



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Συγκόλληση με Δέσμη Laser (Yb: YAG) Επικαλυπτόμενων
Ελασμάτων (Lap Joints) Κραμάτων Αλουμινίου 5754 και 6063**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επαμεινώνδας Ε. Κάτσικας

Επιβλέπων Καθηγητής: Τσακιρίδης Πέτρος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

**Συγκόλληση με Δέσμη Laser (Yb: YAG) Επικαλυπτόμενων
Ελασμάτων (Lap Joints) Κραμάτων Αλουμινίου 5754 και 6063**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επαμεινώνδας Ε. Κάτσικας

Επιβλέπων Καθηγητής: Τσακιρίδης Πέτρος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Π. Τσακιρίδης, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Σ. Δεληγιάννης, Ε.Δι.Π. Ε.Μ.Π. (Υπογραφή)

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών σε συνεργασία με τον Όμιλο Sunlight, που εδρεύει στην Ξάνθη και ειδικεύεται στην ανάπτυξη, παραγωγή και διανομή μπαταριών μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της συγκόλλησης με δέσμη Laser ανομοιογενών κραμάτων αλουμινίου 5754 και 6063. Πιο συγκεκριμένα, εστιάζει στις διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης αυτών των συγκεκριμένων κραμάτων και συγκρίνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πέτρο Τσακιρίδη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, για την άριστη επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας και για την βοήθεια που μου παρείχε σε οτιδήποτε χρειάστηκα.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την Διδακτορική Φοιτήτρια Δήμητρα Ιωαννίδου για την αρωγή που έλαβα σε όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας, για τις συμβουλές που μου έδωσε σχετικά με τη συγγραφή της παρούσας εργασίας και για την άψογη επικοινωνία που είχαμε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μεταλλειολόγο-Μεταλλουργό Μηχανικό Τάσο Κλάδη, που με καθοδήγησε, βοήθησε, συμβούλεψε κατά την παραμονή μου στην Ξάνθη και με τον οποίο πραγματοποιήσαμε τις συγκολλήσεις στον όμιλο Sunlight.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετάει τη συγκόλληση με δέσμη laser κραμάτων αλουμινίου AA5754 και AA6063 και πιο συγκεκριμένα μελετά την επίδραση μίας βασικής παραμέτρου στις συγκολλήσεις με δέσμη laser που δεν είναι άλλη από την ισχύ του laser. Πιο ειδικά, μελετάει τη συγκόλληση κράματος αλουμινίου AA5754 με κράμα AA6063 με ισχύ δέσμης laser 3500W και 3000W με σκοπό την παρατήρηση της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκολλημένων δοκιμίων. Η μικροδομή των μετάλλων, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη και η ζώνη τήξης παρατηρήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο, υπό πολωμένο και μη πολωμένο φως καθώς και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η κρυσταλλική δομή εκτιμήθηκε με την περίθλαση ακτίνων X. Οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων μελετήθηκαν με τη μέτρηση της σκληρότητας Vickers καθώς και με τη δοκιμή του εφελκυσμού. Τέλος, οι θραυσιγενείς επιφάνειες παρατηρήθηκαν στο στερεοσκόπιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως με την αύξηση της ισχύος του laser παρατηρείται πιο έντονο πορώδες, μεγαλύτερες ρωγμές και μεγαλύτερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Οι παραπάνω, όμως, ενδείξεις δεν συνδυάστηκαν και με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες καθώς τα κράματα που συγκολλήθηκαν με μεγαλύτερη ισχύ laser εμφάνισαν μεγαλύτερο όριο θραύσης.

ABSTRACT

This work studies laser beam welding of aluminum alloys AA5754 and AA6063 and more specifically studies the effect of a key parameter in laser beam welding which is none other than laser power. More specifically, this work studies the welding of aluminum alloy AA5754 with alloy AA6063 with laser beam power of 3500W and 3000W in order to observe the microstructure and mechanical properties of the welded specimens. The microstructure of the metals, the heat affected zone and the fusion zone were observed in the light optical microscope (LOM), under polarized and unpolarized light as well as in the scanning electron microscope (SEM). The crystal structure was assessed by X-ray diffraction (XRD). The mechanical properties of the welded specimens were studied by measuring Vickers hardness as well as tensile testing. Finally, the fracture surfaces were observed in the stereoscope. The results showed that increasing the laser power, more intense porosity, larger cracks and a larger heat affected zone are observed. However, the above indications were not combined with reduced mechanical properties as the alloys welded with higher laser power showed a higher tensile strength.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	1
1.1 Η εφεύρεση του λέιζερ.....	1
1.1.1 Είδη Laser	1
1.1.1.1 Το CO ₂ Laser	1
1.1.1.2 Το Diode Laser	2
1.1.1.3 Το YAG-Nd ³⁺ Laser	2
1.1.1.4 Το Excimer Laser.....	2
1.1.1.5 Ευρύτερη βιομηχανική χρήση	3
1.2 Συγκόλληση με δέσμη Laser (Laser Beam Welding – LBW).....	4
1.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκόλληση με δέσμη λέιζερ.....	5
1.2.1.1 Ισχύς δέσμης λέιζερ	5
1.2.1.2 Διάμετρος δέσμης λέιζερ.....	5
1.2.1.3 Απορροφητικότητα του υλικού που συγκολλείται	5
1.2.1.4 Ταχύτητα δέσμης λέιζερ.....	6
1.2.2 Αρχή λειτουργίας.....	6
1.2.3 Μηχανισμοί συγκόλλησης	8
1.2.3.1 Συγκόλληση laser με αγωγή (conduction).....	8
1.2.3.2 Συγκόλληση laser με δημιουργία ‘κλειδαρότρυπας’ (keyhole).....	9
1.2.4 Πλεονεκτήματα συγκολλήσεων με laser	10
1.2.5 Μειονεκτήματα συγκολλήσεων με laser	10
1.2.6 Εφαρμογές συγκολλήσεων με laser.....	11
1.3 Το αλουμίνιο.....	12
1.3.1 Ιδιότητες σχετικές με τις συγκολλήσεις αλουμινίου	13
1.4 Τα κράματα αλουμινίου και οι κατηγορίες τους	15
1.4.1 Το σύστημα αρίθμησης.....	16
1.4.1.1 Τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου	16
1.4.1.2 Τα κράματα χύτευσης αλουμινίου	16
1.4.2 Εργοσκληρυνόμενα κράματα αλουμινίου	17
1.4.2.1 Κράματα αλουμινίου σειράς 1000	17
1.4.2.2 Κράματα αλουμινίου σειράς 3000	18
1.4.2.3 Κράματα αλουμινίου σειράς 5000	18

1.4.3	Θερμοσκληρυνόμενα Κράματα Αλουμινίου	18
1.4.3.1	Κράματα αλουμινίου σειράς 2000	19
1.4.3.2	Κράματα αλουμινίου σειράς 6000	19
1.4.3.3	Κράματα αλουμινίου σειράς 7000	20
1.4.4	Κράματα ειδικών θερμικών κατεργασιών	21
1.4.4.1	Σύστημα για εργοσκληρυνόμενα προϊόντα (μη επιδεχόμενα θερμική κατεργασία)	22
1.4.4.2	Σύστημα για κράματα επιδεχόμενα θερμική κατεργασία	22
1.4.5	Κράμα αλουμινίου AA5754.....	23
1.4.6	Κράμα αλουμινίου AA6063.....	23
1.4.7	Συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου	24
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	25
2.1	Περιγραφή υλικού.....	25
2.1.1	Χημική ανάλυση AA5754 και AA6063	25
2.1.2	Μηχανικές ιδιότητες AA5754 και AA6063.....	25
2.2	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	27
2.2.1	Παράμετροι της συγκόλλησης	28
2.3	Προετοιμασία δοκιμών	30
2.3.1	Κοπή	30
2.3.2	Εγκιβωτισμός	32
2.3.3	Λείανση.....	32
2.3.4	Στύλβωση.....	33
2.3.5	Χημική προσβολή.....	34
2.4	Μελέτη μικροδομής	35
2.4.1	Οπτική μικροσκοπία.....	35
2.4.2	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	36
2.4.3	Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD).....	39
2.5	Αξιολόγηση μηχανικών ιδιοτήτων	40
2.5.1	Μικροκληρομέτρηση Vickers	41
2.5.2	Δοκιμές εφελκυσμού	42
2.6	Παρατήρηση δειγμάτων στο στερεοσκόπιο	46
3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	47
3.1	Οπτική μικροσκοπία	47

3.1.1 Δοκίμιο A (P = 3500W).....	47
3.1.1.1 Μικρογραφίες σε μη πολωμένο φως.....	47
3.1.1.2 Μικρογραφίες σε πολωμένο φως.....	49
3.1.2 Δοκίμιο B (P = 3000W).....	51
3.1.2.1 Μικρογραφίες σε μη πολωμένο φως.....	51
3.1.2.2 Μικρογραφίες σε πολωμένο φως.....	53
3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης	55
3.2.1 Δοκίμιο A (P = 3500W).....	55
3.2.2 Δοκίμιο B (P = 3000W).....	60
3.3 Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD)	66
3.4 Σκληρομέτρηση Vickers	68
3.5 Δοκιμή εφελκυσμού.....	69
3.6 Στερεοσκόπιο.....	72
3.6.1 Δοκίμιο A (P = 3500W).....	72
3.6.2 Δοκίμιο B (P = 3000W).....	74
4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	76
4.1 Οπτική μικροσκοπία	76
4.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης	77
4.3 Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD)	77
4.4 Σκληρομέτρηση Vickers	78
4.5 Δοκιμή εφελκυσμού.....	78
4.6 Στερεοσκόπιο.....	79
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	80
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Τα χαρακτηριστικά των βασικών ειδών Laser [4]	3
Πίνακας 2 : Κύρια στοιχεία κραμάτωσης διαμόρφωσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών [4]	16
Πίνακας 3 : Κύρια στοιχεία κραμάτωσης κραμάτων χύτευσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών [4]	17
Πίνακας 4 : Ονομαστική σύσταση κραμάτων αλουμινίου AA5754 και AA6063	25
Πίνακας 5 : Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου AA5754 και AA6063	25
Πίνακας 6 : Παράμετροι των συγκολλήσεων	28
Πίνακας 7 : Χρόνος προσβολής δοκιμίων	35

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Συγκόλληση με λέιζερ αμαξώματος αυτοκινήτου [1]	4
Εικόνα 2 : Ταχύτητα – Ισχύς Δέσμης[10]	6
Εικόνα 3 : Διάταξη ενός laser [4]	7
Εικόνα 4 : Συγκόλληση laser με αγωγή (conduction)[4]	8
Εικόνα 5 : Συγκόλληση laser με δημιουργία ‘κλειδαρότρυπας’ (keyhole)[1]	9
Εικόνα 6 : Εφαρμογή συγκολλημένων με δέσμη laser δομών στην αεροναυπηγική βιομηχανία [15]	12
Εικόνα 7 : Κράμα AA5754 πριν τη συγκόλληση	26
Εικόνα 8 : Κράμα AA6063 πριν τη συγκόλληση	26
Εικόνα 9 : Η θέση των ελασμάτων κατά τη συγκόλληση	27
Εικόνα 10 : Συγκολλημένα δοκίμια A και B	28
Εικόνα 11 : Συγκολλημένα δοκίμια A	29
Εικόνα 12 : Συγκολλημένα δοκίμια B	29
Εικόνα 13 : Δισκοτόμος Struers	30
Εικόνα 14 : Δοκίμια μετά την κοπή	31
Εικόνα 15 : Σημείο συγκόλλησης κομμένων δοκιμίων	31
Εικόνα 16 : Τα δοκίμια μέσα στα καλούπια με τη ρητίνη	32
Εικόνα 17 : Όργανο λείανσης και στίλβωσης της Stuers	34
Εικόνα 18 : Εξαρτήματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [38]	37
Εικόνα 19 : Διάταξη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [38]	38
Εικόνα 20 : Απεικόνιση της περίθλασης ακτίνων X στα κρυσταλλικά επίπεδα [45]	40
Εικόνα 21 : Σκληρομέτρηση με τη μέθοδο Vickers [46]	41
Εικόνα 22 : Μικροσκληρόμετρο Vickers HV-1000Z	42
Εικόνα 23 : Εξαρτήματα μηχανής δοκιμών [48]	43
Εικόνα 24 : Αναπαράσταση ασκούμενων δυνάμεων κατά τον εφελκυσμό[48]	44
Εικόνα 25 : Σύστημα δοκιμής εφελκυσμού	44
Εικόνα 26 : Μηχανή εφελκυσμού Instron 4482	45
Εικόνα 27 : Συγκολλημένα ελάσματα στη μηχανή εφελκυσμού	45
Εικόνα 28 : Στερεοσκόπιο ZEISS STEMI DV4	46
Εικόνα 29 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη	47
Εικόνα 30 : Ζώνη τήξης	48
Εικόνα 31 : Μικροδομή κράματος 5754	48

Εικόνα 32 : Μικροδομή κράματος 6063 _____	48
Εικόνα 33 : Θερμικά επηρεασμένη ζώνη _____	49
Εικόνα 34 : Ζώνη τήξης _____	49
Εικόνα 35 : Μικροδομή κράματος 5754 _____	50
Εικόνα 36 : Μικροδομή κράματος 6063 _____	50
Εικόνα 37 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη _____	51
Εικόνα 38 : Ζώνη τήξης _____	51
Εικόνα 39 : Μικροδομή κράματος 5754 _____	52
Εικόνα 40 : Μικροδομή κράματος 6063 _____	52
Εικόνα 41 : Θερμικά επηρεασμένη ζώνη _____	53
Εικόνα 42 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη _____	53
Εικόνα 43 : Μικροδομή κράματος 5754 _____	54
Εικόνα 44 : Μικροδομή κράματος 6063 _____	54
Εικόνα 45 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου. _____	55
Εικόνα 46 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου. _____	56
Εικόνα 47 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Πορώδες στη ζώνη τήξης _____	56
Εικόνα 48 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Μικρορωγμές στη ζώνη τήξης _____	57
Εικόνα 49 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Δενδριτική ανάπτυξη στη ζώνη τήξης _____	57
Εικόνα 50 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση. _____	58
Εικόνα 51 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). BM AA6063. Παρουσία ενώσεων AlFeSi _____	59
Εικόνα 52 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου. _____	60
Εικόνα 53 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Μικρορωγμές στη ζώνη τήξης _____	60
Εικόνα 54 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Ζώνη τήξης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση _____	61

Εικόνα 55 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Ζώνη τήξης _____	61
Εικόνα 56 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση πορώδους. _____	62
Εικόνα 57 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση. _____	63
Εικόνα 58 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση _____	64
Εικόνα 59 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση. _____	65
Εικόνα 60 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για το κράμα 5754 _____	66
Εικόνα 61 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για το κράμα 6063 _____	66
Εικόνα 62 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για τα κράματα και τα συγκολλημένα δοκίμια _____	67
Εικόνα 63 : Μικροσκληρομετρήσεις των συγκολλημένων δειγμάτων με 3500 W (A) and 3000 W (B) _____	68
Εικόνα 64 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του κράματος 5754 _____	69
Εικόνα 65 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του κράματος 6063 _____	69
Εικόνα 66 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του συγκολλημένου δοκιμίου A (P = 3500W) _____	70
Εικόνα 67 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του συγκολλημένου δοκιμίου B (P = 3000W) _____	70
Εικόνα 68 : Συγκριτικές καμπύλες δύναμης – μετατόπισης _____	71
Εικόνα 69 : Θραυστογραφία από το έλασμα 6063 _____	72
Εικόνα 70 : Θραυστογραφία από το έλασμα 5754 _____	72
Εικόνα 71 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Θραυσιγενής επιφάνεια. _____	73
Εικόνα 72 : Θραυστογραφία από το έλασμα 6063 _____	74
Εικόνα 73 : Θραυστογραφία από το έλασμα 5754 _____	74
Εικόνα 74 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Θραυσιγενής επιφάνεια. _____	75

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Η εφεύρεση του λέιζερ

Η εφεύρεση του λέιζερ εντοπίζεται στο πρωτοποριακό έργο που επιτελέστηκε στα ηλεκτρονικά μικροκυμάτων από τον A.L. Schawlow και C.H. Townes στα εργαστήρια Bell το 1958 [1]. Το πρώτο λειτουργικό λέιζερ αναπτύχθηκε το 1960 από τον Theodore Maiman στα Ερευνητικά Εργαστήρια Hughes. Λίγο μετά, τα λέιζερ με βάση το ήλιο και το νέον αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια Bell και ήταν ικανά να λειτουργούν σε υψηλή ισχύ [2]. Τα αρχικά L.A.S.E.R. σημαίνουν: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας) [4]. Χρειάστηκε περισσότερο από μια δεκαετία για την πλήρη κατανόηση και ανάπτυξη των λέιζερ και κατ' επέκταση την αξιοποίηση και την εισαγωγή τους στην αγορά [3].

1.1.1 Είδη Laser

1.1.1.1 Το CO₂ Laser

Το CO₂ Laser είναι το πιο διαδεδομένο είδος laser στη βιομηχανία. Έχει μήκος κύματος 10,6μm (κάποιες φορές και 9,6μm), επομένως η ακτινοβολία του ανήκει στο μακρινό υπέρυθρο. Η απόδοσή του κυμαίνεται από μερικά Watt έως και 25kW, αποδίδει δηλαδή 15% επιπλέον ενέργεια σε σχέση με τα άλλα είδη laser, κάτι που του δίνει οικονομικό προβάδισμα. Το ενεργό μέσο που χρησιμοποιείται είναι μίγμα CO₂ (6% κ.ο.), N₂ (12% κ.ο.) και He (82% κ.ο.). Η άντληση γίνεται με ηλεκτρική εκκένωση (διέγερση μορίων N, και μεταφορά της ενέργειάς τους στα άτομα CO₂). Μπορεί επίσης να λειτουργήσει και παλμικά [4].

1.1.1.2 To Diode Laser

Το Diode Laser είναι ένας τύπος laser ημιαγωγού, ο οποίος λειτουργεί στο ορατό και στο υπέρυθρο (IR) φάσμα. Εκπέμπει συνήθως σε χαμηλά μήκη κύματος μεταξύ 808 και 960nm. Για αυτόν τον λόγο η απορρόφηση της δέσμης είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν του laser CO₂. Αρχικά, η απόδοση των diode lasers ήταν της τάξεως των milliwatts. Στη συνέχεια όμως, με τη χρήση νέων τεχνολογιών, έφτασαν την παροχή ισχύος μερικών kilowatts. Με αυτόν τον τρόπο σήμερα χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις τα High Power Diode Lasers (HPDL). Παρουσιάζουν μεγάλο πλεονέκτημα έναντι των άλλων τύπων laser, καθώς έχουν μικρό μέγεθος και βάρος, μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη αξιοπιστία [4].

