

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΗΣΕΙΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ AI & Mg ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ FSW



Τάσιος Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Δρ. Άννα Ζερβάκη

2017

Εγκρίθηκε από τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπουσα) : Δρ. Άννα Ζερβάκη.

Δεύτερος Εξεταστής: Καθηγητής Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος

Τρίτος Εξεταστής: Αναπλ. Καθηγητής Δημήτρης Παντελής

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας Κα Άννα Ζερβάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση της, την βοήθεια καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειχνε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Επίσης θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την πρόταση που μου έκανε ώστε μέρος της εργασίας να παρουσιαστεί στο 6^ο πανελλήνιο συνέδριο μεταλλικών υλικών. Ακόμη, θα ήθελα ευχαριστήσω τον κύριο Γ. Χαϊδεμενόπουλο, διευθυντή του Εργαστηρίου Υλικών τόσο για την άδεια χρήσης του εξοπλισμού του Εργαστηρίου όσο και για τη συμμετοχή του στην 3μελη επιτροπή της Διπλωματικής μου Εργασίας. Ευχαριστώ και τον κ. Δ. Παντελή για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Ελένη Καμούτση για την βοήθεια της στο Εργαστήριο Υλικών, για την προετοιμασία και την μεταλλογραφία των δοκιμίων. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πέτρο Χριστοδούλου που με βοήθησε να πραγματοποιήσω τις δοκιμές εφελκυσμού, καθώς και την Καθηγήτρια Ελένη Παυλίδου του Φυσικού Τμήματος του ΑΠΘ για τις αναλύσεις στο SEM.

Περίληψη

Η μέθοδος συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding – FSW- Συγκολλήσεις δια τριβής και ανάδευσης) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης, κυρίως λόγω της αποφυγής προβλημάτων που σχετίζονται με τη στερεοποίηση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν μετωπικές συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο FSW σε κράμα Al 2024, Mg AZ31 καθώς και διμεταλλικές συγκολλήσεις κράματος Al 2024 με κράμα Mg AZ31. Όλες οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ελάσματα πάχους 2mm. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη φρέζα του Εργαστηρίου Υλικών [1]. Αρχικά για την εκμάθηση της μεθόδου πραγματοποιήθηκαν απλά περάσματα σε ελάσματα Al, ενώ παράλληλα κατασκευάστηκαν νέες στηρίξεις της τράπεζας της φρέζας για την καλύτερη εκτέλεση των συγκολλήσεων. Για κάθε συγκόλληση πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική αξιολόγηση που περιλάμβανε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό έλεγχο καθώς και μικροσκληρομετρήσεις. Παράλληλα, σε επιλεγμένα δείγματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού.

Τα αποτελέσματα όλων των εργαστηριακών ελέγχων ευρίσκονται σε συμφωνία με αυτά της βιβλιογραφίας σε αντίστοιχες συγκολλήσεις FSW. Παρά τη μικρή δυναμικότητα της τροποποιημένης φρεζομηχανής του Εργαστηρίου, είναι δυνατόν να επιτευχθούν συγκολλήσεις χωρίς σφάλματα των οποίων οι ιδιότητες συμπίπτουν ή πλησιάζουν τις αντίστοιχες του βασικού μετάλλου. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι διμεταλλικές συγκολλήσεις των κραμάτων Al και Mg εξαιτίας του υψηλού τεχνολογικού ενδιαφέροντος σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Οι διμεταλλικές συγκολλήσεις που παρήχθησαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζουν ενδιαφέροντα μακροσκοπικά και μικροσκοπικά χαρακτηριστικά, και αποτελούν τη βάση για περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου FSW στο πεδίο των διμεταλλικών συγκολλήσεων.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	15
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	15
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	17
2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου.....	17
2.2 Περιγραφή του εξοπλισμού FSW.....	18
2.3 Μικροδομή σε συγκολλήσεις FSW.....	20
2.4 Σφάλματα σε συγκολλήσεις FSW.....	21
2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου.....	23
2.6 Κράματα Al.....	25
2.6.1 Το Al και τα κράματα του Al.....	25
2.6.2 Ιδιότητες του Al.....	27
2.6.3 Η σειρά κραμάτων Al 2XXX.....	28
2.6.4 Al 2024-0.....	28
2.6.5 Εφαρμογές του Al.....	30
2.7 Κράματα Mg.....	31
2.7.1 Το Mg και τα κράματα του Mg.....	31
2.7.2 Ιδιότητες του Mg.....	32
2.7.3 Το Mg AZ31.....	32
2.7.4 Εφαρμογές του Mg.....	33
2.8 Εφαρμογές της μεθόδου FSW στη Βιομηχανία.....	34
3. Πειραματική διαδικασία.....	40
3.1 Μηχανή συγκόλλησης.....	40
3.2 Εργαλείο συγκόλλησης.....	41
3.4 Σύστημα συγκράτησης.....	42
3.4 Συνθήκες συγκόλλησης.....	43
3.5 Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκολλήσεις.....	43
3.6 Συνθήκες στα πειράματα συγκολλήσεων συμβολής.....	44
3.6.1 Al 2024-0.....	44
3.6.2 Mg AZ31 με Mg AZ31.....	46
3.6.3 Al 2024 με Mg AZ31 (Mg AZ31 στην advancing πλευρά).....	47
3.6.4 Al 2024 με Mg AZ31 (Al 2024 στην advancing πλευρά).....	48

3.7 Διαδικασία μεταλλογραφικής αξιολόγησης	56
3.7.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο	56
3.7.2 Έλεγχος στο οπτικό μικροσκόπιο.....	56
3.7.3 Μικροσκληρομετρήσεις	56
3.7.4 Δοκιμές εφελκυσμού	56
3.7.5 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης SEM/EDX	57
4. Αποτελέσματα - Σχολιασμός αποτελεσμάτων	58
4.1 Συγκολλήσεις συμβολής Al 2024.....	58
4.1.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο	58
4.1.2 Έλεγχος μικροδομής.....	59
4.1.3 Μικροσκληρομετρήσεις	63
4.1.4 Δοκιμές εφελκυσμού	66
4.2 Mg AZ31 με Mg AZ31	68
4.2.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο	68
4.2.2 Έλεγχος μικροδομής.....	69
4.2.3 Μικροσκληρομετρήσεις	76
4.2.4 Δοκιμές εφελκυσμού	80
4.3 Συγκολλήσεις συμβολής Al 2024 :Mg AZ31 (Mg AZ31 στην advancing πλευρά) 81	
4.3.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο	81
4.3.2 Έλεγχος μικροδομής.....	82
4.3.3 Μικροσκληρομετρήσεις	86
4.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού	88
4.3.5 SEM/EDX	89
4.4 Al 2024 με Mg AZ31 (Al 2024 στην advancing πλευρά)	95
4.4.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο	95
4.4.2 Έλεγχος μικροδομής.....	97
4.4.3 Μικροσκληρομετρήσεις	107
4.4.4 SEM/EDX	110
4.4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των διμεταλλικών συγκολλήσεων Al : Mg με αυτά της βιβλιογραφίας.....	119
5. Συζήτηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	122
6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	124
Βιβλιογραφία.....	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Περιγραφή της μεθόδου FSW [4].....	17
Εικόνα 2: Μηχανή FSW [5]	18
Εικόνα 3: Διάφοροι τύποι εργαλείων FSW [19].....	19
Εικόνα 4: Σύστημα συγκράτησης [6].....	19
Εικόνα 5: Περιγραφή της μικροδομής σε συγκόλληση FSW	20
Εικόνα 6: Ατελής διείδυση σε FSW	21
Εικόνα 7: Σφάλμα τύπου tunnel.....	21
Εικόνα 8: Συγκόλληση με πορώδες.....	22
Εικόνα 9: Στρέβλωση σε συγκόλληση FSW	22
Εικόνα 10: Απόβλητο της συγκόλλησης.....	23
Εικόνα 11: Οπή στο τέλος της συγκόλλησης.....	25
Εικόνα 12: Super_Liner_Ogasawara - εφαρμογή της FSW σε πλοίο [18].....	35
Εικόνα 13: FORDGT - εφαρμογή της FSW σε αυτοκίνητο [18].....	36
Εικόνα 14: Εφαρμογή της μεθόδου από τη NASA [18].....	36
Εικόνα 16: Class 395 Javelin – εφαρμογή της FSW σε μετρό [18]	37
Εικόνα 15: Falcon 9 – εφαρμογή της μεθόδου σε πύραυλο [18]	37
Εικόνα 17: Εφαρμογή της FSW από την Apple [18]	38
Εικόνα 18: Εφαρμογή της FSW από τη Honda [20].....	38
Εικόνα 19: Μετρητικά για τον έλεγχο των συνθηκών συγκόλλησης	40
Εικόνα 20: Τροποποιημένη φρεζομηχανή	40
Εικόνα 22: Εργαλείο συγκόλλησης.....	41
Εικόνα 21: Δυναμοκυψέλη τύπου <i>Tedea-Huntleigh</i> [21].....	41
Εικόνα 23: Συγκράτηση των δοκιμίων	43
Εικόνα 24: Συγκόλληση-1 Al 2024.....	45
Εικόνα 25: Συγκόλληση-2 Al 2024.....	45
Εικόνα 26: Συγκόλληση-1 Mg AZ31.....	46

Εικόνα 27: Συγκόλληση-2 Mg AZ31.....	47
Εικόνα 28: Συγκόλληση Al - Mg (Mg advancing). Το βέλος δείχνει την διεύθυνση της συγκόλλησης.	48
Εικόνα 29: Συγκολλήσεις Al-Mg (Al advancing)	49
Εικόνα 30: Διμεταλλική συγκόλληση-1.....	50
Εικόνα 31: Διμεταλλική συγκόλληση-2.....	50
Εικόνα 32: Διμεταλλική συγκόλληση-3.....	51
Εικόνα 33: Διμεταλλική συγκόλληση-4.....	51
Εικόνα 34: Διμεταλλική συγκόλληση-6.....	52
Εικόνα 35: Διμεταλλική συγκόλληση-7.....	52
Εικόνα 36: Διμεταλλική συγκόλληση-8.....	53
Εικόνα 37: Διμεταλλική συγκόλληση-9.....	53
Εικόνα 38: Διμεταλλική συγκόλληση-10.....	54
Εικόνα 39: Διμεταλλική συγκόλληση-11.....	55
Εικόνα 40: Διμεταλλική συγκόλληση-12.....	55
Εικόνα 41: Μακροδομή συγκόλλησης-1 Al (6.5x).....	58
Εικόνα 42: Μακροδομή συγκόλλησης-2 Al (6.5x).....	59
Εικόνα 43: Μακροδομή της συγκόλλησης-1. Σημειώνονται το AS, RS καθώς και η φορά τη συγκόλλησης	59
Εικόνα 44: Όριο ζώνης ανάδευσης advancing.....	60
Εικόνα 45: Όριο ζώνης ανάδευσης retreating.....	60
Εικόνα 46: Base metal (500x)	60
Εικόνα 47: NZ (1000x)	61
Εικόνα 48: TMAZ (1000x)	61
Εικόνα 49: Μακροδομή της συγκόλλησης-2. Σημειώνονται το AS, RS καθώς και η φορά τη συγκόλλησης.....	62
Εικόνα 50: Base metal (500x)	62
Εικόνα 51: NZ (1000x)	62
Εικόνα 52: Tmaz (1000x)	62

Εικόνα 53: Σφάλμα στην συγκόλληση στη ζώνη ανάδευσης (50x)	62
Εικόνα 54: Σφάλμα στη συγκόλληση (200x)	63
Εικόνα 55: Σφάλμα στη συγκόλληση (100x)	63
Εικόνα 56: Σχέδιο διατομής δοκιμίων subsise για εφελκυσμό.....	67
Εικόνα 57: Δοκίμια εφελκυσμού Al.....	67
Εικόνα 58: Εικόνα στερεοσκοπίου (6.5x) συγκόλλησης-1 Mg.....	68
Εικόνα 59: Εικόνα στερεοσκοπίου (6.5x) συγκόλλησης-1 Mg.....	69
Εικόνα 60: Μακροφωτογραφία της συγκόλλησης-1.....	69
Εικόνα 61: Base metal (200x)	70
Εικόνα 62: Ζώνη έντονης ανάδευσης (50x)	70
Εικόνα 63: NZ (200x)	70
Εικόνα 64: NZ (500x).....	71
Εικόνα 65: NZ (1000x)	71
Εικόνα 66: TMAZ (100x)	71
Εικόνα 67: TMAZ (500x)	72
Εικόνα 68: TMAZ (1000x)	72
Εικόνα 69: HAZ (200x)	72
Εικόνα 70: HAZ (1000x)	73
Εικόνα 71: Μακροφωτογραφία της συγκόλλησης-2.....	73
Εικόνα 72: Πορώδες στο NZ της συγκόλλησης (50x).....	74
Εικόνα 73: Base meal (500x).....	74
Εικόνα 74: Base metal (1000x).....	74
Εικόνα 75: NZ (200x)	74
Εικόνα 76: NZ (500x)	75
Εικόνα 77: NZ (1000x)	75
Εικόνα 78: TMAZ (200x)	75
Εικόνα 79: HAZ (500x)	75

Εικόνα 80: (HAZ 1000x)	76
Εικόνα 81: Δοκίμια subsize Mg.....	80
Εικόνα 82: Δοκίμια εφελκυσμού μετά τη θραύση.....	82
Εικόνα 83: Φωτογραφία στερεοσκοπίου (6.5x)	81
Εικόνα 85: Μακροφωτογραφία διμεταλλικής συγκόλλησης-5.....	82
Εικόνα 86: NZ (50x)	82
Εικόνα 87: NZ (100x)	83
Εικόνα 88: NZ (100x)	83
Εικόνα 89: Retreating side (100x)	83
Εικόνα 90: Advancing side (200x)	84
Εικόνα 91: Σφάλμα σο κέντρο (50x)	84
Εικόνα 92: TMAZ (500x)	84
Εικόνα 93: HAZ (500x)	85
Εικόνα 94: TMAZ (1000x)	85
Εικόνα 95: Συγκράτηση δοκιμίου στη μηχανή εφελκυσμού.....	88
Εικόνα 96: Δοκίμιο εφελκυσμού Al- Mg.....	88
Εικόνα 97: Μακροδομή συγκόλλησης (6.5x)	89
Εικόνα 98: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.97).....	90
Εικόνα 99: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	91
Εικόνα 100: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	92
Εικόνα 101: Line scan 3: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	92
Εικόνα 102: Line scan 4: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	93
Εικόνα 103: Line scan 5: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	93
Εικόνα 104: Line scan 6: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.....	94

Εικόνα 105: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.97).....	95
Εικόνα 106: Μακροδομή δοκιμίου-11 (6.5x).....	96
Εικόνα 107: Μακροδομή δοκιμίου-12 (6.5x).....	96
Εικόνα 108: Μακροδομή δοκιμίου-11.....	97
Εικόνα 109: Κέντρο Συγκόλλησης (50x)	97
Εικόνα 110: Περιοχή ανάδευσης (200x)	98
Εικόνα 111: Περιοχή ανάδευσης (200x)	98
Εικόνα 112: Περιοχή ανάδευσης (200x)	98
Εικόνα 113: Περιοχή ανάδευσης (500x)	98
Εικόνα 114: TMAZ (500x)	99
Εικόνα 115: TMAZ (1000x)	99
Εικόνα 116: NZ (200x)	100
Εικόνα 117: NZ (500x)	100
Εικόνα 118: NZ (1000x)	100
Εικόνα 119: Μακροδομή δοκιμίου-12.....	101
Εικόνα 120: Περιοχή ανάδευσης (50x)	101
Εικόνα 121: Περιοχή ανάδευσης (50x)	102
Εικόνα 122: Κέντρο συγκόλλησης (50x)	102
Εικόνα 123: Κέντρο συγκόλλησης (50x)	102
Εικόνα 124: Advancing πλευρά του NZ.....	103
Εικόνα 125: Retreating NZ (200x)	103
Εικόνα 126: NZ (200x)	103
Εικόνα 127: NZ (500x)	104
Εικόνα 128: NZ (1000x)	104
Εικόνα 129: TMAZ (200x)	104
Εικόνα 130: TMAZ (500x)	105
Εικόνα 131: TMAZ (1000x)	105

Εικόνα 132: HAZ (200x)	105
Εικόνα 133: HAZ (500x)	106
Εικόνα 134: HAZ (1000x)	106
Εικόνα 135: Μακροδομή δοκιμίου-11 (6.5x)	110
Εικόνα 136: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.135).....	111
Εικόνα 137: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	112
Εικόνα 138: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.135).....	113
Εικόνα 139: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	113
Εικόνα 140: Μακροδομή συγκόλλησης-12 (6.5x)	114
Εικόνα 141: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.135).....	115
Εικόνα 142: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	116
Εικόνα 143: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	116
Εικόνα 144: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.135).....	117
Εικόνα 145: Line scan 3: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	118
Εικόνα 146: Line scan 4: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.....	118
Εικόνα 147: Αλλαγές στη μικροδομή βάσει των συνθηκών συγκόλλησης [22].....	119
Εικόνα 148: Μακροδομή μελέτης FSW [24].....	120
Εικόνα 149: Μεταλλογραφία από μελέτη συγκόλλησης FSW [24].....	120
Εικόνα 150: Μακροδομή της μελέτης [25].....	121

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σειρά κραμάτων Al [7].....	26
Πίνακας 2: Σύσταση του Al 2024.....	29
Πίνακας 3: Διάφορες κατεργασίες του Al	29
Πίνακας 4: Ιδιότητες του Al 2024[12]	29
Πίνακας 5: Αναφορά στα γράμματα για την κραμάτωση του Mg [13]	32
Πίνακας 6: Χημική σύσταση του Mg AZ31.....	33
Πίνακας 7: Ιδιότητες του Mg AZ31 [15]	33
Πίνακας 8: Χημική σύσταση του H13.....	42
Πίνακας 9: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024	44
Πίνακας 10: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024 Δοκίμιο 1.....	45
Πίνακας 11: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024 Δοκίμιο 2.....	45
Πίνακας 12: Συνθήκες συγκόλλησης για το MgAZ31.....	46
Πίνακας 13: Συνθήκες συγκόλλησης για το Mg AZ31 δοκίμιο 1.....	46
Πίνακας 14: Συνθήκες συγκόλλησης για το Mg AZ31 δοκίμιο 2.....	47
Πίνακας 15: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης (Mg advancing).....	48
Πίνακας 16: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης (Al advancing).....	48
Πίνακας 17: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 1	49
Πίνακας 18: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 2	50
Πίνακας 19: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 3	51
Πίνακας 20: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 4	51
Πίνακας 21: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 6	52
Πίνακας 22: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 7	52
Πίνακας 23: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 8	53
Πίνακας 24: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 9	53
Πίνακας 25: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 10	54
Πίνακας 26: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 11	54

Πίνακας 27: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 12	55
Πίνακας 28: Μικροσκληρομετρήσεις Al δοκίμιο 1	63
Πίνακας 29: Μικροσκληρομετρήσεις Al δοκίμιο 2	65
Πίνακας 30: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Al 2024	67
Πίνακας 31: Μικροσκληρομετρήσεις Mg δοκίμιο 1	76
Πίνακας 32: Μικροσκληρομετρήσεις Mg δοκίμιο 2	78
Πίνακας 33: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Mg AZ31	80
Πίνακας 34: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Mg advancing)	86
Πίνακας 35: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Al 2024- Mg AZ31 (Mg advancing)	88
Πίνακας 38: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Al advancing)-Δοκίμιο 11	107
Πίνακας 39: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Al advancing)-Δοκίμιο 12	108

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Οι συγκολλήσεις FSW (Friction stir welding) είναι συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης και χρησιμοποιούνται για να συγκολληθούν δυο όμοια ή ανόμοια κράματα που είναι δύσκολο να συγκολληθούν με οποιοδήποτε άλλο τρόπο. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή από το 1991 όταν και πρωτοπαρουσιάστηκε από το TWI [23]. Η χρήση κραμάτων Mg και Al είναι εξαιρετική λύση για την κατασκευαστική βιομηχανία κυρίως λόγω του συνδυασμού μικρού βάρους και υψηλής αντοχής. Οι άριστες μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστος, τα κάνουν ολοένα και πιο ελκυστικά για βιομηχανική χρήση. Οι γεωμετρίες που μπορούν να συγκολληθούν είναι συγκολλήσεις συμβολής, αυχενικές, γωνιακές, επικάλυψης και περιφερικές [2]. Οι περισσότερες εφαρμογές αφορούν την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, ναυτιλία, σιδηροδρόμους καθώς και στρατιωτικές εφαρμογές.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις σε κράματα Al 2024 και Mg AZ31 καθώς και διμεταλλικές συγκολλήσεις ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες σε πειραματικό πλαίσιο, καθώς και να μελετηθεί η μικροδομή και οι ιδιότητες της συγκόλλησης. Οι συγκολλήσεις και η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Πιο συγκεκριμένα οι συγκολλήσεις αξιολογήθηκαν με τους εξής ελέγχους:

- Οπτικός έλεγχος
- Έλεγχος μακροδομής
- Έλεγχος μικροδομής
- Μικροσκληρομετρήσεις
- Δοκιμές εφελκυσμού
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM/EDX)

Με βάση τα αποτελέσματα είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν διμεταλλικές συγκολλήσεις σε κράματα Al- Mg οι οποίες παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα, χωρίς εσωτερικά ή εξωτερικά σφάλματα καθώς και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

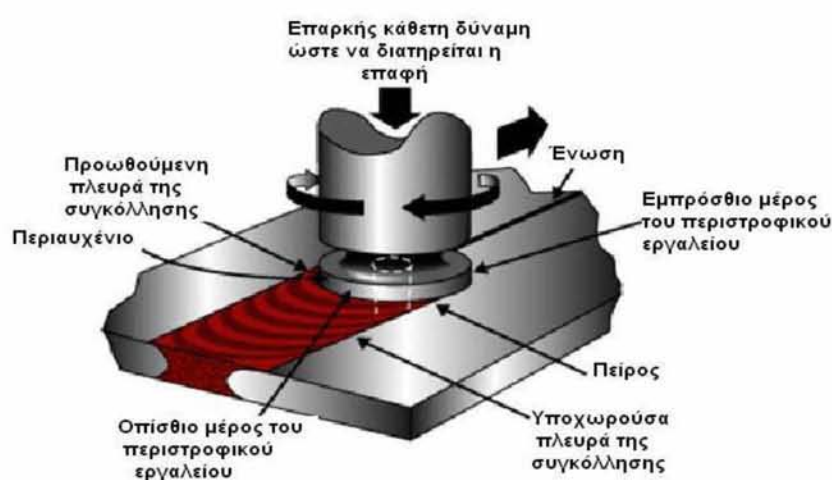
Κεφάλαιο 5: Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 6: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου

Η μέθοδος δια τριβής και ανάδευσης αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, και είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται από το 1991. Είναι συγκόλληση στερεής κατάστασης που σημαίνει ότι δεν αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το σημείο τήξης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται φτάνουν έως το 80% - 90% του σημείου τήξης του κράματος. Ως αποτέλεσμα η απουσία τήξης είναι η απουσία σφαλμάτων που απαντώνται στις συμβατικές συγκολλήσεις όπως η θερμή ρηγματώση και το πορώδες. Έτσι, κράματα τα οποία δεν μπορούν να συγκολληθούν με τις κλασικές μεθόδους, είναι δυνατό να συγκολληθούν με την μέθοδο FSW [3]. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται (Εικ. 1) για την συγκόλληση είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής ώστε να μην φθείρεται. Το εργαλείο φέρει δυο βασικά μέρη, το περιαιχένιο (shoulder) και την ακίδα (pin). Το pin εισέρχεται στο κέντρο των ως προς συγκόλληση καλά συγκρατημένων τεμαχίων και κινείται κατά μήκος την επιθυμητής ραφής συγκόλλησης. Το pin καθώς περιστρέφεται διεισδύει στο κράμα και μεταφέρει υλικό από την προωθούμενη πλευρά (advancing side) στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side), ενώ κινείται κατά μήκος του κέντρου συγκόλλησης. Το περιαιχένιο λόγω της τριβής με τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν, αυξάνει την θερμότητα της επιφάνειας, έτσι τα κράματα μαλακώνουν και διευκολύνεται η ανάδευση του. Επιπρόσθετα, το περιαιχένιο είναι αυτό που απωθεί το απόβλητο από την επιφάνεια της συγκόλλησης.



Εικόνα 1: Περιγραφή της μεθόδου FSW [4]

2.2 Περιγραφή του εξοπλισμού FSW

Ο βασικός εξοπλισμός για τις συγκολλήσεις δια τριβής και ανάδευσης είναι αρκετά απλός και αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- Την μηχανή συγκόλλησης. (στην παρούσα εργασία την τροποποιημένη φρεζομηχανή)
- Το εργαλείο συγκόλλησης
- Το σύστημα συγκράτησης

Πιο αναλυτικά:

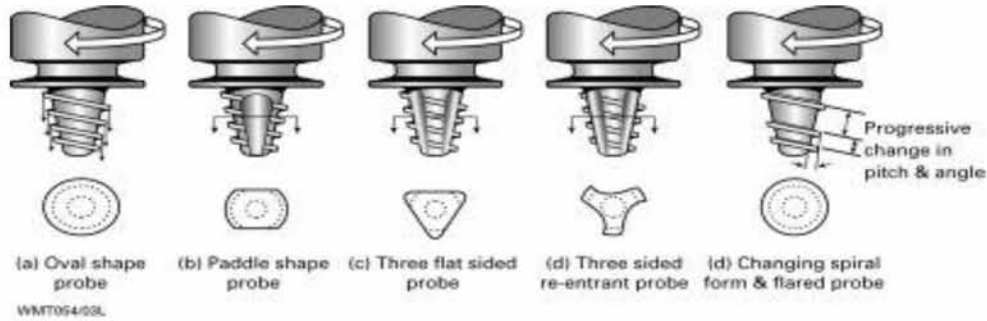
Στο εμπόριο υπάρχει πληθώρα αυτοματοποιημένων **μηχανών για συγκολλήσεις FSW** (Εικ. 1). Σε περιπτώσεις όμως που το κόστος αγοράς μια τέτοιας μηχανής είναι υψηλό, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τροποποιημένες φρεζομηχανές στις οποίες αντικαθίσταται το κοπτικό εργαλείο με περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης, και παράλληλα εγκαθίσταται στιβαρό σύστημα συγκράτησης των ελασμάτων που πρόκειται να συγκολληθούν.



Εικόνα 2: Μηχανή FSW [5]

Το εργαλείο συγκόλλησης είναι ένα σημαντικό κομμάτι στις συγκολλήσεις FSW. Αποτελείται από δυο βασικά τμήματα. Το περιαισχένιο (shoulder) και τον πείρο (pin). Πρόκειται για ένα μη αναλίσκόμενο εργαλείο το οποίο πρέπει να έχει ιδιότητες τέτοιες που να αντέχουν τις μεγάλες δυνάμεις τριβής που δέχεται, τα θλιπτικά φορτία καθώς και την μεγάλη θερμότητα που αναπτύσσεται. Η συνεχής έκθεση του εργαλείου σε μεγάλες θερμοκρασίες είναι εύκολο να επιφέρει αλλαγές στην μικροδομή οι οποίες θα συμβάλουν στην μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Η

μορφή του εργαλείου στο κομμάτι του πείρου είναι συνήθως περίπλοκη (Εικ. 3) και ανάλογα το μέγεθος των κομματιών που θα συγκολληθούν, είναι συνήθως μικρή. Ο πείρος μπορεί να είναι είτε κωνικός είτε σφαιρικός ή και με σπείρωμα. Οπότε η κατεργασιμότητα του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του. Συνήθως το εργαλείο για συγκολλήσεις FSW είναι κατασκευασμένο από εργαλειοχάλυβα. Το μικρό τους κόστος και η ευκολία στην κατεργασία του συμβάλουν στην επιλογή ενός τέτοιου υλικού για την κατασκευή του εργαλείου.



Εικόνα 3: Διάφοροι τύποι εργαλείων FSW [19]

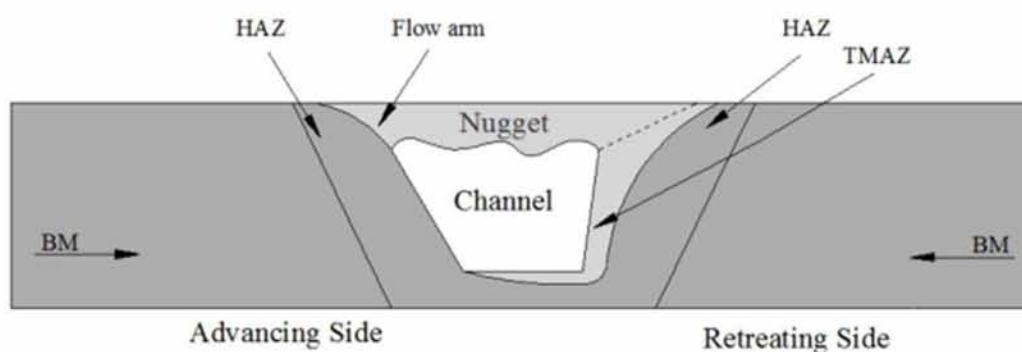
Το σύστημα συγκράτησης (Εικ. 4) είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι της μεθόδου καθώς χρειάζεται άριστη συγκράτηση των μετάλλων προς συγκόλληση ώστε να απαγορευτεί η μετακίνηση των τεμαχίων προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η οποιαδήποτε μετακίνηση των κομματιών θα επιφέρει δυσάρεστα αποτελέσματα στην τελική συγκόλληση. Βάσει αυτών, το σύστημα συγκράτησης τροποποιείται ανάλογα τις διαστάσεις των δοκιμίων, το σχήμα τους, καθώς και τον τύπο συγκόλλησης (π.χ. μετωπική, συμβολής κ.α.)



Εικόνα 4: Σύστημα συγκράτησης [6]

2.3 Μικροδομή σε συγκολλήσεις FSW

Μεταλλογραφικά οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον (Εικ. 5). Ο πείρος του εργαλείου δημιουργεί την ζώνη ανάδευσης. Αριστερά και δεξιά της ζώνης ανάδευσης ακολουθεί η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη και έπειτα η θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ενώ στο τέλος διακρίνουμε το βασικό μέταλλο.



Εικόνα 5: Περιγραφή της μικροδομής σε συγκόλληση FSW

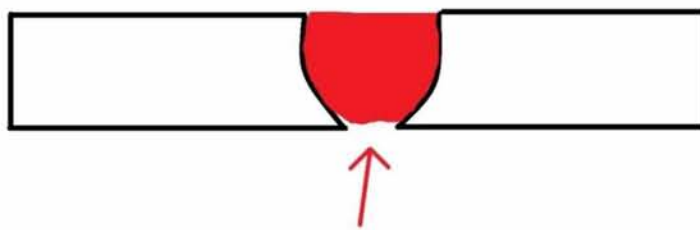
Πιο αναλυτικά οι περιοχές στις συγκολλήσεις FSW είναι:

- **Ζώνη της ανάδευσης (NZ):** Είναι η περιοχή από την οποία διέρχεται ο περιστρεφόμενος πείρος του εργαλείου. Η ζώνη ανάδευσης είναι αυτή μέσα στην οποία το υλικό έχει υποστεί δυναμική ανακρυστάλλωση και το μέγεθος των κόκκων είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό της αρχικής μικροδομής.
- **Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ):** Είναι η ζώνη όπου οι κόκκοι του μετάλλου παρουσιάζουν έντονη παραμόρφωση και ο προσανατολισμός τους ακολουθεί την κίνηση της ανάδευσης. Εδώ η πυκνότητα των αταξιών είναι υψηλή και λόγω των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε συνδυασμό με την παραμόρφωση των κόκκων, έχουν ως αποτέλεσμα την χαμηλή σκληρότητα λόγω της ανάπτυξης και διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης.
- **Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ):** Σε αυτή τη ζώνη το υλικό επηρεάζεται μόνο θερμικά χωρίς να έχει υποστεί αποκρυστάλλωση ή παραμόρφωση, παρά μόνο μετασηματισμούς στερεάς κατάστασης.
- **Βασικό μέταλλο (BM):** Είναι η περιοχή μακριά από την ραφή της συγκόλλησης στην οποία δεν έχουμε καμία μεταβολή στην δομή του μετάλλου.

2.4 Σφάλματα σε συγκολλήσεις FSW

Όπως σε κάθε μέθοδο συγκόλλησης, έτσι και στις συγκολλήσεις δια τριβής και ανάδευσης υπάρχουν διάφορα σφάλματα εξωτερικά ή εσωτερικά που επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα στην αντοχή του μετάλλου καθώς και την συνοχή των συγκολλημένων υλικών. Πιο αναλυτικά συχνά παρουσιάζονται τα παρακάτω σφάλματα:

- **Ατελής διείσδυση:** Η ατελής διείσδυση (Εικ. 6) είναι συχνό φαινόμενο και οφείλεται στο μικρό κάθετο φορτίο με αποτέλεσμα ο πείρος να μην εισέρχεται σωστά σε όλο το πάχος του υλικού το οποίο συμπίπτει με το μήκος του πείρου. Αποτέλεσμα αυτού του σφάλματος είναι η μη σωστή ένωση των τεμαχίων κατά μήκος του πάχους του υλικού συνεπώς υπάρχουν κενά στην περιοχή της συγκόλλησης και η τελική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά.



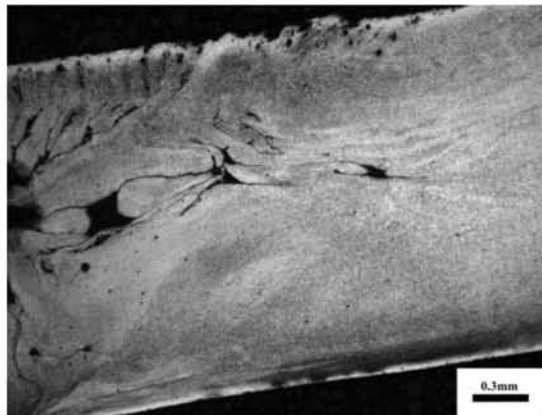
Εικόνα 6: Ατελής διείσδυση σε FSW

- **Σφάλματα τύπου tunnel:** Αφορά σφάλματα (Εικ. 7) τα οποία είναι εμφανή με γυμνό μάτι. Είναι αυλακώσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια της συγκόλλησης και οφείλονται στο κάθετο φορτίο στην περίπτωση που είναι μικρότερο από το απαιτούμενο, ώστε να δημιουργηθεί η απαιτούμενη τριβή μεταξύ του περιαιχενίου και του μετάλλου.



Εικόνα 7: Σφάλμα τύπου tunnel

- Εσωτερικοί πόροι-Πορώδες:** Η εμφάνιση εσωτερικών πόρων (Εικ. 8) στην περιοχή της συγκόλλησης είναι συχνό σφάλμα και έχει να κάνει με την ταχύτητα περιστροφής και το κάθετο φορτίο σε συνάρτηση με την σωστή ανάπτυξη της απαιτούμενης θερμοκρασίας. Όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ μικρή και το κάθετο φορτίο πολύ μικρό, τότε δεν αναπτύσσεται η απαραίτητη θερμοκρασία στον πείρο και το περιανυχένιο του εργαλείου, έτσι ώστε η ροή του υλικού να είναι η κατάλληλη. Όταν η ροή του υλικού δεν είναι κατάλληλη είναι δύσκολο να κλείσει το κενό που δημιουργείται από την προωθούσα πλευρά (advancing side) και έτσι δημιουργούνται οι πόροι. Επιπρόσθετα πολλές φορές οι πόροι οφείλονται στη μη σωστή επιλογή της γεωμετρίας του πείρου του εργαλείου και του περιανυχνίου.



