



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Διμεταλλικές Συγκολλήσεις (Lap Joints) Κραμάτων
Αλουμινίου και Χαλκού (AA5083-H111 : Cu-DHP) με τη
μέθοδο δια τριβής με ανάδευση (FSW)**

Διπλωματική Εργασία

Σκούτας Μιλτιάδης

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Dr. – Ing. Άννα Δ. Ζερβάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Διμεταλλικές Συγκολλήσεις (Lap Joints) Κραμάτων
Αλουμινίου και Χαλκού (AA5083-H111 : Cu-DHP) με τη
μέθοδο δια τριβής με ανάδευση (FSW)**

Διπλωματική Εργασία

Σκούτας Μιλτιάδης

Τριμελής Επιτροπή :

Τσούβαλης Νικόλαος, Καθηγητής

Γκίνης Αλέξανδρος-Αλβέρτος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ζερβάκη Άννα, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ολοκληρώνοντας την εν λόγω εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που βοήθησαν στην διεκπεραίωσή της, καθώς έτσι κλείνει ο κύκλος των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κυρία Άννα Ζερβάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας την εν λόγω διπλωματική εργασία. Την ευχαριστώ θερμά για τη συνεχή καθοδήγηση, για την άμεση συνεργασία καθώς και για όλες τις συμβουλές, ειδικές ή γενικές, που μου χάρισε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, ευχαριστώ δεόντως το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας Θ.Τσιούρβα, Χ. Ξάνθη για την πολύτιμη βοήθεια που μου έδωσαν όποτε την χρειάστηκα. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Χ. Σαράφογλου, για την υπομονή και τον αστείρευτο χρόνο που μου αφιέρωσε επικουρώντας την εργασία σε ό,τι αφορά το εργαστηριακό κομμάτι. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κύριο Γ.Βοσνιάκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, για την παραχώρηση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών, καθώς επίσης και τον Ι.Παπαντωνίου, Διδάκτωρ της ΣΜΜ για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Π.Τσακιρίδη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, ο οποίος βοήθησε επίσης όταν του ζητήθηκε και επίσης ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου για το ευχαριστώ κλίμα που επικρατούσε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης τούτης της εργασίας, στο εργαστήριο της σχολής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τους γονείς μου, Δημήτρη και Ασημούλα, για την συνεχή ψυχολογική και συναισθηματικά στήριξη που μου πρόσφεραν, καθώς επίσης και τα αδέρφια μου, Λεμονιά και Απόστολο, που ήταν αρωγοί όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ένωση διαφορετικών μετάλλων, και ειδικά του Al-Cu, αποτελούσε πάντα μια πρόκληση για τη βιομηχανία συγκόλλησης. Τέτοια προϊόντα με βάση το αλουμίνιο και με επικάλυψη χαλκού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αεροδιαστημική, τη χημική, τη μεταφορική, την ηλεκτρονική και την ενεργειακή βιομηχανία, προκειμένου να συνδυαστούν οι βελτιωμένες μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του χαλκού με το χαμηλό ειδικό βάρος και κόστος του αλουμινίου. Μια από τις πιο γνωστές τεχνικές για την επίτευξη αυτού του στόχου σήμερα είναι η συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW), η οποία μπορεί να προσφέρει μια αποδεκτή ως προς την μικροδομή, ένωση.

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (FSW) εισήχθη πρόσφατα ως νέα τεχνική συγκόλλησης από το The Welding Institute (TWI) στη Μεγάλη Βρετανία. Η ανάμειξη των μετάλλων χωρίς τήξη, την ορίζει ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης. Η ανάγκη συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου, διαφορετικών ή μη, σε συνδυασμό με τη συγκόλληση κραμάτων χάλυβα με κράματα αλουμινίου, οδήγησε στη διαμόρφωση αυτής της μεθόδου. Η διατήρηση της στερεάς κατάστασης των μετάλλων καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και η μη ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιακών ροών, οδηγεί τις συνδέσεις FSW να έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες καθώς και σε μια βελτιωμένη ζώνη θερμικής επίδρασης (HAZ) σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσδιορίσει τις βέλτιστες παραμέτρους συγκόλλησης FSW Al-Cu, με επικάλυψη (lap joint). Μετά από σειρά πειραμάτων στη μηχανή συγκόλλησης, ακολούθησε ανάλυση μεταλλογραφίας, μικροδομής και μικροσκληρότητας προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες παράμετροι της διαδικασίας. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης για την εκτενέστερη ανάλυση επιλεγμένων συγκολλήσεων, καθώς και ανάλυση EDS για να προσδιοριστεί η στοιχειομετρία των φάσεων που δημιουργήθηκαν στην περιοχή της συγκόλλησης. Η όλη διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο AA5083-H111 και καθαρός χαλκός ως. Το πρώτο στάδιο ήταν η επιλογή του βέλτιστου εργαλείου. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν ορισμένα περαιτέρω πειράματα για να αποφασιστεί ποια γωνία ήταν καταλληλότερη. Και τέλος, αλλάζοντας την ταχύτητα πρόωσης ή την ταχύτητα περιστροφής τα πειράματα ολοκληρώθηκαν, καταλήγοντας στις βέλτιστες παραμέτρους, πάντα με γνώμονα αξιολόγησης την δομή και την μικροσκληρότητα.

ABSTRACT

Joining of different metals, and specially Al-Cu, has always been a challenge for the welding industry. Such aluminum-based with coat of copper systems can be used in aerospace, chemical, transport, electronic, and power industries, in order to combine copper's improved mechanical, thermal and electrical properties with aluminum's low specific weight and cost. One of the most known techniques to achieve this today is the Friction Stir Welding (FSW) process, which can deliver a sound structural joint.

Friction Stir Welding (FSW) was recently introduced as a new welding technique by The Welding Institute (TWI) in Great Britain. Joining of metals without melting them, but only plasticizing them to a certain degree, defines this as a solid-state welding process. The need of welding Al alloys, in dissimilar joint configurations, in addition to the difficultness encountered in welding of steels with Al alloys, led to the development of this method. Retaining the solid state of the metals throughout the process and not undergoing through conventionally high thermal flows, leads to the FSW joints exhibiting better mechanical properties in comparison with the conventional welding methods.

The aim of the present Diploma Thesis is to identify the optimal parameters of an Al-Cu Friction Stir Welding on a lap joint. After conducting experiments on the welding machine, metallography, microstructure and micro hardness analyses were carried out in order to determine the optimum parameters of the process. Scanning Electron Microscope was used to analyze selected specimens while EDS analysis was performed to identify IMC within weld area. The whole process took place at the Shipbuilding Technology Laboratory at the School of Naval and Marine Engineering of the National Technical University of Athens.

For the current investigation, Al alloy AA5083-H111 was used as a base metal and Cu-DHP as the one on top. The first stage was to choose the optimal tool. After that, some further experiments were conducted to decide which angle was more suitable. As a final step, the transverse and/or the rotational speed were varied pointing out suggestions for the optimum welding parameters.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	1
1.2	Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας.....	2
1.3	Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας	3
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1	Βασικές Αρχές της Συγκόλλησης δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding – FSW) 4	
2.2	Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση για Αλουμίνιο – Χαλκό (Al:Cu)	13
2.3	Ζώνες Συγκόλλησης.....	20
2.4	Δυναμικά Φαινόμενα Επαναφοράς.....	21
2.4.1	Δυναμικά Φαινόμενα Επαναφοράς	22
2.4.2	Δυναμική Ανακρυστάλλωση	23
2.4.3	Ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση	24
2.4.4	Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση ή δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος	25
2.4.5	Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση	26
2.5	Εφαρμογές της FSW	27
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ, ΥΛΙΚΑ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	31
3.1	Μηχανές Συγκόλλησης.....	31
3.1.1	Μηχανή Συγκόλλησης ENT	31
3.1.2	Μηχανή Συγκόλλησης ETK (ΣΜΜ)	35
3.2	Εργαλείο Συγκόλλησης.....	36
3.3	Ελάσματα προς συγκόλληση.....	38
3.4	Μεταλλογραφική Προετοιμασία	40
3.5	Οπτική και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία	43
3.6	Μέτρηση της κατανομής της μικροσκληρότητας	44
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ	46
4.1	Ονοματολογία Δοκιμών	46
4.2	Αξιολόγηση Συγκολλήσεων Πρώτου Μέρους.....	48
4.3	Αξιολόγηση Συγκολλήσεων Δεύτερου Μέρους	77
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	107
5.1	Συμπεράσματα	107
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	108
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109

Εικόνα 2-1 Αρχής της μεθόδου FSW [4].....	5
Εικόνα 2-2 Οπή πείρου σε κράμα αλουμινίου AA6082-T6 κατά την απομάκρυνση του εργαλείου [4].....	9
Εικόνα 2-3 Ζώνες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση [3] ..	11
Εικόνα 2-4 Διάκριση μεταξύ της ροής που προκαλείται από το περιαυχένιο και αυτής που προκαλείται από τον πείρο τους εργαλείου [3]	12
Εικόνα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής του υλικού κατά την FSW σε εγκάρσια τομή.[3]	13
Εικόνα 2-6 Καθαρός Χαλκός [5]	14
Εικόνα 2-7 Καθαρό Αλουμίνιο [5]	17
Εικόνα 2-8 Ζώνες συγκόλλησης FSW σε συγκολλημένο κράμα AA6082-T6 [4]	20
Εικόνα 2-9 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στο οποίο απεικονίζονται οι αλλαγές στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της δυναμικής αποκατάστασης [3].....	23
Εικόνα 2-10 Ασυνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση χαλκού [4]	25
Εικόνα 2-11 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της ασυνεχούς ανακρυστάλλωσης. a-d)Μεγάλο αρχικό μέγεθος κόκκων, e) Μικρό αρχικό μέγεθος κόκκων (Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τα παλιά όρια των κόκκων). [4]	25
Εικόνα 2-12 α) Ανάπτυξη οδοντώσεων στα όρια των υποκόκκων με μεγάλη γωνία αποπροσανατολισμού, b) παραμόρφωση και c) περιστροφή των ορίων των υποκόκκων [4]	26
Εικόνα 2-13 Με αύξηση της παραμόρφωσης, τα όρια των κόκκων μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού (παχιές γραμμές) πλησιάζουν (μεταξύ τους) ενώ το μέγεθος των υποκόκκων παραμένει σταθερό. Τελικά τα όρια των κόκκων συναντώνται με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροδομής κόκκων με υψηλή γωνία αποπροσανατολισμού. [4]	27
Εικόνα 2-14 (α) Κρουαζιερόπλοιο «The World», της εταιρείας Fosen Mek, (β) ενισχυμένα ελάσματα καταστρώματος προκατασκευασμένα με FSW για το κρουαζιερόπλοιο «The World». [3]	28
Εικόνα 2-15 (α) Πλήρη του στρατιωτικού σκάφους (X-Craft class) «Sea Fighter» της Nichols Bros, (β) Στρατιωτικό σκάφος αλουμινίου τύπου '022' stealth. [3]	28
Εικόνα 3-1 Μηχανή συγκόλλησης διά τριβής με ανάδευση του ENT.....	32
Εικόνα 3-2 Ιδιοσυσκευή συγκράτησης δοκιμίων.....	33
Εικόνα 3-3 Κάτοψη της ιδιοσυσκευής συγκράτησης στην εργαλειομηχανή [2]	34
Εικόνα 3-4 Μηχανολογικό φύλλο διαστασιολόγησης της βάσης έδρασης [3]	34
Εικόνα 3-5 Τροποποιημένη φρεζομηχανή για συγκόλληση FSW (ΕΚΤ-Σχολή ΜΜ).....	35
Εικόνα 3-6 Το εργαλείο συγκόλληση που χρησιμοποιήθηκε σε όψη στο επίπεδο xy και yz. 37	
Εικόνα 3-7.....	37
Εικόνα 3-8 Παρουσίαση των ελαττωματικών πάσων με εργαλείο με σπείρωμα	38
Εικόνα 3-9 Αρχή λειτουργίας XRF	39
Εικόνα 3-10 Το XRF S1 Turbo Bruker κατά την εξέταση δείγματος ελάσματος αλουμινίου ..	40
Εικόνα 3-11 Ορθογώνιο καλούπι εγκιβωτισμού δοκιμίων.....	41
Εικόνα 3-12 Καλούπι Φ30 και δοκίμιο μετά από εγκιβωτισμό	41
Εικόνα 3-13 Εξοπλισμός λείανσης - στίλβωσης τύπου “Stuers, LaboPol-5” του «Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας»	42
Εικόνα 3-14 Το οπτικό μικροσκόπιο (αριστερά) και το οπτικό στερεόσπιο (δεξιά) του ENT. 43	
Εικόνα 3-15 Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Jeol JSM 6390LV του ENT.....	44
Εικόνα 3-16 Το μικροσκληρόμετρο “Wolpert Wilson 402MVD” του ENT	45

Εικόνα 3-17 Ζώνες μέτρησης μικροσκληρότητας δοκιμίου.....	45
Εικόνα 4-1 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 1.....	48
Εικόνα 4-2 Μακρογραφία του δοκιμίου 1.....	49
Εικόνα 4-3 Μικρογραφία του δοκιμίου 1. Σημεία Α,Β,Γ,Δ,Ε από την Εικόνα 4.2.....	52
Εικόνα 4-4 Λήψεις από το SEM που αφορούν υποπεριοχές δοκιμίου.....	53
Εικόνα 4-5 Αποτελέσματα EDS για την περιοχή της Εικόνας 4.4.Α.....	54
Εικόνα 4-6 Αποτελέσματα EDS για την περιοχή της Εικόνας 4.3.Ε & της Εικόνας 4.4.Ε.....	55
Εικόνα 4-7 Ραφή συγκόλλησης Δοκιμίου 2L.....	56
Εικόνα 4-8 Μακρογραφία δοκιμίου 4.2 και σημεία ενδιαφέροντος.....	56
Εικόνα 4-9 Μικρογραφία δοκιμίου 2L. Σημεία ενδιαφέροντος εικόνας 4.8.....	58
Εικόνα 4-10 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 2R.....	59
Εικόνα 4-11 Μακρογραφία δοκιμίου 2R και σημεία ενδιαφέροντος.....	59
Εικόνα 4-12 Μικρογραφία δοκιμίου 2R. Σημεία ενδιαφέροντος Εικόνα 4.11.....	61
Εικόνα 4-13 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 3L.....	62
Εικόνα 4-14 Μακρογραφία δοκιμίου 3L και σημεία ενδιαφέροντος.....	62
Εικόνα 4-15 Μικρογραφία δοκιμίου 3L. Σημεία ενδιαφέροντος εικόνας 4.13.....	64
Εικόνα 4-16 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 3R.....	65
Εικόνα 4-17 Μακρογραφία δοκιμίου 3R και σημεία ενδιαφέροντος.....	65
Εικόνα 4-18 Μικρογραφία δοκιμίου 3R & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνα 4.17.....	67
Εικόνα 4-19 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 4L.....	68
Εικόνα 4-20 Μακρογραφία του δοκιμίου 4L & σημεία ενδιαφέροντος.....	68
Εικόνα 4-21 Μικρογραφία δοκιμίου 4L & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.20.....	70
Εικόνα 4-22 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 4R.....	71
Εικόνα 4-23 Μακρογραφία δοκιμίου 4R & σημεία ενδιαφέροντος.....	71
Εικόνα 4-24 Μικρογραφία δοκιμίου 4R & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.23.....	73
Εικόνα 4-25 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 5.....	74
Εικόνα 4-26 Μακρογραφία δοκιμίου 5 & σημεία ενδιαφέροντος.....	74
Εικόνα 4-27 Μικρογραφία δοκιμίου 5 & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.26.....	76
Εικόνα 4-28 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου Α.....	77
Εικόνα 4-29 Μακρογραφία δοκιμίου Α & σημεία ενδιαφέροντος.....	77
Εικόνα 4-30 : Μικρογραφία δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνα 4.29.....	80
Εικόνα 4-31 Μικρογραφία δοκιμίου μέσω SEM. Παρατηρείται με το πιο γκρι ανοιχτό χρώμα ο χαλκός και με το πιο σκούρο το αλουμίνιο. Διακρίνονται οι ενώσεις που έχουν σχηματιστεί μεταξύ των δύο υλικών καθώς επίσης και η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου.....	81
Εικόνα 4-32 Χημική ανάλυση σε σημείο με καθαρό ΑΙ.....	82
Εικόνα 4-33 Χημική ανάλυση για την εύρεση ενώσεων της περιοχής (στερεό διάλυμα ΑΙ-Cu).....	82
Εικόνα 4-34 Χημική ανάλυση περιοχής χαλκού.....	83
Εικόνα 4-35 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου Β.....	84
Εικόνα 4-36 Μακρογραφία του δοκιμίου Β & σημεία ενδιαφέροντος.....	84
Εικόνα 4-37 Line scan της περιοχής της Εικόνας 4.38.Α. Χαρακτηριστική κατανομή αλουμινίου και χαλκού.....	85
Εικόνα 4-38 Μικρογραφία του δοκιμίου Β στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνα 4.36.....	87
Εικόνα 4-39 Μικρογραφία δοκιμίου στην περιοχή που βρίσκονται τα rings. Γενική φωτογραφία μικροδομής και παρατήρηση σωματιδίων χαλκού (Α) x100. Πιο λεπτομερή άποψη για τον χαλκό στο εσωτερικό του δοκιμίου (Β) x500. Παρατήρηση των σωματιδίων	

χαλκού και των ενώσεων με το αλουμίνιο (Γ) x1000. Λεπτομερέστατη μικρογραφία για την παρατήρηση των δυναμικώς ανακρυσταλλωμένων κόκκων (Δ) x2000	88
Εικόνα 4-40 Μικρογραφία και λήψεις από το SEM, με τη βοήθεια του backscattering. Μεγέθυνση συνεχώς στην ίδια περιοχή. Φαίνεται τελικώς πως υπάρχει δυναμική ανακρυστάλλωση	89
Εικόνα 4-41 Αποτελέσματα EDS για εύρεση διμεταλλικών ενώσεων στο εσωτερικό της Εικόνας 4.40.A. Με την πιο λευκή απόχρωση απεικονίζεται ο χαλκός	90
Εικόνα 4-42 Αποτελέσματα EDS για εύρεση διμεταλλικών ενώσεων στο εσωτερικό της Εικόνας 4.40.A. Με την πιο λευκή απόχρωση απεικονίζεται ο χαλκός. Παρατηρούνται σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου	91
Εικόνα 4-43 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου Γ	92
Εικόνα 4-44 Μακρογραφία δοκιμίου Γ & σημεία ενδιαφέροντος	93
Εικόνα 4-45 Μικρογραφία του δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.44	95
Εικόνα 4-46 Λήψεις του δοκιμίου από το SEM. Παρατήρηση της μικροδομής στην επιφάνεια και στο nugget του δοκιμίου (Α) (x70). Μεγαλύτερη λεπτομέρεια αριστερά (Β) και δεξιά (Γ) του hook (x100). Σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου κοντά στην επιφάνεια του ελάσματος (Δ) (x1000)	97
Εικόνα 4-47 Αποτελέσματα EDS στο εσωτερικό του nugget	98
Εικόνα 4-48 Αποτελέσματα EDS αριστερά της περιοχής που υφίσταται η απουσία υλικού. 98	
Εικόνα 4-49 Αποτελέσματα EDS δεξιά της περιοχής που υφίσταται η απουσία υλικού	99
Εικόνα 4-50 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου	100
Εικόνα 4-51 Εικόνα 4-51 Μακροδομή του δοκιμίου Δ & σημεία ενδιαφέροντος	101
Εικόνα 4-52 Μικροδομή του δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.51	103
Εικόνα 4-53 Μικρογραφία nugget μέσω του SEM. Λήψη μικροδομής στο κέντρο του δοκιμίου (Α) x110. Ενδότερη μελέτη του nugget και των rings (Β) x500. Λήψη στο εσωτερικό των rings. Σωματίδια χαλκού εμφανίζονται σχηματισμένα στο εσωτερικό (με ανοιχτή απόχρωση ο χαλκός)	105
Εικόνα 4-54 Χημική ανάλυση στην περιοχή των rings	106
Εικόνα 4-55 Χημική ανάλυση στην περιοχή αναμειξιμότητας κοντά στην επιφάνεια	106

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τάση στις μέρες μας είναι, ολοένα και περισσότεροι κλάδοι να προσπαθούν να βελτιώσουν την ανταγωνιστικότητά τους, σχεδιάζοντας προϊόντα υψηλότερης απόδοσης, κατασκευασμένα με αποτελεσματικές μεθόδους και χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πολλές από αυτές τις εξελίξεις, στηρίζονται στη βελτιστοποίηση υλικών που απαιτεί προηγμένες λύσεις επεξεργασίας, όπως η σύνδεση των υλικών. Για αυτόν τον λόγο, η επιστημονική κοινότητα εργάζεται με σκοπό να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις και προκειμένου να προτείνει καινοτόμες λύσεις και τεχνογνωσία στη βιομηχανία. Από την επινόησή της στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από το TWI [1], η Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding – FSW), μία μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, δίνει λύση σε εφαρμογές συγκόλλησης διαφορετικών μετάλλων, που είναι αδύνατες με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μετωπικές συγκολλήσεις (butt joints) όσο και σε συγκολλήσεις επικάλυψης (lap joints), όπου υπάρχει η ανάγκη μελέτης. Διμεταλλικές συγκολλήσεις όπως κραμάτων αλουμίνιο με χάλυβα, κραμάτων αλουμίνιο με χαλκό είτε χάλυβα με κάποιο άλλο σιδηρούχο μέταλλο έχουν γίνει πλέον σχεδόν εφικτές καθώς η διαδικασία αυτή επιτρέπει σύνδεση υλικών χωρίς τήξη και κατά συνέπεια χωρίς τις αντίστοιχες ατέλειες. Συνεπώς, υπάρχουν δυνατότητες βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και της κατασκευής διάφορων προϊόντων, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές εφαρμογές δίνεται η δυνατότητα να συνδυαστεί το αλουμίνιο, ως πιο φθηνό και ελαφρύ υλικό, με τον χαλκό, ως υλικό με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (384 W/mK έναντι 220 W/mK του Αλουμινίου) και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ($6,5 \times 10^7 \Omega^{-1} \times m^{-1}$ στους 273K έναντι 4×10^7 του Αλουμινίου), βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Αυτό είναι και το θέμα που θα μελετάται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία και αναλύεται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια, και αφορά την πειραματική διερεύνηση συγκόλλησης Al:Cu με τη μέθοδο FSW.

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών (ΣΝΜΜ) του ΕΜΠ. Η εργασία πραγματεύεται συγκολλήσεις τύπου lap joint μεταξύ ελάσματος αλουμινίου και ελάσματος χαλκού, καθώς και την βελτιστοποίησή τους με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των πειραμάτων. Για την αξιολόγηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μικροσκοπίας (οπτικό στερεοσκόπιο, οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM) καθώς και μικροσκληρομέτρηση. Τα πειράματα των συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκαν τόσο στο ENT, όσο και στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών (ΣΜΜ).

Σημειώνεται πως στο ENT υπάρχει διαρκής δραστηριότητα FSW, όμως είναι η πρώτη εργασία για συγκόλληση αλουμινίου – χαλκού. Αξιοποιήθηκαν, λοιπόν, πείροι που βρίσκονταν ήδη στο Εργαστήριο. Γενικότερα, στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές

δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με την συγκόλληση Al:Cu, άλλες στοχεύοντας στην επιλογή εργαλείου, άλλες σε βελτιστοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων και οι οποίες μελετήθηκαν προκειμένου να αντληθούν στοιχεία στα οποία βασίστηκε η παρούσα εργασία. Η διαδικασία περιελάμβανε αρχικώς την εκπαίδευση στην μηχανή συγκόλλησης με κάποια αρχικά περάσματα για την εμπέδωση της λειτουργίας της φρέζας όσο και στον υπόλοιπο εξοπλισμό του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των Συγκολλήσεων, παράλληλα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η εργασία ολοκληρώθηκε με τη διενέργεια των πειραμάτων συγκόλλησης και την αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκαν και τα οποία παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 4-5.

1.2 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, υπήρχαν εξ αρχής πολλές προκλήσεις που χρειάζονταν να ξεπεραστούν ή να συνυπολογιστούν ώστε να φτάσει ομαλά στο τέλος της. Η συλλογή και η μελέτη της βιβλιογραφίας σε οτιδήποτε αφορά συγκολλήσεις με την FSW και lap joint ήταν το πρώτο βήμα.

Στην συνέχεια ακολούθησαν οι πρώτες συγκολλήσεις, πρώτα εκπαιδευτικά και στην συνέχεια πιο στοχευμένα με βάση την βιβλιογραφία, από τις οποίες μερικές επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη. Η επιλογή έγινε αρχικά εξετάζοντας οπτικά ότι τα δύο ελάσματα συγκολλήθηκαν και το αποτέλεσμα ήταν αποδεκτό με βασικό κριτήριο την ένωση των ελασμάτων χωρίς την παρουσία επιφανειακών σφαλμάτων.

Τα εν λόγω δοκίμια εξετάστηκαν σε ό,τι αφορά τη μακροδομή και τη μικροδομή τους και με βάση τα οποία προέκυψαν αρχικά συμπεράσματα για τη συνέχεια της μελέτης. Έπειτα από την μελέτη στο SEM και τις παράλληλες μετρήσεις μικροσκληρότητας ολοκληρώθηκε ο πρώτος κύκλος συγκολλήσεων.

Στη συνέχεια, με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών πραγματοποιήθηκε ο δεύτερος κύκλος πειραμάτων. Η αντίστοιχη αξιολόγηση από την οποία προέκυψαν τα τελικά συμπεράσματα, τα οποία αναλύονται εκτενώς, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Οι στόχοι της εργασίας ήταν :

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση
- Χαρακτηρισμός των υλικών Al, Cu που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκολλήσεις
- Επιλογή του τύπου του εργαλείου
- Επιλογή μητρώου πειραματικών συνθηκών βασισμένο στην οπτική αξιολόγηση των αρχικών (διερευνητικών συγκολλήσεων)
- Εκτέλεση συγκολλήσεων
- Χαρακτηρισμός με μεθόδους οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και μικροσκληρομετρήσεων
- Επιλογή βέλτιστων πειραματικών συνθηκών και διατύπωση προτάσεων για μελλοντική συνέχεια της εργασίας

1.3 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, που στηρίζεται τόσο σε διεθνής εργασίες όσο και σε προηγούμενες Διπλωματικές ή Διδακτορικές Διατριβές του ENT και άλλων Εργαστηρίων από Ελληνικά Πανεπιστήμια. Περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά της FSW, καθώς επίσης και ανάλυση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται με έμφαση σε συγκολλήσεις τύπου lap joint μεταξύ Al και Cu.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι πειραματικές συνθήκες και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας. Αναλυτικότερα, περιγράφονται οι μηχανές συγκολλήσεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης και ο εξοπλισμός μέσω του οποίου έγιναν οι αξιολογήσεις των συγκολλήσεων (μικρογραφία, σκληρομέτρηση), καθώς και οι συνθήκες των πειραμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 δίδονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Παρουσιάζονται η μακροδομή και η μικροδομή των συγκολλήσεων αυτών καθώς και αναλύσεις των φάσεων που δημιουργούνται αλλά και μετρήσεις της κατανομής της μικροσκληρότητας των δοκιμίων.

Στο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα αυτών των αναλύσεων καθώς επίσης και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σε μελλοντικές εργασίες.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση των βασικών αρχών της μεθόδου συγκόλλησης FSW, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της, και παράλληλα παρουσίαση εργασιών που αφορούν συγκολλήσεις Al-Cu. Επίσης, επεξηγούνται τα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της συγκόλλησης και ακόμα αναφέρονται οι εφαρμογές της FSW στη βιομηχανία.

2.1 Βασικές Αρχές της Συγκόλλησης δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding – FSW)

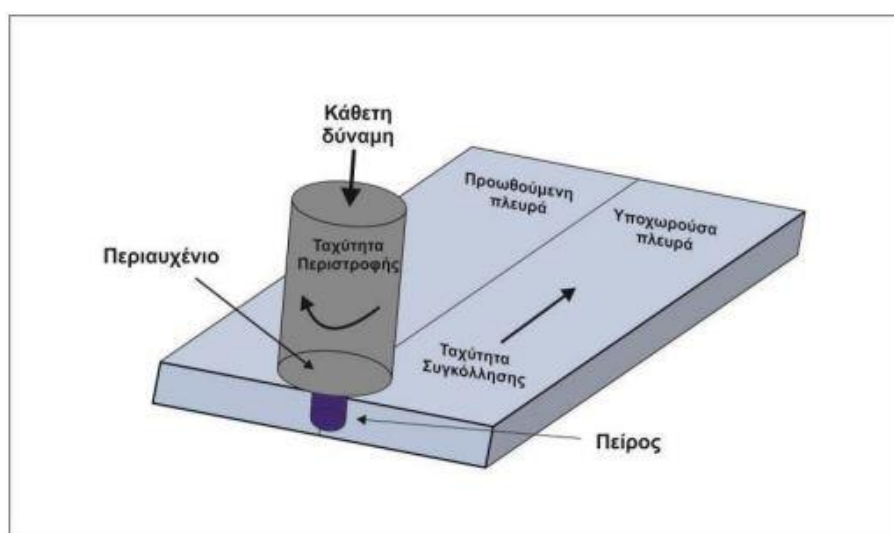
Η μέθοδος της FSW είναι μία από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις στον τομέα των συγκολλησέων και τα τελευταία 30 χρόνια. Εφευρέθηκε το 1991 από τον Wayne Thomas και τους συνεργάτες του στο Ινστιτούτο συγκολλήσεων στο Ηνωμένο Βασίλειο [1] και από τότε έχει προσφέρει πολλές νέες δυνατότητες για την κατασκευή συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας και ταυτόχρονα για την αποφυγή ελαττωμάτων που είναι κοινά σε πιο συμβατικές τεχνικές συγκόλλησης με τήξη των μετάλλων. Χαρακτηρίζεται ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης, επειδή κατά την πραγματοποίησή της τα δύο υλικά προς συγκόλληση φτάνουν μία θερμοκρασία της τάξης του 80% του σημείου τήξης, με αποτέλεσμα να μην λιώνουν. Στην αρχή η εφαρμογή της περιορίστηκε σε κράματα αλουμινίου, λόγω του χαμηλού σημείου τήξης τους, ενώ στις μέρες μας γίνεται έρευνα για την συγκόλληση ακόμα μερικών μεταλλικών κραμάτων, όπως οι χάλυβες, ο χαλκός και τα κράματα τιτανίου .

Τέτοιου είδους συγκολλήσεις παρουσιάζουν εξαιρετικά βελτιωμένη μικροδομή σε σύγκριση με τις συμβατικές συγκολλήσεις τήξης. Ατέλειες που σχετίζονται με την τήξη όπως οι πόροι, τα εγκλείσματα, η θερμή ρωγμάτωση κ.α. οι οποίες οφείλονται κατά μεγάλο βαθμό στην τήξη μετάλλων, εκλείπουν από την συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης. Κύριο πλεονέκτημα είναι ότι δύναται να συγκολληθούν διαφορετικά κράματα (dissimilar welding), πράγμα που είναι δύσκολο να συμβεί με τις συμβατικές μεθόδους, λόγω κυρίως των διαφορών στα σημεία τήξεως των κραμάτων [2]. Επίσης, κατά την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων δια τριβής δεν εκπέμπονται επικίνδυνες ουσίες, δεν παράγονται ρυπογόνα αέρια και οι απαιτήσεις ενέργειας είναι μικρότερες σε σχέση με τις περισσότερες συγκολλήσεις τήξης, θεωρώντας έτσι τέτοιες μεθόδους στην κοινότητα των συγκολλήσεων ως «πράσινες».

Για την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, γίνεται χρήση ενός μη καταναλίσκομενου εργαλείου συγκόλλησης, το οποίο αποτελείται από ένα περιαιχένιο (shoulder) και καταλήγει σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο πείρο (pin). Αυτό το εργαλείο, βυθίζεται και περιστρέφεται στις επαφόμενες ακμές των προς συγκόλληση ελασμάτων ύστερα από την εφαρμογή της κατάλληλης κάθετης αξονικής δύναμης (Εικόνα 2.1). Είτε ένα μέρος του περιαιχενίου είτε ολόκληρο το περιαιχένιο (εξαρτάται από το αν υφίσταται κλίση το εργαλείο) έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια των προς συγκόλληση υλικών, με αποτέλεσμα λόγω της τριβής να παράγεται θερμότητα. Η παραγόμενη θερμότητα λόγω τριβής και πλαστικής παραμόρφωσης που δημιουργεί ο πείρος κατά την περιστροφή του εντός των προς συγκόλληση πλακών προστιθέμενη στην θερμότητα λόγω της μεταξύ τους τριβής, ισοδυναμεί με την

συνολική θερμότητα, η οποία πλαστικοποιεί τα προς συγκόλληση υλικά, και στη συνέχεια το περιστρεφόμενο εργαλείο, έχοντας την κατάλληλη ταχύτητα πρόωσης αναδύει τα πλαστικοποιημένα πλέον υλικά και πραγματοποιείται η τελική συγκόλληση.

Οι συγκολλήσεις FSW χαρακτηρίζονται από δύο διαφορετικές πλευρές οι οποίες παρατηρούνται στο σχήμα 2.1: την προωθούμενη πλευρά (Advancing side) και την υποχωρούσα πλευρά (Retreating side). Η προωθούμενη πλευρά είναι εκείνη κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης, ενώ η υποχωρούσα είναι εκείνη κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής έχει αντίθετη κατεύθυνση με την ταχύτητα συγκόλλησης. Οι δύο αυτές πλευρές έχουν σημαντική επίδραση κυρίως στις συγκολλήσεις ανόμοιων κραμάτων κάτι που θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Λόγω των πολύ μεγάλων δυνάμεων και τάσεων που αναπτύσσονται κατά την υλοποίηση της συγκόλλησης, η μέθοδος αυτή απαιτεί ισχυρά μέσα συγκράτησης των πλακών, ενώ επίσης υπάρχει και περιορισμός στο ύψος του πείρου συγκόλλησης. Συνήθως, για συμβατικούς σχεδιαστικά πείρους, το ύψος τους πρέπει να είναι κατά 0,2 mm μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση πλακών [4].



Εικόνα 2-1 Αρχής της μεθόδου FSW [4]

Παράμετροι της μεθόδου

Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, οι οποίοι αλλάζοντας, έχουν διαφορετική επίδραση στην ποιότητα της ραφής που πραγματοποιείται. Αυτές είναι :

- Η ταχύτητα πρόωσης (mm/min)
- Η ταχύτητα περιστροφής (RPM)
- Η κάθετη αξονική δύναμη (kN)
- Το βάθος διείσδυσης του πείρου του εργαλείου (mm)
- Η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης

- Η γεωμετρία της επιφάνειας του περιαιχενίου
- Η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης (°)
- Η πλευρά τοποθέτησης του κάθε κράματος σε περίπτωση συγκόλλησης ανόμοιων κραμάτων
- Η προθέρμανση ή η ψύξη των προς συγκόλληση τεμαχίων

Ωστόσο είναι αξιοσημείωτο και πρέπει να τονιστεί πως οι δύο σημαντικότερες παράμετροι από τις προαναφερθείσες είναι η ταχύτητα περιστροφής μετρούμενη σε rpm καθώς και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, δηλαδή η ταχύτητα γραμμικής μετατόπισης του εργαλείου κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης μετρούμενη σε mm/min. Το εργαλείο μπορεί να περιστρέφεται είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα και αποτελεσματικά αναδεύει και αναμειγνύει τα υλικά μεταξύ τους ενώ σε συνδυασμό με την πρόωση καταφέρνει να μεταφέρει το υλικό που αναδεύεται από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου, διεκπεραιώνοντας έτσι τη διαδικασία συγκόλλησης. Η τριβή που παράγεται από την θερμότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας πρόωσης. [3]

Μία εξίσου σημαντική παράμετρος της διαδικασίας εκτός της γωνιακής και της γραμμικής ταχύτητας του εργαλείου είναι η γωνία κλίσης του άξονα του εργαλείου σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο. Η κλίση δίνεται στον άξονα πάντα προς την οπίσθια κατεύθυνση, την κατεύθυνση δηλαδή της συγκολλημένης επιφάνειας και εξασφαλίζει τη συγκράτηση του πλαστικοποιημένου υλικού από το περιαιχένιο εντός του πυρήνα συγκόλλησης. Η εν λόγω γωνία κλίσης τείνει να καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια μεταξύ 2° και 3° [4,6].

Τέλος, αυτό που επηρεάζει επίσης σημαντικά τον βαθμό ποιότητας των συγκολλήσεων είναι το βάθος διείσδυσης του πείρου εντός των τεμαχίων. Σε περίπτωση που το βάθος διείσδυσης είναι πολύ μικρό, το περιαιχένιο του εργαλείου δεν έρχεται σε επαφή με την άνω επιφάνεια των προς συγκόλληση ελασμάτων και έτσι δεν παρέχεται επαρκής θερμότητα. Αντίθετα, σε περίπτωση που το βάθος της διείσδυσης είναι πολύ μεγάλο, εξωθείται μεγάλη ποσότητα υλικού εκτός του πυρήνα συγκόλλησης (flash), το οποίο εναποτίθεται στην περιοχή της επιφανείας μετά το περιαιχένιο. Ακόμη, το flow arm τότε είναι πολύ παχύ και ενδεχομένως να δημιουργείται το φαινόμενο που είναι γνωστό ως «weld nugget collapse», δηλαδή μία κοίλη συγκόλληση, η οποία επιφέρει τοπική μείωση του πάχους των συγκολλημένων πλακών.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου και η στερεάς κατάστασης φύση της σε συνδυασμό με τη χαρακτηριστική μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες που οφείλονται σε αυτή, προσδίδουν στην FSW τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Άριστες μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων τεμαχίων
Οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Σε δημοσιευμένες εργασίες έχει πραγματοποιηθεί σύγκριση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση με την TIG (Tungsten Inert Gas) [7]. Παρατηρήθηκε ότι οι συγκολλήσεις FSW παρουσίασαν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα, όριο διαρροής,

αντοχή σε εφελκυσμό και επιμήκυνση) σε σχέση με τις συγκολλήσεις TIG, συμπεράσμα το οποίο αποδίδεται στη λεπτόκοκκη μικροδομή, αλλά και στις χαμηλότερες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες (κυρίως στη ΘΕΖ), οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερο ποσοστό διάλυσης των κατακρημνισμάτων. Οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν πολύ καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και από τις συγκολλήσεις P-GTAW (Pulsed current Gas Tungsten Arc Welding) [8, 9], ενώ παρουσιάζουν συγκρίσιμες μηχανικές ιδιότητες με συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με χρήση laser [9]. Ακόμη, σε εργασία που αφορά στη σύγκριση της FSW με την MIG (metal inert gas) για κράματα αλουμινίου [10] συμπεραίνεται ότι οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα, μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση σε σχέση με τις συγκολλήσεις MIG.

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

Σε έρευνα σχετική με τη διάβρωση με βελονισμούς σε συγκολλήσεις FSW και MIG [11] παρατηρήθηκε ότι οι συγκολλήσεις FSW παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση από τις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με MIG και μάλιστα η αντοχή σε διάβρωση των συγκολλήσεων αυτών (FSW) δεν είχε μεγάλες διαφορές με αυτή του μετάλλου βάσης. Επιπροσθέτως, οι συγκολλήσεις FSW παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση με βελονισμούς και σε ρωγμάτωση υπό μηχανική καταπόνηση σε σχέση με συγκολλήσεις GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)[17].

- Μικρές παραμορφώσεις, ακόμη και για συγκολλήσεις μεγάλου μήκους

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση εφαρμόζεται ευρέως σε κράματα αλουμινίου λόγω των χαμηλών παραμενουσών τάσεων και των μικρών παραμορφώσεων που προκαλούνται μετά τη συγκόλληση [11]. Επίσης, για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση είναι απαραίτητη η ισχυρή συγκράτηση των προς συγκόλληση τεμαχίων, όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως. Η ισχυρή αυτή συγκράτηση όμως δρα ως εξωτερικός περιορισμός, ο οποίος συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση διαφόρων ειδών παραμόρφωσης [3]. Στη μείωση των παραμορφώσεων συμβάλλει και η μικρή θερμική παροχή [3]. Η FSW αποτελεί μία μέθοδο συγκόλλησης με αρκετά χαμηλή θερμική παροχή (στερεάς κατάστασης συγκόλληση στην οποία δεν πραγματοποιείται τήξη) συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνικές τόξου.

- Απουσία ατελειών που προέρχονται από την τήξη

Η στερεάς κατάστασης φύση της συγκόλλησης αυτής έχει ως αποτέλεσμα την απουσία τήξης και κατά συνέπεια όλων των ατελειών που προέρχονται από τη τήξη, όπως το πορώδες, η ύπαρξη εγκλεισμάτων και άλλα.

- Δυνατότητα συγκόλλησης υλικών, των οποίων η συγκόλληση με τις συμβατικές μεθόδους είναι δύσκολη

Η συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου 2XXX και 7XXX, για παράδειγμα, είναι αρκετά δύσκολη με τις συμβατικές μεθόδους [12]. Με χρήση της FSW

όμως, η συγκόλληση των δύο αυτών σειρών αλουμινίου καθίσταται δυνατή έχοντας μάλιστα πολύ καλές ιδιότητες[13][14][15][16]. Επιπλέον, με χρήση της FSW είναι δυνατή η συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων είτε πρόκειται για συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου [4], είτε για συγκόλληση μεταξύ κράματος αλουμινίου και χάλυβα [4], είτε για συγκόλληση μεταξύ κράματος αλουμινίου και κράματος τιτανίου [18]. Πρέπει να αναφερθεί ότι η συγκόλληση μεταξύ αλουμινίου και χάλυβα, όπως και μεταξύ αλουμινίου και τιτανίου είναι εξαιρετικά δύσκολη με τεχνικές τόξου κυρίως λόγω της μεγάλης διαφοράς στα σημεία τήξης τους.

- Είναι πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί και ως ρομποτική
Γενικότερα, για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες εξοπλισμού παραγωγής: χειρωνακτικά, μερικώς αυτοματοποιημένα (fixed automation) και ρομποτικά [19]. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση παρατηρείται ανάπτυξη ισχυρών δυνάμεων, με αποτέλεσμα η συγκόλληση αυτή να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί χειρωνακτικά, αλλά μερικώς αυτοματοποιημένα και ρομποτικά [19].
- Δυνατότητα εφαρμογής σε όλες τις θέσεις και για όλους τους τύπους συγκόλλησης
Η αυτοματοποίηση της μεθόδου δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης των συγκολλήσεων είτε σε ευθεία, είτε σε καμπύλες τροχιές. Ακόμη, είναι πολύ ευέλικτη μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί για όλους τους τύπους συγκόλλησης, από απλές μετωπικές, επικάλυψης [20] μέχρι συγκολλήσεις τύπου T [4].
- Δεν απαιτούνται αναλώσιμα υλικά
Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτούνται αναλώσιμα υλικά, αφού δεν απαιτείται μέταλλο προσθήκης ή προστατευτικά αέρια για το Al. Ακόμη, τα εργαλεία συγκόλλησης είναι μη καταναλισκόμενα και η αντοχή τους σε φθορά αρκεί για τη συγκόλληση εξαιρετικά μεγάλου μήκους για τα κράματα αλουμινίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα συμβατικό εργαλείο συγκόλλησης δύναται να συγκολλήσει πάνω από 1 km κραμάτων αλουμινίου της σειράς 6XXX [The Welding Institute].
- Δεν χρειάζεται ειδική μηχανουργική κατεργασία προετοιμασίας των προς συγκόλληση τεμαχίων
Η FSW ουσιαστικά αποτελεί μία συγκόλληση τύπου “key-hole” με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται ειδική μηχανουργική κατεργασία για την πραγματοποίησή της, όπως για παράδειγμα στις συγκολλήσεις MIG, στις οποίες απαιτείται η δημιουργία λοξοτομής στα προς συγκόλληση τεμάχια.
- Δυνατότητα συγκόλλησης παχών ελασμάτων (>75 mm) αλουμινίου και χαλκού με ένα πέρασμα [The Welding Institute]

- Χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και εκπαίδευσης προσωπικού
- Ενεργειακά αποδοτική [The Welding Institute]
- Φιλική προς το περιβάλλον και βελτιωμένης ασφάλειας
Η μέθοδος αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον εξαιτίας της απουσίας των τοξικών αερίων και των πάσης φύσεως ακτινοβολιών. Για αυτό το λόγο αποκαλείται και ως “πράσινη κατεργασία” (green process).

Μειονεκτήματα της μεθόδου

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί μία σχετικά καινούργια μέθοδο συγκόλλησης και κατά συνέπεια συνοδεύεται από ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχή έρευνα που πραγματοποιείται βελτιώνονται ή επιλύονται. Τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί της μεθόδου είναι τα παρακάτω:

- Δημιουργία οπής πείρου
Μετά το πέρας της FSW, δημιουργείται μία οπή (pinhole or exit hole) στο τέλος της συγκόλλησης κατά την απομάκρυνση του εργαλείου, όπως παρατηρείται για παράδειγμα στην Εικόνα 2.2. Για την επίλυση του παρόντος προβλήματος πραγματοποιείται συνεχής έρευνα με ενθαρρυντικά αποτελέσματα [The Welding Institute, b]



Εικόνα 2-2 Οπή πείρου σε κράμα αλουμινίου AA6082-T6 κατά την απομάκρυνση του εργαλείου [4]

- Απαίτηση ύπαρξης ισχυρού συστήματος συγκράτησης των τεμαχίων
Κατά την πραγματοποίηση της μεθόδου ασκούνται αρκετά ισχυρές δυνάμεις (κάθετες, εγκάρσιες και παράλληλες προς την κατεύθυνση συγκόλλησης) με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η ύπαρξη ισχυρού συστήματος συγκράτησης των τεμαχίων. Το σύστημα συγκράτησης πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένο, αφού στην περίπτωση των αλουμινίων, οι δυνάμεις είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να παραμορφώσουν τοπικά τα προς συγκόλληση τεμάχια και κατά συνέπεια να μεταβάλλεται η αρχική γραμμή συγκόλλησης.
- Συχνά μικρότερη ταχύτητα συγκόλλησης από κάποιες συμβατικές μεθόδους

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση πολλές φορές έχει μικρότερη ταχύτητα συγκόλλησης από κάποιες συμβατικές μεθόδους. Η συνεχής όμως έρευνα και η χρήση αναπτυσσόμενων τεχνολογιών (όπως π.χ. χρήση ειδικά σχεδιασμένων εργαλείων και εξελιγμένων ή και ρομποτικών μηχανών συγκόλλησης) έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ταχύτητας συγκόλλησης.

- Μεγάλο κόστος απόκτησης του εξοπλισμού.
Ο εξοπλισμός για την πραγματοποίηση της μεθόδου ποικίλλει αναλόγως με τα διάφορα χαρακτηριστικά που διαθέτει (π.χ. δυνάμεις που ασκούνται, στιβαρότητα και άλλα). Ως συνέπεια αυτού ποικίλλει και το κόστος του εξοπλισμού για βιομηχανικές εφαρμογές, ξεκινώντας από λιγότερο από 100000\$ και φτάνοντας αρκετά εκατομμύρια δολάρια [19].
- Φθορά τους εργαλείου σε κράματα υψηλής αντοχής
Σε κράματα υψηλής αντοχής (π.χ. κράματα τιτανίου, χάλυβες υψηλής αντοχής), το εργαλείο φθείρεται πολύ γρήγορα. Η FSW των κραμάτων υψηλής αντοχής (π.χ. των χαλύβων) παρουσιάζει διάφορες δυσκολίες λόγω του ότι το υλικό του εργαλείου πρέπει να αντέχει αυξημένες τάσεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση [21]. Βέβαια, πραγματοποιείται συνεχής έρευνα με σκοπό να ξεπεραστούν οι διάφορες δυσκολίες.

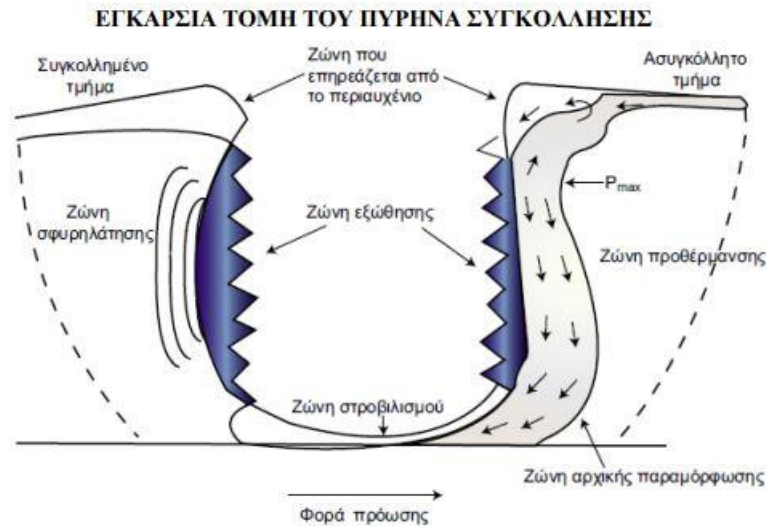
Ροή του υλικού

Κάποιοι παράγοντες όπως η γεωμετρία του εργαλείου, οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι αλλά και οι ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού παίζουν σημαντικό ρόλο στη ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. Ωστόσο, κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως π.χ. η έλλειψη συμμετρίας γύρω από την κεντρική γραμμή συγκόλλησης, εμφανίζονται σε όλες τις συγκολλήσεις. Το μεγαλύτερο μέρος του υλικού μετακινείται σε μία τελική θέση πιο πίσω από την αρχική του θέση και μόνο μια μικρή ποσότητα του υλικού της προωθούμενης πλευράς μεταφέρεται σε μία τελική θέση μπροστά από την αρχική του. Η προς τα πίσω κίνηση του υλικού περιορίζεται σε ένα μήκος όσο η διάμετρος πείρου πίσω από την αρχική του θέση. Επίσης, το περιουχένιο, εκτός από τον πείρο, επιδρά στην ροή του υλικού, ενώ ακόμη αν αυξηθεί η διάμετρος του πείρου, παραμένοντας σταθερά ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης, τότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μεταφορά υλικού εγκάρσιως της κεντρικής γραμμής συγκόλλησης [3].