1.1.1.3 Το YAG-Nd³⁺ Laser

Το YAG-Nd³⁺ Laser έχει μήκος κύματος 1,06μm, επομένως η ακτινοβολία του ανήκει στο κοντινό υπέρυθρο. Το ιόν του νεοδημίου, Nd³⁺, είναι ένα τρισθενές λανθανίδιο και χρησιμοποιείται ως πρόσμιξη σε κρυστάλλους. Τα αρχικά YAG σημαίνουν Yttrium Aluminium Garnet (γρανάτης υτρίου αλουμινίου). Η ατομική συγκέντρωση του νεοδημίου κυμαίνεται μεταξύ 0,6% και 1,2%. Η ενεργειακή απόδοση αυτού του είδους laser φτάνει το 3% και είναι υψηλότερη από όλα τα laser στερεάς κατάστασης. Λειτουργεί τόσο συνεχώς όσο και παλμικά. Σε συνεχή λειτουργία, η ισχύς του είναι 1-20 W για TEM₀₀ και 10-120 W για εγκάρσιους ρυθμούς ταλάντωσης. Σε παλμική λειτουργία, υπάρχουν δύο ρυθμοί: ο ρυθμός Q-switched, ο οποίος έχει πολύ υψηλή ισχύ (GW) με διάρκεια παλμών: 15-700 ns και ο ρυθμός fixed-Q, ο οποίος έχει μέση ισχύ 400 W και διάρκεια παλμών 0,1-20 ms [4].

1.1.1.4 Το Excimer Laser

Το Excimer Laser έχει πάρει το όνομά του από τις λέξεις: excited + dimers (διεγερμένα διμερή), αφού ως ενεργό μέσο χρησιμοποιεί μίγμα ευγενούς αερίου και αλογόνου (ηλεκτρονικά διεγερμένων αερίων). Η διέγερση πραγματοποιείται με ηλεκτρική εκκένωση (προϊονισμού ή UV). Αρχικά, το είδος αυτό χρησιμοποιήθηκε

για καθαρά ερευνητικές εφαρμογές. Αργότερα, όμως, βρήκε τη θέση του και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Τα excimer laser λειτουργούν μόνο παλμικά [4].

Πίνακας 1 : Τα χαρακτηριστικά των βασικών ειδών Laser [4]

Χαρακτηριστικό	LASER			
	CO ₂	DIODE	YAG – Nd ³⁺	EXCIMER
Μήκος κύματος (μm)	10,6 (μακρινό υπέρυθρο)	0,98 περίπου (κοντινό υπέρυθρο)	1,06 (κοντινό υπέρυθρο)	0,193 – 0,351 (κοντινό υπέρυθρο)
Ενεργό μέσο	αέριο CO ₂	στερεό: ημιαγωγός	παλμικός (συνεχής)	αέριο: διμερή
Τρόπος λειτουργίας	συνεχής (παλμικός)	συνεχής (παλμικός)	παλμικός (συνεχής)	παλμικός
Μέση Ισχύς (W)	100 - 25000	2000 - 10000	10 - 5000	30 - 1000

1.1.1.5 Ευρύτερη βιομηχανική χρήση

Η πλειονότητα των λέιζερ που χρησιμοποιούνται για τις συγκολλήσεις σήμερα είναι είτε λέιζερ στερεάς κατάστασης κρυστάλλων υτρίου-αλουμινίου (YAG) με νεοδήμιο ή υτέρβιο ή CO₂ λέιζερ, που αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια Bell το 1964 [3]. Το Diode Laser και το Excimer Laser χρησιμοποιούνται λιγότερο [4].

1.2 Συγκόλληση με δέσμη Laser (Laser Beam Welding – LBW)

Η συγκόλληση με δέσμη Laser χρησιμοποιεί μία υψηλής πυκνότητας ενέργειας πηγή που ονομάζεται λέιζερ ως πηγή θερμότητας. Η συνεκτική φύση της δέσμης λέιζερ της επιτρέπει να εστιαστεί σε ένα μικρό σημείο, που οδηγεί σε υψηλές πυκνότητες ισχύος $10^5 - 10^8 \text{ W/cm}^2$. Τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η μείωση κινδύνου εμφάνισης παραμορφώσεων και η υψηλή παραγωγικότητα – μεγάλη ευελιξία [4].

Τα λέιζερ έχουν προωθηθεί ως δυνητικά χρήσιμα εργαλεία συγκόλλησης για ποικίλες εφαρμογές. Μέχρι το 1965, μια ποικιλία συστημάτων λέιζερ είχε αναπτυχθεί για την κατασκευή μικροσυγκολλήσεων σε ηλεκτρονικές πλακέτες κυκλωμάτων, μέσα σε σωλήνες κενού και σε άλλες εξειδικευμένες εφαρμογές όπου η συμβατική τεχνολογία δεν ήταν σε θέση να παρέχει αξιόπιστη σύνδεση. Μέχρι τη δεκαετία του 1970 όμως, η συγκόλληση με λέιζερ είχε περιοριστεί σε σχετικά λεπτά υλικά και χαμηλές ταχύτητες, λόγω της περιορισμένης συνεχούς διαθέσιμης ισχύος. Από τότε, η διαθεσιμότητα των λέιζερ που μπορούν να λειτουργούν σε συνεχόμενη υψηλή ισχύ έχει αναπτυχθεί και πλέον χρησιμοποιούνται έντονα στις συγκολλήσεις. Η ικανότητα του λέιζερ να παράγει πυκνότητα ισχύος μεγαλύτερη από 10^6 W/cm^2 είναι πρωταρχικός παράγοντας για τις εκτενείς δυνατότητές του στον τομέα των συγκολλήσεων [5].



Εικόνα 1 : Συγκόλληση με λέιζερ αμαξώματος αυτοκινήτου [1]

1.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκόλληση με δέσμη λέιζερ

Οι κύριοι ανεξάρτητοι παράγοντες διαδικασίας για τη συγκόλληση με λέιζερ περιλαμβάνουν την ισχύ της προσπίπτουσας δέσμης λέιζερ, τη διάμετρο της δέσμης λέιζερ, την απορροφητικότητα του υλικού που συγκολλείται και την ταχύτητα της δέσμης λέιζερ.

1.2.1.1 Ισχύς δέσμης λέιζερ

Το βάθος διείσδυσης με τη συγκόλληση με λέιζερ σχετίζεται άμεσα με την ισχύ πυκνότητας της δέσμης λέιζερ και είναι συνάρτηση της ισχύος της προσπίπτουσας δέσμης και της διαμέτρου της δέσμης. Για σταθερή διάμετρο δέσμης, η διείσδυση τυπικά αυξάνεται όσο αυξάνεται η ισχύς της δέσμης. Η διείσδυση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την προσπίπτουσα ισχύ του λέιζερ [6], [7].

1.2.1.2 Διάμετρος δέσμης λέιζερ

Η διάμετρος δέσμης λέιζερ είναι μία από τις περισσότερο σημαντικές μεταβλητές γιατί καθορίζει την πυκνότητα ισχύος για μια δεδομένη συνολική ισχύ. Η εστιασμένη διάμετρος της δέσμης επηρεάζει επίσης πλάτος συγκόλλησης, το οποίο είναι συχνά σημαντική απαίτηση συγκόλλησης [8].

1.2.1.3 Απορροφητικότητα του υλικού που συγκολλείται

Η αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης με δέσμη λέιζερ εξαρτάται από την απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας από το υλικό που συγκολλείται. Οποιοσδήποτε υπολογισμός μεταφοράς θερμότητας για την επεξεργασία λέιζερ βασίζεται στην ενέργεια που απορροφάται από το υλικό [1].

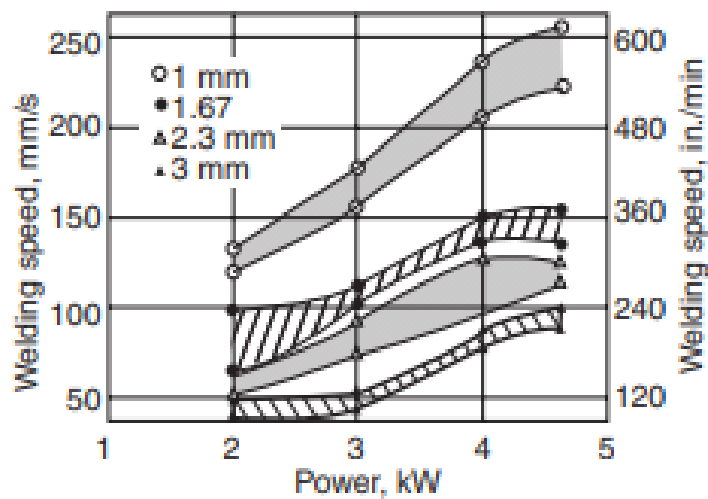
Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ενίσχυση της αρχικής απορρόφησης. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Μη μεταλλικές απορροφητικές επιστρώσεις
- Προθέρμανση

- Τραχύτητα επιφάνειας
- Εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου

1.2.1.4 Ταχύτητα δέσμης λέιζερ

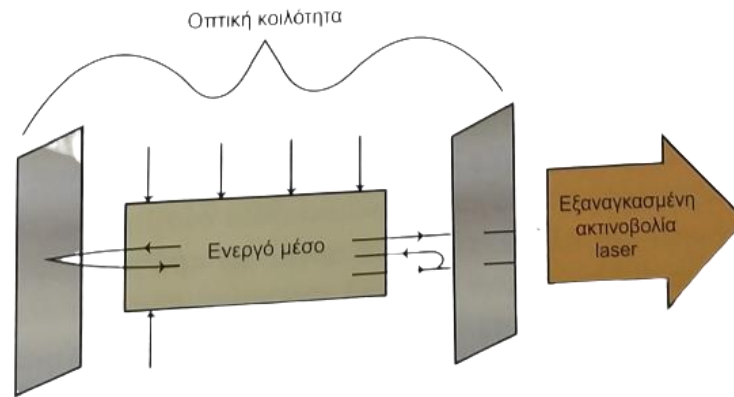
Η ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνεται με αυξανόμενη ισχύ λέιζερ για την παραγωγή σταθερού βάθους διείσδυσης [10].



Εικόνα 2 : Ταχύτητα – Ισχύς Δέσμης [10]

1.2.2 Αρχή λειτουργίας

Τα βασικά στοιχεία ενός laser είναι το ενεργό μέσο, η πηγή άντλησης και η οπτική κοιλότητα.



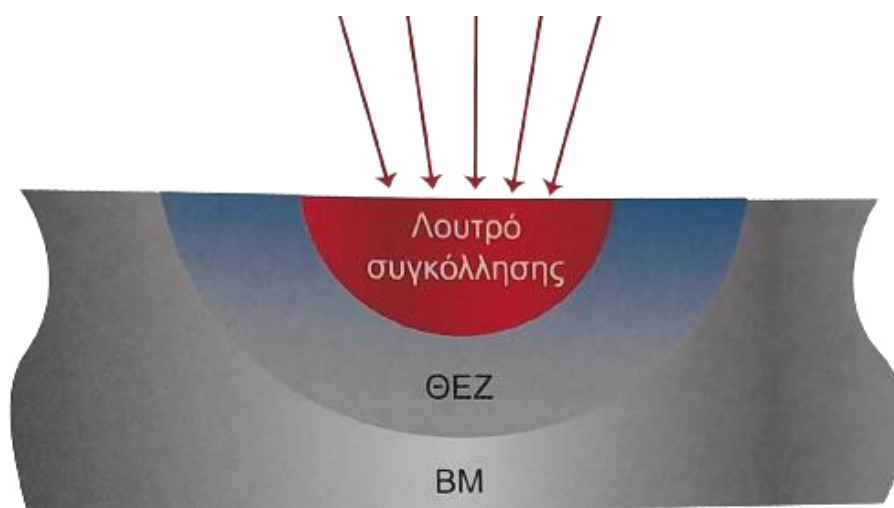
Εικόνα 3 : Διάταξη ενός laser [4]

Το ενεργό μέσο είναι το μέσο μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η εκπομπή laser. Βρίσκεται σε στερεά, υγρή ή αέρια κατάσταση. Η πηγή άντλησης είναι μία εξωτερική πηγή ενέργειας, η οποία διεγείρει τα άτομα. Οι μέθοδοι διέγερσης, που χρησιμοποιούνται, είναι πολλές: οπτική, ηλεκτρονική, θερμική, χημική, με βαρέα στοιχεία, με ιονίζουσες ακτινοβολίες, κ.α. Η οπτική κοιλότητα αποτελείται από δύο κάτοπτρα εκ των οποίων το ένα είναι ημιπερατό (επιτρέπει κάποιο ποσοστό ακτινοβολίας να εξέλθει και το υπόλοιπο ποσοστό το ανακλά μέσα στο ενεργό μέσο) [4].

1.2.3 Μηχανισμοί συγκόλλησης

1.2.3.1 Συγκόλληση laser με αγωγή (conduction)

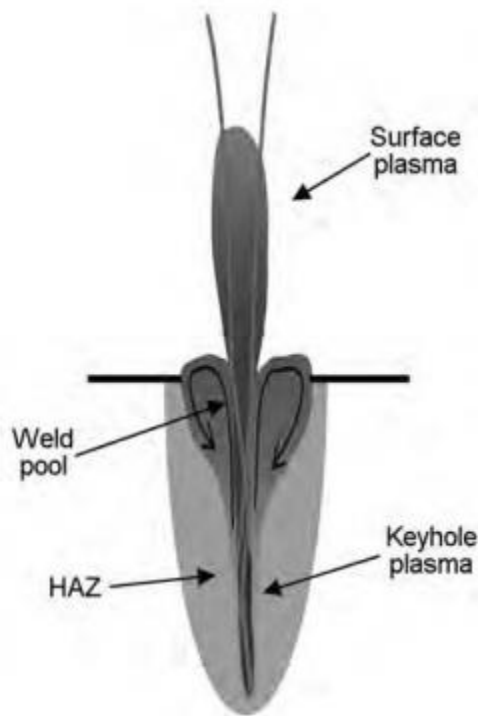
Ο μηχανισμός συγκόλλησης με αγωγή λαμβάνει χώρα συνήθως σε συγκολλήσεις σχετικά χαμηλής πυκνότητας ισχύος και σε πολλές περιπτώσεις όταν η προσπίπτουσα δέσμη έχει σχετικά μεγάλη διάμετρο. Τότε, η δέσμη του laser αλληλεπιδρά μόνο με την επιφάνεια του προς συγκόλληση τεμαχίου. Η προσδιδόμενη ενέργεια μεταφέρεται από τα άτομα της επιφάνειας προς το εσωτερικό του υλικού μέσω αγωγής και προκαλεί τήξη μιας επιφανειακής στοιβάδας (λουτρό συγκόλλησης), καθώς και τη δημιουργία μιας θερμικά επηρεασμένης ζώνης κάτω από αυτήν. Το προφίλ (ύστερα από τομή) μίας τέτοιας συγκόλλησης έχει σχήμα οβάλ και η διείδυση είναι μικρού βάθους και εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και το ρυθμό μεταφοράς της ενέργειας [4].



Εικόνα 4 : Συγκόλληση laser με αγωγή (conduction)[4]

1.2.3.2 Συγκόλληση laser με δημιουργία ‘κλειδαρότρυπας’ (keyhole)

Ο μηχανισμός συγκόλλησης με δημιουργία ‘κλειδαρότρυπας’ λαμβάνει χώρα όταν η προσδιδόμενη ενέργεια από το laser είναι υψηλής πυκνότητας ισχύος. Τότε, η δέσμη του laser θερμαίνει ταχύτατα το υλικό, το τήκει και δημιουργεί στο κέντρο του λουτρού συγκόλλησης μία «μαύρη οπή» (κλειδαρότρυπα), όπου το τηγμένο μέταλλο αρχίζει να εξαχνώνεται. Η εξάχνωση αυτή του τηγμένου μετάλλου διατηρεί την οπή ανοικτή καθ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η παρουσία της ‘κλειδαρότρυπας’ επιτρέπει στην ενέργεια να φτάσει βαθύτερα εντός του υλικού, επομένως σε αυτήν την περίπτωση το προφίλ της συγκόλλησης έχει μεγάλη αναλογία βάρους προς πλάτους [12].



Εικόνα 5 : Συγκόλληση laser με δημιουργία ‘κλειδαρότρυπας’ (keyhole)[1]

1.2.4 Πλεονεκτήματα συγκολλήσεων με laser

- Υψηλή πυκνότητα ενέργειας με κατάλληλη εστίαση της δέσμης.
- Πολύ μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη, λόγω της εστίασης της δέσμης σε πολύ μικρή περιοχή.
- Σημαντική μείωση παραμορφώσεων.
- Δυνατότητα επίτευξης στενών συγκολλήσεων ακριβείας (ως προς τη θέση, τη διάμετρο και τη διεύθυνση). Σαν αποτέλεσμα, τα συγκολλημένα τεμάχια είναι πολύ καλής ποιότητας, χωρίς εσωτερικές ατέλειες.
- Οι πολλαπλές παράμετροι, που επηρεάζουν την αυτογενή συγκόλληση με laser, διασφαλίζουν καλή μηχανική αντοχή, όχι κατώτερη από αυτήν του μετάλλου βάσης.
- Για την ολοκλήρωση μίας επιτυχούς συγκόλλησης απαιτούνται λιγότερα περάσματα και πρόσβαση από τη μία μόνο πλευρά.
- Δυνατότητα πραγματοποίησης συγκολλήσεων σε προστατευτική ατμόσφαιρα.
- Δεν απαιτείται η χρήση ηλεκτροδίου ή μετάλλου προσθήκης.
- Συγκόλληση χωρίς επαφή, κατάλληλη και για σύνθετες κατασκευές. Ικανότητα συγκόλλησης σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από το υλικό (με τη βοήθεια κατόπτρων ή οπτικών ινών).
- Γρήγορες συγκολλήσεις με δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης.
- Εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ελέγχου της διαδικασίας συγκόλλησης. Αύξηση επιπέδου αξιοπιστίας και τελικής ποιότητας συγκολλήσεων.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε διάφορες θέσεις [4], [11]

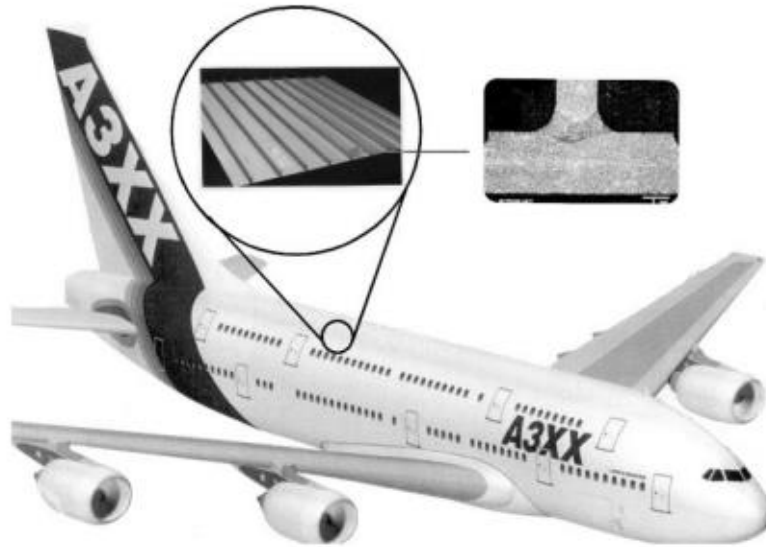
1.2.5 Μειονεκτήματα συγκολλήσεων με laser

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού.
- Πολύ σημαντική η ακριβής τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των προς συγκόλληση τεμαχίων, καθώς η διάμετρος του σημείου εστίασης της δέσμης κυμαίνεται τυπικά από 100 έως 1000μm. Καμία ανοχή σε κενά μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων, εκτός και εάν χρησιμοποιείται μέταλλο/υλικό πλήρωσης.
- Περιορισμένοι προμηθευτές κατάλληλων laser υψηλής ισχύος.