Εικόνα 8: Συγκόλληση με πορώδες

- Στρέβλωση:** Οι στρεβλώσεις σε συγκολλήσεις FSW (Εικ. 9) δεν προέρχονται από μεγάλο ρυθμό εισαγωγής θερμότητας αλλά από την επιβολή μεγάλου κάθετου φορτίου. Καθώς το εργαλείο ασκεί μεγάλο κάθετο φορτίο στο κέντρο του υλικού, αν το φορτίο που αναπτυχτεί είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται για την πλήρη διείδυση, τότε συχνά τα άκρα του υλικού ανασηκώνονται (όσο καλή και αν είναι η συγκράτηση), δημιουργώντας έτσι στρέβλωση στο υλικό με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται οι ιδιότητες της αντοχής του.



Εικόνα 9: Στρέβλωση σε συγκόλληση FSW

- **Απόβλητο (flash):** Το απόβλητο (Εικ. 10) είναι ένα αρκετά συχνό φαινόμενο στις συγκολλήσεις FSW. Όταν το κάθετο φορτίο είναι μεγάλο τότε η περίσσεια υλικού που μεταφέρεται από την επιφάνεια της συγκόλλησης μέσω του περιαυχενίου μεταφέρεται δεξιά και αριστερά κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης δημιουργώντας έτσι μια τραχιά και γεμάτη απόβλητο επιφάνεια. Το απόβλητο μπορεί να αφαιρεθεί με μηχανουργική κατεργασία στη συνέχεια.



Εικόνα 10: Απόβλητο της συγκόλλησης

- **Kissing bond:** Το kissing bond είναι ένα άλλο σφάλμα στις συγκολλήσεις FSW. Εμφανίζεται λόγω του μη σωστού καθαρισμού των επιφανειών που επρόκειτο να συγκολληθούν και δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα οξειδίου στην ζώνη ανάδευσης (NZ)

2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

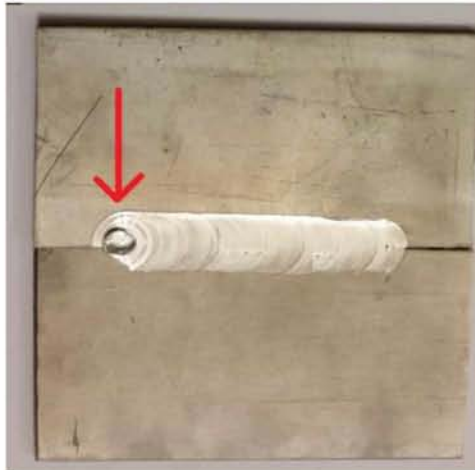
Μερικά από τα πλεονεκτήματα τις μεθόδου είναι τα παρακάτω:

- Ως διαδικασία στερεάς κατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα κραμάτων, χωρίς να δημιουργεί προβλήματα όπως πυρόλυση ή δημιουργία πόρων
- Είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και συνήθως δεν χρειάζεται κάποιο χειροκίνητη παρέμβαση
- Καλές μηχανικές ιδιότητες

- Καλή αντοχή σε κόπωση
- Χαμηλότερες παραμένουσες τάσεις
- Δυνατότητα συγκόλλησης ανόμοιων κραμάτων
- Δεν χρειάζεται κάποιο αέριο αδρανές για την προστασία της συγκόλλησης.
- Η διαδικασία έχει μεγάλες ανοχές στην προετοιμασία των επιφανειών καθώς και κενά μέχρι 20% μπορούν να καλυφτούν
- Το εργαλείο συγκόλλησης είναι μη αναλίσκόμενο
- Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, που ανταγωνίζονται άνετα συγκολλήσεις με άλλες μεθόδους
- Μικρότερες παραμορφώσεις
- Αποφεύγονται μεγάλες συστολές και διαστολές στην περιοχή της συγκόλλησης λόγω του μικρού ΡΕΘ
- Είναι φιλική μέθοδος προς τον χώρο εργασίας καθώς δεν παράγεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή επικίνδυνοι ρύποι αφού είναι και σχετικά αθόρυβη
- Η ενέργεια που απαιτείται κατά τη συγκόλληση για FSW βρίσκεται ανάμεσα συγκόλληση με λέιζερ (η οποία απαιτεί λιγότερη ενέργεια) και συγκόλληση MIG (που συνήθως χρειάζεται περισσότερο)
- Μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης μπορούμε να εφαρμόσουμε διάφορες μηχανικές και θερμικές κατεργασίες για να μειώσουμε τις παραμένουσες τάσεις.

Μερικά από τα μειονεκτήματα τις μεθόδου είναι τα παρακάτω:

- Η οπή που δημιουργείται στην έξοδο του εργαλείου μετά το πέρας της συγκόλλησης (Εικ. 11)
- Το μέγεθος του αποβλήτου
- Οι μεγάλες δυνάμεις που χρειάζονται για την στερέωση των τεμαχίων
- Μεγάλη διερεύνηση στο εύρος των συνθηκών συγκόλλησης για το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 11: Οπή στο τέλος της συγκόλλησης

2.6 Κράματα ΑΙ

2.6.1 Το ΑΙ και τα κράματα του ΑΙ

Το αργίλιο ή αλουμίνιο είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο ΑΙ και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο, στοιχείο που ανήκει στην ομάδα III_A του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βοξίτης. Το ΑΙ διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το ΑΙ, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματικών (χημικών) στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη ΑΙ με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Τα κράματα του ΑΙ διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Τα θερμοσκληρυνόμενα και τα εργοσκληρυνόμενα. Η ισχυροποίηση των θερμοσκληρυνόμενων κραμάτων γίνεται μέσω της καθίζησης μια δεύτερης φάσης ή μιας ενδομεταλλικής ένωσης από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα. Το ίζημα της

δεύτερης φάσης με την διασπορά των σωματιδίων εμποδίζει την ολίσθηση των αταξιών με αποτέλεσμα να εμποδίζει την ολίσθηση των αταξιών και να αυξάνει την αντοχή του κράματος. Τα εργοσκληρυνόμενα κράματα αφορούν την πλαστική παραμόρφωση μέσω της εργοσκλήρυνσης [7].

Πίνακας 1: Σειρά κραμάτων Al [7]

Σειρά	Κύριο κραματικό στοιχείο	Μέθοδος ισχυροποίησης
1XXX	Al>99.00%	Εργοσκληρυνόμενο
2XXX	Al-Cu-Mg	Θερμοσκληρυνόμενο
3XXX	Al-Mn	Εργοσκληρυνόμενο
4XXX	Al-Si	Εργοσκληρυνόμενο
5XXX	Al-Mg	Εργοσκληρυνόμενο
6XXX	Al-Mg-Si	Θερμοσκληρυνόμενο
7XXX	Al-Zn	Θερμοσκληρυνόμενο
8XXX	Al-Sn και άλλα	

- Το πρώτο ψηφίο δηλώνει την σειρά του Al
- Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει την αντοχή του κράματος
 - 0: Ανοπτημένο
 - 1: 1/8 Σκληρό
 - 2: 1/4 Σκληρό
 - 3: 3/8 Σκληρό
 - 4: 1/2 Σκληρό
 - 5: 5/8 Σκληρό
 - 6: 3/7 Σκληρό
 - 7: 7/8 Σκληρό
 - 8: Πλήρως σκληρό
 - 9: Υπερβολικά σκληρό

- Το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο δηλώνουν την περιεκτικότητα σε Al επί της %.
- Το σύμβολο μετά τα ψηφία δηλώνει την κατεργασία που έχει υποστεί το Al
 - F : Όπως παράγεται (χωρίς θερμική κατεργασία).
 - O : Με ανόπτηση.
 - H: Ψυξηλατημένο (Σκληρυμένο).
 - W: Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης.
 - T: Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες.
Συνήθως με σκλήρυνση μετά από βαφή και κατακρήμνιση. Προσθήκη αριθμού μετά το T, δείχνει διάφορες μορφές πχ T6 θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και σκλήρυνσης με τεχνητή γήρανση.

2.6.2 Ιδιότητες του Al

Το Al και τα κράματα του είναι ευρέως γνωστά για τις εφαρμογές του. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι το χαμηλό του βάρος (3 φορές κάτω σε σχέση με ένα χάλυβα), ενώ παράλληλα μερικά κράματα του παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή. Το Al που έχει σημείο τήξης 635-660°C ανάλογα με την καθαρότητα, μεταποιείται με διέλαση, με έλαση, με χύτευση, με μηχανουργικά εργαλεία κατεργασίας για την παραγωγή τελικών προϊόντων ή τμημάτων αυτών για χρήση στην οικοδομή, στη συσκευασία, στις μεταφορές, στον οικιακό εξοπλισμό και σε μηχανολογικές, ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του Al και των κραμάτων του, καθώς και η υψηλή τεχνολογία που εφαρμόζεται, εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα των εφαρμογών του. Η χρήση του Al και των κραμάτων του, εξασφαλίζουν σε κάθε περίπτωση πολύ καλή ποιότητα στα τελικά προϊόντα με χαμηλό παραγωγικό κόστος. Σήμερα, που η προσπάθεια εξοικονόμησης πλουτοπαραγωγικών πόρων και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν τον κύριο στόχο της σύγχρονης κοινωνίας, πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα η δυνατότητα ανακύκλωσης του Al. Το Al, που είναι μια «Τράπεζα Ενέργειας» όπου και σε όποια μορφή και αν βρίσκεται, μετά την χρήση των προϊόντων συλλέγεται και επαναχυτεύεται απαιτώντας μόνο το 5% της ενέργειας που χρειάστηκε για την πρωτογενή παραγωγή του. Το Al είναι ανανεώσιμο υλικό και μπορεί να ανακυκλώνεται συνεχώς χωρίς να υπολείπεται σε ποιότητα, αντιθέτως σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται καλύτερο. Επιπρόσθετα το Al διατηρεί μόνιμα την αγοραστική του αξία γεγονός που είναι ένα ισχυρό κίνητρο για την ανακύκλωση. Επίσης, το Al είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Δεν μαγνητίζεται και δεν καίγεται, ιδιότητες που θεωρούνται πολύ ουσιώδεις για ειδικές εφαρμογές, όπως κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου). Ακόμη, δεν είναι τοξικό, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Παράλληλα, έχει υψηλή κατεργασιμότητα και διαμορφωσιμότητα. Το καθαρό Al δεν είναι αρκετά ισχυρό (35MPa), μετά όμως από θερμική κατεργασία ή έλαση είναι αρκετά ισχυρό ώστε να χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές. Επίσης, εξαιτίας της σχετικά

χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται με κραματικά στοιχεία όπως Mn, Si, Mg, Cu, Zn. Το Al έχει μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου του, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του. Τέλος, ένα ακόμα χαρακτηριστικό του είναι η διατήρηση της ολκιμότητας του σε χαμηλές θερμοκρασίες [8][9].

2.6.3 Η σειρά κραμάτων Al 2XXX

Στην σειρά 2000 κύριο στοιχείο του κράματος είναι ο Cu με μικρές προσθήκες Mn και Mg. Είναι υψηλής αντοχής κράματα, υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούνται συχνά για την αεροδιαστημική βιομηχανία και εφαρμογές αεροσκαφών. Έχουν εξαιρετική αντοχή σε μία ευρεία περιοχή θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, το κράμα 2024 χρησιμοποιείται κυρίως στα αεροσκάφη. Το 2017 χρησιμοποιείται ευρέως σε πριτσίνια Al, συνδετήρες και βίδες μηχανής. Το 2014 το οποίο χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε σφυρήλατες κατασκευές [10].

2.6.4 Al 2024-0

Τα κράματα Al έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Στο Al 2024 γίνεται ανόπτηση από μία κατάσταση που έχει υποστεί θερμική επεξεργασία μεταξύ 399 και 427 °C για περίπου 2 ώρες και στη συνέχεια ψύχθηκε αργά στον κλίβανο. Αυτό το κράμα μπορεί να ανοπτηθεί στους 343 °C για 2 ώρες μετά τις οποίες το κράμα ψύχεται στον αέρα. Ακόμη το 2024 μπορεί να σφυρηλατηθεί αν μετά την κατεργασία ακολουθεί ακόμα μια θερμική επεξεργασία [10].

Το Al 2024 λόγω της μεγάλης του αντοχής σε κόπωση, χρησιμοποιείται ευρέως σε αεροσκάφη, σε περύγια καθώς και σε ατράκτους που δέχονται μεγάλες τάσεις [9]. Ανήκει στα θερμικά κατεργάσιμα κράματα Al που αποκτούν τη μέγιστη αντοχή μέσω της κατεργασίας της γήρανσης (φυσικής ή τεχνητής). Επιπλέον, δεδομένου ότι το υλικό μπορεί να δεχτεί θερμικό σοκ, χρησιμοποιείται στο χαρακτηρισμό των δοκιμών διεισδυτικών υγρών. Η σύσταση του κράματος διακρίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2: Σύσταση του Al 2024

Στοιχείο	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Zr	Ti	Cr
Περιεκτικότητα κ.β.%	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0-0.5	0-0.5	0-0.25	0-0.2	0-0.15	0-0.1

Παρακάτω διακρίνονται μερικές ιδιότητες (πίνακας 3) της αντοχής του 2024 ανάλογα με την κατεργασία που έχει υποστεί [11]:

Πίνακας 3: Διάφορες κατεργασίες του Al

2024-O	Το Al δεν έχει καμία θερμική επεξεργασία. Έχει αντοχή στον εφελκυσμό 140-210 MPa, και η μέγιστη αντοχή διαρροής δεν είναι μεγαλύτερη από 97 MPa. Το υλικό έχει επιμήκυνση μέχρι 10-25.
2024-T3	Το Al 2024-T3 έχει αντοχή στον εφελκυσμό περίπου 400-430 MPa, ενώ έχει επιμήκυνση της τάξης 10-15%.
2024-T4	Είναι Al το οποίο υπόκειται σε φυσική γήρανση
2024-T6	Ψύχεται μετά την θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και υπόκειται σε φυσική γήρανση.
2024-T351	Έχει αντοχή στον εφελκυσμό 470 MPa, ενώ έχει επιμήκυνση ως 20%.

Μερικές ακόμα ιδιότητες του Al 2024 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Ιδιότητες του Al 2024[12]

Πυκνότητα	3.0 g/cm ³
σ_{uts}	200 MPa
σ_y	98 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	66 kJ/m ³
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	15%
Δύναμη κόπωσης	90 GPa
Μέτρο διάτμησης	28 GPa
Θερμική αγωγιμότητα	120 W/m*k
Σημείο τήξης	510 °C

2.6.5 Εφαρμογές του Al

Το Al είναι ένα από τα πιο βασικά κράματα στον πλανήτη και βρίσκεται πάρα πολλές εφαρμογές. Στην Αεροδιαστημική τα τελευταία 35 χρόνια, τα κράματα του Al έχουν μειωθεί κατά το ήμισυ το βάρος της δομής ενός αεροπλάνου.

Στα αυτοκίνητα στο σασί, σε μπλοκ κινητήρων, ρουλεμάν, έδρανα κ.α αποτελούνται από κράματα Al. Σήμερα ένα ευρωπαϊκό αυτοκίνητο περιέχει κατά μέσο όρο 100 κιλά Al, αξιοποιώντας πολλαπλές ιδιότητες των υλικών: ελαφρότητα (απώλεια 100 kg βάρους, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 0,6 λίτρα / 100 km και αερίων του θερμοκηπίου κατά 20%), την αντίσταση (βελτίωση της οδικής συμπεριφοράς - χειρισμό, η απορρόφηση της κινητικής ενέργειας, μικρότερη απόσταση φρεναρίσματος) και ανακύκλωση (95% του Al που περιέχεται σε αυτοκίνητα συλλέγονται και ανακυκλώνονται, και αντιπροσωπεύει πάνω από το 50% της συνολικής αξίας του οχήματος στο τέλος του κύκλου ζωής τους.) Η αυτοκινητοβιομηχανία αναμένεται να διπλασιαστεί τη χρήση του Al στα αυτοκίνητα στα επόμενα δέκα χρόνια. Στη θαλάσσια μεταφορά αυξάνεται η χρήση του Al με την αξιοποίηση των δύο κορυφαίων ιδιοτήτων του, την ελαφρότητα και την αντοχή στη διάβρωση. Σύνθετα κράματα επέτρεψαν το σχεδιασμό πλοίων υψηλών ταχυτήτων, μέσω της μείωσης του χάλυβα έως και 50%. Η αντοχή στη διάβρωση, ακόμη και για το νερό, καθιστά πιο ανθεκτικά τα πλοία σε σκάφη αναψυχής, τις γέφυρες, τα επιβατικά και εμπορικά πλοία. Το γεγονός ότι είναι μη τοξικό και μη απορροφητικό είναι η αιτία που χρησιμοποιείται συνεχώς στην βιομηχανία τροφίμων όπως κονσέρβες αναψυκτικά και περιτυλίγματα, καθώς και στην βιομηχανία φαρμάκων. Στα κτίρια και την οικοδομή χρησιμοποιούνται συνήθως φύλλα έλασης ή μορφοποιημένα σε μορφή για πλαίσια παραθύρων και άλλα γυάλινα υποστηρίγματα. Επίσης, το Al είναι ένα από τα αγαπημένα στοιχεία της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύπλοκες μορφές, σε ένα ευρύ φάσμα σχημάτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν ιδιαίτερα αξιόλογο από τους αρχιτέκτονες και κατασκευαστές, οι οποίοι το χρησιμοποιούν σε δημόσια κτίρια (όπως νοσοκομεία, πανεπιστήμια και κτίρια γραφείων), βιομηχανικά κτίρια και ιδιωτικές κατοικίες. Ακόμη, λόγω της υψηλής του ανακλαστικότητας στο φως η οποία αγγίζει το 95% χρησιμοποιείται συχνά σε φακούς, τηλεσκόπια και καθρέπτες. Τέλος, βρίσκει χρήση στον αθλητισμό και την αναψυχή, σε πολλά αντικείμενα στο καθημερινό μας περιβάλλον, από τα ηλεκτρονικά (οικιακές συσκευές, ψυγεία, καλοριφέρ, επιχρίσματα CD, κλπ) σε αθλητικό εξοπλισμό (ανεμόπτερα, σκι, γκολφ, offroad μοτοσυκλέτες, σκούτερ) και προϊόντα αναψυχής (ρυμουλκούμενα, τροχόσπιτα, καταδύσεις και στον ορειβατικό εξοπλισμό) [11].

2.7 Κράματα Mg

2.7.1 Το Mg και τα κράματα του Mg

Το Mg είναι ένα πολύ ελαφρύ μέταλλο, πυκνότητας $1,7\text{g/cm}^3$, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, που απαιτείται υψηλός λόγος, αντοχής/βάρους (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία). Έχει καλή αντοχή στη διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (στον αέρα), αλλά το προστατευτικό οξείδιο που δημιουργείται στην επιφάνεια είναι ασταθές, κυρίως κάτω από την παρουσία αλάτων. Κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό μεγίστης πυκνότητας πλέγμα και λιώνει στους 650°C . Η ικανότητα παραμόρφωσής του εν ψυχρώ (έλαση, διέλαση) είναι σχετικά μειωμένη σε σχέση με άλλα κράματα (π.χ. Al). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($>300^\circ\text{C}$) το Mg εμφανίζει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Όταν θερμανθεί στον αέρα σε υψηλή θερμοκρασία (800°C) καίγεται, παράγοντας εκτυφλωτική λάμψη. Όπως και στα άλλα βιομηχανικά κράματα, έτσι και στα κράματα Mg υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: τα κράματα διαμόρφωσης και τα κράματα χύτευσης. Η τήξη του Mg κατά τη χύτευση παρουσιάζει δυσκολίες, επειδή το Mg καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η προσθήκη θείου προστατεύει το Mg, επειδή καίγεται και δημιουργεί αέριο διοξείδιο του θείου [13].

Όπως και στα περισσότερα κράματα, έτσι και η κραμάτωση του Mg χρησιμοποιείται για να βελτιωθούν οι ιδιότητες του. Τα κυριότερα κράματα του Mg είναι τα ακόλουθα:

- Κράματα Mg-Al-Zn. Οι προσθήκες Al και Zn οδηγούν σε σκλήρυνση του κράματος (με κατακρήμνιση).
- Κράματα Mg-Zr-Th. Η προσθήκη ζιρκονίου (Zr) βοηθά στη μείωση του μεγέθους των κόκκων, ενώ η προσθήκη θορίου (Th), καθώς και σπανίων γαιών (Ce, La), αυξάνει την αντοχή του υλικού σε ερπυσμό.

Η ονομασία ενός κράματος Mg αποτελείται από δυο γράμματα και δυο αριθμούς. Τα δυο πρώτα γράμματα δείχνουν τα δύο κύρια κραματικά στοιχεία του κράματος ενώ οι δυο αριθμοί υποδηλώνουν την περιεκτικότητά τους κατά βάρος σε αυτό. Για παράδειγμα το κράμα Mg AZ31 περιέχει Al και ψευδάργυρο και ποσοστά κατά βάρος 3% και 1% αντίστοιχα.

Ακολουθεί ο πίνακας με τα κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην κραμάτωση του Mg.

Πίνακας 5: Αναφορά στα γράμματα για την κραμάτωση του Mg [13]

Γράμμα	Στοιχείο
A	Αλουμίνιο
C	Χαλκός
E	Σπάνια μέταλλα
H	Θόριο
J	Στρόντιο
K	Ζιρκόνιο
L	Λίθιο
M	Μαγγάνιο
Q	Ασήμι
S	Πυρίτιο
W	Ύτριο
X	Ασβέστιο
Z	Ψευδάργυρος

2.7.2 Ιδιότητες του Mg

Το Mg με την προσθήκη κραματικών στοιχείων είναι ένα εξίσου καλό μέταλλο με τα υπόλοιπα και χρησιμοποιείται αρκετά στην βιομηχανία. Το Mg είναι το τρίτο σε σειρά ελαφρύτερο κράμα ενώ παράλληλα έχει υψηλή ειδική αντοχή, καλή συγκολλησιμότητα και καλές ιδιότητες κατά την χύτευση του. Σαν ορυκτό στοιχείο θεωρείται ατελείωτο, ενώ όσο πιο καθαρό είναι από προσμίξεις, τόσο καλύτερη είναι η συμπεριφορά του σε διάβρωση. Παρόλα αυτά, πολλά κράματα Mg παρουσιάζουν μικρή διαμορφωσιμότητα, μικρή ολκιμότητα, καθώς και μικρή αντίσταση στη διάβρωση, στη θραύση και τον ερπυσμό. [14]

2.7.3 Το Mg AZ31

Το Mg AZ31 έχει κύρια κραματικά στοιχεία το Al και τον ψευδάργυρο. Έχει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές της βιομηχανίας καθώς και σε τεχνολογικές εφαρμογές. Το Mg είναι μέχρι και 35% πιο ελαφρύ από το Al. Σε αντίθεση με το Al, το Mg δεν χρειάζεται να επεξεργαστεί με θέρμανση.[13]

Η χημική σύσταση του Mg AZ31 διακρίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6: Χημική σύσταση του Mg AZ31

Στοιχείο	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ca	Fe	Ni
Περιεκτικότητα κ.β.%	2.5-3.5	0.7-1.3	0-0.20	0.05	0.05	0.04	0.005	0.10

Μερικές ακόμα ιδιότητες του Mg AZ31:

Πίνακας 7: Ιδιότητες του Mg AZ31 [15]

Πυκνότητα	1.8 g/cm ³
Σημείο τήξης	605 °C
Επιμήκυνση	15 %
σ_{uts}	290 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	45 GPa
Συντελεστή θερμικής διαστολής	20-100C x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Ειδική θερμότητα	1001C J K ⁻¹ Kg ⁻¹
Θερμική αγωγιμότητα	96CW m ⁻¹ K ⁻¹

2.7.4 Εφαρμογές του Mg

Το κράματα Mg βρίσκουν αρκετές εφαρμογές. Οι ενώσεις του Mg χρησιμοποιούνται συχνά ως πυρίμαχο υλικό στην εσωτερική επένδυση των κλιβάνων για την παραγωγή μετάλλων (σίδηρο και χάλυβα, μη σιδηρούχων μετάλλων), γυαλί και τσιμέντο. Ακόμη, λόγω της μικρής του πυκνότητας έχει αμέτρητες εφαρμογές σε περιπτώσεις όπου η μείωση βάρους είναι σημαντική, δηλαδή σε αεροπλάνα και κατασκευές πυραύλων. Έχει επίσης πολλές χρήσιμες χημικές και μεταλλουργικές ιδιότητες, που το καθιστούν κατάλληλο για πολλές άλλες μη-δομικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες σήμερα χρησιμοποιούν πολύ το Mg αφού βασίζονται στον συνδυασμό υψηλής αντοχής και ιδιοτήτων χαμηλής πυκνότητας. Πολλές μεγάλες εταιρείες αυτοκινήτων έχουν ήδη αντικαταστήσει το χάλυβα και το Al με Mg σε διάφορα μέρη των προϊόντων τους. Σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας η μείωση του βάρους θα βελτιώσει την απόδοση του οχήματος, με τη μείωση της αντίστασης κύλισης και της ενέργειας που χρειάζεται για επιτάχυνση, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου και επιπλέον, τη μείωση του CO₂ των αερίων του θερμοκηπίου. Πολλά μέρη του αυτοκινήτου μπορούν να γίνουν από κράματα Mg, όπως μπλοκ του κινητήρα, οι τροχοί, κολώνες τιμονιού, τα

καθίσματα, μπροστά κονσόλες και κουκούλες. Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά δεν είναι τα μόνα οχήματα που έχουν ενσωματώσει το Mg στα σχέδιά τους. Η αεροδιαστημική βιομηχανία έχει μια μακρά ιστορία της χρήσης του μετάλλου σε πολλές εφαρμογές τόσο σε αστικές όσο και στρατιωτικές εφαρμογές. Είναι κρίσιμο για να μειωθεί το βάρος στα αεροπλάνα και τα διαστημόπλοια, καθώς και τα βλήματα, αν θέλουμε να επιτύχουμε μειώσεις των εκπομπών και μεγαλύτερη απόδοση καυσίμου. Αυτές οι αλλαγές θα οδηγήσουν σε μείωση των λειτουργικών εξόδων. Το Mg είναι ένα ιδανικό υλικό για χρήση σε αυτές τις εφαρμογές, λόγω του περιορισμένου βάρους. Το Mg, λοιπόν, χρησιμοποιείται συχνά σε κινητήρες και περιβλήματα αεροσκαφών και ελικοπτέρων. Τα τελευταία χρόνια το Mg εμφανίζεται συχνά και σε ηλεκτρονικές συσκευές, λόγω της καλής του σχέσης με τη μεταφορά θερμότητας και την απαγωγή, καθώς και την ικανότητά του να προστατεύει από τον ηλεκτρομαγνητισμό και τις ραδιοφωνικές παρεμβολές συχνοτήτων. Πολλά ηλεκτρονικά απαιτούν τα μέρη ή τα περιβλήματα τους να είναι σε πολύπλοκα σχήματα, που είναι δυνατόν, να κατασκευαστούν με Mg. Φωτογραφικές μηχανές, κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές είναι κλασικές ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες σίγουρα για να κατασκευαστούν χρησιμοποιείται και Mg. Τέλος, βασικές χρήσεις των σφυρήλατων και χυτών κραμάτων Mg εντοπίζονται στην κατασκευή δομικών στοιχείων αυτοκινήτων και αεροσκαφών, όπως π.χ. τροχούς προσγείωσης, δοχεία πετρελαίου/λαδιού, πλαίσια στροφάλων και έμβολα μηχανών εσωτερικής καύσης [15] [16].

2.8 Εφαρμογές της μεθόδου FSW στη Βιομηχανία.

Η FSW είναι μια μέθοδος συγκόλλησης η οποία βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στην βιομηχανία. Χρησιμοποιείται συχνά σαν διαδικασία συγκόλλησης στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική, στα τρένα, ακόμα και σε ηλεκτρονικές συσκευές.[17][18][19] Πιο συγκεκριμένα η εφαρμογή της μεθόδου αναφέρεται:

Στη ναυπηγική η διαδικασία FSW έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην κατασκευή των θαλάσσιων σκαφών. Δύο σκανδιναβικές εταιρείες διέλασης Al ήταν οι πρώτες που χρησιμοποίησαν την FSW στην κατασκευή πάνελ καταψύκτες ψαριών, καθώς και κατάστρωμα και πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων. Στη συνέχεια το Super Liner Ogasaware (Εικ. 12), που χτίστηκε από την Mitsui Engineering και τη ναυπηγική βιομηχανία στην Ιαπωνία, φέρεται να είναι το μεγαλύτερο πλοίο που κατασκευάστηκε μέσω συγκόλλησης τριβής ανάδευσης. Το πλοίο φέρει προκατασκευασμένα πάνελ τα οποία έχουν συγκολληθεί με την μέθοδο FSW. Το

πλοίο μπορεί να φτάσει ταχύτητες ως 42,8 κόμβους και μπορεί να μεταφέρει μέχρι 740 επιβάτες και 210 τόνους φορτίου. Τέλος, αρκετές είναι και οι εταιρίες που χρησιμοποιούν την μέθοδο FSW για να θωρακίσουν τα πλοία τους.



Εικόνα 12: Super_Liner_Ogasawara - εφαρμογή της FSW σε πλοίο [18]

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί από πολλές μεγάλες εταιρίες για την κατασκευή πάνελ, πλαισίων, επιμέρους κομματιών της ανάρτησης κ.α. Η Ford ήταν η πρώτη που εφάρμοσε τη μέθοδο δια τριβής και ανάδευσης στο μοντέλο τους 2005 GT (Εικ.13). Το συγκολλημένο με την μέθοδο FSW κεντρικό τούνελ εξυπηρετεί δύο λειτουργίες, πρώτον, να παρέχει ακαμψία και δεύτερον, να παρέχει χώρο για τη δεξαμενή καυσίμου που βρίσκεται στο κεντρικό κόμβο του οχήματος για την αποφυγή ζημιών από τις συγκρούσεις. Πολλές είναι ακόμα οι εταιρίες που χρησιμοποίησαν την FSW στα μοντέλα τους. Η Mazda στο μοντέλο MX-5 εφαρμόζει την μέθοδο σε κομμάτια της ανάρτησης του μοντέλου, καθώς και για την ένωση των φύλλων Al με γαλβανισμένα στηρίγματα χάλυβα για το καπό του χώρου αποσκευών. Η ίδια εταιρία με την ίδια μέθοδο συγκολλά την οροφή και τις πίσω πόρτες του μοντέλου RX-8. Επίσης, η Audi στο μοντέλο R8 εφαρμόζει τη μέθοδο για να συγκολλήσει τα κομμάτια που χρησιμεύουν στην ενίσχυση του πλαισίου. Συλλογικά, η μέθοδος δια τριβής και ανάδευσης παρέχει μια οικονομική και αποδοτική, αυτοματοποιημένη μέθοδο για να ανταποκριθεί στις μεγάλες απαιτήσεις συγκόλλησης των κατασκευαστών αυτοκινήτων του σήμερα.



Εικόνα 13: FORDGT - εφαρμογή της FSW σε αυτοκίνητο [18]

Στην αεροναυπηγική και στη διαστημική τεχνολογία η μέθοδος χρησιμοποιείται αρκετά τα τελευταία χρόνια (Εικ.15) . Χρησιμοποιείται σε φτερά , πόρτες, ατράκτους, πάνελ και σε πατώματα.[18][19] Τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι η μείωση του βάρους και η αντικατάσταση των ηλώσεων. Οι ράμπες της πίσω πόρτας του Boeing C-17 και τα πάνελ της πόρτας του Boeing 747 ήταν τα πρώτα τμήματα που συγκολλήθηκαν στην αεροναυπηγική με την FSW. Έπειτα, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε πολλά μέρη του Airbus A400M και στα Jet Legacy 450 και 500 με επιτυχία. Από κει και πέρα η μέθοδος εφαρμόζεται κατά κόρον πια σε αεροναυπηγικές εφαρμογές. Στη διαστημική τεχνολογία η μέθοδος εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 1999 στους πυραύλους Delta II, Delta IV και το Atlas V. Στη συνέχεια με την FSW συγκολλήθηκε το εξωτερικό κέλυφος στο διαστημικό λεωφορείο Ares I και για το Orion, το διαστημικό σκάφος της NASA (Εικ. 14). Η FSW επέτρεψε Nasa να δημιουργήσει συγκολλήσεις υψηλής αντοχής με ένα κράμα Al εξαιρετικά ελαφρύ που δεν θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί με τη χρήση συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης. Η συγκόλληση δια τριβής και ανάδευσης, παρέχει ακαμψία, και οι συγκολλήσεις της είναι σε θέση να αντέξουν τις σκληρές συνθήκες που λαμβάνουν χώρα κατά διαστημική πτήση.



Εικόνα 14: Εφαρμογή της μεθόδου από τη NASA [18]



Εικόνα 15: Falcon 9 – εφαρμογή της μεθόδου σε πύραυλο [18]

Στην κατασκευή τρένων η μέθοδος δια τριβής και ανάδευσης χρησιμοποιείται στην παραγωγή των σιδηροδρομικών βαγονιών σε όλο τον κόσμο (Εικ. 16). Το κινέζικο σιδηροδρομικό δίκτυο χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη τεχνολογία για να συνδέσουν τα 30 μέτρα πάνελ που χρησιμοποιούνται για το σώμα των βαγονιών των τρένων. Στο μετρό του Λονδίνου από το 1997, τα πάνελ οροφής γίνονται από προφίλ Al συγκολλημένα με FSW, το ίδιο και η κυρτή πλευρά στα πλάγια, και η οροφή για τις αμαξοστοιχίες της γραμμής Victoria. Το ίδιο συμβαίνει και με τα πατώματα της αμαξοστοιχίας. Τέλος, η ίδια διαδικασία συγκόλλησης χρησιμοποιείται και στους απαγωγούς θερμότητας για την ψύξη των ηλεκτρονικών υψηλής ισχύος των μηχανών



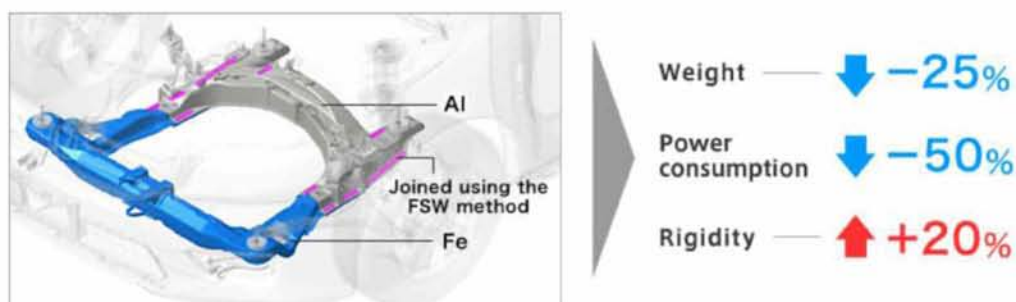
Εικόνα 16: Class 395 Javelin – εφαρμογή της FSW σε μετρό [18]

Στους υπολογιστές η Apple (Εικ. 17) χρησιμοποίησε τη συγκόλληση FSW για να πλαισιώσει τις επιφάνειες AI του iMac. Οι μηχανικοί της Apple αντιμετώπιζαν μια μεγάλη πρόκληση με το σχεδιασμό του iMac για το πώς θα συγκολληθούν τα αλουμινένια μπροστά και πίσω τμήματα της οθόνης. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συγκόλλησης θα είχαν ως αποτέλεσμα εμφανή σημάδια συγκόλλησης, εξωτερικά του υπολογιστή. Έτσι η μέθοδος επέτρεψε στην Apple να δημιουργήσει ένα προϊόν πέρα από λειτουργικό να είναι και όμορφο χωρίς ατέλειες και εμφανή σημάδια συγκόλλησης περιμετρικά της οθόνης.