Σε ό,τι αφορά τη διαμήκη ροή (ροή που δημιουργείται κατά την κατεύθυνση κίνησης του εργαλείου), η προκύπτουσα μικροδομή και τα χαρακτηριστικά ροής του μετάλλου κατά την FSW, λέγεται σύμφωνα με τις επικρατούσες θεωρίες πως μοιάζουν με εκείνα της θερμής διέλασης και σφυρηλάτησης. Έτσι, η FSW μπορεί να μοντελοποιηθεί διακρίνοντας πέντε συμβατικές ζώνες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 :

- τη ζώνη προθέρμανσης,
- τη ζώνη αρχικής παραμόρφωσης,
- τη ζώνη εξώθησης-διέλασης,

- τη ζώνη σφυρηλάτησης και
- τη ζώνη απόψυξης



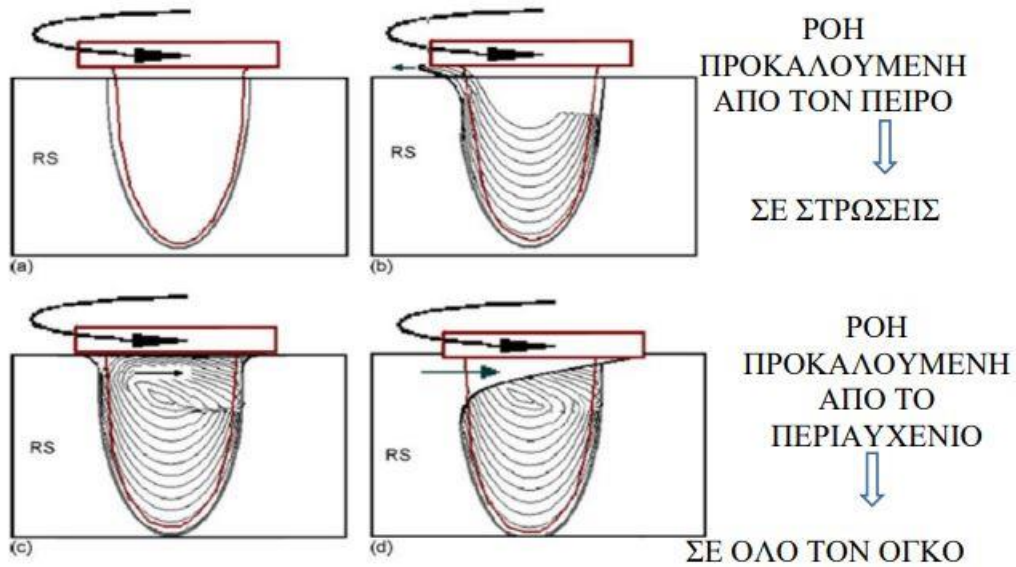
Εικόνα 2-3 Ζώνες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση [3]

Στην πρώτη ζώνη, η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της τριβής ανάμεσα στο περιστρεφόμενο εργαλείο και της αδιαβατικής θέρμανσης εξαιτίας της παραμόρφωσης του υλικού. Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου καθορίζουν την θερμότητα που αναπτύσσεται σε αυτή τη ζώνη. Καθώς το εργαλείο κινείται προς τα εμπρός σχηματίζεται μια αρχική ζώνη παραμόρφωσης. Το υλικό σε αυτή τη ζώνη ωθείται τόσο προς τα πάνω στη ζώνη του περιαυχενίου όσο και προς τα κάτω μέσα στη ζώνη εξώθησης. Στη ζώνη διέλασης το υλικό ρέει γύρω από τον πείρο από το μπροστινό μέρος προς τα πίσω. Μία κρίσιμη ισόθερμη σε κάθε πλευρά του εργαλείου ορίζει το πλάτος της ζώνης διέλασης, όπου τα μεγέθη των τιμών τάσης και θερμοκρασίας είναι ανεπαρκή για την επίτευξη ροής μετάλλου. Μετά τη ζώνη διέλασης εντοπίζεται η ζώνη σφυρηλάτησης όπου το υλικό από το μπροστινό μέρος του εργαλείου συμπιέζεται στην κοιλότητα που προκύπτει από τη μετατόπιση του πείρου τόσο λόγω της υδροστατικής πίεσης που αναπτύσσεται καθώς το υλικό δεν έχει προλάβει να κρυώσει και να στερεοποιηθεί όσο και λόγω της ασκούμενης κάθετης δύναμης από το περιαυχένιο του εργαλείου. Τέλος, πίσω από τη ζώνη σφυρηλάτησης βρίσκεται η ζώνη απόψυξης όπου το υλικό ψύχεται υπό παθητικές ή εξαναγκαστικές συνθήκες ψύξης (συνήθως από τον αέρα του περιβάλλοντος) [3].

Σε ό,τι αφορά την εγκάρσια ροή του υλικού (ροή λόγω περιστροφικής κίνησης), η συνολική μεταφορά του πλαστικοποιημένου υλικού περιγράφεται από τρεις τύπους ροής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 :

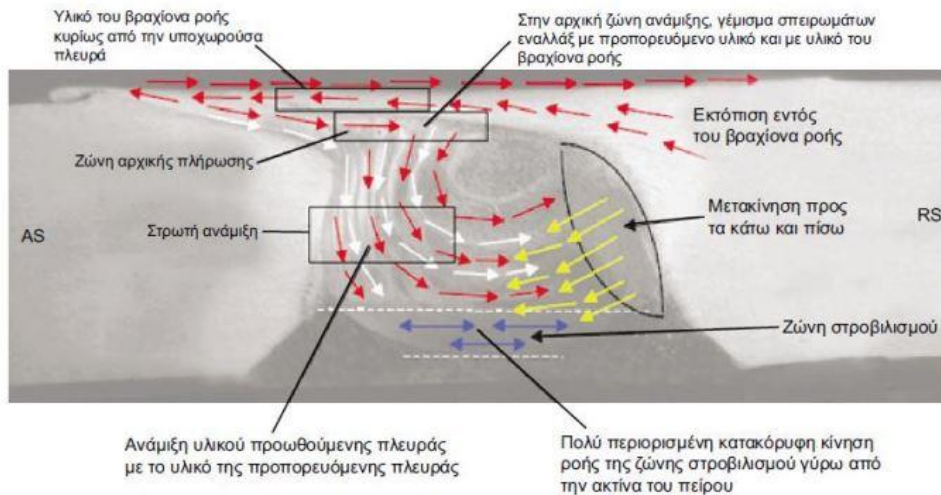
- Ροή προκαλούμενη από τον πείρο συγκόλλησης - σε διαδοχικές στρώσεις και από την προωθούμενη στην υποχωρούσα πλευρά
- Ροή που προκαλείται από το περιαυχένιο - αφορά στην κίνηση του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης, στην περιοχή κοντά στο εργαλείο. Η κίνηση προκαλείται από την περιστροφή του εργαλείου

και από την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου. Κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, υλικό από την υποχωρούσα πλευρά μεταφέρεται δια μέσου της επιφάνειας του περιαιχηνίου στην κορυφή της προωθούμενης πλευράς.



Εικόνα 2-4 Διάκριση μεταξύ της ροής που προκαλείται από το περιαιχηνίο και αυτής που προκαλείται από τον πείρο τους εργαλείου [3]

Κοιτώντας την Εικόνα 2.5 μπορεί κανείς να κατανοήσει ακόμα καλύτερα τους μηχανισμούς που η ροή του υλικού ακολουθεί κατά το εγκάρσιο επίπεδο. Ένα τμήμα του ρέοντος υλικού μεταφέρεται από την RS στην AS (κόκκινα βέλη). Ένας συγκεκριμένος όγκος υλικού από το άνω τμήμα της AS και κάτω από την αριστερή περιοχή του flow arm εναποτίθεται στο δεξί μέρος της ζώνης εξώθησης (στην AS) και στο μέσο του πυρήνα συγκόλλησης (λευκά βέλη). Ένας άλλος όγκος υλικού από τη ζώνη εξώθησης της RS φαίνεται να μετατοπίζεται κάτω και προς τα πίσω (κίτρινα βέλη). Το κάτω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης απαρτίζεται από τη ζώνη στροβιλισμού (μπλε βέλη) [3].



Εικόνα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής του υλικού κατά την FSW σε εγκάρσια τομή.[3]

2.2 Συγκόλληση δια Τριβής με Ανάδευση για Αλουμίνιο – Χαλκό (Al:Cu)

Ως μέθοδος στερεάς κατάστασης, η FSW πραγματοποιείται κάτω από τις θερμοκρασίες τήξης των υλικών που χρησιμοποιούνται, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Συνεπώς, έχουν δημιουργηθεί δυνατότητες συγκόλλησης ανόμοιων υλικών με πολύ διαφορετικές ιδιότητες, που με τις συμβατικές μεθόδους τήξης θα ήταν δύσκολο ή ακατόρθωτο να συμβούν. Η διαφορά στις θερμοκρασίες τήξης των υλικών, όπως για παράδειγμα το αλουμίνιο και ο χαλκός, καθιστούν πολύ δύσκολη την επίτευξη ποιοτικών συγκολλήσεων με τις γνωστές μεθόδους. Διάφορα ζητήματα όπως η διαφορετική συμπεριφορά παραμόρφωσης, ο σχηματισμός διμεταλλικών ενώσεων (InterMetallic Compounds) και οι διαφορές στις φυσικές ιδιότητες προάγουν την ασυμμετρία στη ροή του υλικού και την θερμότητα κατά τη παραγωγή συγκόλλησης ανόμοιων μετάλλων και πρέπει να ληφθούν υπόψη [15].

Για την επιλογή της τοποθέτησης των προς συγκόλληση ελασμάτων για μετωπική συγκόλληση FSW, για παράδειγμα, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν ο διαφορετικός μηχανισμός ροής στην AS και στην RS. Αν το υλικό στην υποχωρούσα πλευρά δεν μαλακώσει αρκετά κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, τότε αυτό δεν θα κινηθεί με ευκολία γύρω από τον πείρο του εργαλείου. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό να τοποθετείται το σκληρότερο και ισχυρότερο υλικό στην προωθούμενη πλευρά (AS), ώστε να μπορεί να ρέει πιο εύκολα γύρω από το εργαλείο και να οδηγεί σε ισχυρότερες συγκολλήσεις [4].

Οι διμεταλλικές ενώσεις ορίζονται ως στερεές φάσεις που περιέχουν δύο ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία, με προαιρετικά ένα ή περισσότερα μη μεταλλικά στοιχεία, των οποίων η κρυσταλλική δομή διαφέρει από εκείνη των άλλων συστατικών. Γενικότερα θεωρούνται πολύ σταθερές ενώσεις, ψαθυρές σε θραύση και με υψηλή θερμοκρασία τήξης. Αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στη συγκόλληση ανόμοιων υλικών, τόσο στις συγκολλήσεις τήξης όσο και στις συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης. Στις μεν συγκολλήσεις τήξης σχηματίζεται κατά

την στερεοποίηση των λιωμένων μετάλλων ενώ στην συγκόλληση FSW σχηματίζονται υπό υψηλές πιέσεις και έντονη πλαστική παραμόρφωση. Σε συγκολλήσεις τήξης ανόμοιων υλικών, μάλιστα, η ποσότητα των ενδομεταλλικών ενώσεων είναι τέτοια που θέτει σε κίνδυνο τη συγκόλληση σε σχεδόν κάθε περίπτωση και καθιστά τη μέθοδο συγκόλλησης άχρηστη για πολλούς συνδυασμούς υλικών όπως Al και Cu .

Ο χαλκός (Cu) είναι το μέταλλο που έχει χρησιμοποιηθεί από την ανθρωπότητα για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Μπορεί να βρεθεί σε χρήσιμη μεταλλική μορφή και χρησιμοποιείται από το 8000 π.Χ. Επίσης, ήταν το πρώτο μέταλλο του οποίου το μετάλλευμα τήχθηκε, το πρώτο μέταλλο που χυτεύθηκε και το πρώτο μέταλλο που αναμείχθηκε με άλλο. Το 3500 π.Χ., η ανθρωπότητα άρχισε να κραματοποιεί τον χαλκό με κασσίτερο για να δημιουργήσει μπρούντζο, ξεκινώντας έτσι την Εποχή του Χαλκού.

Γενικότερα, όπως τονίστηκε και προηγουμένως, ο χαλκός και τα κράματά του έχουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και κατεργασιμότητα, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό σε πολυάριθμες εφαρμογές, ιδίως ως μεταφορέα ηλεκτρισμού και θερμότητας. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο χαλκός ήταν το δεύτερο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπορικό μέταλλο μετά τον σίδηρο. Λόγω του υψηλού κόστους του, έχει αντικατασταθεί από άλλα μέταλλα χαμηλότερου κόστους, όπως το αλουμίνιο σε ορισμένες εφαρμογές και τώρα είναι το τρίτο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπορικό μέταλλο μετά το σίδηρο και το αλουμίνιο.



Εικόνα 2-6 Καθαρός Χαλκός [5]

Ο Cu είναι το μέταλλο που έχει χρησιμοποιηθεί από την ανθρωπότητα για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Μπορεί να βρεθεί σε χρήσιμη μορφή μεταλλική μορφή και χρησιμοποιείται από το 8000 π.Χ. Ο Cu ήταν το πρώτο μέταλλο που λειουργήθηκε από το μετάλλευμά του, το πρώτο μέταλλο που χύνεται και το πρώτο μέταλλο που κραματώνεται με άλλο μέταλλο. Το 3500 π.Χ., η ανθρωπότητα άρχισε να κραματοποιεί τον Cu με κασσίτερο για να δημιουργήσει χαλκό, ξεκινώντας έτσι την Εποχή του Χαλκού [5]. Ο Cu και τα κράματά του έχουν υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλή διάβρωση αντίσταση, ολκιμότητα και διαμορφωσιμότητα, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό σε πολυάριθμες εφαρμογές, ιδίως ως μεταφορέας

ηλεκτρισμού και θερμότητας. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο Cu ήταν το δεύτερο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπορικό μέταλλο μετά τον σίδηρο. Λόγω του υψηλού κόστους του, έχει αντικατασταθεί από άλλα μέταλλα χαμηλότερου κόστους όπως το Al σε ορισμένες εφαρμογές και τώρα είναι το τρίτο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο εμπορικό μέταλλο μετά το σίδηρο και το Al [5].

Ο καθαρός χαλκός έχει σημείο τήξης 1084.62°, ατομικό βάρος 63,55 u, πυκνότητα 8,96 g/cm³ και βρίσκεται στην 29^η θέση στον περιοδικό πίνακα [5]. Ο καθαρός χαλκός έχει επίσης αντοχή σε εφελκυσμό από 172.5 έως 345 MPa, ανάλογα με το αν είναι χυτευμένος, ανοπτημένος ή έχει προέλθει με ψυχρή κατεργασία. Ακόμα, ο χαλκός δεν είναι μόνο ένα σημαντικό υλικό για την μηχανική αλλά έχει επίσης σημαντικές αντιβακτηριακές ιδιότητες. Τα βακτήρια, οι ζυμομύκητες και οι ιοί πεθαίνουν γρήγορα στις επιφάνειες του χαλκού, φαινόμενο γνωστό από την αρχαιότητα. Οι παλιοί Αιγύπτιοι τον χρησιμοποιούσαν για αποστείρωση των πληγών στο στήθος και του πόσιμου νερού- οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται λεπτομερώς στον πάπυρο Smith, ο οποίος γράφτηκε μεταξύ του 2600 και του 2200 π.Χ. [5].

Τα πιο γνωστά κράματα χαλκού είναι ο μπρούτζος και ο ορείχαλκος. Αυτά τα ονόματα έχουν χρησιμοποιηθεί για διαφορετική σύνθεση κραμάτων για πάνω από χιλιάδες χρόνια. Ο μπρούτζος αναφέρεται σε πολυάριθμα κράματα χαλκού-κασσίτερου, ενώ ο ορείχαλκος είναι κράμα χαλκού-ψευδαργύρου. Ένας κατάλογος των κραμάτων χαλκού και των τυπικών εφαρμογών τους μπορεί να δει κανείς από τον Πίνακα 1 .

Πίνακας 1 : Κοινά κράματα χαλκού, η σύστασή τους και τυπικές χρήσεις τους [5]

Αριθμός Κράματος	Χημική Ανάλυση [%]	Τυπική Χρήση
C11000	99.9 Cu	Αρχιτεκτονική, Ηλεκτρισμός
C12200	99.5 Cu, 0.015-0.04 P	Ηλιακοί απορροφητές
C26800	65 Cu, 35 Zn	Υδραυλικά
C61400	91 Cu, 7 Al, 2 Fe	Συμπυκνωτές, σωλήνες
C71500	70 Cu, 30 Ni	Αφαλάτωση, σωλήνες
C17200	98 Cu, 2 Be	Ελατήρια, εργαλεία
C81100	100 Cu	Ηλεκτρικοί αγωγοί
C83600	85 Cu, 5 Sn, 5 Zn, 5 Zb	Βαλβίδες, ρουλεμάν
C93700	80 Cu, 10 Sn, 10 Pb	Ρουλεμάν, αντλίες
C96400	70 Cu, 30 Ni	Βαλβίδες πλοίων
C82400	98 Cu, 2 Be	Φιλιέρα, εργαλεία
C90500	88 Cu, 10 Sn, 2 Ni	Γρανάζια
C95300	89 Cu, 10 Al, 1 Fe	Γρανάζια, ρουλεμάν

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 1, τα κράματα C11000 και C81100 είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Αυτά τα κράματα αποτελούνται σχεδόν και τα δύο από καθαρό χαλκό και συνεπώς έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα ανώτερη από εκείνα με χαμηλότερη συγκέντρωση χαλκού. Το C81100 έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα 92% ενώ το C11000 έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα περίπου 100% [5]. Ο

χαλκός και τα κράματά του έχουν εξαιρετική ικανότητα μορφοποίησης λόγω της κυβικής κρυσταλλικής δομής τους.

Αρκετές διαφορετικές μέθοδοι συγκόλλησης τήξης και συγκόλλησης στερεάς κατάστασης είναι ικανές να συγκολλήσουν χαλκό και κράματα χαλκού. Συνήθεις μέθοδοι τήξης, όπως η συγκόλληση με οξυγόνο, η συγκόλληση αντίστασης και η συγκόλληση τόξου επιλέγονται συνήθως για τη συγκόλληση χαλκού με κράματα χαλκού, ενώ η συγκόλληση διάχυσης, η FSW και η συγκόλληση μέσω διέλασης είναι οι κατάλληλες συγκολλήσεις στερεάς φάσης που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό. Στις συγκολλήσεις χαλκού, η υψηλή θερμική αγωγιμότητά του είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ικανότητα συγκόλλησης του υλικού. Οι θερμικές αγωγιμότητες για τα διάφορα κράματα διαφέρουν. Τα πιο καθαρά κράματα και ο σχεδόν καθαρός χαλκός, όπως ο χαλκός χωρίς οξυγόνο (C10200) και ο ηλεκτρολυτικός σκληρός χαλκός (C11000) έχουν θερμική αγωγιμότητα $391 \frac{W}{mK}$, ενώ ο βαριά ισχυρά χαλκός, όπως ο Cu:Ni (C71500) και ο Cu:Ni;Ag (C75200) έχουν θερμική αγωγιμότητα μόλις $29 \frac{W}{mK}$. Τα υπόλοιπα κράματα χαλκού έχουν τιμή θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των τιμών αυτών. Κατά την συγκόλληση τόξου Cu με υψηλές θερμικές αγωγιμότητες είναι σημαντικό να ρυθμίζονται οι παράμετροι συγκόλλησης έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η θερμική εισροή της διαδικασίας στην ένωση. Συχνά υπάρχουν ορισμένες πτητικές, τοξικές χημικές ουσίες στον χαλκό και στα κράματά του, κάτι που έχει γενικά σαν αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη απελευθέρωση τοξικών αναθυμιάσεων από ό,τι όταν συγκολλούνται σιδηρούχα μέταλλα και έτσι απαιτείται ένα πιο αποτελεσματικό σύστημα εξαερισμού για την προστασία του χειριστή από ό,τι συνήθως. Αυτό γενικά αποφεύγεται στις διαδικασίες συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που λειτουργούν κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Οι τεχνικές στερεάς κατάστασης είναι επίσης πολύ πιο κατάλληλες για τη συγκόλληση ανόμοιων υλικών. Οι συνδέσεις Al:Cu πραγματοποιούνται με τεχνικές όπως η συγκόλληση διάχυσης, η συγκόλληση τριβής (FSW), η ψυχρή συγκόλληση και η συγκόλληση υπερήχων [5].

Το αλουμίνιο είναι το μέταλλο που βρίσκεται σε αφθονία στον φλοιό της γης, ο οποίος αποτελείται από 85% από αυτό. Είναι ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα, καθώς μαζί με τα κράματά του χρησιμοποιούνται για αλουμινόχαρτο, για κονσέρβες, για εργαλεία κουζίνας, για ηλεκτρικές εφαρμογές καθώς και σε διάφορες κατασκευές. Λόγω του φυσικού στρώματος οξειδίου του, τα περισσότερα κράματα αλουμινίου έχουν πολύ υψηλή αντοχή στη διάβρωση σε πολλές διαφορετικές καταστάσεις περιβάλλοντος. Το αλουμίνιο είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού και λόγω της χαμηλής τιμής και του βάρους του, χρησιμοποιείται πολύ συχνά για να αντικαταστήσει τον χαλκό σε διάφορες ηλεκτρικές εφαρμογές. Όπως συμβαίνει με τα περισσότερα υλικά που είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, το αλουμίνιο είναι επίσης καλός αγωγός της θερμότητας, γεγονός που έχει οδηγήσει σε εφαρμογές του σε θερμαντικά σώματα και εξοπλισμό μαγειρέματος. Γίνεται επίσης χρήση του ευρέως σε εφαρμογές μεταφορών, όπως σε αεροσκάφη και αμαξώματα τρένων, λόγω της υψηλής αντοχής του σε σχέση με το βάρος ορισμένων κραμάτων. Γενικά είναι μαλακό και όλκιμο, γεγονός που το καθιστά ένα από τα ευκολότερα μέταλλα στην κατεργασία και τη μορφοποίηση. Το αλουμίνιο και τα κράματά του δεν είναι τοξικά για το περιβάλλον και είναι από τα

πλέον ανακυκλώσιμα υλικά, καθώς η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωση του αλουμινίου είναι μόνο το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την επεξεργασία νέου αλουμινίου [5].

Το στρώμα οξειδίου του αλουμινίου έχει πολύ υψηλό σημείο τήξης, 2072°C, πράγμα το οποίο μπορεί να καταστήσει το υλικό δύσκολο στις συγκολλήσεις τόξου, καθώς το σημείο τήξης του μετάλλου είναι αρκετά χαμηλότερο, στους 655°C. Το αλουμίνιο έχει πυκνότητα 2.7 g/cm³ και επίσης διαμορφώνεται και κατεργάζεται εύκολα λόγω της εδροκεντρομένης κυβικής κρυσταλλικής δομής του (FCC). Ακόμη, το αλουμίνιο και τα κράματά του έχουν ευρύ φάσμα αντοχής, ανάλογα με την σύσταση και την θερμική κατεργασία τους και κυμαίνεται από 69 έως 607 MPa. Τα κράματα του αλουμινίου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες : στα χυτά κράματα και στα ελατά κράματα. Γενικότερα, είναι σημαντικό να ελέγχεται η μικροδομή του αλουμινίου κατά την παραγωγή του και την επεξεργασία του. Οι χονδροειδείς μεσομεταλλικές ενώσεις σχηματίζονται από την ευτηκτική αποσύνθεση στο εσωτερικού του υλικού κατά την στερεοποίηση των ράβδων αλουμινίου. Ορισμένες ενώσεις, όπως CuAl₂ και SiMg₂, είναι διαλυτές, ενώ άλλες που περιέχουν σίδηρο και πυρίτιο, όπως Al₂Fe και αAl(Fe,Mn,Si) είναι αδιάλυτες. Οι διαλυτές ενώσεις διαλύονται στο υλικό κατά τη διάρκεια της ομογενοποίησης πριν από την θερμική κατεργασία του υλικού, ενώ οι αδιάλυτες ενώσεις στη συνέχεια διασπώνται και ευθυγραμμίζονται ως μικροί δοκοί κατά τη διάρκεια της θερμής κατεργασίας. Αυτές οι ενδομεταλλικές ενώσεις είναι πολύ ψαθυρές και μπορούν να μειώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς επίσης αποτελούν και σημαντικό πρόβλημα στην συγκόλληση Al:Cu, όπου σχηματίζονται υπό την θερμότητα και την πίεση της διαδικασίας [5].



Εικόνα 2-7 Καθαρό Αλουμίνιο [5]

Ανάλογα με το κύριο στοιχείο κράματος τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε 9 κατηγορίες. Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminum Association (A. A.), αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για ελατό κράμα ή για κράμα χύτευσης. Στα ελατά (wrought) κράματα (βλ. Πίνακα 2.2), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων

περιεκτικότητων των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00 %, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας σειράς [22].

Πίνακας 2.2 : Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των ελατών κραμάτων του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης [5]

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

Στα κράματα χύτευσης (βλ. Πίνακα 2.3), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει επίσης το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος και τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά στη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

Πίνακας 2.3 : Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A. των χυτών (cast) κραμάτων του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης [5]

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

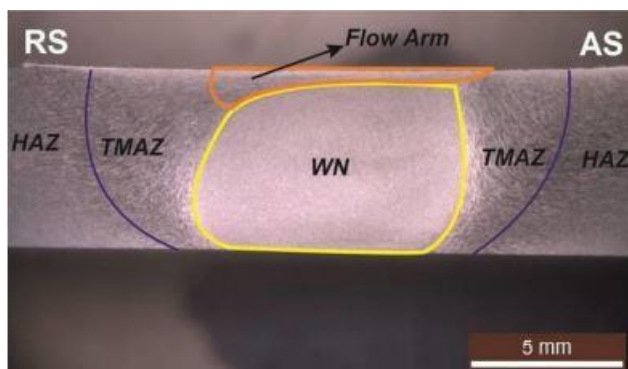
Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, τόσο για τα ελατά όσο και για τα χυτά κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί (βλ. Πίνακα 2.4). Για παράδειγμα, το 1060-H14 είναι αλουμίνιο καθαρότητας 99,60 %, το οποίο έχει υποστεί μόνον ενδοτράχυνση, η οποία έχει οδηγήσει σε αύξηση της σκληρότητάς του κατά 50 % [22].

Πίνακας 2.4: Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί [22]

Κωδικός	Κατεργασία
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης
	H1X Μόνον ενδοτράχυνση (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης)
	H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας
	H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25 %
	H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50 %
	H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75 %
	H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100 %
	H19: Υπέρσκληρο κράμα
	H2X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
	H3X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
	T1 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση
	T2 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
	T3 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
	T4 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση
	T5 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
	T6 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος
	T7 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
	T8 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
	T9 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.	
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

2.3 Ζώνες Συγκόλλησης

Η στερεάς κατάστασης συγκόλληση σε συνδυασμό με το εργαλείο που χρησιμοποιείται έχει ως αποτέλεσμα μία ιδιαίτερα χαρακτηριστική μικροδομή. Η μικροδομή αυτή αποτελείται από 5 ζώνες συγκόλλησης, οι οποίες παρατηρούνται στην εικόνα 2.8 [3].



Εικόνα 2-8 Ζώνες συγκόλλησης FSW σε συγκολλημένο κράμα AA6082-T6 [4]

Οι κύριες αυτές ζώνες είναι οι ακόλουθες :

- Ο πυρήνας συγκόλλησης ή ζώνη ανάδευσης (**weld nugget, WN** ή **stir zone, SZ**) που βρίσκεται στην περιοχή μέσα από την οποία έχει διέλθει ο πείρος του εργαλείου συγκόλλησης. Το μέγεθος και το σχήμα του πυρήνα συγκόλλησης εξαρτάται σημαντικά από την παραγόμενη θερμότητα, καθώς και από το μέγεθος και τη γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης. Αποτελεί ουσιαστικά μία περιοχή δυναμικής ανακρυστάλλωσης, η οποία αποτελείται από ισοαξονικούς κόκκους με πολύ μικρό μέγεθος. Το μέγεθος των κόκκων του WN είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από αυτό του μητρικού υλικού, αλλά αυτό εξαρτάται κυρίως από την κατάσταση στην οποία έχει διαμορφωθεί το υλικό (πχ. O, H111, H14 κ.τ.λ.) και κατά συνέπεια από το είδος της δυναμικής ανακρυστάλλωσης που θα πραγματοποιηθεί. Επιπροσθέτως, χαρακτηριστικό της περιοχής αυτής είναι η εμφάνιση μίας “δακτυλιοειδούς δομής” (onion ring structure) αποτελούμενης από παραμορφωμένους ομόκεντρους κύκλους. Βέβαια, η δομή αυτή δεν παρατηρείται πάντα, διότι εξαρτάται από τις παραμέτρους της διαδικασίας (περισσότερο από την ταχύτητα περιστροφής και τον πείρο) και είναι καθοδηγούμενη και πλήρως εξαρτώμενη από τη δημιουργούμενη ροή υλικού [4].
- Το “**Flow arm**”, το οποίο είναι μία περιοχή που βρίσκεται άνωθεν της ζώνης ανάδευσης της συγκόλλησης. Είναι θερμομηχανικά επηρεασμένη περιοχή, η οποία αποτελείται από παραμορφωμένους κόκκους. Είναι αποτέλεσμα της μεταφερόμενης ροής υλικού από την υποχωρούσα προς την προωθούμενη πλευρά. Κατά συνέπεια αποτελείται από υλικό το οποίο βρίσκεται στην υποχωρούσα πλευρά. Πρέπει να αναφερθεί ότι το “flow arm” δεν δημιουργείται πάντα ή δεν είναι πάντα παρατηρήσιμο, όπως για παράδειγμα στις συγκολλήσεις με κωνικό πείρο [4].

- Η **θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)** η οποία βρίσκεται εκατέρωθεν του πυρήνα συγκόλλησης. Η ζώνη αυτή αποτελείται από παραμορφωμένους κόκκους σχετικά μικρού μεγέθους. Διαφέρει από τον πυρήνα συγκόλλησης, διότι εντός αυτής παρατηρούνται κόκκοι διαφορετικής μορφολογίας από το WN και αναπτύσσονται διαφορετικά φαινόμενα δυναμικής επαναφοράς (dynamic restoration), τα οποία συνήθως είναι η δυναμική αποκατάσταση ή η γεωμετρικά δυναμική ανακρυστάλλωση. Η διαφορά στα αναπτυσσόμενα φαινόμενα μεταξύ των δύο ζωνών οφείλεται στη διαφορά των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και των ασκούμενων παραμορφώσεων εντός αυτών [4].
- Η **θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat-Affected Zone, HAZ)** η οποία είναι η γνωστή ζώνη που δημιουργείται σε όλες τις συγκολλήσεις, με τη διαφορά ότι κατά την FSW έχει πολύ καλύτερες ιδιότητες λόγω των χαμηλών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Συνήθως, οι κόκκοι της είναι μεγεθυμένοι σε σχέση με το μητρικό υλικό. Στη ζώνη αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στατική ανακρυστάλλωση ή μεγέθυνση των κόκκων λόγω διάχυσης. Ακόμη, η ΘΕΖ που δημιουργείται κατά την FSW των κραμάτων αλουμινίου, υποβαθμίζεται περισσότερο όταν τα προς συγκόλληση κράματα είναι θερμικά κατεργασμένα, λόγω της διάλυσης των κατακρημνισμάτων [4]
- Το **μητρικό υλικό ή μέταλλο βάσης (parent material ή base metal)** που αποτελεί το ανεπηρέαστο υλικό που παρατηρείται σε όλες τις συγκολλήσεις.

2.4 Δυναμικά Φαινόμενα Επαναφοράς

Τα δυναμικά φαινόμενα της επαναφοράς (restoration) διακρίνονται σε:

- a) Δυναμικά φαινόμενα αποκατάστασης (recovery) και
- b) Δυναμικά φαινόμενα ανακρυστάλλωσης (recrystallization)

Οι ονομασίες πηγάζουν από το γεγονός ότι αυτά συμβαίνουν κατά τη διάρκεια έντονης παραμόρφωσης του αλουμινίου και των μεταλλικών υλικών γενικότερα, επί των πλείστων κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει για να διαχωρίζονται από τις διεργασίες ανόπτησης οι οποίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας των μετάλλων μετά τη διαδικασία παραμόρφωσής τους. Μεταξύ τους, τα στατικά και τα αντίστοιχα δυναμικά φαινόμενα έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά.

Τα φαινόμενα της δυναμικής ανακρυστάλλωσης με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

- a) ασυνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση και
- b) συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση, η οποία με τη σειρά της διακρίνεται σε:
 - b1) συνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος και
 - b2) γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση.

2.4.1 Δυναμικά Φαινόμενα Επαναφοράς

Η αποκατάσταση έχει να κάνει με την ανακατανομή των αταξιών και τη δημιουργία υποκόκκων στο εσωτερικό των κόκκων και λαμβάνει χώρα συνήθως στην ΘΕΖ. Το φαινόμενο της δυναμικής αποκατάστασης συμβαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις στη ΘΜΕΖ και στιγμιαία πριν την έναρξη της δυναμικής ανακρυστάλλωσης στη ζώνη ανάδευσης. Γενικότερα, όταν γίνεται αναφορά στα φαινόμενα αποκατάστασης, οι μεταβολές που συμβαίνουν αναφέρονται στο εσωτερικό των κόκκων. Δεν υφίσταται μετακίνηση των ορίων των κόκκων παρά μόνο πιθανώς κάποια μικρή παραμόρφωση αυτών. Το αλουμίνιο και τα κράματά του, ο α-σίδηρος και οι φερριτικοί χάλυβες, που θεωρούνται μέταλλα με υψηλή ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης, υπάρχει εύκολη αναρρίχηση και ολίσθηση των διαταραχών. Για τα συγκεκριμένα υλικά και σε υψηλές θερμοκρασίες, η δυναμική αποκατάσταση χαρακτηρίζεται γρήγορη και εκτενής και είναι συνήθως το μόνο φαινόμενο επαναφοράς που συμβαίνει. Στα αρχικά στάδια της παραμόρφωσης παρατηρείται ενίσχυση της εντατικής κατάστασης, καθώς οι αταξίες αλληλεπιδρούν και πολλαπλασιάζονται. Παράλληλα με την αύξηση της πυκνότητας των αταξιών αυξάνεται και ο ρυθμός του φαινομένου της δυναμικής αποκατάστασης και αυτό δημιουργεί υποκόκκους με μικρή γωνία αποπροσανατολισμού. Ο ρυθμός εργοσκήρυσης και ο ρυθμός αποκατάστασης έρχονται σε δυναμική ισορροπία κάτω από την επίδραση συγκεκριμένης τιμής τάσης. Αυτό δυνητικά μπορεί να προκαλέσει μείωση στη ροή των τάσεων αφού η παραμόρφωση αυξηθεί περαιτέρω. Η αναρρίχηση και η ολίσθηση των διαταραχών που είναι βασικοί μηχανισμοί της δυναμικής αποκατάστασης, είναι ίδιοι με αυτούς της στατικής αποκατάστασης. Αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υποκόκκων με μικρή γωνία αποπροσανατολισμού. Η τάση που ασκείται επιδρά στη μετακίνηση των ορίων των υποκόκκων με μικρή γωνία αποπροσανατολισμού και αυτό το φαινόμενο παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο που παραμορφώνεται τελικά το υλικό. Αποτέλεσμα αυτής της μετακίνησης είναι η μερική απαλοιφή διαταραχών και η διατήρηση της ισοαξονικότητας των υποκόκκων [24-26].

Ο ρυθμός παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$ (σε s^{-1}) και η θερμοκρασία παραμόρφωσης T (σε K) ενσωματώνονται στην παράμετρο Zener - Hollomon (Z) η οποία ορίζεται ως εξής:

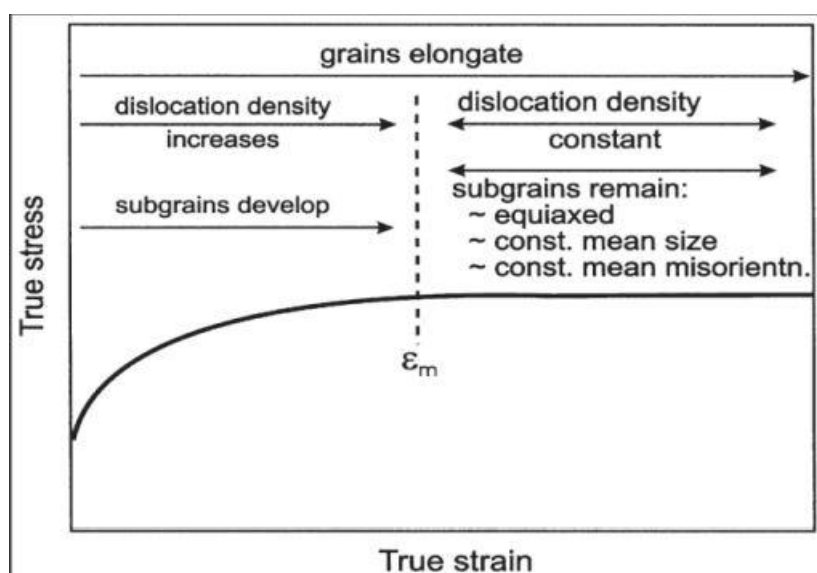
$$Z = \dot{\epsilon} * \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

όπου Q είναι η ενέργεια ενεργοποίησης (σε kJ/mol) και R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($8,314 J/(mol \cdot K)$).

Το Z παρατίθεται σε κλίμακα νεπέριου λογάριθμου. Τυπικές τιμές του $\ln Z$ για τα κράματα αλουμινίου είναι από 15 έως 60. Η ενέργεια ενεργοποίησης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία. Σε περιπτώσεις με συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλό ρυθμό παραμόρφωσης, τα όρια των υπόκοκκων μεταναστεύουν τοπικά λόγω της τάσης των ορίων και της ανομοιομορφίας στην πυκνότητα των διαταραχών, σχηματίζοντας οδοντώσεις με μήκος κύματος συγκρίσιμο με το μέγεθος των υπόκοκκων [3].

Κατά την εργοσκήρυση και τη δυναμική αποκατάσταση, λαμβάνει χώρα συνεχής εξαφάνιση και επαναδημιουργία υποκόκκων μικρής γωνίας αποπροσανατολισμού και

έπειτα δημιουργούνται ελεύθερες διαταραχές μέσα σε αυτούς. Όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2.9, έπειτα από την τιμή παραμόρφωσης ϵ_m , η οποία είναι συγκεκριμένη και ανάλογα το υλικό κυμαίνεται μεταξύ 0,5-1, η μικροδομή των υποκόκκων έρχεται σε κατάσταση ισορροπίας. Όταν επικρατούν ταυτόχρονα χαμηλές θερμοκρασίες αλλά υψηλές τάσεις, τότε κυριαρχεί το φαινόμενο της εργοσκλήρυνσης. Αντίθετα, όταν επικρατούν ταυτόχρονα υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές τάσης, τότε επικρατεί η δυναμική αποκατάσταση.



Εικόνα 2-9 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στο οποίο απεικονίζονται οι αλλαγές στη μικροδομή κατά τη διάρκεια της δυναμικής αποκατάστασης [3]

2.4.2 Δυναμική Ανακρυστάλλωση

Η δυναμική ανακρυστάλλωση πηγάζει από την τάση που εμφανίζει το εκάστοτε υλικό να ελαττώσει την εσωτερική ενέργεια της μικροδομής του, η οποία έχει αυξηθεί διότι οι διαταραχές συσσωρεύονται στη διογκωμένη περιοχή των ορίων των κόκκων με αποτέλεσμα την περαιτέρω σκλήρυνση του υλικού. Αυτό συμβαίνει με τη δημιουργία νέων κόκκων οι οποίοι έχουν μικρότερη πυκνότητα διαταραχών στο εσωτερικό τους. Υπάρχουν τρία είδη δυναμικής ανακρυστάλλωσης:

1. Η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Discontinuous Dynamic Recrystallization – DDRX) η οποία περιλαμβάνει το σχηματισμό πυρήνων ανακρυσταλλωμένων κόκκων και την επακόλουθη ανάπτυξη αυτών. Σε υλικά όπως είναι το αλουμίνιο, που έχει FCC δομή και υψηλή ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης, η DDRX περιορίζεται από τη δυναμική αποκατάσταση χωρίς να αποκλείεται το γεγονός της εμφάνισης ασυνεχούς δυναμικής ανακρυστάλλωσης σε υψηλές θερμοκρασίες και σε περιπτώσεις που το υλικό παραμορφώνεται υπό συγκεκριμένες τιμές της παραμέτρου Z .

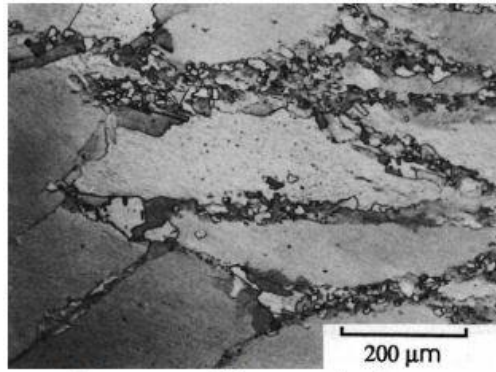
2. Η συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση (Continuous Dynamic Recrystallization - CDRX) κατά την οποία παρατηρείται αύξηση της γωνίας αποπροσανατολισμού των υποκόκκων από το εσωτερικό του κόκκου προς τα όριά του και τελικά διακριτοποίηση των υποκόκκων μέσω δημιουργίας νέων κόκκων. Όταν η παραμόρφωση του υλικού δεν είναι μεγάλη, οι διαταραχές αρχίζουν να μαζεύονται στα υπάρχοντα όρια των κόκκων και λιγότερο σε αυτά των υποκόκκων. Όταν όμως η πλαστική παραμόρφωση αυξηθεί, το ίδιο συμβαίνει και με τις διαταραχές, οι οποίες μαζεύονται στα όρια των υποκόκκων που έχουν αρχικά χαμηλή γωνία αποπροσανατολισμού. Η γωνία αυτή αυξάνεται καθώς οι διαταραχές συσσωρεύονται στα όρια των κόκκων και τελικώς αυτοί αποσχίζονται και μετατρέπονται σε κόκκους.
3. Η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση (Geometric Dynamic Recrystallization- GDRX) όπου τα αρχικά όρια των κόκκων αναπτύσσουν οδοντώσεις και τελικά διαχωρίζονται όταν το μήκος κύματος των οδοντώσεων εξισωθεί με το μέγεθος των υποκόκκων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση δρα συνεργατικά με τη συνεχή ή τη γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση.[3]

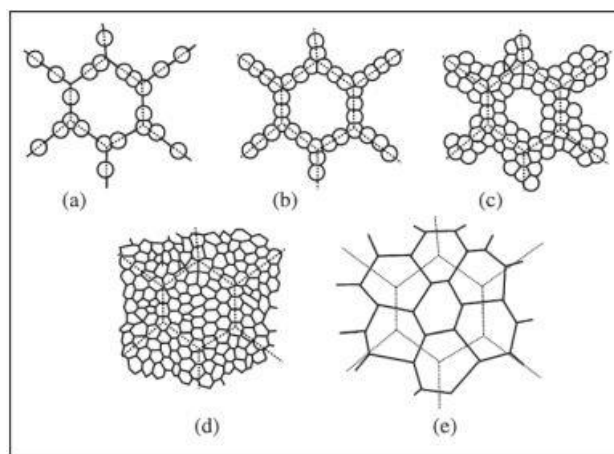
2.4.3 *Ασυνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση*

Σε μέταλλα όπως π.χ. ο χαλκός, το νικέλιο, ο ωστενιτικός χάλυβας, τα οποία έχουν χαμηλή ή μέση ενέργεια σφαλμάτων επιστοίβασης και οι διαδικασίες αποκατάστασης είναι αργές, έπειτα από κάποια τιμή κρίσιμη τιμή παραμόρφωσής τους ενδέχεται να συμβεί δυναμική ανακρυστάλλωση. Με την συνέχιση της παραμόρφωσης, η πυκνότητα των διαταραχών των νέων κόκκων αυξάνεται περιορίζοντας την περαιτέρω μεγέθυνση αυτών. Ταυτόχρονα, καθώς δημιουργούνται νέο κόκκοι στα μετακινούμενα όρια, το μέγεθός τους τείνει να μειωθεί. Ο συγκεκριμένος τύπος ανακρυστάλλωσης χαρακτηρίζεται ως ασυνεχής διότι έχει διακριτά τα στάδια του σχηματισμού και της μεγέθυνσης των κόκκων [4].

Η δυναμική ανακρυστάλλωση αρχίζει στα όρια των κόκκων μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού (βλ. Εικόνα 2.11). Εξαιτίας της δημιουργίας όλων και περισσότερων κόκκων, η ζώνη ανακρυσταλλωμένων κόκκων που δημιουργείται μεγαλώνει συνεχώς. Εν τέλει, το υλικό ανακρυσταλλώνεται πλήρως. Αντίθετα σε σχέση με την στατική ανακρυστάλλωση, το μέσο μέγεθος των δυναμικά ανακρυσταλλωμένων κόκκων δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.



Εικόνα 2-10 Ασυνεχή δυναμική ανακρυστάλλωση χαλκού [4]

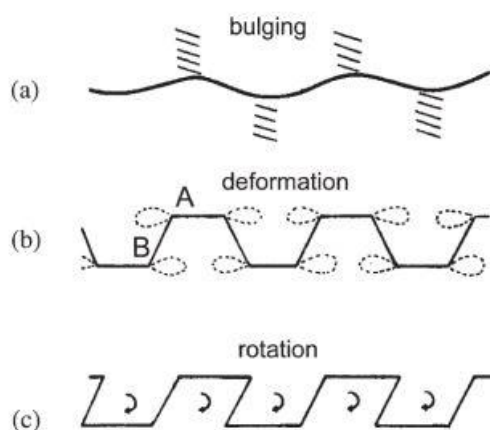


Εικόνα 2-11 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της ασυνεχούς ανακρυστάλλωσης. a-d) Μεγάλο αρχικό μέγεθος κόκκων, e) Μικρό αρχικό μέγεθος κόκκων (Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τα παλιά όρια των κόκκων). [4]

2.4.4 Συνεχής δυναμική ανακρυστάλλωση ή δυναμική ανακρυστάλλωση με προοδευτική περιστροφή πλέγματος

Ορισμένα υλικά, όταν παραμορφώνονται, δύναται να δημιουργούν νέους κόκκους, με μεγάλη γωνία αποπροσανατολισμού, εξαιτίας της προοδευτικής περιστροφής των υποκόκκων σε συνδυασμό με μικρή μετανάστευση των ορίων των κόκκων. Πιο συγκεκριμένα, η παραμόρφωση του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την προοδευτική περιστροφή των υποκόκκων οι οποίοι είναι προσκείμενοι στα όρια των κόκκων. Γι' αυτό, στο εσωτερικό του κόκκου και από το κέντρο του προς τα όρια του, παρουσιάζεται μία διαβάθμιση της γωνίας αποπροσανατολισμού των υποκόκκων. Οι υπόκοκκοι ενδέχεται να μην είναι καλά ανεπτυγμένοι στο κέντρο του κόκκου ή μπορεί να έχουν πολύ μικρή γωνία αποπροσανατολισμού. Ακόμη, πλησίον των ορίων των κόκκων, η γωνία αποπροσανατολισμού των υποκόκκων αυξάνει, και έτσι σε περίπτωση υψηλών τιμών παραμόρφωσης μπορεί να δημιουργηθούν υποκόκκοι με μεγάλη γωνία αποπροσανατολισμού. Πλέον, αυτοί θεωρούνται κόκκοι, μιας και όρια τους είναι πλέον διακριτά σε σχέση από τα αντίστοιχα των κόκκων. Επί των πλείστων αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα μία μερικώς ανακρυσταλλωμένη μικροδομή όπως στην Εικόνα 2.11 a-c. Σε περιπτώσεις υψηλών τάσεων μπορεί να προκύψει και

μία πλήρως ανακρυσταλλωμένη μικροδομή όπως αυτή της Εικόνας 2.11d. Τέτοιος τύπος ανακρυστάλλωσης βρίσκεται κυρίως σε υλικά στα οποία η μετακίνηση των διαταραχών περιορίζεται, είτε από την έλλειψη επιπέδων ολίσθησης, όπως τα κράματα μαγνησίου, είτε από στερεό διάλυμα όπως τα κράματα αλουμινίου. Επίσης, υπάρχει περίπτωση, πλησίον των ορίων των κόκκων, η συνεχής δυναμικής ανακρυστάλλωση, η ανομοιογενής πλαστικότητα και η επιταχυνόμενη δυναμική αποκατάσταση να σχετίζονται μεταξύ τους. Όσον αφορά τα κράματα αλουμινίου, περιστροφή πλέγματος μπορεί να λάβει χώρα στα όρια των κόκκων κατά τη διάρκεια παραμόρφωσης σε θερμοκρασίες από 300 έως 400°C (βλ. Εικόνα 2.12). Καθώς στα όρια των κόκκων σχηματίζονται υποκόκκοι, στο εσωτερικό τους δεν έχουμε σχηματισμό υποκόκκων. Κατά την παραμόρφωση, οι κόκκοι με μεγάλη γωνία αποπροσανατολισμού αναπτύσσουν οδοντώσεις στα όριά τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ολίσθηση μόνο συγκεκριμένων περιοχών των ορίων των κόκκων, αφού η τάση της παραμόρφωσης πρέπει να διαδοθεί και στις υπόλοιπες περιοχές. Αυτό οδηγεί σε διάτμηση και τοπική περιστροφή του πλέγματος. Ωστόσο, δεν έχει ακόμα βρεθεί κατά πόσον η παραμόρφωση των ορίων των κόκκων οδηγεί σε ολίσθησή τους ή τοπικά σε πλαστική κατάρρευση (local plasticity).

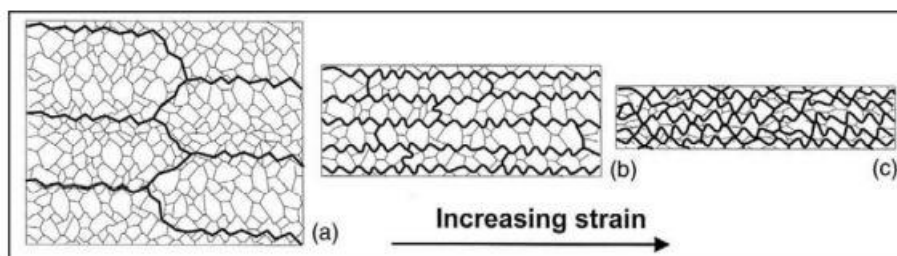


Εικόνα 2-12 α) Ανάπτυξη οδοντώσεων στα όρια των υποκόκκων με μεγάλη γωνία αποπροσανατολισμού, β) παραμόρφωση και γ) περιστροφή των ορίων των υποκόκκων [4]

2.4.5 Γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση

Έπειτα από παραμόρφωση υπό υψηλή τάση και θερμοκρασία, ενδέχεται να προκύψει μικροδομή η οποία αποτελείται κυρίως από όρια κόκκων μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού. Το συγκεκριμένο είδος δυναμικής ανακρυστάλλωσης ονομάζεται γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση. Σε περίπτωση που ένα πολυκρυσταλλικό υλικό παραμορφώνεται, η περιοχή των ορίων των κόκκων αυξάνεται με αύξηση της παραμόρφωσης. Κατά την πλαστική παραμόρφωση δημιουργούνται κελιά ή υποκόκκοι. Καθώς αυξάνεται η τάση, ταυτόχρονα αυξάνεται και το ποσοστό ορίων κόκκων με γωνία αποπροσανατολισμού. Ακόμα, τέτοια όρια κόκκων μπορούν να σχηματιστούν λόγω κατακερματισμού των παλαιών κόκκων. Με την παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες, κατά τη διάρκεια της δυναμικής αποκατάστασης, τα όρια των κόκκων αναπτύσσουν οδοντώσεις με μήκος κύματος, συγκρίσιμο με το μέγεθος των

υποκόκκων. Σε περίπτωση που το υλικό υποστεί μεγάλη μείωση στη διατομή του, π.χ. σε περίπτωση θερμής έλασης ή συμπίεσης, οι κόκκοι του επιμηκύνονται. Το μέγεθος των υποκόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, είναι ανεξάρτητο της παραμόρφωσης και έτσι οι κόκκοι μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού αυξάνονται και τελικά το μέγεθος των οδοντώσεων γίνεται συγκρίσιμο με το πάχος των κόκκων. Τελικώς, ακολουθεί αλληλοδιείσδυση των ορίων των κόκκων η οποία έχει ως αποτέλεσμα μία μικροδομή η οποία αποτελείται από μικρούς ισομεγέθεις κόκκους με μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό των υποκόκκων (βλ. Εικόνα 2.13). Όταν το υλικό παραμορφώνεται υπό υψηλές τάσεις και υψηλό Z, το φαινόμενο της γεωμετρικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης ξεκινά μόνο όταν το υλικό παραμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό διότι το μέγεθος των υποκόκκων είναι μικρό. Σε περιπτώσεις παραμόρφωσης υπό χαμηλότερες τάσεις η γεωμετρική δυναμική ανακρυστάλλωση ξεκινά από μικρότερες παραμορφώσεις [4].