- Λήψη μέτρων ασφαλείας κατά την έκθεση στη δέσμη laser.
- Περιορισμός φορητότητας.
- Μικρό βάθος διείσδυσης σε χαμηλές πυκνότητες ενέργειας.
- Μικρότερο βάθος διείσδυσης σε σχέση με τη δέσμη ηλεκτρονίων.
- Χαμηλή ενεργειακή απόδοση (τυπική απόδοση μεταξύ 3 και 40%, ανάλογα με τον τύπο του laser) [4], [11]

1.2.6 Εφαρμογές συγκολλήσεων με laser

Η μέθοδος παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα και αυτοματοποιείται εύκολα. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά την καθιστούν μια εξαιρετική επιλογή για διεργασίες υψηλής παραγωγικότητας σε όλους σχεδόν τους τύπους των κατασκευαστικών βιομηχανιών. Συναντάται σε εφαρμογές αεροδιαστημικής, αυτοκινητοβιομηχανίας [14], ναυπηγικής, ηλεκτρονικών και γενικά διαφόρων καταναλωτικών αγαθών. Μερικά από τα πολλά παραδείγματα συγκόλλησης με laser, αποτελούν οι συγκολλήσεις ηλεκτρονικών εφαρμογών (π.χ. συγκολλήσεις ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε ηλεκτρονικές πλακέτες), οι συγκολλήσεις διαφόρων δομικών/κατασκευαστικών στοιχείων (π.χ. συγκολλήσεις σωλήνων δικτύων από ανοξείδωτο χάλυβα, συγκολλήσεις στοιχείων αυτοκινήτων και ναυπηγικών ελασμάτων), οι συγκολλήσεις διαφόρων εξαρτημάτων (π.χ. συγκολλήσεις στοιχείων κινητήρα) και οι μικρο-συγκολλήσεις (π.χ. συγκολλήσεις θερμοστοιχείων, συγκολλήσεις ακροδεκτών μπαταρίας) [13].



Εικόνα 6 : Εφαρμογή συγκολλημένων με δέσμη laser δομών στην αεροναυπηγική βιομηχανία [15]

1.3 Το αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο στον πλανήτη, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Αποτελεί το 8% της συνολικής μάζας του φλοιού της Γης και είναι το πιο άφθονο μέταλλο σε αυτόν [16], [20]. Είναι ανακυκλώσιμο μέταλλο [17] και η πιο σημαντική πηγή αλουμινίου είναι το πέτρωμα του βωξίτη [18].

Η εμφάνιση της επιφάνειας, το μικρό βάρος, η κατεργασιμότητα, οι έξοχες φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες και η αντοχή του στη διάβρωση το καθιστούν μία φθηνή και ελκυστική λύση για πάρα πολλές εφαρμογές. Η πυκνότητά του είναι $2,7 \text{ g/cm}^3$, δηλαδή περίπου το 1/3 της πυκνότητας του χάλυβα ($7,83 \text{ g/cm}^3$) και του χαλκού ($8,93 \text{ g/cm}^3$) ή του ορειχάλκου ($8,53 \text{ g/cm}^3$) [19].

Τα βασικά του πλεονεκτήματα της ελαφρότητας, της ανθεκτικότητας, της μορφοποίησης, της επιδεκτικότητας σε συγκόλληση, της αγωγιμότητας και της δυνατότητας φινιρίσματος το καθιστούν δημοφιλές σε σχέση με άλλα μέταλλα [20].

Οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες αναπτύσσονται σε μεγάλο εύρος τιμών και είναι αξιοσημείωτο το πόσο ισχυρά μεταβάλλονται από το αλουμίνιο υψηλής

καθαρότητας μέχρι τα σύνθετα κράματά του. Στη διεργασία αυτή παίρνουν μέρος οι γνωστοί μηχανισμοί ισχυροποίησης των μετάλλων [19].

Το αλουμίνιο ανθίσταται στο είδος της προοδευτικής οξειδωσης η οποία προκαλεί τη γνωστή φθορά (μέχρις αστοχίας) στους χάλυβες. Το λεπτό στρώμα του Al_2O_3 (αλούμινα) το οποίο σχηματίζεται με την πρώτη έκθεση της καθαρής επιφάνειας στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο εμποδίζει την προώθηση της οξειδωσης. Ακόμα, το οξειδίο αυτό παρουσιάζει υψηλή πρόσφυση και δεν απομακρύνεται (flake-off), όπως συμβαίνει με τη σιδηρούχο σκουριά [19], [32].

Την ιδιότητα αυτή του οξειδίου του εκμεταλλεύτηκε η τεχνολογική εποχή με την ανάπτυξη της ανοδιώσης, με την οποία επιτυγχάνεται η ανάπτυξη ελεγχόμενου στρώματος Al_2O_3 στην επιφάνεια του μετάλλου με εξαιρετικές διακοσμητικές ιδιότητες. Στην ανοδιωμένη επιφάνεια μπορεί να δοθεί μία ποικιλία χρωματισμών. Η επιφάνειά του παρουσιάζει υψηλές ανακλαστικές ιδιότητες σε μεγάλο εύρος μηκών κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τυπικά παρουσιάζει πολύ υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Εντούτοις έχουν αναπτυχθεί και ειδικά κράματα υψηλού βαθμού ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς κινητήρες υψηλής ροπής. Συχνά επιλέγεται, λόγω της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, η οποία είναι περίπου διπλάσια αυτής του χαλκού για ισοδύναμο βάρος μετάλλου. Η θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων του (περίπου στο 50 έως 60% αυτής του χαλκού) είναι πολλές φορές πλεονεκτική σε εναλλάκτες θερμότητας, σε συσκευές οι οποίες λειτουργούν με ηλεκτρική θέρμανση και σε κεφαλές κινητήρων των αυτοκινήτων [19].

Δεν είναι φερρομαγνητικό και η ιδιότητά του αυτή το καθιστά εφαρμόσιμο στη βιομηχανία ηλεκτρονικών. Δεν είναι πυροφορικό και χρησιμοποιείται στην αποθήκευση ή έκθεση εύφλεκτων υλικών και εκρηκτικών (π.χ. βυτία μεταφοράς κηροζίνης). Δεν είναι τοξικό και χρησιμοποιείται εκτεταμένα από τη βιομηχανία τροφίμων σε εφαρμογές ρουτίνας [19].

1.3.1 Ιδιότητες σχετικές με τις συγκολλήσεις αλουμινίου

Το Al παρουσιάζει ισχυρή χημική συγγένεια προς το οξυγόνο. Οξειδώνεται ταχύτατα προς Al_2O_3 μετά την έκθεσή του στην ατμόσφαιρα, ακόμη και σε συνθήκες

περιβάλλοντος. Θερμικές επεξεργασίες και η υγρασία αυξάνουν το πάχος του σχηματιζόμενου οξειδίου. Η ανοδίσωση του Al είναι μια τεχνική η οποία βασίζεται στην ιδιότητα αυτή. Σε απλές συνθήκες έκθεσης το στρώμα οξειδίου είναι λεπτό και μπορεί να απομακρυνθεί με προσθήκη κατάλληλων σκωριών ή με συγκόλληση σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου. Το παχύ οξείδιο, όμως, επιβάλλεται να απομακρυνθεί είτε με χημικό είτε με μηχανουργικό τρόπο πριν τη συγκόλληση.

Το οξείδιο του Al τήκεται στους 2050 °C, θερμοκρασία η οποία είναι κατά πολύ υψηλότερη του σημείου τήξης του μετάλλου. Εάν δεν απομακρυνθεί κατάλληλα, τότε κατά τη συγκόλληση προκύπτει ατελής τήξη. Οι διατιθέμενες στο εμπόριο σκωρίες για την απομάκρυνσή του περιέχουν χλωριόντα και φθοριόντα και πρέπει να απομακρύνονται μετά τη συγκόλληση για αποφυγή φαινομένων διάβρωσης κατά την επερχόμενη χρήση.

Το οξείδιο είναι ηλεκτρικός μονωτής. Εάν είναι παχύ, τότε εμποδίζει την έναυση του τόξου. Στην περίπτωση αυτή, επιβάλλεται η απομάκρυνσή του ακόμη και από τις θέσεις όπου τοποθετούνται οι λαβίδες γείωσης.

Το υδρογόνο διαλύεται ταχύτατα στο τηγμένο Al. Η διαλυτότητά του, όμως, στο στερεό είναι μηδενική, οπότε αποτελεί την κύρια αιτία δημιουργίας πορώδους στις συγκολλήσεις των κραμάτων Al με την έκλυσή του και τον εγκλωβισμό του στο στερεό εναποτιθέμενο μέταλλο. Υψηλές θερμοκρασίες στη λίμνη ρευστού μετάλλου οδηγούν στην απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, οπότε το πορώδες στο στερεό εναποτιθέμενο μέταλλο αυξάνει δραματικά. Η δράση κάθε πηγής υδρογόνου (λάδια, γράσσα, υγρασία κ.λπ.) πρέπει να ελαχιστοποιείται, για να προκύψουν καλές ραφές.

Η θερμική αγωγιμότητα του Al είναι 6 φορές μεγαλύτερη της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα. Παρόλο που το σημείο τήξης είναι πολύ χαμηλότερο του χάλυβα, απαιτείται πολύ ισχυρότερη πυκνότητα ισχύος για τη συγκόλλησή του, λόγω της υψηλής του ειδικής θερμότητας. Για καλή συγκόλληση συνδυάζεται, επομένως, η υψηλή πυκνότητα ισχύος με τη χαμηλή ταχύτητα προώθησης της συγκόλλησης.

Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα καθιστά το Al πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της πυκνότητας ισχύος της συγκόλλησης. Απαιτείται ιδιαίτερα σταθερή πυκνότητα ισχύος ιδιαίτερα με τις τεχνικές γρήγορης προώθησης.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του ΑΙ είναι περίπου διπλάσιος του αντίστοιχου του χάλυβα. Στις συγκολλήσεις ΑΙ παρατηρείται συστολή κατά 6% κατ' όγκο κατά τη στερεοποίηση. Τα λεπτά φύλλα πρέπει να συγκρατούνται με πόντα, για να διατηρηθεί η ευθυγράμμιση.

Το ΑΙ δεν αλλάζει χρωματισμό, όταν τήκεται. Επομένως, ο συγκολλητής επιβάλλεται να μπορεί να «βλέπει» την τήξη κάτω από το τόξο, για να ελέγχει το βαθμό τήξης, όσο η συγκόλληση προχωρά.

Στο εμπόριο τα κράματα ΑΙ διατίθενται είτε ως προϊόντα διαμόρφωσης είτε ως προϊόντα χύτευσης. Όλα αυτά συγκολλώνται, αλλά ειδικά στη συγκόλληση προϊόντων χύτευσης σε τύπους (die castings) και προϊόντων κωνιομεταλλουργίας (P/M parts) τα προβλήματα εμφάνισης πορώδους είναι ιδιαίτερα έντονα, λόγω ενυπάρχοντος εγκλεισμού αερίων [19], [20].

1.4 Τα κράματα αλουμινίου και οι κατηγορίες τους

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα κράματα διαμόρφωσης (wrought products) και τα κράματα χύτευσης (cast products). Η πρώτη περιλαμβάνει κράματα που τήκονται σε κλίβανο και στη συνέχεια χύνονται σε καλούπια, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει κράματα που έχουν υποστεί επεξεργασία σε στερεά μορφή [22].

Οι δύο αυτές κατηγορίες κραμάτων διακρίνονται επιμέρους στα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση μέσω θερμικής κατεργασίας (θερμοσκληρυνόμενα) και στα κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση μέσω θερμικής κατεργασίας (εργοσκληρυνόμενα). Οι ιδιότητες των θερμοσκληρυνόμενων κραμάτων αλουμινίου εξαρτώνται άμεσα από το είδος της ακολουθούμενης θερμικής κατεργασίας, ενώ οι ιδιότητες των εργοσκληρυνόμενων κραμάτων αλουμινίου εξαρτώνται από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Το καθαρό αλουμίνιο και τα κράματά του παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Τα κύρια στοιχεία κραμάτωσης (προσθήκης) του αλουμινίου είναι: Cu, Fe, Mn, Mg, Si και Zn [19].

1.4.1 Το σύστημα αρίθμησης

1.4.1.1 Τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

Τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου ταξινομούνται σε 9 σειρές χρησιμοποιώντας ένα τετραψήφιο σύστημα και κάθε σειρά περιλαμβάνει διαφορετικούς συνδυασμούς προσθηκών κράματος. Το πρώτο ψηφίο (Xxxx) υποδηλώνει το κύριο συστατικό στο κράμα, ενώ το δεύτερο ψηφίο (xXxx) δείχνει τις τροποποιήσεις που έγιναν στο αρχικό κράμα. Τα δύο τελευταία ψηφία (xxXX) είναι αυθαίρετοι αριθμοί ώστε το συγκεκριμένο κράμα να μπορεί να αναγνωριστεί στη σειρά [21].

Πίνακας 2 : Κύρια στοιχεία κραμάτωσης διαμόρφωσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών [4]

Κωδικοποίηση	Κύριο στοιχείο κραμάτωσης
1xxx	Αλουμίνιο με ελάχιστη καθαρότητα 99%
2xxx	Χαλκός
3xxx	Μαγγάνιο
4xxx	Πυρίτιο
5xxx	Μαγνήσιο
6xxx	Μαγνήσιο, Πυρίτιο
7xxx	Ψευδάργυρος
8xxx	Άλλα στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

1.4.1.2 Τα κράματα χύτευσης αλουμινίου

Στα κράματα χύτευσης αλουμινίου χρησιμοποιείται πάλι ο τετραψήφιος αριθμός με τη μόνη διαφορά να εμφανίζεται στην τελεία που δεσπόζει μεταξύ του τρίτου και τέταρτου αριθμού.

Πίνακας 3 : Κύρια στοιχεία κραμάτωσης κραμάτων χύτευσης αλουμινίου και κωδικοποίηση αυτών [4]

Κωδικοποίηση	Κύριο στοιχείο κραμάτωσης
1xx.x	Αλουμίνιο με ελάχιστη καθαρότητα 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

1.4.2 Εργοσκληρυνόμενα κράματα αλουμινίου

Τα κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία είναι τα κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Τα κράματα των σειρών αυτών είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή ενδομεταλλικών ενώσεων. Η σκλήρυνσή τους επιτυγχάνεται μέσω δημιουργίας στερεών διαλυμάτων αλλά κυρίως, μετά την επακολουθούσα ενδοτράχυνση [23].

1.4.2.1 Κράματα αλουμινίου σειράς 1000

Τα κράματα της σειράς 1000 είναι κράματα καθαρότητας 99% σε Al και πάνω. Οι κυριότερες ακαθαρσίες, που συναντώνται σε αυτά τα κράματα, είναι ο Fe και το Si, σε συνολικό ποσοστό έως 1% (κράμα 1100). Έχουν υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν με ενδοτράχυνση και μπορούν να υποστούν κατεργασία εν ψυχρώ. Χαρακτηρίζονται από καλή αντοχή τόσο σε υγρή όσο και σε θαλάσσια ατμόσφαιρα, υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καθώς και από καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [24].

1.4.2.2 Κράματα αλουμινίου σειράς 3000

Τα κράματα της σειράς 3000 έχουν ως κύρια προσθήκη το Mn. Το Mn με το Al σχηματίζουν εύκολα την ενδομεταλλική ένωση Al_6Mn , δεδομένου ότι η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al είναι μόνο 1,8% (στους 659°C). Η ένωση αυτή διασπείρεται μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου προκαλώντας σκλήρυνση του Al και ταυτόχρονα αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Αύξηση της μηχανικής αντοχής των κραμάτων της σειράς αυτής επιτυγχάνεται με προσθήκη Cu σε ποσοστό 0,12% (κράμα 3003). Δευτερογενής σκλήρυνσή τους επιτυγχάνεται με προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα του 1,2% (κράμα 3004), μέσω σχηματισμού στερεού διαλύματος. Τα κράματα Al-Mn έχουν καλή διαμορφωσιμότητα και επιδεκτικότητα σε συγκόλληση. Παρουσιάζουν καλή αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση και αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000 σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες [4], [25], [31].

1.4.2.3 Κράματα αλουμινίου σειράς 5000

Τα κράματα της σειράς 5000 έχουν ως κύρια προσθήκη το Mg, σε ποσοστά μικρότερα του 4%, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στην ενδομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 (φάση β), η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη. Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση, καλή επιδεκτικότητα σε συγκόλληση, αλλά μέτρια μηχανική αντοχή. Η τελευταία μπορεί να βελτιωθεί έπειτα από ενδοτράχυνση, αλλά προφανώς εις βάρος της ολκιμότητας. Στη μεταλλουργική κατάσταση O (ανόπτηση) εμφανίζουν καλή εν ψυχρώ και εν θερμώ κατεργασιμότητα. Παρουσιάζουν καλή ποιότητα επιφάνειας μετά από επιφανειακές κατεργασίες (λείανση, ανοδίωση), εφόσον όμως περιέχουν χαμηλά ποσοστά σε Fe και Si [4], [26].

1.4.3 Θερμοσκληρυνόμενα Κράματα Αλουμινίου

Τα κράματα που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία είναι τα κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000 [27].

1.4.3.1 Κράματα αλουμινίου σειράς 2000

Τα κράματα της σειράς 2000 είναι κράματα: (α) Al-Cu, με ποσοστά σε Cu μεταξύ 2,6% και 6,3%, ή (β) Al-Cu-Mg, με ποσοστά σε Mg μεταξύ 0,5% και 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής και οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα κράματα αυτά επιτυγχάνονται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl_2 ή/και CuMgAl_2 . Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8% (κράμα 2014), ευνοεί το σχηματισμό τετραμερών συστατικών, με αποτέλεσμα τη βελτίωση των ιδιοτήτων της μεταλλικής μήτρας. Η παρουσία Fe στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του Cu, λόγω του σχηματισμού της ένωσης Cu_2FeAl_7 , και μειώνει, με αυτόν τον τρόπο, τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Εάν συγχρόνως με το Fe προστεθεί και Ni σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , η οποία έως και τους 230°C προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή. Μετά από βαφή και γήρανση, τα κράματα αλουμινίου της σειράς 2000 παρουσιάζουν μέτρια αντοχή σε διάβρωση και μειωμένη επιδεκτικότητα σε συγκόλληση. Αυτό συμβαίνει, διότι οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης ζώνες, λόγω του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, υπόκεινται σε ανόπτηση. Τέλος, στη σειρά 2000 ανήκουν και τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν Li (το ελαφρύτερο μεταλλικό στοιχείο). Έχει διαπιστωθεί πως για κάθε 1% προσθήκης λιθίου στο αλουμίνιο, προκαλείται μείωση του βάρους του κατά περίπου 3% και αύξηση του ορίου ελαστικότητας κατά περίπου 5%. Στα εμπορικά κράματα του αλουμινίου, το ποσοστό λιθίου που συναντάται είναι μεταξύ 1% και 3%. Τα κράματα αυτά, λόγω της μικρής τους πυκνότητας και της υψηλής μηχανικής τους αντοχής χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροναυπηγική και σε δομικά στοιχεία διαστημοπλοίων [4], [29].