Εικόνα 17: Εφαρμογή της FSW από την Apple [18]

Η εφαρμογή της μεθόδου σε συγκολλήσεις κραμάτων από το ίδιο υλικό είναι σχετικά εύκολη παρόλα αυτά είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις σε διμεταλλικά κράματα. Υπάρχουν εφαρμογές όπου ο συνδυασμός από την συγκόλληση δυο διαφορετικών κραμάτων μπορεί να επιφέρει άριστα αποτελέσματα στην κατασκευή. Για παράδειγμα, η παρακάτω συγκόλληση από την Honda[24]. Η Honda είναι η πρώτη στην αυτοκινητοβιομηχανία (Εικ.18) που χρησιμοποίησε την μέθοδο για την ένωση του χαλύβδινου και αλουμινένιου τμήματος του εμπρόσθιου υποπλαισίου. Με αυτόν τον τρόπο κατάφερε να πετύχει μείωση του βάρους 25%, μείωση της κατανάλωσης 50%, και αύξηση της άνεσης οδήγησης λόγω αύξησης της στιβαρότητας.



Εικόνα 18: Εφαρμογή της FSW από τη Honda [20]

Η υιοθέτηση λοιπόν της FSW σε μια τέτοια ευρεία ποικιλία των βιομηχανικών εφαρμογών αποδεικνύει την ευελιξία αυτής της καινοτόμου μεθόδου συγκόλλησης. Το ινστιτούτο συγκολλήσεων ανέφερε ότι υπάρχουν πάνω από 3000 διπλώματα ευρεσιτεχνίας και αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας σε παγκόσμιο επίπεδο, που αφορούν τη διαδικασία FSW.

3. Πειραματική διαδικασία

3.1 Μηχανή συγκόλλησης

Στο εμπόριο υπάρχει πληθώρα μηχανών συγκόλλησης FSW. Λόγω όμως του μεγάλου κόστους αγοράς μιας τέτοιας μηχανής συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα τροποποιημένη φρεζομηχανή [1] για την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Η τροποποιημένη φρέζα (Εικ. 20) που υπάρχει το εργαστήριο των υλικών φέρει ηλεκτρονικές ενδείξεις (Εικ. 19) για την ταχύτητα πρόωσης, την ταχύτητα περιστροφής και το κάθετο φορτίο έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερος έλεγχος και σταθερές συνθήκες στην πραγματοποίηση του εκάστοτε πειράματος. Επίσης είναι εγκατεστημένη μια δυναμοκυψέλη (Εικ. 21) τύπου *Tedea-Huntleigh* ικανοχής ως 2.000kg για την σωστή μέτρηση του κάθετου φορτίου.



Εικόνα 19: Μετρητικά για τον έλεγχο των συνθηκών συγκόλλησης



Εικόνα 20: Τροποποιημένη φρεζομηχανή



Εικόνα 21: Δυναμοκυψέλη τύπου *Tedea-Huntleigh* [21]

3.2 Εργαλείο συγκόλλησης

Το εργαλείο συγκόλλησης (Εικ.22) αποτελεί το πιο σημαντικό μέρος της συγκεκριμένης μεθόδου. Αποτελείται από δυο βασικά κομμάτια, το περιουχένιο (shoulder) και τον πείρο (pin). Το περιουχένιο έχει αρκετές βασικές λειτουργίες. Αρχικά επιτυγχάνει την θέρμανση των επιμέρους κομματιών προς συγκόλληση ώστε να μαλακώσουν τα κράματα και να μεταφέρεται πιο εύκολα υλικό. Επίσης, επιτυγχάνει την απομάκρυνση του αποβλήτου από την περιοχή της συγκόλλησης ενώ παράλληλα περιορίζει την ροή του μετάλλου έξω από την περιοχή της συγκόλλησης.



Εικόνα 22: Εργαλείο συγκόλλησης

Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας συγκόλλησης αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες, επομένως το εργαλείο πρέπει πέρα από την κατάλληλη σκληρότητα να έχει και καλές φυσικές ιδιότητες ώστε να αντέχει σε φθορές όπως ο ερπυσμός και να διατηρούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Η συνεχής έκθεση του εργαλείου σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και μεγάλες κάθετες δυνάμεις και την τριβή είναι

σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός σωστού εργαλείου. Έτσι για την μακροχρόνια αντοχή του εργαλείου, είχε επιλεγεί για την κατασκευή του ο εργαλειοχάλυβας H13 με θερμική κατεργασία ωστενιτοποίησης, βαφής και διπλής επαναφοράς με αριστερόστροφο σπείρωμα M5 (με σκληρότητα 53RC). Ο λόγος που επιλέγεται αριστερόστροφο σπείρωμα ενώ η κίνηση του εργαλείου είναι δεξιόστροφη είναι για την καλύτερη μεταφορά του κάθετου φορτίου. Οι διαστάσεις του εργαλείου συγκόλλησης επιλέγονται βιβλιογραφικά. Έτσι έχει επιλεγεί το εργαλείο να φέρει τις παρακάτω διαστάσεις για πάχος ελασμάτων 2mm:

- Διάμετρος περιουχενίου 14mm
- Διάμετρος πείρου 5mm
- Μήκος πείρου 1.8 mm

Πίνακας 8: Χημική σύσταση του H13

Υλικό	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
H13	0.32-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	1.1-1.75	0.8-1.2

Ο λόγος που έχουν επιλεγεί αυτές οι διαστάσεις είναι λόγω του βρετανικού ινστιτούτου συγκολλήσεων το οποίο προτείνει την αναλογία διαμέτρων μεταξύ πείρου και περιουχενίου κυμαίνεται από 2.5:1 μέχρι 3:1 ,για πάχη ελασμάτων μέχρι 6mm.

3.4 Σύστημα συγκράτησης

Η άριστη συγκράτηση των δοκιμίων είναι σημαντική αφού οποιαδήποτε μετακίνηση των ως προς συγκόλληση κομματιών θα επιφέρει αλλαγές στις συνθήκες συγκόλλησης και στο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι για την σωστή συναρμογή των τεμαχίων χρησιμοποιήθηκε μια τράπεζα με διαστάσεις 200X200X5mm. Τα φύλλα Al και Mg που χρησιμοποιήθηκαν έχουν διαστάσεις 100X50X2mm οπότε περιμετρικά χρησιμοποιήθηκαν ακόμα τέσσερα κομμάτια χάλυβα 100X50X2mm ώστε να αποτρέπεται η οποιαδήποτε μετακίνηση κατά την διάρκεια της συγκόλλησης (Εικ. 23). Τέλος, δυο φύλλα χάλυβα τα οποία δένονται δεξιά και αριστερά της τράπεζας με κοχλίες βελτιστοποιούν περαιτέρω την συγκράτηση των τεμαχίων.



Εικόνα 23: Συγκράτηση των δοκιμίων

3.4 Συνθήκες συγκόλλησης

Οι συνθήκες συγκόλλησης είναι αυτές που επιφέρουν την τελική συνοχή, αντοχή καθώς και τις ιδιότητες στο συγκολλημένο υλικό. Οι συνθήκες της συγκόλλησης είναι οι εξής:

- Ταχύτητα περιστροφής (RPM)
- Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)
- Κάθετο φορτίο (Kg)
- Κλίση του εργαλείου ($^{\circ}$)

3.5 Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκολλήσεις.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της έρευνας σε συγκολλήσεις συμβολής με την μέθοδο δια τριβής και ανάδευσης, είναι δυο. Το Al 2024-0, το Mg AZ31 καθώς και ο συνδυασμός αυτών. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν οι ίδιες σε όλα τα πειράματα, 100X50X2 (mm).

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις συμβολής με τους συνδυασμούς:

- Al 2024 με Al 2024
- Mg AZ31 με Mg AZ31
- Al 2024 με Mg AZ31 (Mg AZ31 στην advancing πλευρά)
- Al 2024 με Mg AZ31 (Al 2024 στην advancing πλευρά)

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι συγκολλήσεις σε κάθε ένα από τους παραπάνω συνδυασμούς:

3.6 Συνθήκες στα πειράματα συγκολλήσεων συμβολής.

3.6.1 Al 2024-0

Το Al 2024 ήταν το πρώτο υλικό στο οποίο ξεκίνησαν τα πειράματα και η διερεύνηση. Μετά από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση καθώς και πειραματικές δοκιμές, προσαρμόζοντας κατάλληλα τις τιμές πάνω στην τροποποιημένη φρεζομηχανή του εργαστηρίου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στα πλαίσια των παρακάτω συνθηκών:

Πίνακας 9: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024

Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	650-900
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	40-80
Κάθετο φορτίο (Kg)	350-700
Κλίση του εργαλείου (°)	2 (σταθερή)

Έπειτα από αρκετές δοκιμές επιλέχθηκαν τα δυο καλύτερα δοκίμια χωρίς εμφανή σφάλματα, τα οποία φαινόταν αρκετά ανθεκτικά για περαιτέρω μελέτη και οι συνθήκες τους φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024 Δοκίμιο 1

Δοκίμιο 1	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	845
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	475
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 24: Συγκόλληση-1 Al 2024

Πίνακας 11: Συνθήκες συγκόλλησης για το Al 2024 Δοκίμιο 2

Δοκίμιο 2	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	830
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	450
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 25: Συγκόλληση-2 Al 2024

3.6.2 Mg AZ31 με Mg AZ31

Η δεύτερη κατηγορία πειραμάτων αφορούσε συγκολλήσεις συμβολής σε Mg AZ31. Παρομοίως με το Al, έτσι και εδώ, αφού έγινε η κατάλληλη έρευνα για την επιλογή των συνθηκών συγκόλλησης, ακολούθησαν πειράματα στα πλαίσια των παρακάτω συνθηκών.

Πίνακας 12: Συνθήκες συγκόλλησης για το MgAZ31

Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	650-900
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	40-80
Κάθετο φορτίο (Kg)	350-700
Κλίση του εργαλείου (°)	2 (σταθερή)

Έπειτα, επιλέχθηκαν τα δύο καταλληλότερα δοκίμια που θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στην μελέτη, αφού δεν εμπεριείχαν σφάλματα. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα δυο δοκίμια με τις συνθήκες τους:

Πίνακας 13: Συνθήκες συγκόλλησης για το Mg AZ31 δοκίμιο 1

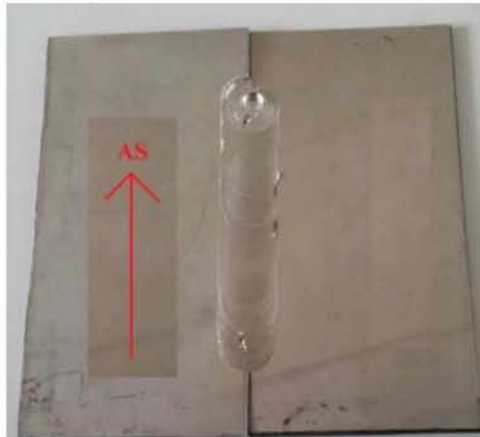
Δοκίμιο 1	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	830
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	60
Κάθετο φορτίο (Kg)	420
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 26: Συγκόλληση-1 Mg AZ31

Πίνακας 14: Συνθήκες συγκόλλησης για το Mg AZ31 δοκίμιο 2

Δοκίμιο 2	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	830
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	450
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 27: Συγκόλληση-2 Mg AZ31

3.6.3 Al 2024 με Mg AZ31 (Mg AZ31 στην advancing πλευρά)

Επόμενος στόχος μετά τις συγκολλήσεις ιδίου μετάλλου, ήταν οι συγκολλήσεις σε ανόμοια μεταξύ τους κράματα. Ο συνδυασμός αυτός των δύο ανόμοιων μετάλλων, επιλέχτηκε να είναι το Al 2024 και το Mg AZ31. Πέρα από την επιλογή των συνθηκών, αυτό που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν στην συγκόλληση των δυο διαφορετικών μετάλλων, είναι πιο κράμα θα συγκολληθεί από την προωθούσα (advancing) πλευρά. Η βιβλιογραφία αυστηρά επιλέγει πάντα, στην περίπτωση της FSW σε Al και Mg, το Al να μπαίνει στην advancing πλευρά και το Mg στην retreating. Για πειραματικούς λόγους επιλέχτηκε να γίνουν και δοκιμές με το Mg στην advancing πλευρά.

Στην Εικ. 28 παρουσιάζεται το βέλτιστο δείγμα με τις αντίστοιχες συνθήκες συγκόλλησης τοποθετώντας στην advancing πλευρά το Mg AZ31:

Πίνακας 15: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης (Mg advancing)

Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	850
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	50
Κάθετο φορτίο (Kg)	450
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 28: Συγκόλληση Al - Mg (Mg advancing). Το βέλος δείχνει την διεύθυνση της συγκόλλησης.

3.6.4 Al 2024 με Mg AZ31 (Al 2024 στην advancing πλευρά)

Η τοποθέτηση του Mg στην advancing πλευρά δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα για την τελική ποιότητα της συγκόλλησης. Έτσι τοποθετώντας το Al στην προωθούσα (advancing) πλευρά, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου δοκιμές.

Οι συνθήκες συγκόλλησης δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 16: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης (Al advancing)

Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	800-1000
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	35-55
Κάθετο φορτίο (Kg)	300-700
Κλίση του εργαλείου (°)	2 (σταθερή)



Εικόνα 29: Συγκολλήσεις Al-Mg (Al advancing)

Στην Εικ. 29 από το δοκίμιο 1 ως το 4 η μείωση του κάθετου φορτίου έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο απόβλητο (flash), ενώ από το δοκίμιο 6 ως το 10 η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης δημιουργεί προβλήματα τύπου tunnel.

Πιο αναλυτικά οι συνθήκες για κάθε δοκίμιο φαίνονται παρακάτω:

Το βέλος πάντα δείχνει την φορά της συγκόλλησης

Πίνακας 17: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 1

Δοκίμιο 1	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	900
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	65
Κάθετο φορτίο (Kg)	400
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 30: Διμεταλλική συγκόλληση-1

Πίνακας 18: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 2

Δοκίμιο 2	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	880
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	65
Κάθετο φορτίο (Kg)	200
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 31: Διμεταλλική συγκόλληση-2

Πίνακας 19: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 3

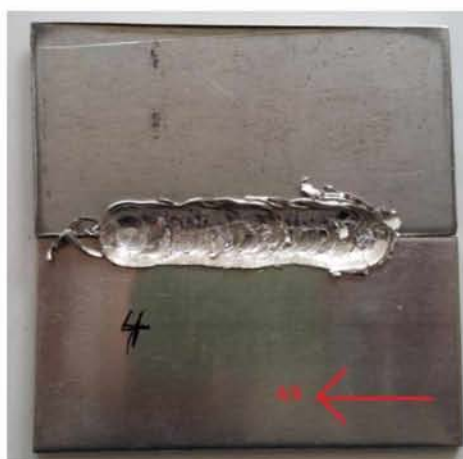
Δοκίμιο 3	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	850
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	300
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 32: Διμεταλλική συγκόλληση-3

Πίνακας 20: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 4

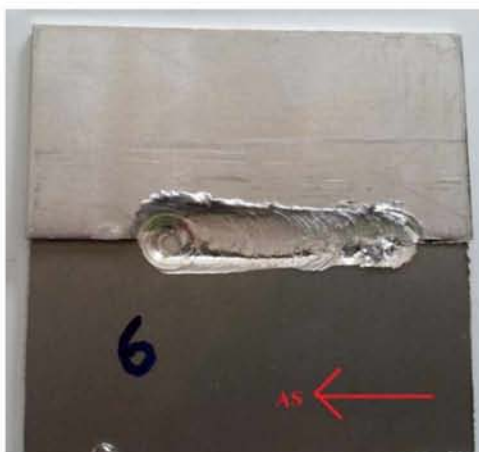
Δοκίμιο 4	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	1000
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	35
Κάθετο φορτίο (Kg)	420
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 33: Διμεταλλική συγκόλληση-4

Πίνακας 21: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 6

Δοκίμιο 6	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	800
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	500
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 34: Διμεταλλική συγκόλληση-6

Πίνακας 22: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 7

Δοκίμιο 7	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	840
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	55
Κάθετο φορτίο (Kg)	580
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 35: Διμεταλλική συγκόλληση-7

Πίνακας 23: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 8

Δοκίμιο 8	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	1000
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	50
Κάθετο φορτίο (Kg)	360
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 36: Διμεταλλική συγκόλληση-8

Πίνακας 24: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 9

Δοκίμιο 9	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	850
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	45
Κάθετο φορτίο (Kg)	600
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 37: Διμεταλλική συγκόλληση-9

Πίνακας 25: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 10

Δοκίμιο 10	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	815
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	25
Κάθετο φορτίο (Kg)	700
Κλίση του εργαλείου (°)	2

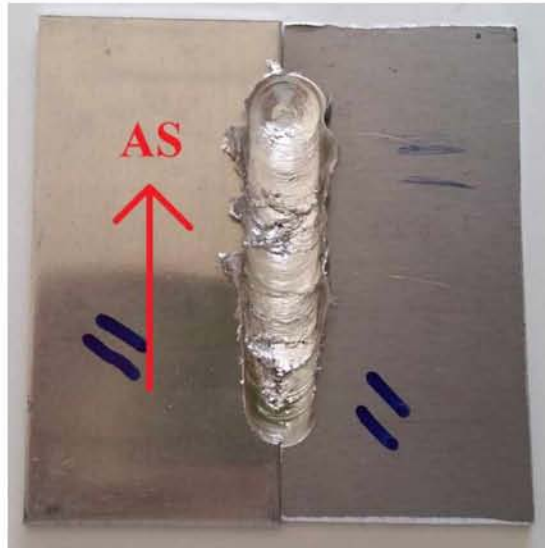


Εικόνα 38: Διμεταλλική συγκόλληση-10

Έπειτα μετά από νέα σειρά πειραμάτων και δοκιμών, ακλούθησαν δυο ακόμα δοκίμιο τα οποία επιλέχτηκαν ως τα καταλληλότερα για να μελετηθούν περαιτέρω. Οι συνθήκες των δυο αυτών δοκιμών δίνονται στον Πίνακα 25:

Πίνακας 26: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 11

Δοκίμιο 11	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	850
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	45
Κάθετο φορτίο (Kg)	600
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 39: Διμεταλλική συγκόλληση-11

Πίνακας 27: Συνθήκες διμεταλλικής συγκόλλησης δοκιμίου 12

Δοκίμιο 12	
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	810
Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	45
Κάθετο φορτίο (Kg)	980
Κλίση του εργαλείου (°)	2



Εικόνα 40: Διμεταλλική συγκόλληση-12

3.7 Διαδικασία μεταλλογραφικής αξιολόγησης

Αρχικά αφού τα δοκίμια κόπηκαν και εγκιβωτίστηκαν, ακολούθησε η διαδικασία της λείανσης. Κάθε δοκίμιο λειάνθηκε διαδοχικά σε 120, 180, 220, 500, 800, 1000, 1200, 2000, 2400 Grid και στη συνέχεια στιλβώθηκε με διαμαντόπαστα 3μm και 1μm. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε στο Al 2024 ήταν το kellers, ενώ για το Mg AZ31 χρησιμοποιήθηκε μίγμα 4,2 g πικρικού οξέως, 10 ml αιθανικού οξέως και 70 ml αιθανόλης. Στις διμεταλλικές συγκολλήσεις το etching έγινε σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο για 10 δευτερόλεπτα σε μίγμα 10 ml αιθανικό οξύ (acetic acid), 10 ml αποσταγμένο νερό, and 100 ml αιθανόλη και 6 gr πικρικό οξύ. Στο δεύτερο στάδιο για 40 δευτερόλεπτα σε 20 gr υδροξειδίου του νατρίου και 100 ml αποσταγμένο νερό.[22]

3.7.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο

Ο πρώτος έλεγχος των επιφανειών των συγκολλήσεων έγινε στο στερεοσκόπιο για να ελεγχτεί αρχικά αν υπάρχουν σφάλματα τα οποία έχουν φτάσει ως την επιφάνεια της συγκόλλησης. Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Leica Wilz M3Z σε μεγεθύνσεις 6.5 - 45X.

3.7.2 Έλεγχος στο οπτικό μικροσκόπιο

Η παρατήρηση της μικροδομής έγινε στο μικροσκόπιο Leitz Aristomet σε εγκάρσιες τομές, και μεγεθύνσεις 50 - 1000X.

3.7.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά πάρθηκαν τιμές μικροσκληρομετρήσεων κατά μήκος του κέντρου της εγκάρσιας τομής της εκάστοτε συγκόλλησης. Το φορτίο ήταν 100gr για 10 sec. Το μικροσκληρόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Wolpert 402 MVD.

3.7.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν στη μηχανή Instron 8801 σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8M για subsized δοκίμια.

3.7.5 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης SEM/EDX

Οι αναλύσεις επιλεγμένων συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκαν με SEM/EDS στο Τμήμα Φυσικής του ΑΠΘ. Ο τύπος του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν SEM JEOL- 84

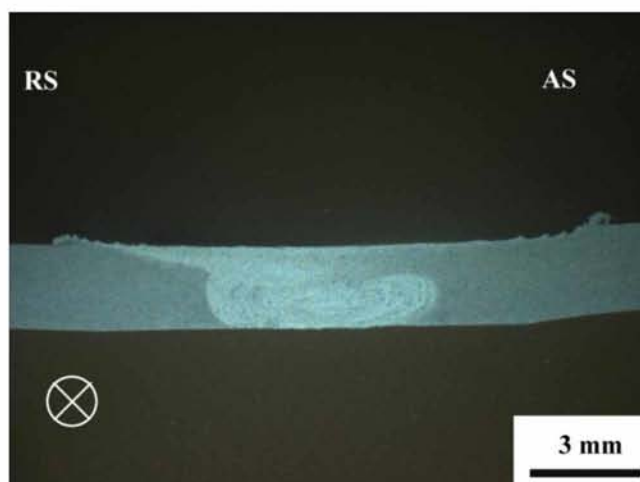
4. Αποτελέσματα - Σχολιασμός αποτελεσμάτων

4.1 Συγκολλήσεις συμβολής AI 2024

4.1.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο

Δοκίμιο 1:

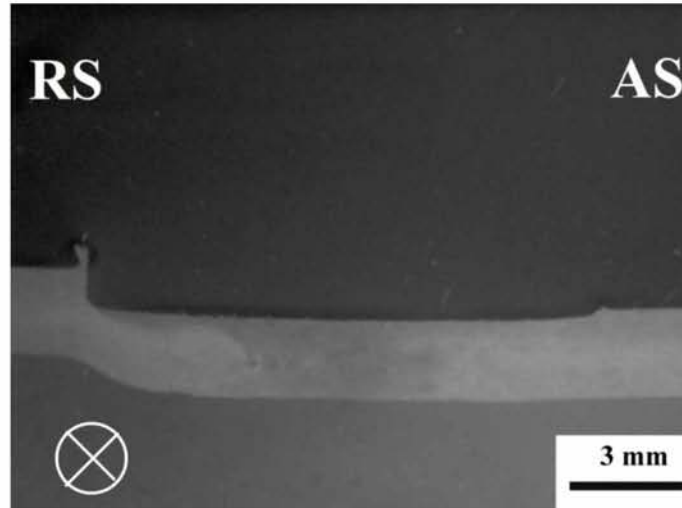
Παρακάτω διακρίνεται το η μακροδομή της συγκόλλησης 1 στο στερεοσκόπιο. Παρατηρώντας την τομή στο στερεοσκόπιο (Εικ. 41), φαίνεται μια συγκόλληση πλήρους διείσδυσης, χωρίς επιφανειακά σφάλματα. Παρατηρούμε τον στροβιλισμό στην περιοχή της ανάδευσης που έχει δημιουργηθεί από το εργαλείο.



Εικόνα 41: Μακροδομή συγκόλλησης-1 AI (6.5x)

Δοκίμιο 2:

Αντίστοιχα με την συγκόλληση Νο 1, έτσι και στη συγκόλληση Νο 2 διακρίνεται η περιοχή της ανάδευσης από το εργαλείο, και δεν παρατηρείται κάποιο σφάλμα (Εικ.42). Στην συγκεκριμένη όμως περίπτωση βλέπουμε ότι οι συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης τελικά πίεσαν το υλικό προς τα κάτω με αποτέλεσμα να δημιουργήσει «παραμόρφωση» προς τα κάτω, γεγονός το οποίο μπορεί να επιφέρει δυσάρεστα αποτελέσματα στην μετέπειτα αντοχή του υλικού.



Εικόνα 42: Μακροδομή συγκόλλησης-2 Al (6.5x)

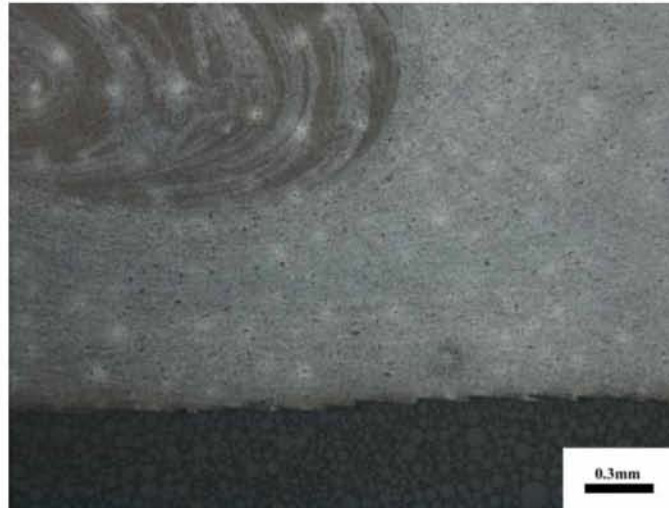
4.1.2 Έλεγχος μικροδομής

Για τον έλεγχο της μικροδομής της συγκόλλησης, παρουσιάζονται αρχικά οι μακροφωτογραφίες όλης της συγκόλλησης ώστε να υπάρχει μια γενική εικόνα για το τελικό αποτέλεσμα και την περαιτέρω μελέτη της εκάστοτε περιοχής. Σημειώνεται ότι η συνολική εικόνα της συγκόλλησης προέκυψε από την ένωση τμημάτων φωτογραφιών όπως αυτές ελήφθησαν στο στερεοσκόπιο.

Δοκίμιο 1:



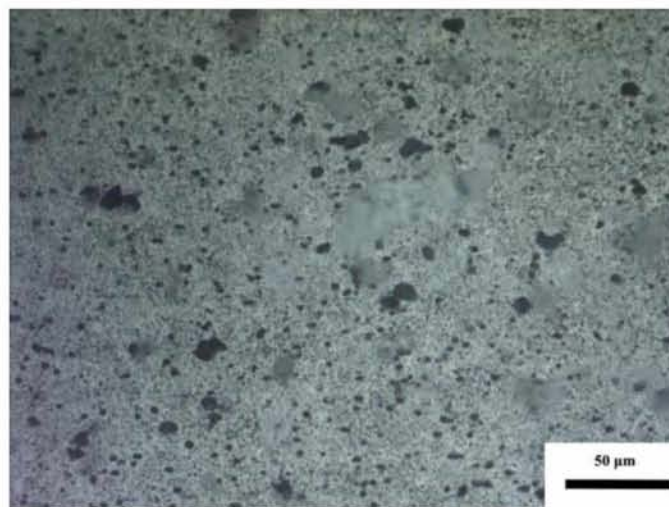
Εικόνα 43: Μακροδομή της συγκόλλησης-1. Σημειώνονται το AS, RS καθώς και η φορά τη συγκόλλησης



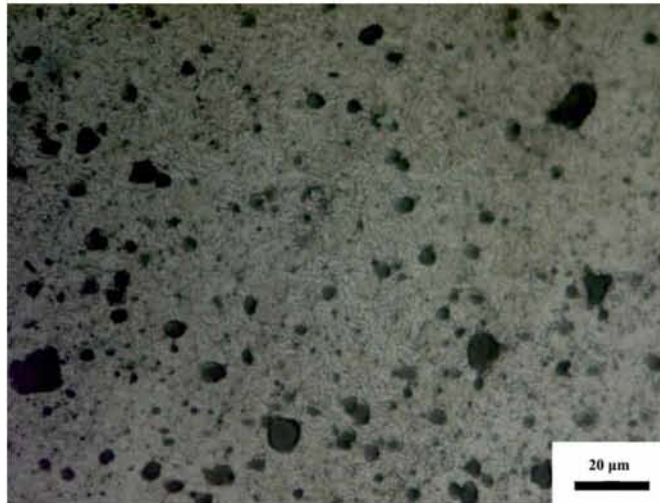
Εικόνα 44: Όριο ζώνης ανάδευσης advancing



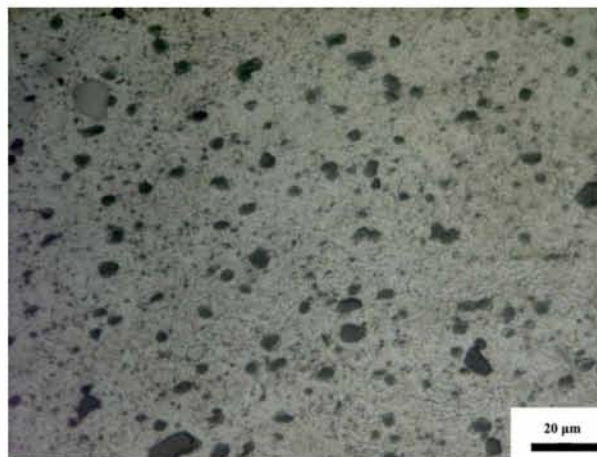
Εικόνα 45: Όριο ζώνης ανάδευσης retreating



Εικόνα 46: Base metal (500x)



Εικόνα 47: (NZ 1000x)



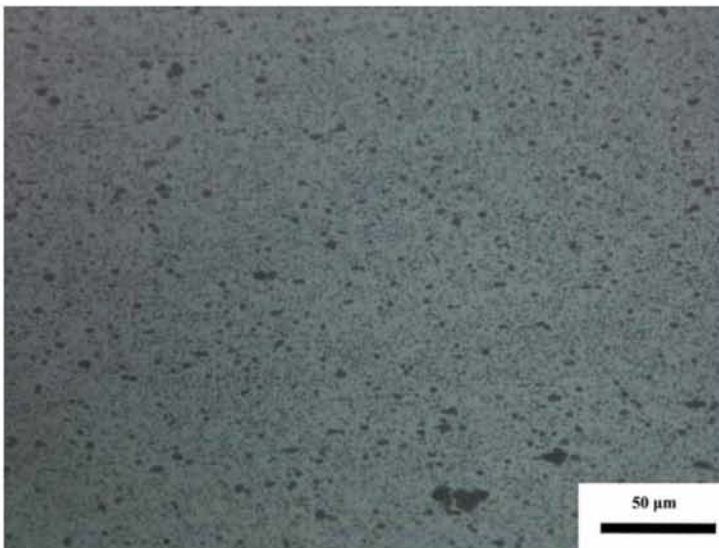
Εικόνα 48: TMAZ (1000x)

Παρατηρούμε και από το μικροσκόπιο (Εικ.43), μια συγκόλληση με πλήρη συνοχή χωρίς κενά ή πορώδες και με πλήρη διείσδυση. Στη συνέχεια, κοιτάζοντας τις εικόνες 44-45, βλέπουμε την ένωση του αναδευόμενου υλικού αριστερά με την περιοχή retreating και δεξιά με την περιοχή advancing. Ούτε και εδώ παρατηρούμε κάποια ασυνέχεια στη συγκόλληση. Επιπρόσθετα στην περιοχή NZ (Εικ. 47) έχουμε την περιοχή της δυναμικής ανακρυστάλλωσης όπου το μέγεθος των κόκκων έχει μικρύνει σε σχέση με το βασικό μέταλλο, ενώ στην περιοχή TMAZ (Εικ. 48) υπάρχει η έντονη περιστροφή των κόκκων λόγω της ανάδευσης.

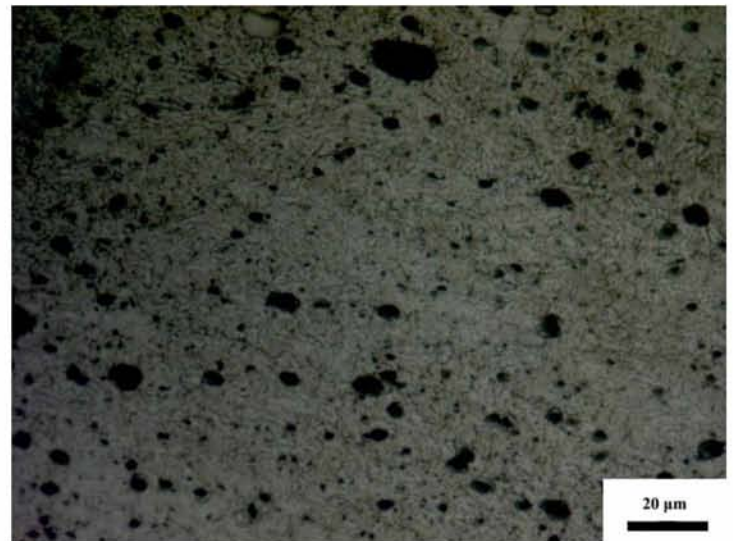
Δοκίμιο 2:



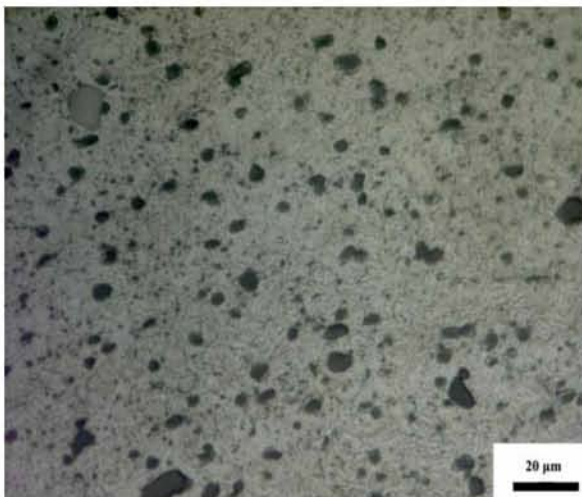
Εικόνα 49: Μακροδομή της συγκόλλησης-2. Σημειώνονται το AS, RS καθώς και η φορά τη συγκόλλησης



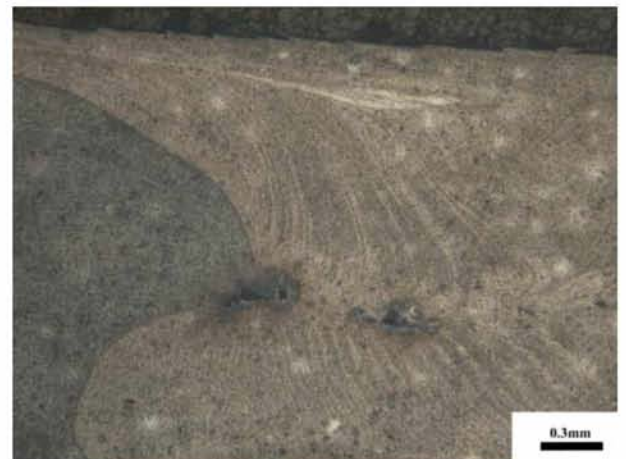
Εικόνα 50: Base metal (500x)



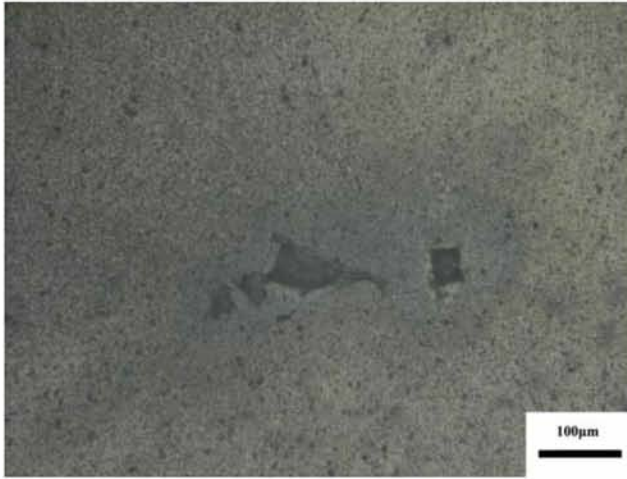
Εικόνα 51: NZ (1000x)



Εικόνα 52: Tmaz (1000x)



Εικόνα 53: Σφάλμα στην συγκόλληση στη ζώνη ανάδευσης (50x)



Εικόνα 54: Σφάλμα στη συγκόλληση (200x)



Εικόνα 55: Σφάλμα στη συγκόλληση (100x)

Σε αντίθεση με το δοκίμιο 1, στο δοκίμιο 2 υπάρχουν δύο περιοχές (Εικ. 49) οι οποίες έχουν πόρους. Το πορώδες αυτό (Εικ. 53-54-55) οφείλεται σε μικρή τιμή κάθετης δύναμης. Όπως και προηγουμένως έτσι και εδώ παρατηρούμε την περιοχή NZ (Εικ. 51) όπου έχουν λεπτύνει οι κόκκοι, την περιοχή TMAZ (Εικ. 52) και το βασικό μέταλλο (Εικ. 50) το οποίο δεν έχει υποστεί κάποια αλλαγή.