Εικόνα 2-13 Με αύξηση της παραμόρφωσης, τα όρια των κόκκων μεγάλης γωνίας αποπροσανατολισμού (παχιές γραμμές) πλησιάζουν (μεταξύ τους) ενώ το μέγεθος των υποκόκκων παραμένει σταθερό. Τελικά τα όρια των κόκκων συναντώνται με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροδομής κόκκων με υψηλή γωνία αποπροσανατολισμού. [4]

2.5 Εφαρμογές της FSW

Η FSW βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων της. Οι βιομηχανικοί αυτοί τομείς είναι η ναυπηγική, η αεροδιαστημική, η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία σιδηροδρόμων και χερσαίων οδικών μεταφορών, καθώς και η πολεμική βιομηχανία. Οι συγκολλήσεις ανόμοιων υλικών είναι η βασικότερη εφαρμογή της και έτσι για παράδειγμα διαφορετικά κράματα αλουμινίου μπορούν να συγκολληθούν με χρήση της FSW.

Στη **ναυπηγική βιομηχανία** χρησιμοποιήθηκε αρχικά για συγκολλήσεις αλουμινίου σειράς 6XXX σε καταψύκτες αλιευτικών σκαφών. Έπειτα υιοθετήθηκε για την κατασκευή ταχύπλοων σκαφών και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε σε εξέδρες άντλησης πετρελαίου, σε hovercraft και σε κρουαζιερόπλοια. Επιπλέον, η υπερκατασκευή του μεγαλύτερου πλοίου παγκοσμίως το οποίο είναι εξολοκλήρου κατασκευασμένο από αλουμίνιο, του ιαπωνικού «Ogasawara» κατασκευάστηκε μέσω εκτενούς χρήσης της FSW , όπως και αυτή του κρουαζιερόπλοιου «Seven Seas Navigator» [3].

Επιπροσθέτως, η μέθοδος εφαρμόζεται σε ταχύπλοα σκάφη για την ενσωμάτωση χωρισμάτων πλοίου και καταστρώματων, αλλά και σε πολλά κρουαζιερόπλοια τα οποία έχουν συχνά καταστρώματα αλουμινίου. Το κρουαζιερόπλοιο «The World», της εταιρείας Fosen Mek, φέρει ενισχυμένα ελάσματα καταστρώματος προκατασκευασμένα με FSW (Εικόνα 2.14 α,β).



Εικόνα 2-14 (α) Κρουαζιερόπλοιο «The World», της εταιρείας Fosen Mek, (β) ενισχυμένα ελάσματα καταστρώματος προκατασκευασμένα με FSW για το κρουαζιερόπλοιο «The World». [3]

Η FSW έχει εφαρμογές και σε κατασκευές στρατιωτικών σκαφών. Η «Nichols Brothers Boat Builders» (Washington, USA) χρησιμοποίησε συγκολλημένα ελάσματα με FSW για το στρατιωτικό σκάφος (X-Craft class) «Sea Fighter» μέγιστης ταχύτητας 55 κόμβων. Επίσης, στην κατασκευή του αλουμινένιου αντιτορπιλικού πλοίου «Type 022 Houbei Class» χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα αλουμινίου συγκολλημένα μέσω FSW [3].



Εικόνα 2-15 (α) Πλήρη του στρατιωτικού σκάφους (X-Craft class) «Sea Fighter» της Nichols Bros, (β) Στρατιωτικό σκάφος αλουμινίου τύπου '022' stealth. [3]

Η εφαρμογή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλού ποσοστού παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα ελάσματα και ως εκ τούτου μικρές παραμορφώσεις. Τα πλεονεκτήματα αυτά τα εκμεταλλεύονται ναυπηγεία σε διάφορες περιοχές (Dalian, Shanghai, Wuhan, Guangxi and Guangzhou),

τα οποία χρησιμοποιούν προκατασκευασμένα ελάσματα με χρήση FSW για εμπορικά πλοία [3].

Τέλος, η εν λόγω μέθοδος συγκόλλησης συναντάται και σε μερικές ακόμα ναυπηγικές εφαρμογές όπως σε:

- Ελάσματα καταστρώματος, πλευρές, φρακτές και έδρες
- Γάστρες και υπερκατασκευές
- Πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων
- Παράκτιες εγκαταστάσεις
- Θαλάσσιες κατασκευές
- Εγκαταστάσεις ψύξης
- Κατάρτια ιστιοπλοϊκών

Στην **αεροδιαστημική και την αεροναυπηγική βιομηχανία** η πρώτη κύρια εφαρμογή της FSW ήταν η αντικατάσταση των συγκολλήσεων τήξης στις δεξαμενές καυσίμου των μη επανδρωμένων πυραύλων Delta II και εν συνεχεία των Delta IV. Ο κατασκευαστής (Boeing) ανέφερε ότι οι συγκολλήσεις χαρακτηρίζονταν από την απουσία σφαλμάτων και επίσης επεσήμανε τη σημαντική μείωση του κόστους η οποία επετεύχθη. Γενικά, η FSW δύναται να εφαρμοστεί στη συγκόλληση διαφόρων μερών στρατιωτικών και πολιτικών αεροσκαφών, όπως στο κέλυφός τους, στα πλευρικά τους μέρη, αλλά και στις «νευρώσεις» (stringers) τους. Τα πλεονεκτήματα που αντλούνται από την εφαρμογή της FSW σε σχέση με τη χρήση πριτσινιών είναι τα μειωμένα κόσθη παραγωγής και η μείωση του βάρους των αεροσκαφών. Πιο συγκεκριμένα έχουν πραγματοποιηθεί διαμήκεις μετωπικές συγκολλήσεις κραμάτων Al σε δεξαμενές καυσίμων για διαστημικά οχήματα και αεροσκάφη. Ακόμη, η FSW έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην κατασκευή του αεροσκάφους «Eclipse 550» της εταιρείας «ONE Aviation» [3].

Γενικά η FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αεροδιαστημική βιομηχανία για την επίτευξη:

- Διαμηκών μετωπικών συγκολλήσεων κραμάτων Al σε δοχεία καυσίμων για διαστημικά οχήματα και αεροσκάφη.
- Συγκόλλησης του κελύφους του αεροπλάνου με τα ενισχυτικά του (δοκούς, νευρώσεις) καθώς και συγκόλληση των κεντρικών τμημάτων των πτερυγίων
- Συγκολλήσεων σε εξωτερικά αποσπώμενα δοχεία καυσίμων για στρατιωτικά αεροσκάφη.
- Συγκολλήσεων σε πτερύγια πυραύλων.
- Επισκευή ελαττωματικών συγκολλήσεων MIG (Κατεργασία δια τριβής με ανάδευση)

Στη βιομηχανία σιδηροδρόμων η FSW χρησιμοποιείται σε:

- Κυλιόμενα εξαρτήματα για σιδηροδρομικά βαγόνια, υπόγειους συρμούς και τραμ.
- Φορείς εμπορευματοκιβωτίων.
- Βαγόνια μεταφοράς πετρελαίου.

Τέλος, στη βιομηχανία χερσαίων οδικών μεταφορών οι υπάρχουσες και οι εν δυνάμει εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση της FSW σε:

- Βάσεις κινητήρων και πλαισίου.
- Ζάντες.
- Αμαξώματα και αναβατήρες για φορτηγά.
- Κινητούς γεραμούς.
- Πλάκες θωράκισης οχημάτων.
- Οχήματα μεταφοράς καυσίμων (fuel tankers).
- Τροχόσπιτα.
- Λεωφορεία και οχήματα μεταφοράς εντός αεροδρομίων

Ωστόσο πιο συγκεκριμένα η εφαρμογή ενός ελάσματος που αποτελείται από χαλκό και από αλουμίνιο μπορεί πιο συγκεκριμένα να βρει εφαρμογή σε :

- Κατασκευή εξαρτημάτων εναλλακτών θερμότητας με εφαρμογή στα πλοία
- Κατασκευή πλακών μεταφοράς ενέργειας σε μετασχηματιστές

Και στις δύο παραπάνω εφαρμογές αυτό που γίνεται εκμεταλλεύσιμο είναι αφενός η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού και αφετέρου η περίσσεια, η ευκολία και η προσιτή τιμή του αλουμινίου. Όπως περιγράφηκε και πιο πάνω, συνδυάζοντας τις δυνατότητες που προσφέρουν αυτά τα δύο υλικά και ταυτόχρονα μειώνοντας το κόστος παραγωγής (χρησιμοποιώντας αλουμίνιο αντί για σκέτο χαλκό), επιτυγχάνεται η κατασκευή πιο φθηνών υλικών συγκολλώντας δύο υλικά που μέχρι πρότινος ήταν αδύνατον.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ, ΥΛΙΚΑ & ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εκτέλεση των πειραμάτων, όσο και για την αξιολόγηση των δοκιμών. Όπως σημειώθηκε και προηγουμένως σε εισαγωγικό κεφάλαιο, οι συγκολλήσεις έλαβαν χώρο σε δύο εργαστήρια. Η πρώτη ομάδα συγκολλήσεων έγινε στο ENT και στη συνέχεια, λόγω βλάβης του εξοπλισμού, η δεύτερη ομάδα έγινε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στην σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Επομένως, θα περιγραφούν οι μηχανές συγκόλλησης, ο εξοπλισμός μεταλλογραφίας, καθώς και όλα τα στάδια που χρειάστηκαν για να αξιολογηθούν τα δοκίμια των συγκολλήσεων.

3.1 Μηχανές Συγκόλλησης

Σχετικά με τις μηχανές συγκόλλησης, πρέπει να τονιστεί, πως και στα δύο εργαστήρια που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν πραγματοποιηθεί προηγουμένως διδακτορικές διατριβές, και έτσι έχουν τροποποιηθεί μερικώς, σχετικά με την αρχική τους κατάσταση.

3.1.1 Μηχανή Συγκόλλησης ENT

Το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, διαθέτει κάθετη φρεζομηχανή FU-32 (Universal Milling Machine, UMC CUGIR), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, η οποία έχει τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δέχεται εργαλεία κατάλληλα για την συγκόλληση FSW, και έτσι πλέον χρησιμοποιείται μόνο για αυτόν τον σκοπό.

Η συγκεκριμένη φρεζομηχανή, έχει προέλευση από την Ρουμανία και όπως θα αναλυθεί παρακάτω έχει ένα αρκετά μεγάλο εύρος σε ταχύτητες πρόωσης και σε ταχύτητες περιστροφής. Ζυγίζει περίπου 2250 κιλά, οι διαστάσεις της είναι 1770 x 2526 x 1600 mm, έχει διαστάσεις τραπέζιου 1350 x 300 mm και διαθέτει εύρος κλίσης στο επίπεδο xz από -45° έως 45°. Η διαθέσιμη διαδρομή στον άξονα x είναι στα 1000 mm και η πρόωση στον ίδιο άξονα γίνεται ημιαυτόματα ηλεκτρικά. Το ίδιο συμβαίνει και στον άξονα y, με διαθέσιμη διαδρομή τα 350 mm. Στον άξονα z η πρόωση (κάθετη δύναμη) γίνεται με χειροκίνητη ντίζα και η διαθέσιμη διαδρομή είναι στα 400 mm. Επίσης, οι διαθέσιμες ταχύτητες πρόωσης (άξονας x) αλλά και οι αντίστοιχες ταχύτητες περιστροφής (άξονας y) παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3.1, Πίνακας 3.2).



Εικόνα 3-1 Μηχανή συγκόλλησης διά τριβής με ανάδευση του ENT

Πίνακας 3.1 : Ταχύτητες πρόωσης φρεζομηχανής (mm/min)

Ταχύτητες Πρόωσης (Άξονας x) [mm/min]			
19	85	235	600
30	118	300	750
60	150	375	950
75	190	475	

Πίνακας 3.2 : Ταχύτητες περιστροφής κεφαλής (rpm or rev⁻¹)

Ταχύτητες Περιστροφής [RPM or rev ⁻¹]					
30	60	118	235	475	950
37.5	75	150	300	600	1180
47.5	95	190	375	750	1500

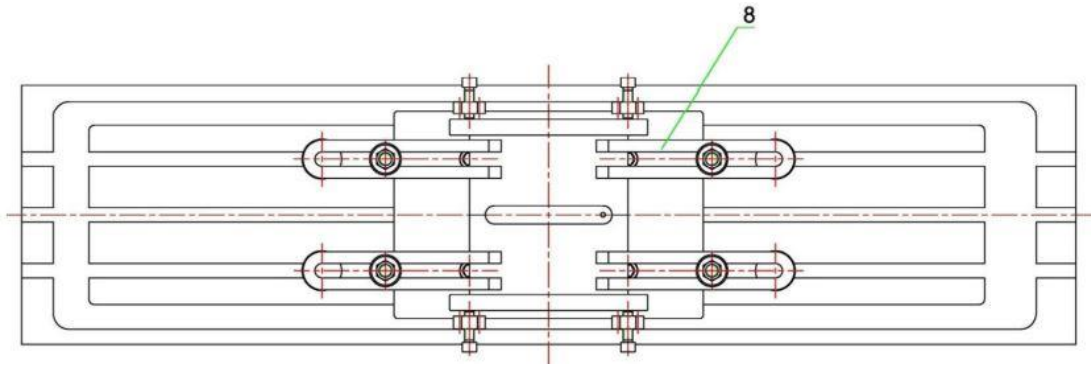
Είναι γνωστό, πως κατά την πραγματοποίηση της FSW, αναπτύσσονται δυνάμεις, οι οποίες κάποιες φορές ξεπερνούν τον 1 tn. Έτσι, είναι λοιπόν απαραίτητο να

εξασφαλίζεται η άριστη συγκράτηση των προς συγκόλληση δοκιμίων πάνω στο τραπέζι της μηχανής. Εξαιτίας αυτού, έχει κατασκευαστεί μία ιδιοσυσκευή συγκράτησης που φαίνεται στην Εικόνα 3.2.

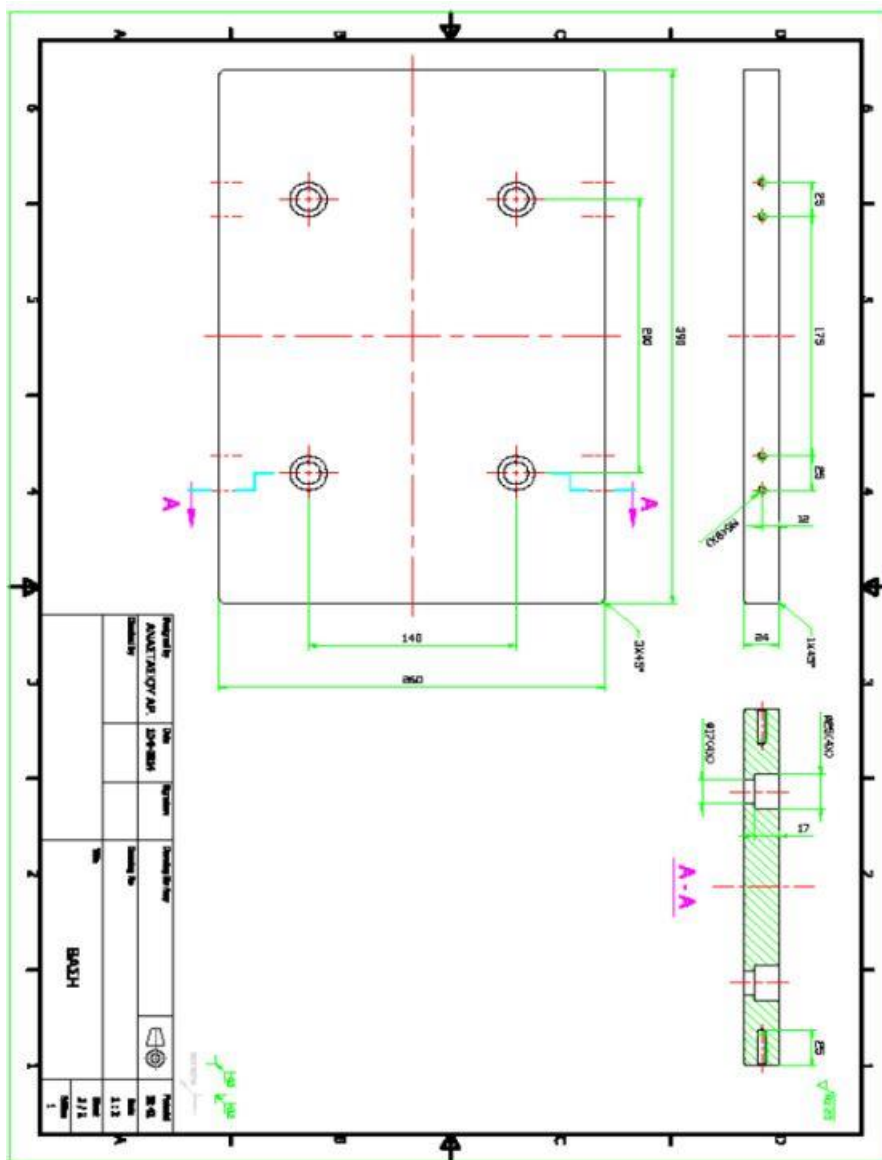


Εικόνα 3-2 Ιδιοσυσκευή συγκράτησης δοκιμίων

Μία χαλύβδινη πλάκα διαστάσεων 390 x 260 mm χρησιμοποιείται ως βάση έδρασης των δοκιμίων. Η συγκεκριμένη έχει πλανιστεί και στις δύο μεγάλες της επιφάνειες, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνεπιπεδότητα σε όλο το μήκος της συγκόλλησης, και έτσι το τελικό πάχος της έχει προκύψει στα 24 mm, από τα 25 mm που ήταν στην αρχή. Για την καλύτερη πρόσδεση στο τραπέζι της εργαλειομηχανής, έχουν δημιουργηθεί στη βάση έδρασης 4 οπές διαμέτρου $\Phi 17$ με πατούρα για κοχλία M16 τύπου alen σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο σχέδιο που ακολουθεί. Η πλάκα είναι επίσης εφοδιασμένη με αποσυναρμολογούμενα εξαρτήματα στις δύο διαμήκεις πλευρές της που εξασφαλίζουν το γόνιασμα των δοκιμίων, την παραλληλότητα δηλαδή της ραφής συγκόλλησης με τον άξονα x της διαδρομής της εργαλειομηχανής. Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η κάτοψη της εν λόγω ιδιοσυσκευής συγκράτησης και στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται το μηχανολογικό φύλλο διαστασιολόγησης της βάσης έδρασης.



Εικόνα 3-3 Κάτοψη της ιδιοσυσκευής συγκράτησης στην εργαλειομηχανή [2]



Εικόνα 3-4 Μηχανολογικό φύλλο διαστασιολόγησης της βάσης έδρασης [3]

Επίσης, τέσσερις (4) ειδικές σφιγκτήρες τύπου «φουρκέτας» ή πιο γνωστά ως clamps, χρησιμοποιούνται με σκοπό να συγκρατούν τα δοκίμια στην βάση έδρασης (Εικόνα

3.2). Ακόμη, αξίζει να τονιστεί πως για τη σχεδίαση της πλάκας έδρασης των δοκιμίων έχει ληφθεί υπόψη και το κριτήριο της διαχείριση της θερμότητας που παράγεται δια τριβής (thermal management) στα πλαίσια μίας γενικής διαχείρισης θερμότητας στο σύστημα (το σύστημα αποτελείται από την πλάκα έδρασης, τα δοκίμια, την κεφαλή συγκόλλησης και την άτρακτο της εργαλειομηχανής). Ο σκοπός της μελέτης, η οποία ανάγεται σε πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας, είναι κατά κύριο λόγο η συγκράτηση της θερμότητας εντός των ορίων των δοκιμίων συγκόλλησης για την επάρκεια του φαινομένου της θερμομηχανικής παραμόρφωσης και αντίστοιχα την απαγωγή της θερμότητας από την άτρακτο της εργαλειομηχανής για την αποφυγή θερμικών παραμορφώσεων. Αναλόγως την εφαρμογή, υπάρχει η δυνατότητα είτε ψύξης είτε θέρμανσης, τόσο στο εργαλείο συγκόλλησης όσο και στη βάση έδρασης. Στην περίπτωση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, αφενός επειδή πρόκειται για αλουμίνιο και δεν υπάρχει ανάγκη διαχείρισης της θερμότητας λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του και αφετέρου λόγω αύξησης του κόστους της κατασκευής, δεν προβλέφθηκε ψυκτική ή θερμαντική διάταξη στο σχεδιαζόμενο σύστημα.

3.1.2 Μηχανή Συγκόλλησης ETK (ΣΜΜ)

Σχετικά με την φρεζομηχανή του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε αντίστοιχη κατάλληλα τροποποιημένη φρεζομηχανή, της κατασκευάστριας εταιρείας C.V.A. Jigs Moulds & Tools LTD. Η φρέζα φαίνεται στην Εικόνα 3.5, ενώ ταυτόχρονα οι δυνατές ταχύτητες πρόωσης (άξονα x) και οι δυνατές ταχύτητες περιστροφής (άξονας y) φαίνονται στους πίνακες 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.



Εικόνα 3-5 Τροποποιημένη φρεζομηχανή για συγκόλληση FSW (EKT-Σχολή ΜΜ)

Σε αντίθεση με την προηγούμενη φρεζομηχανή, στη συγκεκριμένη έχει κατασκευαστεί ειδικά διαμορφωμένη βάση, πάνω στην οποία τα προς συγκόλληση ελάσματα πακτώνονται μέσω τεσσάρων κοχλιών τύπου *alen*. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερή συγκράτηση των ελασμάτων κατά την διαδικασία της FSW καθώς και η απαιτούμενη κάθετη δύναμη για την αποφυγή τυχόν παραμορφώσεων (π.χ. λυγισμός) λόγω των θερμοκρασιών και των δυνάμεων που αναπτύσσονται.

3.2 Εργαλείο Συγκόλλησης

Το εργαλείο συγκόλλησης είναι μία από τις παραμέτρους που καθορίζει την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση. Γενικότερα, η γεωμετρία του πείρου που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης έχει σημαντική επιρροή στην ροή των προς συγκόλληση υλικών και επομένως στις τελικές ιδιότητες της συγκόλλησης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ανόμοιων υλικών, όπως εδώ. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία και τις προηγούμενες μελέτες, έχουν γίνει έρευνες που περιγράφουν λεπτομερώς την επίδραση του εργαλείου συγκόλλησης εξαιτίας τη γεωμετρίας του, σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση για Al-Cu.

Μία από αυτές τις προηγούμενες έρευνες [23], εξέτασε την επίδραση τριών διαφορετικών πείρων στις ιδιότητες των συγκολλήσεων FSW μεταξύ αλουμινίου και χαλκού. Οι πείροι που δοκιμάστηκαν ήταν κωνικού τύπου με σπείρωμα σε τριγωνική κατάληξη, απλού κωνικού τύπου και κωνικού τύπου με σπείρωμα. Κατέληξαν πως το καταλληλότερο για τέτοιου είδους συγκόλληση είναι το απλό κωνικού τύπου εργαλείο, κάτι που απέδωσαν στη χωρίς ελαττώματα ζώνη ανάδευσης και στην αύξηση της σκληρότητας.

Έτσι, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί εργαλείο συγκόλλησης τέτοιο ώστε να μην έχει μεγάλο μήκος πείρου και ταυτόχρονα να είναι απλής μορφής. Βάσει αυτής της λογικής, επιλέχθηκε το εργαλείο της Εικόνας 3.6 (όψη *yz*) και της Εικόνας 3.7 (όψη *xy*). Το πάχος του χαλκού ήταν το καθοριστικό στοιχείο για την επιλογή του εργαλείου, καθώς και του τύπου του, μιας και το πολύ λεπτό φύλλο που τοποθετήθηκε πάνω από την πλάκα του αλουμινίου, έτεινε να «σκιστεί» λόγω των τάσεων που ασκούσε το εργαλείο στο δοκίμιο. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε έχει διάμετρο πείρου 5.9 mm και διάμετρο βάσης 23 mm.



Εικόνα 3-6 Το εργαλείο συγκόλληση που χρησιμοποιήθηκε σε όψη στο επίπεδο xy και yz



Εικόνα 3-7

Να σημειωθεί επίσης, πως η επιλογή του εργαλείου έγινε μέσα από μία πληθώρα εργαλείων που διέθετε το ENT. Αρχικά, έγιναν πειράματα τόσο για την εμπειρία του φοιτητή όσο και για τον έλεγχο της λειτουργίας της φρεζομηχανής, και έτσι αλλάχθηκαν αρκετά εργαλεία κατά τη διαδικασία. Το κριτήριο για την αλλαγή του εργαλείου, ήταν το οπτικό αποτέλεσμα της ραφής συγκόλλησης. Ξεκινώντας με πείρο που είχε σπείρωμα στην άκρη, παρατηρήθηκε πως η ακμή άφηνε ένα «αυλάκι» στη μέση του δοκιμίου, το αποτέλεσμα του οποίου για μεγαλύτερη κατανόηση φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Συνεχίζοντας, ο πείρος άλλαξε σε κωνικής μορφής, στη συνέχεια σε ελικοειδούς κωνικής μορφής, και μετά από μερικές δοκιμές και σε συνδυασμό με τη βιβλιογραφία αποφασίστηκε ο πείρος που συζητήθηκε παραπάνω.



Εικόνα 3-8 Παρουσίαση των ελαττωματικών πάσων με εργαλείο με σπείρωμα

3.3 Ελάσματα προς συγκόλληση

Οι διαστάσεις των προς συγκόλληση ελασμάτων ήταν οι ίδιες σε όλα τα πειράματα και ήταν οι ακόλουθες :

- 200 mm μήκος
- 100 mm πλάτος
- 3 mm πάχος για τα ελάσματα αλουμινίου
- 0.2 mm πάχος για τα ελάσματα χαλκού

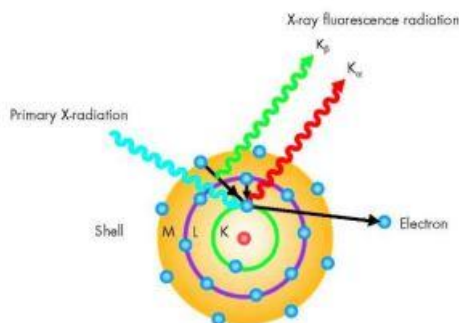
Τα υλικά των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν :

- Κράμα αλουμινίου 5083 σε κατάσταση H111 (εργοσκληρυνόμενο)
- Κράμα χαλκού C12200 DHP

Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτος ο τρόπος που έγινε η επιλογή του ελάσματος του αλουμινίου, μιας και η εκτίμηση των αρχικών προς συγκόλληση ελασμάτων ήταν λάθος, με αποτέλεσμα να χρειάζεται προσαρμογή της πειραματικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα, το αρχικό έλασμα αλουμινίου που προοριζόταν για την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας, ήταν και αυτό πάχους 0.2 mm, πράγμα που έκανε αδύνατη τη πραγματοποίηση της συγκόλλησης με την FSW, δεδομένων των εργαλείων που διέθετε το ENT. Έτσι, το επόμενο στάδιο ήταν η επιλογή ενός πιο ελάσματος μεγαλύτερου πάχους, έχοντας λάβει υπόψη τις δυνάμεις και τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της FSW. Το κράμα 5083-H111 πάχους 3 mm που επιλέχτηκε για τα πειράματα ταυτοποιήθηκε με χημική προσβολή με τη μέθοδο Φθορισμού Ακτίνων-X.

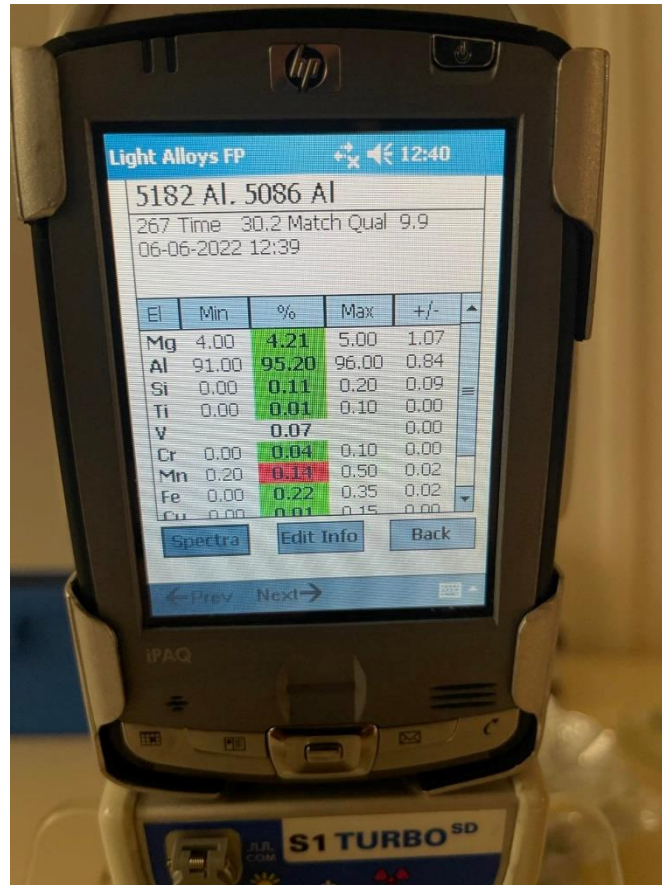
Φασματόμετρο Φθορισμού Ακτίνων X (XRF)

Το φασματόμετρο φθορισμού ακτίνων X (XRF) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των ελασμάτων αλουμινίου, ώστε να διασαφηνιστεί αν αυτά είναι της σειράς 5XXX ή της σειράς 6XXX, μιας και όλα τα ελάσματα αλουμινίου που βρέθηκαν, αφορούσαν παλαιότερες διδακτορικές διατριβές που έλαβαν χώρα στο ENT, αλλά δεν αναγραφόταν πάνω σε αυτά σε ποια σειρά ανήκουν. Τα δύο κύρια στοιχεία ενός φασματόμετρου XRF είναι μία έξοδος ακτίνων X και ένας ευαίσθητος ανιχνευτής ικανός να προσδιορίζει τις φθορίζουσες ακτίνες X από το προσπίπτον φως. Το XRF λειτουργεί καθώς αν ένα δείγμα δεχθεί μία έντονη δέσμη ακτίνων X, γνωστή ως προσπίπτουσα δέσμη, ένας μέρος της ενέργειας σκεδάζεται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται μέσα στο δείγμα, με τρόπο που εξαρτάται από την χημεία του. Όταν αυτή η πρωτογενής δέσμη ακτίνων X πέφτει στο δείγμα, λέγεται ότι διεγείρεται. Το διεγερμένο δείγμα εκπέμπει με τη σειρά του ακτίνες X σε ένα φάσμα μηκών κύματος που χαρακτηρίζουν τους τύπους των ατόμων που υπάρχουν στο δείγμα, Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3-9 Αρχή λειτουργίας XRF

Τα άτομα του δείγματος απορροφούν την ενέργεια των ακτίνων X με ιονισμό, εκτοξεύοντας ηλεκτρόνια από τα κατώτερα ενεργειακά επίπεδα. Τα εκτοξευόμενα ηλεκτρόνια αντικαθίστανται από ηλεκτρόνια από ένα εξωτερικό, υψηλότερης ενέργειας τροχιακό. Όταν συμβαίνει αυτό, απελευθερώνεται ενέργεια λόγω της μειωμένης ενεργειακής σύνδεσης του εσωτερικού τροχιακού σε σύγκριση με το εξωτερικό. Αυτή η απελευθέρωση ενέργειας γίνεται με τη μορφή εκπομπής χαρακτηριστικών ακτίνων X που υποδεικνύουν τον τύπο του ατόμου που υπάρχει. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το XRF S1 Turbo Bruker του ENT (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3-10 Το XRF S1 Turbo Bruker κατά την εξέταση δείγματος ελάσματος αλουμινίου

3.4 Μεταλλογραφική Προετοιμασία

Για να προσδιοριστεί η ποιότητα κάθε συγκόλλησης FSW, χρειάστηκε η μεταλλογραφική μελέτη της. Αρχικά, όλα τα συγκολλημένα ελάσματα κόπηκαν σε μικρότερα κομμάτια με τη χρήση του κοπτικού δίσκου του ENT. Στη συνέχεια, αφού τα δοκίμια κοπούν σε κατάλληλες διαστάσεις, απαραίτητη είναι η πραγματοποίηση της κατάλληλης μεταλλογραφικής προετοιμασίας για την παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο και τη μέτρηση της μικροσκληρότητάς του. Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα της μεταλλογραφικής προετοιμασίας είναι :

- Εγκιβωτισμός
- Λείανση
- Στίλβωση
- Χημική ή Ηλεκτρολυτική προσβολή

Εγκιβωτισμός

Το πρώτο στάδιο για την μεταλλογραφική προετοιμασία αποτελεί ο εγκιβωτισμός, αφού εξαιτίας αυτού, γίνεται πιο εύκολα ο χειρισμός του δοκιμίου κατά τα επόμενα στάδια. Κατά τον εγκιβωτισμό, που λόγω της τοξικότητας των χρησιμοποιούμενων σκληρυντών, πρέπει πάντα να πραγματοποιείται εντός απαγωγού, τα προς μελέτη

δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικά καλούπια τα οποία έχουν αλειφθεί με σιλικόνη ώστε να καθίσταται εύκολη η αποκόλληση των δοκιμίων. Έπειτα, ένα μείγμα οργανικών ουσιών αρκετά μεγάλου ιξώδους εισάγεται εντός του καλουπιού. Το μείγμα περιλαμβάνει ρητίνη με κατάλληλο σκληρυντή και προκύπτει μετά την ανάμειξη και την γρήγορη ανάδευση τους. Οι αναλογίες των δύο υλικών αναγράφονται στις συσκευασίες τους και μετά την διαδικασία αυτή, τα δοκίμια, ανάλογα με τον τύπο της ρητίνης, χρειάζονται κάποιο χρόνο για να στερεοποιηθούν (20 min – κάποιες ώρες). Κατά το πρώτο στάδιο της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν καλούπια που φαίνονται στην Εικόνα 3.11. Στην Εικόνα 3.12, φαίνονται τα καλούπια διατομής Φ30 που χρησιμοποιήθηκαν στο δεύτερο στάδιο της εργασίας, καθώς και ένα δοκίμιο που έχει στερεοποιηθεί.



Εικόνα 3-11 Ορθογώνιο καλούπι εγκιβωτισμού δοκιμίων



Εικόνα 3-12 Καλούπι Φ30 και δοκίμιο μετά από εγκιβωτισμό

Λείανση

Το στάδιο της λείανσης πραγματοποιείται σε κατάλληλη υδρόψυκτη λειαντική μηχανή, η οποία αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το περιστρεφόμενο πλατό και το σύστημα ψύξης. Ειδικά χαρτιά λείανσης (γυαλόχαρτα) τοποθετούνται στο πλατό, τα οποία αποτελούνται από κόκκους SiC (καρβίδιο του πυριτίου). Αρχικά, τοποθετείται το πιο χονδρόκοκκο χαρτί για το ξεκίνημα της λείανσης, δηλαδή το 80 grit (dots/inch²), και ρυθμίζοντας τη ταχύτητα περιστροφής με μέγιστο όριο τις 600 στροφές/λεπτό (RPM), ξεκινάει η διαδικασία εναποθέτοντας το δοκίμιο πάνω στο πλατό. Στη συνέχεια, η διαδικασία συνεχίζεται τοποθετώντας όλο και πιο λεπτόκοκκα χαρτιά (220, 300, 500, 800, 1000, 2000) και για 3-5 λεπτά το κάθε χαρτί, ώστε στο τέλος το αποτέλεσμα που λαμβάνεται είναι μία εξαιρετικά λεία επιφάνεια, έτοιμη για τη διαδικασία της στίλβωσης. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η υδρόψυκτη μηχανή της εταιρείας Struers που διαθέτει το ENT.



Εικόνα 3-13 Εξοπλισμός λείανσης - στίλβωσης τύπου "Struers, LaboPol-5" του «Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας»

Στίλβωση

Η διαδικασία της στίλβωσης αποτελεί μία διαδικασία παρόμοια με τη λείανση. Η κατεργασία της στίλβωσης πραγματοποιείται στην ίδια διάταξη με αυτήν της λείανσης αλλά εμφανίζει ορισμένες σημαντικές διαφορές. Στη διαδικασία αυτή τοποθετείται στο περιστρεφόμενο πλατό δίσκος καλυμμένος από βελούδινο πανί και πάνω σε αυτόν εναποτίθεται πάστα αλούμινας (Al_2O_3) με κοκκομετρία 1 μm . Το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται μόλις εξαλειφθούν οι γραμμές από το τελευταίο στάδιο της λείανσης και στη συνέχεια εναποτίθεται αλούμινα με κοκκομετρία 0,1 μm . Το αποτέλεσμα της στίλβωσης είναι μία εξαιρετικά λεία επιφάνεια και στο στάδιο αυτό το δοκίμιο είναι έτοιμο για την πραγματοποίηση της χημικής προσβολής.

Χημική Προσβολή

Για την παρατήρηση της μικροδομής ενός μεταλλικού δοκιμίου με χρήση οπτικού μικροσκοπίου απαιτείται η πραγματοποίηση της χημικής ή ηλεκτρολυτικής του προσβολής. Για κάθε κράμα υπάρχει ένα χημικό διάλυμα, το οποίο διαβρώνει επιλεκτικά τα όρια των κόκκων του με αποτέλεσμα οι κόκκοι να είναι ορατοί με χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Εν προκειμένω, όλα τα δοκίμια των δεύτερων δοκιμών προσβλήθηκαν με το διάλυμα Modified Poulton's reagent, του οποίου η χημική σύσταση παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3. Οι πρώτες δοκιμές δεν προβλήθηκαν χημικά, εκτός από μία που προσβλήθηκε με το διάλυμα Keller's reagent. Οι υπόλοιπες εξετάστηκαν σε ό,τι αφορά τη μικροδομή τους με την χρήση του μικροσκοπίου και του στερεοσκοπίου.

Πίνακας 3.4 : Το διάλυμα χημικής προσβολής Keller's

(Keller's reagent)	2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5 mL HNO ₃ (conc), 190 mL H ₂ O
--------------------	---

Πίνακας 3.4 : Το διάλυμα χημικής προσβολής Poulton's [29]

Διάλυμα προσβολής	Χημική του σύσταση
Modified Poulton's reagent	20 mL Poulton's reagent (12 mL HCl, 6 mL HNO ₃ , 1 mL HF, 1 mL H ₂ O), 10 mL HNO ₃ , διάλυμα αποτελούμενο από 4.8 g CrO ₃ σε 16 mL of H ₂ O

3.5 Οπτική και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

Οπτική Μικροσκοπία

Αφού πραγματοποιήθηκε η μεταλλογραφική προετοιμασία, στη συνέχεια τα δοκίμια παρατηρήθηκαν με χρήση του οπτικού στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου. Το ENT είναι εξοπλισμένο με το οπτικό στερεοσκόπιο «LEICA MZ6» (Εικόνα 3.14 δεξιά), το οποίο έχει δυνατότητα μεγεθύνσεων από x 6.3 έως x 40 και επίσης με το οπτικό μικροσκόπιο τύπου «LEICA DMILM» (Εικόνα 3.14 αριστερά), το οποίο με τη σειρά του έχει δυνατότητα μεγέθυνσης x 100, x 200, x 500 και x 1000, καθώς επίσης είναι εξοπλισμένο με αναλυτή και πολωτή φωτός. Τα δύο αυτά μέσα οπτικής παρατήρησης είναι συνδεδεμένα μέσω κάμερας με το λογισμικό ανάλυσης εικόνας “Leica LAS application software” για να είναι δυνατή η λήψη των διαφόρων μακρο- και μικρογραφιών.



Εικόνα 3-14 Το οπτικό μικροσκόπιο (αριστερά) και το οπτικό στερεόσκόπιο (δεξιά) του ENT

Συγκεκριμένα, το οπτικό στερεόσκόπιο χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της μακροδομής των δοκιμίων. Με την βοήθεια του μετρήθηκαν επίσης το πλάτος της συγκόλλησης καθώς και το βάθος της ανάμιξης και παρατηρήθηκαν επίσης οι ζώνες των δοκιμίων. Με το οπτικό μικροσκόπιο έγινε η παρατήρηση της μικροδομής των δοκιμίων. Πιο αναλυτικά, έγινε μεγαλύτερη παρατήρηση στις ζώνες συγκόλλησης, καθώς επίσης και μεγαλύτερη ανάλυση στον πυρήνα, έγινε εύρεση ατελειών και επίσης ελέγχθηκε η ανάμιξη των δύο υλικών σε μεγαλύτερο εύρος.

Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης

Για την παρατήρηση της μικροδομής σε μεγάλη μεγέθυνση και για τη μελέτη των ενώσεων της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) “ Jeol JSM 6390LV” του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ (βλ. Εικόνα 3.15) με δυνατότητα χημικής ανάλυσης μέσω φασματοσκοπίας διασποράς ενέργειας (Energy Dispersive Spectroscopy system, EDS, Oxford Inca Energy 250).



Εικόνα 3-15 Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης Jeol JSM 6390LV του ENT.

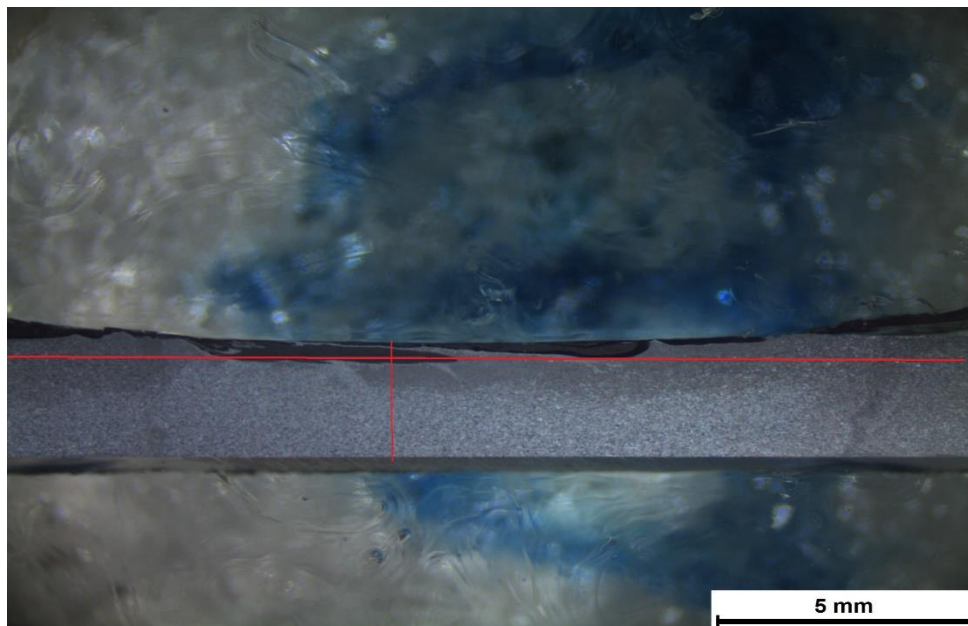
3.6 Μέτρηση της κατανομής της μικροσκληρότητας

Για τη μελέτη της κατανομής μικροσκληρότητας χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο “Wolpert Wilson 402MVD”, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 84. Σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε φορτίο 10g.



Εικόνα 3-16 Το μικροσκληρόμετρο "Wolpert Wilson 402MVD" του ENT

Η διαμήκης κατανομή μελετήθηκε 0.3 mm περίπου κάτω από την επιφάνεια του περιουχενίου, λαμβάνοντας μετρήσεις σε όλες τις ζώνες συγκόλλησης. Η εγκάρσια κατανομή μικροσκληρότητας μελετήθηκε εντός του πυρήνα συγκόλλησης και συγκεκριμένα στο κέντρο του με κατεύθυνση από την επιφάνεια περιουχενίου προς την επιφάνεια υποστήριξης. Η εγκάρσια κατανομή ήταν απαραίτητη διότι εντός του πυρήνα συγκόλλησης, η θερμοκρασιακή κατανομή δεν είναι η ίδια με αποτέλεσμα την μικρή ανομοιομορφία του μεγέθους των κόκκων κυρίως κατά το πάχος του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διακύμανση της σκληρότητας στην περιοχή αυτή, η παρατήρηση της οποίας είναι σημαντική. Χαρακτηριστικά της μέτρησης της μικροσκληρότητας φαίνονται στο σχήμα της Εικόνα 3.17, όπου με τις κόκκινες γραμμές φαίνονται οι ζώνες μέτρησης.



Εικόνα 3-17 Ζώνες μέτρησης μικροσκληρότητας δοκιμίου

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και κάποια χρήσιμα σχόλια που αναφέρονται σε αυτά ξεχωριστά. Στο εδάφιο 4.1 θα περιγραφεί η ονοματολογία των δοκιμών και στα εδάφια 4.2 και 4.3 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα μέσω φωτογραφιών από τα οπτικό μικροσκόπιο και το στερεοσκόπιο καθώς και από το SEM.

4.1 Ονοματολογία Δοκιμών

Όπως τονίστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, η πειραματική διαδικασία έγινε σε δύο στάδια λόγω βλάβης της μηχανής συγκόλλησης του ENT. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των πρώτων δοκιμών, η συνέχεια περιελάμβανε πιο στοχευμένες συνθήκες σε ό,τι αφορά τα πειράματα. Κατά το πρώτο στάδιο συγκολλήσεων, λοιπόν, έγιναν αρκετά πειράματα, ώστε αρχικά να γίνει καλύτερη εξοικείωση του φοιτητή με την μηχανή και τον εξοπλισμό του εργαστηρίου, καθώς επίσης και διάφορες δοκιμές με διαφορετικά εργαλεία και σε διαφορετικές συνθήκες για να επιτευχθεί ένα αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα, οπτικά σε πρώτη φάση. Από αυτές τις συγκολλήσεις επιλέχθηκαν μερικές για μεταλλογραφία, ενώ μερικές απορρίφθηκαν για σφάλματα που φαινότουσαν με γυμνό μάτι (tunnels, cracks, flash).

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι συγκολλήσεις του πρώτου μέρους καθώς και ο λόγος της ταχύτητας περιστροφής προς την ταχύτητα πρόωσης για κάθε διαφορετικό ζεύγος ταχυτήτων.

Πίνακας 4.1 : Ονοματολογία δοκιμών και συνθήκες που έλαβαν χώρα στο πρώτο στάδιο

Sample Number	Rotational Speed	Traverse Speed	Angle	ω/v	Pin
	[rev * min ⁻¹]	[mm * min ⁻¹]	degrees		
1	1500	60	1	25.0	2
2 L	1180	30	0	39.3	1
2 R	1180	75	0	15.7	1
3 L	1180	75	0	15.7	2
3 R	1180	60	0	19.7	2
4 L	1180	75	1	15.7	2
4 R	1500	75	1	20.0	2
5	1180	30	0	39.3	2

Σε ό,τι αφορά τα σύμβολα “R” και “L”, αναφέρονται στην εκάστοτε πλευρά όταν ο παρατηρητής κοιτάει το δοκίμιο. Το σύμβολο “R” αναφέρεται στην δεξιά πλευρά του

δοκιμίου και το σύμβολο “L” στην αριστερή πλευρά, όταν τα κοιτάζει ο παρατηρητής στην πλευρά που έχει υποστεί λείανση. Ακόμα, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο. Το νούμερο 1 εργαλείο συγκόλλησης διαθέτει διάμετρο εργαλείου 22.3 mm και διάμετρο πείρου 5.1 mm και είναι τύπου ελικοειδούς. Το εργαλείο νούμερο 2 είναι το εργαλείο με το οποίο έγιναν και οι υπόλοιπες συγκολλήσεις της δεύτερης φάσης και η περιγραφή του οποίου έγινε στο Κεφάλαιο 3.

Στις αρχικές συγκολλήσεις το εύρος της γωνίας κλίσης ήταν από 0° έως 1° εξαιτίας ρύθμισης του φοιτητή, ενώ επίσης η επιθυμία ήταν να διατηρηθεί υψηλός ο λόγος ω/v και ταυτόχρονα να υπάρχει μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Ακόμη, στα δοκίμια που περιλαμβάνουν την αρίθμηση 2, να τονιστεί πως τα ελάσματα του αλουμινίου ήταν πάχος ενός χιλιοστού καθώς επίσης και της σειράς 6XXX. Πιο συγκεκριμένα ήταν έλασμα 6082 σε κατάσταση T6, διαστάσεων 100 x 200 mm και πάχους 1 mm.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα δοκίμια που αφορούν το δεύτερο μέρος των συγκολλήσεων, τα οποία έγιναν στο εργαστήριο της ΣΜΜ.

