse-grained 7475 Al alloy during severe hot forging*. April 2005.
80. **Tsuzaki, K.** *Effect of initial microstructures on grain refinement in a stainless steel by large strain deformation* . February 2003.
81. **Belyakov, A.** *Strain-Induced Grain Evolution in Polycrystalline Copper during Warm Deformation* . 1998.
82. **Blum, W.** *Geometric dynamic recrystallization in hot torsion of Al-5Mg-0.6Mn (AA5083)*. 1996.