4.1.3 Μικροσκληρομετρήσεις

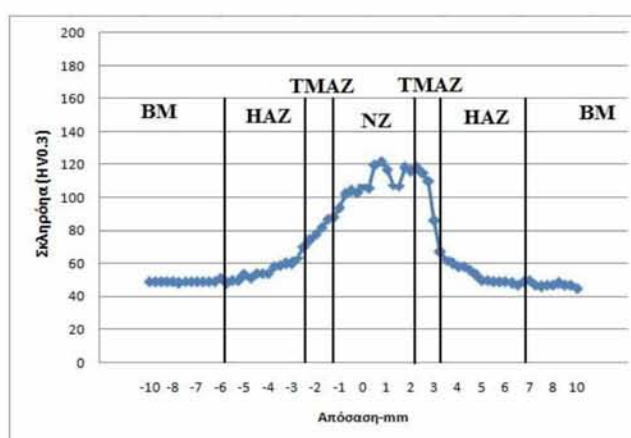
Για κάθε ένα από τα δοκίμια ξεχωριστά πραγματοποιήθηκαν μικροσκληρομετρήσεις κατά μήκος του κέντρου της συγκόλλησης. Αυτό βοηθάει στο να διαχωρίσουμε τις βασικές περιοχές. Την NZ, την TMAZ, την HAZ και το BM.

Δοκίμιο 1:

Πίνακας 28: Μικροσκληρομετρήσεις Al δοκίμιο 1

Απόσταση από το κέντρο προς retreating σε mm	HV0.3	Απόσταση από το κέντρο προς advancing σε mm	HV0.3
0.00	103	0.00	107
0.25	104	0.25	106
0.50	102	0.50	120
0.75	94	0.75	122
1.00	88	1.00	117
1.25	87	1.25	108
1.50	82	1.50	107
1.75	78	1.75	118

2.00	74	2.00	116
2.25	72	2.25	118
2.50	70	2.50	115
2.75	64	2.75	110
3.00	60	3.00	86
3.25	60	3.25	67
3.50	59	3.50	62
3.75	58	3.75	60
4.00	54	4.00	58
4.25	54	4.25	58
4.50	54	4.50	56
4.75	54	4.75	53
5.00	51	5.00	50
5.25	53	5.25	50
5.50	50	5.50	49
6.00	50	6.00	49
6.50	48	6.50	49
7.00	51	7.00	48
7.50	49	7.50	47
8.00	49	8.00	49
8.50	49	8.50	50
9.00	50	9.00	47
9.50	48	9.50	46
10.00	48	10.00	47
11.00	48	11.00	47
12.00	48	12.00	48
13.00	48	13.00	47
14.00	48	14.00	47
15.00	48	15.00	45
16.00	48	16.00	45
17.00	48	17.00	45
18.00	48	18.00	45
19.00	48	19.00	45
20.00	48	20.00	45



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου 1

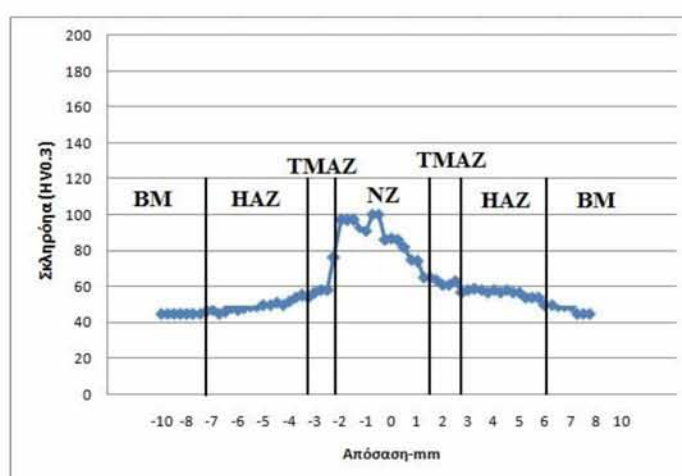
Παρατηρώντας το διάγραμμα 1 , διακρίνουμε στην περιοχή NZ τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το υπόλοιπο υλικό. Σε αυτή την περιοχή το υλικό λόγω της ανάδευσης έχει υποστεί δυναμική αποκρυστάλλωση. Το μέγεθος των κόκκων έχει μικραίνει και η σκληρότητα του έχει αυξηθεί σε σχέση με το μητρικό. Όπως ήταν αναμενόμενο δεξιά και αριστερά μετά την TMAZ οι τιμές πέφτουν σχεδόν γραμμικά. Η σκληρότητα στην περιοχή του NZ, της ΘΕΖ και της TMAZ αυξάνεται σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του βασικού μετάλλου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται σε φαινόμενα φυσικής γήρανσης που εξελίσσονται λόγω του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης, καθώς και στα φαινόμενα της ανακρυστάλλωσης και πλαστικής παραμόρφωσης.

Δοκίμιο 2:

Πίνακας 29: Μικροσκληρομετρήσεις Al δοκίμιο 2

Απόσταση από το κέντρο προς retreating σε mm	HV0.3	Απόσταση από το κέντρο προς advancing σε mm	HV0.3
0.00	86	0.00	87
0.25	100	0.25	86
0.50	100	0.50	82
0.75	91	0.75	75
1.00	93	1.00	74
1.25	97	1.25	65
1.50	97	1.50	65
1.75	76	1.75	64
2.00	58	2.00	61
2.25	58	2.25	61
2.50	57	2.50	63
2.75	54	2.75	57
3.00	55	3.00	58
3.25	54	3.25	59
3.50	52	3.50	58
3.75	50	3.75	57
4.00	51	4.00	58
4.25	50	4.25	57
4.50	50	4.50	58
4.75	49	4.75	57
5.00	49	5.00	57
5.25	48	5.25	54
5.50	47	5.50	54

6.00	48	6.00	54
6.50	46	6.50	50
7.00	44	7.00	50
7.50	45	7.50	49
8.00	45	8.00	49
8.50	45	8.50	49
9.00	48	9.00	45
9.50	48	9.50	45
10.00	48	10.00	45
11.00	48	11.00	45
12.00	48	12.00	45
13.00	48	13.00	45
14.00	48	14.00	45



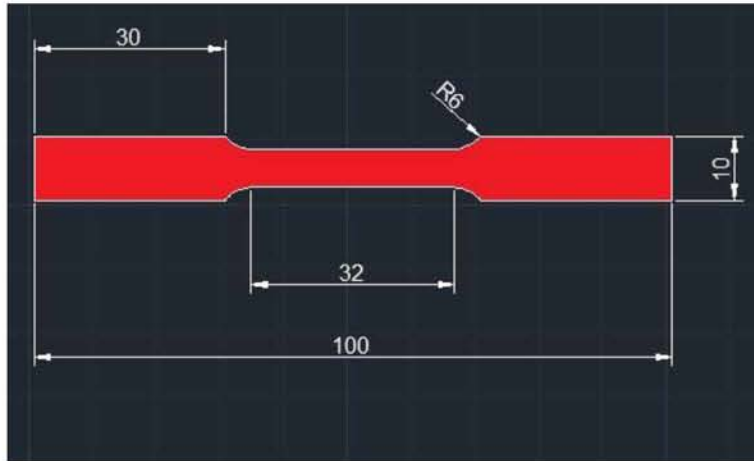
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα μικροσκληρομερήσεων δοκιμίου 2

Όπως και στο δοκίμιο 1, έτσι και στο δοκίμιο 2 (Διάγραμμα 2) οι τιμές των μικροσκληρομετρήσεων έχουν την ίδια συμπεριφορά με το δοκίμιο 1. Ομοίως με το προηγούμενο δοκίμιο, η αλλαγή του μεγέθους των κόκκων πηγαίνοντας από το BM στο NZ έχει ως αποτέλεσμα τις μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας.

4.1.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Για κάθε ένα από τα δοκίμια κατασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού ώστε να μελετηθούν περαιτέρω οι ιδιότητες του τελικού συγκολλημένου υλικού.

Η διατομή των δοκιμίων subsized διακρίνεται παρακάτω (Εικ. 56) :



Εικόνα 56: Σχέδιο διατομής δοκιμίων subsize για εφελκυσμό



Εικόνα 57: Δοκίμια εφελκυσμού Al

Πίνακας 30: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Al 2024

Al 2024	
Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2
182(MPa)	178(MPa)
UTS(2024-0): 185 (MPa)	

Το όριο θραύσης του υλικού είναι 185 MPa και παρατηρώντας τις δύο τιμές των δοκιμίων 1 και 2 με 182 και 178 MPa αντίστοιχα βλέπουμε ότι η συγκόλληση αγγίζει την τιμή του μητρικού υλικού του Al 2024. Αυτό είναι μια ακόμα ένδειξη για μία συγκόλληση με καλές τελικές μηχανικές ιδιότητες.

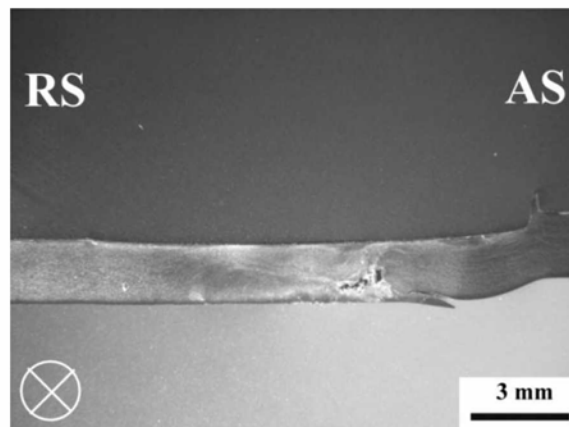
Αν και τα δύο υλικά είναι πολύ κοντά και σε μηχανικές ιδιότητες καθώς και μεταλλογραφικά, οι συνθήκες του δοκιμίου 1 θεωρούνται πιο κατάλληλες καθώς δίνουν ένα πιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα στην περιοχή της ανάδευσης και δεν παραμορφώνουν το υλικό ως προς το πάχος της διατομής.

4.2 Mg AZ31 με Mg AZ31

4.2.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο

Δοκίμιο 1:

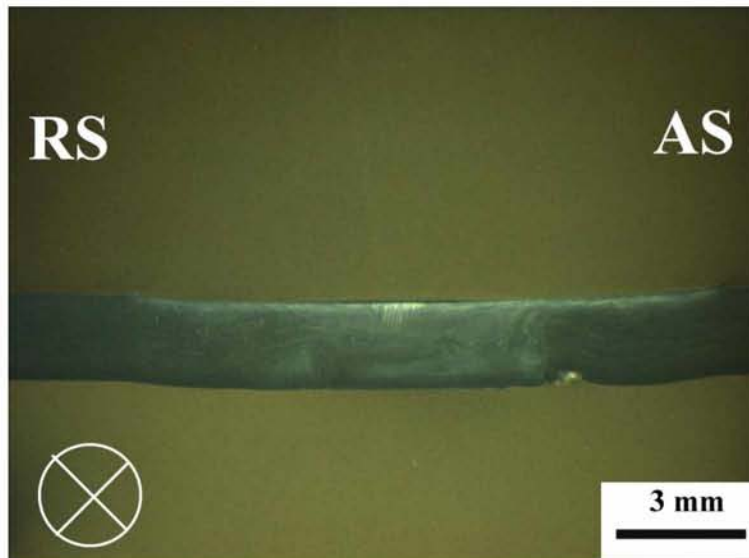
Η πρώτη συγκόλληση στο δοκίμιο του Mg φαίνεται παρακάτω (Εικ. 58). Εκ πρώτης όψεως, το δοκίμιο δεν φαινόταν να παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα, με μία όμως πιο προσεκτική ματιά στο στερεοσκόπιο διακρίνεται ένα κομμάτι της συγκόλλησης το οποίο περιέχει πόρους και οφείλεται σε μη πλήρη διείσδυση στο συγκεκριμένο σημείο καθώς και ελλιπές κάθετο φορτίο. Αναλυτικότερα θα φανεί το πρόβλημα στον μικροσκοπικό έλεγχο.



Εικόνα 58: Μακροδομή συγκόλλησης-1 (6.5x)

Δοκίμιο 2:

Αντιθέτως με τη συγκόλληση Νο 1, η συγκόλληση Νο 2 (Εικ. 59) δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα όπως πόρους ή ατελή συγκόλληση και οι συνθήκες είναι σίγουρα πιο βέλτιστες σε σύγκριση με τη συγκόλληση 1. Όπως και στα υπόλοιπα δοκίμια διακρίνεται ξεκάθαρα η περιοχή της ανάδευσης που δημιουργείται από το εργαλείο.

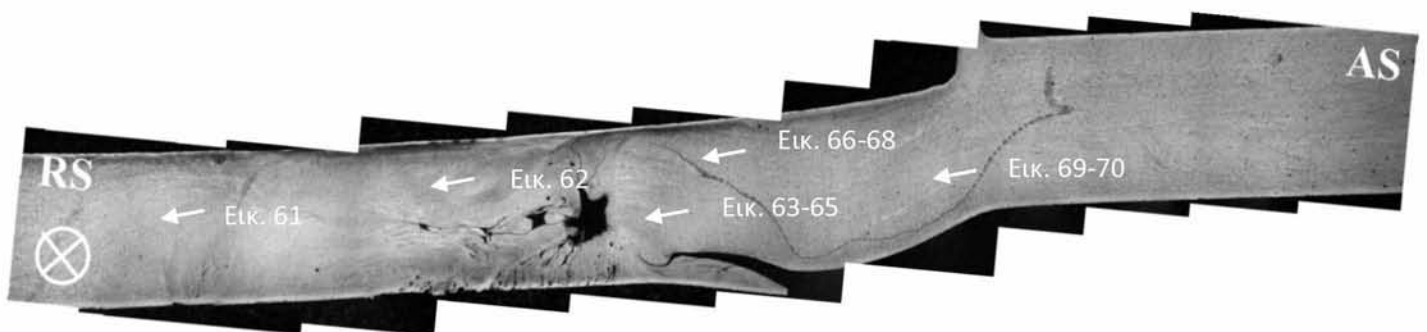


Εικόνα 59: Μακροδομή συγκόλλησης-1 Al (6.5x)

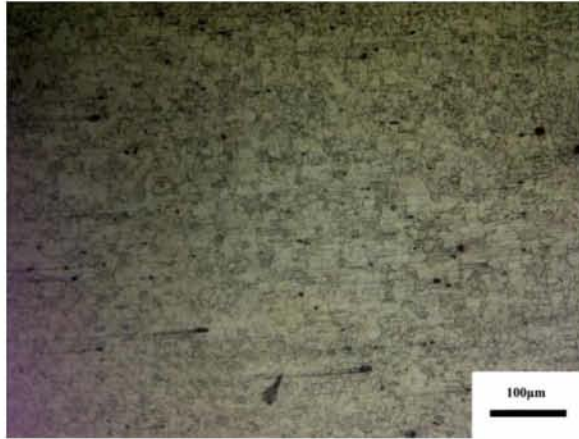
4.2.2 Έλεγχος μικροδομής

Αντίστοιχα με πριν, και στις συγκολλήσεις του Mg πρώτα παρουσιάζονται οι πανοραμικές φωτογραφίες (Εικ. 60, Εικ. 71) από το μικροσκόπιο και ύστερα ακολουθεί ο πιο ενδελεχής αναλυτικός έλεγχος και σχολιασμός.

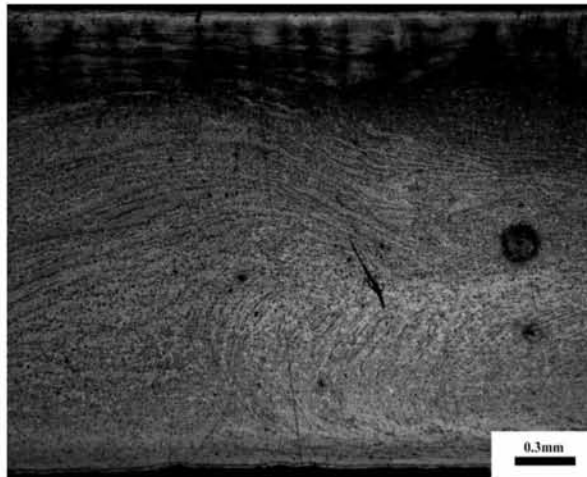
Δοκίμιο 1:



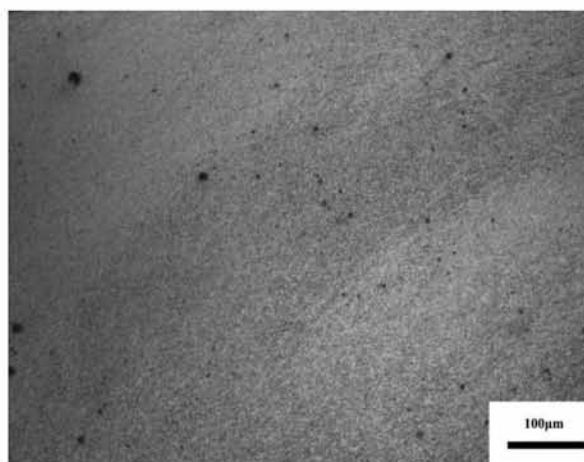
Εικόνα 60: Μακροδομή συγκόλλησης-1



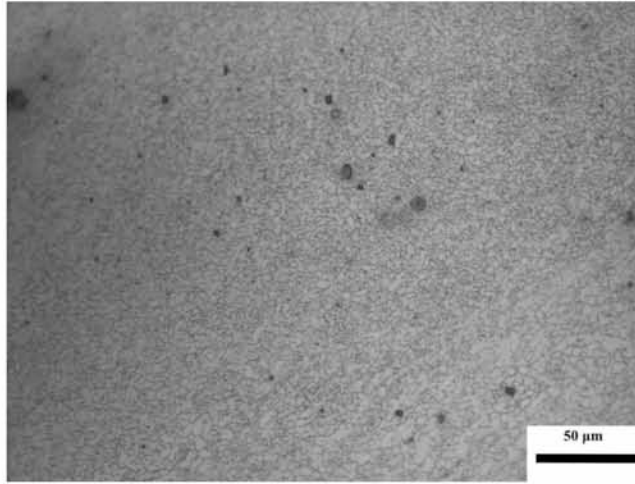
Εικόνα 61: Base metal (200x)



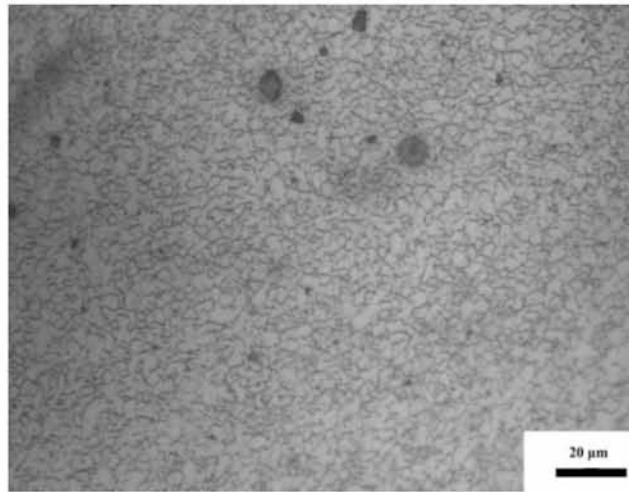
Εικόνα 62: Ζώνη έντονης διάβρωσης (50x)



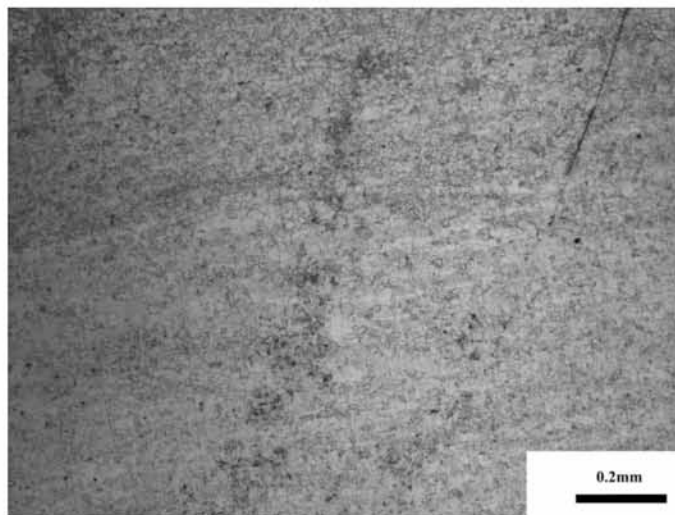
Εικόνα 63: NZ (200x)



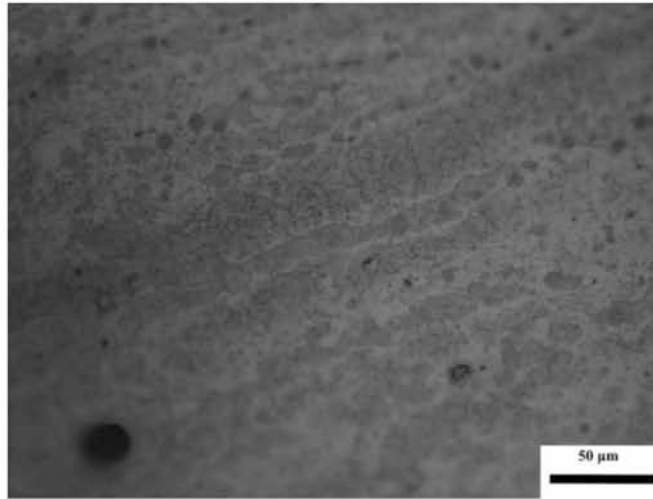
Εικόνα 64: NZ (500x)



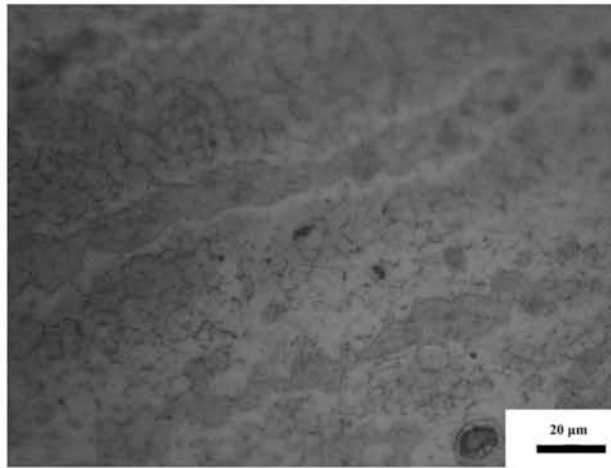
Εικόνα 65: NZ (1000x)



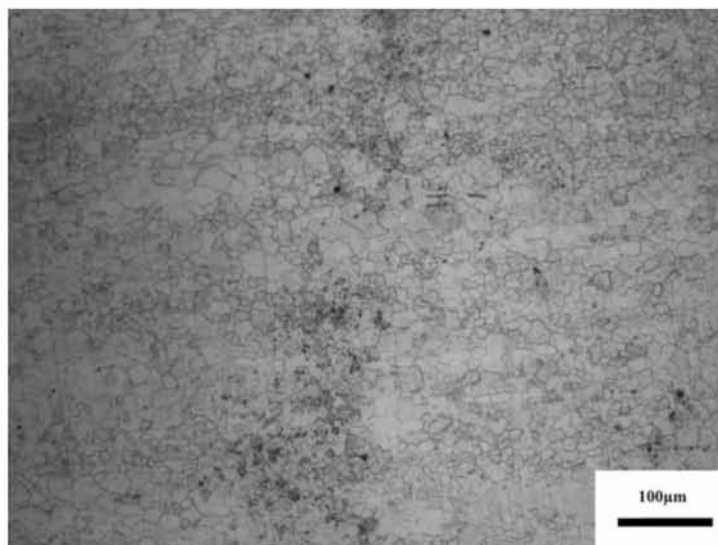
Εικόνα 66: TMAZ (100x)



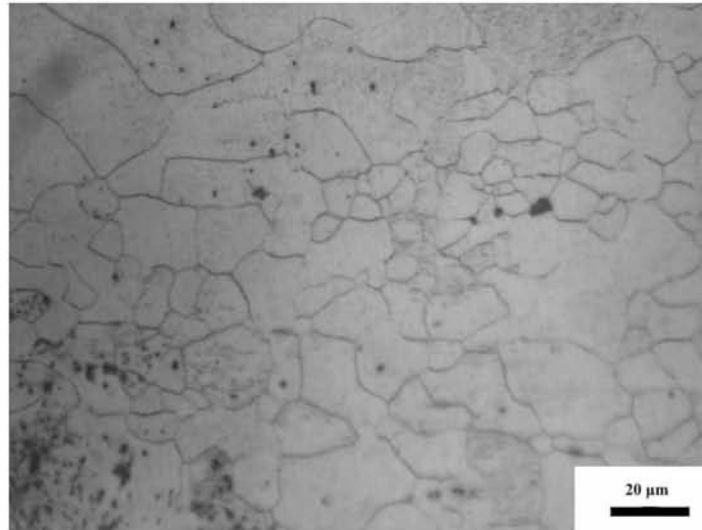
Εικόνα 67: TMAZ (500x)



Εικόνα 68: TMAZ (1000x)



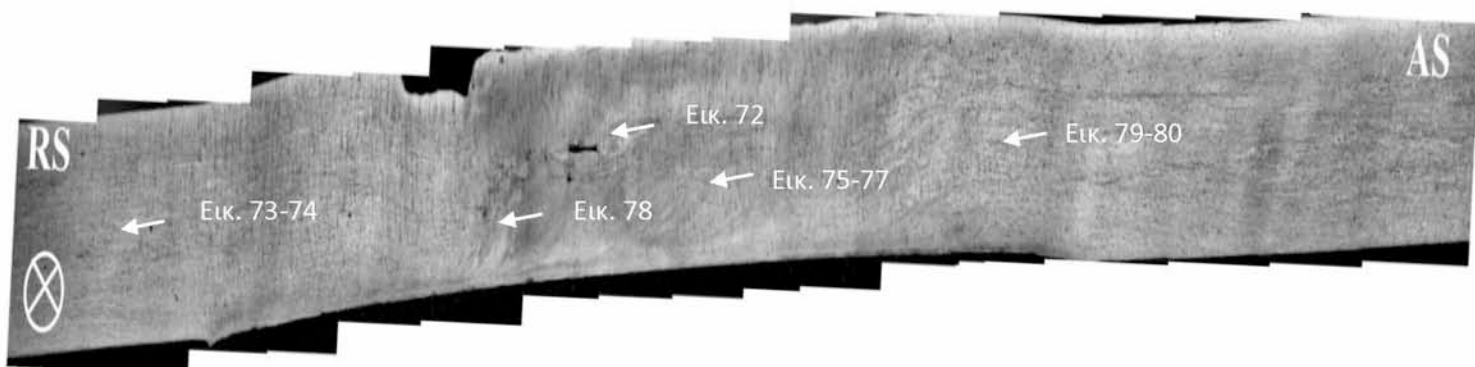
Εικόνα 69: HAZ (200x)



Εικόνα 70: HAZ (1000x)

Αρχικά παρατηρούμε στο δοκίμιο 1 τους κόκκους του βασικού μετάλλου (Εικ. 61). Μέσα στην περιοχή του κέντρου της συγκόλλησης (Εικ. 62) παρατηρείται η έντονη στροφή του υλικού λόγω της περιστροφής του εργαλείου. Έπειτα παρατηρώντας το NZ του υλικού (Εικ. 63-65) φαίνεται η μείωση στο μέγεθος των κόκκων λόγω της δυναμικής ανακρυστάλλωσης που έλαβε χώρα κατά την συγκόλληση. Ενώ η περιοχή TMAZ μένει ανεπηρέαστη (Εικ. 66-68). Και τέλος η Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (Εικ. 69-70) όπου το υλικό επηρεάζεται μόνο θερμικά χωρίς να έχει υποστεί παραμόρφωση ή αποκρυστάλλωση.

Δοκίμιο 2:



Εικόνα 71: Μακροδομή συγκόλλησης-2



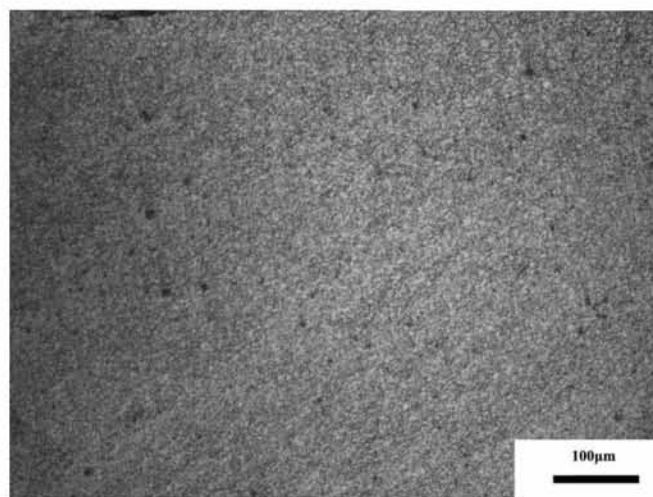
Εικόνα 72: Πορώδες στο NZ της συγκόλλησης (50x)



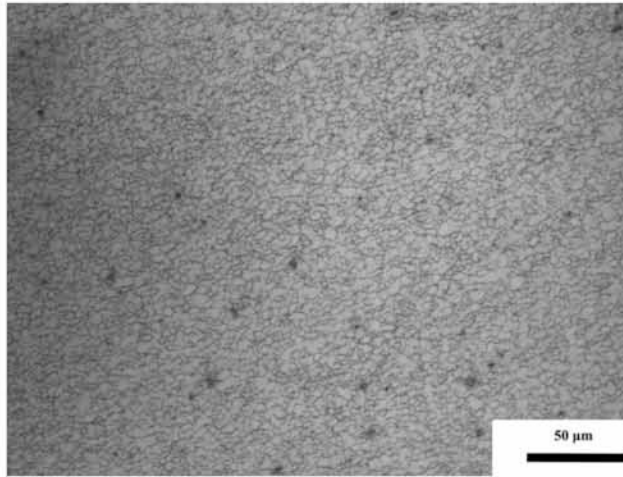
Εικόνα 73: Base metal (500x)



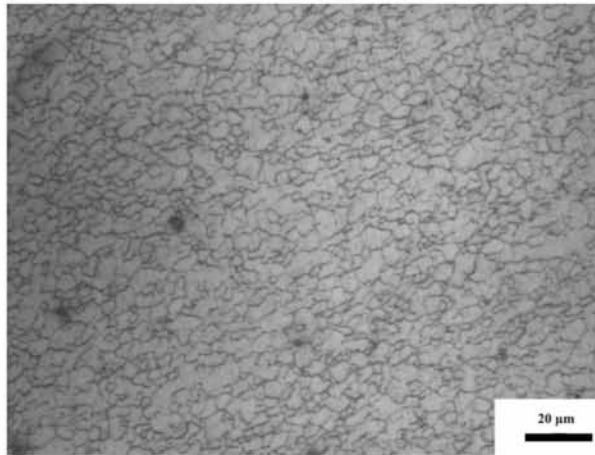
Εικόνα 74: Base metal (1000x)



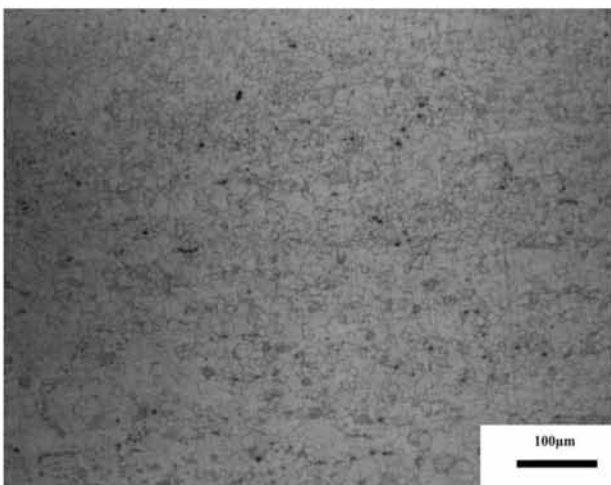
Εικόνα 75: NZ (200x)



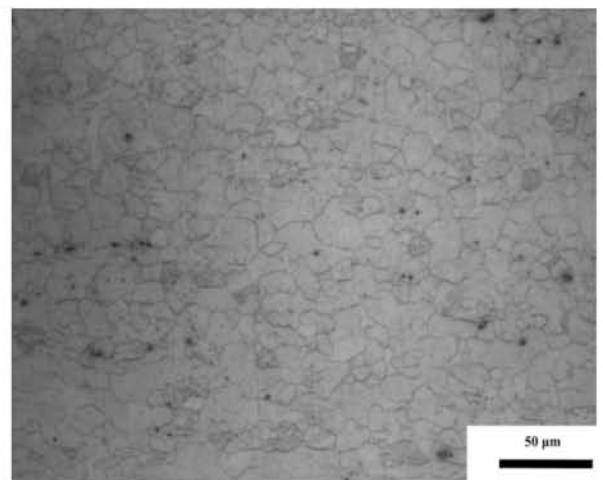
Εικόνα 76: NZ (500x)



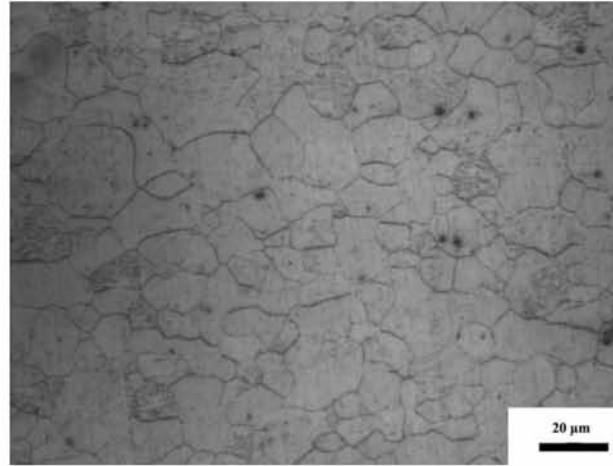
Εικόνα 77: NZ (1000x)



Εικόνα 78: TMAZ (200x)



Εικόνα 79: HAZ (500x)



Εικόνα 80: (HAZ 1000x)

Όπως και στο δοκίμιο 1, έτσι και εδώ στο δοκίμιο 2 μελετάμε πρώτα την μακροδομή (Εικ 71). Στο κέντρο της συγκόλλησης και προς την retreating περιοχή υπάρχει ένας πόρος. Πιο αναλυτικά εμφανίζεται σε φωτογραφία του μικροσκοπίου (Εικ 72). Ο πόρος αυτός οφείλεται σε ανεπαρκές κάθετο φορτίο και σίγουρα μπορεί να επηρεάσει τοπικά τις μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης. Το βασικό μέταλλο φαίνεται στις (Εικ. 73-74) . Στο NZ (Εικ. 75-77) εμφανίζεται το μειωμένο μέγεθος των κόκκων και αντίστοιχα εμφανίζονται οι περιοχές TMAZ (Εικ. 78) και HAZ (Εικ. 79-80).