Πίνακας 4.2 : Ονοματολογία δοκιμίων και συνθήκες που έλαβαν χώρα στο δεύτερο στάδιο

Δοκίμιο	Ταχύτητα Περιστροφής ω	Ταχύτητα Πρόωσης v	ω/v	Angle
	[rev * min ⁻¹]	[mm * min ⁻¹]		
A	1000	32	31.25	3°
B	1000	21	47.62	3°
Γ	1000	13	76.92	3°
Δ	1000	13	76.92	3°

Όλες οι ραφές έγιναν σε κλίση 3° και σε διάταξη διαφορετική σε σχέση με τις συγκολλήσεις του πρώτου σταδίου, όπως έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 3. Παρατηρούμε τον μεγαλύτερο λόγο ω/v που επιτυγχάνεται με την συγκεκριμένη μηχανή συγκόλλησης καθώς επίσης και τις αρκετές στροφές που είναι ικανή η μηχανή συγκόλλησης να φτάσει. Ταυτόχρονα, άξιο σημασίας είναι και η διαφορά μεταξύ των δοκιμίων Γ και Δ. Τα δύο αυτά δοκίμια έχουν τις ίδιες ακριβώς συνθήκες συγκόλλησης. Η διαφορά τους έγκειται στην διάταξη, όπου έγινε μία εξωτερική παρέμβαση για καλύτερο αποτέλεσμα σε ό,τι αφορά το αποτέλεσμα με γυμνό μάτι. Πιο συγκεκριμένα, δύο ελάσματα αλουμινίου τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν της διεύθυνσης ραφής συγκόλλησης, πριν την έναρξη της συγκόλλησης, ώστε να δημιουργήσουν επιπλέον αντίσταση κατά την περιστροφή του πείρου. Στην ουσία, ο λόγος που η διάταξη πήρε αυτή την μορφή, ήταν για να επιτευχθεί η πιο ομαλή πορεία της ραφής, καθώς χωρίς την παρέμβαση αυτή, ο χαλκός έτεινε να «σκίζεται» εξαιτίας του συνδυασμού της περιστροφής και της πρόωσης του πείρου και όχι να αναμειγνύεται σε μεγάλο βαθμό με το αλουμίνιο. Το φαινόμενο αυτό καθώς και η ανάλυση της συγκεκριμένης διάταξης θα αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε επόμενο εδάφιο.

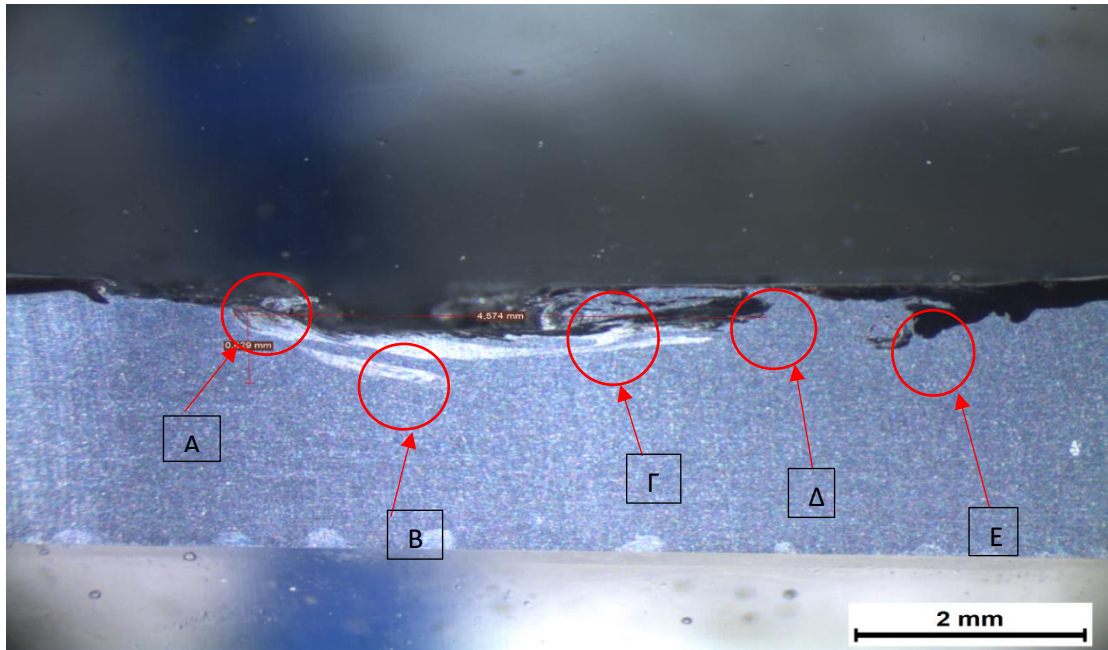
4.2 Αξιολόγηση Συγκολλήσεων Πρώτου Μέρους

- Δοκίμιο 1 (1180/75/1°)



Εικόνα 4-1 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 1

Για την ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου 1, όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 4.1 υπάρχουν τα εξής σχόλια σε ό,τι αφορά το οπτικό αποτέλεσμα : Παρατηρείται στην μέση περίπου της ραφής μία σταδιακή μείωση της διαμέτρου του αποτυπώματος του πείρου που τελικά οδηγεί σε λεία επιφάνεια αλουμίνιου. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι υπάρχει ένα σχετικό ελάττωμα στο κεντρικό γρανάζι της μηχανής του ENT, το οποίο πιο συγκεκριμένα απορρυθμίζει την άσκηση της κάθετης δύναμης που ασκείται με αποτέλεσμα να επηρεάζει την ραφή. Ωστόσο, παρατηρείται πως το αποτέλεσμα γίνεται πιο επιθυμητό στη συνέχεια καθώς, ασκήθηκε η απαιτούμενη κάθετη δύναμη ώστε να υπάρχει πάλι η επιθυμητή ραφή. Έτσι, φαίνεται και η σημειωμένη κάθετη στη διεύθυνση της συγκόλλησης μαύρη γραμμή, η οποία δηλώνει το σημείο που έγινε η κοπή, ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσει ο εγκιβωτισμός και η μεταλλογραφία.



Εικόνα 4-2 Μακρογραφία του δοκιμίου 1

Σε αυτό το σημείο, είναι αναγκαίο να τονιστεί, πως από τα δοκίμια του πρώτου μέρους, το συγκεκριμένο είναι το μόνο που προσβλήθηκε χημικά με το διάλυμα Keller's.

Το πλάτος της υπό εξέτασης ραφής που μελετήθηκε, μετρήθηκε με την βοήθεια του οπτικού στερεοσκοπίου στα 4,574 χιλιοστά, ενώ το βάθος της αντίστοιχα γύρω 0,829 mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

Στην Εικόνα 4.3, παρουσιάζονται τα σημεία Α,Β,Γ,Δ,Ε της εικόνας 4.2, με λήψεις από το οπτικό μικροσκόπιο. Γενικότερα, φαίνεται από την μακρογραφία του δοκιμίου, αλλά πιο καθαρά από τις μικρογραφικές λήψεις, πως έχει επιτευχθεί ανάμειξη των δύο υλικών σε επιθυμητό βαθμό. Ακόμα, φαίνεται πως στο κέντρο της ραφής συγκόλλησης τείνουν να δημιουργηθούν κάποια rings στην περιοχή του pugget. Μελετώντας την Εικόνα 4.3, καθώς και την μακροδομή, φαίνονται κάποιες διαφορές σε ό,τι αφορά τους κόκκους του αλουμινίου και έτσι αποδεικνύεται η ύπαρξη διαφορετικών ζωνών.

Αναλυτικότερα στην Εικόνα 4.3.Α, η οποία αφορά το αριστερό μέρος της ραφής, στην RS, διακρίνεται η ροή του χαλκού μέσα στο αλουμίνιο και ταυτόχρονα παρατηρείται ανάμειξη των δύο υλικών, σε μία περιοχή που είναι στα όρια της TMAZ και του κέντρου ανάδευσης. Στην Εικόνα 4.3.Β, η οποία αφορά το κέντρο ανάδευσης του δοκιμίου, παρατηρείται πως τόσο κοντά στην επιφάνεια όσο και στο κάτω μέρος υπάρχει μίγμα πλούσιο σε αλουμίνιο και χαλκό, ενώ μεταξύ τους υπάρχει καθαρό αλουμίνιο, ενώ ταυτόχρονα τείνουν να σχηματιστούν οπιοn rings στο εσωτερικό του pugget, δείχνοντας έτσι πως οι συνθήκες που εκλέχθηκαν για το συγκεκριμένο δοκίμιο είναι αρκετά ικανοποιητικές. Οι εικόνες 4.3.Γ και 4.3.Δ είναι στην ουσία η μία συνέχεια της άλλης. Πιο λεπτομερώς, φαίνεται να υπάρχει και σε αυτή την περιοχή, που αναφέρεται στην δεξιά πλευρά της ραφής, στην AS, πλήρης ανάμειξη των υλικών και να σχηματίζονται δεσμοί μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα φαίνεται και το όριο της TMAZ με την HAZ. Τέλος, φαίνεται στην Εικόνα 4.3.Ε, μία λεπτομέρεια η οποία ανήκει στην

HAZ. Εκεί, φαίνεται πως ενώ ο χαλκός είναι στο πάνω στρώμα του αλουμινίου χωρίς να έχει γίνει ανάμειξη των δύο υλικών, στο συγκεκριμένο σημείο παρουσιάζεται μία κουκίδα ανάμειξης, γεγονός που ίσως οφείλεται είτε στην τοπική αύξηση/μείωση της κάθετης δύναμης στο σημείο της ραφής, είτε στο εργαλείο συγκόλλησης και την γεωμετρία του. Αριστερά του σημείου, φαίνεται πάλι καθαρός χαλκός, που σηματοδοτεί πως το συγκεκριμένο σημείο είναι το τελευταίο σημείο ανάμειξης του δοκιμίου και προκαλεί εντύπωση πως αυτό λαμβάνει χώρα στην περιοχή του μετάλλου βάσης.

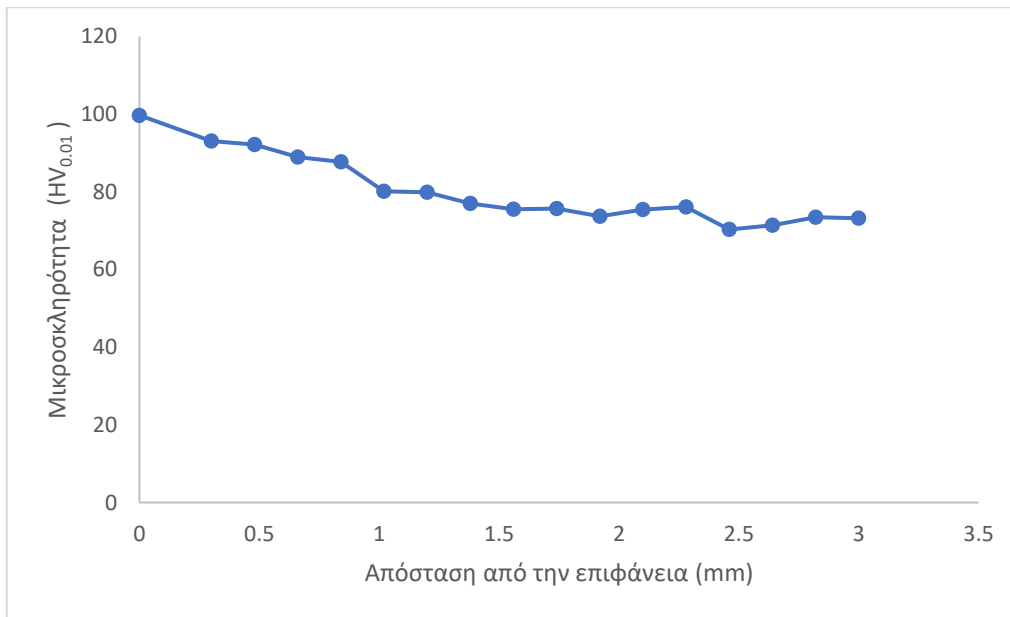
Λεπτομερέστερα, πληροφορίες σχετικά με τις υποπεριοχές και την πιθανή ανάμειξη των δύο υλικών, έγινε με την βοήθεια του SEM. Στην Εικόνα 4.4.A και στην Εικόνα 4.4.B παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την Εικόνα 4.3.Δ. Αρχικά, φαίνεται σε πιο μακρινή όψη, πως στην συγκεκριμένη περιοχή, έχει επέλθει ανάμειξη του αλουμινίου με τον χαλκό. Έπειτα, εστιάζοντας και μεγεθύνοντας εκεί, φαίνεται καλύτερα το πως τα δύο υλικά έχουν αναμειχθεί μεταξύ τους και μάλιστα, εξαιτίας της ροής του χαλκού μέσα στο αλουμίνιο.

Για καλύτερη διευκρίνιση της Εικόνας 4.3.E, έγινε ενδελεχή εξέταση της συγκεκριμένης περιοχής. Αρχικά, διακρίνεται επίσης στην Εικόνα 4.4.Γ, το συγκεκριμένο σημείο του δοκιμίου. Στην αμέσως επόμενη φωτογραφία του SEM, στην Εικόνα 4.4.Δ, μεγεθύνοντας, παρατηρείται μείγμα των δύο υλικών σε ίση ποσότητα, ενώ παρατηρώντας την Εικόνα 4.4.E μπορεί κανείς να διακρίνει καθαρά τον χαλκό που έχει επιτυχώς υπεισέλθει εντός του αλουμινίου σε αυτό το σημείο.

Αντίστοιχα αποτελέσματα λαμβάνονται και με την μέτρηση της σκληρότητας στην διαμήκη διεύθυνση, αλλά και στην κατακόρυφη (στην κατακόρυφο του κέντρου ανάδευσης). Στο Διάγραμμα 4.1.A, φαίνεται η αύξηση της σκληρότητας σε μία περιοχή δεξιά και αριστερά από το κέντρο του δοκιμίου, η οποία οφείλεται στην μίξη των δύο υπό συγκόλληση υλικών. Οι μετρήσεις της σκληρότητας λήφθηκαν σε μία διαμήκη ζώνη, η οποία απέχει 0.5 χιλιοστά από την επιφάνεια του δοκιμίου. Λεπτομερώς, φαίνεται και η μείωση της σκληρότητας στην κατακόρυφο, καθώς από μίγμα Al-Cu, καταλήγει στο βασικό μέταλλο και την ονομαστική του σκληρότητα.

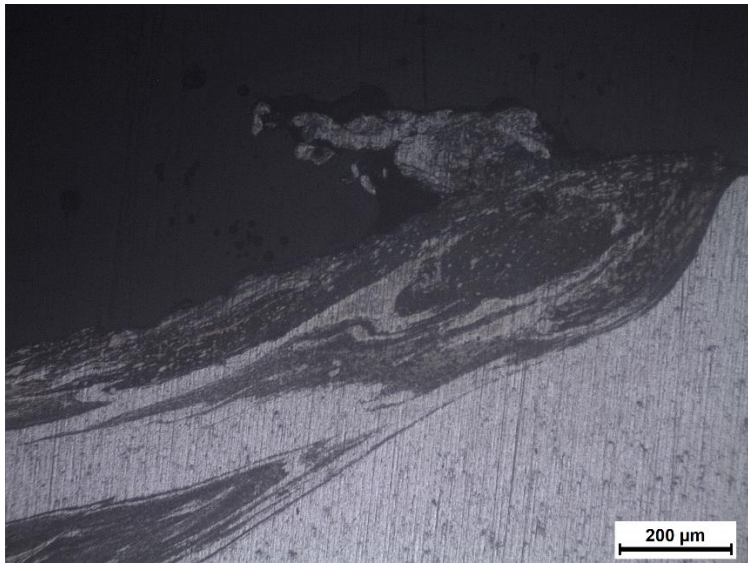


A

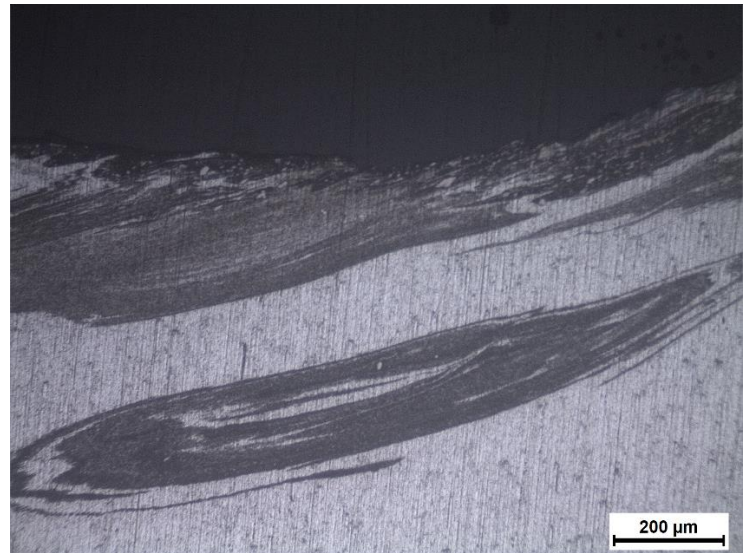


B

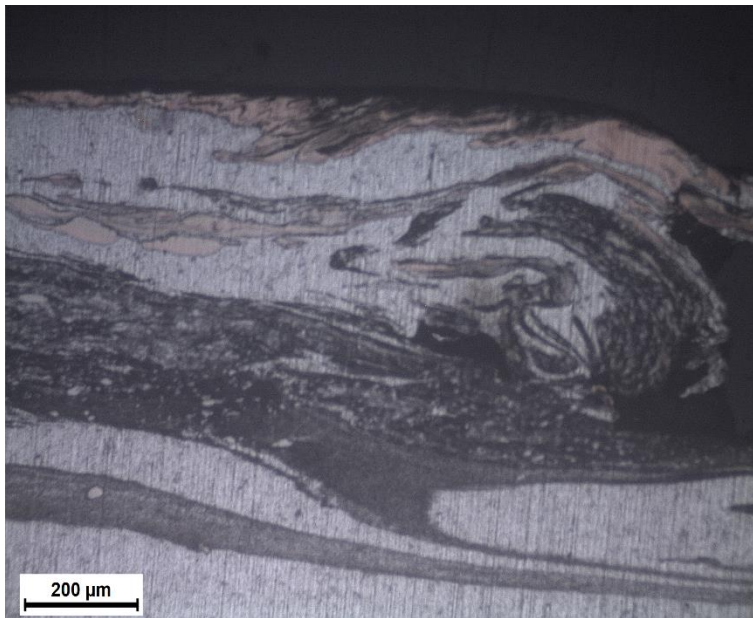
Διάγραμμα 4-1 Αποτέλεσμα μέτρησης μικροσκληρότητας δοκιμίου 1 κατά το διάμηκες (A) και κατά το εγκάρσιο στο κέντρο του δοκιμίου (B)



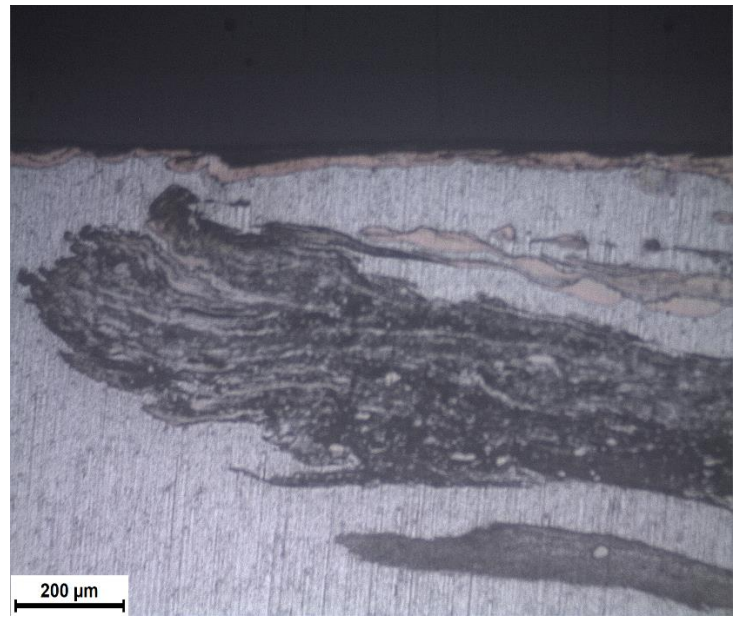
(Α)



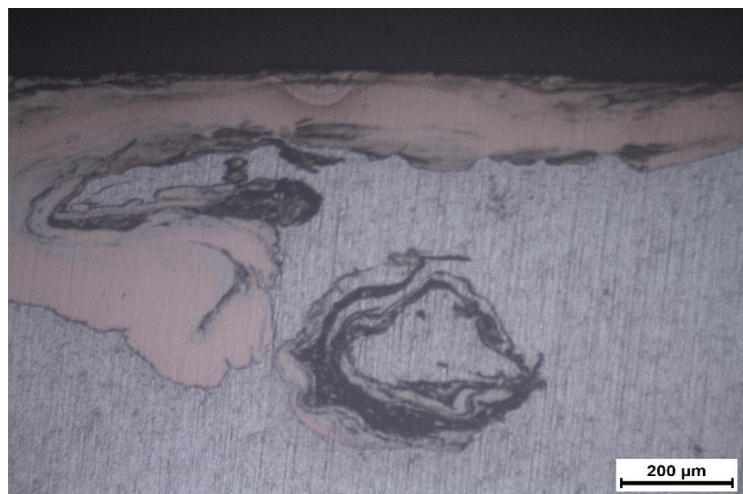
(Β)



(Γ)

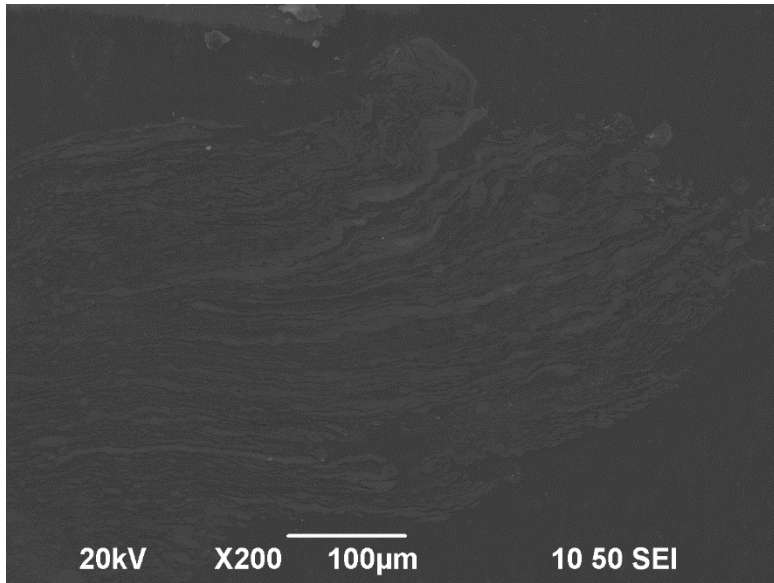


(Δ)

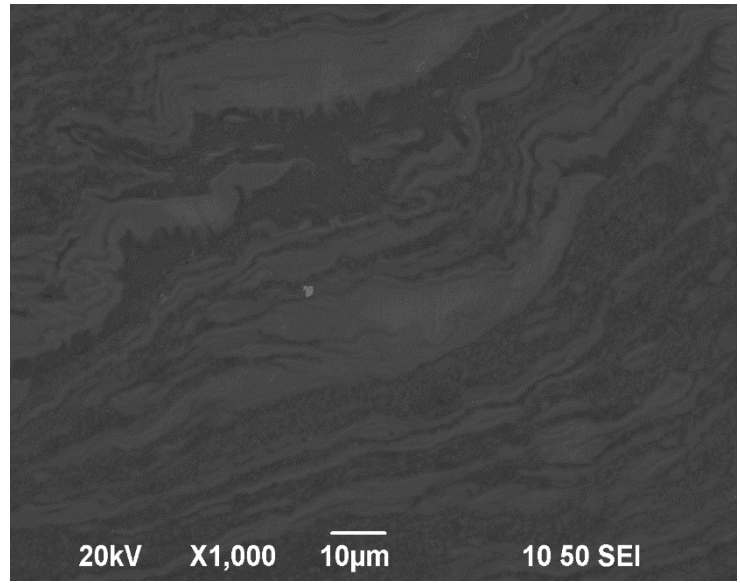


(Ε)

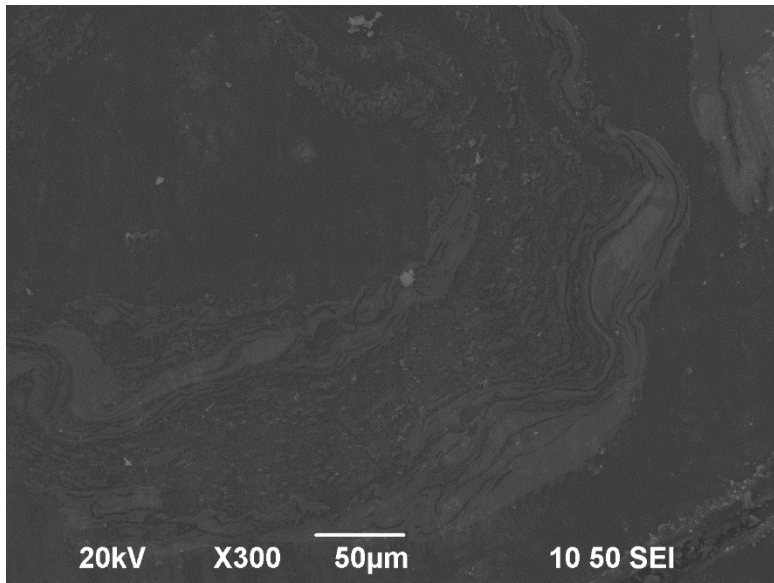
Εικόνα 4-3 Μικρογραφία του δοκιμίου 1. Σημεία Α,Β,Γ,Δ,Ε από την Εικόνα 4.2



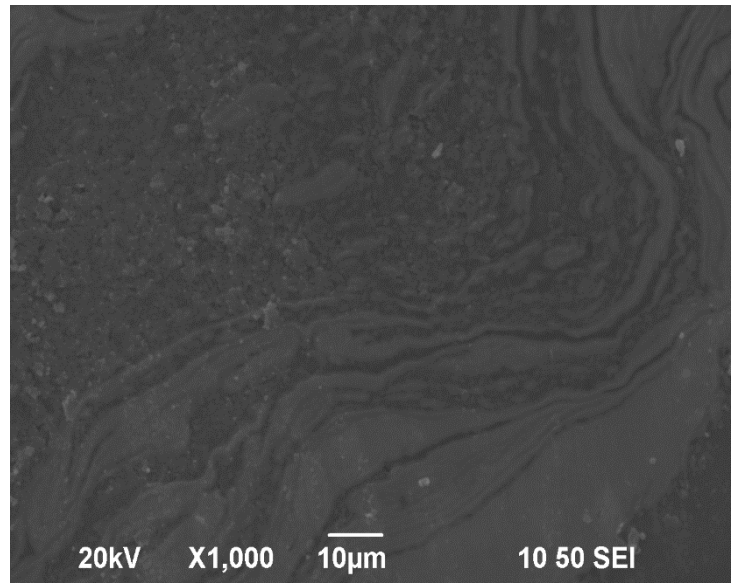
(A)



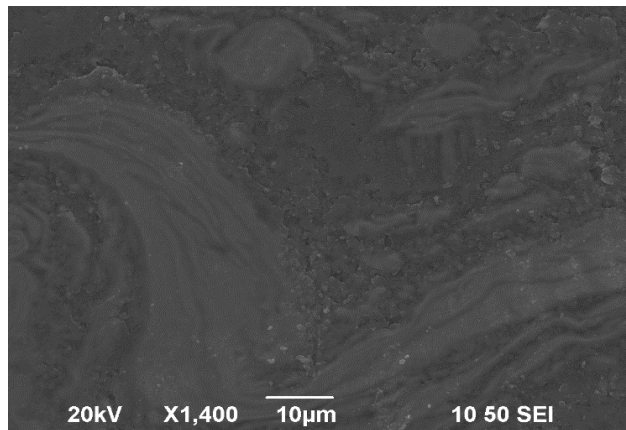
(B)



(Γ)



(Δ)



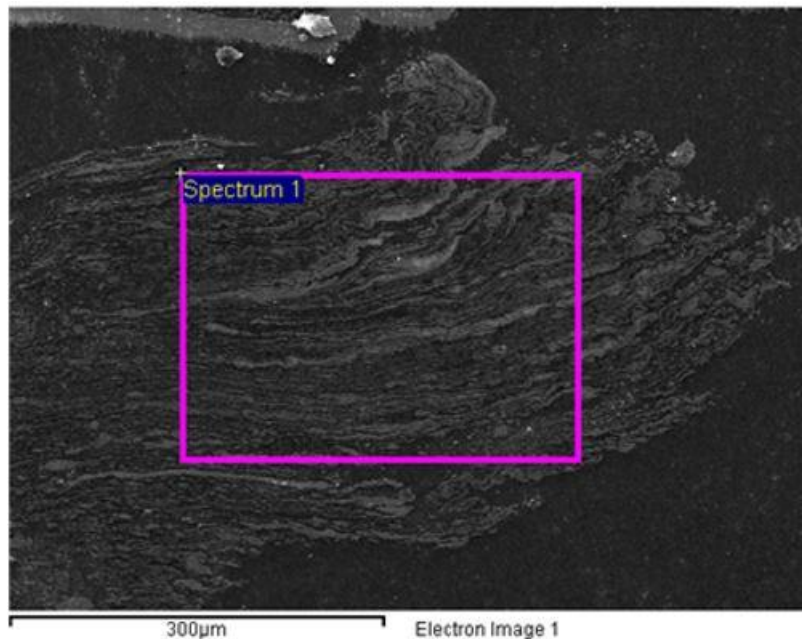
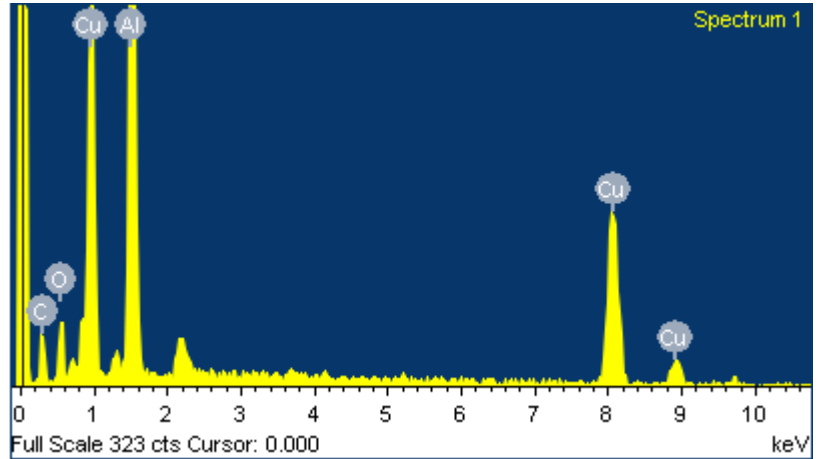
(E)

Εικόνα 4-4 Λήψεις από το SEM που αφορούν υποπεριοχές δοκιμίου

Για δύο από αυτές τις παρατηρήσεις που έγιναν στο SEM, λήφθηκαν και οι αντίστοιχες χημικές αναλύσεις EDS. Εξετάζοντας και αυτά τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται πως και στις δύο αυτές περιοχές, υπάρχει αρκετή ποσότητα αλουμινίου και χαλκού και έτσι επιτυχώς έχουμε ανάμειξη. Λεπτομέρειες σχετικά με το EDS των σημείων αυτών παρουσιάζονται παρακάτω.

Standard
 C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	19.48	41.13
O K	7.61	12.06
Al K	32.78	30.80
Cu K	40.12	16.01
Totals	100.00	



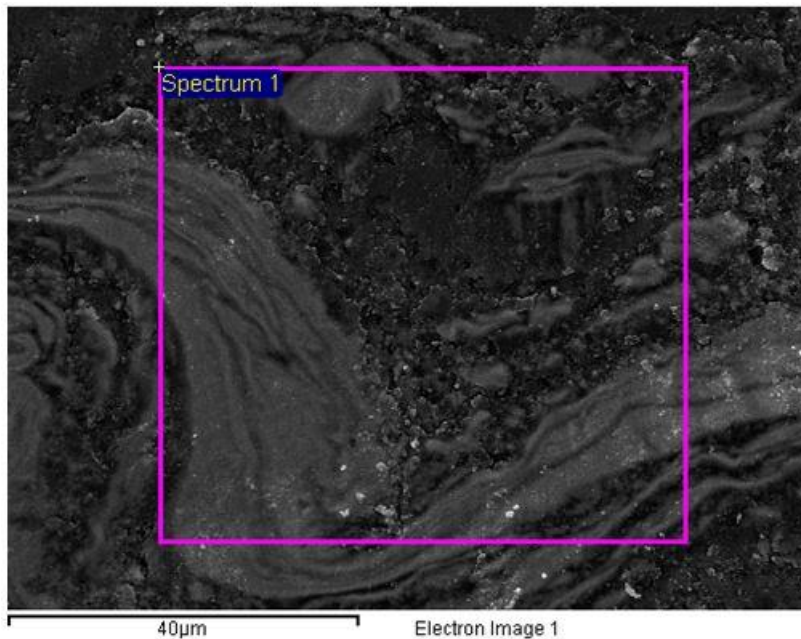
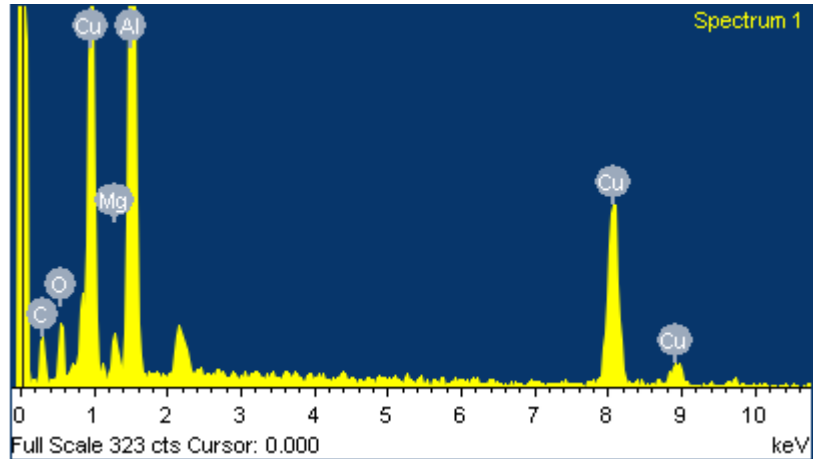
Εικόνα 4-5 Αποτελέσματα EDS για την περιοχή της Εικόνας 4.4.A

Πιο συγκεκριμένα, η παραπάνω χημική ανάλυση έχει γίνει στην περιοχή που αφορά την Εικόνα 4.4.A. Στη συγκεκριμένη περιοχή, έχει επέλθει ανάμειξη των δύο υλικών με το αλουμίνιο να διατηρεί διπλάσιο ατομικό ποσοστό από τον χαλκό. Ωστόσο το αποτέλεσμα δείχνει πως στη συγκεκριμένη κατάσταση αυτό που λαμβάνεται είναι στερεό διάλυμα.

Standard:

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	17.03	36.39
O K	6.29	10.10
Mg K	1.53	1.61
Al K	39.32	37.42
Cu K	35.83	14.48
Totals	100.00	



Εικόνα 4-6 Αποτελέσματα EDS για την περιοχή της Εικόνας 4.3.E & της Εικόνας 4.4.E

Μία ακόμα χημική ανάλυση που έλαβε χώρα, αφορούσε την περιοχή της Εικόνας 4.3.E και της Εικόνας 4.4.E. Λεπτομερέστερα, αυτό που αποτυπώνεται στο παραπάνω EDS είναι ότι και σε αυτή την περιοχή υπάρχει ανάμειξη του αλουμινίου με το χαλκό. Το αλουμίνιο και σε αυτή την περίπτωση βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό, όμως πράγματι ο χαλκός έχει καταφέρει να περάσει στο εσωτερικό, ακόμα κι αν το σημείο που εξετάζεται απέχει αρκετά από το κέντρο του δοκιμίου και το nugget.

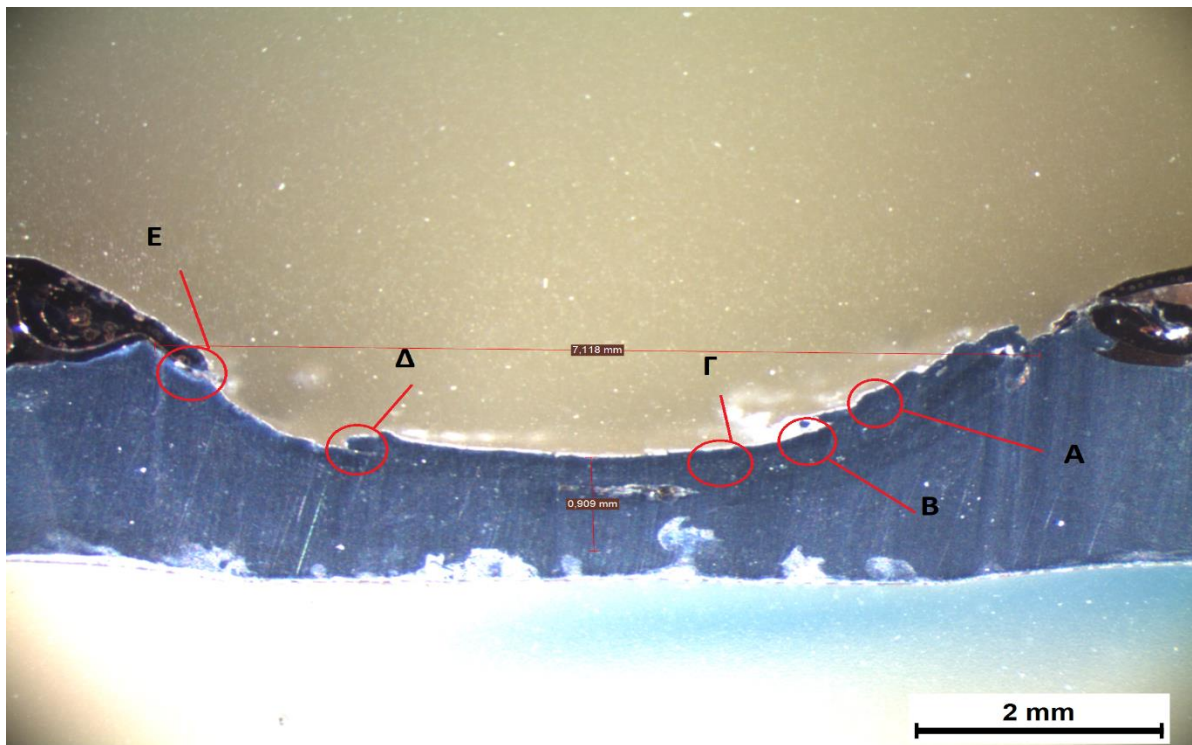
Γενικότερα, η συγκόλληση χαρακτηρίζεται σε μεγάλο βαθμό επιτυχημένη, βάσει των εικόνων τόσο μακρογραφικά όσο και μικρογραφικά. Τα δύο υλικά αναμείχθηκαν πλήρως σε ικανοποιητική έκταση, τείνοντας να σχηματίσουν οπιοι rings, οι ζώνες φαίνονται να διαχωρίζονται η μία από την άλλη και τέλος, η ραφή συγκόλλησης δείχνει να είναι αποδεκτή με γυμνό μάτι. Ακόμα, δεν παρουσιάζεται κάποιο είδους ατέλεια ή σφάλματος τόσο στη ραφή, όσο και στο εσωτερικό της ένωσης των δύο υλικών.

- Δοκίμιο 2L (1180/30/0°)



Εικόνα 4-7 Ραφή συγκόλλησης Δοκιμίου 2L

Το δοκίμιο 2, όπως έχει ήδη τονιστεί στο Κεφάλαιο 4.1, αποτελείται από δύο ραφές, ενώ ταυτόχρονα είναι το μόνο που χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό εργαλείο. Φαίνεται, λοιπόν, πως η ραφή συγκόλλησης, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7, είναι πιο πολύ μικρή σε πλάτος, καθώς επίσης και πολύ πιο «τραχιά», γεγονός που οφείλεται στο είδος του πείρου, μιας και ήταν ελικοειδής σπειρωτό. Παρατηρείται και εδώ μία αύξηση της κάθετης δύναμης ύστερα από το πρώτο τρίτο του μήκους της συγκόλλησης, ενώ στο σημείο που φαίνεται η κάθετη σημειωμένη γραμμή, έγινε ο εγκιβωτισμός και η μελέτη του δοκιμίου. Γενικότερα, σαν πρώτο σχόλιο, η ραφή συγκόλλησης δεν έχει την μορφή μίας τέλει ραφής οπτικά, ωστόσο χρειάζεται να δει κανείς και την οποιαδήποτε ανάμειξη υλικών υπάρχει.



Εικόνα 4-8 Μακρογραφία δοκιμίου 4.2 και σημεία ενδιαφέροντος

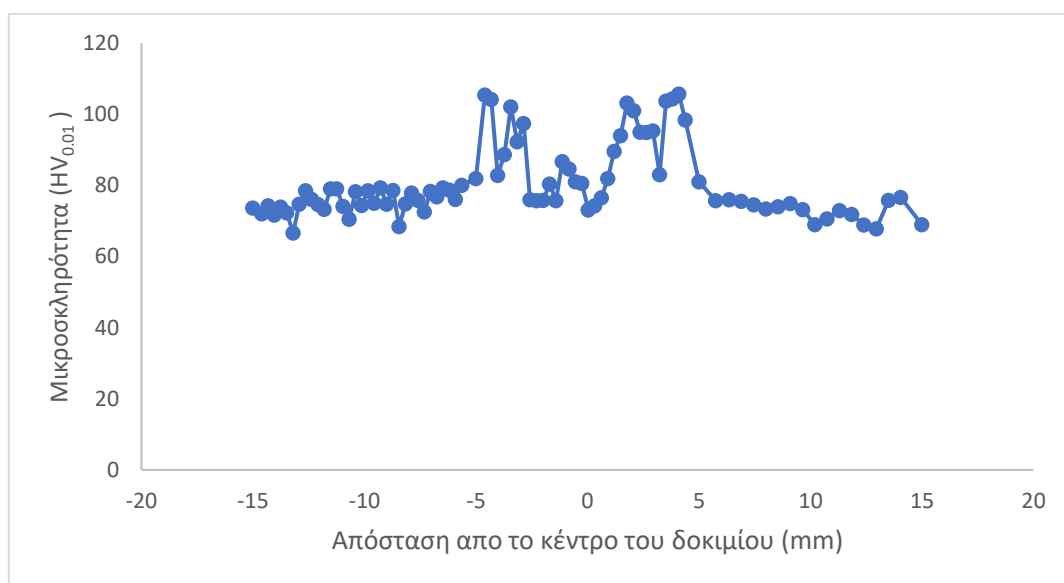
Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται λήψη από το οπτικό στερεοσκόπιο που αφορά την μακρογραφία του δοκιμίου, καθώς και κάποια σημεία ενδιαφέροντος που εξετάστηκαν

στο οπτικό μικροσκόπιο. Παρατηρείται λοιπόν, πως το πλάτος συγκόλλησης τελικά μετρήθηκε ίσο με 7,118 χιλιοστά, ενώ το βάθος της συγκόλλησης στα 0,9 χιλιοστά. Ωστόσο, φαίνεται πως η κάθετη δύναμη του πείρου έχει δημιουργήσει κάτι σαν ημικυκλική «γούβα» στο δοκίμιο, ενώ λόγω της περιστροφικής του ταχύτητας έχει εξωθήσει τον περισσότερο χαλκό στο πλάι. Παρά ταύτα, ένα ποσοστό του χαλκού φαίνεται να έχει αναμειχθεί με το αλουμίνιο.

Το ίδιο αποτυπώνεται και στην Εικόνα 4.9, όπου παρουσιάζονται οι μικρογραφίες που αφορούν την Εικόνα 4.8. Αρχικά, στην Εικόνα 4.9.A φαίνεται πως στο συγκεκριμένο σημείο, υπάρχει σκέτο αλουμίνιο, χωρίς καθόλου χαλκό, ενώ η λήψη αφορά το σημείο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ο χαλκός έχει φύγει όλος στο πλάι λόγω της γεωμετρίας του πείρου και της ταχύτητας περιστροφής, ενώ ένα μικρό ποσοστό έχει περάσει στη συγκεκριμένη περιοχή, πιο βαθιά. Στην Εικόνα 4.9.B, φαίνεται ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα, ενώ κοιτώντας προς το κέντρο του δοκιμίου, στην περιοχή του κέντρου ανάδευσης, στην Εικόνα 4.9.Γ φαίνεται πως υπάρχει μία ανάμειξη των δύο υλικών, κοινώς έχει περάσει χαλκός και στην επιφάνεια του αλουμινίου. Στην Εικόνα 4.9.Δ, παρουσιάζεται ξανά φτωχό μίγμα χαλκού, ενώ τέλος στην Εικόνα 4.9.E, παρουσιάζεται χαρακτηριστικά ο χαλκός να υφίσταται μόνο στην επιφάνεια, ενώ το αλουμίνιο να είναι πλούσιο στην περιοχή που επηρεάζει ο πείρος.

Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και από το διάγραμμα 4.2. Όπως απεικονίζεται, κατά το διάμηκες, σε μία ζώνη που απέχει 0,5 χιλιοστά από την κορυφή, φαίνεται πως στην περιοχή του κέντρου δεν έχει επέλθει ανάμειξη των δύο υλικών. Ωστόσο ο χαλκός έχει αναμειχθεί με το αλουμίνιο στις δύο περιοχές εκατέρωθεν του κέντρου, αλλά όχι σε ένα πλούσιο μίγμα σε χαλκό.

Συμπερασματικά, από όλα αυτά που χαρακτήρισαν το συγκεκριμένο δοκίμιο, κρίνεται πως δεν είναι μια επιτυχημένη ραφή συγκόλλησης. Παρά τις θεωρητικές καλές συνθήκες με βάση τη βιβλιογραφία, παρατηρήθηκε πως ούτε η ραφή, αλλά ούτε και η μεταλλογραφία δώσανε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνεπώς το συγκεκριμένο δοκίμιο είναι μη επιτυχημένο.



Διάγραμμα 4-2 Αποτέλεσμα μέτρησης μικροσκληρότητας δοκιμίου 2L κατά το διάμηκες



(A)



(B)



(Γ)



(Δ)



(E)

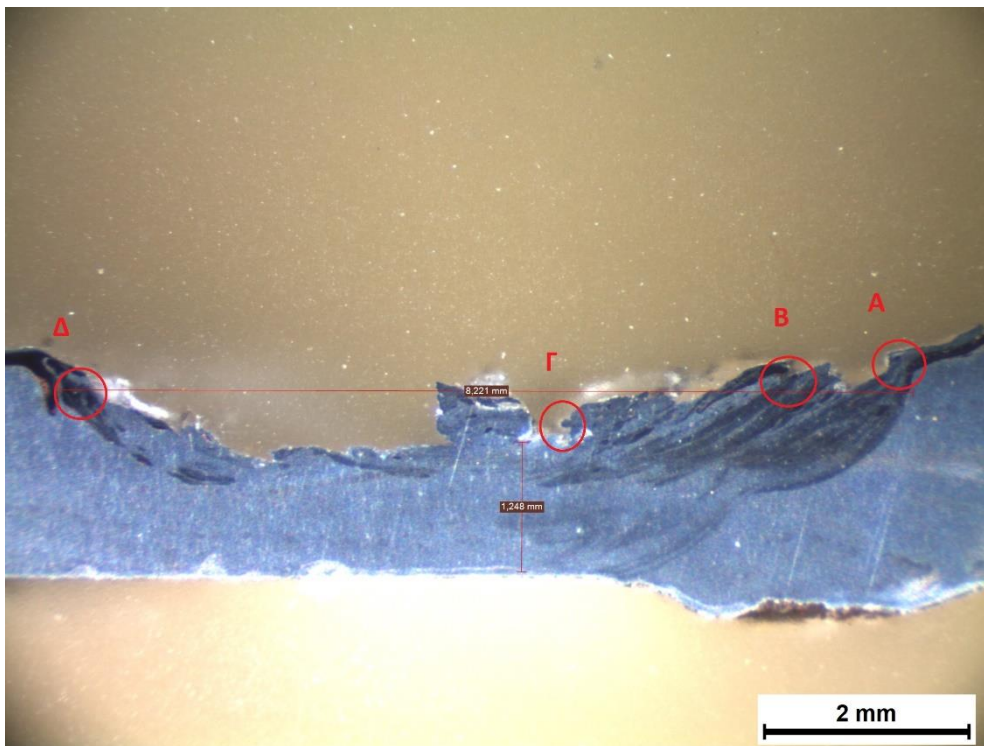
Εικόνα 4-9 Μικρογραφία δοκίμιου 2L. Σημεία ενδιαφέροντος εικόνας 4.8

- Δοκίμιο 2R (1180/75/0°)



Εικόνα 4-10 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 2R

Για το δοκίμιο 2R, η ραφή συγκόλλησης απεικονίζεται στην Εικόνα 4.10. Παρατηρείται, πως το οπτικό αποτέλεσμα της εν λόγω ραφής σε σχέση με τη προηγούμενη είναι σαφώς βελτιωμένο, καθώς επίσης δεν εμφανίζει ατέλειες. Φυσικά, εξαιτίας του πείρου, παρουσιάζεται και εδώ πιο τραχιά επιφάνεια στο δοκίμιο σε σχέση με μία τέλεια συγκόλληση, ενώ ακόμα στο σημείο που φαίνεται η κάθετη μαύρη γραμμή, κόπηκε στη συνέχεια το δοκίμιο για να εγκιβωτιστεί και να μελετηθεί μεταλλογραφικά.



Εικόνα 4-11 Μακρογραφία δοκιμίου 2R και σημεία ενδιαφέροντος

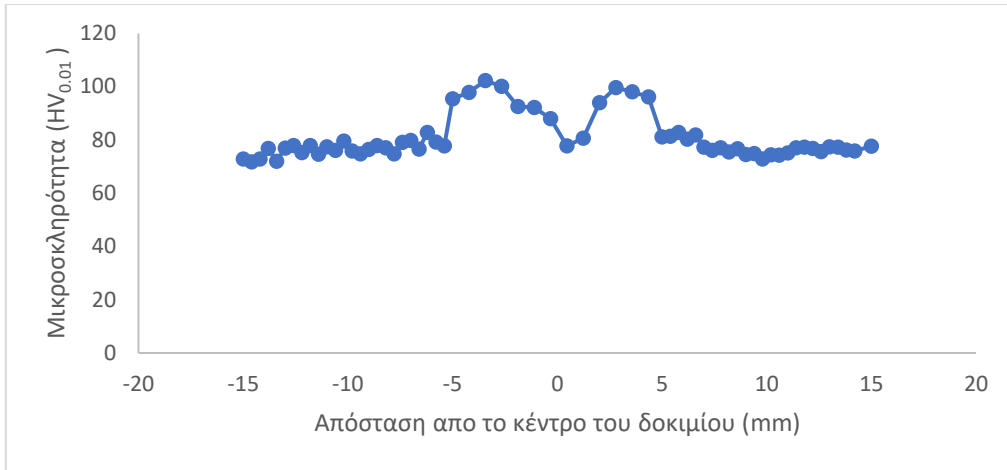
Σε αυτό το σημείο, αξίζει να τονιστεί ξανά πως το εν λόγω έλασμα αλουμινίου ήταν πάχους 1 χιλιοστού και όχι 3, όπως τα υπόλοιπα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Έτσι, παρατηρείται πως το εργαλείο συγκόλλησης έχει επηρεάσει την ραφή σε βάθος μεγαλύτερο του ενός χιλιοστού, ενώ το πλάτος της είναι λίγο μεγαλύτερο από 8 χιλιοστά. Παρατηρείται

μέσω της μακρογραφίας, πως έχει επέλθει ανάμειξη των δύο υλικών αλλά αφενός όχι σε όλο το πλάτος της ραφής και αφετέρου προξενώντας διάφορες ατέλειες. Περισσότερες λεπτομέρειες φαίνονται στην Εικόνα 4.12 που αφορά την μικρογραφία του δοκιμίου.