1.4.3.2 Κράματα αλουμινίου σειράς 6000

Τα κράματα της σειράς 6000 είναι κράματα που περιέχουν ως κύρια κραματικά στοιχεία το Mg και το Si. Μέσω κατεργασιών σκλήρυνσης με κατακρήμνιση και γήρανσης, κατακρημνίζεται η φάση Mg_2Si , που προσδίδει στο κράμα αυξημένη σκληρότητα. Η περίσσεια Si (π.χ. κράμα 6070) βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ταυτόχρονα όμως μειώνει την αντοχή του σε διάβρωση. Ορισμένα

κράματα της σειράς αυτής περιέχουν και Mn (σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%) και Cr (σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%). Η προσθήκη αυτών των στοιχείων οδηγεί σε εκλέπτυνση των κόκκων, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και αυξάνει τη δυσθραυστότητα. Η προσθήκη Cu, ο οποίος όμως δεν πρέπει να ξεπερνά σε ποσοστό το 0,5% για να μην εμφανιστεί μείωση της αντοχής σε διάβρωση, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 6000 έχουν καλή διαμορφωσιμότητα εν θερμώ και καλή επιδεκτικότητα σε συγκόλληση. Επίσης, εμφανίζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως τους 150°C) και εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση [4], [29].

1.4.3.3 Κράματα αλουμινίου σειράς 7000

Τα κράματα της σειράς 7000 είναι κράματα: (α) Al-Zn-Mg ή (β) Al-Zn-Mg-Cu, με ποσοστά σε Zn μεταξύ 4% και 8% και με ποσοστά σε Mg μεταξύ 1% και 3%. Τα κράματα αυτά, όταν υπόκεινται σε κατάλληλη θερμική κατεργασία, αποκτούν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου. Η κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂, στα κράματα αυτά, είναι η κύρια αιτία που προκαλεί τη σκλήρυνση της δομής τους. Η προσθήκη Cu (σε ποσοστό μικρότερο του 2%) προκαλεί επίσης σκλήρυνση της δομής, λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κυρίως κατακρημνισμάτων, όμως είναι επιζήμια, καθώς μειώνει την εμβαπτότητα, την επιδεκτικότητα σε συγκόλληση και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων αυτών. Η παρουσία Zr βελτιώνει τη συγκολλησιμότητά τους, ενώ παρουσία Cr (σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%) βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 παρουσιάζουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος της περιοχής ομογενοποίησής τους, καλή εμβαπτότητα (ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα) και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες γήρανσης (από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους 160°C). Ωστόσο, η επιδεκτικότητά τους σε συγκόλληση είναι γενικά μέτρια, ομοίως και η αντοχή τους εν θερμώ και για το λόγο αυτό η θερμοκρασία λειτουργίας τους παραμένει χαμηλή (έως 120°C). Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 7000 βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική και σε τμήματα κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, καθώς πληρούν ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των εφαρμογών αυτών τόσο

για υψηλή μηχανική αντοχή, όσο και για αντοχή σε διάβρωση. Η μικροδομή και οι ιδιότητες που διαμορφώνονται στη ΘΕΖ εξαρτώνται από τη μικροδομή και τους μηχανισμούς ισχυροποίησης του βασικού μετάλλου [4], [30].

1.4.4 Κράματα ειδικών θερμικών κατεργασιών

Εκτός από τις βασικές οικογένειες κραμάτων σε πολλές περιπτώσεις επιβάλλεται να γίνει κάποια συγκεκριμένη θερμική κατεργασία ή ακολουθία διεργασιών προκειμένου να επιτευχθούν επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι διεργασίες αυτές ονομάζονται temper(s), χαρακτηρίζονται από γράμματα τα οποία συνοδεύουν τα νούμερα του γενικού χαρακτηρισμού και οι περισσότερες κοινές από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- **F (as fabricated)**: Εφαρμόζεται σε γενικά προϊόντα διαμορφωμένα με χύτευση και ψυχρή ή θερμή πλαστική παραμόρφωση για τις οποίες διεργασίες δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο των θερμικών συνθηκών ή των συνθηκών εργοσκληρυνσης.
- **O (annealed - ανοπτημένο)** : Εφαρμόζεται σε προϊόντα διαμόρφωσης τα οποία υφίστανται ανόπτηση για χαμηλά επίπεδα αντοχών ή σε χυτά για τα οποία επιδιώκεται βελτιωμένη ελατότητα και σταθερότητα διαστάσεων.
- **H (strain-hardened, εργοσκληρυμένο)** : Εφαρμόζεται σε προϊόντα διαμόρφωσης ισχυροποιημένα με ενδοτράχυνση, με ή χωρίς πρόσθετη θερμική επεξεργασία για ελάττωση της αντοχής. Το γράμμα H συνοδεύεται από δύο ή περισσότερους αριθμούς για ειδικές περιπτώσεις διεργασιών.
- **W (solution heat-treated, με θερμικό κύκλο στερεάς διαλυτοποίησης)** : Πρόκειται για μία ασταθή temper εφαρμοζόμενη μόνο σε κράματα των οποίων η αντοχή μεταβάλλεται φυσικά στη θερμοκρασία δωματίου και για μία χρονική περίοδο μηνών ή ετών μετά το θερμικό κύκλο στερεάς διαλυτοποίησης.
- **T (solution heat treated, με θερμικό κύκλο στερεάς διαλυτοποίησης)** : Εφαρμόζεται σε κράματα των οποίων η αντοχή είναι σταθεροποιημένη για μερικές εβδομάδες μετά το θερμικό κύκλο στερεάς διαλυτοποίησης. Το γράμμα T ακολουθείται από έναν ή περισσότερους ενδεικτικούς αριθμούς [19].

1.4.4.1 Σύστημα για εργοσκληρυμένα προϊόντα (μη επιδεχόμενα θερμική κατεργασία)

H1 (μόνο εργοσκλήρυνση) : Εφαρμόζεται σε προϊόντα εργοσκληρυμένα μόνο (χωρίς άλλη θερμική επεξεργασία) για επίτευξη επιθυμητών ιδιοτήτων. Ο αριθμός πέραν του H1 φανερώνει το βαθμό εργοσκλήρυνσης.

H2 (εργοσκλήρυνση και μερική ανόπτηση) : Η εργοσκλήρυνση στα προϊόντα αυτά οδηγεί σε υπέρβαση της επιθυμητής μηχανικής αντοχής η οποία επιτυγχάνεται τελικά σε επερχόμενο στάδιο ανόπτησης. Ο αριθμός πέραν του H2 φανερώνει το ποσοστό εργοσκλήρυνσης το οποίο παραμένει μετά την ανόπτηση.

H3 (εργοσκλήρυνση και σταθεροποίηση) : Εφαρμόζεται σε εργοσκληρυμένα προϊόντα τα οποία υφίστανται μία πρόσθετη διεργασία σταθεροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων για βελτίωση της ελατότητας. Συνήθως, πρόκειται για θερμικό κύκλο χαμηλών θερμοκρασιών και αναφέρεται σε κράματα τα οποία υφίστανται φυσική γήρανση (μαλάκυνση) στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, εάν δεν υποστούν τη διεργασία αυτή. Ο αριθμός πέραν του H3 φανερώνει το ποσοστό εργοσκλήρυνσης το οποίο παραμένει μετά τη σταθεροποίηση [19].

1.4.4.2 Σύστημα για κράματα επιδεχόμενα θερμική κατεργασία

Το σύστημα αυτό για προϊόντα διαμόρφωσης και χυτά χρησιμοποιεί τους γενικούς χαρακτηρισμούς W και T, όπου το W υποδηλώνει μία ασταθή temper, ενώ το T μία σταθερή temper, αλλά διαφορετική από τις F, O, H του γενικού χαρακτηρισμού. Το T συνοδεύεται από έναν αριθμό από το 1 μέχρι το 10 καθένας από τους οποίους υποδηλώνει μία ακολουθία διεργασιών.

T1 : Ψύξη μετά από διεργασία διαμόρφωσης σε υψηλή θερμοκρασία και φυσική γήρανση προς κάποια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T2 : Ψύξη μετά από διεργασία διαμόρφωσης σε υψηλή θερμοκρασία, ψυχρή παραμόρφωση και φυσική γήρανση προς κάποια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T3 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης, ψυχρή παραμόρφωση και ακολούθως φυσική γήρανση προς κάποια ουσιωδώς σταθερή κατάσταση.

T4 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης και ακολούθως φυσική γήρανση προς κάποια ουσιωδώς σταθερή κατάσταση.

T5 : Ψύξη μετά από διαμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία και ακολούθως τεχνητή γήρανση.

T6 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης και ακολούθως τεχνητή γήρανση.

T7 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης και ακολούθως υπεργήρανση ή σταθεροποίηση.

T8 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης, ψυχρή παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση.

T9 : Θερμική κατεργασία στερεάς διαλυτοποίησης, τεχνητή γήρανση και, τέλος, ψυχρή παραμόρφωση

T10 : Ψύξη από διεργασία διαμόρφωσης υψηλών θερμοκρασιών, ψυχρή παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση [19].

1.4.5 Κράμα αλουμινίου AA5754

Το κράμα αλουμινίου 5754 ανήκει στην εργοσκληρυνόμενη σειρά κραμάτων 5000 με κύρια κραματική προσθήκη το Mg. Έχει εφαρμογή στη ναυπηγική, στα αμαξώματα των οχημάτων, στον εξοπλισμό της αλιευτικής βιομηχανίας, την επεξεργασία τροφίμων και στις συγκολλημένες χημικές και πυρηνικές δομές [34].

1.4.6 Κράμα αλουμινίου AA6063

Αυτό το κράμα χρησιμοποιείται πιο συχνά για διέλαση (extrusion). Θα μπορούσε να διελαστεί σε λεπτά, μικρά και περίπλοκα σχήματα και, ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται εκτενώς για δομικές εφαρμογές. Για τέτοιες εφαρμογές, χρησιμοποιείται συχνά η κατεργασία T6, δηλαδή η θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και ακολούθως τεχνητή γήρανση. Αυτό το κράμα έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και

χαρακτηριστικά μέσης μηχανικής ικανότητας. Το κράμα AA6063 χρησιμοποιείται ευρέως σε κτίρια. Η ανοδική οξείδωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μιας επιφάνειας με όμορφα χρώματα και ως εκ τούτου να χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή επίπλων, σκαφών, μηχανοκίνητων οχημάτων, κουφωμάτων, κουφωμάτων θυρών, συστημάτων στήριξης οροφής κ.λπ. Σε σύγκριση με το 6061, το 6063, είναι πιο ανθεκτικό στη διάβρωση και εκτίθεται σε πιο «απαιτητικά» περιβάλλοντα. Το κράμα 6063 με σκλήρυνση T6 έχει μέτρια χαρακτηριστικά κάμψης και αναδίπλωσης. Οι σωλήνες από κράμα 6063 και οι ράβδοι T6 μπορούν να λυγιστούν, αλλά αυτό δεν είναι εγγυημένο χαρακτηριστικό [33].

1.4.7 Συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου

Παρά τα ευεργετικά χαρακτηριστικά για τα οποία είναι ελκυστικά τα κράματα αλουμινίου, υπάρχουν και αρκετά επιζήμια που επηρεάζουν την επιδεκτικότητά τους σε συγκόλληση. Η ικανότητα συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσικές και θερμικές ιδιότητές τους, όπως η ανακλαστικότητα, η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής. Έχει αποδειχθεί ότι οι αυξημένες τιμές αυτών των ιδιοτήτων σχετίζονται με κακή επιδεκτικότητα σε συγκόλληση και ρωγμές κατά τη στερεοποίηση. Για παράδειγμα, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα και η ανακλαστικότητα απαιτούν αυξημένη εισροή θερμότητας κατά τη συγκόλληση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές και σε υποβάθμιση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ). Επιπλέον, η εξαιρετικά υψηλή διαλυτότητα του υδρογόνου σε υγρό σε σύγκριση με το στερεό αλουμίνιο συντελεί στο να γίνουν οι συγκολλήσεις αλουμινίου αρκετά δύσκολες. Η παγίδευση αερίου υδρογόνου, που επηρεάζεται επίσης από την παρουσία στοιχείων όπως το Mg, έχει αποδειχθεί ότι προκαλεί πορώδες και υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων. Τέλος, μελέτες έχουν δείξει ότι η συγκόλληση κραμάτων που περιέχουν μαγνήσιο (Mg) είναι πιο εύκολα εφικτή καθώς το μαγνήσιο (Mg) συμβάλλει στη σταθερότητα της κλειδαρότρυπας, καθώς και στην ελαχιστοποίηση του πορώδους που προκαλείται από την κλειδαρότρυπα [53], [54].

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Περιγραφή υλικού

Η παρούσα εργασία μελετά τη συγκόλληση με δέσμη laser εργοσκληρυνόμενου κράματος αλουμινίου AA5754 H22, μήκους 10 cm, πλάτους 4,5 cm και πάχους 2mm, και θερμοσκληρυνόμενου κράματος αλουμινίου AA6063, μήκους 9 cm, πλάτους 4,5 cm και πάχους 8,3 mm.

2.1.1 Χημική ανάλυση AA5754 και AA6063

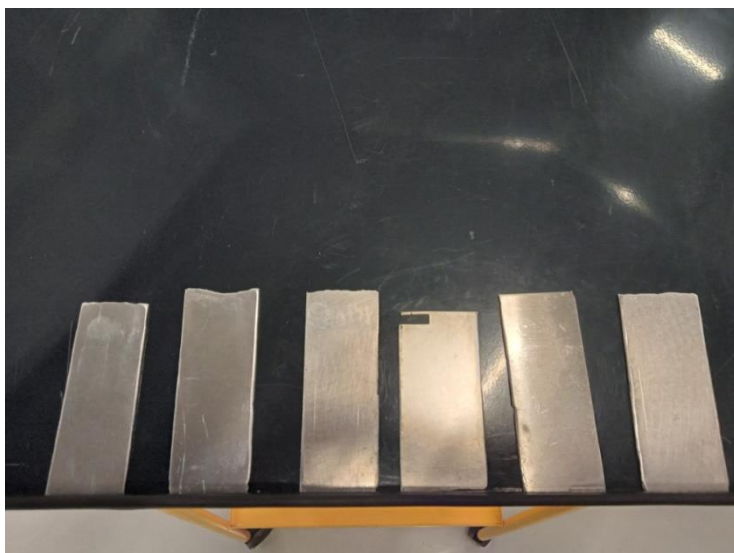
Πίνακας 4 : Ονομαστική σύσταση κραμάτων αλουμινίου AA5754 και AA6063

Alloy	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zn	Other
AA5754	0,40	0,40	0,1-0,6	2,6-3,6	0,10	0,10	0,1-0,6	0,20	
AA6063	0,48-0,58	0,16-0,22	0,04	0,48-0,58	0,03	0,03	0,03	0,03	0,15

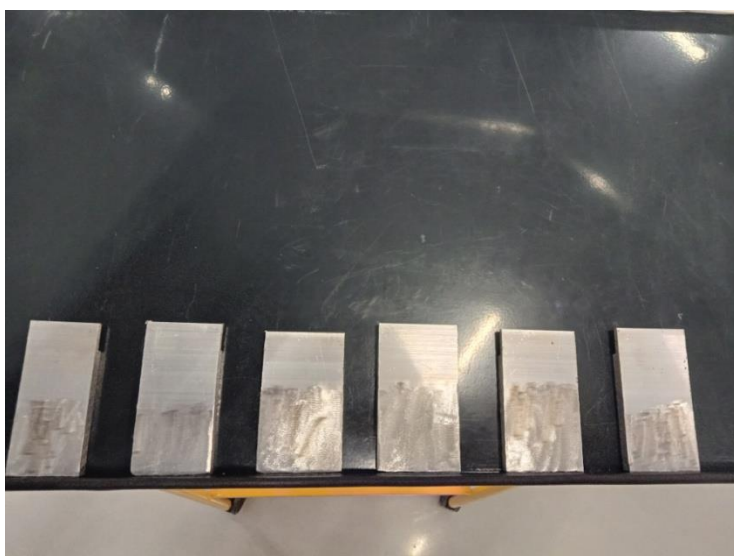
2.1.2 Μηχανικές ιδιότητες AA5754 και AA6063

Πίνακας 5 : Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου AA5754 και AA6063

Alloy	Tensile Strength (Rm) N/mm ²	Yield Strength (Rp0,2) N/mm ²	Elongation (A50mm) %
AA5754	237,3	184,2	17,4
AA6063	255	225	15



Εικόνα 7 : Κράμα AA5754 πριν τη συγκόλληση



Εικόνα 8 : Κράμα AA6063 πριν τη συγκόλληση

2.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

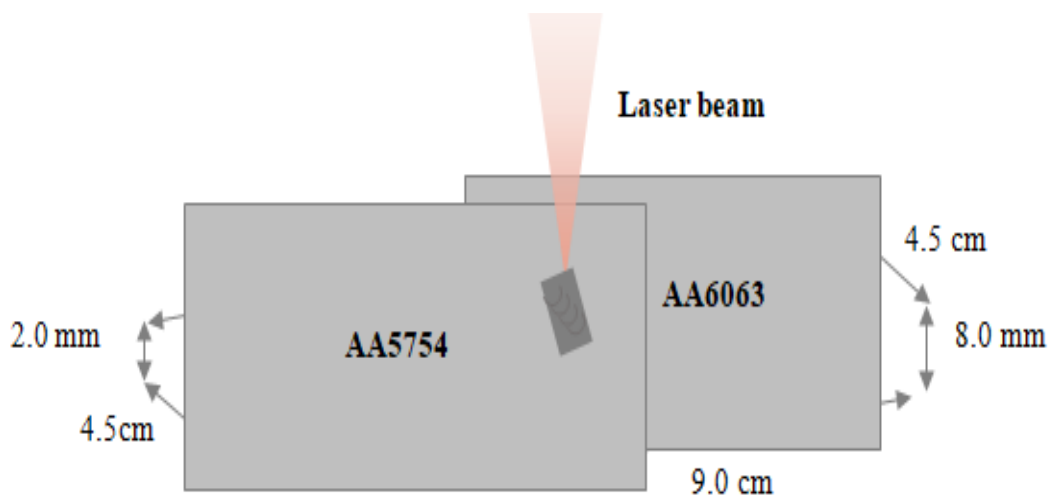
Για τα πειράματα των συγκολλήσεων, χρησιμοποιήθηκε Disk LASER τύπου Yb:YAG.

Η συγκόλληση έγινε μέσα σε ελεγχόμενο και καλά αεριζόμενο χώρο, χωρίς βέβαια προστατευτική ατμόσφαιρα, κάτι που συνηθίζεται στις συγκολλήσεις LASER λόγω της πολύ γρήγορης διαδικασίας. Τα δοκίμια πριν κολληθούν είχαν τροχιστεί και καθαριστεί με ακετόνη για να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα που μπορεί να είχαν έπειτα από τις μηχανικές διεργασίες.