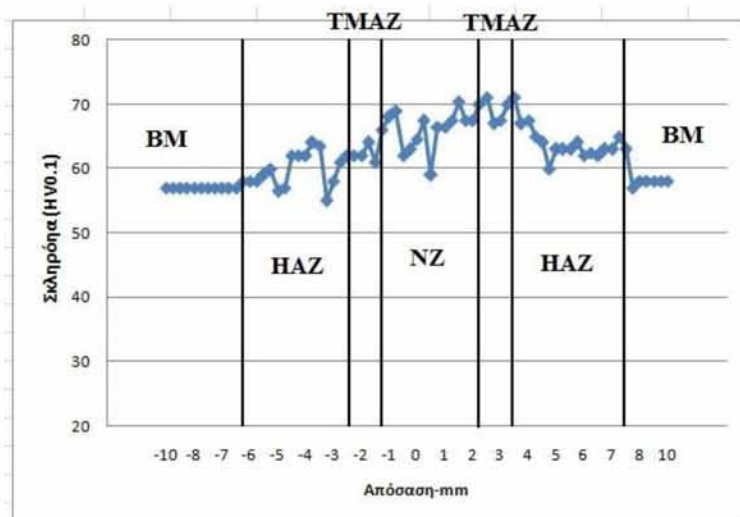
4.2.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Δοκίμιο 1:

Πίνακας 31: Μικροσκληρομετρήσεις Mg δοκίμιο 1

Απόσταση από το κέντρο προς retreating σε mm	HV0.1	Απόσταση από το κέντρο προς advancing σε mm	HV0.1
0.00	63	0.00	64.5
0.25	62	0.25	67.4
0.50	69	0.50	68.8
0.75	68	0.75	66.4
1.00	66	1.00	66.4
1.25	61	1.25	67.5
1.50	64	1.50	70.2
1.75	62	1.75	67.5

2.00	62	2.00	67.5
2.25	62	2.25	70
2.50	62	2.50	71
2.75	61	2.75	67
3.00	58	3.00	67.5
3.25	55	3.25	70
3.50	63.5	3.50	71
3.75	64	3.75	67
4.00	62	4.00	67.5
4.25	62	4.25	65
4.50	62	4.50	64
4.75	57	4.75	60
5.00	56.5	5.00	63
5.25	60	5.25	63
5.50	59	5.50	63
6.00	59	6.00	64
6.50	58	6.50	62
7.00	57.5	7.00	62.5
7.50	57.5	7.50	62
8.00	57	8.00	63
8.50	57	8.50	63
9.00	57	9.00	65
9.50	56	9.50	63
10.00	57	10.00	57
11.00	57	11.00	58
12.00	57.5	12.00	58
13.00	57	13.00	57
14.00	57	14.00	57



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου 1

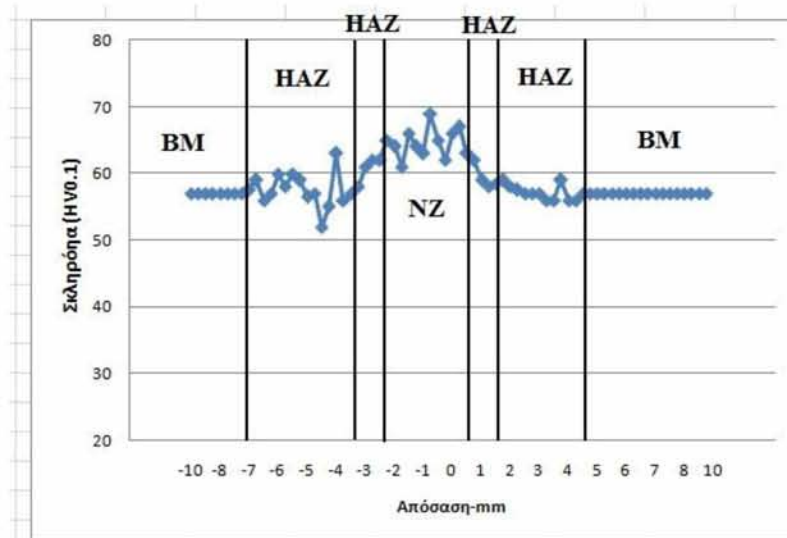
Στο διάγραμμα 3 εμφανίζονται οι τιμές των μικροσκληρομετρήσεων του δοκιμίου 1. Όπως ήταν αναμενόμενο, στο κέντρο λόγω της λεπτόκοκκης διατομής, έχουμε μεγαλύτερες τιμές μικροσκληρότητας. Πηγαίνοντας δεξιά και αριστερά προς την advancing και retreating περιοχή αντίστοιχα οι τιμές πέφτουν όπως και ήταν αναμενόμενο αφού το υλικό μένει ανεπηρέαστο. Στην περιοχή της ανάδευσης η λεπτόκοκκη διατομή είναι αυτή που επιφέρει μεγάλες τιμές μικροσκληρομετρήσεων στο NZ. Οι χαμηλά ασυνήθιστες τιμές στο κέντρο της συγκόλλησης οφείλονται σε πόρους που εμφανίζουν τα δοκίμια σε μερικά σημεία.

Δοκίμιο 2:

Πίνακας 32: Μικροσκληρομετρήσεις Mg δοκίμιο 2

Απόσταση από το κέντρο προς retreating σε mm	HV0.1	Απόσταση από το κέντρο προς advancing σε mm	HV0.1
0.00	62	0.00	66
0.25	65	0.25	67
0.50	69	0.50	63
0.75	63	0.75	62
1.00	64	1.00	59
1.25	66	1.25	58
1.50	61	1.50	58.5
1.75	64	1.75	59
2.00	65	2.00	58
2.25	62	2.25	57.5
2.50	62	2.50	57
2.75	61	2.75	57
3.00	58	3.00	57
3.25	57	3.25	56
3.50	56	3.50	56
3.75	63	3.75	59
4.00	55	4.00	56
4.25	52	4.25	56
4.50	57	4.50	57
4.75	56.5	4.75	57
5.00	59	5.00	57
5.25	60	5.25	57
5.50	58	5.50	57
6.00	60	6.00	57
6.50	57	6.50	57
7.00	56	7.00	57
7.50	59	7.50	57

8.00	57.5	8.00	57
8.50	57.5	8.50	57
9.00	57	9.00	57
9.50	57	9.50	57
10.00	57	10.00	57
11.00	57	11.00	57
12.00	57	12.00	57
13.00	57	13.00	57
14.00	57	14.00	57



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου 2

Οι τιμές της μικροσκληρότητας είναι αντίστοιχες με αυτές του προηγούμενου δοκιμίου.

4.2.4 Δοκιμές εφελκυσμού



Εικόνα 81: Δοκίμια subsize Mg



Εικόνα 82: Δοκίμια εφελκυσμού μετά τη θραύση

Πίνακας 33: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Mg AZ31

Mg AZ31	
Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2
246 (MPa)	212 (MPa)
UTS υλικού 273 (MPa)	

Όπως στα δοκίμια του Al, έτσι και στα δοκίμια του Mg κατασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού subsized (Εικ. 82). Οι δυο τιμές του ορίου θραύσης (UTS) είναι παραπλήσιες με αυτές του μητρικού υλικού (273 MPa) με εξαίρεση το δοκίμιο No 2 το οποίο παρουσιάζει μειωμένη αντοχή και αυτό οφείλεται στην παρουσία των εσωτερικών πόρων στην περιοχή της συγκόλλησης.

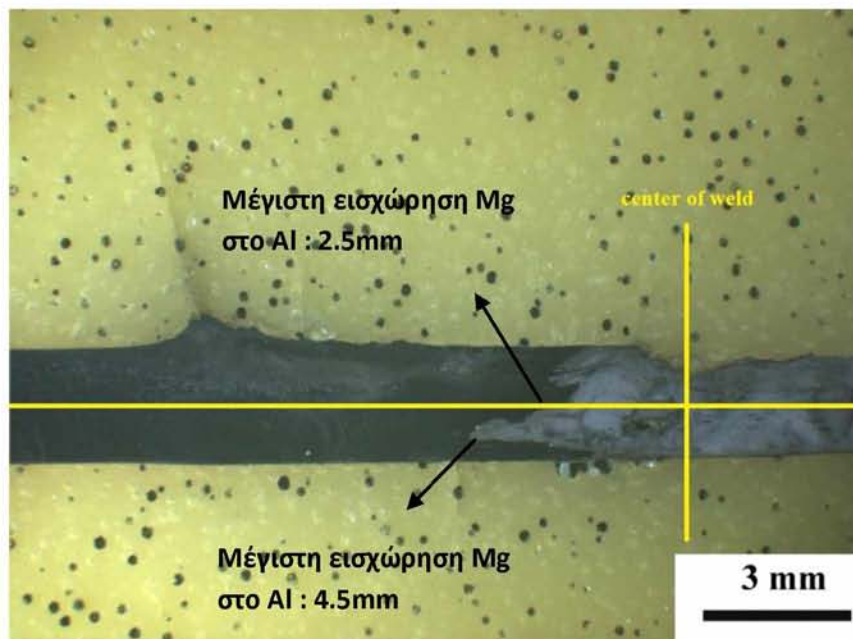
Συμπεραίνουμε με βάση το όριο θραύσης του υλικού ότι οι συνθήκες συγκόλλησης του δοκιμίου 1 είναι σαφώς καλύτερες από του 2.

4.3 Συγκολλήσεις συμβολής Al 2024 :Mg AZ31 (Mg AZ31 στην advancing πλευρά)

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν οι διμεταλλικές συγκολλήσεις οι οποίες έχουν μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον. Όπως ήδη αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η βιβλιογραφία προτείνει την χρήση του Mg στην retreating πλευρά. Για πειραματικούς λόγους η πρώτη διμεταλλική συγκόλληση αφορά συγκόλληση όπου το Mg τοποθετήθηκε στην advancing πλευρά ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του και σε αυτή τη θέση.

4.3.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο

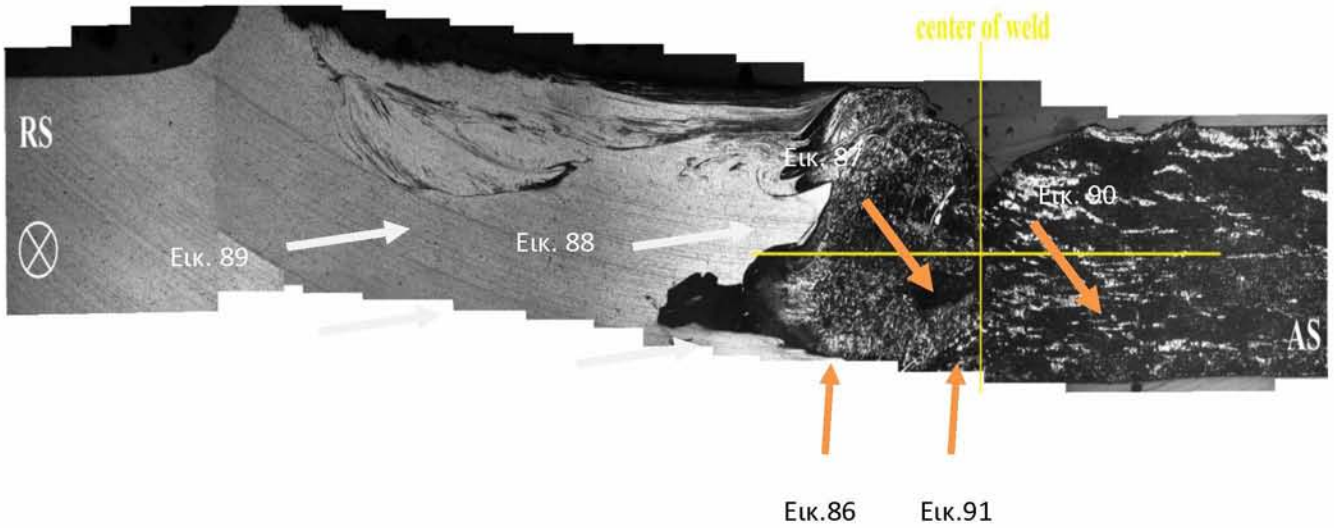
Όπως και στα υπόλοιπα δοκίμια, έτσι και στις διμεταλλικές συγκολλήσεις συμβολής, πρώτα ξεκινά ο έλεγχος στο στερεοσκόπιο. Στην φωτογραφία που ακολουθεί (Εικ. 83) δίνεται η μακρογραφία της συγκόλλησης. Είναι εμφανής η εισχώρηση του ενός υλικού μέσα στο άλλο.



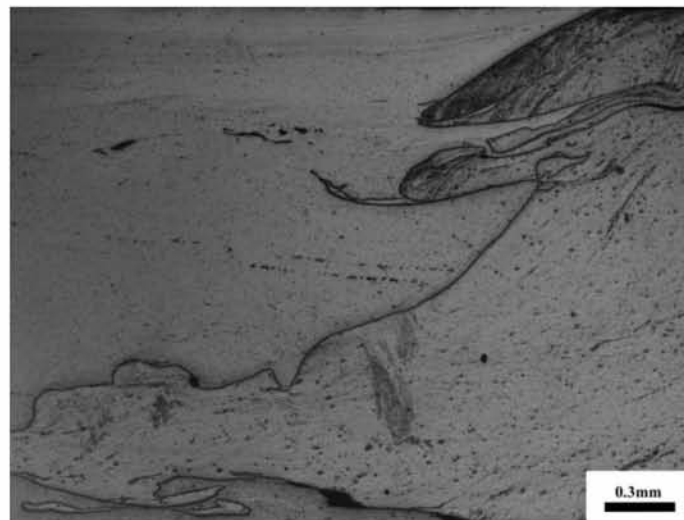
Εικόνα 83: Μακροδομή συγκόλλησης-5 (6.5x)

4.3.2 Έλεγχος μικροδομής

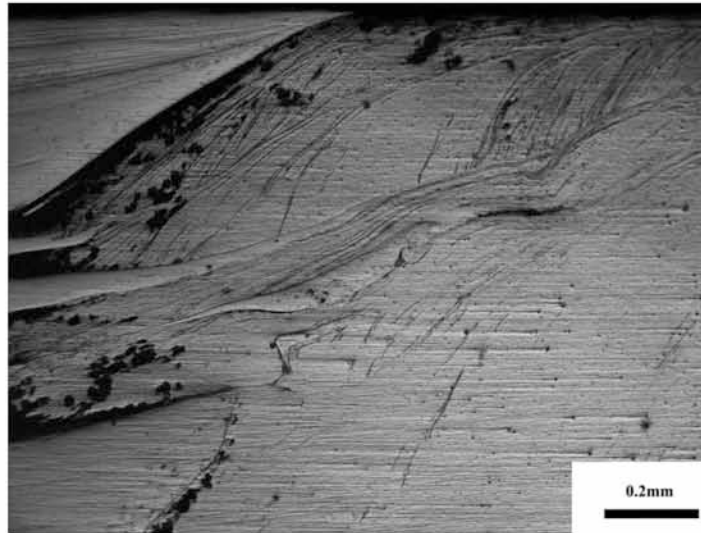
Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές, έτσι και εδώ, παρουσιάζεται η μακροδομή (Εικ. 85) κατά μήκος της τομής της συγκόλλησης.



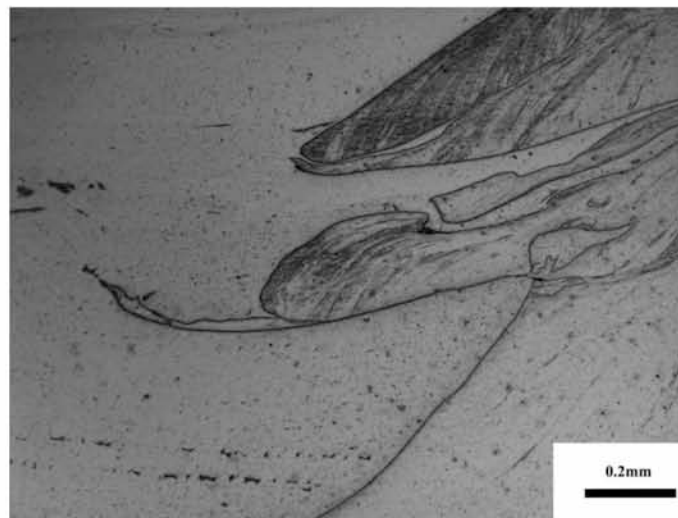
Εικόνα 85: Μακροδομή διμεταλλικής συγκόλλησης-5 (6.5x)



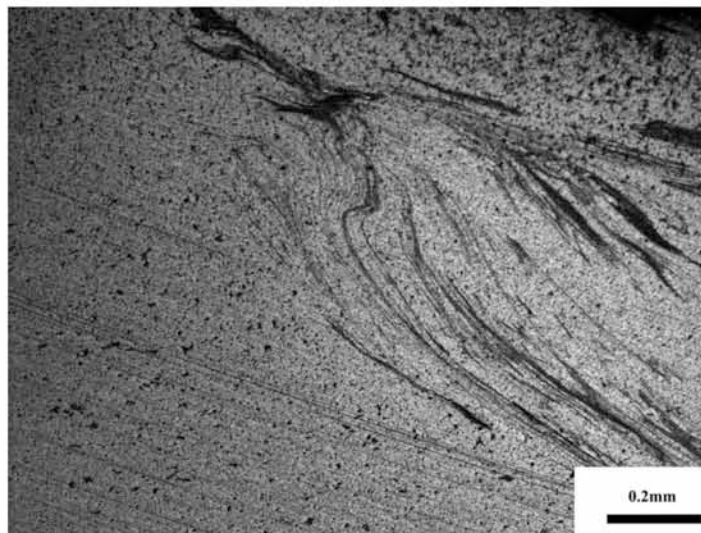
Εικόνα 86: NZ (50x)



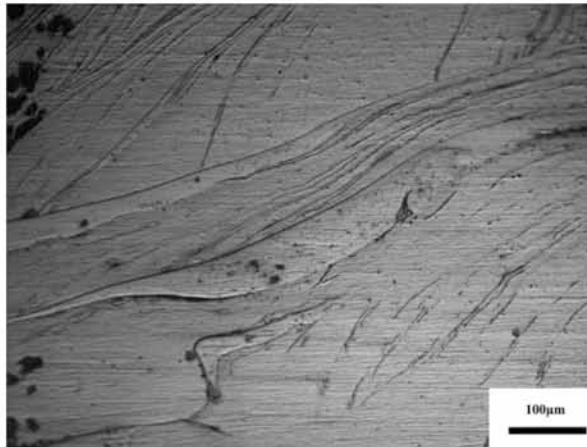
Εικόνα 87: NZ (100x)



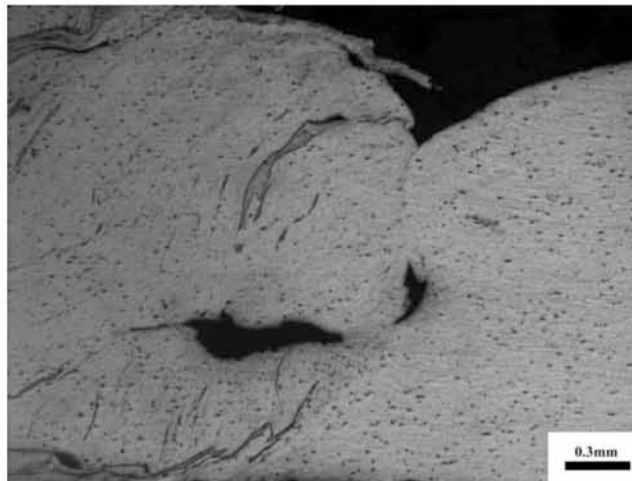
Εικόνα 88: NZ (100x)



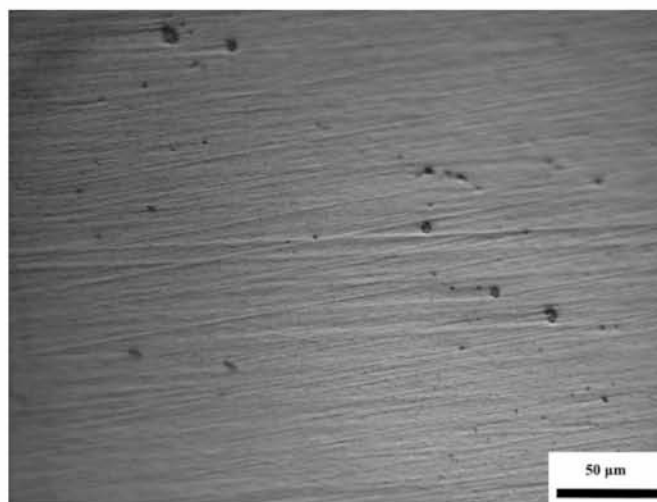
Εικόνα 89: Retreating side (100x)



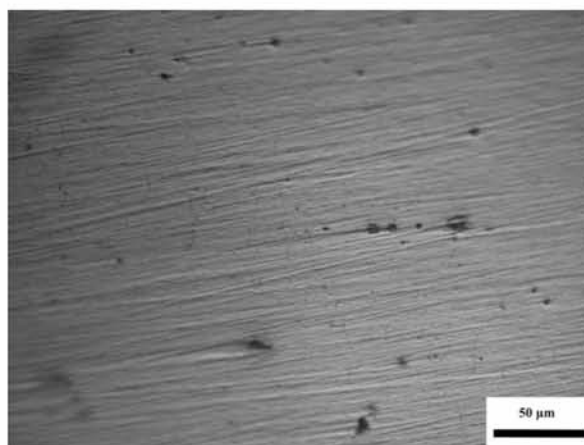
Εικόνα 90: Advancing side (200x)



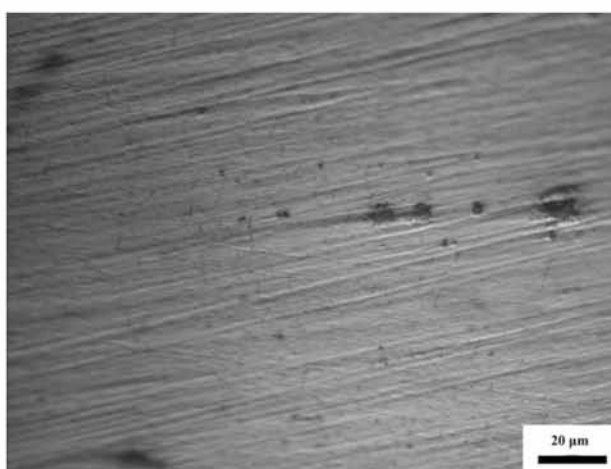
Εικόνα 91: Σφάλμα στο κέντρο (50x)



Εικόνα 92: TMAZ (500x)



Εικόνα 93: HAZ (500x)



Εικόνα 94: TMAZ (1000x)

Όπως είναι ήδη γνωστό, τεχνικά είναι αρκετά δύσκολη η συγκόλληση σε δύο ανόμοια κράματα, καθώς και η περαιτέρω μελέτη στο τελικό αποτέλεσμα. Η FSW είναι μία από τις μεθόδους που επιτρέπουν τη συγκόλληση δυο διαφορετικών μετάλλων. Από την μακροφωτογραφία του μικροσκοπίου (Εικ. 85) διακρίνεται η ένωση και η εισχώρηση του ενός υλικού μέσα στο άλλο. Το Mg βρίσκεται στην advancing πλευρά και βλέπουμε ότι η retreating πλευρά του Al υποχωρεί από την εισχώρηση του Mg. Στο NZ (Εικ. 86-88) διακρίνεται η έντονη ανάδευση και η εισχώρηση μεγάλων και μικρών κομματιών Mg μέσα στο Al (RS). Μερικά τμήματα του Mg έχουν φτάσει αρκετά βαθιά, ως 4.5 mm και έχουν αναμειχθεί πλήρως με το Al κυρίως στην κορυφή του (Εικ. 89) στην οποία παρουσιάζεται και η έντονη στροφή του υλικού στην TMAZ. Επιπρόσθετα στο κέντρο της συγκόλλησης (Εικ. 91) υπάρχουν περιοχές οι οποίες έχουν κενό και δεν έχουν συγκολληθεί. Αυτό είναι ένα από τα στοιχεία που μας δείχνουν την δυσκολία στην ένωση δυο διαφορετικών υλικών. Θα μπορούσε το κενό αυτό να οφείλεται σε μικρή τιμή του κάθετου φορτίου, όμως η έντονη αποκόλληση του υλικού στην κορυφή του κέντρο της συγκόλλησης δείχνει το αντίθετο, δηλαδή μεγάλη κάθετη δύναμη.

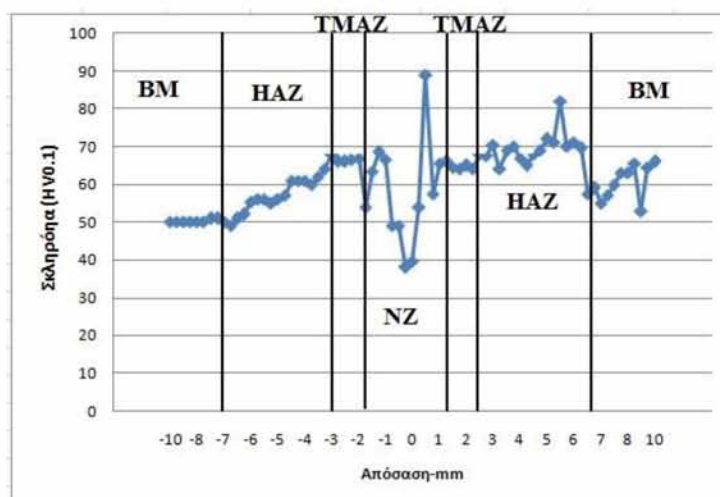
4.3.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Αντίστοιχες μετρήσεις μικροσκληρότητας, όπως και στα άλλα δοκίμια, έγιναν και στις διμεταλλικές συγκολλήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων ακολουθούν παρακάτω:

Πίνακας 34: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Mg advancing)

Απόσταση από το κέντρο προς retreating (Al) σε mm	HV0.1	Απόσταση από το κέντρο προς advancing (Mg) σε mm	HV0.1
0.00	38	0.00	39.5
0.25	49	0.25	54
0.50	49	0.50	89
0.75	66.5	0.75	57.5
1.00	68.5	1.00	65.5
1.25	63.5	1.25	66
1.50	64	1.50	64.5
1.75	67	1.75	64
2.00	66.5	2.00	65
2.25	66	2.25	64
2.50	66	2.50	68
2.75	68	2.75	67.5
3.00	64	3.00	70.5
3.25	62	3.25	64
3.50	60	3.50	69
3.75	61	3.75	70
4.00	61	4.00	67
4.25	61	4.25	65
4.50	67.5	4.50	68
4.75	57	4.75	69
5.00	56	5.00	72
5.25	55	5.25	71
5.50	55	5.50	82
5.75	56	5.75	70
6.00	56	6.00	71
6.25	56	6.25	69.5
6.50	55.4	6.50	57.5
6.75	56	6.75	59
7.00	54.5	7.00	55
7.25	54	7.25	57
7.50	55	7.50	60
7.75	55	7.75	63
8.00	53	8.00	63

8.50	52.5	8.50	65.5
9.00	52	9.00	53
9.50	51	9.50	64.5
10.00	49	10.00	66
10.50	50	10.50	67
11.00	51	11.00	59
11.50	50	11.50	59
12.00	50	12.00	60
12.50	49	12.50	60.5
13.00	49	13.00	60
13.50	49	13.50	60
14.00	49	14.00	60



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου Al-Mg (Mg advancing)

Στο διάγραμμα 5 επισυνάπτονται τα αποτελέσματα από τις τιμές των μικροσκληρομετρήσεων. Οι χαμηλές τιμές στο κέντρο οφείλονται στα κενά που υπάρχουν στο κέντρο της συγκολλήσεως ενώ σε μερικά σημεία παρατηρούνται υψηλές τιμές πράγμα που υποδηλώνει την ένωση του Al με το Mg.

4.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού



Εικόνα 95: Συγκράτηση δοκιμίου στη μηχανή εφελκυσμού



Εικόνα 96: Δοκίμιο εφελκυσμού Al- Mg

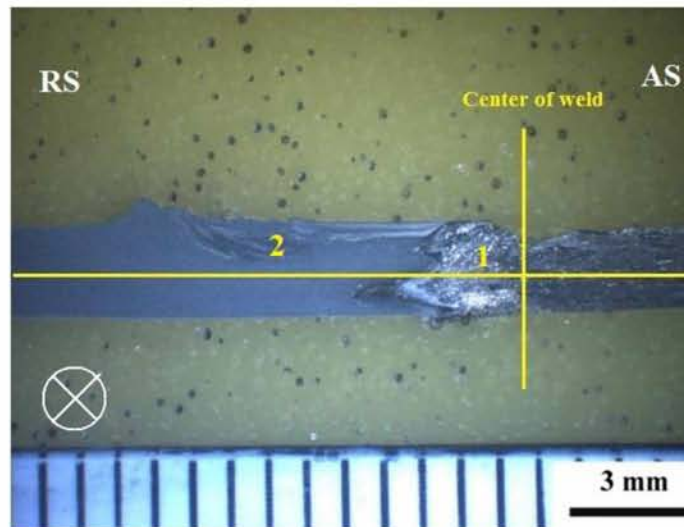
Πίνακας 35: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού σε συγκολλήσεις του Al 2024- Mg AZ31 (Mg advancing)

Al 2024 / Mg AZ31 (Mg advancing)
Δοκίμιο 5
UTS συγκόλλησης 69.5 (MPa)

Όπως ήταν αναμενόμενο, η τιμή του ορίου θραύσης (UTS) είναι αρκετά χαμηλή (69.5MPa) σε σχέση με τα μητρικά υλικά των δυο υλικών. (Mg AZ31- 273MPa, Al 2024 – 185MPa). Τόσο η επιλογή στο να χρησιμοποιηθεί το Mg στην προωθούσα (advancing) πλευρά καθώς και το κενό που υπήρχε στο κέντρο της συγκολλήσεως συνεισφέρουν σε αυτή τη χαμηλή τιμή.

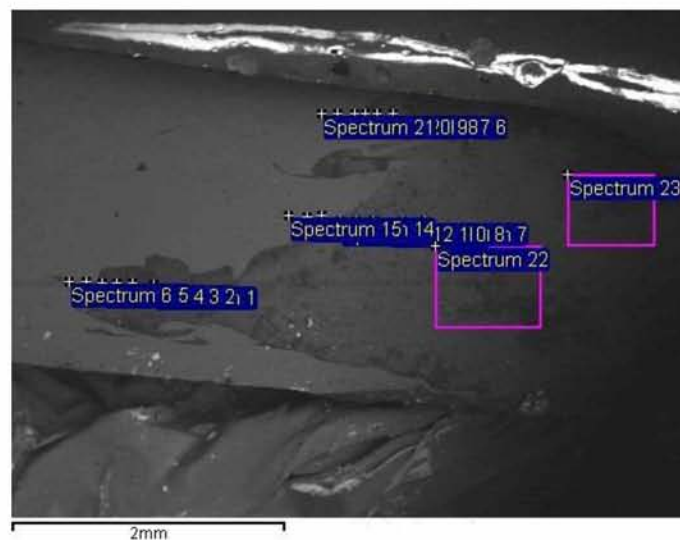
4.3.5 SEM/EDX

Η συγκόλληση μελετήθηκε περαιτέρω με SEM/EDX με στόχο να προσδιοριστούν οι τοπικές χημικές αναλύσεις των περιοχών της διμεταλλικής συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα δίδονται στις Εικ. 98-105.