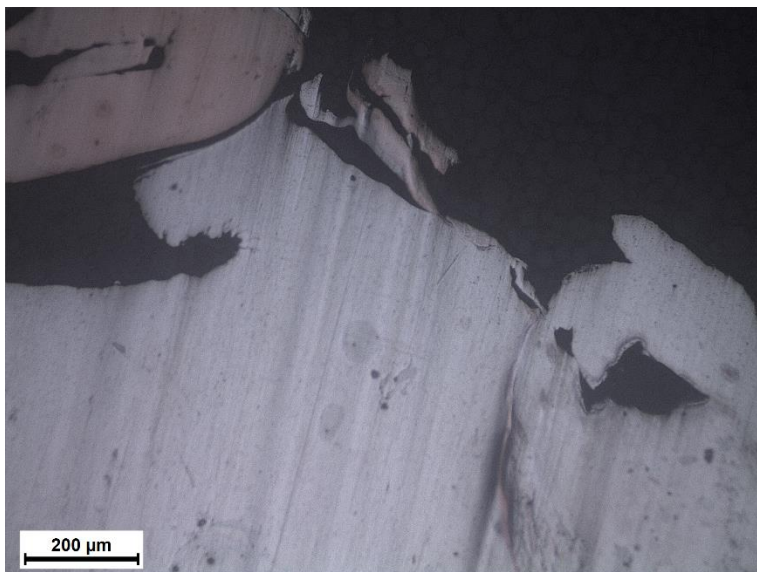
Εξετάζοντας την Εικόνα 4.12.A, παρατηρείται πως στο ένα άκρο του πλάτους της ραφής, ο χαλκός έχει διασπαστεί πλήρως από το αλουμίνιο και στο συγκεκριμένο σημείο δεν υπάρχει ανάμειξη. Ωστόσο φαίνεται ακόμα να έχει δημιουργηθεί κενό στο αλουμίνιο στην συγκεκριμένη περιοχή, γεγονός που προκαλεί ελάττωμα για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Στην Εικόνα 4.12.B, παρατηρείται πλήρης ανάμειξη των δύο υλικών, καθώς ο χαλκός έχει εισέλθει στο αλουμίνιο, προκαλώντας όμως στο συγκολλημένο έλασμα μία τοπική εσοχή στην επιφάνεια του, πράγμα που οφείλεται είτε στην άσκηση της κάθετης δύναμης είτε στην ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Έπειτα, στην Εικόνα 4.12.Γ, φαίνεται πως υπάρχει και σε αυτό το σημείο υπάρχει μίγμα Al-Cu, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζεται και η επιφάνεια της ραφής που έχει προκύψει από την περιστροφή του εργαλείου. Πιο χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται το μίγμα των δύο υλικών να μην έχει ενσωματωθεί με τρόπο ομαλό στο εσωτερικό του δοκιμίου, αλλά να έχει υποστεί παραμορφώσεις εξαιτίας της γεωμετρίας του πείρου σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου. Τέλος, στην Εικόνα 4.12.Δ, παρουσιάζεται το αντιδιαμετρικό σημείο του πλάτους της ραφής, όπου φαίνεται να υπάρχει και εδώ ανάμειξη μεταξύ των υλικών, όχι σε ιδανικό όγκο, και επίσης χαρακτηριστικά απεικονίζεται το τέλος της TMAZ καθώς και η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου.

Στο διάγραμμα 4.3, παρουσιάζεται η μέτρηση της μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Όπως αποτυπώνεται και εκεί, οι τιμές της μικροσκληρότητας ανεβαίνουν στις δύο περιοχές που απέχουν απόσταση γύρω στα 4 mm. Επομένως και από εδώ, εξάγεται το συμπέρασμα πως η ανάμειξη έχει επιτευχθεί σε αυτές τις δύο περιοχές, αντιδιαμετρικά του κέντρου του δοκιμίου.

Γενικότερα, το συγκεκριμένο δοκίμιο χαρακτηρίζεται ως μη ικανοποιητικό. Η ραφή συγκόλλησης δεν έχει ομαλό αποτέλεσμα, γεγονός που οφείλεται στη γεωμετρία του πείρου και στην κλίση του εργαλείου. Ακόμη και αν υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών σε κάποιες περιοχές, φαίνεται πως υπάρχουν σημεία όπου οι παραμορφώσεις που έχουν επέλθει, έχουν επηρεάσει την μικροδομή του συγκολλημένου ελάσματος καθώς και την ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου.



Διάγραμμα 4-3 Κατανομή μικροσκληρότητας δοκιμίου 2R κατά το διάμετρος



(Α)



(Β)



(Γ)



(Δ)

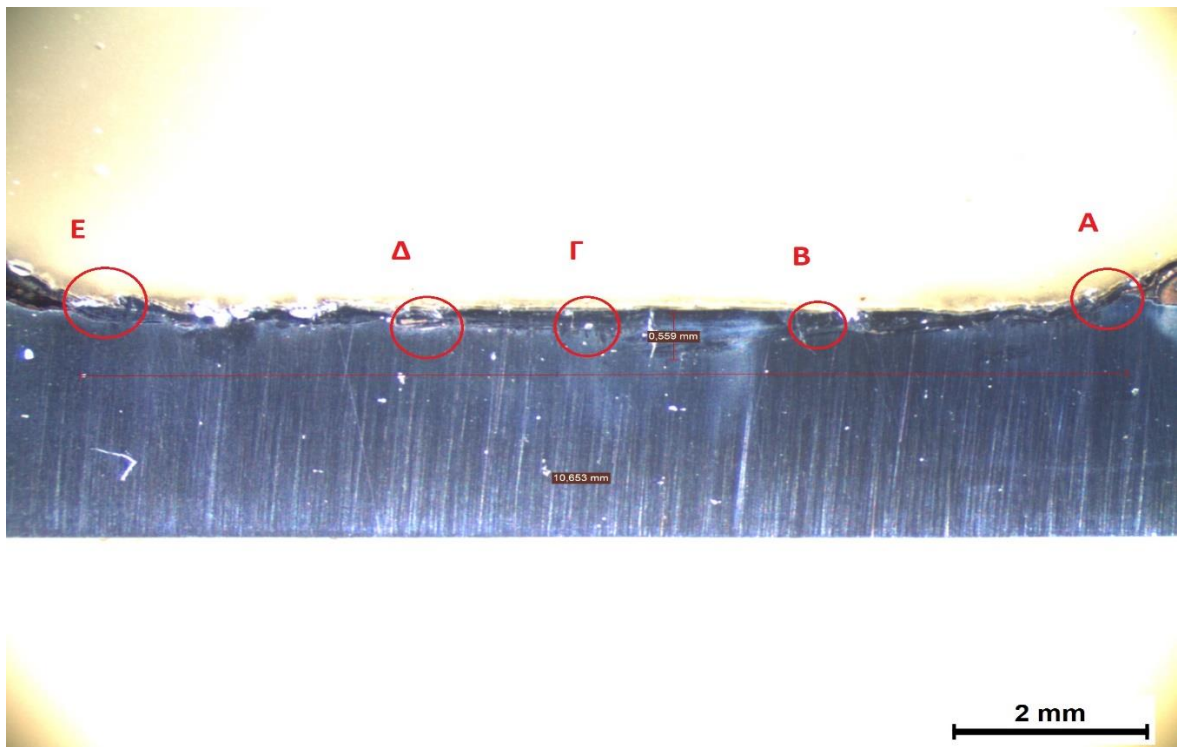
Εικόνα 4-12 Μικρογραφία δοκιμίου 2R. Σημεία ενδιαφέροντος Εικόνα 4.11

- Δοκίμιο 3L (1180/75/0°)



Εικόνα 4-13 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 3L

Για το δοκίμιο 3L, η ραφή συγκόλλησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13. Για την συγκεκριμένη ραφή, φαίνεται πως ενώ και εδώ υπάρχει ένα πολύ καλό και λείο αποτέλεσμα στο μεγαλύτερο μέρος της, προς το τέλος της, η κάθετη δύναμη μειώθηκε, εξαιτίας ίσως της μηχανής συγκόλλησης, με αποτέλεσμα στο τελευταίο τρίτο του μήκους της ραφής να μην φαίνεται ανάμειξη υλικών.



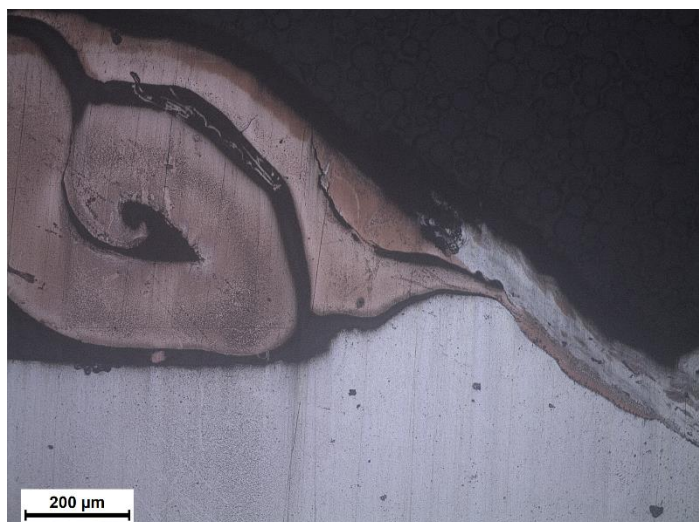
Εικόνα 4-14 Μακρογραφία δοκιμίου 3L και σημεία ενδιαφέροντος

Σχετικά με την μακροδομή του δοκιμίου, αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14. Εκεί φαίνεται, πως το βάθος τη συγκόλλησης έχει περιοριστεί στα 0,559 χιλιοστά καθώς την ίδια στιγμή το πλάτος φαίνεται να έχει επηρεαστεί στα 10,663 χιλιοστά. Είναι φανερό, λοιπόν, πως η όποια ανάμειξη έχει επέλθει στο δοκίμιο, αφενός δεν έχει γίνει σε μεγάλο βάθος και αφετέρου έχει γίνει σε μεγάλο πλάτος, γεγονός που δεν είναι εξολοκλήρου

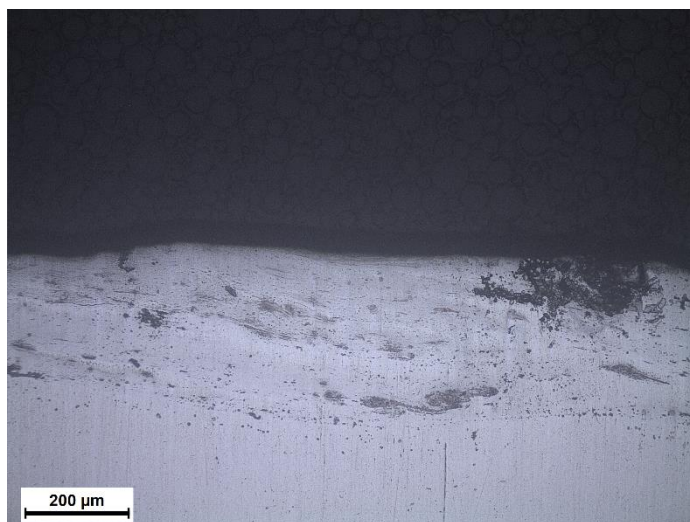
αποδεκτό, μιας και ούτε το απαιτούμενο nugget έχει δημιουργηθεί αλλά ταυτόχρονα, οι ζώνες συγκόλλησης είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν.

Λεπτομέρειες σχετικά με την μικρογραφία φαίνονται στην Εικόνα 4.15 . Πιο χαρακτηριστικά, στην Εικόνα 4.15.A, φαίνεται η αρχή της συγκόλλησης και το πως ο χαλκός ξεκινάει να ρέει στο εσωτερικό του αλουμινίου. Παρατηρείται επίσης, πως ο χαλκός λόγω της ταχύτητας περιστροφής έχει «διπλώσει» προς τα έξω. Στη συνέχεια και οδεύοντας προς το κέντρο ανάδευσης, στην Εικόνα 4.15.B, είναι φανερό η ανάμειξη των δύο υλικών αλλά σε πολύ μικρό βάθος, με το αλουμίνιο ωστόσο να είναι πιο πλούσιο από το χαλκό. Στην Εικόνα 4.15.Γ, που αφορά το κέντρο του δοκιμίου, φαίνεται τα δύο υλικά να έχουν αναμειχθεί, αλλά ξανά σε φτωχό σε χαλκό μίγμα. Περισσότερος χαλκός σε αναλογία φαίνεται να υπάρχει στην Εικόνα 4.15.Δ, όπου αφορά το αριστερό μέρος από το κέντρο ανάδευσης. Στο συγκεκριμένο σημείο, ο χαλκός έχει εισέλθει πλήρως στο αλουμίνιο, χωρίς ωστόσο να έχει σχηματιστεί το χαρακτηριστικό του nugget, ούτε τα οπίον rings. Τέλος, στο τέλος της συγκόλλησης, στην Εικόνα 4.15.E, παρουσιάζεται ξανά ανάμειξη των δύο υλικών, ενώ στα δεξιά της συγκεκριμένης εικόνας, φαίνονται πάλι τα δύο υλικά ξεχωριστά, με τον χαλκό στην επιφάνεια, γεγονός που σημαίνει ότι είναι το τελευταίο διάστημα που επηρεάζεται από το εργαλείο συγκόλλησης.

Συμπερασματικά, ακόμα και αν υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών στο συγκεκριμένο δοκίμιο και ταυτόχρονα το οπτικό αποτέλεσμα είναι εν μέρει ικανοποιητικό, η συγκόλληση θεωρείται μη αποδεκτή. Οι συνθήκες φάνηκε να λειτουργούν, αλλά η μη επαρκής άσκηση της κάθετης δύναμης και ίσως η κλίση του εργαλείου να έπαιξαν καίριο ρόλο.



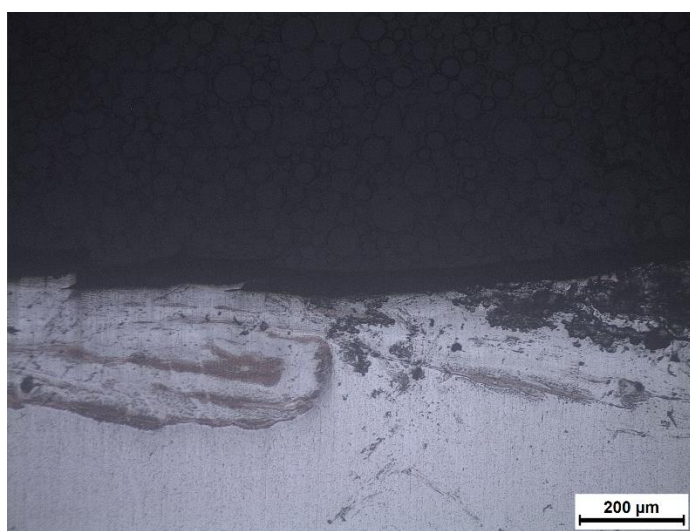
(A)



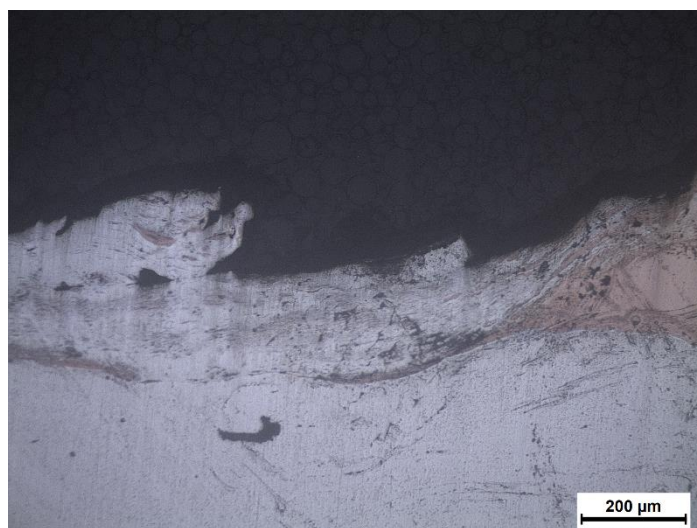
(B)



(Γ)



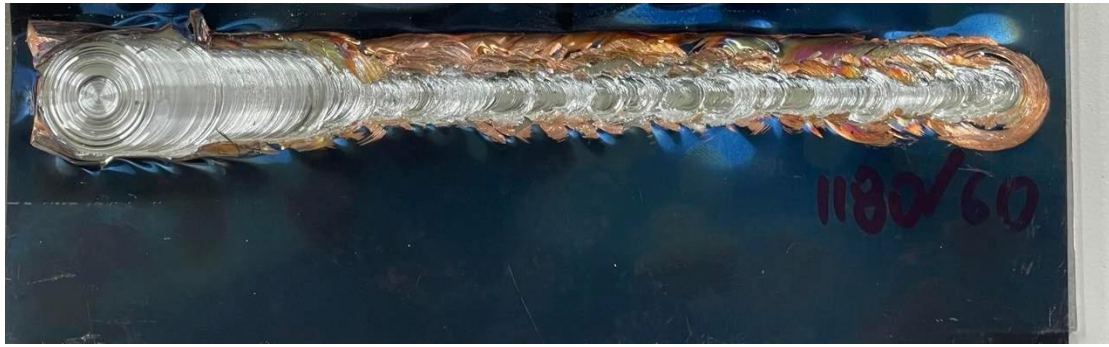
(Δ)



(E)

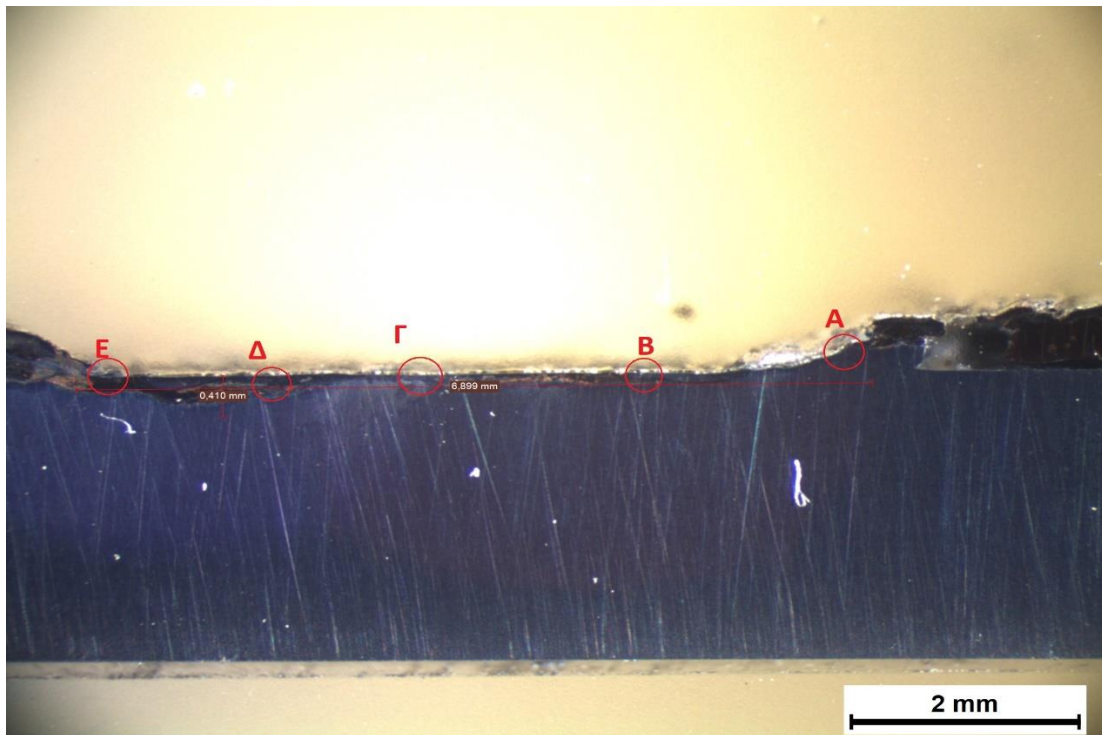
Εικόνα 4-15 Μικρογραφία δοκίμιου 3L. Σημεία ενδιαφέροντος εικόνας 4.13

- Δοκίμιο 3R (1180/60/0°)



Εικόνα 4-16 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 3R

Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζεται η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου 3R. Όπως παρουσιάζεται, το ξεκίνημα της συγκόλλησης φαίνεται να είναι πολύ ικανοποιητικό, όμως στη συνέχεια, εξαιτίας προφανώς της μείωσης της κάθετης δύναμης, το αποτέλεσμα δεν είναι το ίδιο, και έτσι το μεγαλύτερο ποσοστό του αλουμινίου έχει μείνει στην επιφάνεια, και έτσι το αποτέλεσμα είναι αυτό που παρουσιάζεται στην παραπάνω φωτογραφία.



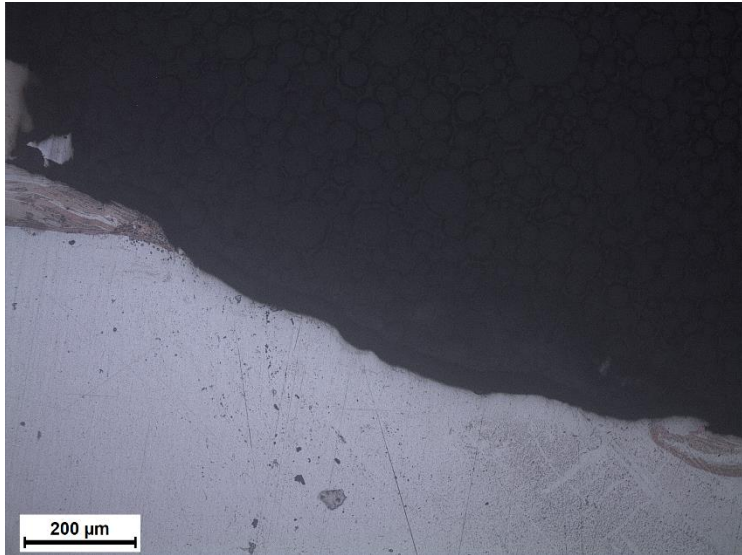
Εικόνα 4-17 Μακρογραφία δοκιμίου 3R και σημεία ενδιαφέροντος

Στην Εικόνα 4.17, παρουσιάζεται η μακρογραφία του δοκιμίου. Φαίνεται πως το πλάτος της ραφής επηρεάζεται σε μήκος 6,899 χιλιοστά, ενώ το βάθος της περιορίζεται μόλις στα 0,410 χιλιοστά. Εδώ, υφίσταται παρόμοια κατάσταση με του προηγούμενου δοκιμίου, αφού η οποιαδήποτε ανάμειξη υλικών έχει συμβεί, θα είναι σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του δοκιμίου.

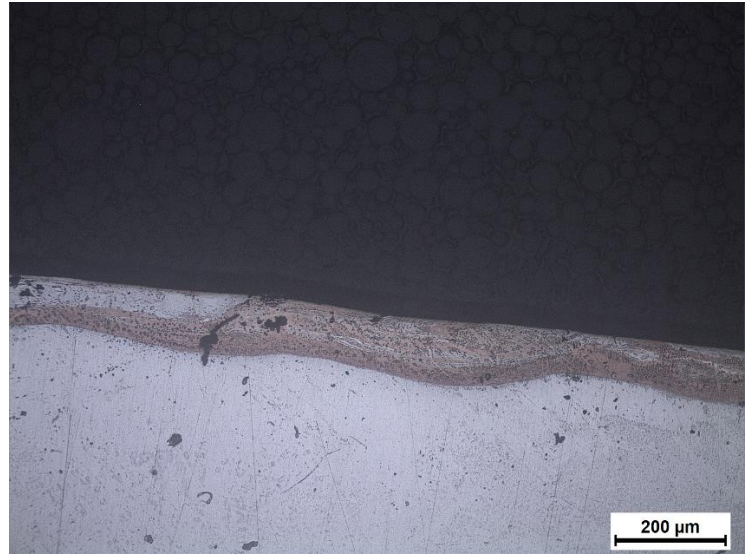
Λεπτομέρειες σχετικά με την μικρογραφία και τα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.17 παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.17. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.18.A

απεικονίζεται η κατάσταση στο ένα από τα δύο άκρα της ραφής κατά το εγκάρσιο. Ενώ στην αρχή φαίνεται πως τα δύο υλικά βρίσκονται σε μίξη, στη συνέχεια φαίνεται το αλουμίνιο να κυριαρχεί, και στο τέλος να ξαναυπάρχει μίγμα Al-Cu. Εξετάζοντας προς το κέντρο του πλάτους της ραφής και συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.18.Β, απεικονίζεται η επιφάνεια της ραφής να είναι πλούσια σε μίγμα των δύο υλικών, όχι όμως σε μεγάλο βάθος. Αντίθετα, στο κέντρο της ραφής, στο σημείο Γ, τα αποτελέσματα του οπτικού μικροσκοπίου δείχνουν ότι ενώ υπάρχουν μερικά σημεία με ανάμειξη χαλκού και αλουμινίου, το υλικό που επικρατεί είναι το αλουμίνιο και έτσι δεν θεωρείται αρκετά ικανοποιητικό (Εικόνα 4.18.Γ). Στη συνέχεια, εξετάζοντας τη ραφή αντιδιαμετρικά, πιο λεπτομερώς στην Εικόνα 4.18.Δ, παρατηρείται πως η περιοχή γύρω από αυτή το σημείο, είναι αρκετά ικανοποιητική σε ό,τι αφορά την ένωση των δύο υλικών. Φαίνεται να υπάρχει τόσο η αντίστοιχη αναλογία κατά βάρος των δύο υλικών, όσο και η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου, σχηματίζοντας δεσμούς μεταξύ τους. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το βάθος που τα δύο υλικά έχουν αναμειχθεί είναι σχετικά περιορισμένο. Τέλος, στο σημείο Ε, φαίνεται πως και εκεί υπάρχει ανάμειξη, στη μία άκρη του πλάτους της ραφής, όπως συνέβη και αντιδιαμετρικά. Ακόμα, στο μέσο περίπου της Εικόνα 4.17.Ε, φαίνεται η ροή του αλουμινίου στο εσωτερικό του χαλκού καθώς επίσης και ένα σφάλμα που έχει προκύψει στην επιφάνεια των δύο υλικών (λεπτομέρεια κυκλωμένη στην Εικόνα 4.18.Ε). Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης λεπτομέρειας παραπέμπουν σε μικρή ρωγμάτωση (microcracks). Ωστόσο γύρω από τη κυκλωμένη περιοχή δεν υπάρχει κάποια σύνδεση των δύο υλικών, και έτσι αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια ρωγμή στον χαλκό, εξαιτίας της ταχύτητας περιστροφής και της κάθετης δύναμης του πείρου.

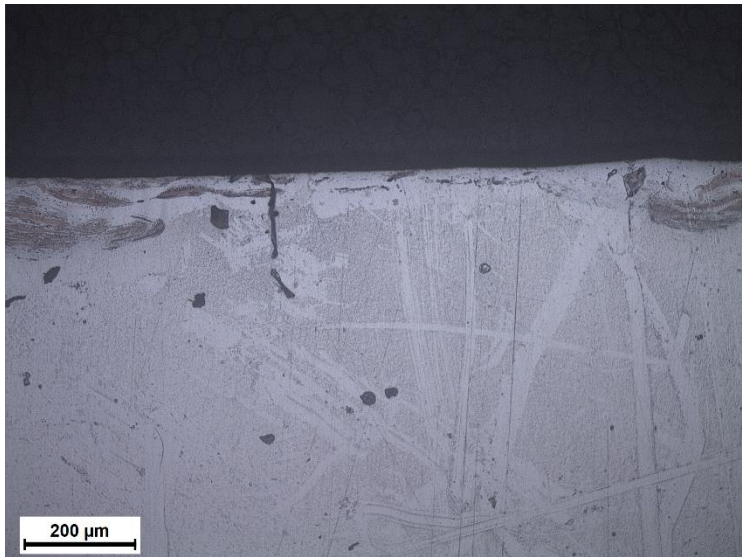
Γενικότερα, έπειτα από τον παραπάνω σχολιασμό για το συγκεκριμένο δοκίμιο, η εν λόγω συγκόλληση δεν θεωρείται ως πετυχημένη. Η άσκηση της κάθετης δύναμης σίγουρα έπαιξε πρωταγωνιστικό ρόλο, μιας και υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών, αλλά όχι στις επιθυμητές διαστάσεις πλάτους και βάθους καθώς και η μη ύπαρξη χαρακτηριστικών της FSW (nugget, onion rings, καθαρές ζώνες μεταξύ τους).



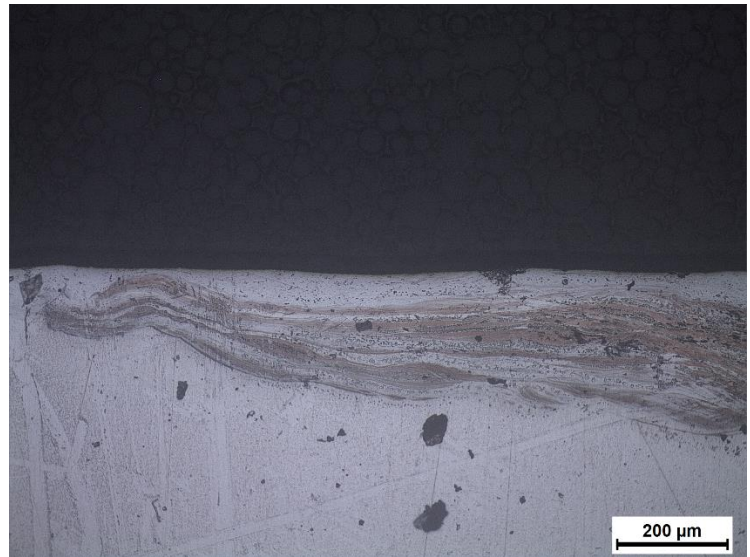
(A)



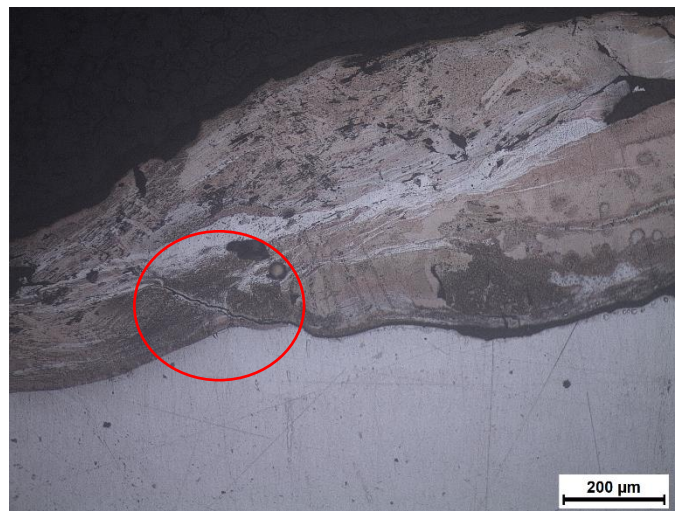
(B)



(Γ)



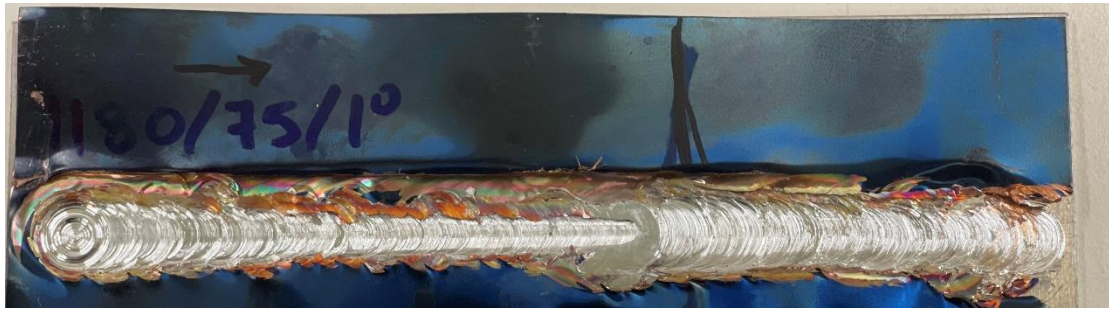
(Δ)



(E)

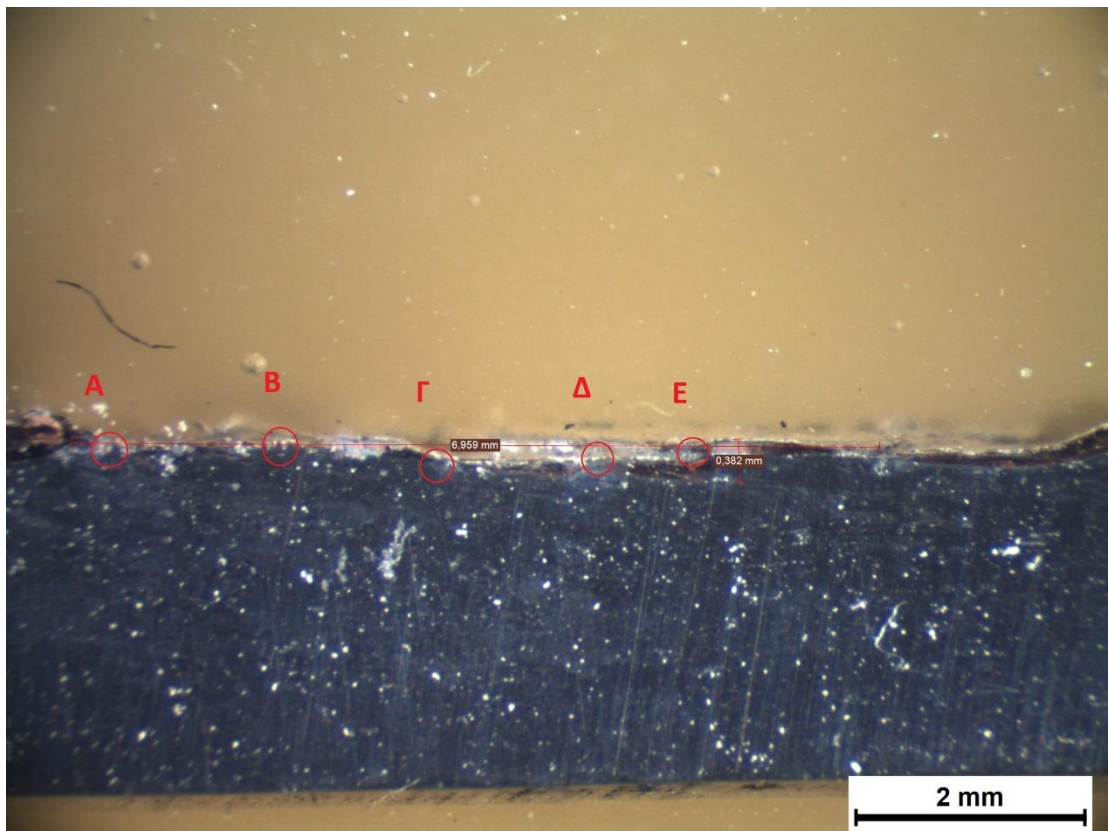
Εικόνα 4-18 Μικρογραφία δοκιμίου 3R & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνα 4.17

- Δοκίμιο 4L (1180/75/1°)



Εικόνα 4-19 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 4L

Στην Εικόνα 4.19, παρουσιάζεται η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση, η σταδιακή μείωση της κάθετης αξονικής δύναμης, που οδηγεί σε μείωση του πλάτους που επηρεάζει ο πείρος, έπειτα οδηγείται σε αυτή την ασυνέχεια εξαιτίας της μηχανής και σε αυτή την περίπτωση, ενώ έπειτα από εξωτερική παρέμβαση με αύξηση της κάθετης δύναμης, ξαναεπιτυγχάνεται ικανοποιητικό πλάτος στη ραφή, η οποία στη συνέχεια κόπηκε στο σημείο που έχει σχεδιαστεί η μαύρη κάθετη γραμμή για να εγκιβωτιστεί και ύστερα να εξεταστεί μεταλλογραφικά. Το σημείο που επιλέχθηκε να μελετηθεί η εν λόγω συγκόλληση προέκυψε ως το πιο ικανοποιητικό, βάσει οπτικού αποτελέσματος.



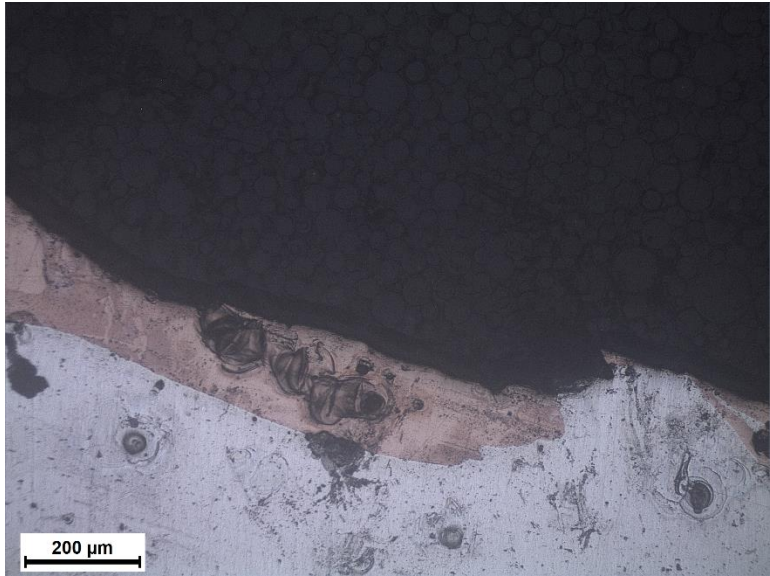
Εικόνα 4-20 Μακρογραφία του δοκιμίου 4L & σημεία ενδιαφέροντος

Στην Εικόνα 4.20 παρουσιάζεται η μακρογραφία του δοκιμίου, οι διαστάσεις της συγκόλλησης καθώς και κάποια σημεία, η μικρογραφία των οποίων παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην Εικόνα 4.21, πιο κάτω. Όπως σημειώνεται και στην φωτογραφία,

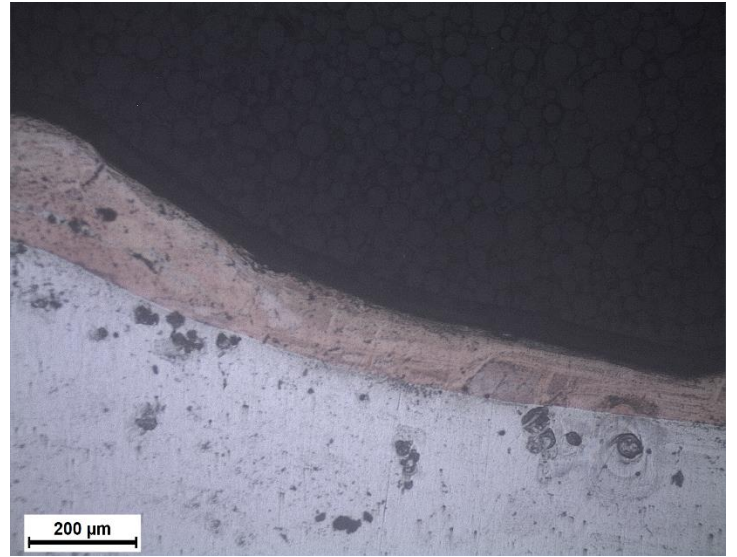
το βάθος του αλουμινίου που έχει επηρεαστεί από το εργαλείο συγκόλλησης περιορίζεται στα 0,382 χιλιοστά, ενώ το πλάτος της ραφής μετρήθηκε στα 6,959 χιλιοστά.

Εξετάζοντας πιο λεπτομερώς τη ραφή συγκόλλησης κατά το εγκάρσιο και πιο συγκεκριμένα ξεκινώντας από το δεξί άκρο της Εικόνας 4.20, φαίνεται πως ο χαλκός στο ξεκίνημα της επαφής του πείρου με το δοκίμιο, δεν έχει αναδευτεί στην αρχή και παραμένει πάνω από το αλουμίνιο (Εικόνα 4.21.A). Το ίδιο συμβαίνει και σε μία περιοχή ανάμεσα στο άκρο και στο κέντρο του πείρου, όπου πολύ λίγες ενώσεις Al-Cu φαίνεται να έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια του δοκιμίου, με τον χαλκό όμως να επικρατεί σε μεγαλύτερο ποσοστό (Εικόνα 4.21.B). Στοχεύοντας στο κέντρο της ραφής συγκόλλησης κατά το εγκάρσιο και πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.21.Γ, εκεί παρατηρείται αρκετά καλή ανάμειξη των δύο υλικών σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία ενδιαφέροντος, μιας και οι ενώσεις που φαίνονται να έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια είναι αρκετές για να προσδώσουν χαρακτηριστικά αλουμινίου και χαλκού. Στην Εικόνα 4.21.Δ, που αφορά το αριστερό μέρος του δοκιμίου κατά το εγκάρσιο, το ποσοστό του χαλκού που έχει αναμειχθεί με το αλουμίνιο παραμένει μικρό καθώς επίσης και το μικρό μίγμα των δύο υλικών υπάρχει στην επιφάνεια. Τέλος, στην Εικόνα 4.21.E, όπου εξετάζεται το άλλο άκρο της ραφής, παρατηρείται και εδώ μία μικρή ανάμειξη στην περιοχή, με το αλουμίνιο να βρίσκεται πάνω από τον χαλκό, χωρίς ωστόσο να φαίνονται ενώσεις με τη ροή των δύο υλικών.

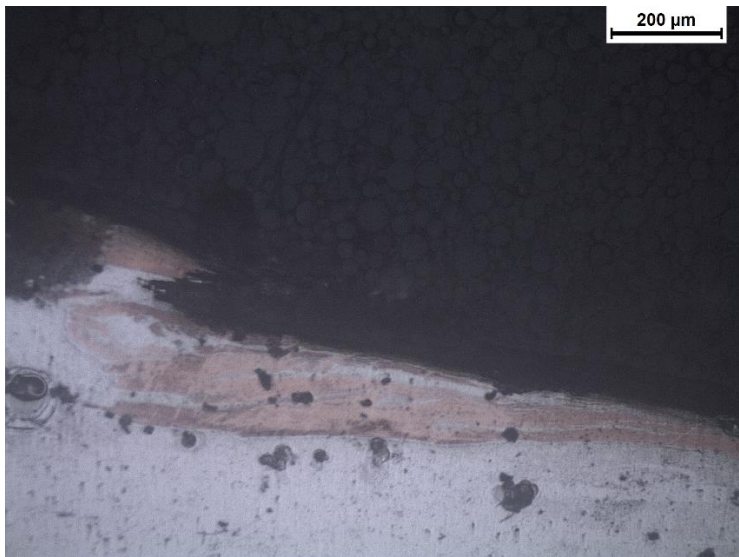
Συμπερασματικά η συγκεκριμένη συγκόλληση χαρακτηρίζεται ως μη αποδεκτή. Ανάμειξη χαλκού και αλουμινίου υπάρχει σε μερικά σημεία, χωρίς όμως να είναι ικανοποιητικά τα ποσοστά των δύο υλικών και χωρίς να συμβαίνει σε ικανοποιητικό βάθος και πλάτος. Η ραφή επηρεάστηκε σαφώς από τη συνεχή μείωση της κάθετης αξονικής δύναμης και επίσης από τη μηχανή συγκόλλησης. Τέλος, το δοκίμιο δεν εμφανίζει τα χαρακτηριστικά της FSW σε ό,τι αφορά τη μικροδομή του καθώς επίσης οι ζώνες συγκόλλησης είναι δύσκολο έως αδύνατον να χαρακτηριστούν.



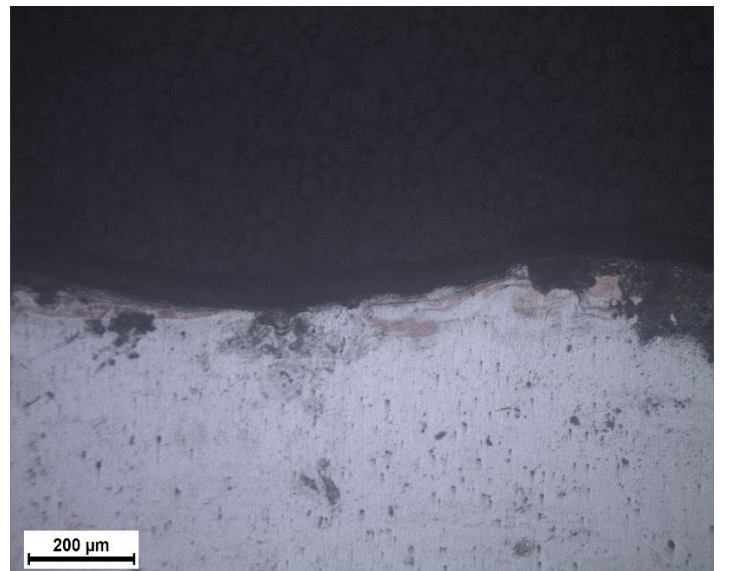
(A)



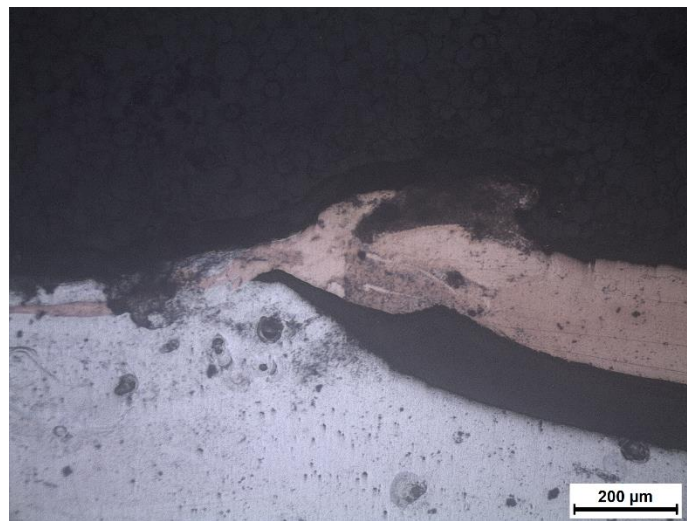
(B)



(Γ)



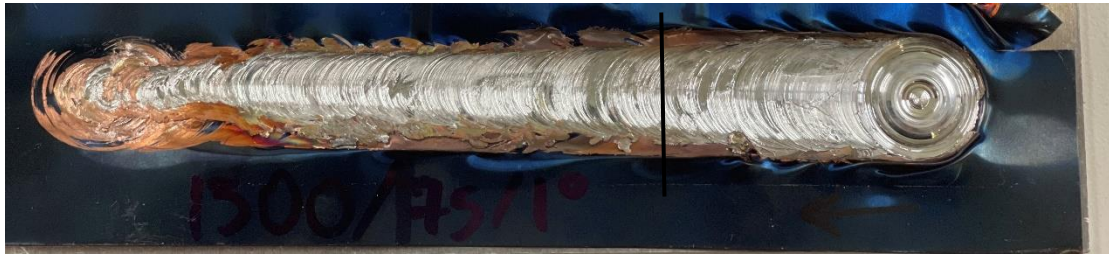
(Δ)



(E)

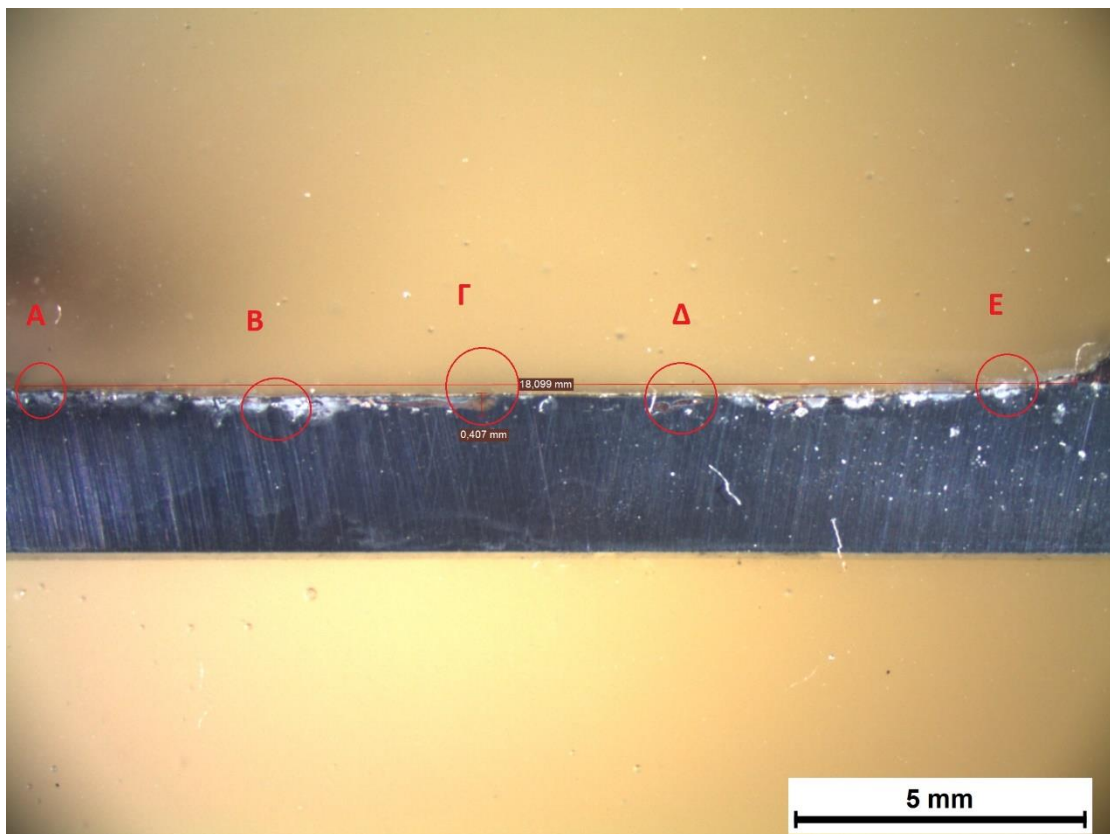
Εικόνα 4-21 Μικρογραφία δοκιμίου 4L & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.20

- Δοκίμιο 4R (1500/75/1°)



Εικόνα 4-22 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 4R

Στην Εικόνα 4.22 παρουσιάζεται η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου. Παρατηρείται πως στη συγκεκριμένη περίπτωση η ραφή μοιάζει να είναι πιο λεία και να μην εμφανίζει κάποιο σημαντικό ελάττωμα. Υπάρχει και εδώ μία μείωση της κάθετης δύναμης, όμως το οπτικό αποτέλεσμα είναι αισθητά πιο ικανοποιητικό σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο. Το δοκίμιο κόπηκε και εγκιβωτίστηκε για περαιτέρω μελέτη στο σημείο που υπάρχει η κάθετη μαύρη γραμμή στην ραφή.