Ο τύπος της κόλλησης ήταν Lapweld (επικαλυπτόμενη) και το είδος του γαζιού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 12X4mm Fusion Seam Weld σύμφωνα με το ISO 2553 Welding and allied processes — Symbolic representation on drawings — Welded joints.

Η συγκράτηση των δοκιμίων πριν την κόλληση έγινε με ειδικό εξοπλισμό όπου με δύναμη 100N εξαλείφθηκε η πιθανότητα κενού ανάμεσα στα δύο υλικά. Η δύναμη παρέμεινε μέχρι το πέρας της κόλλησης.

Για την δημιουργία του γαζιού χρησιμοποιήθηκε ταλάντωση πλάτους 4mm.



Εικόνα 9 : Η θέση των ελασμάτων κατά τη συγκόλληση

2.2.1 Παράμετροι της συγκόλλησης

Τα ελάσματα συγκολλήθηκαν με δύο διαφορετικές συνθήκες, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.3, με τη μόνη διαφοροποίηση να έγκειται στην ισχύ της δέσμης laser.

Τρία ελάσματα AA5754 συγκολλήθηκαν με τρία ελάσματα AA6063 με την ισχύ του laser να ανέρχεται στα 3500 Watt και τα δοκίμια αυτά να ονομάζονται A.

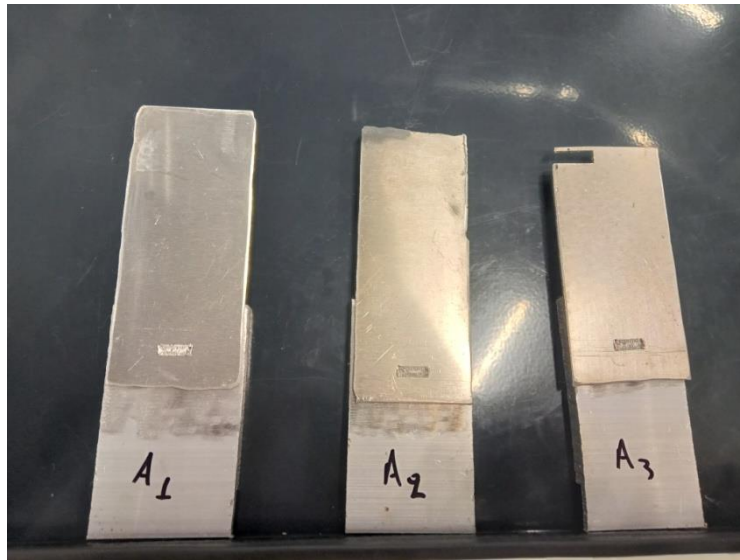
Τρία ελάσματα AA5754 συγκολλήθηκαν με τρία ελάσματα AA6063 με την ισχύ του laser να ανέρχεται στα 3000 Watt και τα δοκίμια αυτά να ονομάζονται B.

Πίνακας 6 : Παράμετροι των συγκολλήσεων

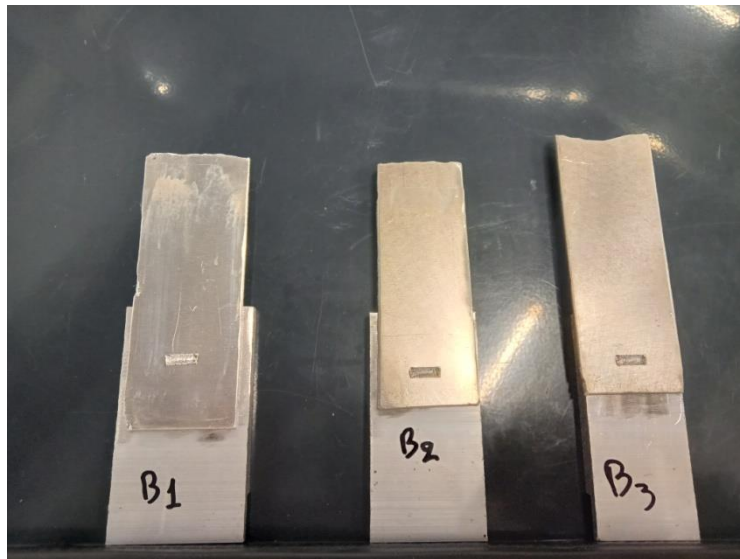
	A	B
Power (W)	3500	3000
Velocity (mm/s)	45	45
Length (mm)	12	12
Width (mm)	4	4
Duration (s)	0,26667	0,26667



Εικόνα 10 : Συγκολλημένα δοκίμια A και B



Εικόνα 11 : Συγκολλημένα δοκίμια Α



Εικόνα 12 : Συγκολλημένα δοκίμια Β

2.3 Προετοιμασία δοκιμίων

Για την εξέταση των δειγμάτων με τις τεχνικές του οπτικού μικροσκοπίου, της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και της περίθλασης ακτίνων X είναι απαραίτητο να προηγηθεί μια διαδικασία η οποία θα προετοιμάσει την επιφάνεια των δειγμάτων κατάλληλα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την κοπή κατάλληλων δοκιμίων από τον αρχικό όγκο του υλικού, τον εγκιβωτισμό, τη λείανση, τη στίλβωση και την προσβολή με κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο.

2.3.1 Κοπή

Τα δοκίμια κόπηκαν με δισκοτόμο Struers Discotom. Κατά τη διαδικασία της κοπής, τα δοκίμια ψύχονταν με ψυκτικό γαλάκτωμα, ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανσή τους. Τα δοκίμια κόπηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση συγκόλλησης, σε διαστάσεις τέτοιες ώστε να εμπεριέχονται σε κάθε δοκίμιο όλες οι ζώνες της συγκόλλησης (ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, μέταλλο βάσης).



Εικόνα 13 : Δισκοτόμος Struers



Εικόνα 14 : Δοκίμια μετά την κοπή



Εικόνα 15 : Σημείο συγκόλλησης κομμένων δοκιμίων

2.3.2 Εγκιβωτισμός

Κατά τον εγκιβωτισμό τα δοκίμια μπήκαν σε καλούπια στα οποία προστέθηκε ρητίνη. Για κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν 15ml ρητίνης και 2.1ml σκληρυντή.



Εικόνα 16 : Τα δοκίμια μέσα στα καλούπια με τη ρητίνη

2.3.3 Λείανση

Το επόμενο στάδιο της μεταλλογραφικής προετοιμασίας είναι η λείανση, στο οποίο χρησιμοποιούνται χαρτιά λείανσης καρβιδίου του πυριτίου (SiC) με λεπτομερείς λειαντικούς κόκκους, με σκοπό να απομακρυνθούν τα οξείδια που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια των δοκιμίων. Τα γυαλόχαρτα τοποθετήθηκαν πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ο οποίος περιστρεφόταν με 120 στροφές το λεπτό, ενώ ταυτόχρονα εισερχόταν νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου και την αποφυγή αύξησης της θερμοκρασίας, όσο και για την απομάκρυνση των ρινισμάτων και της σκόνης.

Η διαδικασία της λείανσης πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια με διαφορετικού μεγέθους κόκκων γυαλόχαρτα (P600, P800, P1200, P2400). Κάθε φορά που αλλάζει το χαρτί πρέπει να αλλάζει και η κατεύθυνση της λείανσης, και πρέπει να γίνεται σε κάθετη κατεύθυνση από αυτή της προηγούμενης. Προσοχή δίνεται στην πίεση που ασκείται από τον χειριστή στο δοκίμιο. Πρέπει να είναι ομοιόμορφη σε όλο το δοκίμιο, αλλιώς η επιφάνεια σε κάποια σημεία θα έχει «φαγωθεί» περισσότερο από άλλα και δεν θα είναι επίπεδη.

Μετά το πέρας της λείανσης σε κάθε στάδιο, τα δοκίμια πλένονταν με νερό αρχικά και στη συνέχεια με αιθανόλη και στεγνώνονταν με αέρα με σκοπό να καθαριστούν από υπολειπόμενα καρβίδια από το χαρτί λείανσης. Κάθε στάδιο είχε διάρκεια πέντε λεπτών.

2.3.4 Στίλβωση

Η διαδικασία της στίλβωσης πραγματοποιήθηκε μετά από αυτή της λείανσης με σκοπό την εξάλειψη των γραμμών που είχαν δημιουργηθεί κατά την λείανση. Χρησιμοποιήθηκε στίλβωτικό πανί, το οποίο τοποθετήθηκε στην περιστρεφόμενη βάση του λειαντικού τροχού ο οποίος λειτουργούσε με μέγιστες 120 στροφές το λεπτό. Προστέθηκε αδαμαντόπαστα μεγέθους κόκκου διαμαντιού 3μm και 1 μm. Στο τέλος κάθε σταδίου γίνονταν καθαρισμός των δοκιμίων, τα οποία εν συνεχεία στεγνώνονταν με ρεύμα αέρα.

Στο τελικό στάδιο της προετοιμασίας, τα δοκίμια στίλβώθηκαν με διάλυμα Colloidal Silica, ενώ κατά τη διαδικασία αυτή, το πανί στο οποίο γίνονταν η στίλβωση βρεχόταν με απιονισμένο νερό. Μετά από την προετοιμασία, τα δείγματα καθαρίστηκαν με βαμβάκι και νερό, στη συνέχεια με αιθανόλη και στεγνώθηκαν με ρεύμα αέρα. Κάθε στάδιο είχε διάρκεια πέντε λεπτών.



Εικόνα 17 : Όργανο λείανσης και στίλβωσης της Stuers

2.3.5 Χημική προσβολή

Η χημική προσβολή αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο στην μεταλλογραφία καθώς επιτρέπει την αποκάλυψη της μικροδομής ενός μετάλλου ή κράματος για την παρατήρησή του στο οπτικό μικροσκόπιο και το SEM.

Πραγματοποιήθηκε ηλεκτροχημική προσβολή με το αντιδραστήριο Barker's (4–5 mL HBF_4 , 200ml H_2O), με εφαρμοσμένη τάση 35 V, με σκοπό να αποκαλυφθεί το μέταλλο βάσης (base metal), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone), η ζώνη τήξης (Fusion Zone), καθώς και γενικά η μικροδομή (Microstructure) των συγκολλημένων δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα, τα τέσσερα δοκίμια A1.1, A1.2, B3.1, B3.2 προσβλήθηκαν όπως αναγράφεται στον πίνακα 2.4.

Πίνακας 7 : Χρόνος προσβολής δοκιμίων

Δοκίμιο	Χρόνος Ηλεκτροχημικής Προσβολής στα 35 V (sec)
A1.1	40
A1.2	30
B3.1	50
B3.2	30

2.4 Μελέτη μικροδομής

Η προετοιμασία των δοκιμίων ολοκληρώθηκε και ακολούθησαν οι πιο εξελιγμένες ηλεκτρονικές τεχνικές μέσω των οποίων μελετήθηκε η μικροδομή.

2.4.1 Οπτική μικροσκοπία

Κάτω από την τράπεζα του μικροσκοπίου τοποθετείται ο πολωτής, ενώ ενδιάμεσα του αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού τοποθετείται ο αναλυτής, ο οποίος μπορεί να παρεμβληθεί ή όχι στην πορεία των ακτινών. Το δείγμα-δοκίμιο εισάγεται στην τράπεζα, η οποία περιστρέφεται γύρω από τον οπτικό άξονα και μέσω της υποδιαίρεσης της σε μοίρες μπορούν να υπολογισθούν γωνίες. Ο προσοφθάλμιος φακός φέρει σταυρόνημα του οποίου τα νήματα έχουν διεύθυνση κατά την οποία γίνονται οι κραδάνσεις του φωτός σε πολωτή και αναλυτή. Σε ορισμένους προσοφθάλμιους φακούς παρεμβάλλεται κλίμακα για την μέτρηση των διαστάσεων των κόκκων και της γωνίας των οπτικών αξόνων. Ο σωλήνας του μικροσκοπίου φέρει σχισμή 45° ως προς τα νήματα του σταυρονήματος, εντός της οποίας εισάγονται ειδικά διπλοθλαστικά πλακίδια, για ορισμένες μετρήσεις, οι αντισταθμιστές. Ο αντικειμενικός φακός τοποθετείται σε ειδικό κυκλικό στέλεχος, ενώ υπάρχουν ειδικοί κοχλίες για την ρύθμιση της κέντρωσης αυτής, έτσι ώστε να συμπίπτει με τον άξονα του μικροσκοπίου [55].

Με το οπτικό μικροσκόπιο και τις επιλογές φακών εστίασης που περιέχει, μελετήθηκε η μικροδομή των δοκιμίων, παρατηρήθηκε η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone), η ζώνη τήξης (Fusion Zone) και οι κόκκοι του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο Olympus GX41F και τα δείγματα εξετάστηκαν υπό πολωμένο και μη πολωμένο φως.

2.4.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

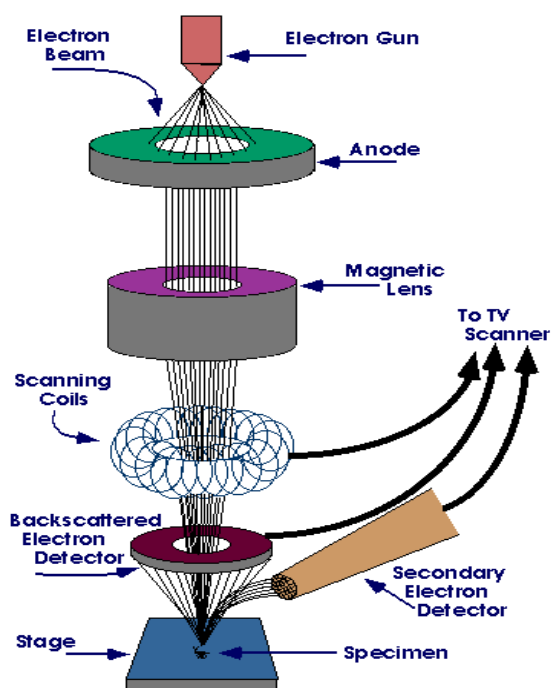
Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους, υψηλής διακριτικής ικανότητας, ανάλυσης της μικροδομής και χρησιμεύει για την παρατήρηση επιφανειών και τη στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών [35].

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά μικροσκόπια. Το SEM έχει μεγάλο βάθος πεδίου, το οποίο επιτρέπει σε περισσότερα δείγματα να εστιάζονται ταυτόχρονα. Το SEM έχει επίσης πολύ υψηλότερη ανάλυση, επομένως τα δείγματα σε κοντινή απόσταση μπορούν να μεγεθύνονται σε πολύ υψηλότερα επίπεδα. Επειδή το SEM χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες και όχι φακούς, ο ερευνητής έχει πολύ περισσότερο έλεγχο στον βαθμό μεγέθυνσης. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα, καθώς και οι πραγματικές εντυπωσιακά καθαρές εικόνες, καθιστούν το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία στην έρευνα σήμερα [36].

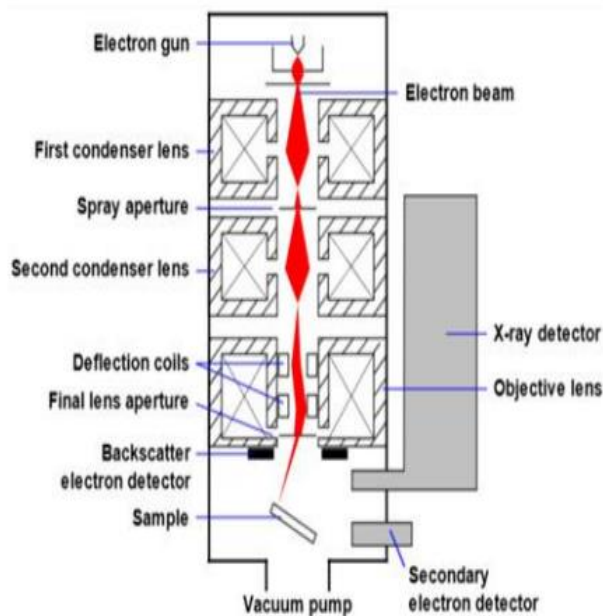
Μία διάταξη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου περιλαμβάνει από πάνω προς τα κάτω, το ηλεκτρονιοβόλο, τους ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και το σύστημα σάρωσης. Εντός του ηλεκτρονιοβόλου, η δέσμη ηλεκτρονίων εκπέμπεται από θερμαινόμενη κάθοδο βολφραμίου και περνώντας από την άνοδο, κατευθύνεται προς τους ηλεκτρομαγνητικούς φακούς. Η στήλη της διάταξης καθ' όλη την διάρκεια, λειτουργεί υπό υψηλό κενό για την προστασία της πηγής (να μην οξειδωθεί η κάθοδος) και για την μεταφορά των ηλεκτρονίων. Μια διάταξη περιλαμβάνει δύο με τρεις ηλεκτρομαγνητικούς φακούς. Αυτοί χωρίζονται στον συγκεντρωτικό φακό, ο οποίος είναι ένα πηνίο που εστιάζει την δέσμη ηλεκτρονίων σε ένα διάφραγμα και

στον αντικειμενικό φακό, ο οποίος επίσης είναι πηνίο και κάνει εκλέπτυνση της δέσμης την οποία εστιάζει πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Ο συγκεντρωτικός φακός είναι αυτός που βρίσκεται πιο κοντά στο ηλεκτρονιοβόλο, ενώ ο αντικειμενικός αυτός που βρίσκεται πιο κοντά στο υλικό [37], [39].

Τελικά, η επιφάνεια του δείγματος σαρώνεται από την δέσμη με μεγάλη ταχύτητα και διαμορφώνεται η εικόνα. Η σάρωση επιτυγχάνεται από πηνία σάρωσης, τα οποία εκτρέπουν την δέσμη ώστε να καλύψει όλη την επιφάνεια του υλικού. Η εικόνα διαμορφώνεται με την βοήθεια ενός ανιχνευτή ο οποίος συλλέγει τα ηλεκτρόνια. Κατά την σάρωση της επιφάνειας του υλικού από την δέσμη, εκπέμπονται ακτινοβολίες [40].



Εικόνα 18 : Εξαρτήματα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [38]



Εικόνα 19 : Διάταξη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [38]

Το είδος της ακτινοβολίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα του υλικού. Τα κύρια είδη εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι:

Δευτερογενή ηλεκτρόνια (Secondary electrons): προκύπτουν από ανελαστική σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα της επιφανειακής στοιβάδας σε βάθος 1-10nm, είναι ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας (χαμηλότερη από 50 eV) και εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος. Μπορούν να συλλεχθούν ευκολότερα από τον ανιχνευτή σε σχέση με τα πρωτογενή ηλεκτρόνια της δέσμης, λόγω της χαμηλής τους ενέργειας [40].

Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (Back-scattered electrons): τα ηλεκτρόνια της δέσμης τα οποία συγκρούονται ελαστικά με τα ηλεκτρόνια του δείγματος και επιστρέφουν προς τα πίσω ονομάζονται οπισθοσκεδαζόμενα και εμφανίζουν ενέργειες μεταξύ 5 και 50 eV. Δίνουν πληροφορίες για την σύσταση, για τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και την τοπογραφία της επιφάνειας [41].