Εικόνα 97: Μακροδομή συγκόλλησης-5 (6.5x)

Περιοχή 1:



Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Cu	Zn	Total
Spectrum 1	Yes	41.45	52.62	5.20	-	0.81	100.00

Spectrum 2	Yes	48.86	45.86	4.68	0.05	0.55	100.00
Spectrum 3	Yes	44.38	51.35	3.90	--	0.45	100.00
Spectrum 4	Yes	67.08	28.99	3.55	0.00	0.38	100.00
Spectrum 5	Yes	2.79	1.07	92.75	3.47	--	100.00
Spectrum 6	Yes	4.99	10.61	81.91	2.45	0.04	100.00
Spectrum 7	Yes	10.92	86.01	3.12	--	0.10	100.00
Spectrum 8	Yes	13.19	84.48	2.46	-	--	100.00
Spectrum 9	Yes	9.62	85.54	4.64	--	0.26	100.00
Spectrum 10	Yes	15.83	81.28	2.34	0.09	0.46	100.00
Spectrum 11	Yes	25.96	71.50	2.01	0.09	0.44	100.00
Spectrum 12	Yes	50.71	43.52	5.36	--	0.43	100.00
Spectrum 13	Yes	2.94	1.34	91.88	3.67	0.16	100.00
Spectrum 14	Yes	3.58	1.33	92.00	3.36	--	100.00
Spectrum 15	Yes	1.82	0.67	95.56	1.79	0.17	100.00
Spectrum 16	Yes	14.09	59.51	24.59	1.15	0.66	100.00
Spectrum 17	Yes	33.26	15.24	28.76	-7.33	30.07	100.00
Spectrum 18	Yes	17.40	26.45	21.82	3.71	30.63	100.00
Spectrum 19	Yes	27.61	27.48	23.80	1.31	19.80	100.00
Spectrum 20	Yes	5.46	17.36	74.21	2.86	0.10	100.00
Spectrum 21	Yes	4.83	12.33	79.90	2.43	0.51	100.00
Spectrum 22	Yes	23.21	74.20	2.87	-0.64	0.36	100.00
Spectrum 23	Yes	20.75	55.22	23.61	0.19	0.22	100.00

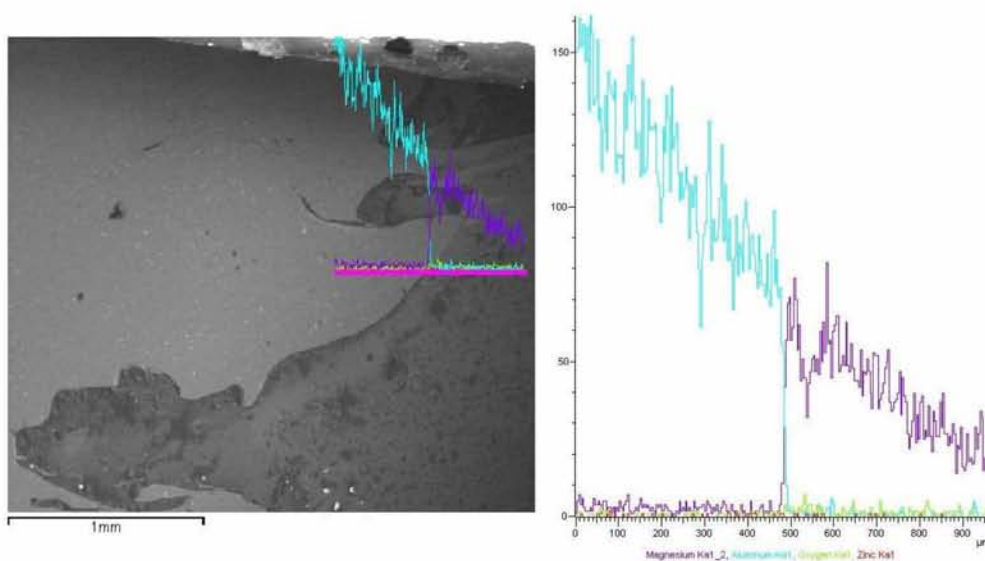
Εικόνα 98: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.97)

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές του πίνακα και κοιτώντας την εικόνα μπορούμε να συμπεράνουμε τα παρακάτω για την συγκόλληση:

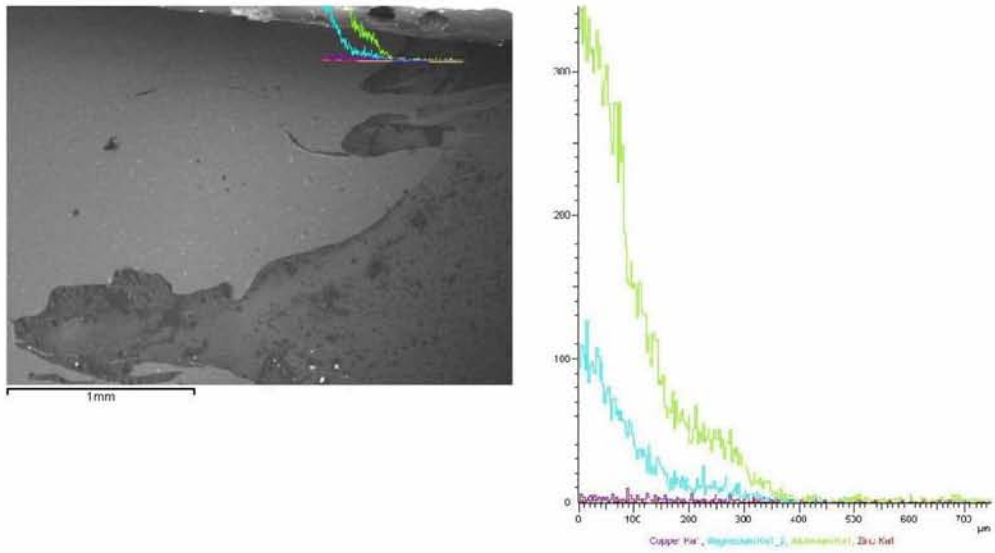
Η περιοχή 23 απέχει 1mm από το κέντρο της συγκόλλησης, είμαστε δηλαδή μέσα στο NZ. Το Mg κυριαρχεί με ποσοστό 55.22% ενώ το Al με 23.61%. Είναι ένα πρώτο αποτέλεσμα και μας επιβεβαιώνει ότι η μεταφορά του Al έχει γίνει ως το κέντρο της συγκόλλησης. Αντίστοιχα, η περιοχή 22 απέχει 3mm από το κέντρο της συγκόλλησης που σημαίνει ότι βρισκόμαστε στην περιοχή TMAZ. Εδώ το ποσοστό του Al είναι μόλις 2.87% ενώ του Mg 74.20%. Σε αυτή την περιοχή βλέπουμε λοιπόν την έντονη εισχώρηση του Mg μέσα στο Al, το οποίο είναι λογικό, αφού το Mg βρίσκεται στην advancing πλευρά. Στις περιοχές 1 έως 4 έντονη είναι και εδώ η παρουσία του Mg που κυμαίνεται από 29%έως 52%, ενώ το Al κυμαίνεται πολύ

χαμηλά από 3.5%έως 5%. Οι περιοχές 1 έως 4 απέχουν 3.5mm από το κέντρο της συγκόλλησης πράγμα που σημαίνει ότι είμαστε μέσα στην περιοχή HAZ. Αν λάβουμε υπόψιν το γεγονός ότι το μέγεθος του pin είναι 5mm το Mg έχει προχωρήσει ακόμα 2 χιλιοστά πιο μέσα προς το Al. Επιπρόσθετα στις περιοχές 7 έως 12 το Mg έχει ποσοστό από 43% ως 86%, ενώ το Al 2% έως 5%. Στις περιοχές 17 έως 19 τα ποσοστά Al και Mg είναι όμοια κοντά στο 20%, ενώ στις περιοχές 14,15,20,21 το ποσοστό του Al είναι μεγάλο και του Mg ελάχιστο. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι το Mg τείνει να εισέρχεται από κάτω προς τα πάνω μέσα στο Al και τα μεγαλύτερα ποσοστά Mg εντοπίζονται μέσα στο Al προς τον πάτο της συγκόλλησης και όχι προς την κορυφή. Αυτό συμβαίνει λόγω της γεωμετρίας του εργαλείου το οποίο φέρει αριστερόστροφο σπείρωμα και τείνει να σηκώνει το υλικό προς τα πάνω.

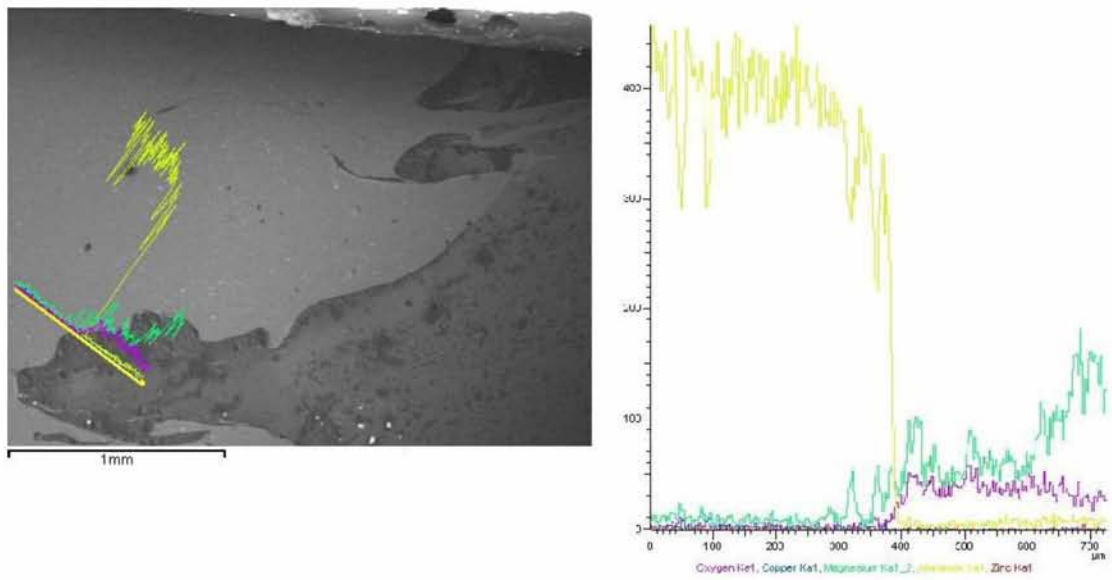
Ακολουθούν αναλύσεις line scan σε επιλεγμένες διεπιφάνειες των δύο υλικών. Οι αναλύσεις δείχνουν την μείωση του Al καθώς πηγαίνουμε από την retreating προς την advancing περιοχή:



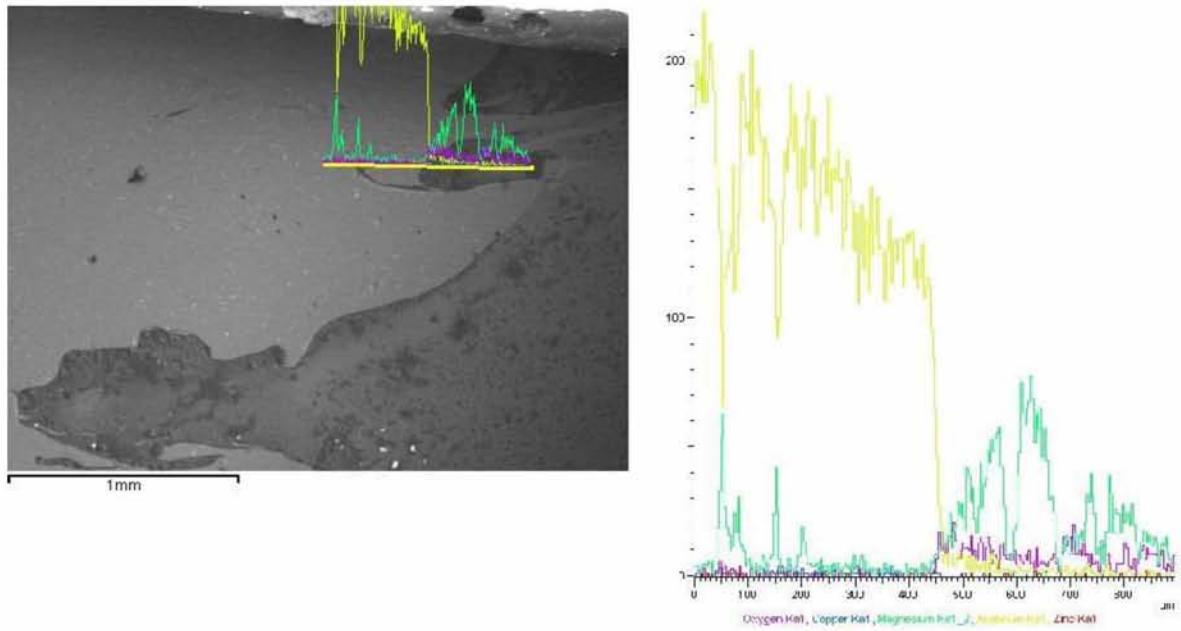
Εικόνα 99: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.



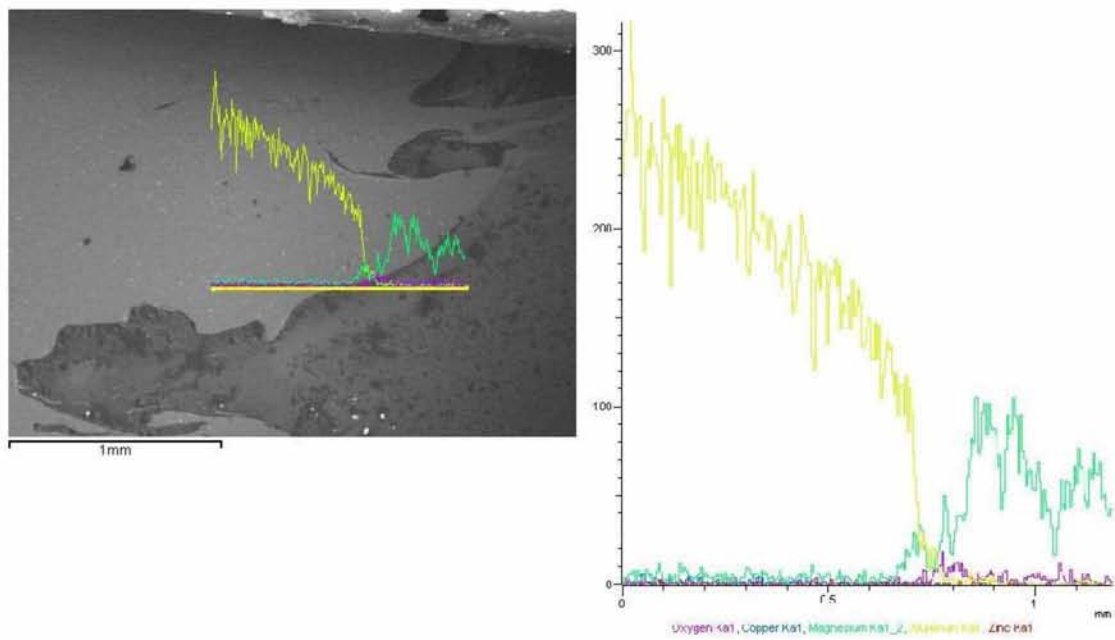
Εικόνα 100: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.



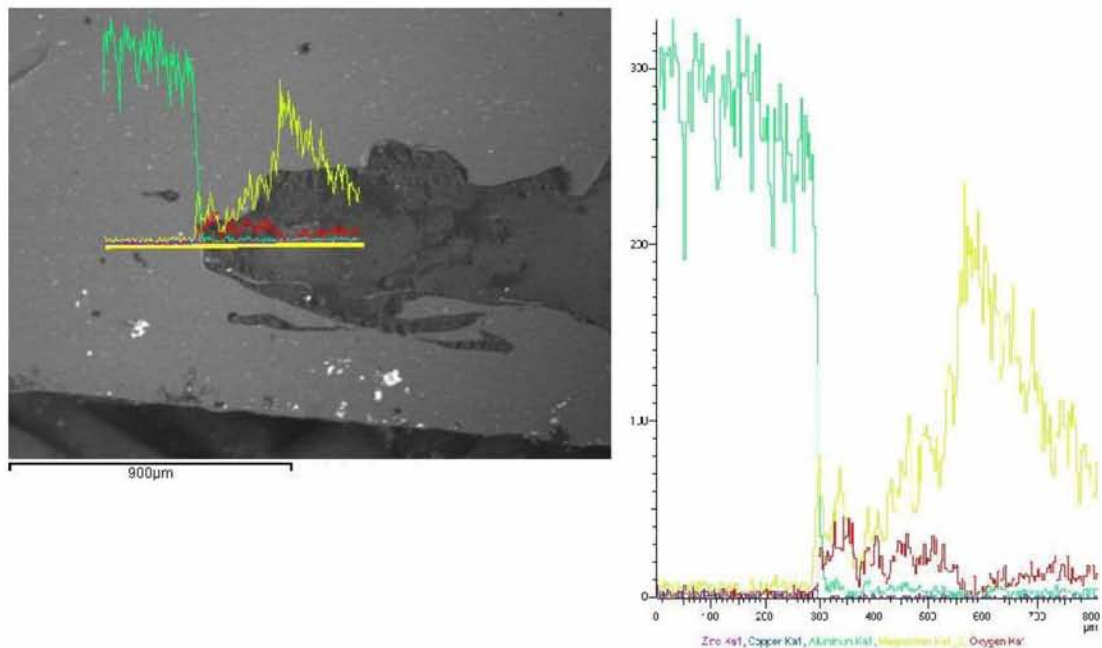
Εικόνα 101: Line scan 3: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.



Εικόνα 102: Line scan 4: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.



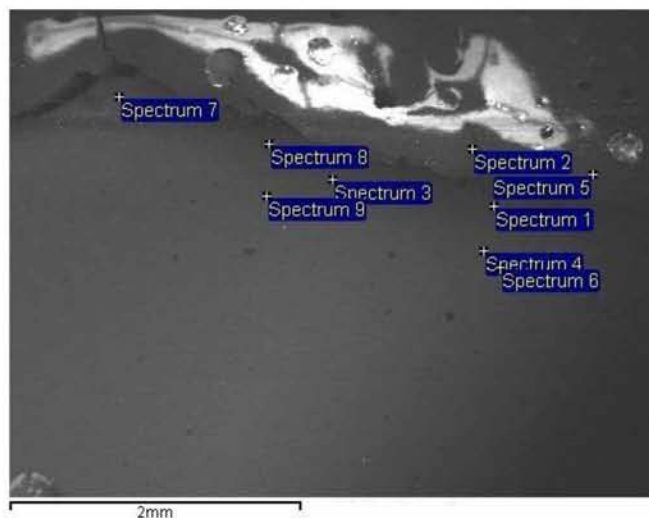
Εικόνα 103: Line scan 5: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.



Εικόνα 104: Line scan 6: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Zn στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το 2024.

Στις παραπάνω φωτογραφίες (Εικ.99-104) βλέπουμε τις κατανομές των στοιχείων στις διάφορες περιοχές. Αρχικά στην πρώτη διεπιφάνεια Mg-Al (Εικ. 99) παρατηρούμε πως δεν υπάρχει εισχώρηση του Al μέσα στο Mg ενώ το Mg έχει εισέρθει σε πολύ μικρό ποσοστό μέσα στο Al. Το ίδιο συμβαίνει και στις Εικ. 102-104. Έπειτα στην Εικ. 100 παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει καθόλου εισχώρηση Al και Mg στην επιφάνεια, ενώ στην Εικ. 101 η εισχώρηση του Mg μέσα στο Al είναι λίγο περισσότερο στην αρχή και μετά πέφτει. Το παραπάνω είναι λογικό αφού στο κάτω μέρος της συγκόλλησης το Mg εισέρχεται περισσότερο μέσα στο Al.

Περιοχή 2:



Spectrum	In stats.	C	O	Mg	Al	Cu	Zn	Total
Spectrum 1	Yes	49.94	40.92	0.94	43.46	-43.21	7.95	100.00
Spectrum 2	Yes	63.45	36.06	-0.04	0.53	0.00	0.00	100.00
Spectrum 3	Yes	33.12	13.20	2.05	12.86	43.86	-5.09	100.00
Spectrum 4	Yes	3.10	4.19	5.65	85.69	2.45	-1.09	100.00
Spectrum 5	Yes	65.59	30.98	0.19	3.24	0.00	0.00	100.00
Spectrum 6	Yes	7.45	4.41	4.89	80.49	2.61	0.15	100.00
Spectrum 7	Yes	26.28	16.13	1.13	12.93	38.59	4.94	100.00
Spectrum 8	Yes	15.91	13.70	1.02	15.43	49.07	4.87	100.00
Spectrum 9	Yes	2.16	7.23	8.04	78.45	3.59	0.53	100.00

Εικόνα 105: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.97)

Στην περιοχή 2, η παρουσία του Mg είναι μικρή αφού είναι σε απόσταση από το κέντρο της συγκόλλησης. Σε όλες τις περιοχές η περιεκτικότητα σε Al είναι υψηλή, ενώ το Mg εμφανίζεται σε πολύ μικρά ποσοστά από 0% έως 8%.

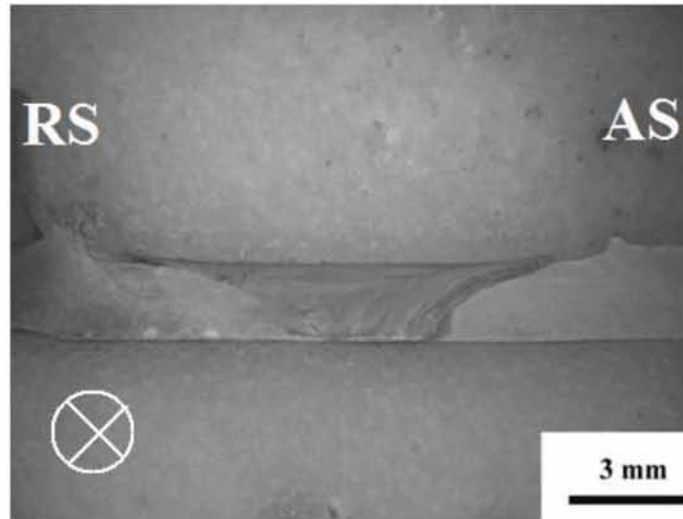
4.4 Al 2024 με Mg AZ31 (Al 2024 στην advancing πλευρά)

Τα επόμενα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την τοποθέτηση του Al στην προωθούσα (advancing) πλευρά. Η ποιότητα των συγκολλήσεων είναι βελτιωμένη σε σχέση με την προηγούμενη ομάδα συγκολλήσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη μελέτη των δύο βέλτιστων συγκολλήσεων:

4.4.1 Έλεγχος στο στερεοσκόπιο

Δοκίμιο 11:

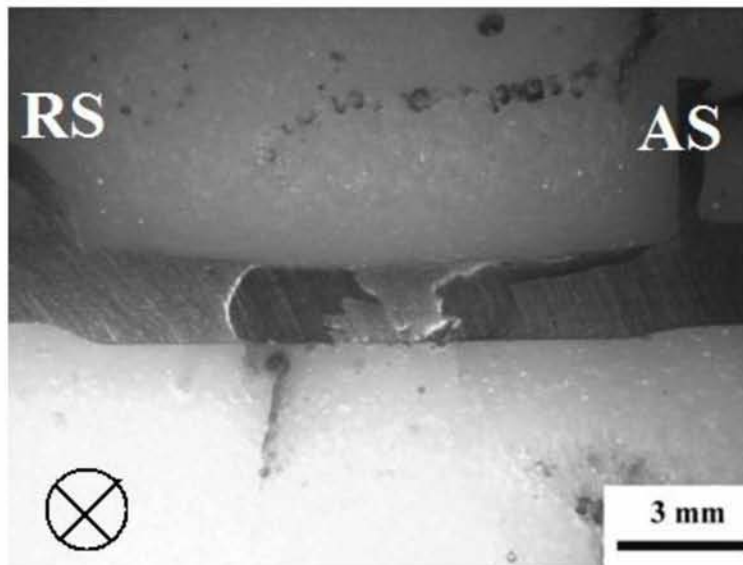
Με βάση τη μακροδομή το δοκίμιο συγκόλλησης 11 (Εικ. 106) δείχνει να έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα σε διμεταλλική συγκόλληση συμβολής Al 2024 και Mg AZ31. Το κέντρο της συγκόλλησης φαίνεται να ευρίσκεται σε πλήρη συνοχή με το υπόλοιπο υλικό αριστερά και δεξιά, δεν υπάρχουν κενά, η συγκόλλησης είναι πλήρους διεύθυνσης και η ποσότητα του αποβλήτου ελάχιστη.



Εικόνα 106: Μακροδομή δοκιμίου-11 (6.5x)

Δοκίμιο 12:

Σε αντίθεση με το δοκίμιο 11, το δοκίμιο 12 (Εικ. 107) παρά το γεγονός ότι επετεύχθη συγκόλληση πλήρους διείσδυσης χωρίς κενά, εμφανίζει αρκετά μεγάλο απόβλητο, ενώ παρατηρείται και μια παραμόρφωση στη ρίζα του υλικού που αποδίδεται στο εξαιρετικά μεγάλο κάθετο φορτίο κατά την διαδικασία της συγκόλλησης.

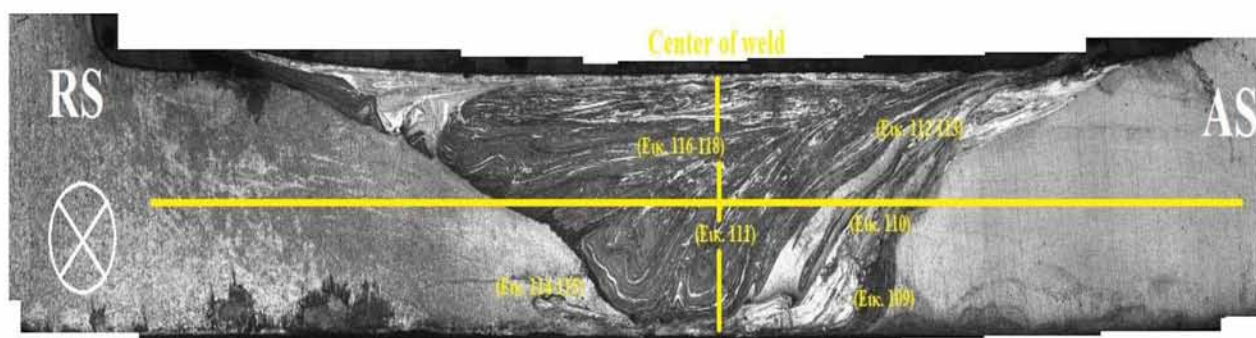


Εικόνα 107: Μακροδομή δοκιμίου-12 (6.5x)

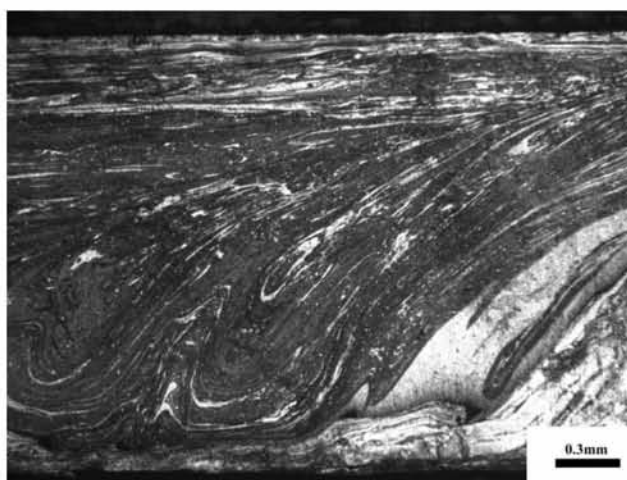
4.4.2 Έλεγχος μικροδομής

Με πιο πολύ λεπτομέρεια μπορούμε να μελετήσουμε τα δυο παραπάνω δοκίμια ελέγχοντάς τα στο οπτικό μικροσκόπιο. Αντίστοιχα με πριν πρώτα ακολουθούν οι πανοραμικές φωτογραφίες (Εικ. 108,119) και στη συνέχεια η πιο λεπτομερής μελέτη σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις στο μικροσκόπιο.

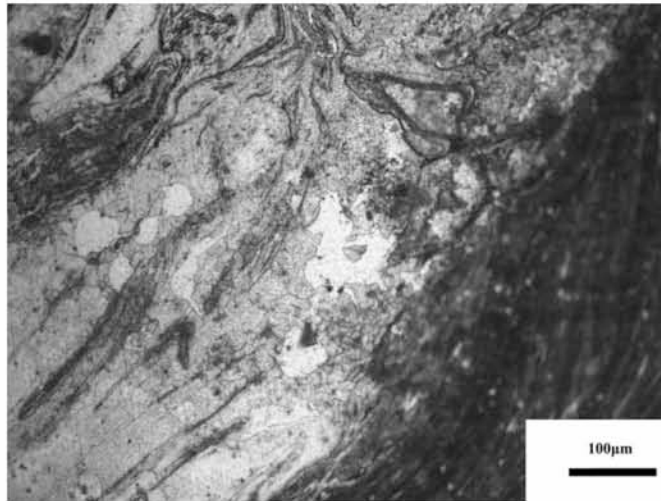
Δοκίμιο 11:



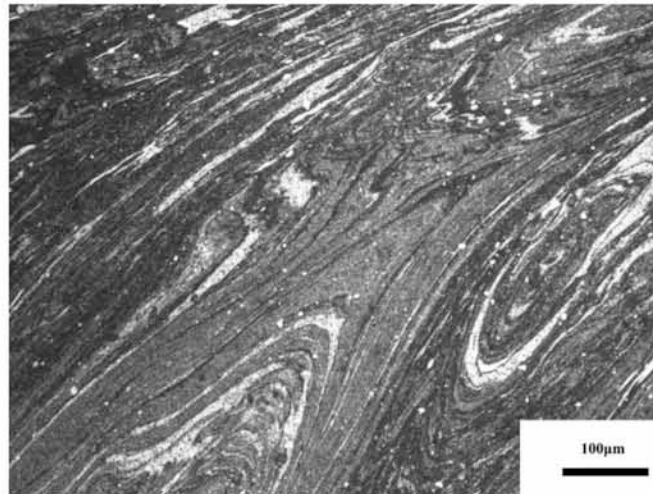
Εικόνα 108: Μακροδομή δοκίμιου-11



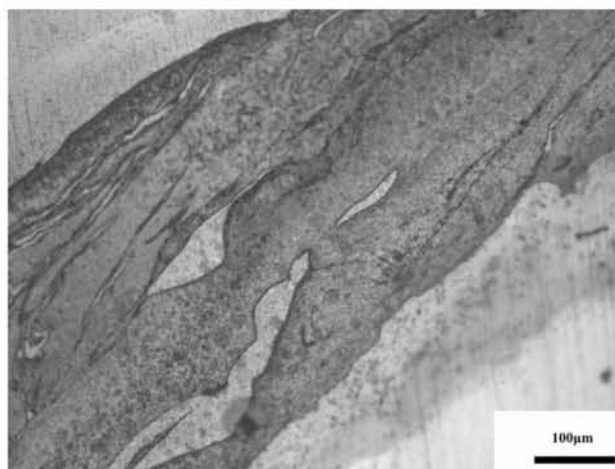
Εικόνα 109: Κέντρο Συγκόλλησης (50x)



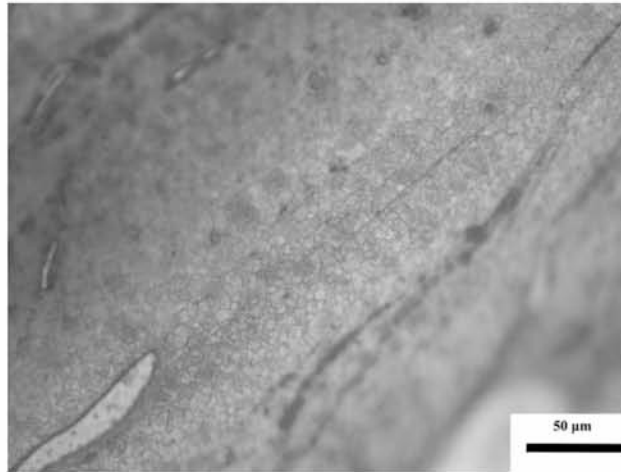
Εικόνα 110: Περιοχή ανάδευσης (200x)



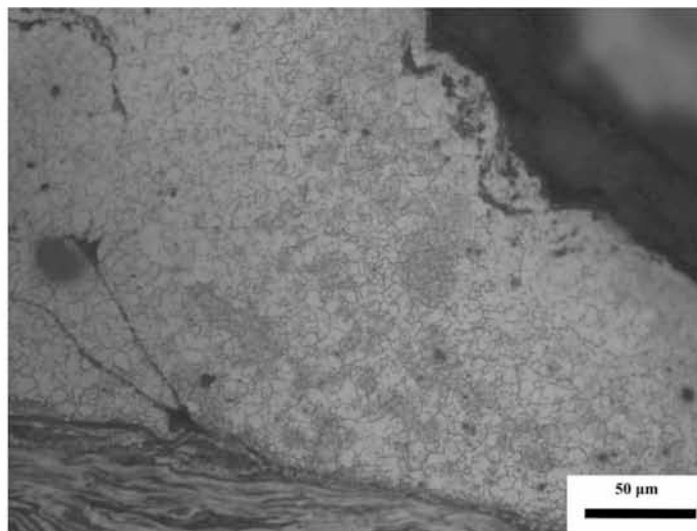
Εικόνα 111: Περιοχή ανάδευσης (200x)



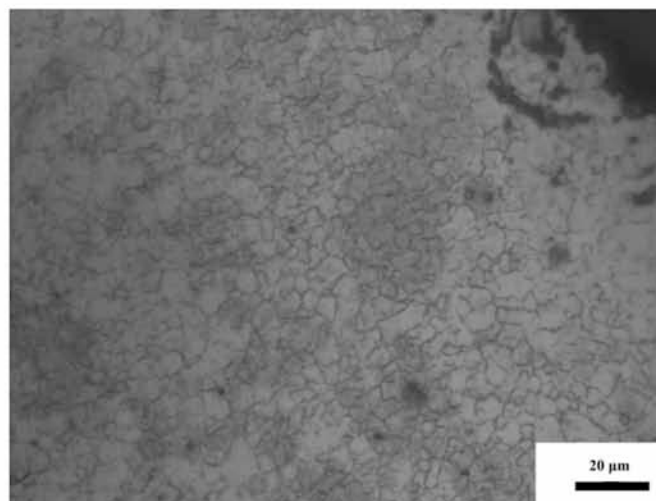
Εικόνα 112: Περιοχή ανάδευσης (200x)



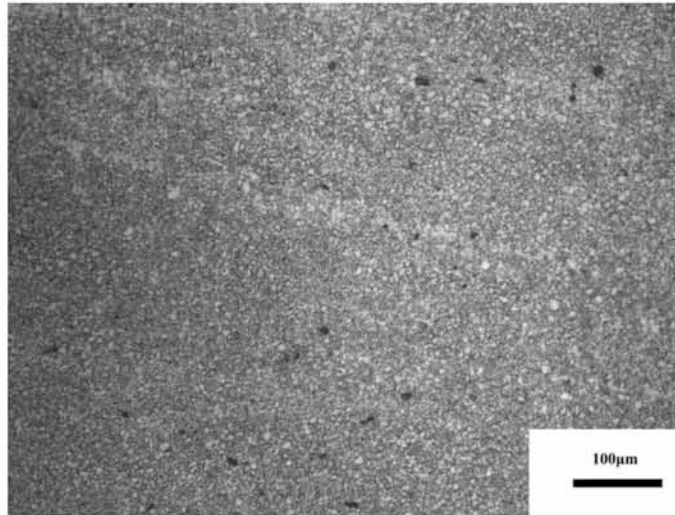
Εικόνα 113: Περιοχή ανάδευσης (500x)



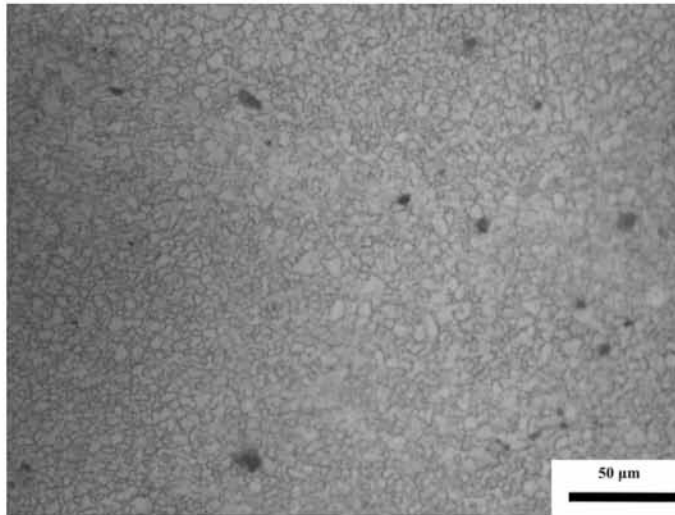
Εικόνα 114: TMAZ (500x)



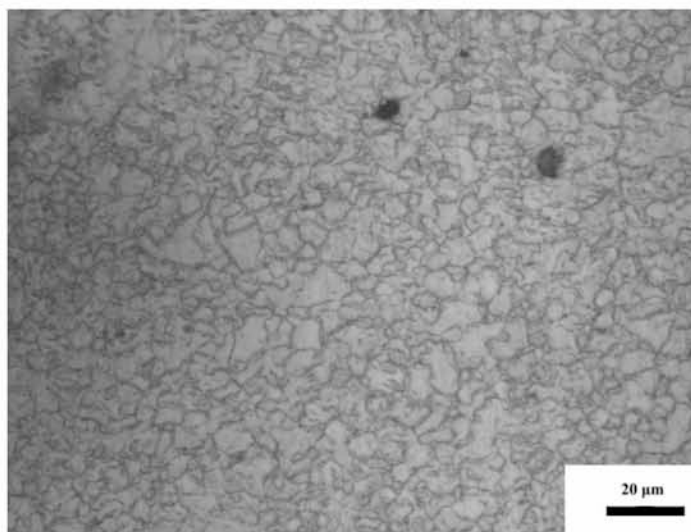
Εικόνα 115: TMAZ (1000x)



Εικόνα 116: NZ (200x)



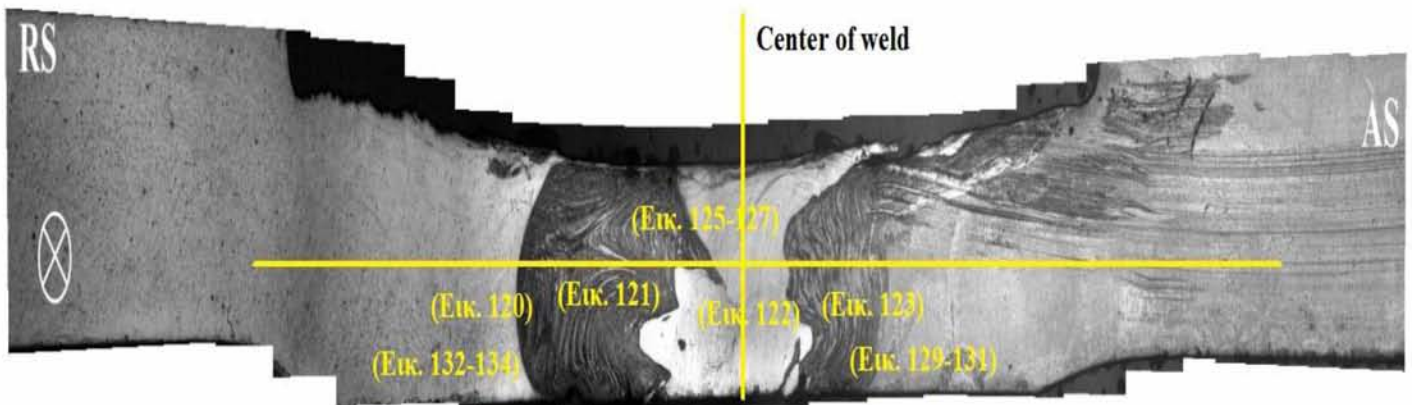
Εικόνα 117: NZ (500x)



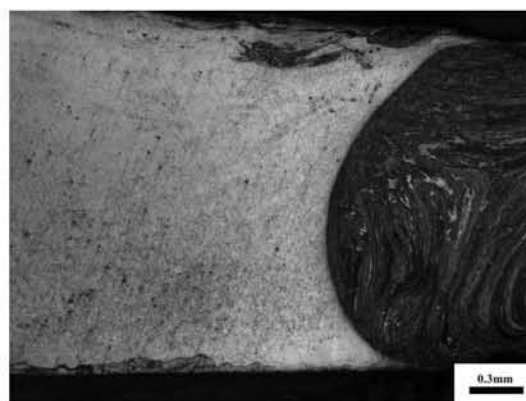
Εικόνα 118: NZ (1000x)

Σε αντίθεση με την προηγούμενη συγκόλληση (Mg στη προωθούσα πλευρά) τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης είναι βέλτιστα. Παρατηρώντας τη μακρο φωτογραφία (Εικ. 108) αυτό που βλέπουμε είναι ότι η περιοχή του κέντρου της συγκόλλησης μοιάζει με περιοχή συγκόλλησης από FSW σε συγκόλληση όμοιου υλικού. Η ανάδευση και η εισχώρηση του ενός υλικού στο άλλο είναι έντονη. Θα μπορούσαμε να την χαρακτηρίσουμε ομοιόμορφη καθώς ολόκληρη η περιοχή είναι ακριβώς ίδια στο κέντρο (Εικ. 109-110). Ήδη από πολύ μικρές μεγεθύνσεις εμφανίζονται οι κόκκοι του μετάλλου (Εικ. 112) στην περιοχή της ανάδευσης. Όπως και στην συγκόλληση FSW ενός μόνο υλικού, έτσι και στη διμεταλλική, η TMAZ (Εικ. 114-115) εμφανίζει την ίδια έντονη περιστροφή των κόκκων. Αντιστοίχως και στο NZ (Εικ. 116-118) εμφανίζεται η λεπτόκοκκη διατομή λόγω της δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Το συμπέρασμα είναι ότι η συγκόλληση είναι πλήρους διείσδυσης χωρίς εξωτερικά ή εσωτερικά σφάλματα και μπορεί με βεβαιότητα να χαρακτηριστεί διμεταλλική συγκόλληση.