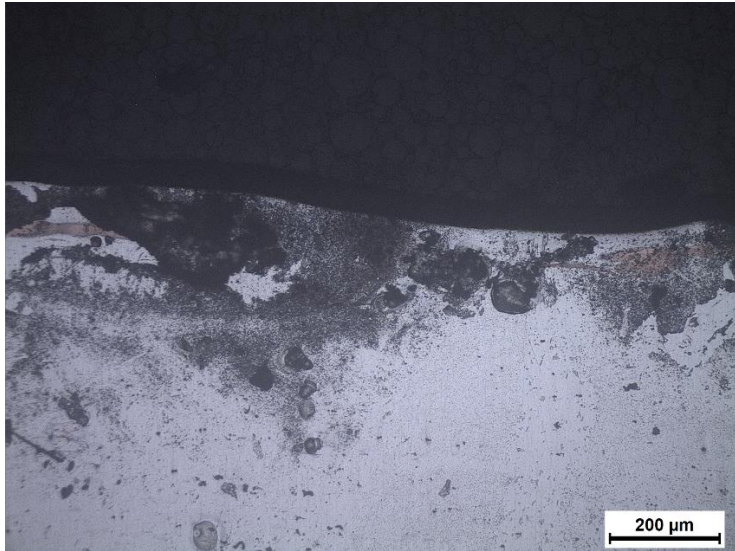
Εικόνα 4-23 Μακρογραφία δοκιμίου 4R & σημεία ενδιαφέροντος

Η μακροδομή του δοκιμίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.23, όπου είναι σχεδιασμένα και τα σημεία που χαρακτηρίστηκαν πιο ενδιαφέροντα και που παρουσιάζονται μικρογραφικά στην Εικόνα 4.24. Πιο αναλυτικά, με τη βοήθεια του λογισμικού, το βάθος που έχει επηρεαστεί από την κάθετη άσκηση του εργαλείου συγκόλλησης

μετρήθηκε ως 0,407 χιλιοστά, ενώ το πλάτος της ραφής κατά το εγκάρσιο μετρήθηκε ως 18,099 χιλιοστά.

Το δοκίμιο στη συνέχεια εξετάστηκε κατά όλο πλάτος του και κάποιες από τις φωτογραφίες εμφανίζονται στην Εικόνα 4.24, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν πιο κατανοητή η μικρογραφία του, σε διαφορετικές περιοχές. Στην Εικόνα 4.24.A, εμφανίζεται η ραφή συγκόλλησης στο δεξί άκρο κατά το εγκάρσιο. Παρατηρείται πως υπάρχουν διμεταλλικές ενώσεις Al-Cu στην επιφάνεια του δοκιμίου, με το υλικό που επικρατεί σε μεγάλο βαθμό όμως κατά βάρος να είναι το αλουμίνιο. Πιο μετά, στην Εικόνα 4.24.B, παρατηρείται επίσης ο χαλκός να έχει περάσει στο εσωτερικό του αλουμινίου, κυρίως στην επιφάνεια του. Στο κέντρο της ραφής, κοιτώντας την Εικόνα 4.24.Γ, φαίνεται το αλουμίνιο να έχει αναμειχθεί πλήρως με τον χαλκό και μάλιστα σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Στη συνέχεια και στο σημείο που αφορά το αριστερό μέρος της ραφής κατά το εγκάρσιο, παρουσιάζεται ξανά η ανάμειξη των δύο υλικών και ο σχηματισμός διμεταλλικών ενώσεων καθώς αυτές έχουν σχηματιστεί με τη ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου. Ωστόσο και εδώ οι αναλογίες δεν είναι οι ίδιες και το βάθος δεν είναι μεγάλο. Στο άλλο άκρο της ραφής κατά το εγκάρσιο, παρουσιάζεται το τέλος της περιοχής ανάμειξης των δύο υλικών, καθώς στο μισό της φωτογραφίας εμφανίζεται καθαρός χαλκός στην επιφάνεια του αλουμινίου σηματοδοτώντας έτσι τη ζώνη που επηρεάζεται από τον πείρο (Εικόνα 4.24.E).

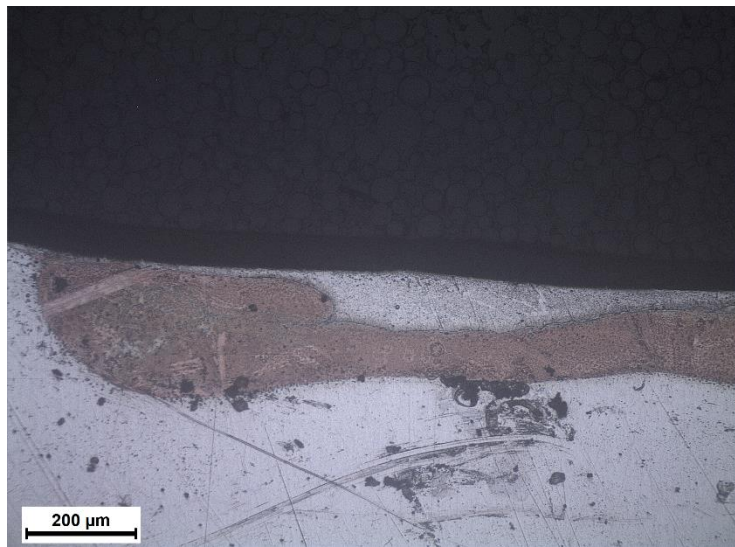
Σε γενικές γραμμές η συγκεκριμένη συγκόλληση δεν θεωρείται ως επιτυχής μιας και τόσο τα μακρογραφικά όσο και τα μικρογραφικά αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Ο χαλκός έχει περάσει σε μικρές ποσότητες στο εσωτερικό του αλουμινίου και ταυτόχρονα δεν υφίσταται τα χαρακτηριστικά μίας συγκόλλησης FSW. Οι ζώνες συγκόλλησης δεν εμφανίζονται καθαρά, καθώς επίσης και ο χαλκός που έχει αναμειχθεί μοιάζει να επικρατεί μόνο στο κέντρο της ραφής.



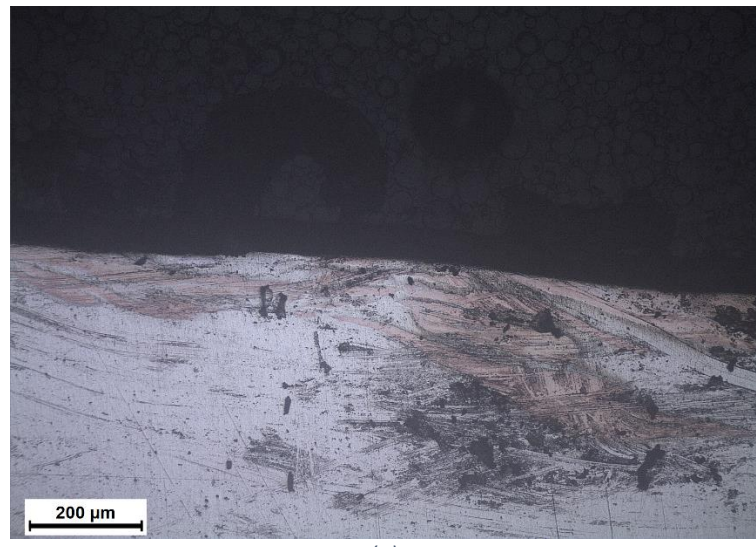
(A)



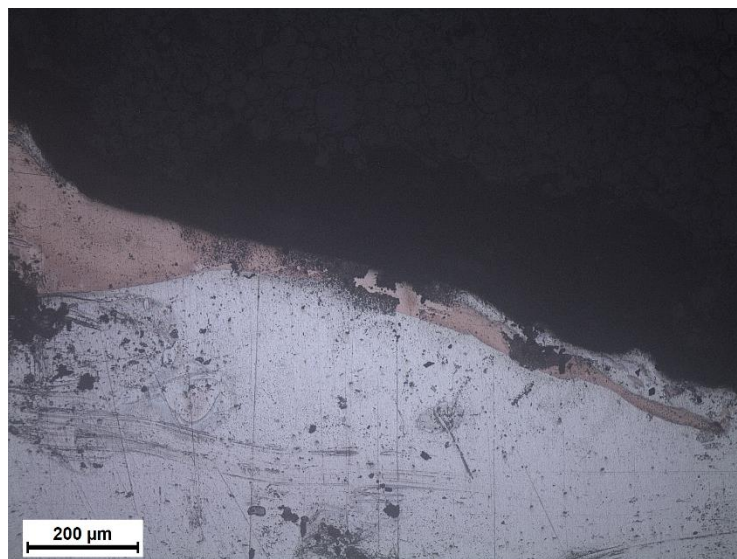
(B)



(Γ)



(Δ)



(E)

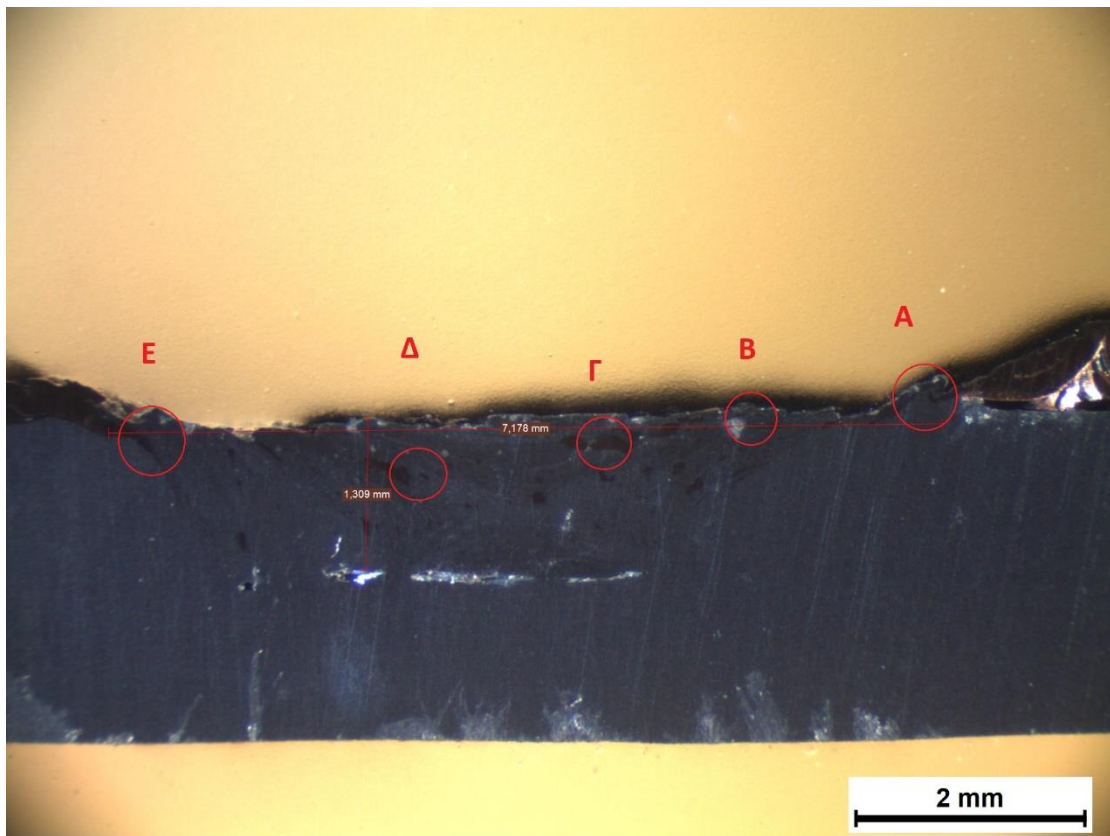
Εικόνα 4-24 Μικρογραφία δοκιμίου 4R & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.23

- Δοκίμιο 5 (1180/30/0°)



Εικόνα 4-25 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου 5

Στην Εικόνα 4.25 παρουσιάζεται η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου. Παρατηρείται πως η συγκεκριμένη ραφή είναι αρκετά λεία, χωρίς ελαττώματα και μάλιστα με καλή αρχή και τέλος. Το πλάτος της έχει διατηρηθεί σχεδόν ακέραιο καθ'όλο το μήκος της και παράλληλα, σε αυτή την περίπτωση, η κάθετη δύναμη μοιάζει να μην έχει αυξομειώσεις. Με πιο κοντινή ματιά ο χαλκός φαίνεται να έχει εισέλθει στο αλουμίνιο σε μεγάλο μήκος, σίγουρα σε πιο ικανοποιητικό βαθμό σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια και όχι να έχει φύγει στα πλάγια εξαιτίας της περιστροφικής ταχύτητας.



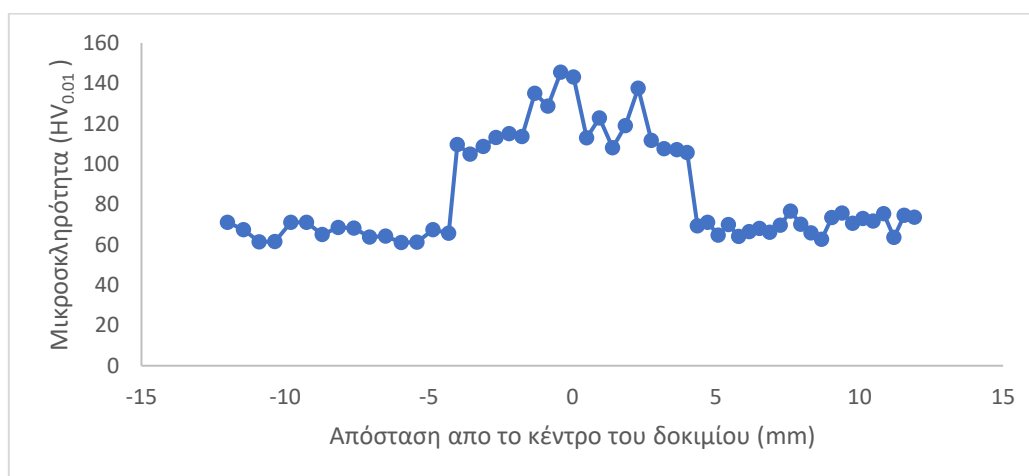
Εικόνα 4-26 Μακρογραφία δοκιμίου 5 & σημεία ενδιαφέροντος

Η μακρογραφία του δοκιμίου, καθώς και κάποια σημεία που φάνηκαν να έχουν περισσότερο ενδιαφέρον φαίνονται στην Εικόνα 4.26. Ακόμη, σημειωμένα στην εν λόγω εικόνα είναι το πλάτος που έχει επηρεαστεί εξαιτίας του πείρου, το οποίο μετρήθηκε στα 7,178 χιλιοστά καθώς επίσης και το βάθος το οποίο μετρήθηκε στα 1,309 χιλιοστά.

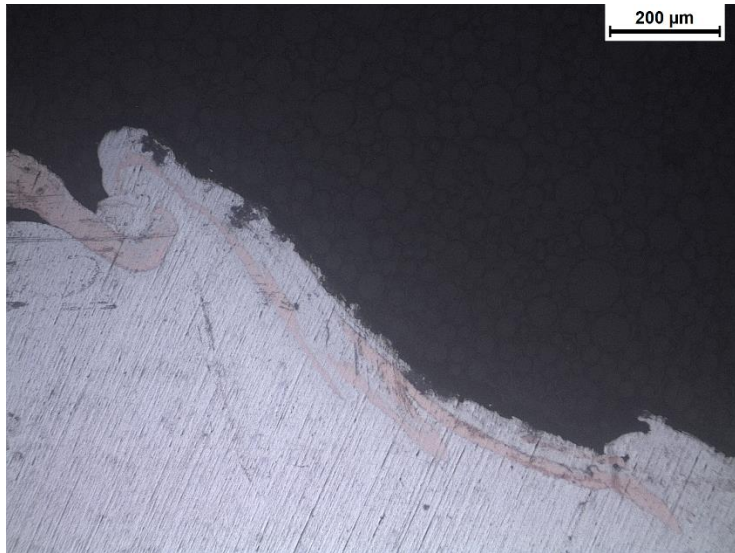
Λαμβάνοντας υπόψιν το νόμωρο του βάθους και συγκρίνοντάς το με αυτό των προηγούμενων δοκιμίων, καταλαβαίνει κανείς πως η άσκηση της κάθετης δύναμης είναι σαφώς μεγαλύτερη. Λεπτομέρειες σχετικά με τα σημεία ενδιαφέροντος παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.27, όπου φαίνονται οι μικρογραφίες των σημείων, οι οποίες λήφθηκαν από το οπτικό μικροσκόπιο. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4.27.Α, φαίνεται η δεξιά αρχή του πλάτους της ραφής συγκόλλησης, όπου παρατηρείται πως η ανάμειξη των δύο υλικών λαμβάνει χώρα, σε μικρή μεν απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου. Ωστόσο, στην Εικόνα 4.27.Β, εμφανίζεται ο χαλκός να έχει διεισδύσει στο αλουμίνιο και να έχουν σχηματιστεί διμεταλλικές ενώσεις σε μεγάλο βάθος. Μάλιστα, στην εν λόγω περιοχή παρατηρείται πως το αλουμίνιο έχει μικρότερους κόκκους. Ίδια κατάσταση συναντάται και στην Εικόνα 4.27.Γ, όπου φαίνεται πως η ανάμειξη έχει επέλθει σε μεγάλο όγκο του δοκιμίου. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται μεγάλες ποσότητες χαλκού να έχουν εισέλθει στο αλουμίνιο, ενώ επίσης στα δεξιά της ίδιας φωτογραφίας εμφανίζεται το nugget που έχει σχηματιστεί. Αριστερά του nugget και πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.27.Δ, εμφανίζονται και πάλι διμεταλλικές ενώσεις και πιο λεπτόκοκκο αλουμίνιο, ενώ και εδώ παρατηρείται μία μεγάλη ποσότητα χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου. Τέλος, στο αντιδιαμετρικό άκρο κατά το εγκάρσιο του πλάτους της ραφής, στην Εικόνα 4.27.Ε, φαίνεται και πάλι να υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών, παρουσιάζεται το τέλος της περιοχής που επηρεάζεται από το εργαλείο συγκόλλησης, ενώ επίσης φαίνεται και η ροή του χαλκού που έχει προκύψει κατά την ανάμειξη.

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται η σκληρότητα που μετρήθηκε για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Όπως φαίνεται, η σκληρότητα παρουσιάζει αύξηση σε μια περιοχή που έχει μήκος περίπου 8 χιλιοστά γύρω από το κέντρο του.

Γενικότερα, η συγκεκριμένη συγκόλληση χαρακτηρίζεται τελικά ως επιτυχημένη και αρκετά ικανοποιητική. Το βάθος και το πλάτος της ραφής φαίνεται να έχουν ικανοποιητικά μεγέθη, η μακρογραφία και η μικρογραφία δείχνουν πως τα υλικά έχουν ενωθεί με επιτυχία σε βαθμό που να σχηματίζουν nugget και να φαίνονται οι ζώνες συγκόλλησης. Τέλος, η ανάμειξη των δύο υλικών αποδεικνύεται και από την μικροσκληρότητα που μετρήθηκε και δείχνει την αύξηση στην γύρω περιοχή του κέντρου.



Διάγραμμα 4-4 Μικροσκληρότητα δοκιμίου κατά το πλάτος της ραφής



(A)



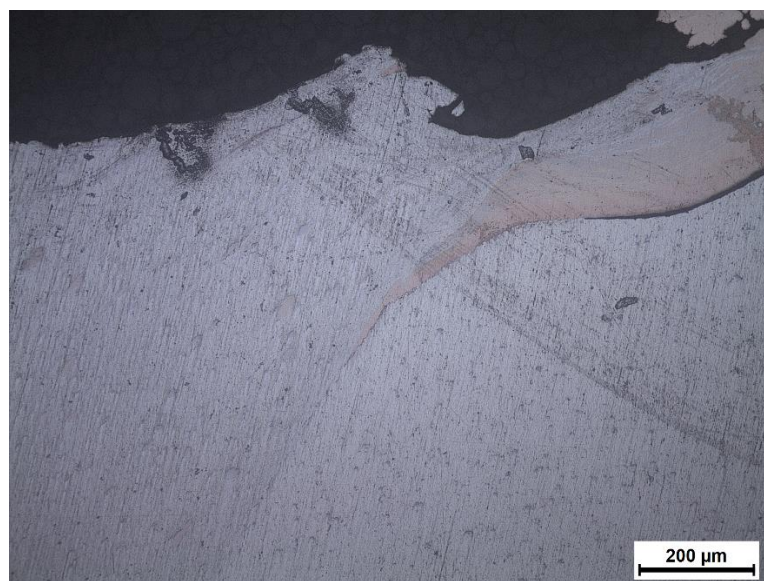
(B)



(Γ)



(Δ)



(E)

Εικόνα 4-27 Μικρογραφία δοκιμίου 5 & σημεία ενδιαφέροντος Εικόνας 4.26

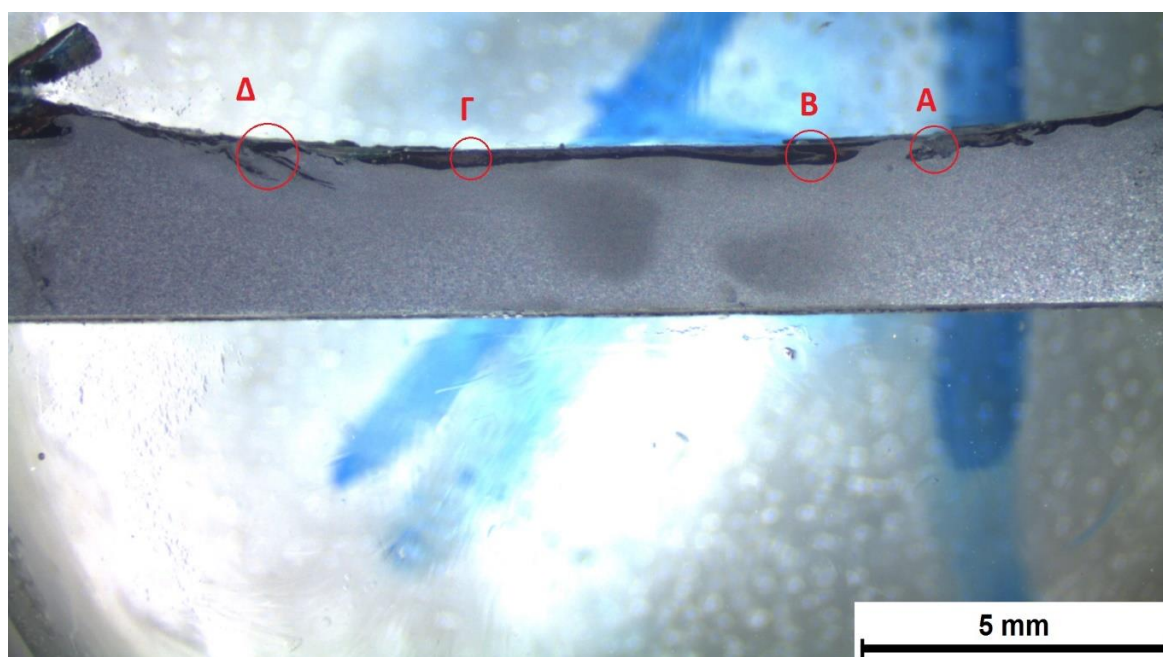
4.3 Αξιολόγηση Συγκολλήσεων Δεύτερου Μέρους

- Δοκίμιο A (1000/32/3°)



Εικόνα 4-28 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου A

Για την ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου A, παρατηρείται πως αυτή έχει προκύψει έπειτα από καλή έναρξη του εργαλείου στο δοκίμιο και επίσης παρουσιάζεται ως μία ομαλή και χωρίς ελαττώματα ραφή, ενώ ταυτόχρονα φαίνεται ο χαλκός να έχει ενσωματωθεί στο εσωτερικό του αλουμινίου (Εικόνα 4.28). Στο σημείο όπου είναι σημειωμένη με πράσινο χρώμα η ραφή, το δοκίμιο κόπηκε με σκοπό να εγκιβωτιστεί και να εξεταστεί μεταλλογραφικά.

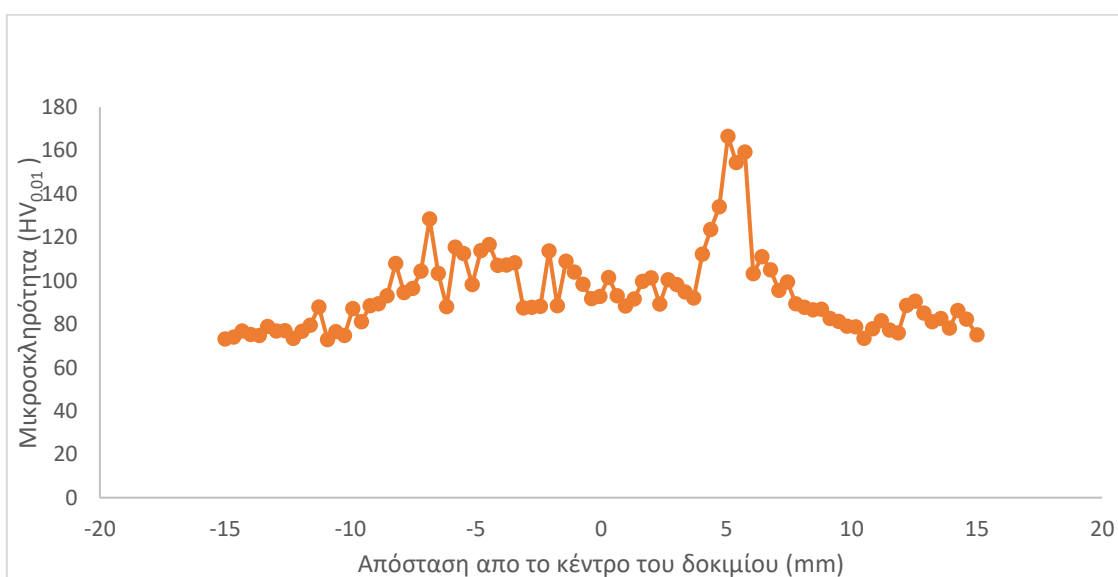


Εικόνα 4-29 Μακρογραφία δοκιμίου A & σημεία ενδιαφέροντος

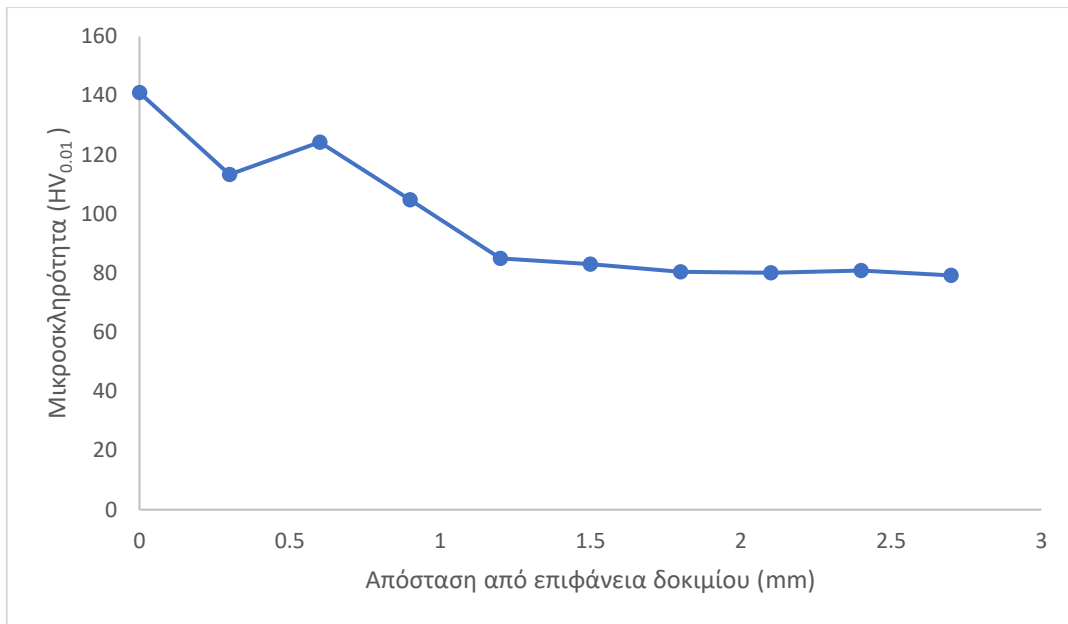
Στην Εικόνα 4.29 παρουσιάζεται η μακρογραφία του δοκιμίου A, καθώς επίσης και τα σημεία που παρουσίασαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Παρατηρείται, πως υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών στην επιφάνεια του δοκιμίου, ωστόσο το μίγμα φαίνεται να αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό από αλουμίνιο, καθώς ο χαλκός μοιάζει να μην έχει κατέβει αρκετά χαμηλά και η ανάμειξη να έχει συμβεί πιο κοντά στην επιφάνεια τους. Ακόμη διακρίνεται η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου καθώς και οι περιοχές που έχουν επηρεαστεί από το εργαλείο συγκόλλησης.

Για την μικρογραφία στα σημεία της Εικόνας 4.29 που έχουν επιλεγεί, παρουσιάζεται η Εικόνα 4.30. Στην Εικόνα 4.30.A, παρουσιάζεται μια περιοχή του δοκιμίου, η οποία φαίνεται να έχει πλούσιο μίγμα Al-Cu στην επιφάνεια, ενώ ταυτόχρονα, βάσει των κόκκων που παρουσιάζονται, βρίσκεται στην ζώνη TMAZ. Η Εικόνα 4.30.B αφορά το κέντρο της ζώνης ανάδευσης, όπου και εδώ παρατηρείται ανάμειξη των δύο υλικών, ωστόσο ο χαλκός μοιάζει να βρίσκεται σε μεγαλύτερη αναλογία. Πιο λεπτομερώς, η περιοχή φαίνεται να είναι πλουσιότερη σε χαλκό ο οποίος δεν έχει καταφέρει να αναμειχθεί πλήρως με το αλουμίνιο, ενώ βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση λόγω της ροής του που έχει προκαλέσει ο πείρος. Στα αριστερά αυτού του σημείο και πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.30.Γ, φαίνεται πως υπάρχει ανάμειξη σε όλη αυτή την περιοχή, η οποία είναι στην ζώνη TMAZ. Από το σημείο Β έως το σημείο Γ, όλο αυτό το φιλμ της διεπιφάνειας αποτελείται από τέτοιους κόκκους αλουμινίου οι οποίοι έχουν αναμειχθεί με τον χαλκό και λαμβάνεται αυτό το αποτέλεσμα. Τέλος, στην Εικόνα 4.30.Δ, παρουσιάζεται το τέλος της ραφής συγκόλλησης καθώς και μέρος της ζώνης HAZ. Φαίνεται ο χαλκός να βρίσκεται στην επιφάνεια, όμως εξαιτίας του εργαλείου συγκόλλησης, παρουσιάζεται και η έναρξη της ροής και της ανάμειξης του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου.

Παράλληλα, μετρήθηκε και η μικροσκληρότητα του δοκιμίου A, η οποία παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.5. Όπως φαίνεται και από την κατανομή της, η πλήρης ανάμειξη δεν έχει επέλθει ακριβώς στο κέντρο του δοκιμίου, αλλά λίγο πιο δεξιά, γεγονός που λαμβάνεται υπόψιν και από την Εικόνα 4.29.

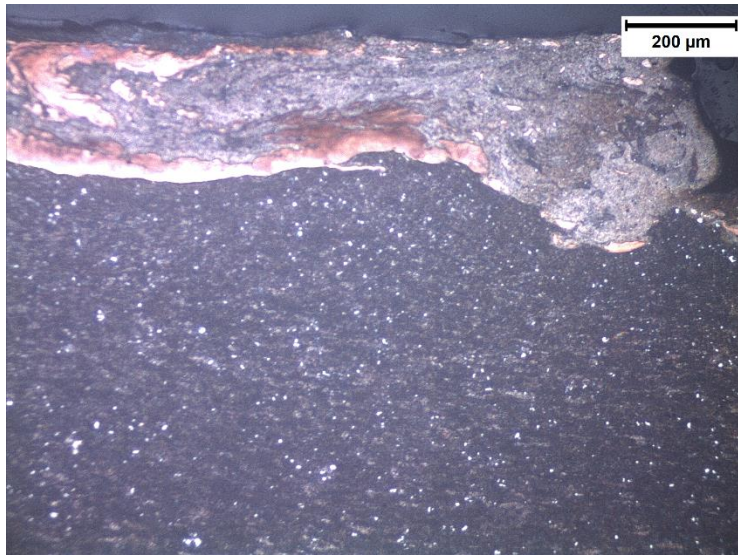


(A)



(B)

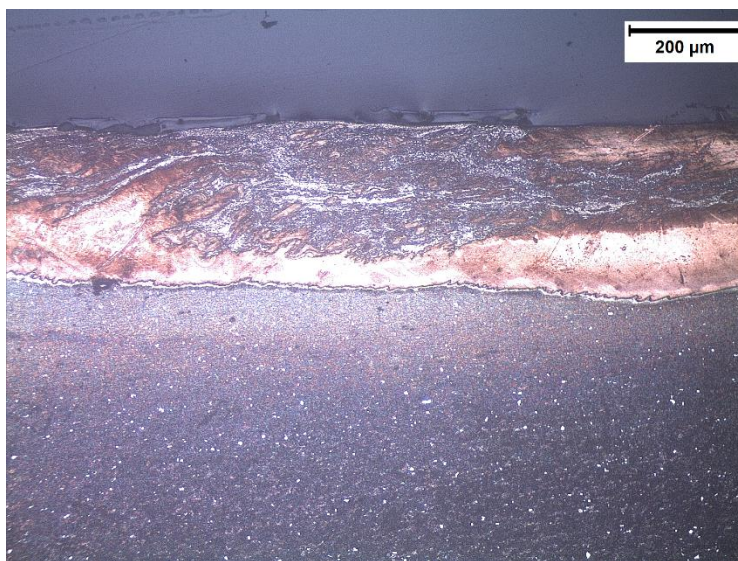
Διάγραμμα 4-5 : Κατανομή μικροσκληρότητας δοκιμίου A κατά το διάμηκες (A) και κατά το εγκάρσιο (B)



(A)



(B)



(Γ)

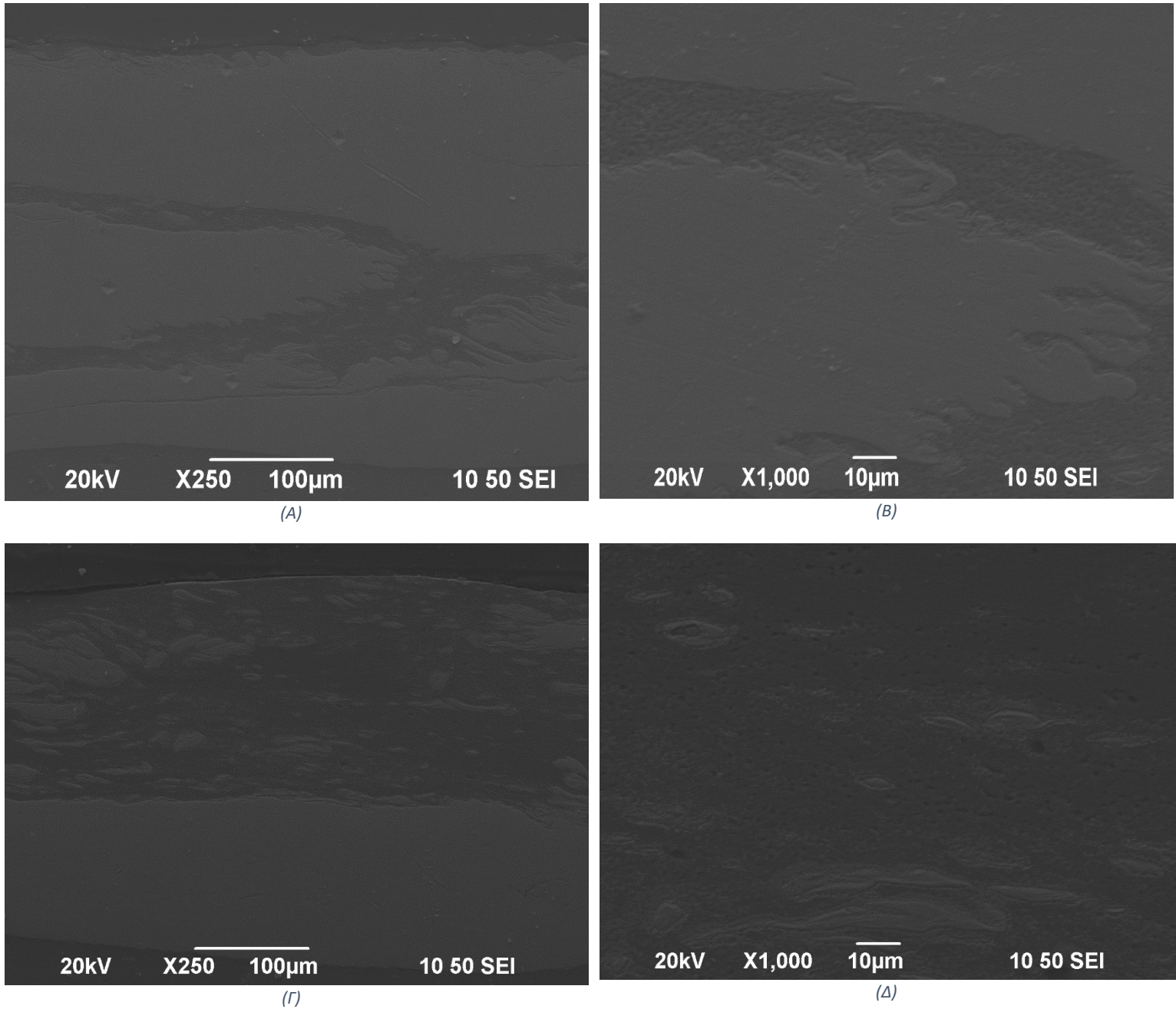


(Δ)

Εικόνα 4-30 : Μικρογραφία δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.29

Περισσότερη πληροφορία σχετικά με τις περιοχές λήφθηκε μέσω του SEM. Πιο χαρακτηριστικά, στην Εικόνα 4.31.A, παρουσιάζεται με μεγαλύτερη μεγέθυνση και καλύτερη διακριτικότητα η Εικόνα 4.31.B. Η γκριζα περιοχή αποτελείται πλήρως από χαλκό, ενώ η πιο σκούρα αποτελείται από αλουμίνιο. Η Εικόνα 4.31.Γ, καθώς και η Εικόνα 4.31.Δ, αφορούν την περιοχή που βρίσκεται αριστερά της Εικόνας 4.31.A, δηλαδή δίπλα στο nugget. Αποτυπώνεται και εδώ πως έχουν δημιουργηθεί πιθανές ενώσεις Al-Cu όχι μόνο σε αυτή το σημείο, αλλά κατά μήκος όλης της διεπιφάνειας που φαίνεται και στην μακρογραφία του. Για περισσότερη λεπτομέρεια, παρακάτω παρουσιάζονται μερικές χημικές αναλύσεις του δοκιμίου. Στην Εικόνα 4.32, παρουσιάζεται η χημική ανάλυση σωματιδίων, που υπάρχουν και στην Εικόνα 4.31.Δ. Αναλυτικότερα, η Εικόνα 4.32 και η Εικόνα 4.33, αφορούν την ίδια περιοχή, ωστόσο τα EDS έχουν λάβει χώρα ελάχιστα μm μεταξύ τους. Έτσι, στην Εικόνα 4.33, αποδεικνύεται καθαρά, πως τα σωματίδια αυτής της μορφής και απόχρωσης στο εσωτερικό της TMAZ, αποτελούνται από πιθανές ενδομεταλλικές ενώσεις ή στερεό διάλυμα Al:Cu. Σε αντίθεση με αυτό, στην Εικόνα 4.32, παρουσιάζεται η περιοχή του σχεδόν καθαρού αλουμινίου, όπου δεν υπάρχει καθόλου ανάμειξη με χαλκό. Αυτή η

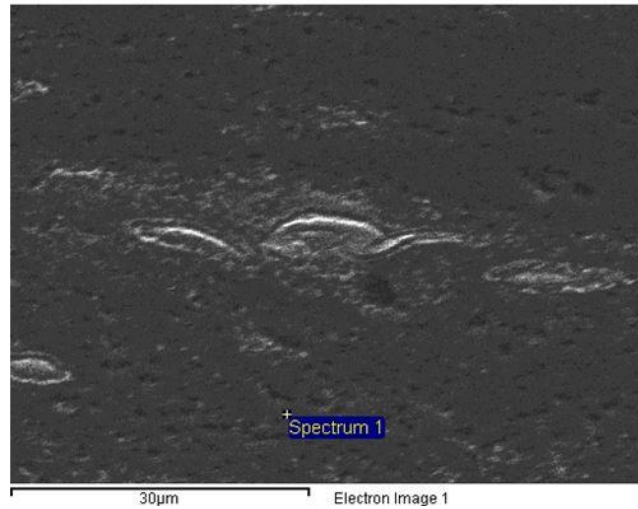
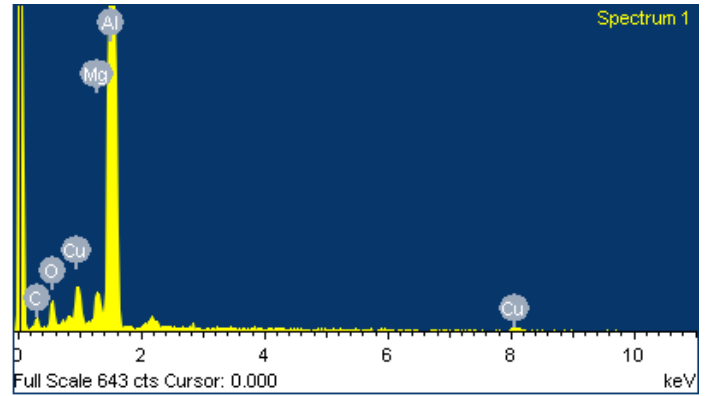
ανάλυση έχει ως σκοπό να αποδείξει πως στην ίδια περιοχή έχουν σχηματιστεί ενώσεις διμεταλλικές ή στερεό διάλυμα Al-Cu, ενώ γύρω από αυτή κυριαρχεί το αλουμίνιο.



Εικόνα 4-31 Μικρογραφία δοκιμίου μέσω SEM. Παρατηρείται με το πιο γκρι ανοιχτό χρώμα ο χαλκός και με το πιο σκούρο το αλουμίνιο. Διακρίνονται οι ενώσεις που έχουν σχηματιστεί μεταξύ των δύο υλικών καθώς επίσης και η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου

Standard
 C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

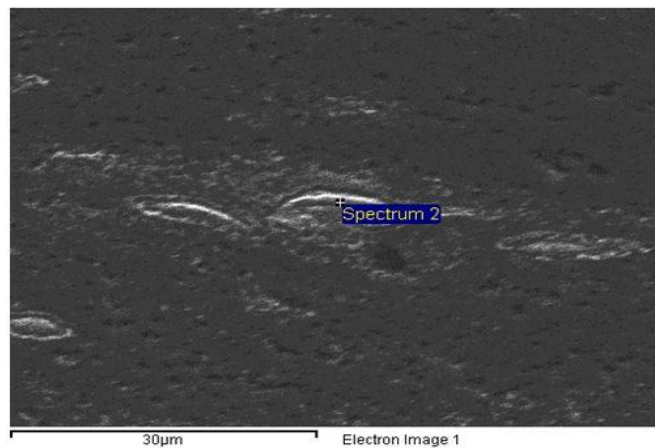
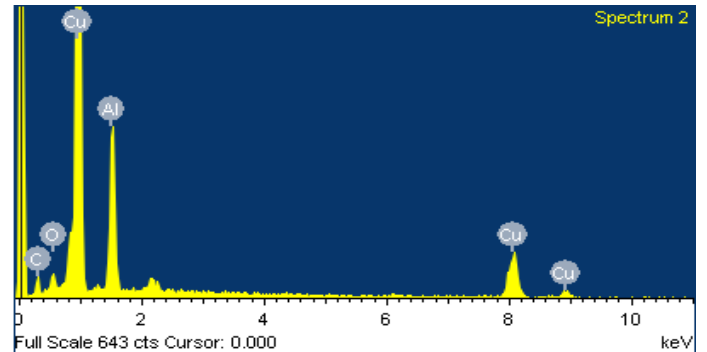
Element	Weight%	Atomic%
C K	13.16	24.23
O K	9.59	13.25
Mg K	1.38	1.26
Al K	73.95	60.59
Cu K	1.92	0.67
Totals	100.00	



Εικόνα 4-32 Χημική ανάλυση σε σημείο με καθαρό Al

Standard
 C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

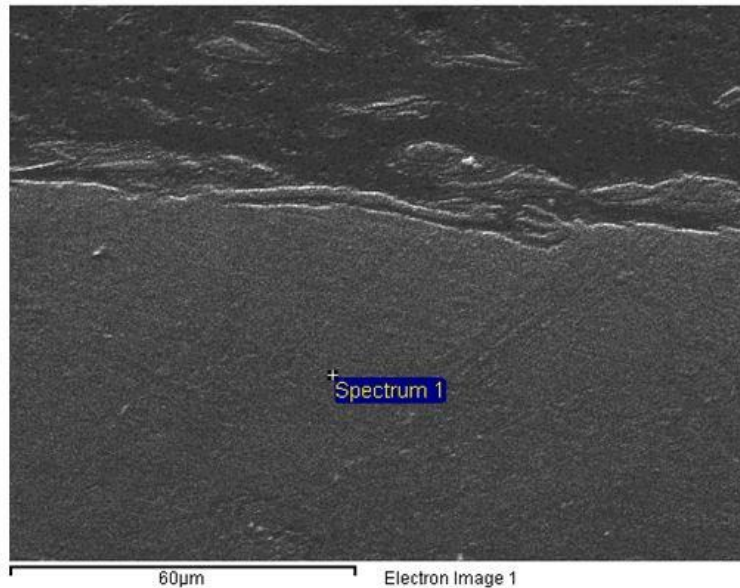
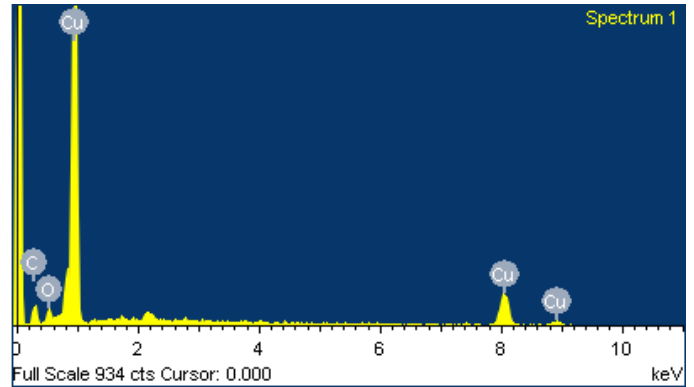
Element	Weight%	Atomic%
C K	22.83	46.38
O K	8.93	13.63
Al K	26.50	23.97
Cu K	41.74	16.03
Totals	100.00	



Εικόνα 4-33 Χημική ανάλυση για την εύρεση ενώσεων της περιοχής (στερεό διάλυμα Al-Cu)

Standard:
 C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	31.97	62.36
O K	11.45	16.77
Cu K	56.58	20.86
Totals	100.00	



Εικόνα 4-34 Χημική ανάλυση περιοχής χαλκού

Ωστόσο, στην Εικόνα 4.34, η οποία αφορά την περιοχή κάτω από τις δύο προηγούμενες Εικόνες, φαίνεται πως υπάρχει πράγματι καθαρός χαλκός. Η συγκεκριμένη περιοχή δεν περιέχει τελικώς καθόλου αλουμίνιο, παρόλο που βρίσκεται γύρω στα 0,5 mm από την επιφάνεια του χαλκού. Μία εξήγηση για το γεγονός αυτό, θα μπορούσε να είναι πως το εργαλείο συγκόλλησης, δημιουργώντας διμεταλλικές ενώσεις με το αλουμίνιο, κατάφερε να εναποθέσει τον χαλκό στο εσωτερικό του αλουμινένιου ελάσματος, δίχως όμως να τον αναδεύσει πλήρως, τοποθετώντας τον τελικά λόγω της περιστροφικής κίνησης, στο συγκεκριμένο σημείο.

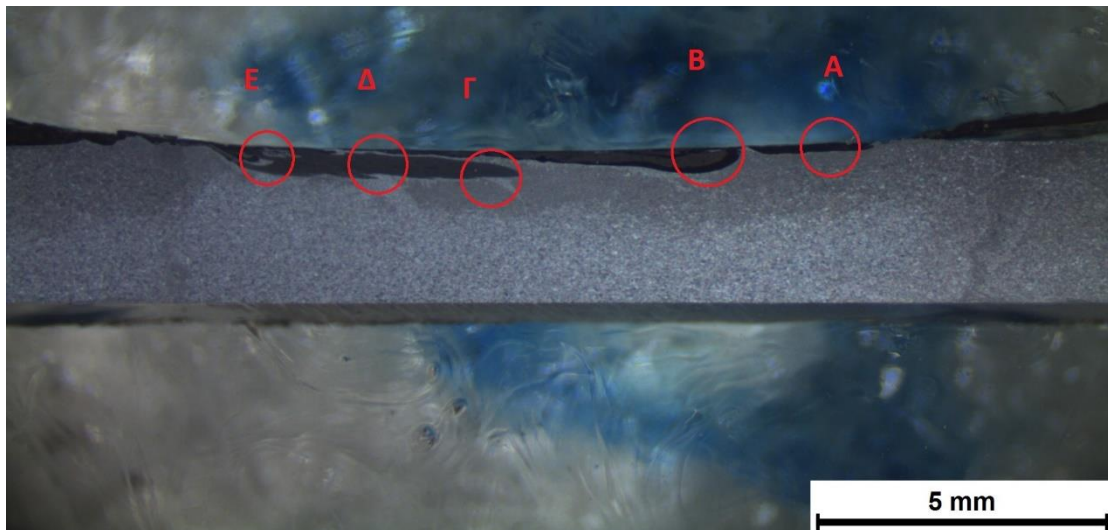
Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη συγκόλληση χαρακτηρίζεται ως μερικώς πετυχημένη. Η ραφή συγκόλλησης είναι καθαρή από ελαττώματα και μοιάζει ομαλή. Τα δύο υλικά αναμείχθηκαν μεταξύ τους σε μεγάλο ποσοστό, κυρίως στην διεπιφάνεια τους, ενώ οι ζώνες της συγκόλλησης διακρίνονται καθαρά. Το μοναδικό μεμπτό σημείο φαίνεται να είναι ο όχι τόσο καλά αναμειγμένος χαλκός στο κέντρο περίπου του δοκίμιού, όπως αποδείχτηκε και από τις αναλύσεις του EDS.