Ακτίνες X: είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχει υψηλή ενέργεια και μικρό μήκος κύματος. Παράγονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των ηλεκτρονίων της προσπίπτουσας δέσμης με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δοκιμίου σε βάθος έως 2μm. Όταν ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει την εσωτερική στοιβάδα, τότε ένα άλλο, προερχόμενο από μια ενεργειακά υψηλότερη στοιβάδα καλύπτει το κενό, εκπέμποντας ακτινοβολία (ακτίνες X) [42].

Στα πλαίσια της πειραματικής εργασίας, λήφθηκαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JEOL JSM 6380-LV (επιταχυνόμενη τάσης 20 kV) φωτογραφίες δευτερογενών (SEI), και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES), οι οποίες έδωσαν πληροφορίες που αφορούν τη χημική σύσταση και την τοπογραφία της επιφάνειας και συνέβαλαν στη μελέτη και τον χαρακτηρισμό της ζώνης τήξης αλλά και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης των συγκολλημένων δοκιμίων. Επιπλέον, κατέστη εφικτή η ποιοτική και ημιποσοτική ανάλυση των στοιχείων που περιέχονταν στη μικροδομή, με χρήση της μικροανάλυσης ακτίνων X (EDS, Energy Dispersive System).

2.4.3 Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD)

Η περίθλαση ακτίνων X (XRD) είναι μια ισχυρή μη καταστροφική τεχνική, κατάλληλη για τον χαρακτηρισμό κρυσταλλικών υλικών. Παρέχει πληροφορίες για δομές, φάσεις, προτιμώμενο προσανατολισμό κρυστάλλων και άλλες δομικές παραμέτρους, όπως μέσο μέγεθος κόκκου ή κρυσταλλικότητα. Οι κορυφές περίθλασης ακτίνων X παράγονται από εποικοδομητική παρεμβολή μίας μονοχρωματικής δέσμης ακτίνων X, διασκορπισμένης σε συγκεκριμένες γωνίες από κάθε σύνολο επιπέδων πλέγματος σε κάθε δείγμα. Κατά συνέπεια, το μοτίβο περίθλασης ακτίνων X είναι το δακτυλικό αποτύπωμα των περιοδικών ατομικών διατάξεων σε ένα δεδομένο υλικό [43].

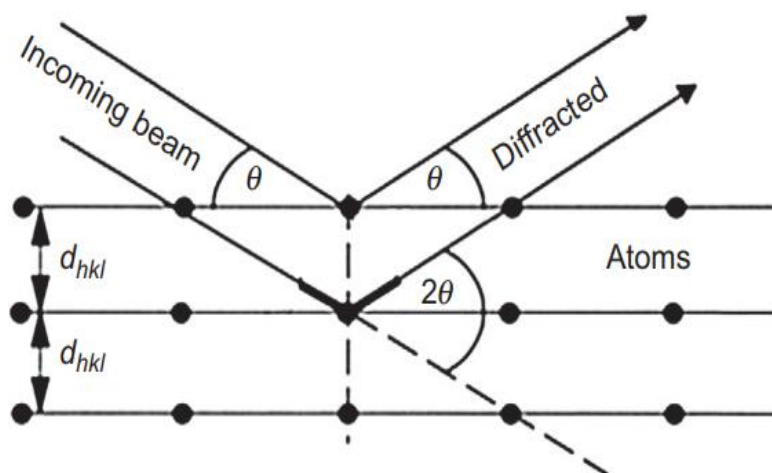
Οι κρύσταλλοι είναι κανονικές σειρές ατόμων, ενώ οι ακτίνες X μπορούν να θεωρηθούν ως κύματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα κρυσταλλικά άτομα διασκορπίζουν τις προσπίπτουσες ακτίνες X, κυρίως μέσω της αλληλεπίδρασης με τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως ελαστική σκέδαση και το ηλεκτρόνιο είναι γνωστό ως σκεδαστής. Μια κανονική διάταξη σκεδαστών

παράγει μια κανονική διάταξη σφαιρικών κυμάτων. Στην πλειονότητα των κατευθύνσεων, αυτά τα κύματα αλληλοεξουδετερώνονται μέσω καταστροφικών παρεμβολών, ωστόσο, προσθέτουν μερικές συγκεκριμένες κατευθύνσεις, όπως καθορίζεται από το νόμο του Bragg:

$$2 * d * \sin\theta = n * \lambda$$

όπου d η απόσταση μεταξύ δύο κρυσταλλικών επιπέδων, θ η γωνία Bragg, n η τάξη ανάκλασης και λ το μήκος κύματος [44].

Μια τυπική διάταξη περίθλασης ακτίνων-X αποτελείται από πηγή ακτίνων-X με συγκεκριμένο μήκος κύματος, γωνιόμετρο και ανιχνευτή των ακτίνων. Με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται η καταγραφή της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας 2θ , οπότε από την εξίσωση του Bragg υπολογίζονται οι πλεγματικές αποστάσεις [45].



Εικόνα 20 : Απεικόνιση της περίθλασης ακτίνων X στα κρυσταλλικά επίπεδα [45]

2.5 Αξιολόγηση μηχανικών ιδιοτήτων

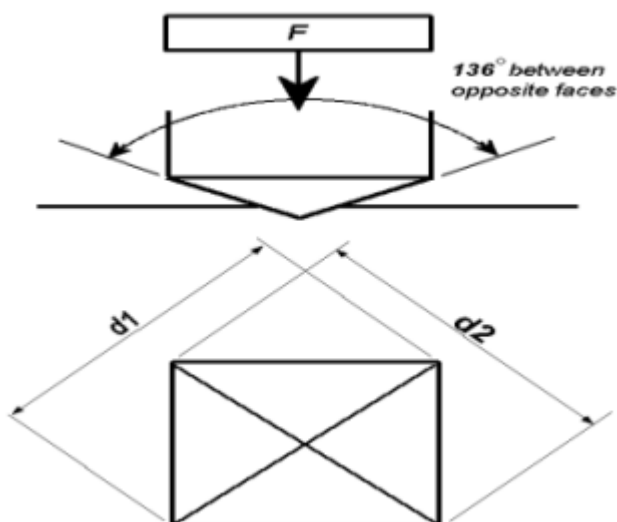
Οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλημένων δειγμάτων εκτιμήθηκαν αρχικά με τη μέτρηση της μικροσκληρότητας τους καθώς και με δοκιμές εφελκυσμού.

2.5.1 Μικροκληρομέτρηση Vickers

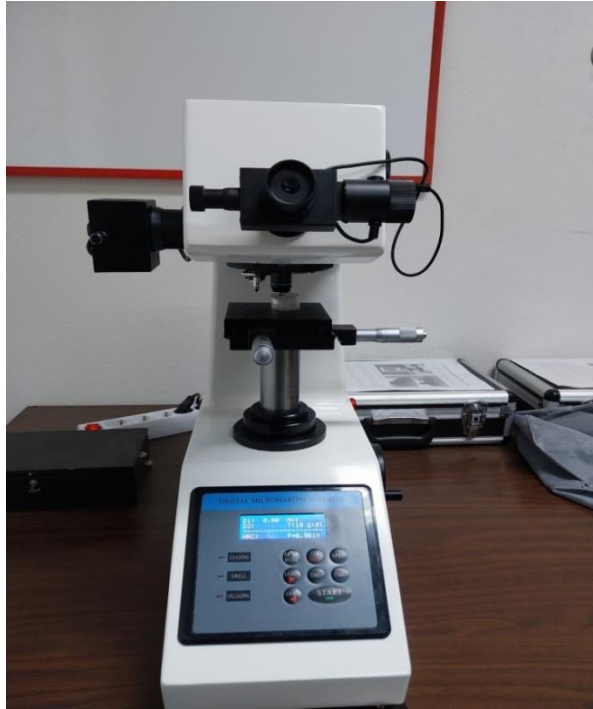
Η μικροσκληρομέτρηση Vickers χρησιμοποιεί έναν διεισδυτή σχήματος κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με διαμαντένια κορυφή γωνίας $\alpha = 136^\circ$, ο οποίος πιέζεται με δύναμη στην επιφάνεια του μετάλλου. Η δύναμη εφαρμόζεται στο δείγμα και η επαφή με το δοκίμιο διαρκεί 10 – 20 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι δύο διαγώνιοι και η σκληρότητα κατά Vickers υπολογίζεται από τον τύπο

$$HV = \frac{1854,4 \times P}{d^2}$$

με **d** τον μέσο όρο των δύο διαγωνίων και **P** την ασκούμενη δύναμη [46], [47].



Εικόνα 21 : Σκληρομέτρηση με τη μέθοδο Vickers [46]



Εικόνα 22 : Μικροσκληρόμετρο Vickers HV-1000Z

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας των δοκιμίων έγινε σε αυτόματο μικροσκληρόμετρο Vickers HV-1000Z με δυνατότητα εφαρμογής βάρους 10-1000g. Εφαρμόστηκε δύναμη 0,49N, ο χρόνος διείσδυσης ήταν 10sec με το βήμα ανά μέτρηση να ανέρχεται στα 250μm. Μετρήθηκε η σκληρότητα στο μέταλλο βάσης, στην ζώνη τήξης καθώς και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

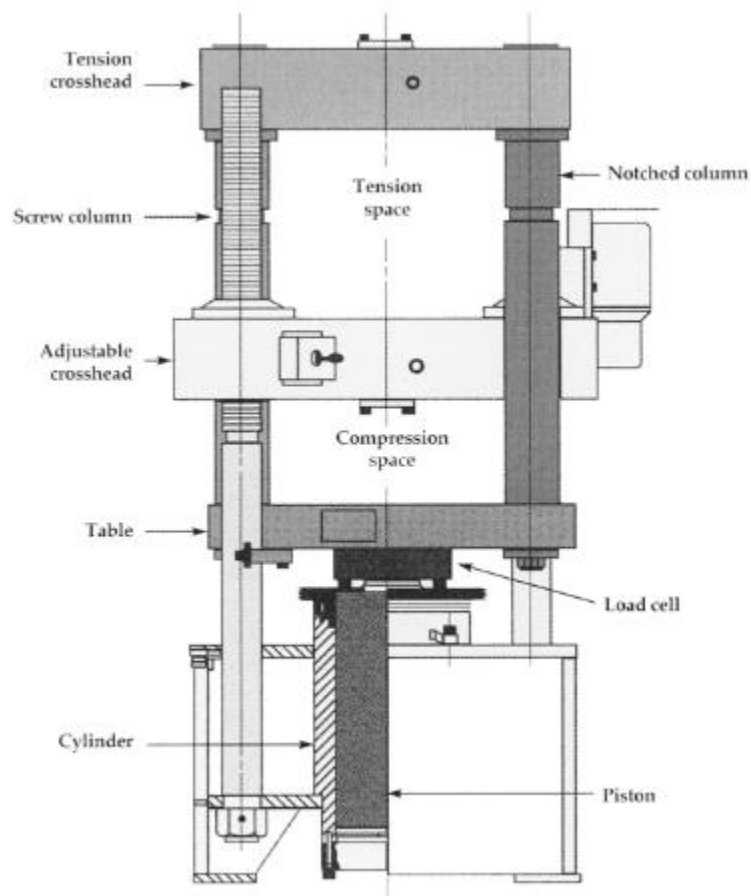
2.5.2 Δοκιμές εφελκυσμού

Εφελκυσμός ονομάζεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που τείνουν να το επιμηκύνουν. Ο εφελκυσμός είναι μία από τις δύο μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος.

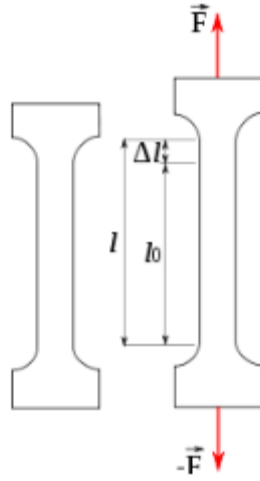
Με τη δοκιμή του εφελκυσμού μπορεί να αποκτηθεί μία πολύ καλή εικόνα για τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού, αφού μπορούν να υπολογιστούν τα MPa ή τα kN

όπου αυτό σπάει και κατ' επέκταση να υπολογιστεί το όριο διαρροής και το όριο θραύσης [48].

Τα αλουμινένια ελάσματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού σε μια μηχανή δοκιμών γενικής χρήσης Instron 4482 με ρυθμό φόρτισης 1 mm/min.



Εικόνα 23 : Εξαρτήματα μηχανής δοκιμών [48]



Εικόνα 24 : Αναπαράσταση ασκούμενων δυνάμεων κατά τον εφελκυσμό[48]



Εικόνα 25 : Σύστημα δοκιμής εφελκυσμού



Εικόνα 26 : Μηχανή εφελκυσμού Instron 4482



Εικόνα 27 : Συγκολλημένα ελάσματα στη μηχανή εφελκυσμού

2.6 Παρατήρηση δειγμάτων στο στερεοσκόπιο

Οι επιφάνειες θραύσης παρατηρήθηκαν τελικά σε στερεοσκόπιο ZEISS STEMI DV4.



Εικόνα 28 : Στερεοσκόπιο ZEISS STEMI DV4

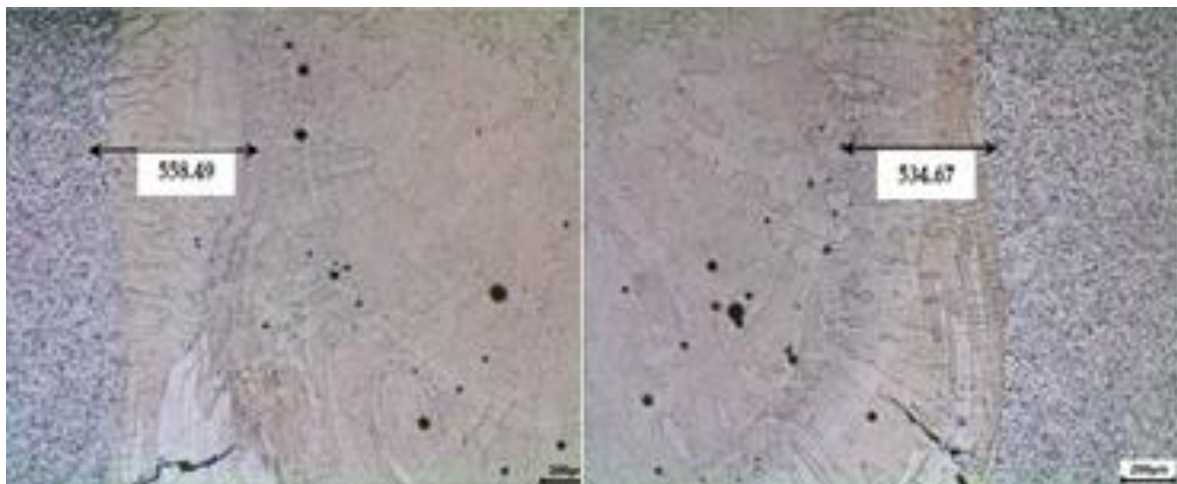
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Οπτική μικροσκοπία

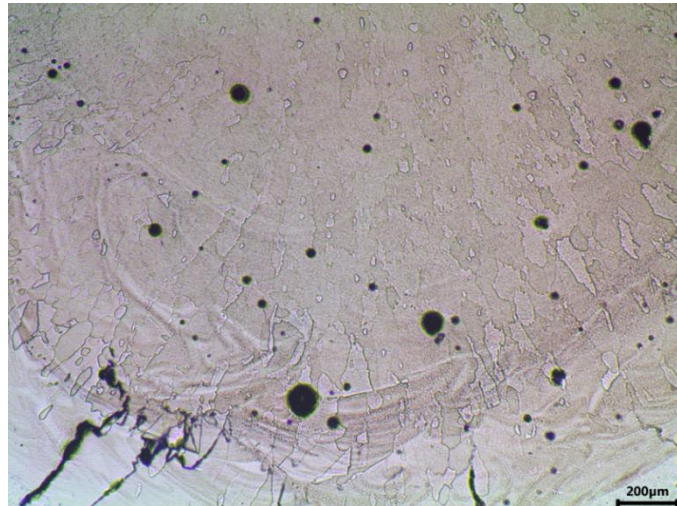
Παρακάτω παρατίθενται μικρογραφίες από τα δείγματα που εξετάστηκαν υπό πολωμένο και μη πολωμένο φως.

3.1.1 Δοκίμιο Α (P = 3500W)

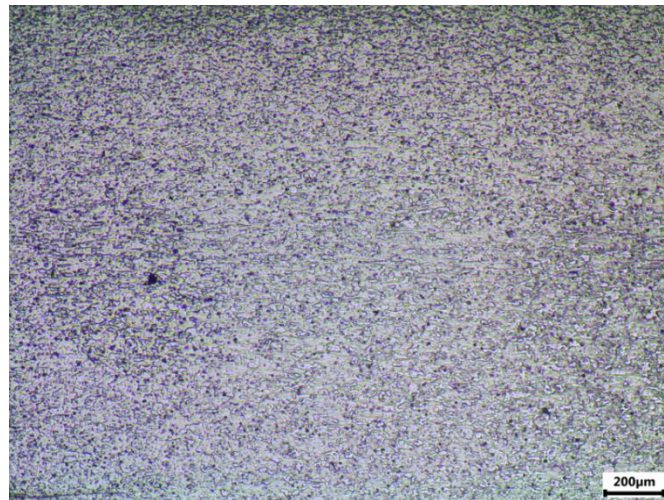
3.1.1.1 Μικρογραφίες σε μη πολωμένο φως



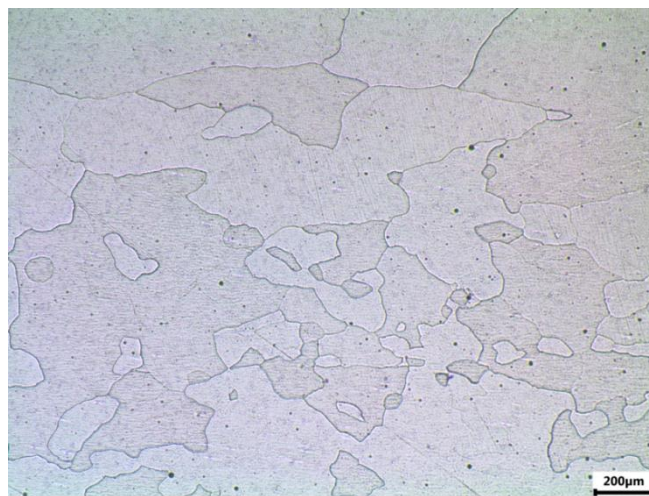
Εικόνα 29 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 30 : Ζώνη τήξης