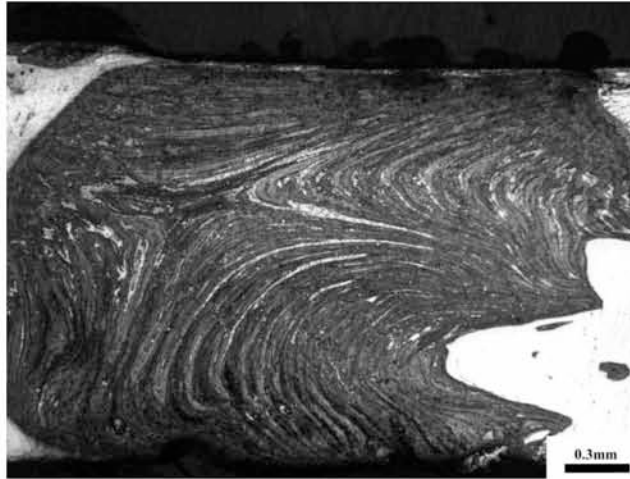
Δοκίμιο 12:



Εικόνα 119: Μακροδομή δοκιμίου-12



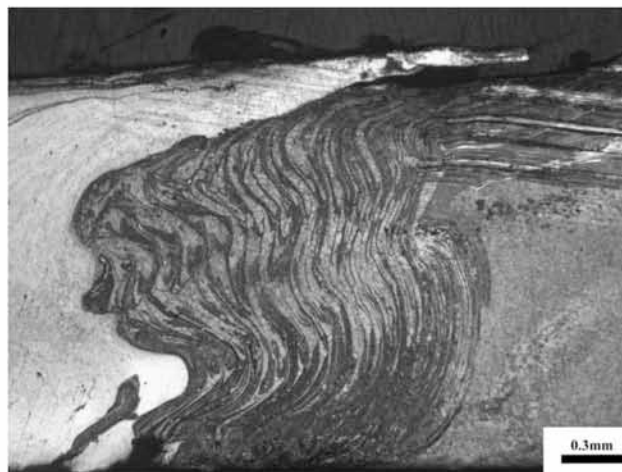
Εικόνα 120: Περιοχή ανάδευσης (50x)



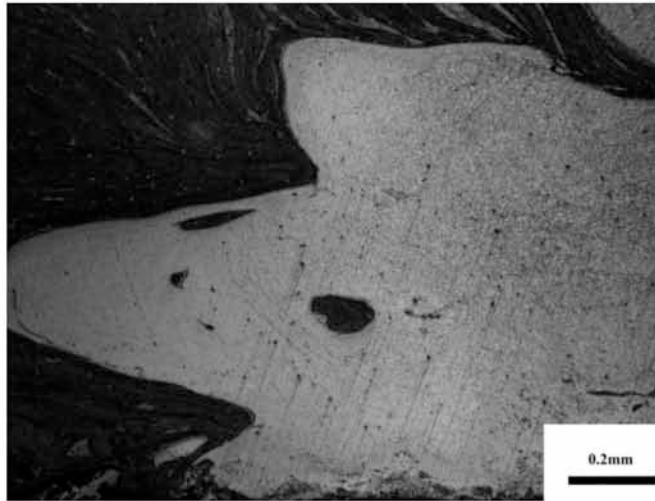
Εικόνα 121: Περιοχή ανάδευσης (50x)



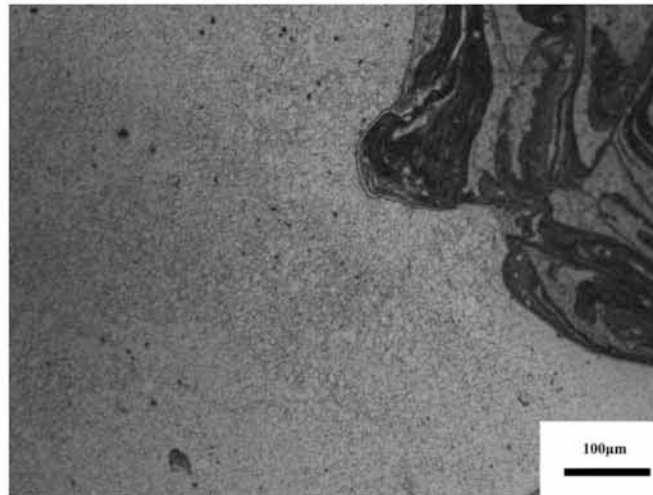
Εικόνα 122: Κέντρο συγκόλλησης (50x)



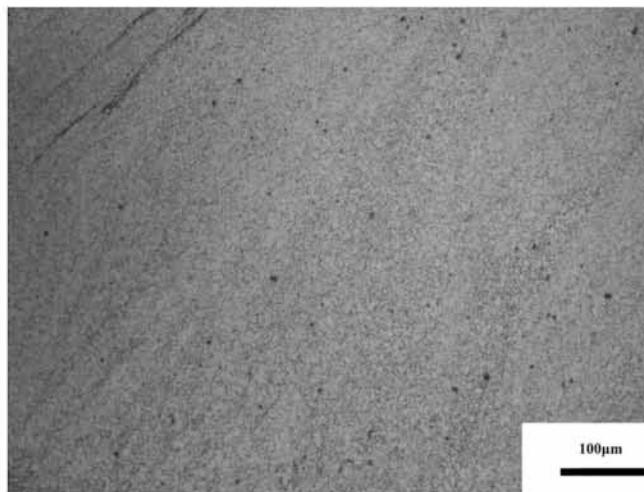
Εικόνα 123: Κέντρο συγκόλλησης (50x)



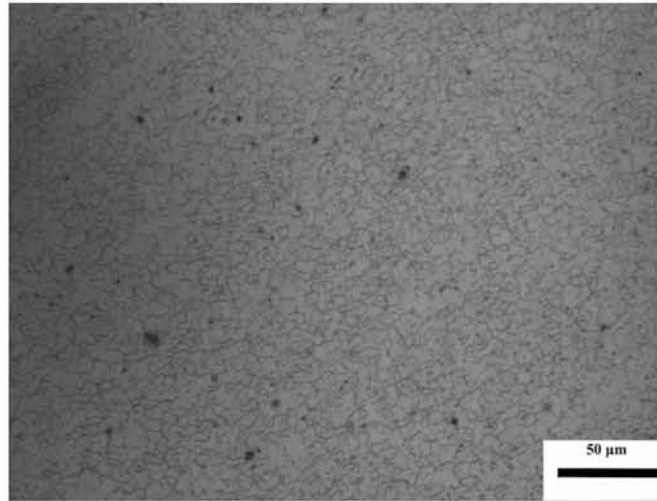
Εικόνα 124: Advancing πλευρά του NZ



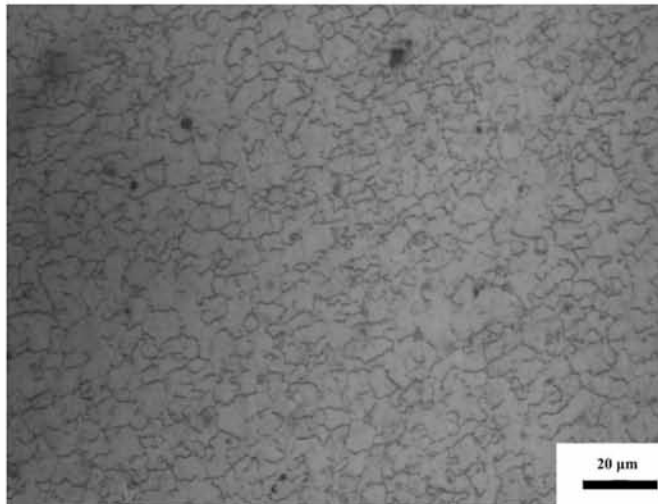
Εικόνα 125: Retreating NZ (200x)



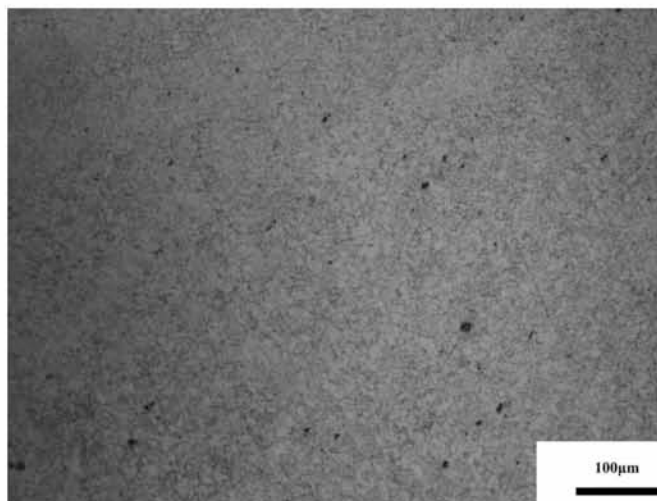
Εικόνα 126: NZ (200x)



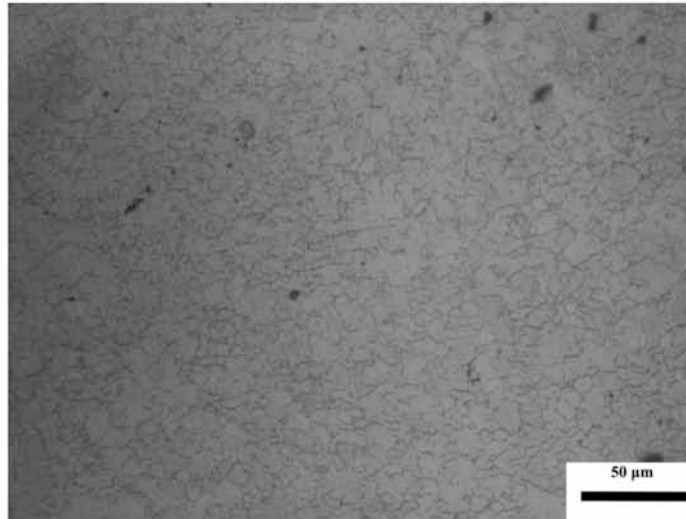
Εικόνα 127: NZ (500x)



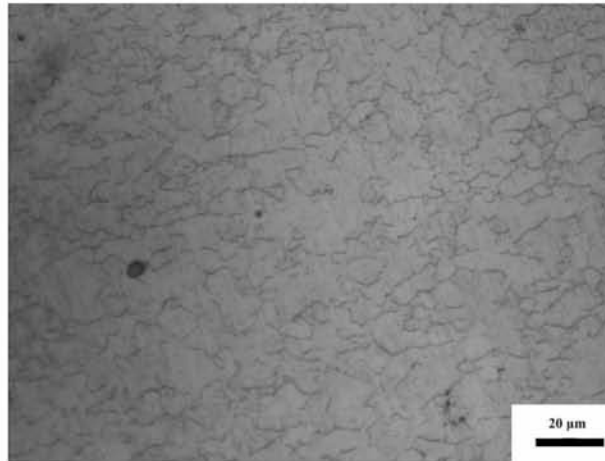
Εικόνα 128: NZ (1000x)



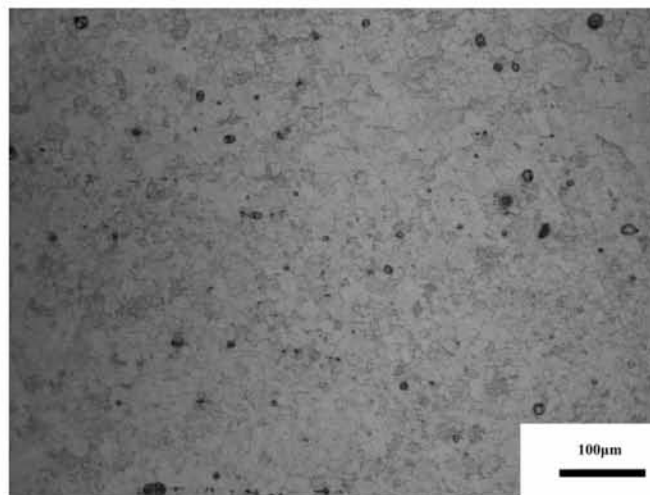
Εικόνα 129: TMAZ (200x)



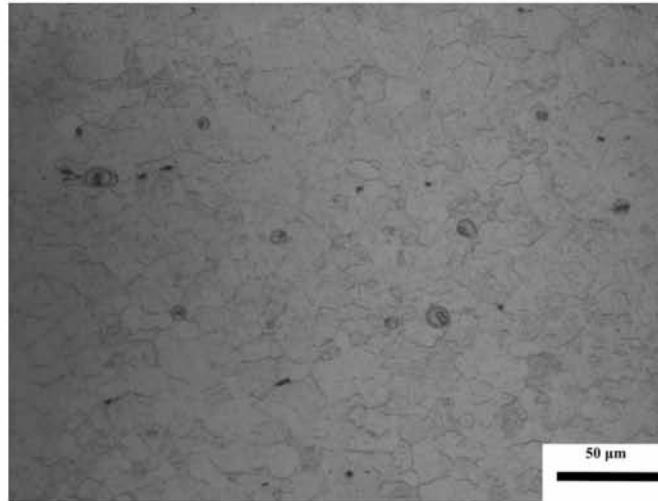
Εικόνα 130: TMAZ (500x)



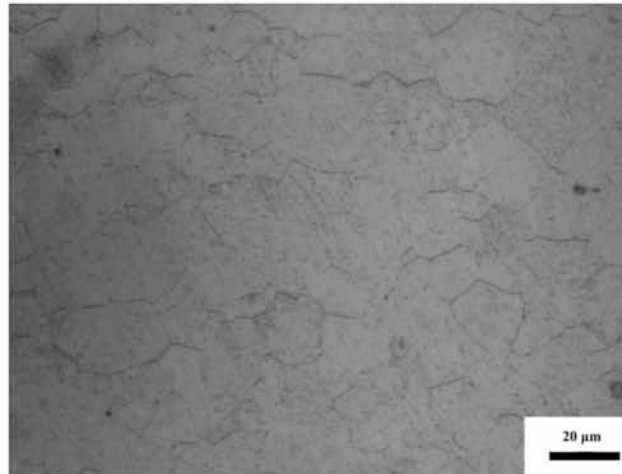
Εικόνα 131: TMAZ (1000x)



Εικόνα 132: HAZ (200x)



Εικόνα 133: HAZ (500x)



Εικόνα 134: HAZ (1000x)

Η συγκόλληση του δοκιμίου 12 είναι πανομοιότυπη σε συνθήκες με την συγκόλληση 11, με μόνο βασική διαφορά, το μεγάλο κάθετο φορτίο. Το μεγάλο κάθετο φορτίο ασκεί μεγάλες δυνάμεις στην περιοχή της «ραφής», με αποτέλεσμα στο κέντρο να δημιουργείται «κοιλιά» προς τα κάτω. Η λεπτομέρεια αυτή μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στην πανοραμική φωτογραφία από το μικροσκόπιο (Εικ. 119). Σε σχέση με δοκίμιο 11, το κέντρο της συγκόλλησης αυτής διαφέρει καθώς δεν έχουμε μια ομοιόμορφη ανάμειξη των υλικών. Παρόλα αυτά, η συνοχή των δύο υλικών στην περιοχή της συγκόλλησης (Εικ 120-124) έχει άριστη συνοχή και δεν εμφανίζονται πόροι ή κάποιο κενό. Όπως ήταν αναμενόμενο και σε αυτή τη συγκόλληση υπάρχουν και οι τρεις βασικές περιοχές. Το NZ (126-128) , η TMAZ (129-131) και η HAZ (132-134) όπου εδώ οι κόκκοι φυσικά και είναι πιο μεγάλοι σε σύγκριση με αυτούς του NZ, όπως αναμέναμε.

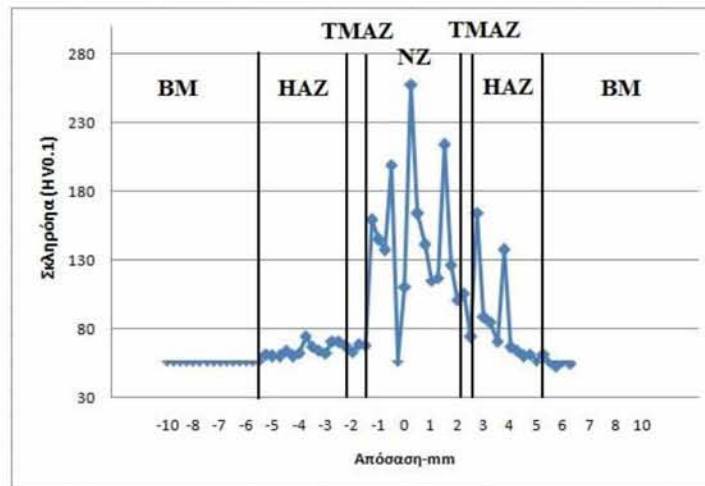
4.4.3 Μικροσκληρομετρήσεις

. Τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων των διμεταλλικών συγκολλήσεων δίδονται παρακάτω:

Δοκίμιο 11:

Πίνακας 36: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Al advancing)-Δοκίμιο 11

Απόσταση από το κέντρο προς retreating (Mg) σε mm	HV0.1	Απόσταση από το κέντρο προς advancing (Al) σε mm	HV0.1
0.00	110.5	0.00	110,5
0.25	87	0.25	258
0.50	199	0.50	164
0.75	137.5	0.75	141
1.00	145	1.00	115
1.25	159	1.25	117
1.50	68	1.50	214
1.75	63	1.75	126
2.00	69	2.00	101
2.25	68	2.25	106
2.50	71	2.50	74
2.75	70.5	2.75	164,5
3.00	62.5	3.00	89
3.25	64	3.25	85
3.50	67	3.50	71
3.75	74.7	3.75	137,5
4.00	62	4.00	66,5
4.25	60	4.25	64
4.50	62	4.50	60
4.75	64	4.75	61
5.00	66	5.00	57
5.25	60	5.25	61
5.50	61	5.50	56,5
5.75	57	5.75	53
6.00	57	6.00	56,5
6.25	57	6.25	54,5



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου 11

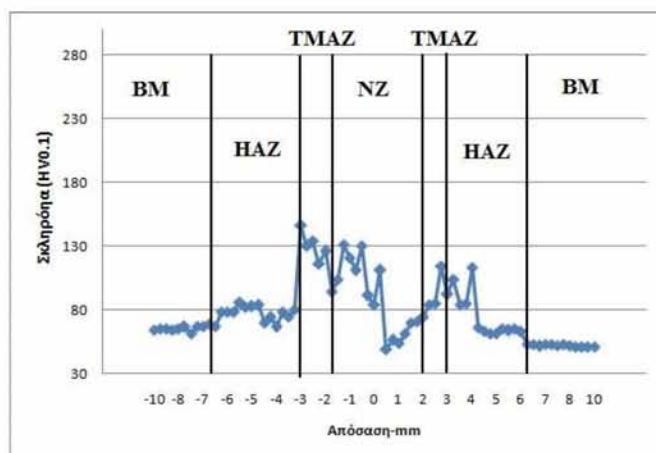
Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζονται οι τιμές των μικροσκληρομετρήσεων της συγκόλλησης No. 11. Παρατηρούνται πολύ υψηλές τιμές στο NZ σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο. Είναι όμως αναμενόμενο, αφού η συγκόλληση 11 χαρακτηρίζεται από πλήρη ανάμιξη των υλικών στον κέντρο, οπότε οι τιμές είναι λογικό να είναι υψηλές αφού το Al αναμίχτηκε πλήρως με το Mg. Τέλος, όπως και στα υπόλοιπα δοκίμια, οι τιμές έξω από το NZ πέφτουν γραμμικά ως το βασικό μέταλλο με κάποιες μικρές εξαιρέσεις λόγω της διασποράς σωματιδίων Mg και Al προς την advancing και retreating περιοχή αντίστοιχα. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν βρεθεί σε παρόμοιες εργασίες διμεταλλικών συγκολλήσεων Al 5082 : Mg AZ31 [26] όπου οι τιμές των μικροσκληρομετρήσεων κυμαίνονται από 200-300 HV λόγω των διμεταλλικών ενώσεων ($Mg_{17}Al_{12}$, Mg_2Al_3) που σχηματίζονται.

Δοκίμιο 12:

Πίνακας 37: Μικροσκληρομετρήσεις σε διμεταλλική συγκόλληση (Al advancing)-Δοκίμιο 12

Απόσταση από το κέντρο προς retreating (Mg) σε mm	HV0.1	Απόσταση από το κέντρο προς advancing (Al) σε mm	HV0.1
0.00	84	0.00	84
0.25	91	0.25	111
0.50	130	0.50	49
0.75	111	0.75	56
1.00	121	1.00	54

1.25	131.5	1.25	61
1.50	104	1.50	70
1.75	94	1.75	71
2.00	126	2.00	74
2.25	116	2.25	84
2.50	134	2.50	85
2.75	130	2.75	114
3.00	146	3.00	92
3.25	80	3.25	104
3.50	74.5	3.50	84
3.75	78	3.75	85
4.00	66.5	4.00	113,5
4.25	74	4.25	66
4.50	70	4.50	63
4.75	83.5	4.75	61
5.00	82.5	5.00	61
5.25	82	5.25	65
5.50	86	5.50	63,5
5.75	78	5.75	65
6.00	78	6.00	63
6.25	78	6.25	52,5
6.75	67	6.75	53
7.00	69	7.00	51,5
7.25	67	7.25	53
7.50	67	7.50	53
7.75	61	7.75	52
8.00	66.5	8.00	53
8.50	65	8.50	52
9.00	64	9.00	51
9.50	65	9.50	51
10.00	65	10.00	51
10.5	64	10.5	51



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα μικροσκληρομετρήσεων δοκιμίου 12

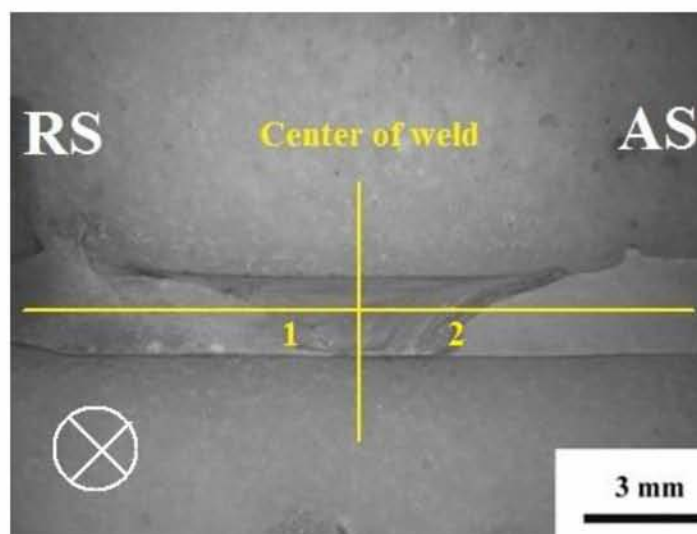
Σε αντίθεση με την συγκόλληση 11, η τιμές μικροσκληρομετρήσεων του δοκιμίου 12 είναι αρκετά χαμηλότερες, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο κάθετο φορτίο που ασκήθηκε με αποτέλεσμα να μην είναι αρκετά καλή η ανάδευση των δυο υλικών στο κέντρο της συγκόλλησης. Φυσικά, όπως ήταν αναμενόμενο, πηγαίνοντας από το NZ στην TMAZ και το BM οι τιμές μειώνονται σχεδόν γραμμικά.

Διαπιστώνουμε τελικά και μεταλλογραφικά, αλλά και από τις υψηλές τιμές των μικροσκληρομετρήσεων του δοκιμίου 11, ότι οι συνθήκες συγκόλλησης του δοκιμίου 11 είναι σαφώς καλύτερες από αυτές του δοκιμίου 12. Το μεγάλο κάθετο φορτίο στη συγκόλληση 12 αλλοιώνει την περιοχή της συγκόλλησης και μειώνει το πάχος της διατομής.

Επίσης σαν γενικό κανόνα αυτό που παρατηρείται στις συγκολλήσεις FSW (και στις διμεταλλικές) είναι ότι μεταβάλλοντας έστω και λίγο τις συνθήκες της συγκόλλησης το αποτέλεσμα είναι διαφορετικό. Παρατηρώντας λοιπόν την εικόνα 29 βλέπουμε ότι πηγαίνοντας από το δοκίμιο 1 ως το 4 η μείωση του κάθετου φορτίου έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο απόβλητο (flash). Ενώ πηγαίνοντας από το δοκίμιο 6 ως το 10 η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης δημιουργεί προβλήματα τύπου tunnel.

4.4.4 SEM/EDX

Δοκίμιο 11:

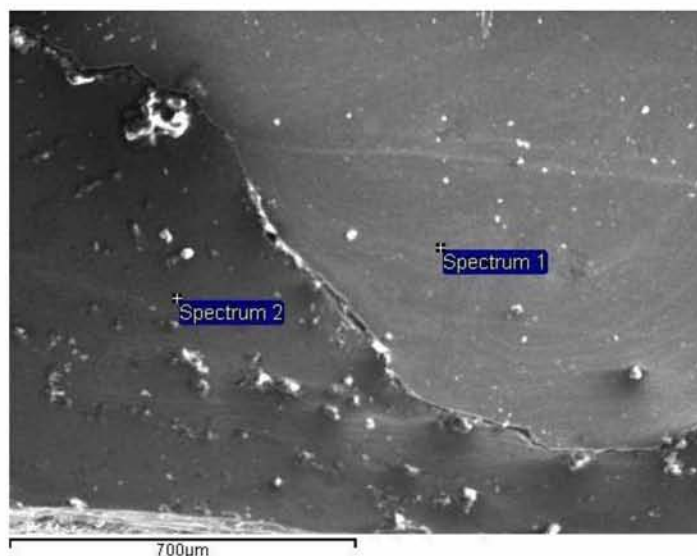


Εικόνα 135: Μακροδομή δοκιμίου-11 (6.5x)

Το δοκίμιο μελετήθηκε στις περιοχές 1 & 2 (Εικ. 135).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω στις Εικ 136-139

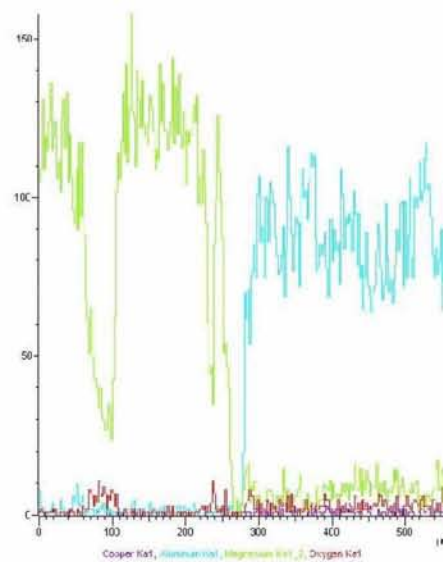
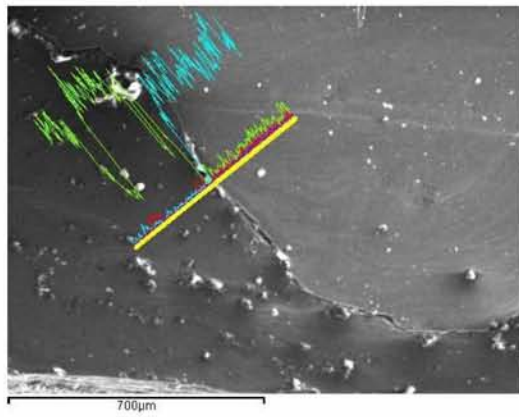
Περιοχή 1:



Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Cu	Total
Spectrum 1	Yes	12.12	2.76	81.13	3.99	100.00
Spectrum 2	Yes	2.20	97.66	1.58	-1.44	100.00

Εικόνα 136 : Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.135)

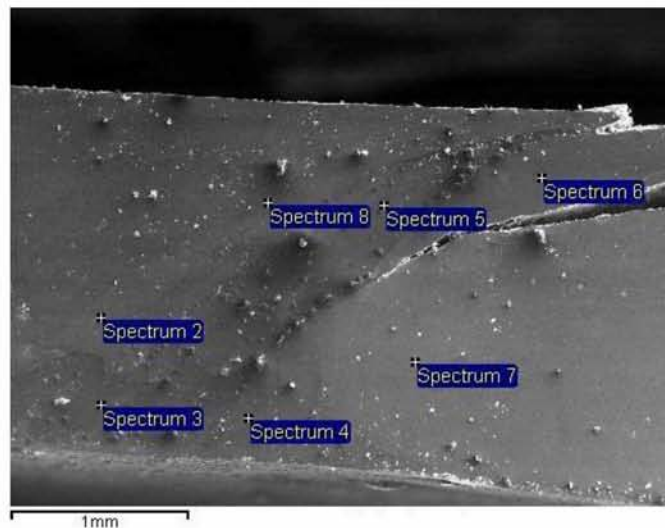
Συμφώνα με τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε πως μέσα στην περιοχή της ανάδευσης (spectrum 1) κυριαρχεί το Al με ποσοστό 81.13% και μόνο 2.75% Mg, ενώ έξω από την περιοχή της ανάδευσης (spectrum 2) κυριαρχεί το mg με ποσοστό 97.66% και μόνο 1.58%. Βλέπουμε λοιπόν ότι σε σύγκριση με την προηγούμενη συγκόλληση (Mg στην advancing περιοχή) η εισχώρηση του Al εδώ γίνεται από πάνω προς τα κάτω και η εισχώρηση του στο Mg είναι πιο έντονη στη κορυφή του υλικού και λιγότερο στον πάτο. Στο πάτο η εισχώρηση του είναι όσο η μισή διάμετρος του πείρου, δηλαδή 2.5mm. Το O δεν μας απασχολεί καθώς είναι ένδειξη παρουσίας οξειδίων.