- Δοκίμιο B (1000/21/3°)



Εικόνα 4-35 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου B

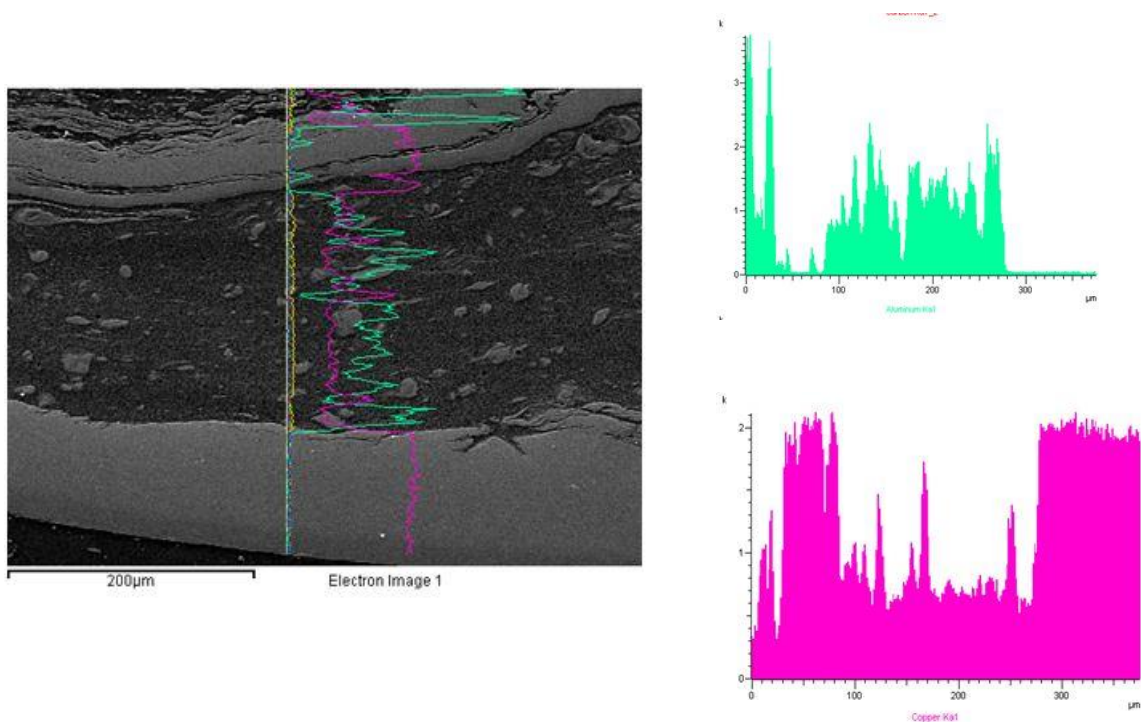
Η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου B παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.35. Το ξεκίνημα και το τελείωμα του εργαλείου συγκόλλησης έχουν γίνει σε ικανοποιητικό βαθμό και ακόμα φαίνεται να μην υπάρχουν ατέλειες στην επιφάνεια της ραφής. Επίσης, με γυμνό μάτι παρατηρούνται ενώσεις Al:Cu, πιο έντονα στην αρχή της συγκόλλησης και στην επιφάνεια της ραφής. Στο σημείο που έχει σημειωθεί η κάθετη πράσινη γραμμή, το δοκίμιο κόπηκε ώστε να εγκιβωτιστεί και να μελετηθεί μακρογραφικά και μικρογραφικά.



Εικόνα 4-36 Μακρογραφία του δοκιμίου B & σημεία ενδιαφέροντος

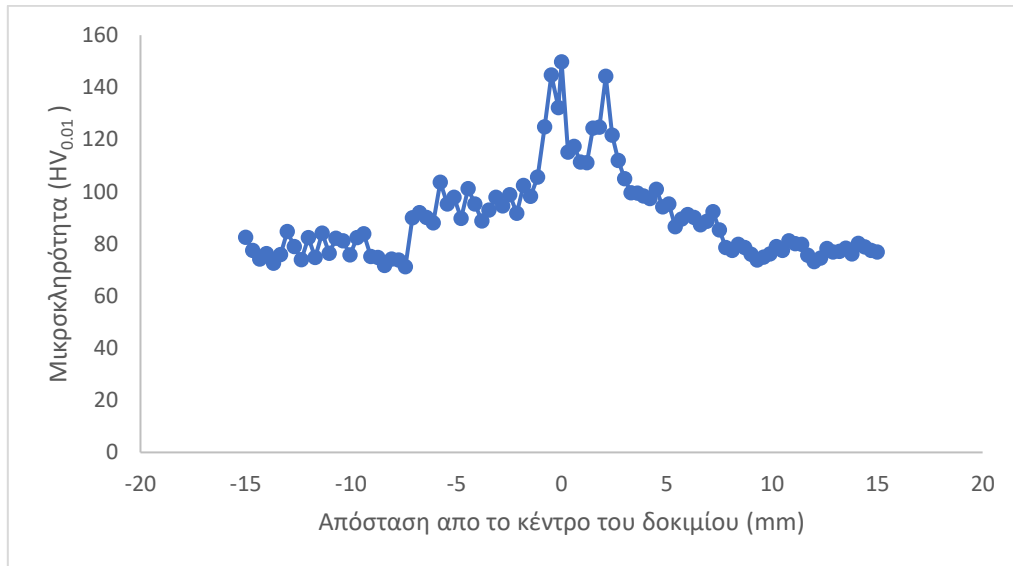
Στην Εικόνα 4.36 παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου. Παρατηρείται πως υπάρχουν δύο περιοχές πλήρους ανάμειξης των δύο υλικών. Η μία αφορά την διεπιφάνεια των δύο υλικών και βρίσκεται στα δεξιά της φωτογραφίας, ενώ η άλλη αφορά μία περιοχή που από πάνω της περιέχει αλουμίνιο, περιλαμβάνει το flow arm και σχηματίζονται στο εσωτερικό της χαρακτηριστικά rings.

Πιο λεπτομερώς, τα παραπάνω σημεία, φαίνονται στην Εικόνα 4.38, όπου τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από το οπτικό μικροσκόπιο. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4.38.A φαίνεται η περιοχή του δοκιμίου όπου ο χαλκός παραμένει στην επιφάνεια του, χωρίς να έχει επέλθει ανάμειξη με το αλουμίνιο, ενώ παράλληλα τα δύο υλικά βρίσκονται στο όριο της ζώνης TMAZ. Στη συνέχεια, στην Εικόνα 4.38.B, παρουσιάζεται η ανάμειξη των δύο υλικών που συμβαίνει κοντά στην διεπιφάνεια του δοκιμίου. Παρατηρείται πλήρης ανάμειξη του χαλκού με το αλουμίνιο, όπως επίσης και διάφορες ενώσεις μεταξύ των δύο αυτών υλικών που έχουν σχηματιστεί στην εν λόγω περιοχή. Για να γίνει ακόμα πιο σαφής η περιοχή αυτή, πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση line scan, που εμφανίζεται στην Εικόνα 4.37. Πράγματι τα αποτελέσματα του line scan δείχνουν πως στο ενδιάμεσο τα ποσοστά του χαλκού (ροζ χρώμα) και του αλουμινίου (πράσινο χρώμα) είναι αρκετά κοντά με συνέπεια εκεί να υφίσταται κραμάτωση των δύο υλικών. Αντίθετα, στις υποπεριοχές πάνω και κάτω από την κραμάτωση, το line scan δείχνει ο χαλκός και το αλουμίνιο να υπάρχουν σε αυτονομία, δίχως να έχουν αναμειχθεί πλήρως ή να έχουν σχηματίσει ενώσεις. Στην Εικόνα 4.38.Γ, φαίνεται καθαρά η ζώνη ανάδευσης του δοκιμίου, που ταυτόχρονα έχουν δημιουργηθεί τα χαρακτηριστικά rings. Πιο αναλυτικά, στην διεπιφάνεια της φωτογραφίας, εξακολουθεί να υπάρχει ανάμειξη αλουμινίου και χαλκού, ωστόσο το ίδιο συμβαίνει σε μεγαλύτερο βάθος, όπου και εκεί παρατηρούνται ενώσεις των δύο υλικών, ενώ οι κόκκοι είναι δυναμικώς ανακρυσταλλωμένοι και σε μέγεθος πολύ μικρό. Η ίδια κατάσταση επικρατεί και στην Εικόνα 4.38.Δ. Στην διεπιφάνεια παρατηρείται ξανά το φιλμ που έχει ανάμειξη των δύο υλικών, ενώ εδώ φαίνονται τα rings πιο χαρακτηριστικά, αφού η φωτογραφία αναφέρεται στο κέντρο του δοκιμίου. Σε ό,τι αφορά την Εικόνα 4.38.E, αυτό που φαίνεται χαρακτηριστικά είναι το τέλος των rings και επίσης το flow arm στην επιφάνεια του δοκιμίου. Παρατηρείται ο τρόπος που εισέρχεται η ροή στο pugget και ακόμα το πως το φιλμ της διεπιφάνειας όπου υπάρχει ανάμειξη τερματίζει όταν ξεκινάει το flow arm.

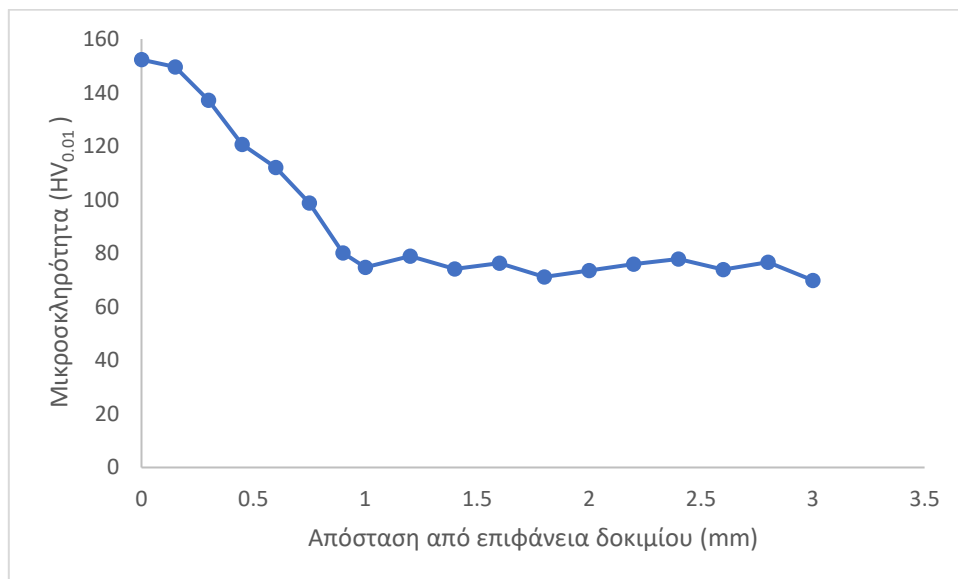


Εικόνα 4-37 Line scan της περιοχής της Εικόνας 4.38.A. Χαρακτηριστική κατανομή αλουμινίου και χαλκού

Ακόμη, σχετικά με το δοκίμιο Β, στο διάγραμμα 4.6 φαίνονται οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας που πραγματοποιήθηκαν. Χαρακτηριστικά μετρήθηκε μεγαλύτερη σκληρότητα σε μία περιοχή περίπου 4 χιλιοστών γύρω από το κέντρο του δοκιμίου, σε απόσταση σχεδόν 0.3 χιλιοστών από την επιφάνειά του, δεδομένο που δείχνει την αύξηση της σκληρότητας λόγω της ανάμειξης των δύο υλικών, καθώς επίσης και της λεπτόκοκκης δομής που υπάρχει εκεί.

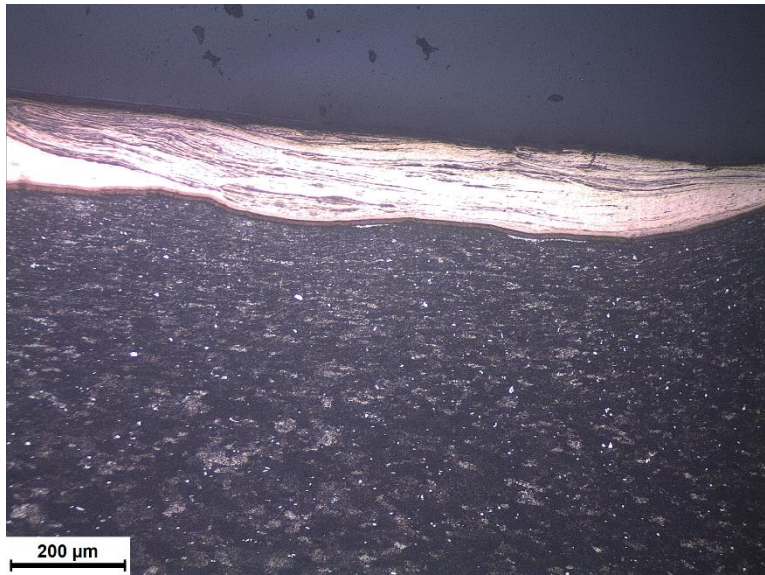


(A)

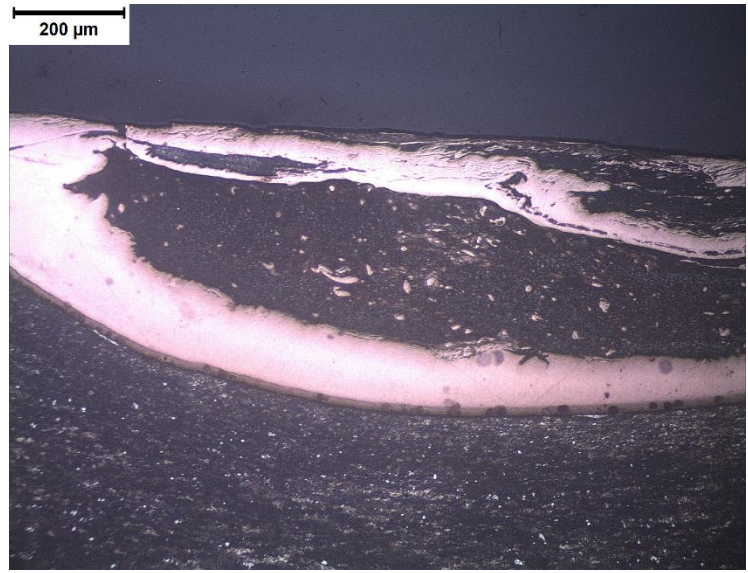


(B)

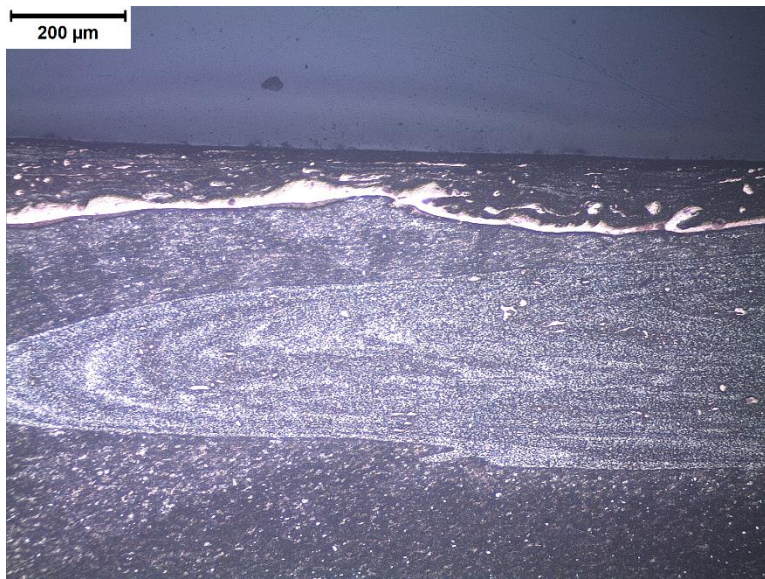
Διάγραμμα 4-6 : Κατανομή μικροσκληρότητας δοκιμίου Β κατά το διάμηκες (A) και κατά το εγκάρσιο (B)



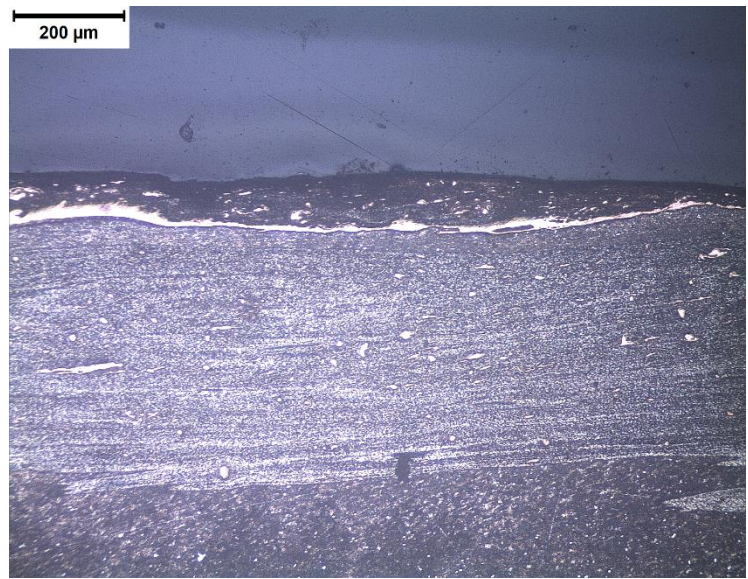
(A)



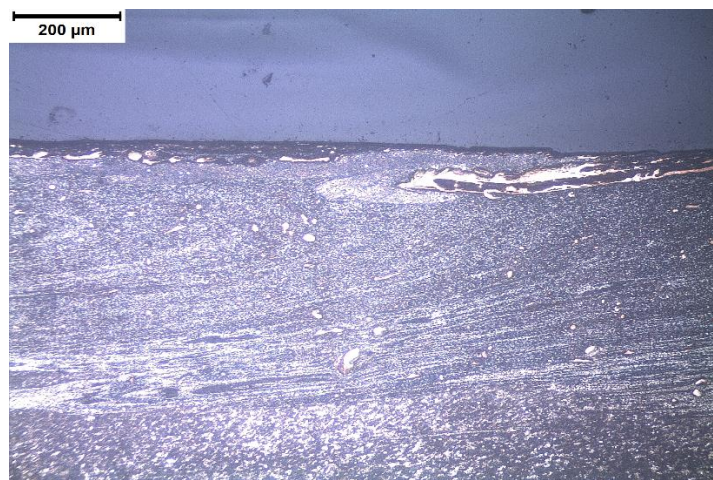
(B)



(Γ)



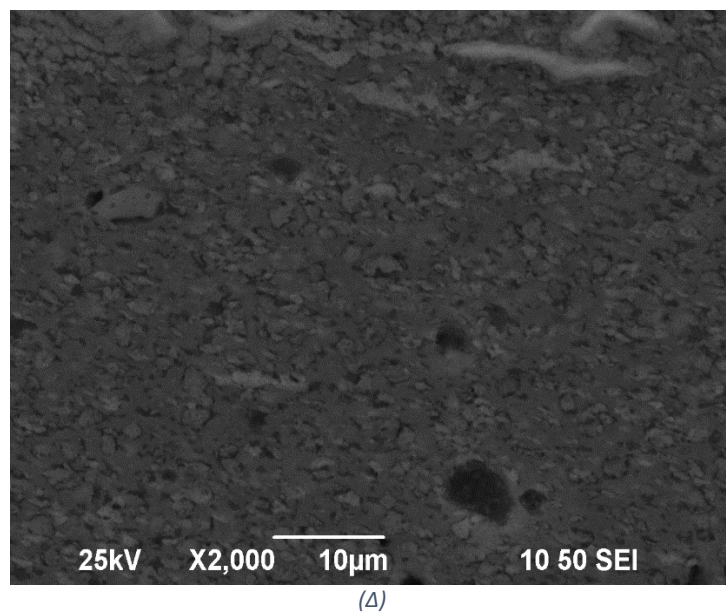
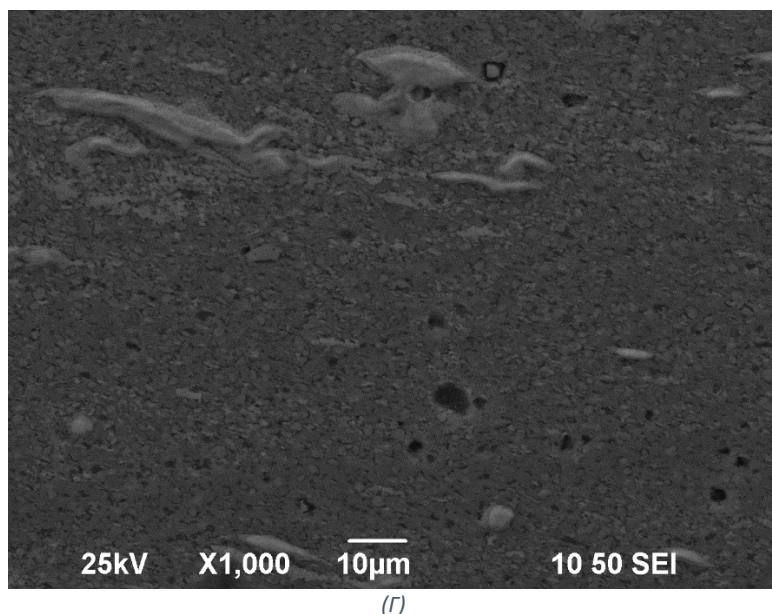
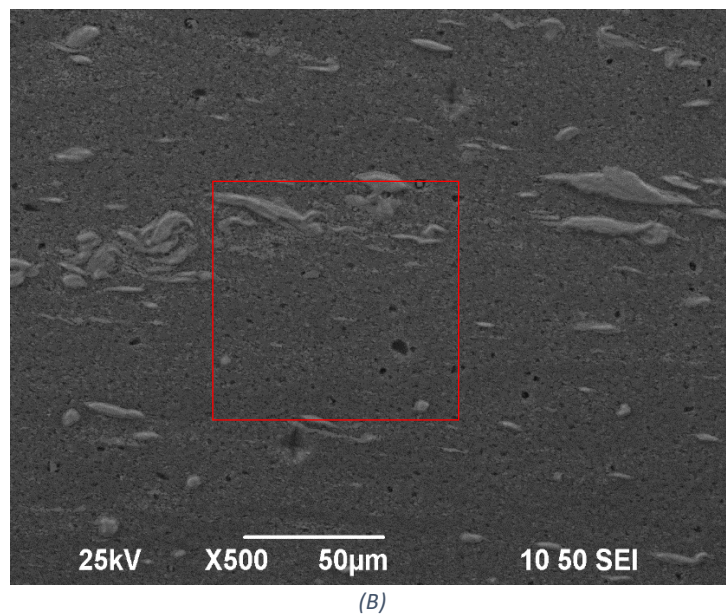
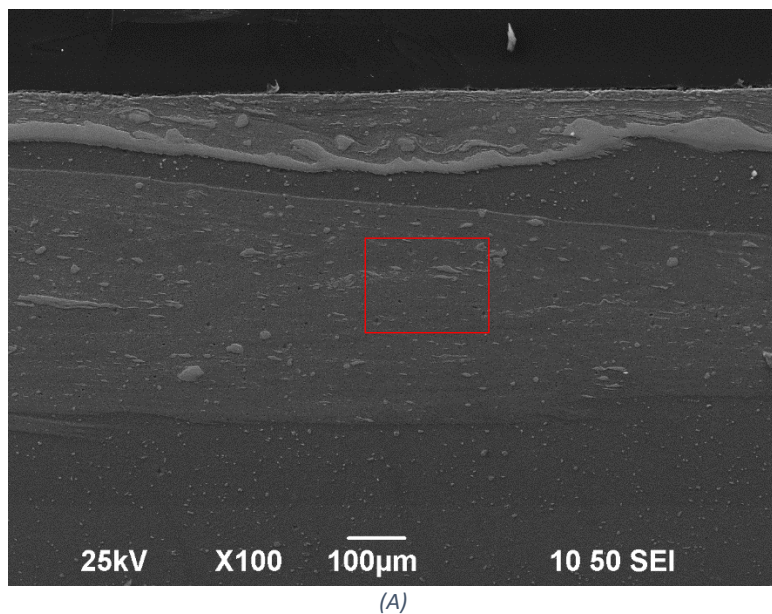
(Δ)



(E)

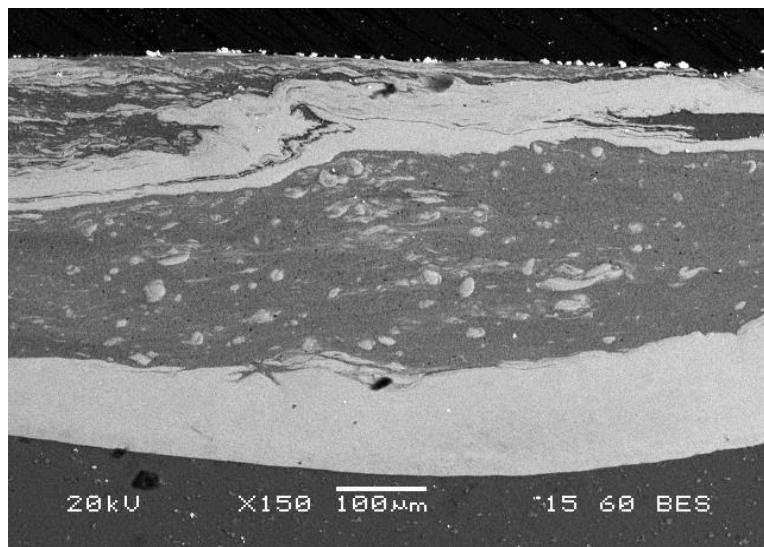
Εικόνα 4-38 Μικρογραφία του δοκιμίου Β στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνα 4.36

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα rings του δοκιμίου έγιναν με χρήση του SEM και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.39. Στην Εικόνα 4.39.Α φαίνονται πιο καθαρά οι ενώσεις που έχουν σχηματιστεί. Με σκούρο γκρι χρώμα χαρακτηρίζεται το αλουμίνιο, ενώ με το πιο ανοιχτό γκρι ο χαλκός. Παρατηρούνται, λοιπόν, τόσο στην επιφάνεια του δοκιμίου όσο και στο εσωτερικό των rings, ενώσεις χαλκού με αλουμίνιο. Πιο λεπτομερώς, στην Εικόνα 4.39.Β, η οποία αποτελεί μεγέθυνση στο κόκκινο πλαίσιο της Εικόνας 4.39.Α, φαίνονται σωματίδια χαλκού να έχουν εισέλθει στο αλουμίνιο δημιουργώντας δεσμούς. Τέλος, στις Εικόνες 4.39.Γ και 4.39.Δ, παρουσιάζονται γεωμετρικά οι κόκκοι της περιοχής, οι οποίοι όπως αποδεικνύεται και από το SEM, είναι δυναμικώς ανακρυσταλλωμένοι.

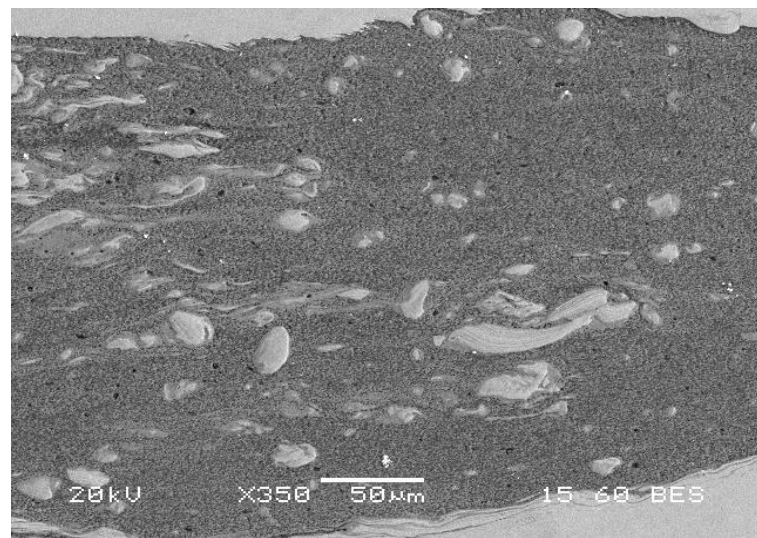


Εικόνα 4-39 Μικρογραφία δοκιμίου στην περιοχή που βρίσκονται τα rings. Γενική φωτογραφία μικροδομής και παρατήρηση σωματιδίων χαλκού (Α) x100. Πιο λεπτομερή άποψη για τον χαλκό στο εσωτερικό του δοκιμίου (Β) x500. Παρατήρηση των σωματιδίων χαλκού και των ενώσεων με το αλουμίνιο (Γ) x1000. Λεπτομερέστατη μικρογραφία για την παρατήρηση των δυναμικώς ανακρυσταλλωμένων κόκκων (Δ) x2000

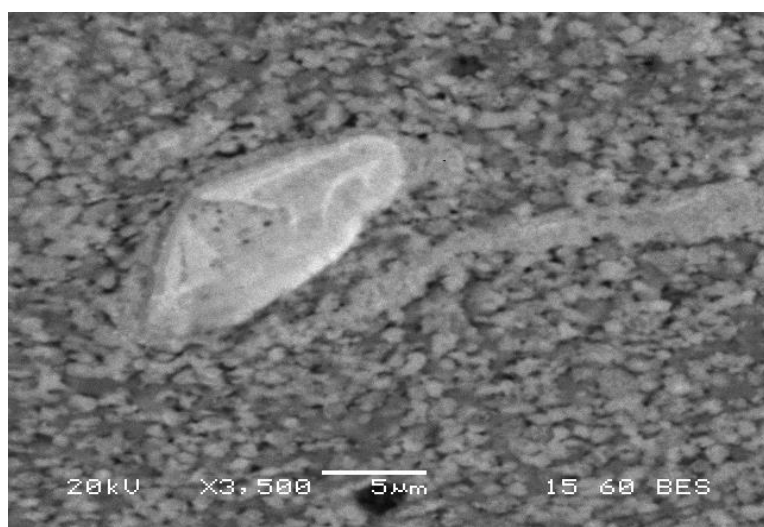
Το δοκίμιο Β αναλύθηκε περαιτέρω στην περιοχή της Εικόνας 4.38.Β, με χρήση ανάλυσης backscattering. Πιο αναλυτικά, λήψεις της περιοχής αυτής παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.40. Και εδώ ο χαλκός φαίνεται με το πιο ανοιχτόχρωμο γκρι χρώμα ενώ το αλουμίνιο με τη πιο σκούρα γκρι απόχρωση. Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούνται να έχουν σχηματιστεί ενώσεις Al:Cu. Επίσης, χαρακτηριστικά στις δύο τελευταίες φωτογραφίες, παρουσιάζονται οι δυναμικώς ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι, καθώς και σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου. Επιπλέον, με χρήση του EDS έγιναν οι χημικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.41 και 4.42 αντίστοιχα. Από τις δύο αυτές χημικές αναλύσεις συμπεραίνεται πως ο χαλκός βρίσκεται στην φάση η. Επομένως πράγματι αυτό που δείχνει το EDS, είναι πως σε αυτή την περιοχή του δοκιμίου, έχουν σχηματιστεί διμεταλλικές ενώσεις της μορφής AlCu (η). Σε ό,τι αφορά τις υπόλοιπες περιοχές του δοκιμίου, υπάρχει στερεό διάλυμα Al:Cu.



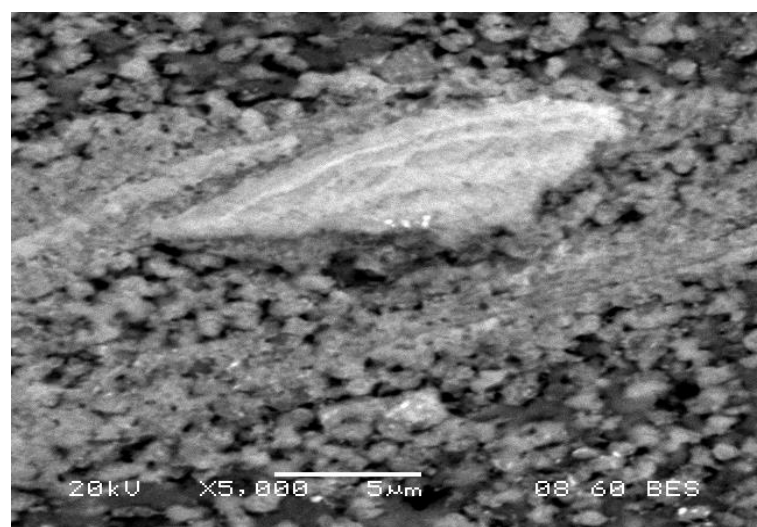
(Α)



(Β)



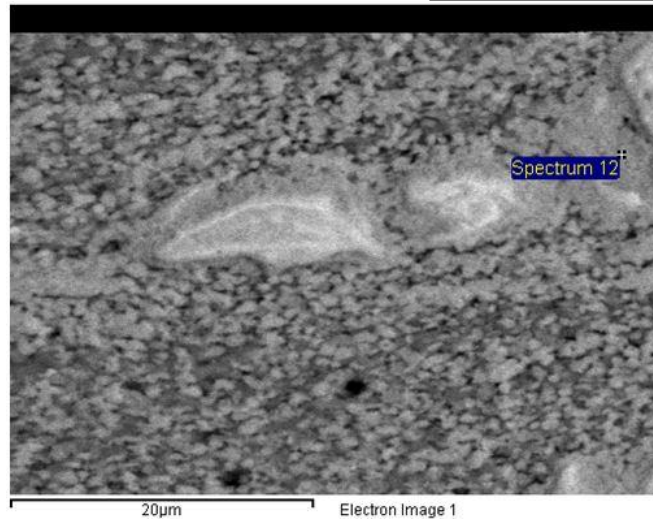
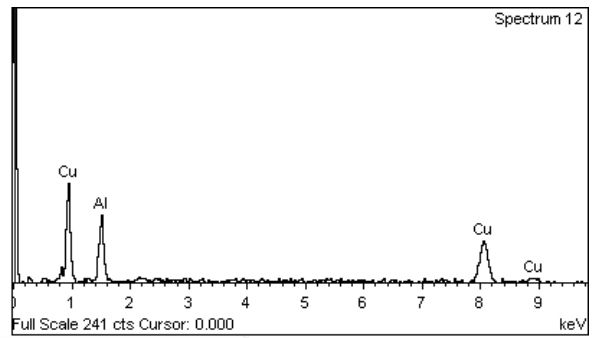
(Γ)



(Δ)

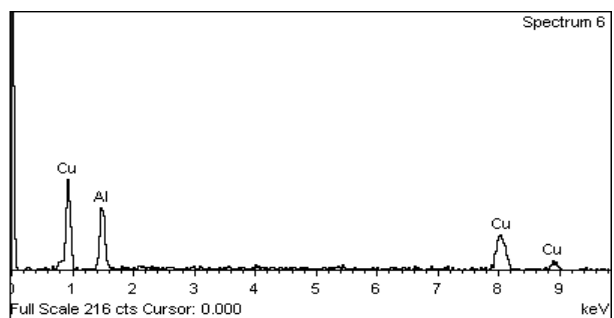
Εικόνα 4-40 Μικρογραφία και λήψεις από το SEM, με τη βοήθεια του backscattering. Μεγέθυνση συνεχώς στην ίδια περιοχή. Φαίνεται τελικώς πως υπάρχει δυναμική ανακρυστάλλωση

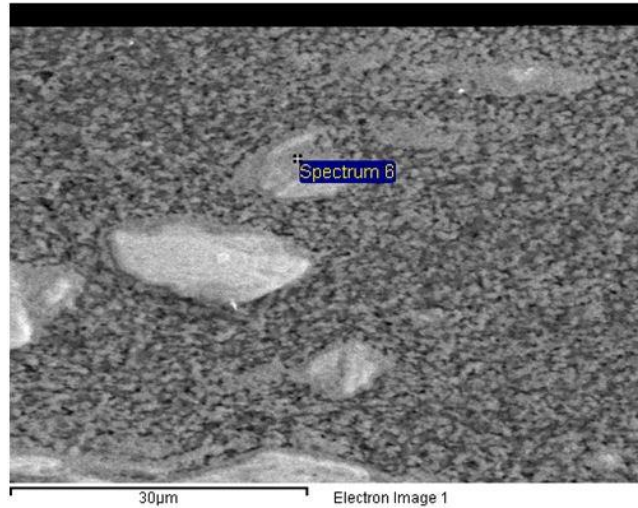
Element	Weight%	Atomic%
Al K	27.23	46.84
Cu K	72.77	53.16
Totals	100.00	



Εικόνα 4-41 Αποτελέσματα EDS για εύρεση διμεταλλικών ενώσεων στο εσωτερικό της Εικόνας 4.40.A. Με την πιο λευκή απόχρωση απεικονίζεται ο χαλκός

Element	Weight%	Atomic%
Al K	30.22	50.49
Cu K	69.78	49.51
Totals	100.00	





Εικόνα 4-42 Αποτελέσματα EDS για εύρεση διμεταλλικών ενώσεων στο εσωτερικό της Εικόνας 4.40.A. Με την πιο λευκή απόχρωση απεικονίζεται ο χαλκός. Παρατηρούνται σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του αλουμίνιου

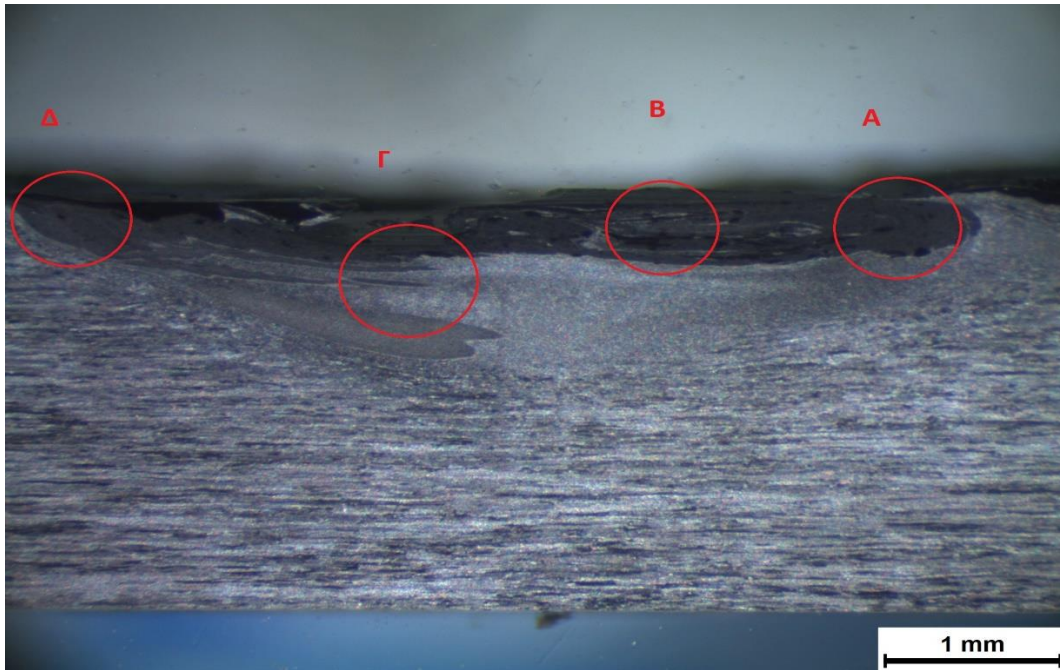
Συμπερασματικά, οι συνθήκες της συγκεκριμένης συγκόλλησης έδωσαν ένα θεμιτό και άρτιο αποτέλεσμα. Στην μακροδομή του δοκιμίου, διακρίνονται τόσο οι ζώνες συγκόλλησης καθαρά, όσο και η ανάμειξη που έχει επέλθει. Η ανάμειξη των δύο υλικών λαμβάνεται και από το EDS πιο καθαρά, καθώς δείχνει ότι είτε στο δοκίμιο έχουν σχηματιστεί διμεταλλικές ενώσεις της φάσης η είτε υπάρχει στερεό διάλυμα (περιοχή rings). Συνεπώς, η συγκόλληση κρίνεται ως επιτυχής.

- Δοκίμιο Γ (1000/13/3°)



Εικόνα 4-43 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου Γ

Η ραφή συγκόλλησης του δοκιμίου Γ παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.43. Όπως φαίνεται, η έναρξη της συγκόλλησης δεν ήταν η επιθυμητή, καθώς στις δεδομένες συνθήκες, η ταχύτητα περιστροφής έτεινε να «σκίσει» τον χαλκό και να τον εξωθήσει, παρά να τον αναδεύσει και να εισέλθει με την κάθετη δύναμη στο αλουμίνιο. Ωστόσο στη συνέχεια, αυτό επιτεύχθηκε, αφήνοντας όμως στην επιφάνεια της ραφής κάποια ελαττώματα. Αυτά οφείλονται στον πείρο της μηχανής συγκόλλησης, καθώς κατά τη διαδικασία, ο ίδιος, κατασκευασμένος από εργαλειοχάλυβα, δημιουργεί διμεταλλικές ενώσεις με το αλουμίνιο και τον χαλκό και έτσι δεν καταφέρνει στο έπακρο να εναποθέσει τον χαλκό στο εσωτερικό του αλουμινίου, αφήνοντας έτσι αφενός αρκετό χαλκό στην επιφάνεια του δοκιμίου και αφετέρου αυτού του είδους το tunnel. Παρόλα αυτά, το δοκίμιο κόπηκε, εγκιβωτίστηκε και μελετήθηκε σε σημείο όπου δεν υπήρχαν τόσο έντονα αυτού του είδους τα ελαττώματα.



Εικόνα 4-44 Μακρογραφία δοκιμίου Γ & σημεία ενδιαφέροντος

Η μακρογραφία του δοκιμίου Γ, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.44. Από εκεί φαίνεται πως στην διεπιφάνεια, υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών. Στο σημείο Γ ωστόσο και λίγο πιο αριστερά διακρίνεται η απουσία υλικού, γεγονός που οφείλεται στον πείρο συγκόλλησης και το γνωστό “hook” της βιβλιογραφίας. Ακόμα, παρατηρείται πως στο κέντρο του δοκιμίου, οι κόκκοι του αλουμινίου μοιάζει να είναι δυναμικώς ανακρυσταλλωμένοι.

Μεγαλύτερη λεπτομέρεια σχετικά με αυτά τα σημεία, φαίνονται στην Εικόνα 4.45, όπου παρουσιάζονται μικρογραφικά τα αποτελέσματα τους. Έτσι, στην Εικόνα 4.45.Α, φαίνεται πως στην επιφάνεια του δοκιμίου υπάρχει ανάμειξη των δύο υλικών, ενώ επίσης στα αριστερά της φωτογραφίας, φαίνεται και μετάβαση από την TMAZ στην HAZ. Στην Εικόνα 4.45.Β, εμφανίζεται πιο πλούσιο μίγμα χαλκού-αλουμινίου, καθώς οι ενώσεις μεταξύ των δύο υλικών μοιάζει να είναι περισσότερες σε εκείνη την περιοχή. Στην Εικόνα 4.45.Γ, διακρίνεται το κενό στην επιφάνεια του δοκιμίου, καθώς επίσης και η περιοχή του nugget στο αλουμίνιο. Παρατηρείται η λεπτόκοκκη δομή του αλουμινίου, ενώ η ανάμειξη των δύο υλικών φαίνεται να μην έχει κατέβει σε μεγάλο βάθος. Τέλος, στην Εικόνα 4.45.Δ, διακρίνεται ξανά η μετάβαση των ζωνών καθώς επίσης και το τέλος του μίγματος. Ο περισσότερος χαλκός στην περιοχή αυτή βρίσκεται στην επιφάνεια χωρίς να έχει αναμειχθεί με το αλουμίνιο.

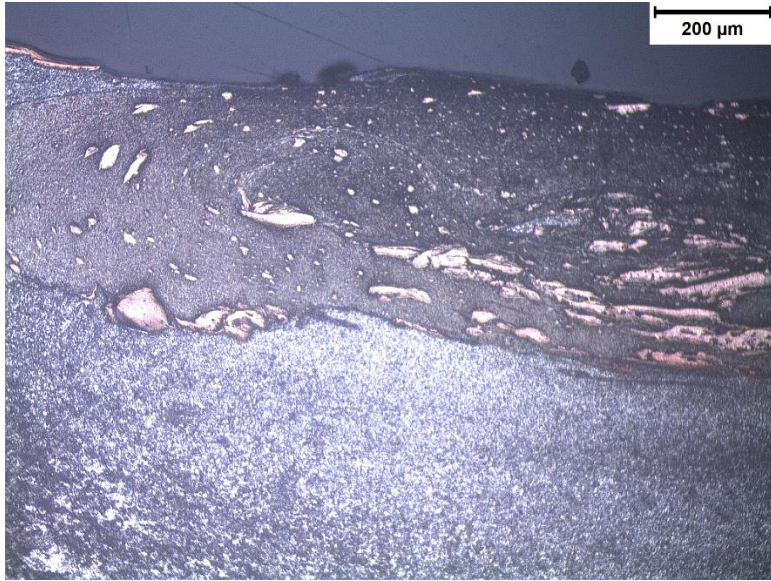
Περισσότερες πληροφορίες για την μικροδομή καθώς επίσης και για τα στοιχεία του δοκιμίου, λήφθηκαν με τη βοήθεια του SEM. Στην Εικόνα 4.46 παρουσιάζονται κάποιες από τις φωτογραφίες που έκαναν πιο σαφή τα αποτελέσματα της συγκόλλησης. Πιο καθαρά, φαίνεται στην Εικόνα 4.46.Α η απουσία υλικού στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ακόμη, φαίνεται πως η ανάμειξη έχει όντως περιοριστεί στη διεπιφάνειά του, ενώ στο κέντρο του μοιάζει να υπάρχει μόνο αλουμίνιο. Πιο λεπτομερώς αυτό αποτυπώνεται στις εικόνες 4.46.Β και 4.46.Γ, οι οποίες απευθύνονται δεξιά και

αριστερά του κέντρου της συγκόλλησης. Μάλιστα, στην Εικόνα 4.46.Δ, αποτυπώνεται πιο κοντινή λήψη, κοντά στην επιφάνεια του συγκολλημένου ελάσματος, η οποία δείχνει πως έχουν σχηματιστεί ενώσεις των δύο υλικών. Ωστόσο, η χημική ανάλυση στη δεδομένη περιοχή, αποτύπωσε πως ο χαλκός βρίσκεται σε πολύ χαμηλό ποσοστό σε σχέση με το αλουμίνιο.

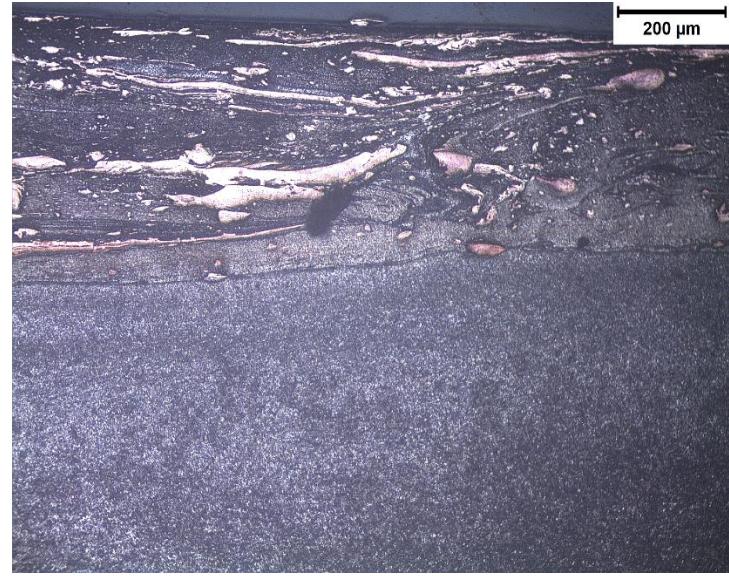
Στα παραπάνω σχόλια, προστίθεται και το αποτέλεσμα της μικροσκοπιομέτρησης. Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.6, η μέγιστη τιμή της μικροσκληρότητας είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με αυτές των προηγούμενων δοκιμίων. Ακόμα, φαίνεται πως και κατά τον y άξονα που περνάει από το κέντρο του δοκιμίου, η πτώση της μικροσκληρότητας σχετίζεται με το ότι η ανάμειξη των υλικών έχει περιοριστεί στην επιφάνεια του δοκιμίου, αφού σε κοντινή απόσταση από την διεπιφάνεια η μικροσκληρότητα τείνει στην ονομαστική του αλουμινίου.

Επιπλέον, έγιναν EDS, με σκοπό να ανιχνευτούν οι ενδεχόμενες ενώσεις των δύο υλικών καθώς επίσης και η εξακρίβωση του nugget. Έτσι, αρχικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.47, στην περιοχή του nugget, βρίσκεται σκέτο αλουμίνιο, με αποτέλεσμα ο χαλκός να έχει περιοριστεί σε ανάμειξη μόνο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Αντίστοιχα, στις Εικόνες 4.48 και 4.49, οι οποίες αφορούν τις περιοχές δεξιά και αριστερά από το κέντρο του δοκιμίου, φαίνεται ο χαλκός να έχει δημιουργήσει στερεό διάλυμα με το αλουμίνιο, σε ικανοποιητική ποσότητα.

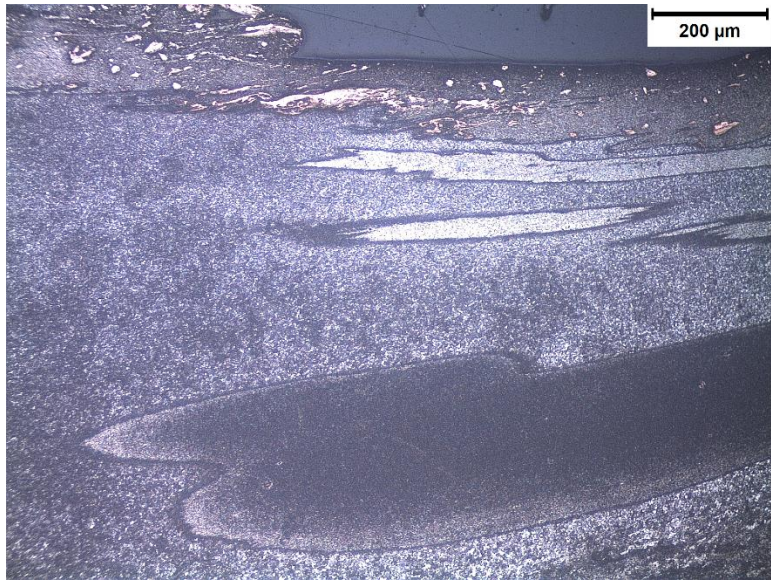
Συμπερασματικά, η εν λόγω συγκόλληση χαρακτηρίζεται ως μη αποδεκτή. Το ελάττωμα που εμφάνισε η ραφή φαίνεται να επηρέασε την μικροδομή του δοκιμίου και τελικά την ανάμειξη των υλικών. Ακόμα, η κάθετη δύναμη φάνηκε να επηρεάζει επίσης το αποτέλεσμα και έτσι το τελικό αποτέλεσμα μοιάζει να μην είναι ικανοποιητικό.