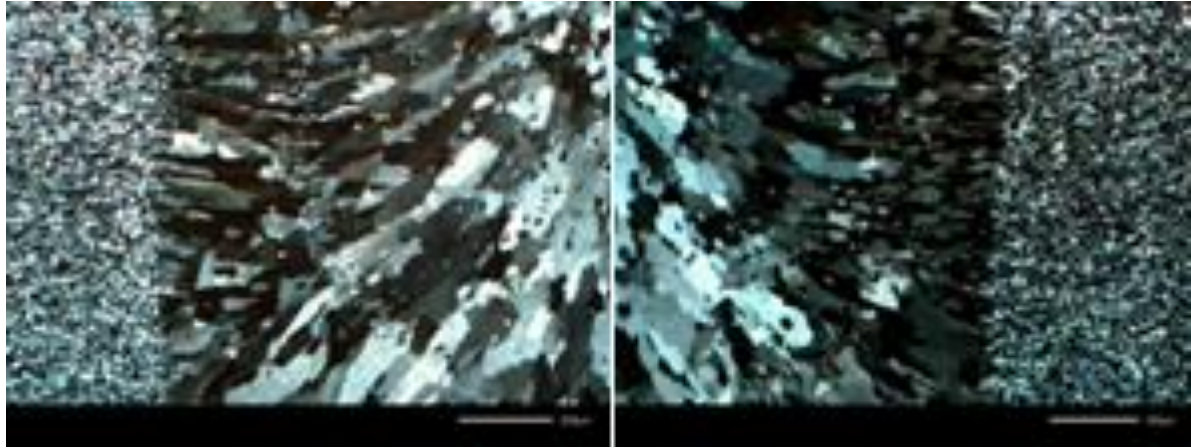


Εικόνα 31 : Μικροδομή κράματος 5754

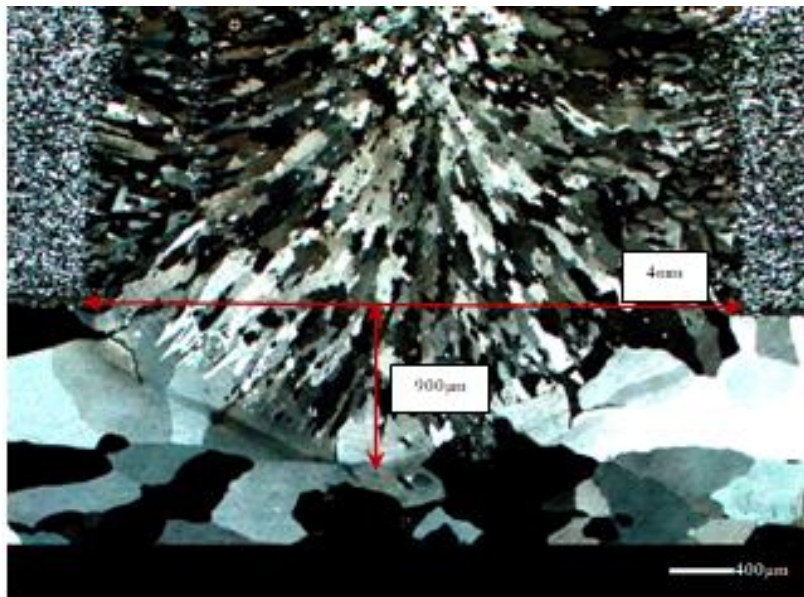


Εικόνα 32 : Μικροδομή κράματος 6063

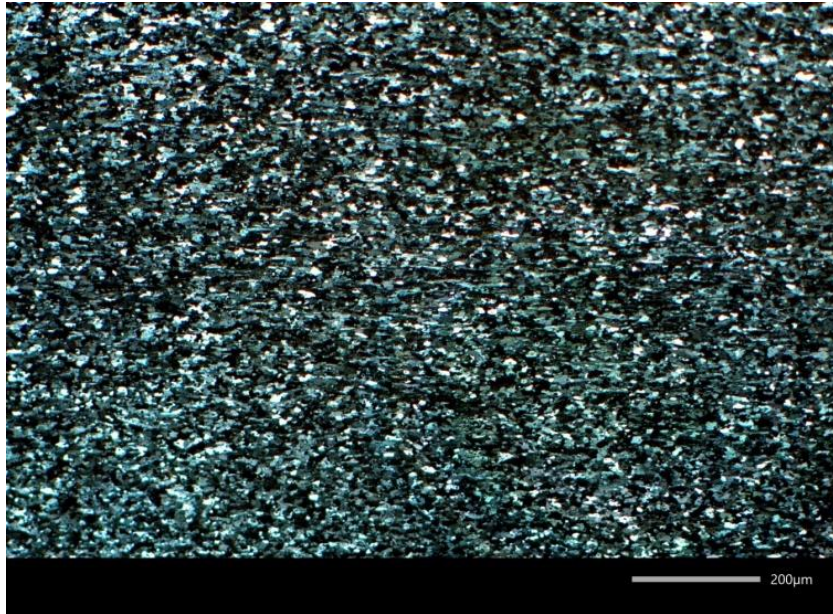
3.1.1.2 Μικρογραφίες σε πολωμένο φως



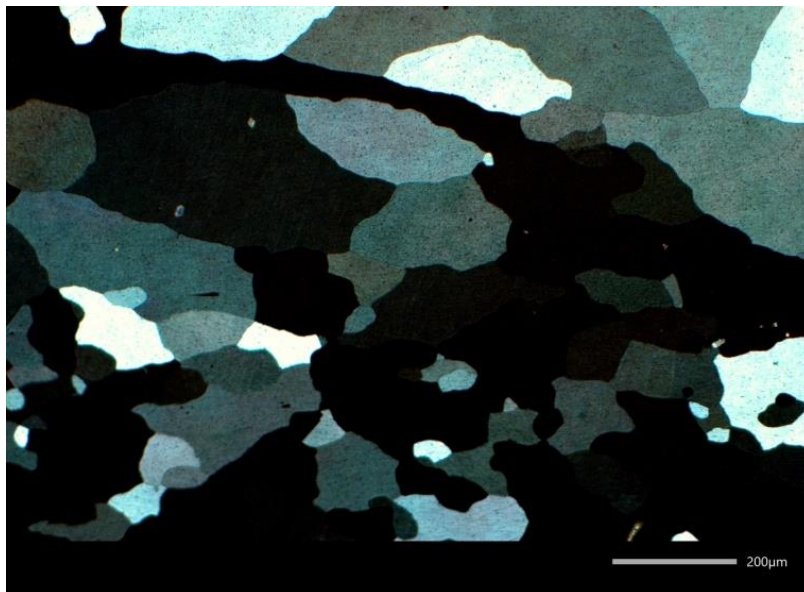
Εικόνα 33 : Θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 34 : Ζώνη τήξης



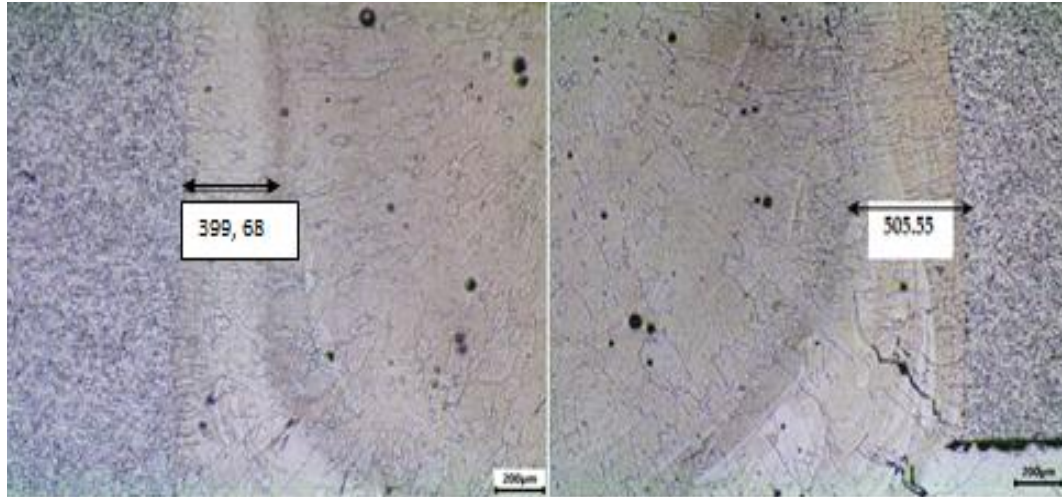
Εικόνα 35 : Μικροδομή κράματος 5754



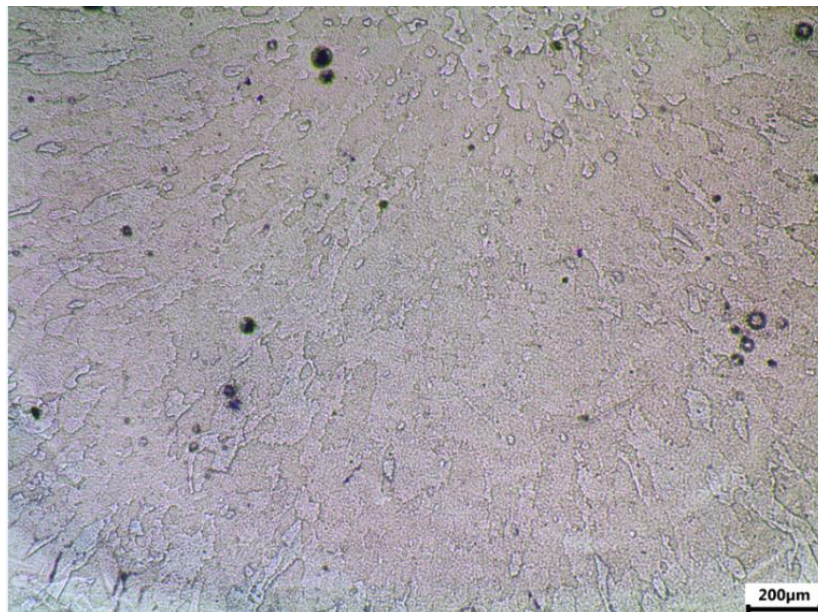
Εικόνα 36 : Μικροδομή κράματος 6063

3.1.2 Δοκίμιο Β (P = 3000W)

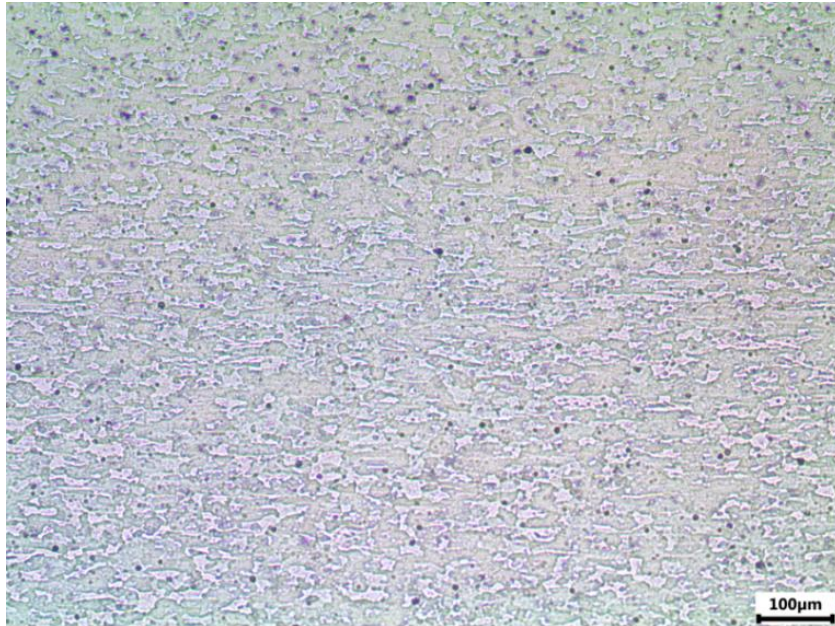
3.1.2.1 Μικρογραφίες σε μη πολωμένο φως



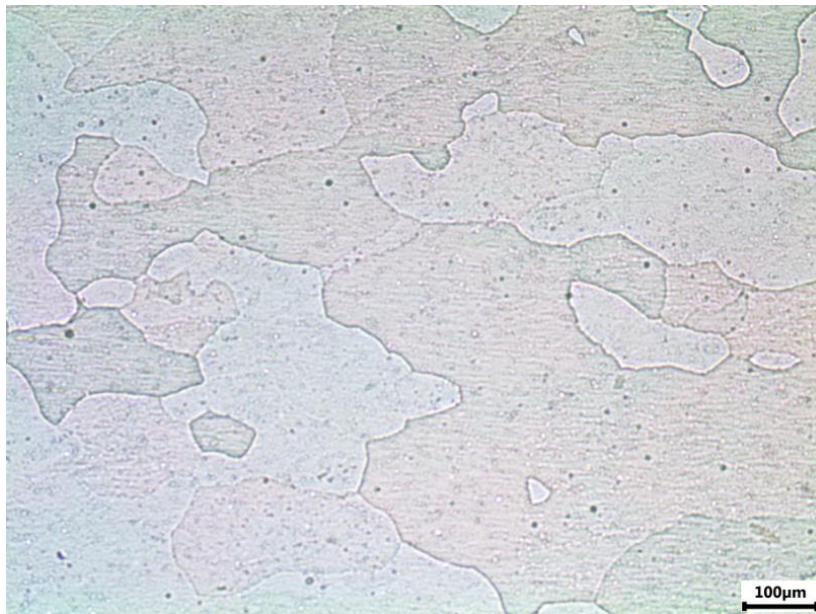
Εικόνα 37 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 38 : Ζώνη τήξης

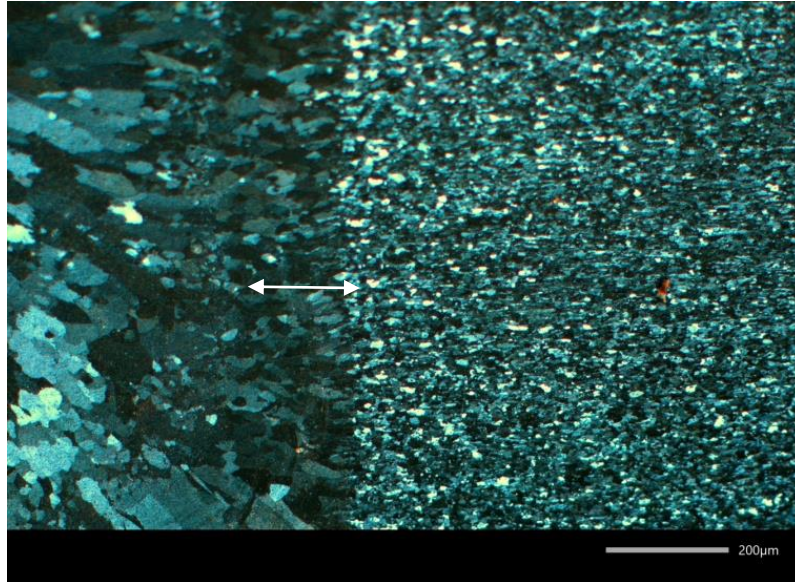


Εικόνα 39 : Μικροδομή κράματος 5754

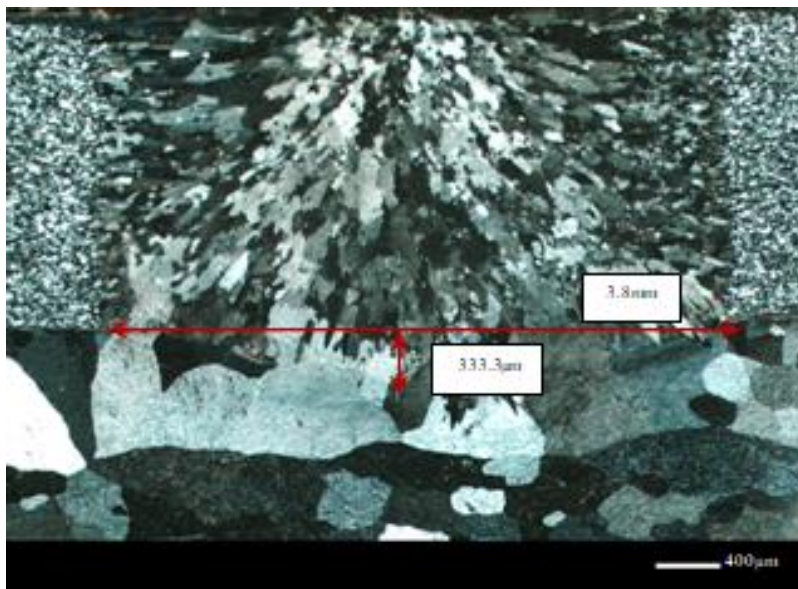


Εικόνα 40 : Μικροδομή κράματος 6063

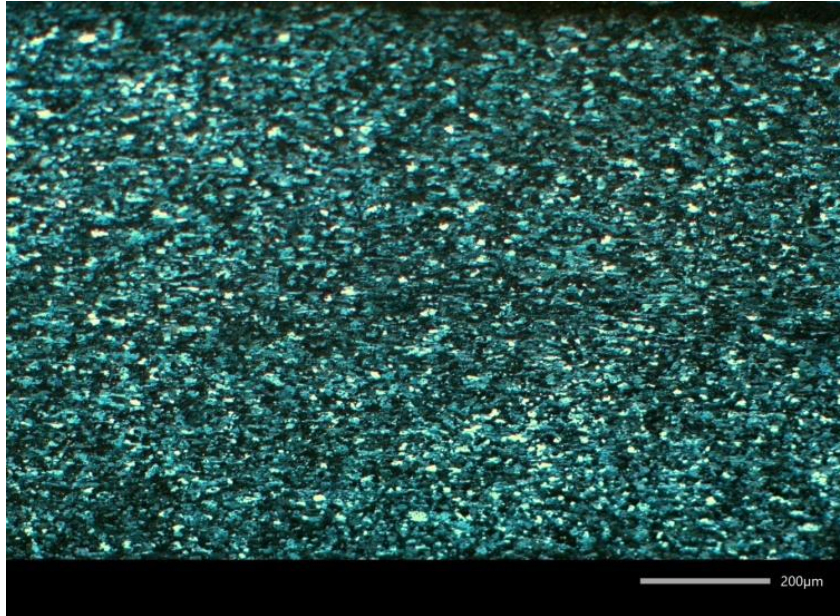
3.1.2.2 Μικρογραφίες σε πολωμένο φως



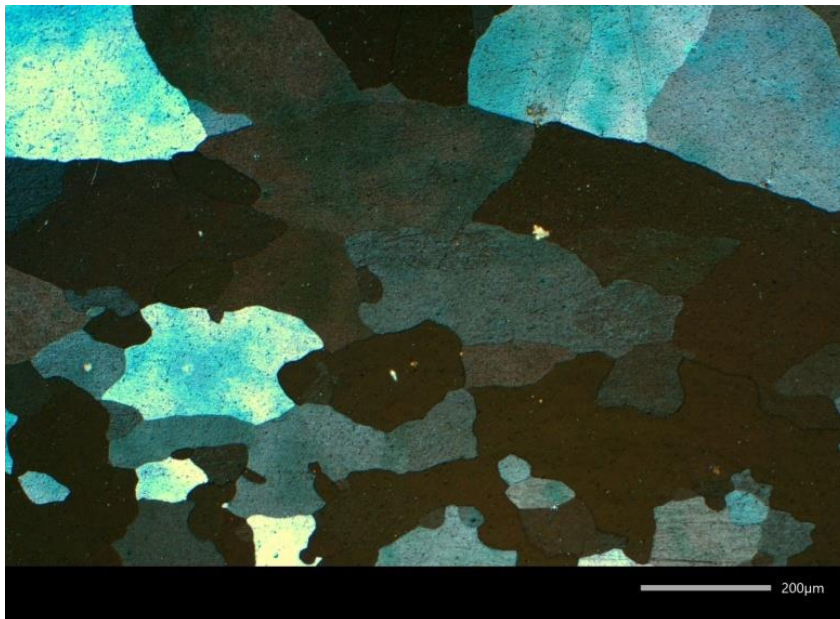
Εικόνα 41 : Θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 42 : Ζώνη τήξης και θερμικά επηρεασμένη ζώνη