Εικόνα 137: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

Στο παραπάνω line scan (Εικ. 137) βλέπουμε την μικρή εισχώρηση του Mg μέσα στο Al, ενώ το Al σε αυτή την περιοχή δεν έχει προχωρήσει μέσα στο Mg

Περιοχή 2:

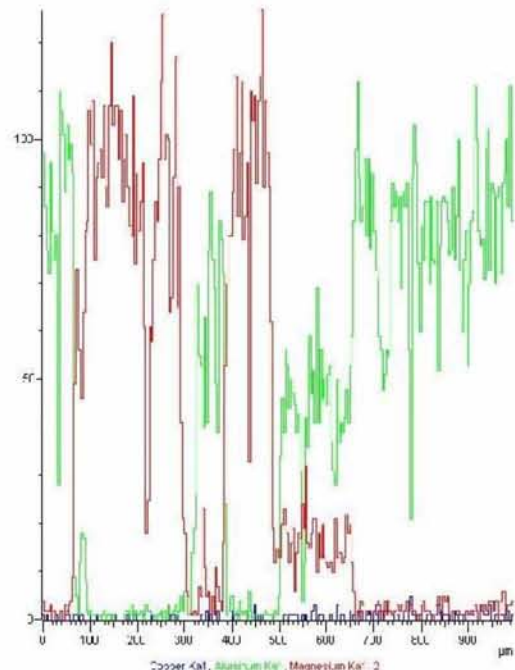
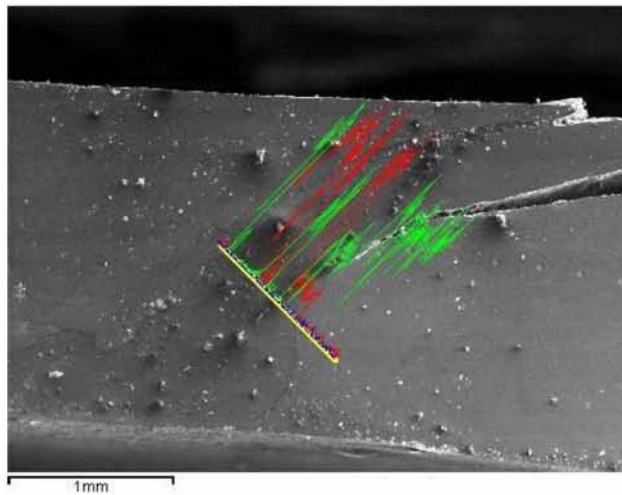


Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Cu	Total
Sum Spectrum	Yes	9.02	38.55	50.71	1.72	100.00
Spectrum 2	Yes	7.31	1.52	87.76	3.41	100.00

Spectrum 3	Yes	4.77	93.91	0.71	0.61	100.00
Spectrum 4	Yes	21.38	11.02	63.63	3.98	100.00
Spectrum 5	Yes	7.41	88.96	3.38	0.24	100.00
Spectrum 6	Yes	7.61	14.09	74.01	4.30	100.00
Spectrum 7	Yes	15.13	0.42	80.51	3.93	100.00
Spectrum 8	Yes	20.08	4.21	73.19	2.53	100.00

Εικόνα 138 : Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.135)

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα και ξεκινώντας από το spectrum 7, το οποίο βρίσκεται εκτός της περιοχής ανάδευσης και στην advancing πλευρά, όπως και περιμέναμε η περιοχή απαρτίζεται από Al. Μπαίνοντας μέσα στην περιοχή της ανάδευσης και παρατηρώντας τα spectrum 2 έως 8 τα ποσοστά αλλάζουν. Οι περιοχές spectrum 2 και 8 έχουν Al σε ποσοστό 87% και 73% αντίστοιχα ενώ εμφανίζουν και λίγο Mg της τάξης του 1% και 4% αντίστοιχα. Στις περιοχές spectrum 4 και 6 τα ποσοστά του Mg αυξάνονται σε 11% και 14% αντίστοιχα, ενώ το Al μειώνεται σε 63% και 75%. Τέλος, στις περιοχές spectrum 3 και 5 η εμφάνιση του Mg είναι πολύ έντονη με ποσοστά 94% και 89% αντίστοιχα. Διαπιστώνουμε, ότι το Mg, παρόλο που είναι στην retreating περιοχή, έχει προχωρήσει σχεδόν 3mm προς την περιοχή του Al, διεσπαρμένο σε μικρότερα κομμάτια στο κέντρο της συγκόλλησης και κατευθυνόμενο προς την advancing πλευρά.



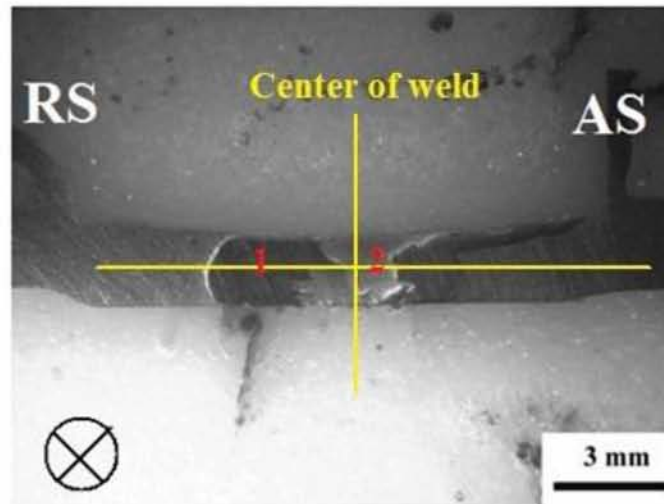
Εικόνα 139: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

Αντίστοιχα με την περιοχή 1, στην Εικ. 139 παρατηρούμε πως και το Al και το Mg αριστερά της επιφάνειας έχουν περίπου την ίδια κατανομή, ενώ δεξιά αυτής το Mg πέφτει σε ποσοστό σε σχέση με το Al το οποίο φαίνεται λογικό αφού είμαστε στην AS πλευρά.

Δοκίμιο 12:

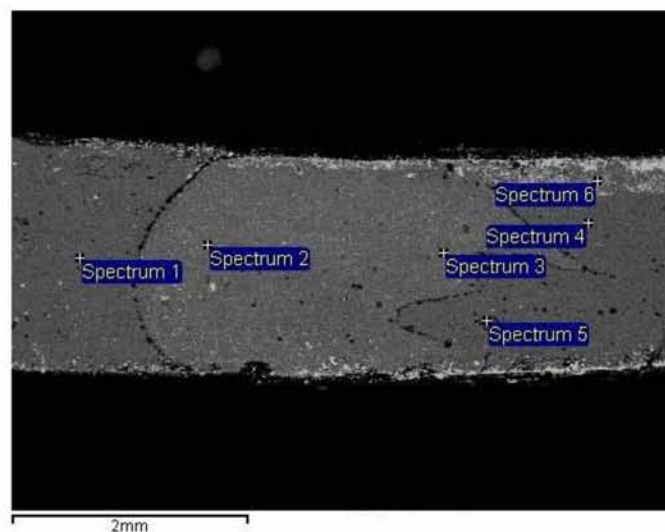
Το δοκίμιο μελετήθηκε στις περιοχές 1 & 2 (Εικ. 140).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω στις Εικ 141-146



Εικόνα 140: Μακροδομή συγκόλλησης-12 (6.5x)

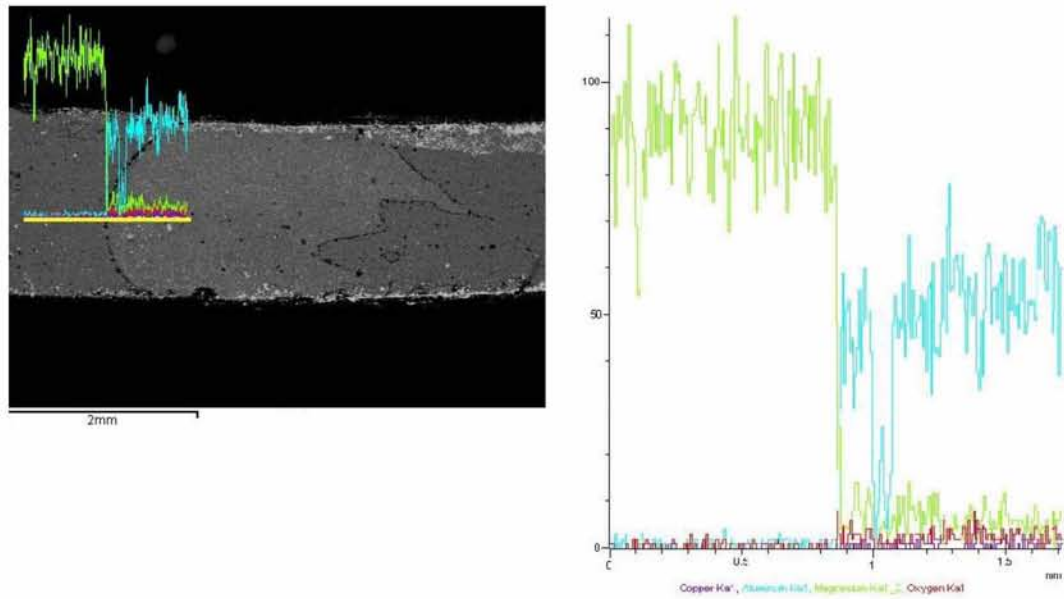
Περιοχή 1:



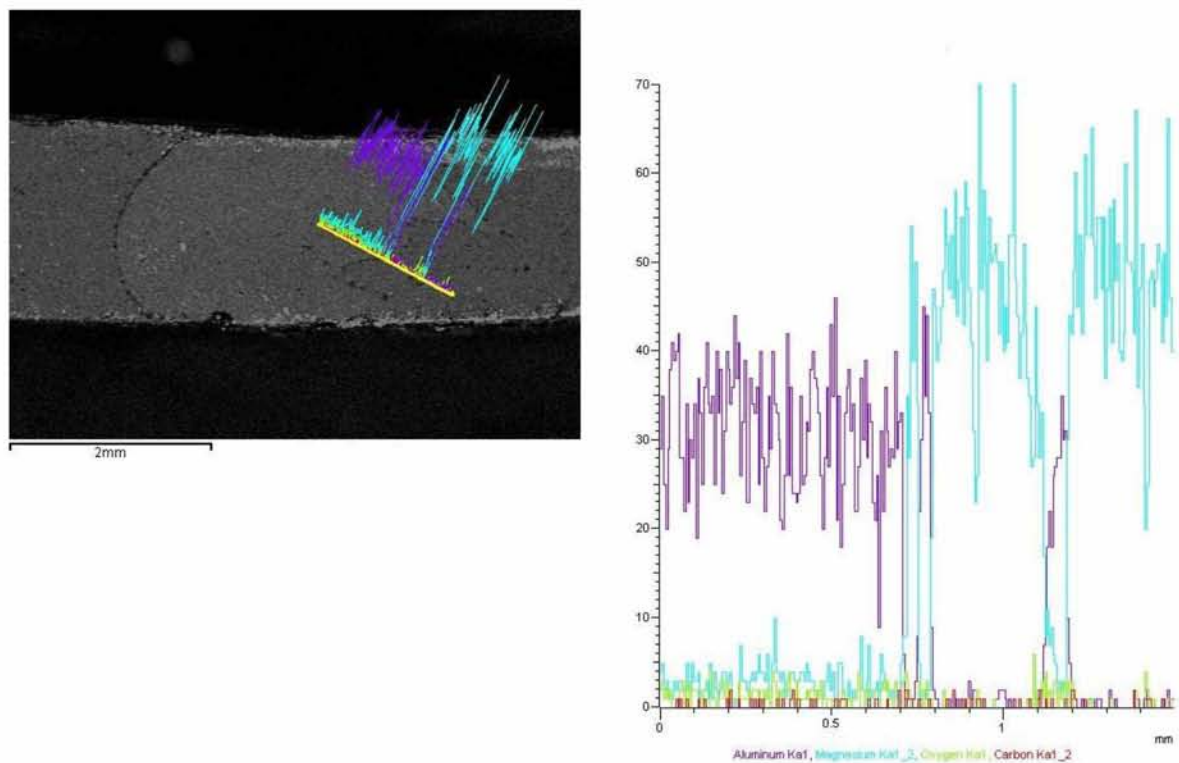
Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Cu	Total
Spectrum 1	Yes	1.62	97.85	0.97	-0.44	100.00
Spectrum 2	Yes	17.97	8.14	71.37	2.52	100.00
Spectrum 3	Yes	19.48	5.29	72.28	2.95	100.00
Spectrum 4	Yes	2.85	93.77	3.44	-0.06	100.00
Spectrum 5	Yes	27.82	6.06	60.98	5.14	100.00
Spectrum 6	Yes	4.04	96.28	0.56	-0.88	100.00

Εικόνα 141 : Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 1 (Εικ.135)

Το κέντρο της συγκόλλησης νούμερο 12 χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανομοιομορφία. Φαίνεται σαν να αποτελείται από τρία διαφορετικά τμήματα. Αρχικά, στην περιοχή spectrum 1 παρατηρούμε ότι το Mg αγγίζει το 98% πράγμα λογικό αφού είμαστε εκτός της περιοχής της ανάδευσης και στην retreatingπλευρά. Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον φαίνεται να έχει η περιοχή spectrum 6 καθώς και εδώ το ποσοστό του Mg είναι πολύ υψηλό, 96%. Αυτή η περιοχή βρίσκεται ακριβώς πάνω στην νοητή κάθετο του κέντρου συγκόλλησης. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι στη κορυφή του υλικού στο κέντρο της συγκόλλησης έχει μεταφερθεί Mg. Αντίστοιχη είναι και η περιοχή 4 με ποσοστό Mg 93.77%. Τέλος, οι περιοχές spectrum 2,3 και 5 εμφανίζουν υψηλά ποσοστά Al από 60%έως 72% ενώ το Mg κυμαίνεται από 5%έως 8% . Παρατηρούμε, λοιπόν, πως πηγαίνοντας κάθετα της τομής τα ποσοστά του Mg ολοένα και μικραίνουν. Είναι ένα λογικό αποτέλεσμα, καθώς λόγω της γεωμετρίας του εργαλείου καθώς και τη θέση του Mg στην advancingπλευρά, το Al τείνει να αναδεύεται από κάτω προς τα πάνω και κατευθύνεται από την advancingπρος την retreatingπλευρά. Η παρουσία του οξυγόνου και εδώ δεν πρέπει να μας απασχολεί καθώς οφείλεται στην παρουσία οξειδίων.



Εικόνα 142: Line scan 1: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

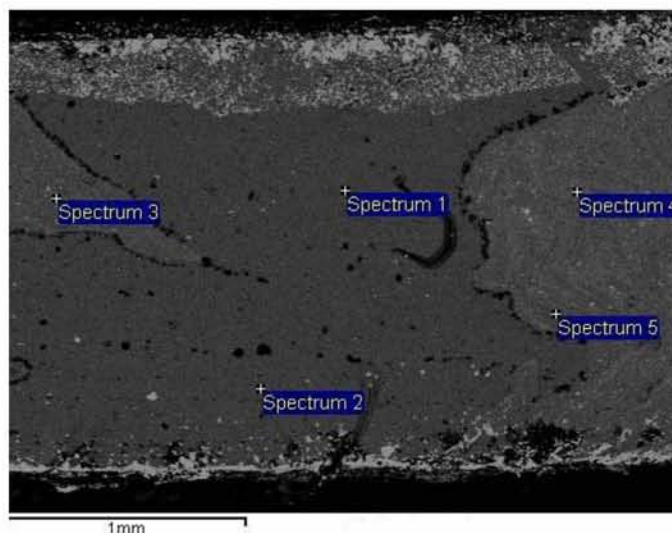


Εικόνα 143: Line scan 2: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

Στο πρώτο από τα δυο παραπάνω line scan (Εικ. 142) παρατηρούμε πως δεξιά της διεπιφάνειας Al:Mg η εισχώρηση του Mg μέσα στο Al γίνεται με μικρό ποσοστό ενώ αριστερά της διεπιφάνειας δεν υπάρχει εισχώρηση του Al. Στην Εικ. 143 η

παρουσία όμως του Mg είναι πιο έντονη μέσα στο Al, ενώ η το Mg δεν έχει περάσει δεξιά της διεπεφάνειας.

Περιοχή 2:

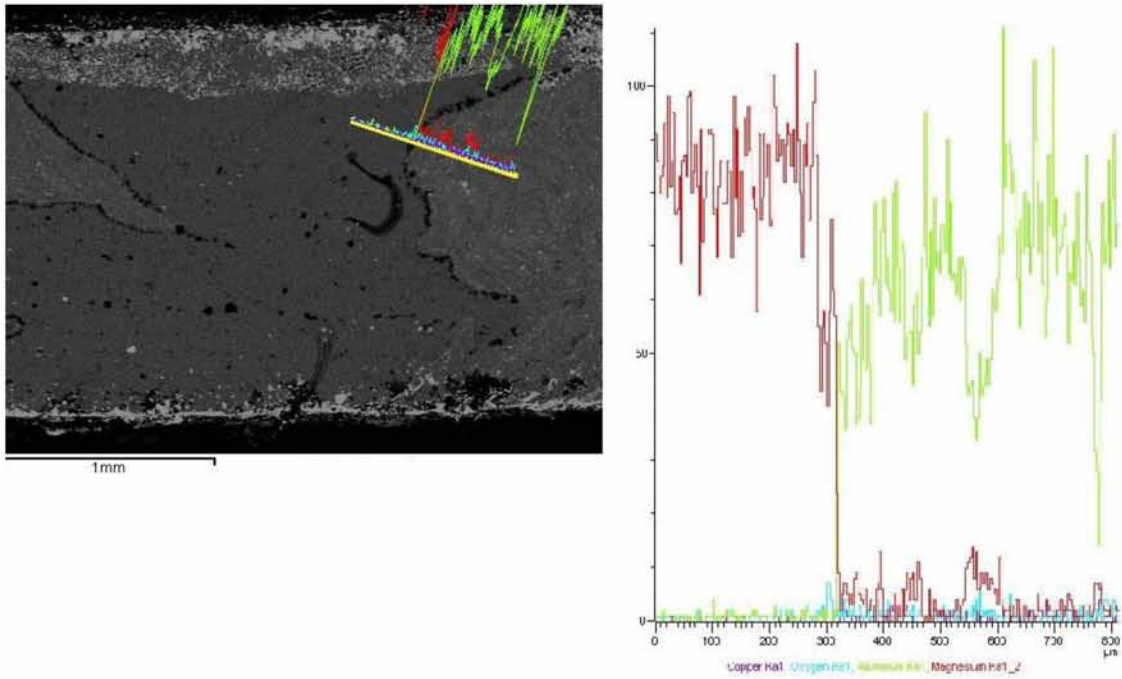


Spectrum	In stats.	O	Mg	Al	Cu	Total
Spectrum 1	Yes	3.06	94.73	1.93	0.28	100.00
Spectrum 2	Yes	14.60	81.85	3.94	-0.38	100.00
Spectrum 3	Yes	7.52	1.63	88.99	1.86	100.00
Spectrum 4	Yes	9.38	0.67	87.49	2.46	100.00
Spectrum 5	Yes	15.94	5.84	74.45	3.77	100.00

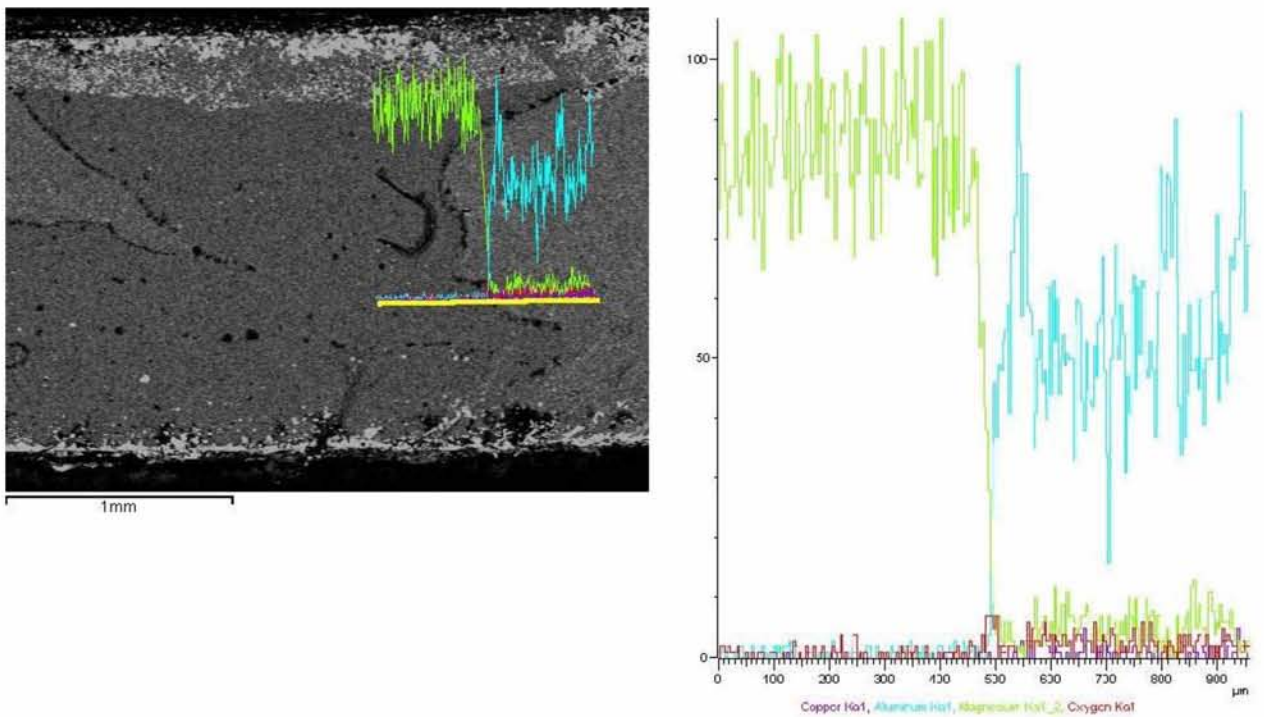
Εικόνα 144: Τοπικές χημικές αναλύσεις (%κ.β.) της περιοχής 2 (Εικ.135)

Ξεκινώντας και παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα και βλέποντας τα spectrum 1 και 2 των οποίων οι τιμές σε Mg είναι 94% και 82% αντίστοιχα καταλήγουμε σε ένα βασικό συμπέρασμα. Η περιοχή στο κέντρο της συγκόλλησης 12 αποτελείται από το μεγαλύτερο μέρος της σε Mg. Αυτό που συμβαίνει δεν είναι λογικό, αλλά όπως είδαμε και από τις μεταλλογραφίες, ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι λόγω του μεγάλου κάθετου φορτίου από τις συνθήκες συγκόλλησης (980kg). Έτσι, η μεγάλη πίεση του εργαλείου προς τα κάτω δεν άφησε περιθώρια στο να ομογενοποιηθεί το Mg με το Al. Τέλος, οι περιοχές spectrum 3,4 και 5 περιέχουν μικρά ποσοστά Mg έως 8% και το υπόλοιπο είναι Al, και πράγματι αυτό συμφωνεί με το παραπάνω συμπέρασμα. Καταλήγοντας, παρατηρείται ότι το Al έχει προχωρήσει

ως και 3.5mm μέσα στο Mg, ενώ το Mg έχει εισχωρήσει στο Al ως 1.5 mm το οποίο είναι και αυτό λογικό καθώς βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά.



Εικόνα 145: Line scan 3: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

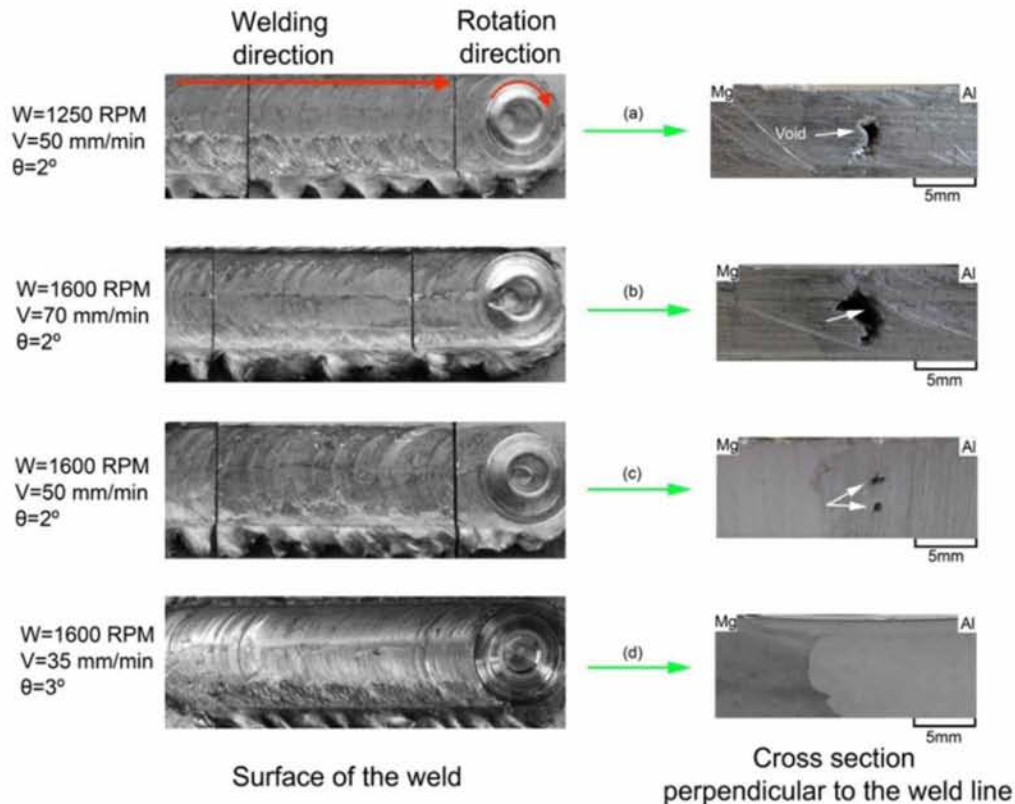


Εικόνα 146: Line scan 4: Ποιοτική κατανομή Mg, Al, Cu στη διεπιφάνεια της συγκόλλησης με το AZ31.

Αντίστοιχα με την περιοχή 1 (Εικ.141) τα δυο line scan της περιοχής 2 (Εικ.145-146) έχουν ακριβώς την ίδια κατανομή με τα line scan της περιοχής 1 (Εικ. 142-143).

4.4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των διμεταλλικών συγκολλήσεων Al : Mg με αυτά της βιβλιογραφίας.

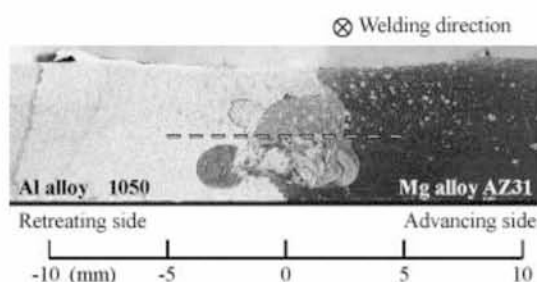
Στην μελέτη που ακολουθεί βλέπουμε τα πειράματα σε συγκολλήσεις FSW μεταξύ Al 6013 και καθαρού Mg σε πλακίδια πάχους 10mm [22]. Η βασική διαφορά στην εργασία αυτή, είναι η τοποθέτηση του pin 1mm προς την μεριά του Al ώστε να μελετηθεί καλύτερα η εισχώρηση του ενός υλικού μέσα στο άλλο. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικ.) παρατηρούμε την διαφορά στην μικροδομή βάσει των αλλαγών στις συνθήκες συγκόλλησης.



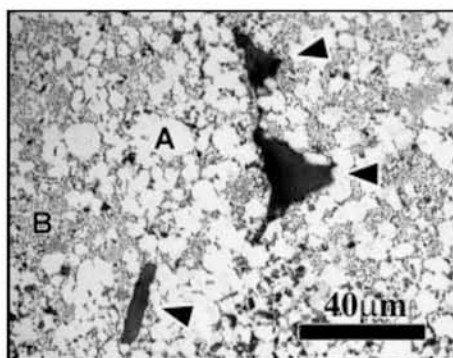
Εικόνα 147: Αλλαγές στη μικροδομή βάσει των συνθηκών συγκόλλησης [22]

Παρατηρούμε λοιπόν πως η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και η μείωση της ταχύτητας πρόωσης δεν δημιουργούν πόρους στην περιοχή της συγκόλλησης. Πράγμα που συμφωνεί και με την παρούσα διπλωματική εργασία. Το όριο θραύσης στην εργασία αυτή ήταν αρκετά χαμηλό (20.62 MPa) ενώ με περαιτέρω θερμική κατεργασία του δοκιμίου για μία ώρα στους 320 °C ανέβηκε στα 36 MPa. Είναι μια αρκετά χαμηλή τιμή σε σύγκριση με το διμεταλλική συγκόλληση Al : Mg (AS) της παρούσας εργασίας όπου το όριο θραύσης άγγιζε τα 69 MPa. Τέλος, όπως και στην παρούσα διπλωματική, βρέθηκαν κομμάτια Mg τα οποία έχουν προσχωρήσει προς την AS πλευρά.

Πολύ ενδιαφέρουσα είναι και η σύγκριση με την παρακάτω μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε Al 1050 και Mg AZ31 (AS) [24]. Η ταχύτητα περιστροφής ήταν 2450 RPM ενώ η ταχύτητα πρόωσης μόλις 1.5mm/sec. Βλέπουμε λοιπόν και εδώ ότι προτιμάται πολύ η υψηλή ταχύτητα περιστροφής και ταυτόχρονα η πολύ μικρή ταχύτητα πρόωσης. Στις δύο παρακάτω φωτογραφίες (Εικ. 150-151) βλέπουμε ένα αντίστοιχο αποτέλεσμα με αυτό της αντίστοιχης συγκόλλησης Mg (As) : Al της παρούσας εργασίας. Η εισχώρηση του Mg στο Al είναι μικρή, ενώ παράλληλα μικρά κομμάτια Mg διασπείρονται μέσα στο Al.



Εικόνα 148: Μακροδομή μελέτης FSW [24]



Εικόνα 149: Μεταλλογραφία από μελέτη συγκόλλησης FSW [24]

Τέλος μία ακόμα σε μία ακόμα εργασία [25] , χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκόλληση πλακίδια 5mm Al 5083-Mg με ταχύτητα περιστροφής 925 RPM και ταχύτητα πρόωσης 17mm/min. Στην παρακάτω φωτογραφία (Εικ. 152) φαίνεται η ομοιότητα με τη διμεταλλική συγκόλληση 11 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Βλέπουμε και εδώ την άριστη ανάδευση και συνοχή των υλικών στην περιοχή της συγκόλλησης όταν το Al είναι στην advancing πλευρά.



Εικόνα 150: Μακροδομή της μελέτης [25]

5. Συζήτηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

- Με την μέθοδο FSW πάνω στην τροποποιημένη φρεζομηχανή μπορούν να πραγματοποιηθούν καλές συγκολλήσεις με καλή επαναληψιμότητα
- Τα κράματα Al 2024, MgAZ31 καθώς και ο συνδυασμός αυτών σε διμεταλλικές συγκολλήσεις ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στη μέθοδο.
- Μπορούν χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια να γίνουν συγκολλήσεις χωρίς μεγάλο απόβλητο, χωρίς εσωτερικά σφάλματα (όπως πορώδες), πλήρους διείσδυσης και άριστης συνοχής μεταξύ των δυο υλικών.
- Οι πόροι που κατά διαστήματα εμφανίζονται στις συγκολλήσεις οφείλονται καθαρά στη μεγάλη δυσκολία του να κρατηθούν σταθερές οι συνθήκες συγκόλλησης σε μια μη αυτοματοποιημένη μηχανή FSW όπως η τροποποιημένη φρεζομηχανή
- Οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού είναι κοντά με αυτές του μητρικού υλικού.
- Η θραύση όλων των δοκιμών εφελκυσμού γίνεται στην advancing πλευρά και συγκεκριμένα στην περιοχή TMAZ
- Το όριο διαρροής πλησιάζει αρκετά αυτό το μητρικού υλικού.
- Όσο οι συνθήκες διατηρούνται σταθερές κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό.
- Μελετώντας την μικροδομή των μετάλλων μετά την συγκόλληση μπορούν εύκολα να μελετηθούν οι τρεις βασικές περιοχές NZ, TMAZ, HAZ
- Οι τιμές των μικροσκληρομετρήσεων είναι μεγαλύτερες στο κέντρο της συγκόλλησης και πέφτουν σχεδόν γραμμικά πηγαίνοντας από το NZ στο base metal
- Το μέγεθος των κόκκων βάσει της μικροδομής ακολουθεί την σειρά HAZ>BM>TMAZ>NZ
- Η τελική ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται καθαρά από την εμπειρία του χρήστη καθώς η φρέζα που χρησιμοποιήθηκε δεν αποτελεί μια αυτοματοποιημένη μηχανή FSW

*Μέρος της παρούσας εργασίας, παρουσιάστηκε στο 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο
Μεταλλικών Υλικών, στα Ιωάννινα.*

6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κύριος σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η επίτευξη διμεταλλικών συγκολλήσεων μεταξύ των κραμάτων Al 2024 και Mg AZ31. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα τροποποιημένη φρέζα του εργαστηρίου των υλικών.

Επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος χρήζει σημαντικής έρευνας και πειραμάτων θα ήταν πολύ θετικό η αγορά μιας αυτοματοποιημένης μηχανής FSW ώστε να πραγματοποιούνται τα πειράματα με ακριβείς και σταθερές συνθήκες κάνοντας έτσι την διεξαγωγή αυτών πιο εύκολη καθώς και κρατώντας απόλυτα σταθερές τις συνθήκες καθ' όλο το μήκος της συγκόλλησης.

Επίσης, σημαντική είναι και η εισαγωγή ενός θερμοστοιχείου ώστε να μελετάται παράλληλα και η επίδραση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα συγκολλημένα αντικείμενα.

Τέλος πολύ ενδιαφέρον θα ήταν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις όπου το εργαλείο δεν θα είναι κεντραρισμένο πάνω στην γραμμή της συγκόλλησης (center line) αλλά λίγο πιο μέσα προς την advancing ή retreating πλευρά ώστε να μελετηθεί εκτενέστερα η ροή του ενός υλικού μέσα στο άλλο.

Βιβλιογραφία

- [1] Στέφανος Αθανασιάδης, *Τροποποίηση φρεζομηχανής για την διενέργεια συγκολλήσεων FSW και αξιολόγηση συγκολλήσεων FSW κράματος AL 5083-H32, Διπλωματική εργασία.*
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding
- [3] B. RAMS , A. PIETRAS , K. MROZKA, *FRICION STIR WELDING OF ELEMENTS MADE OF CAST ALUMINIUM ALLOYS*
- [4] Κουλιδης Δημήτρης, *Διερεύνηση συμπεριφοράς κόπωσης αεροπορικού κράματος Al 2195 με διαμήκη συγκόλληση διά τριβής και ανάμιξης (FSW), διπλωματική εργασία. TMM, 2010*
- [5] <http://www.indiantradebird.com/r-v-machine-tools-friction-stir-welding-machine?spid=NDIzMSw1>
- [6] http://www.dlr.de/wf/en/desktopdefault.aspx/tabid-2132/2294_read-3738/
- [7] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%BB%CE%B9%CE%BF>
- [8] <http://www.aluminium.org.gr/%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%85%CE%BC%CE%AF%CE%BD%CE%B9%CE%BF-i-129.html>
- [9] <http://www.elval.gr/default.asp?pid=179&la=1>
- [10] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024O>
- [11] https://www.arconic.com/mill_products/catalog/pdf/alloy2024techsheet.pdf
- [12] <http://www.suppliersonline.com/propertypages/2024.asp>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_alloy
- [14] <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6895>
- [15] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6707>
- [16] <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/magnesium/application.shtml>
- [17] <http://www.holroyd.com/blog/friction-stir-welding-applications/>
- [18] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/application-of-friction-stir-welding-in-the-shipbuilding-industry-february-2000/>
- [19] A. Grimm,S.A. Silva,G. Göbel,J. Standfuss,B. Brenner,E. Beyer,Friction Stir welding of Light Metals for Industrial Applications
- [20] <http://world.honda.com/automobile-technology/FSW/topic1/>
- [21] http://www.pressure-transducers-sensor.com/Tedea_Huntleigh
- [22] ZHIYUAN LIANG, KE CHEN, XIAONA WANG, JUNSHAN YAO, QI YANG,

LANTING ZHANG, and AIDANG SHAN, *Effect of Tool Offset and Tool Rotational Speed on Enhancing Mechanical Property of Al/Mg Dissimilar FSW Joints*
Mechanical Property of Al/Mg Dissimilar FSW Joints

[23] M.W. Thomas, J. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, *Friction Stir Butt welding*, GB Patent Application No.9125978.8 Dec 1991. US Patent No.5460317, (Oct.1995).

[24] Yutaka S. Sato, Seung Hwan C. Park, Masato Michiuchi, Hiroyuke Kokawa, *Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys*

[25] Sebastian Balos, Laposava Sidjanin, Miroslav Dramicanin, Danka Labus Zlatanovic, Aco Antic, *FSW WELDING OF Al-Mg ALLOY PLATES WITH INCREASED EDGE ROUGHNESS USING SQUARE PIN TOOLS OF VARIOUS SHOULDER GEOMETRIES*

[26] Taiki Morishige, Atsushi Kawaguchi, Masato Tsujikawa, Makoto Hino, Tomotake Hirata, Kenji Higashi, *Dissimilar Welding of Al and Mg Alloys by FSW*