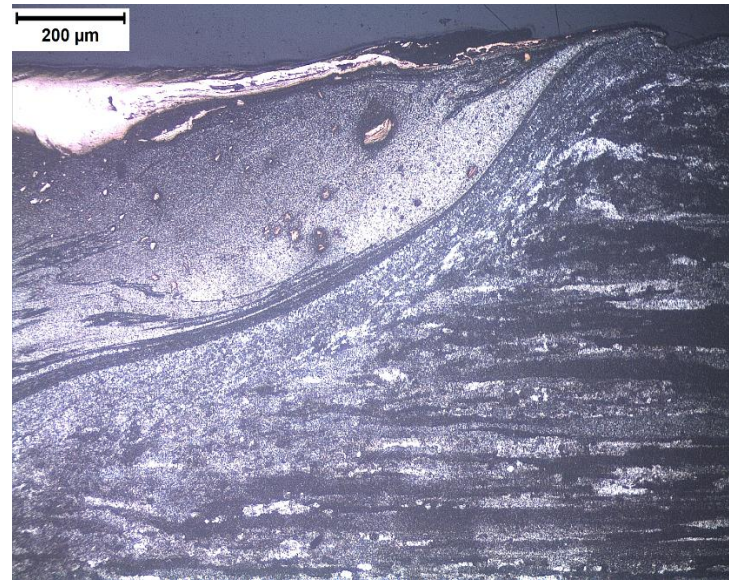
(Α)



(Β)

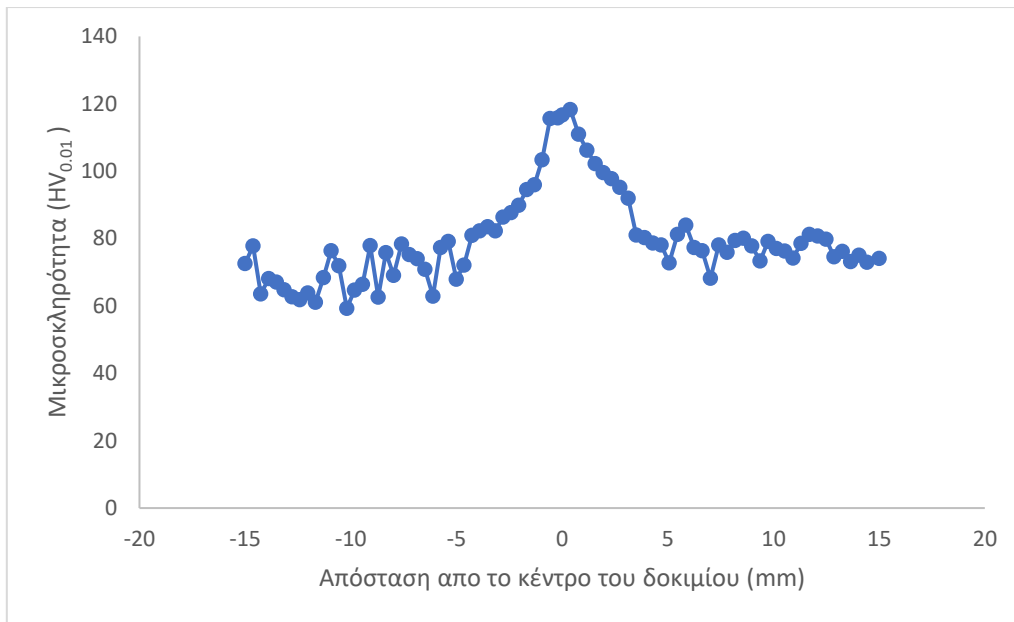


(Γ)

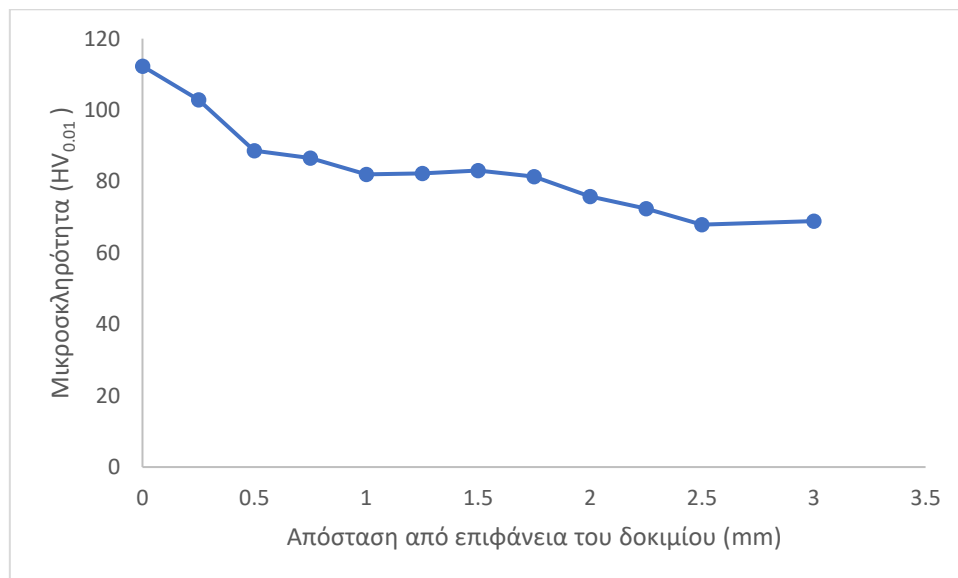


(Δ)

Εικόνα 4-45 Μικρογραφία του δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.44

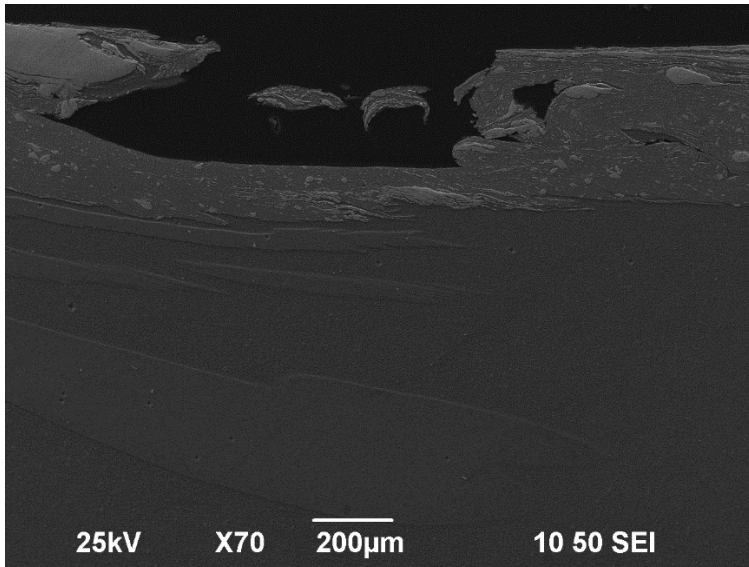


(A)

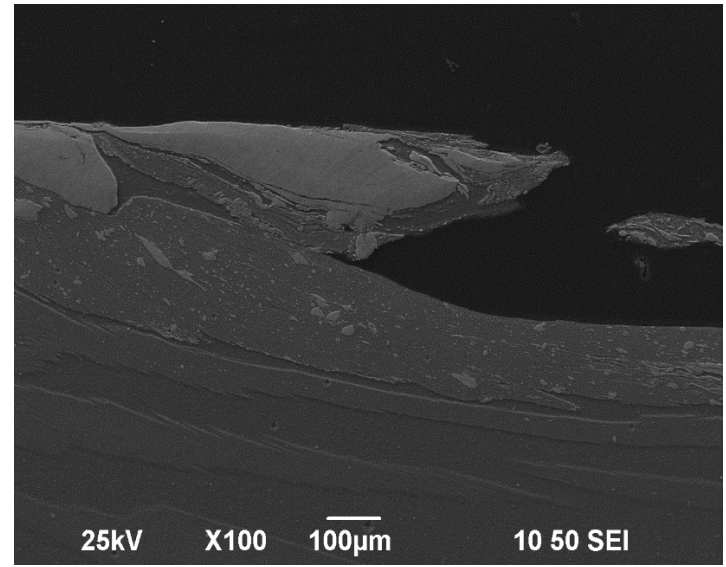


(B)

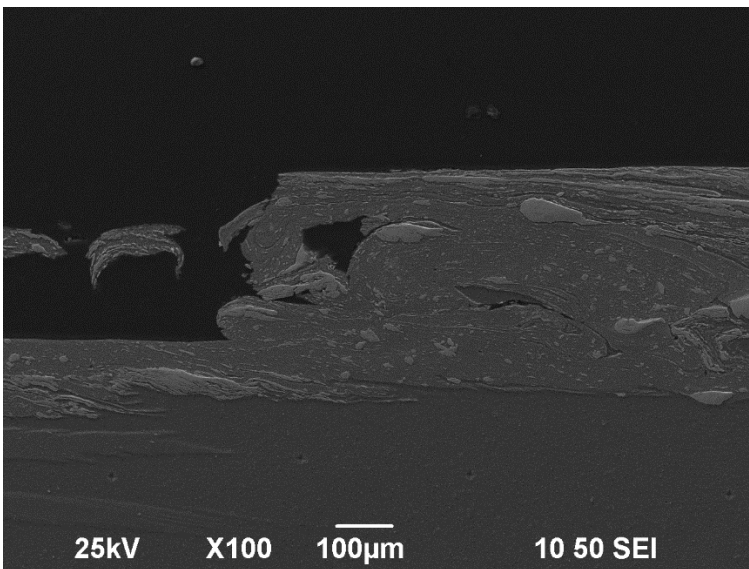
Διάγραμμα 4-7: Κατανομή μικροσκληρότητας δοκιμίου Γ κατά το διάμηκες (A) και κατά το εγκάρσιο (B)



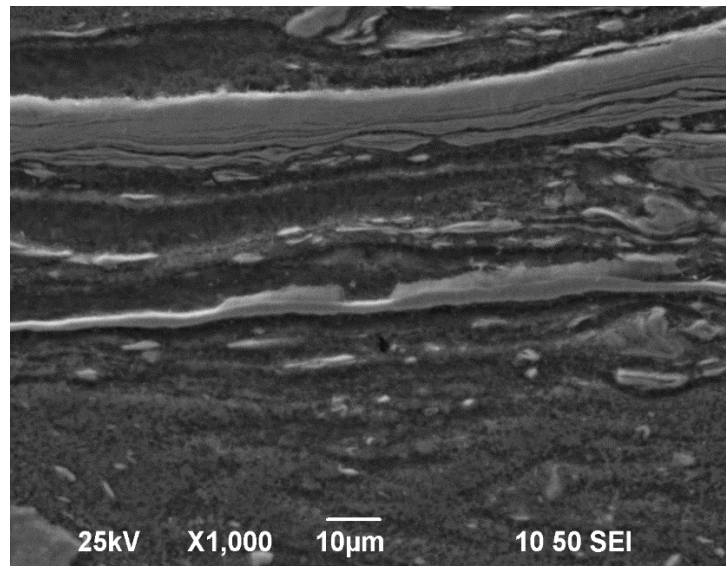
(A)



(B)



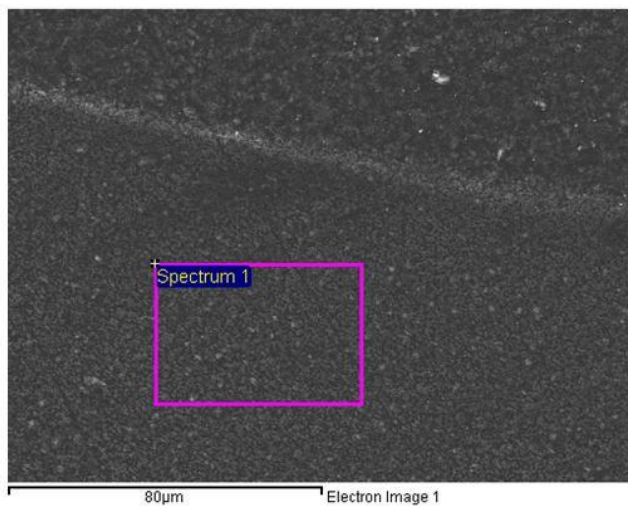
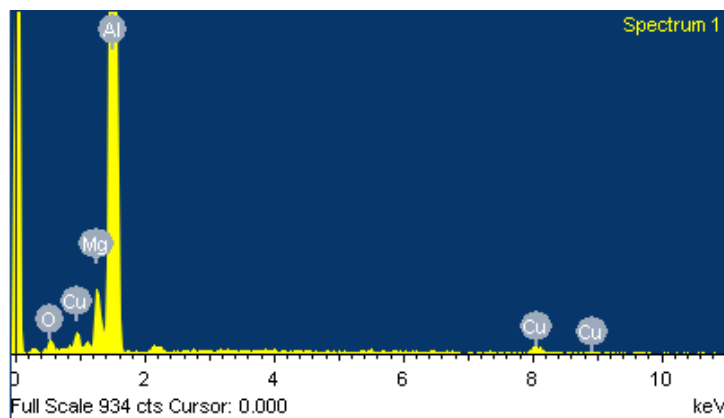
(Γ)



(Δ)

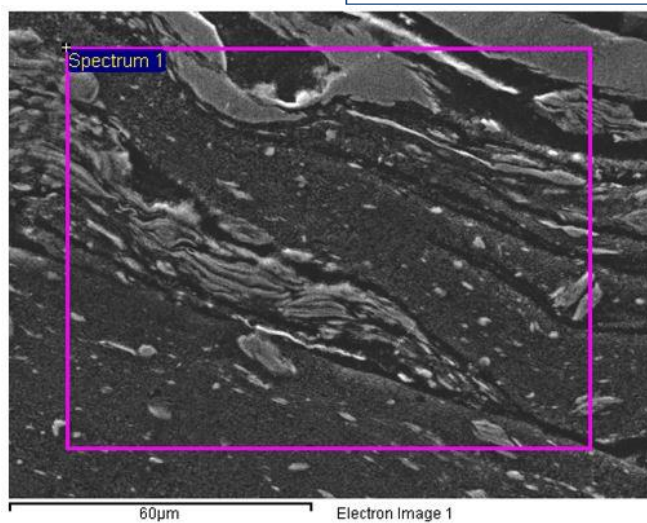
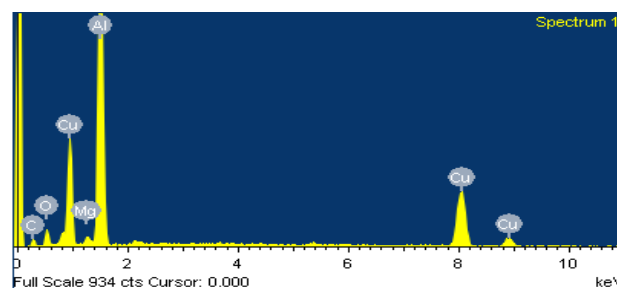
Εικόνα 4-46 Λήψεις του δοκιμίου από το SEM. Παρατήρηση της μικροδομής στην επιφάνεια και στο nugget του δοκιμίου (A) (x70). Μεγαλύτερη λεπτομέρεια αριστερά (B) και δεξιά (Γ) του hook (x100). Σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου κοντά στην επιφάνεια του ελάσματος (Δ) (x1000)

Element	Weight%	Atomic%
O K	4.35	7.21
Mg K	2.69	2.94
Al K	90.31	88.75
Cu K	2.64	1.10
Totals	100.00	



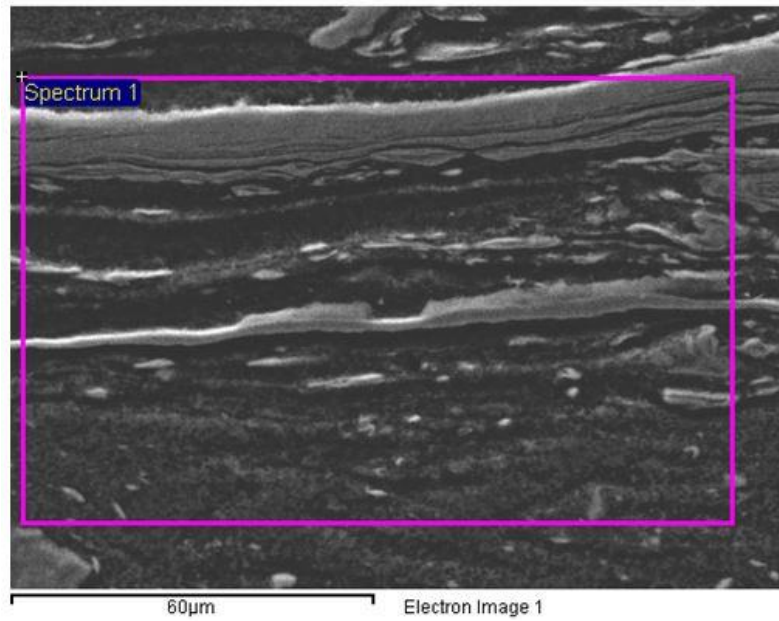
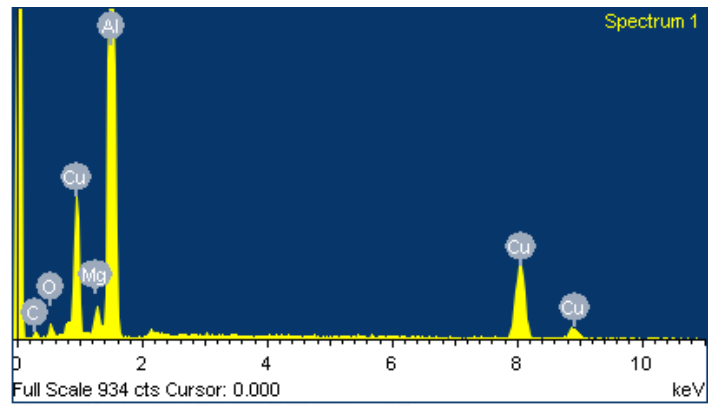
Εικόνα 4-47 Αποτελέσματα EDS στο εσωτερικό του nugget

Element	Weight%	Atomic%
C K	12.18	26.15
O K	8.36	13.47
Mg K	0.91	0.96
Al K	50.11	47.88
Cu K	28.44	11.54
Totals	100.00	



Εικόνα 4-48 Αποτελέσματα EDS αριστερά της περιοχής που υφίσταται η απουσία υλικού

Element	Weight%	Atomic%
C K	9.21	20.36
O K	4.54	7.54
Mg K	1.80	1.97
Al K	61.55	60.57
Cu K	22.89	9.57
Totals	100.00	



Εικόνα 4-49 Αποτελέσματα EDS δεξιά της περιοχής που υφίσταται η απουσία υλικού

- Δοκίμιο Δ (1000/13/3°)



Εικόνα 4-50 Ραφή συγκόλλησης δοκιμίου

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.50, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης του δοκιμίου, η έναρξη δεν ήταν η επιθυμητή. Ωστόσο, στη συνέχεια με αύξηση της κάθετης δύναμης, επιτεύχθηκε το θεμιτό αποτέλεσμα. Το συγκεκριμένο δοκίμιο, αν και έχει τις ίδιες συνθήκες με το Γ, διαφοροποιείται ως προς την διάταξη. Πιο συγκεκριμένα, επιθυμώντας να επιτευχθεί πιο ομαλή ραφή, χωρίς να απωθείται ο χαλκός από την επιφάνεια, τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν της ραφής ελάσματα αλουμινίου, τα οποία λειτουργούσαν ως μία επιπλέον επιφανειακή δύναμη ως προς τα συγκολλημένα ελάσματα. Έτσι, σαφώς το οπτικό αποτέλεσμα είναι πιο ικανοποιητικό σε σχέση με το δοκίμιο Γ.



Εικόνα 4-51 Εικόνα 4-51 Μακροδομή του δοκιμίου Δ & σημεία ενδιαφέροντος

Στην Εικόνα 4.51, παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου και κάποια σημεία που εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον προς μελέτη. Από την μακρογραφία του δοκιμίου, φαίνεται να έχει γίνει ανάμειξη των δύο υλικών, τόσο στην επιφάνεια, όσο και σε βάθος περίπου 0,5 mm. Στο κέντρο του δοκιμίου έχουν δημιουργηθεί rings, ενώ ταυτόχρονα διακρίνονται οι διαφορές στους κόκκους του υλικού, σε όλη τη διατομή.

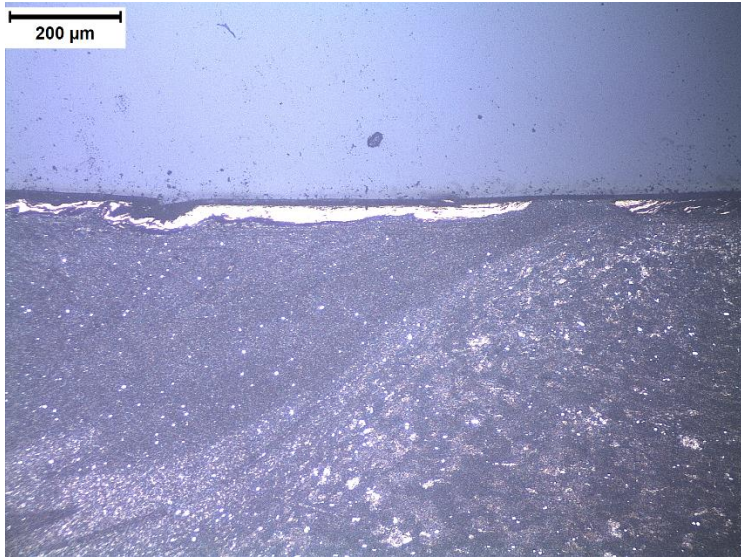
Λεπτομερέστερα, στην Εικόνα 4.52.Α, παρουσιάζεται η μικροδομή του σημείου Α. Φαίνονται οι διαφορετικές ζώνες που έχουν σχηματιστεί κατά την συγκόλληση των ελασμάτων, καθώς και ο ελάχιστος χαλκός που έχει παραμείνει στην επιφάνεια. Στις Εικόνες 4.52.Β και 4.52.Γ, φαίνονται λήψεις από την περιοχή του nugget. Στη μέση διακρίνονται καθαρά τα rings που έχουν σχηματιστεί κατά την ανάδευση, η λεπτόκοκκη δομή του υλικού, καθώς επίσης και η ανάμειξη των δύο υλικών που έχει επέλθει στην διεπιφάνεια. Εκεί διακρίνεται η ροή του χαλκού στο εσωτερικό του αλουμινίου, αλλά και σωματίδια χαλκού εσωτερικά του αλουμινίου. Στην Εικόνα 4.52.Δ, αποτυπώνεται το αντιδιαμετρικό σημείο του πλάτους της ραφής, όπου φαίνονται οι διαφορετικές ζώνες που έχουν σχηματιστεί εκεί, καθώς και ο χαλκός που έχει μείνει κατά μεγάλο ποσοστό στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Για εκτενέστερη μελέτη του δοκιμίου, με χρήση του SEM έγιναν περαιτέρω λήψεις, ενώ ταυτόχρονα διενεργήθηκαν και χημικές αναλύσεις. Στην Εικόνα 4.53 παρουσιάζονται οι εικόνες από το SEM. Με το πιο ανοιχτό γκρι χρώμα χαρακτηρίζεται ο χαλκός, ενώ με το πιο σκούρο χρώμα το αλουμίνιο. Η Εικόνα 4.53.Α δείχνει την λήψη στο κέντρο του δοκιμίου. Οι Εικόνες 4.53.Β και 4.53.Γ αναφέρονται στο nugget και στα rings που έχουν δημιουργηθεί. Αναλυτικότερα, στην Εικόνα 4.53.Γ, φαίνονται οι λεπτοί δυναμικώς ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι, που αποτελούν χαρακτηριστικό της περιοχής, ενώ αντίστοιχα διακρίνονται σωματίδια χαλκού στο εσωτερικό του

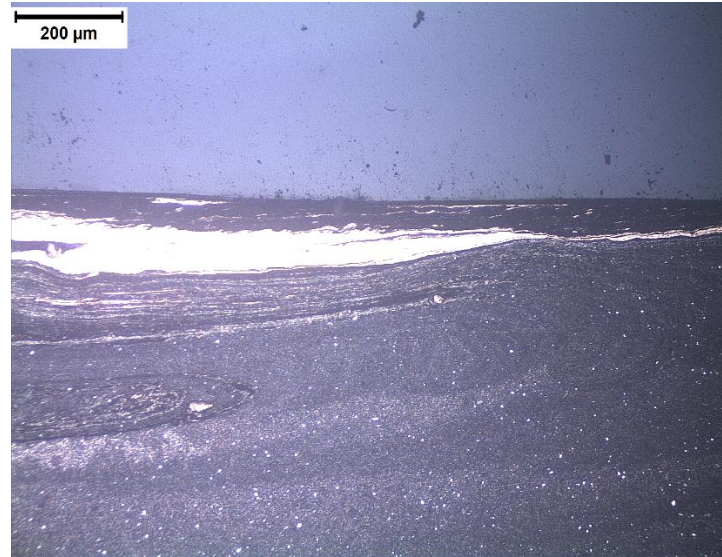
αλουμινίου. Απαντήσεις σχετικά με τις ενώσεις που έχουν δημιουργηθεί λήφθηκαν μέσω του EDS. Η Εικόνα 4.54 παρουσιάζει τη χημική ανάλυση που έλαβε χώρα στην περιοχή της Εικόνας 4.52.B. Αυτό που δείχνει είναι πως στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχει στερεό διάλυμα του χαλκού με το αλουμίνιο καθώς αν και υπάρχει ανάμειξη, ο χαλκός βρίσκεται σε πολύ χαμηλό ατομικό ποσοστό. Το ίδιο συμβαίνει και με την Εικόνα 4.55 όπου η κατάσταση που επικρατεί προς την επιφάνεια του δοκιμίου, είναι παρόμοια. Ο χαλκός βρίσκεται σε χαμηλό ατομικό ποσοστό, οπότε αυτό που λαμβάνεται είναι πως υφίσταται στερεό διάλυμα.

Επιπλέον, στο διάγραμμα 4.8, εμφανίζεται η μέτρηση της κατανομής της μικροσκληρότητας του δοκιμίου. Η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στο κέντρο του δοκιμίου και γενικότερα αποτυπώνεται η ανάμειξη των δύο υλικών καθώς και η λεπτόκοκκη δομή της περιοχής πέριξ του κέντρου.

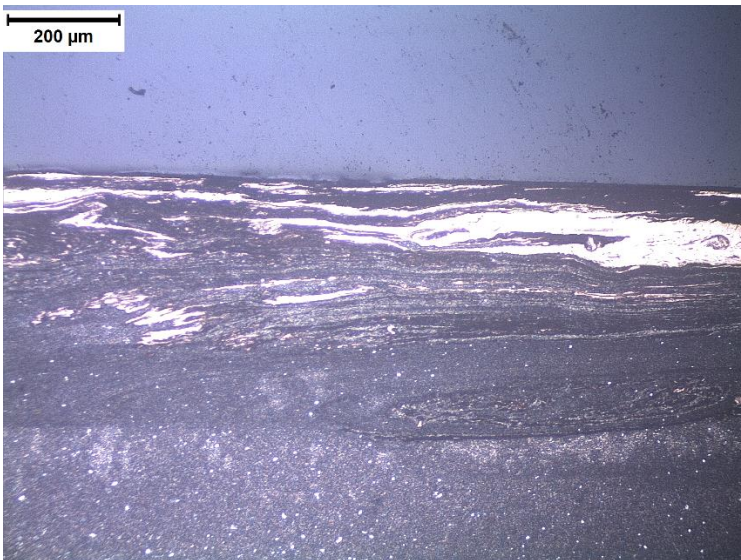
Συμπερασματικά η συγκεκριμένη συγκόλληση κρίνεται ως ικανοποιητική. Η μικροδομή του δοκιμίου περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά της FSW, οι ζώνες που έχουν σχηματιστεί διακρίνονται καθαρά και η ανάμειξη έχει γίνει σε επαρκή βαθμό. Αν σε αυτά συνυπολογιστούν η κατανομή της μικροσκληρότητας και τα αποτελέσματα του EDS, τότε σίγουρα το αποτέλεσμα είναι πολύ κοντά στο θεμιτό.



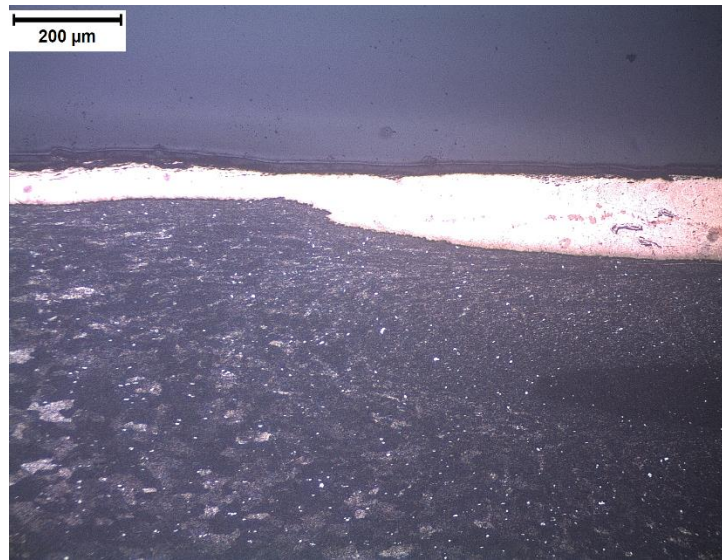
(Α)



(Β)

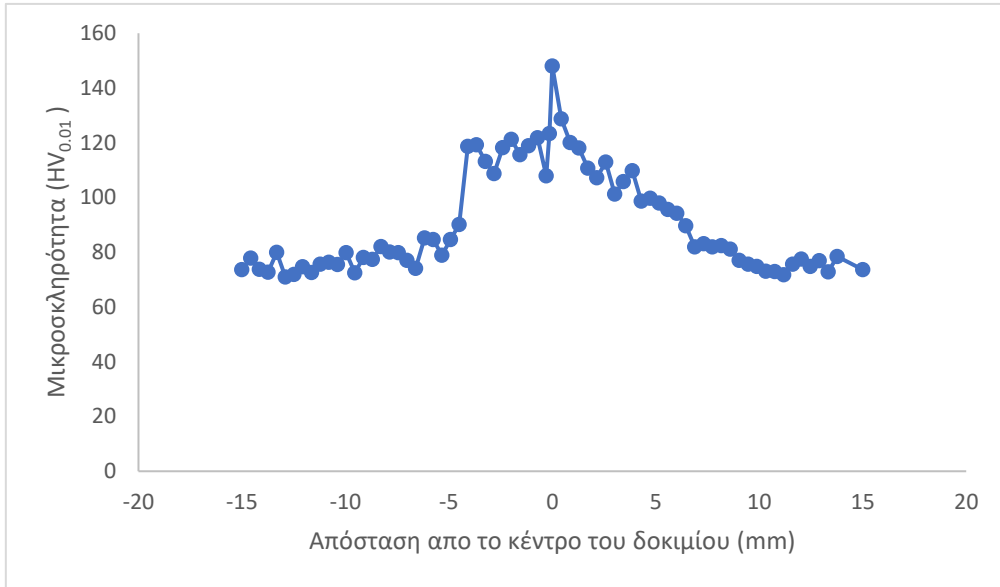


(Γ)

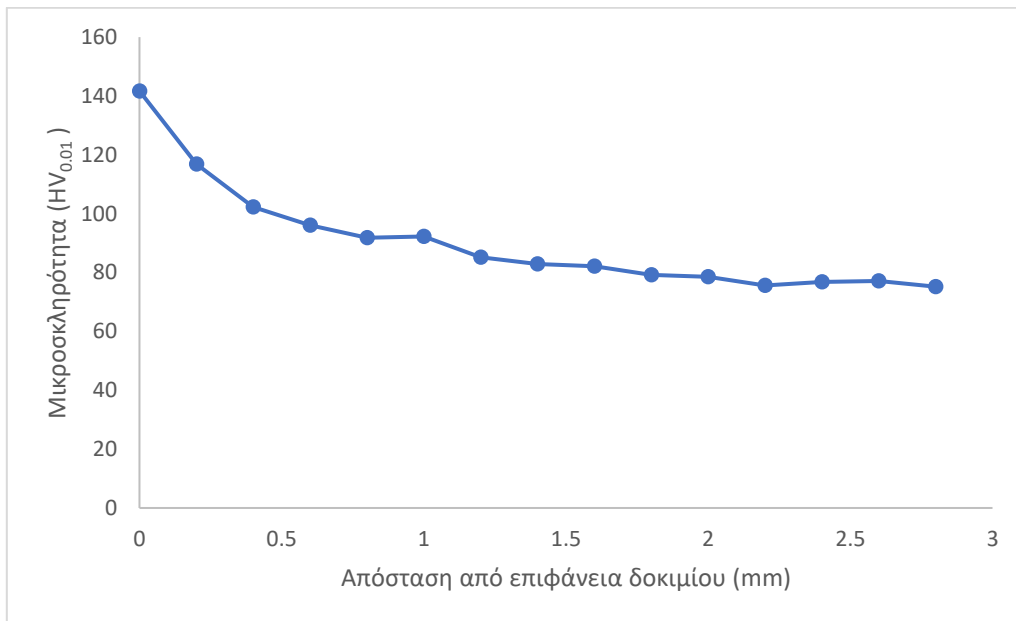


(Δ)

Εικόνα 4-52 Μικροδομή του δοκιμίου στα σημεία ενδιαφέροντος της Εικόνας 4.51

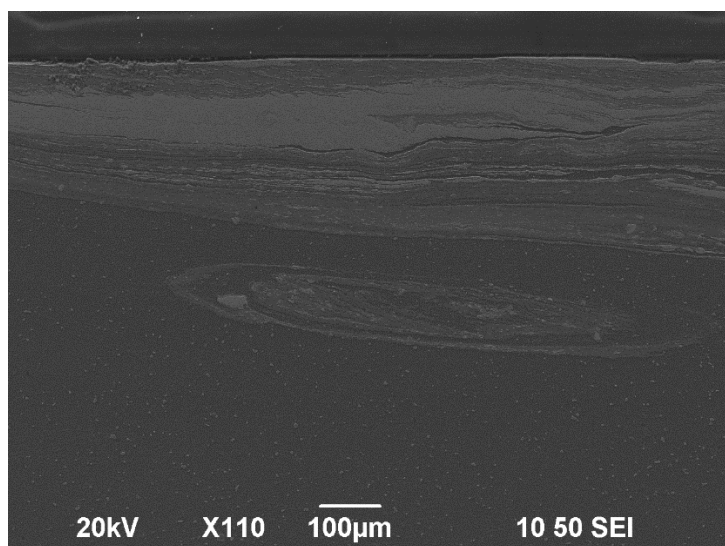


(A)

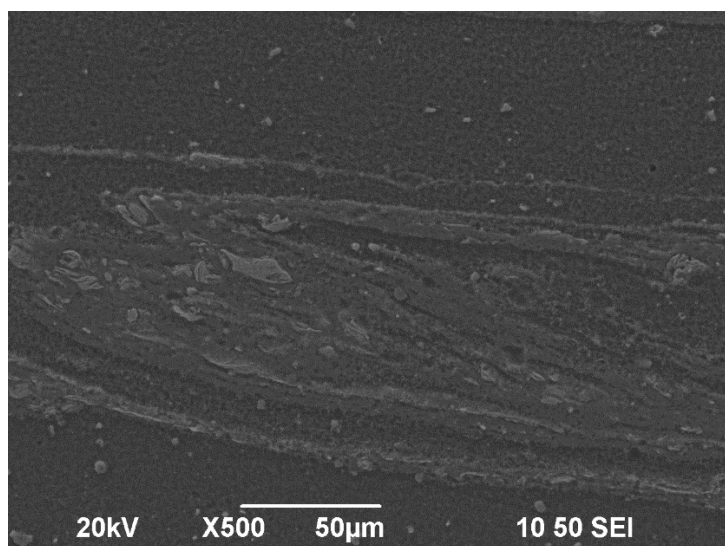


(B)

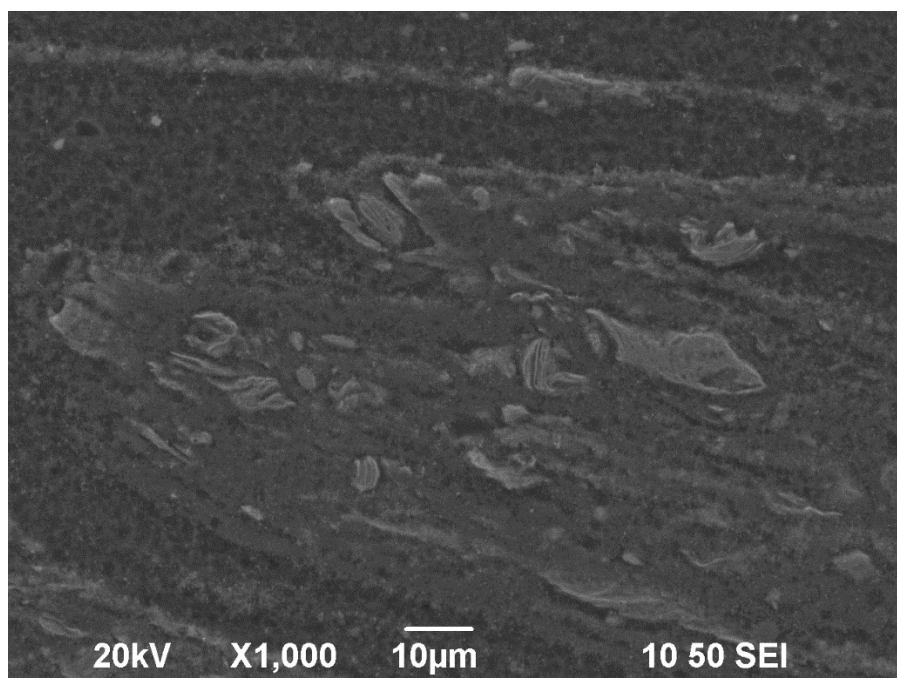
Διάγραμμα 4-8: Κατανομή μικροσκληρότητας δοκιμίου Δ κατά το διάμηκες (A) και κατά το εγκάσιο (B)



(A)



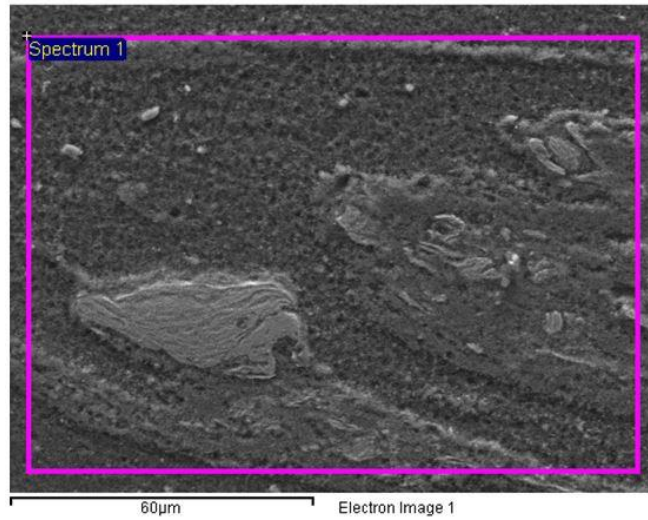
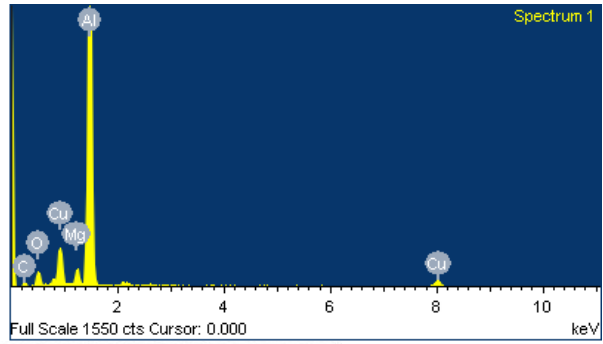
(B)



(Γ)

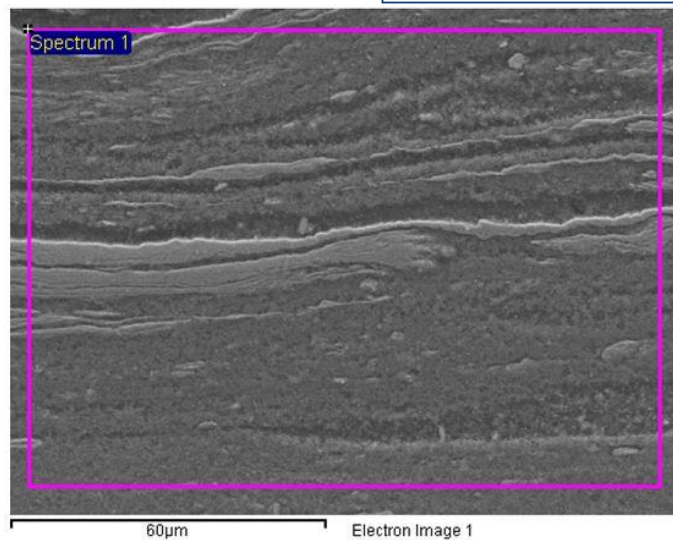
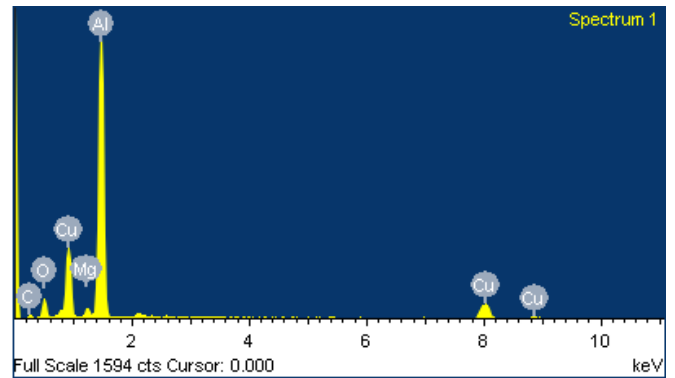
Εικόνα 4-53 Μικρογραφία pugget μέσω του SEM. Λήψη μικροδομής στο κέντρο του δοκιμίου (A) x110. Ενδότερη μελέτη του pugget και των rings (B) x500. Λήψη στο εσωτερικό των rings. Σωματίδια χαλκού εμφανίζονται σχηματισμένα στο εσωτερικό (με ανοιχτή απόχρωση ο χαλκός)

Element	Weight%	Atomic%
C K	12.22	22.96
O K	13.88	19.58
Mg K	2.76	2.56
Al K	61.58	51.51
Cu K	9.56	3.40
Totals	100.00	



Εικόνα 4-54 Χημική ανάλυση στην περιοχή των rings

Element	Weight%	Atomic%
C K	9.31	19.40
O K	13.11	20.50
Mg K	1.62	1.67
Al K	53.41	49.54
Cu K	22.55	8.88
Totals	100.00	



Εικόνα 4-55 Χημική ανάλυση στην περιοχή αναμειγνότητας κοντά στην επιφάνεια

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας ήταν η βελτιστοποίηση της συγκόλλησης Al-Cu, η μελέτη και ο έλεγχος της μικροδομής των παραγόμενων δοκιμίων καθώς επίσης και η ομοιόμορφη κραμάτωση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος Al-Cu. Το κράμα αλουμινίου AA5083-H111 και ο καθαρός χαλκός συγκολλήθηκαν σε διάταξη Lap Joint. Τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται παρακάτω :

1. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν δύο πιθανές βέλτιστες συνθήκες για την συγκόλληση μεταξύ των δύο υλικών. Και οι δύο πραγματοποιούνται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής 1000 rpm , ενώ οι τιμές της ταχύτητας πρόωσης είναι 21 mm/min (Δοκίμιο Β) και 13 mm/min (Δοκίμιο Δ) αντίστοιχα.
2. Οι περισσότερες από τις συγκολλήσεις του πρώτου μέρους κρίθηκαν ως ανεπιτυχείς. Ωστόσο, σε δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα κρίθηκε ικανοποιητικό καθώς υπάρχει ανάμιξη των υλικών, σε αρκετά καλό βάθος, καθώς σωματίδια χαλκού φαίνονται στο εσωτερικό του αλουμινίου.
3. Η μικροσκληρότητα αποκτά μεγαλύτερες τιμές στις συνθήκες με τις οποίες συγκολλήθηκαν τα Δοκίμια Β (1000/21/3°) και Δ (1000/13/3°).
4. Το κυριότερο ελάττωμα που εμφανίζεται στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι το flash.
5. Όσο ο λόγος ω/v μικραίνει, η πιθανότητα επιτυχούς συγκόλλησης μειώνεται. Η μεγάλη ταχύτητα πρόωσης δυσχεραίνει την ανάμιξη των υλικών και δε συντελεί σε καλής ποιότητας συγκόλληση.
6. Η μικρή ταχύτητα περιστροφής δεν προσδίδει στα υλικά την κατάλληλη θερμότητα ενώ ταυτόχρονα κάνει το flash πιο έντονο.
7. Κατά τη διαδικασία των συγκολλήσεων των δύο υλικών, στο εργαλείο συγκόλλησης προσκολούνταν υλικό, είτε αλουμίνιο είτε μίγμα Al-Cu, γεγονός που συντελούσε στο τέλος της ραφής να μην υπάρχει πάντα ικανοποιητική ανάμιξη. Γι' αυτόν τον λόγο τα δοκίμια μελετήθηκαν όσο το δυνατόν πιο κοντά στην έναρξη της ραφής.
8. Η προσαρμογή της διάταξης που ενισχύει την κάθετη στήριξη των ελασμάτων μειώνει αισθητά την παρουσία ελαττωμάτων, πχ flash, βοηθάει την ανάμιξη των υλικών σε μεγαλύτερο βάθος και σε μεγαλύτερη ποσότητα και οπτικά συντελεί σε καλύτερη ραφή.

9. Η κλίση του εργαλείου στη γωνία των 3° έδωσε πολύ πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις περιπτώσεις που κυμαινόταν από 0° έως 1° .
10. Η μικροσκληρότητα αποκτά μεγαλύτερες τιμές κατά τις συνθήκες που ορίζονται από τα Δοκίμια Β (1000/21/ 3°) και Δ (1000/13/ 3°).
11. Η έξοδος του πείρου από την επιφάνεια συγκόλλησης πάντα προκαλεί την δημιουργία τρύπας στο πέρας της συγκόλλησης, ασχέτως από την ταχύτητα απομάκρυνσης του εργαλείου.
12. Στις περιοχές που εξετάστηκαν με EDS, βρέθηκε πως επί των πλείστων υφίσταται στερεό διάλυμα. Στο Δοκίμιο Β, ωστόσο βρίσκονται ενώσεις μεταξύ Al:Cu φάσης η (AlCu).
13. Η εμφάνιση διμεταλλικών ενώσεων Al:Cu εντοπίζεται μόνο στο Δοκίμιο Β. Ταυτόχρονα η μακροδομή και η μικροδομή αυτού του δοκιμίου είναι σαφώς πιο καθαρή και πιο κοντά σε άρτιο αποτέλεσμα απ' ότι τα υπόλοιπα. Συνεπώς οι συνθήκες που χαρακτηρίζουν το Δοκίμιο Β προτείνονται ως βέλτιστες. Στις 1000 rpm, με ταχύτητα 21 mm/min και γωνία κλίσης 3° δύναται το βέλτιστο αποτέλεσμα.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

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

- Μελέτη της συγκόλλησης ως προς το μέγεθος της τιμής της αξονικής κάθετης δύναμης του εργαλείου συγκόλλησης
- Μελέτη και παρακολούθηση του εύρους της θερμικής παροχής κατά τη συγκόλληση. Παρακολούθηση είτε μέσω καμερών CCD είτε με χρήση θερμοστοιχείων
- Αξιολόγηση των συγκολλήσεων ως προς τις μηχανικές ιδιότητές τους (εφελκυσμός, κόπωση)
- Μελέτη της συγκόλλησης με έλασμα χαλκού μεγαλύτερου πάχους
- Πιθανή συγκόλληση τύπου sandwich, με το έλασμα χαλκού στη μέση και με εργαλείο συγκόλλησης με σπείρωμα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P. and Dawes, C.J. (1991) International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8.
- [2] Cary H.B., Helzer S.C., “Modern Welding Technology”, Pearson Prentice Hall, 6th edition, USA, 2005
- [3] Διδακτορική Διατριβή «Μελέτη δημιουργίας συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κραμάτων αλουμινίου ενισχυμένων με κεραμικά νανοσωματίδια», Καρακίζης Παναγιώτης, 2018
- [4] Διδακτορική Διατριβή «Μελέτη της συγκόλλησης διά τριβής με ανάδευση ομοίων και ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, με έμφαση στην επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες», Δανιόλος Νικόλαος, Αθήνα Ιούνιος, 2017
- [5] Friction stir welding of aluminum – copper, Dagur Ingi Ólafsson, Dissertation for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Aalto University, Espoo 2017
- [6] Effect of SiC and TiC nanoparticle reinforcement on the microstructure, microhardness, and tensile performance of AA6082-T6 friction stir welds The International Journal of Advanced Manufacturing Technology April 2018, Volume 95, Issue 9–12, pp 3823–3837
- [7] Zhao J., Jiang F., Jian H., Wen K., Jiang L., Chen X. (2010). Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al–Mg–Sc alloy plates, *Materials and Design*, 31, 306–311
- [8] Rajakumar S., Balasubramanian V., Razaalrose A. (2013). Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study, *Materials and Design*, 49, 267–278.
- [9] Padmanaban G., Balasubramanian V. (2011). Metallurgical characterization of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints, *Materials Chemistry and Physics*, 125, 686–697
- [10] Moreira P.M.G.P., de Figueiredo M.A.V., de Castro P.M.S.T. (2007). Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 48, 169–177
- [11] Maggolino S., Schmid C. (2008). Corrosion resistance in FSW and in MIG welding techniques of AA6XXX, *Journal of Materials Processing Technology*, 197, 237–240.
- [12] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, “Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2007
- [13] Aydın H., Bayram A., Durgun I. (2010). The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints. *Materials and Design*, 31, 2568–2577
- [14] Hatamleha O., Hill M., Forth S., Garcia D. (2009). Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints at elevated and cryogenic temperatures. *Materials Science and Engineering A*, 519, 61–69

- [15] Fratini L., Buffa G., Shivpuri R. (2010). Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints, *Acta Materialia*, 58, 2056–2067
- [16] Fuller C., Mahoney M., Calabrese M., Micono L. (2010). Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds, *Materials Science and Engineering A*, 527, 2233–2240
- [17] Mishra R.S., Ma Z.Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R*, 50, 1–78
- [18] Dressler U., Biallas G., Mercado U. A. (2009). Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3, *Materials Science and Engineering A*, 526, 113–117.
- [19] Mishra R. S., Mahoney M. W. (2007). *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, Materials Park, Ohio
- [20] Salari E., Jahazi M., Khodabandeh A., Ghasemi-Nanesa H. (2014). Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets, *Materials and Design*, 58, 381–389
- [21] Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023
- [22] Διπλωματική Εργασία « Μελέτη της διάδοσης των ρωγμών σε ενισχυμένα και υβριδικά ελάσματα κραμάτων αλουμινίου μέσω δοκιμών σε συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού μικρής κλίμακας (CT)», Αθανασάτος Ιωάννης, 2009
- [23] M.F.X. MUTHU and V. JAYABALAN, "Effect of pin profile and process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al–Cu joints," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 26, no. 4, pp. 984-993 2016
- [24] Silicon Carbide: The Return of an Old Friend By: Nicholas G. Wright*, Alton B. Horsfall, *Material Matters Volume 4 Article 2*
- [25] Low-Temperature Elastic Properties of ZrC and TiC *Journal of Applied Physics* 37, 3778 (1966), Roger Chang and L. J. Graham
- [26] Recrystallization mechanisms in 5251-H14 and 5251-O aluminum friction stir welds. A.L. Etter, T. Baudin, N. Fredj, R. Penelle. *Materials Science and Engineering A* 445–446 (2007) 94–99
- [27] K. Huang, «A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials,» *Materials & Design*, pp. 548-574, 5 December 2016
- [28] G. Henshall, «Dynamic restoration mechanisms in Al-5.8 At. Pct Mg deformed to large strains in the solute drag regime,» *Metallurgical Transactions A*, pp. 881-889, March 1992
- [29] ASM Metals HandBook Volume 09 - Metallography and Microstructures
- [30] Δημήτρης Ι. Παντελής, Γρηγόρης Δ. Χρυσουλάκης, «Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών (2η έκδοση)», Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008