Εικόνα 43 : Μικροδομή κράματος 5754

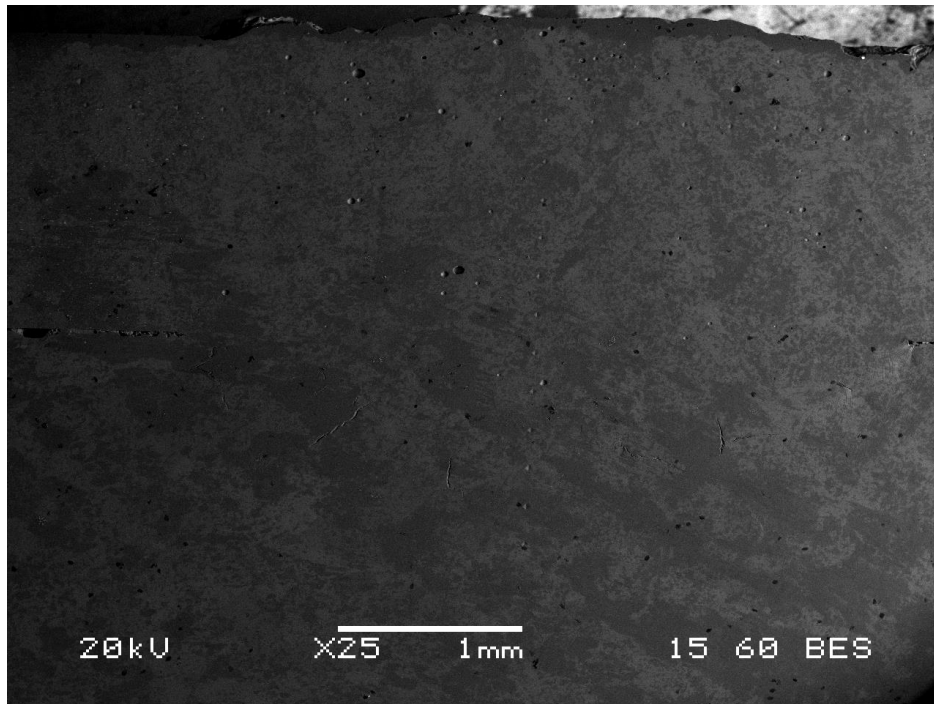


Εικόνα 44 : Μικροδομή κράματος 6063

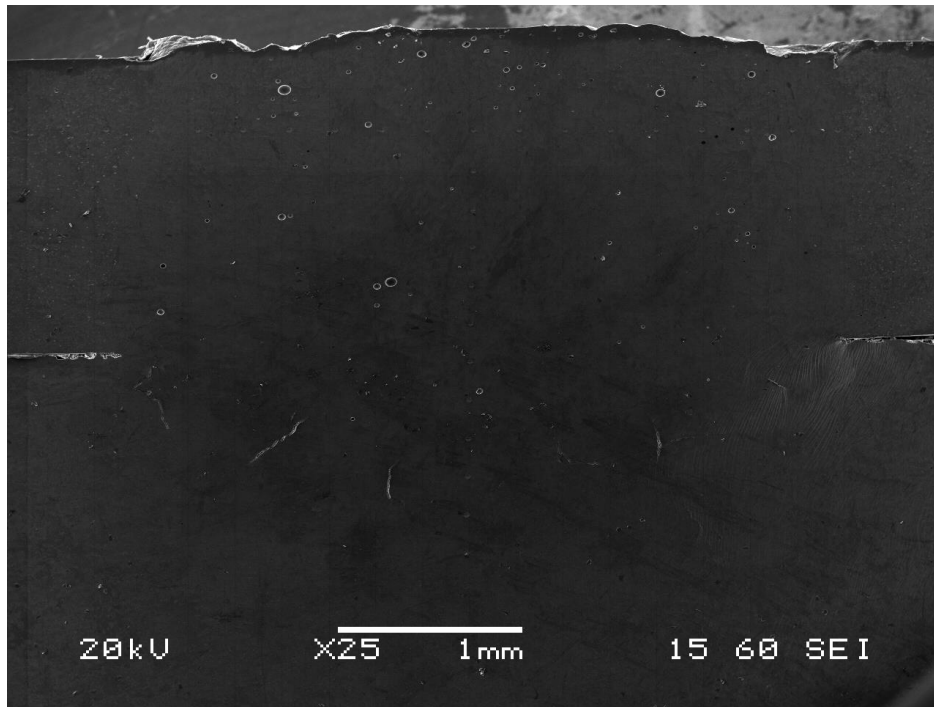
3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης

Παρακάτω παρατίθενται μικρογραφίες δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, οι οποίες λήφθηκαν από κάθε δοκίμιο μέσω του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) και στοιχειακές ποιοτικές-ημιποσοτικές αναλύσεις.

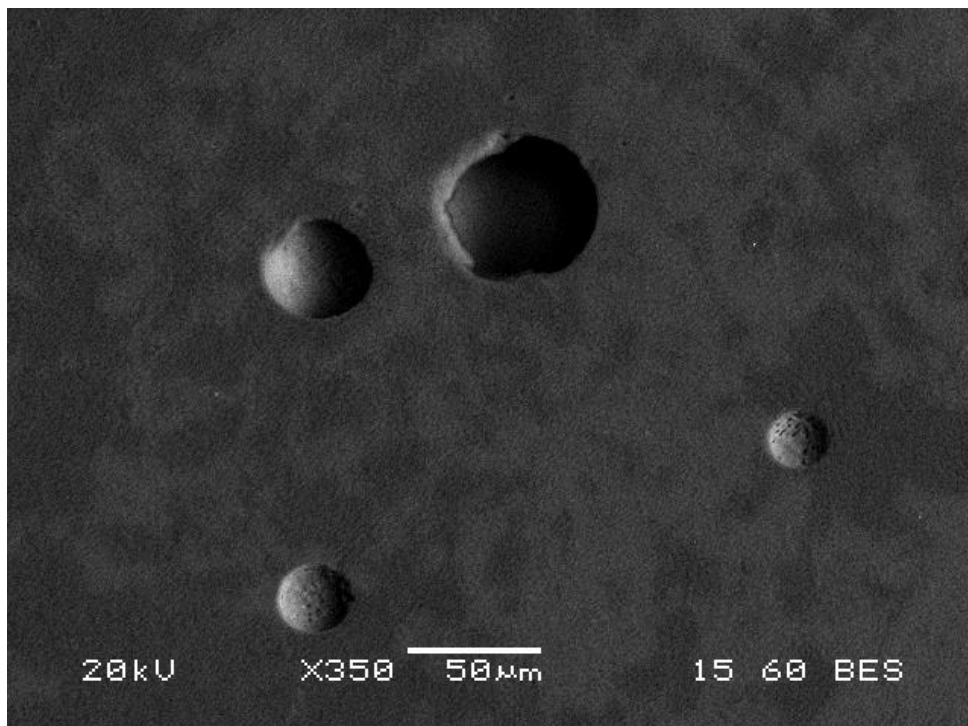
3.2.1 Δοκίμιο Α (P = 3500W)



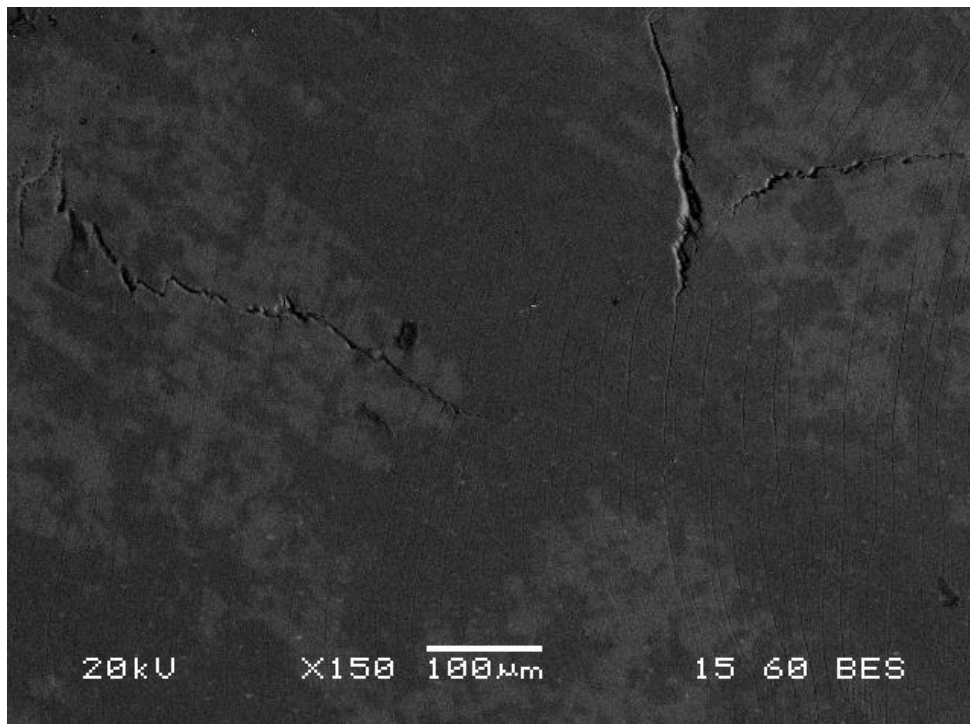
Εικόνα 45 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου.



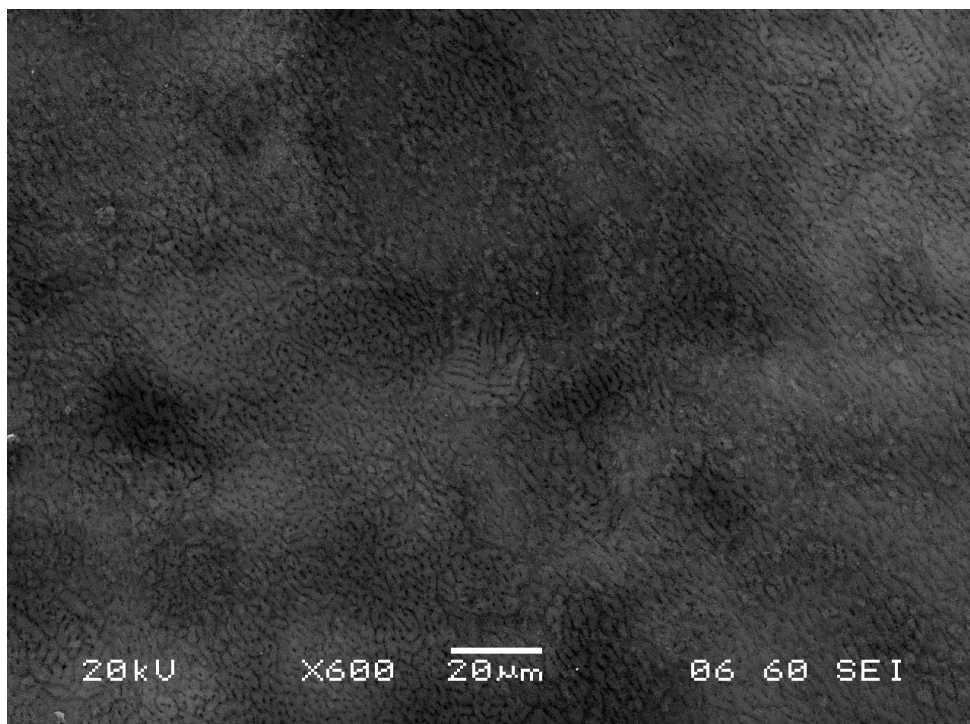
Εικόνα 46 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου.



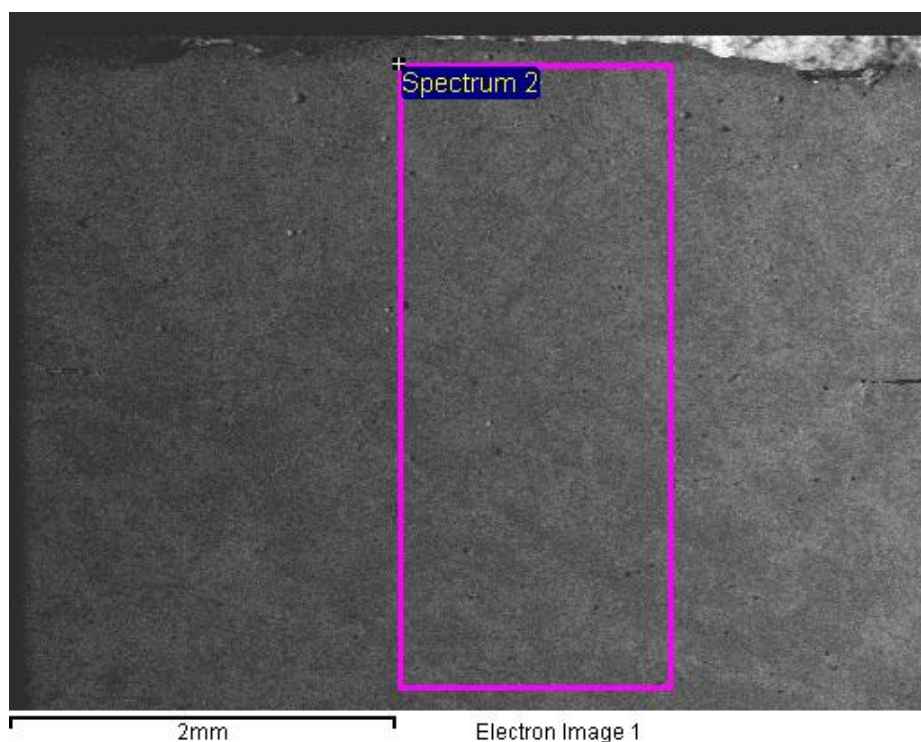
Εικόνα 47 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Πορώδες στη ζώνη τήξης



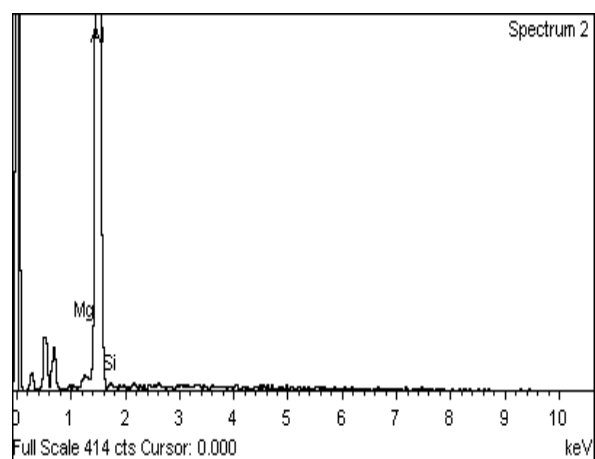
Εικόνα 48 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Μικρορωγμές στη ζώνη τήξης



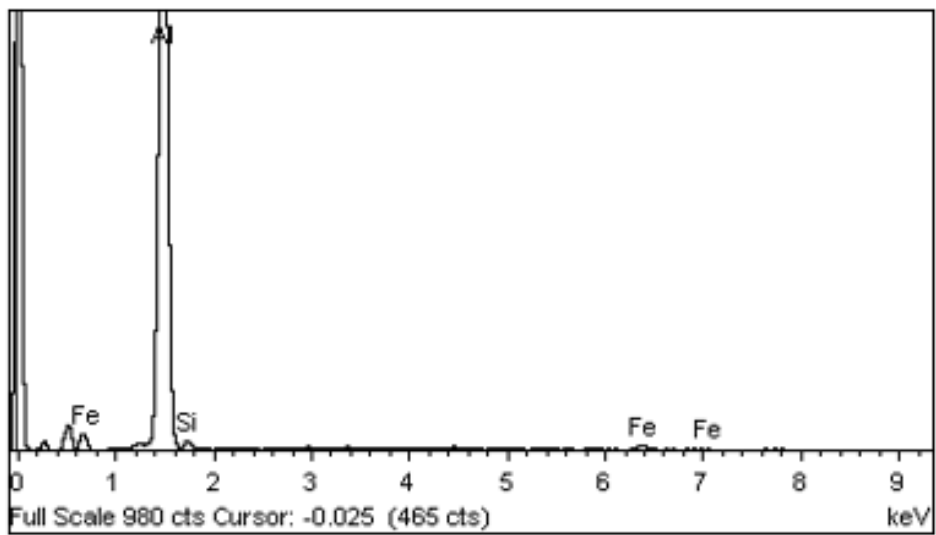
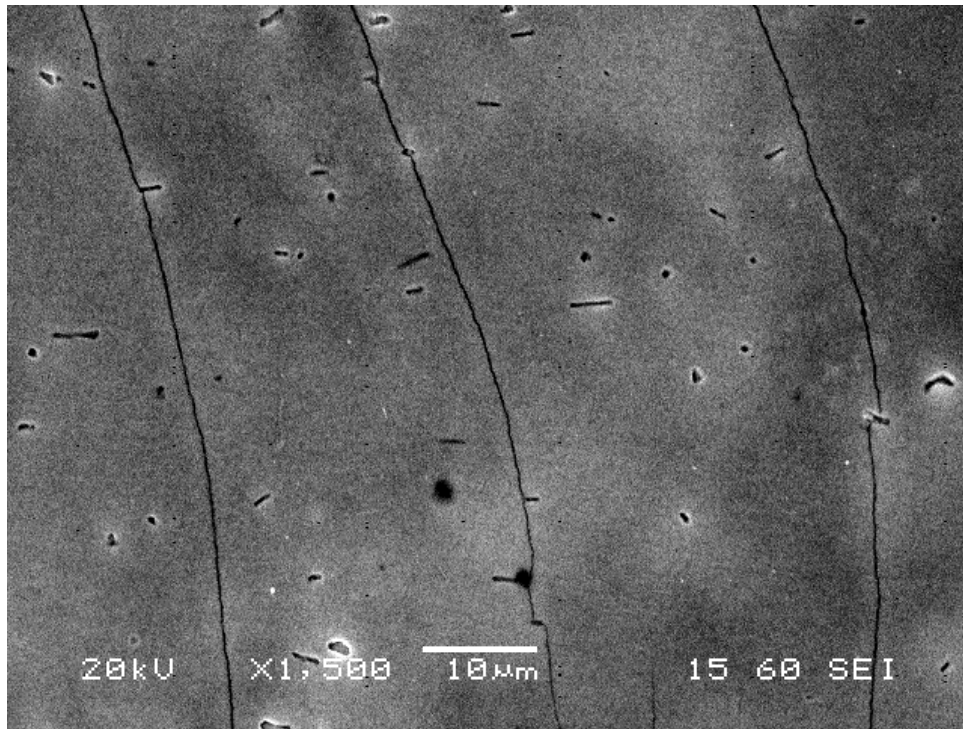
Εικόνα 49 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Δενδριτική ανάπτυξη στη ζώνη τήξης



Element	Weight%	Atomic%
Mg K	1.02	1.13
Al K	97.57	97.52
Si K	1.41	1.35
Totals	100.00	

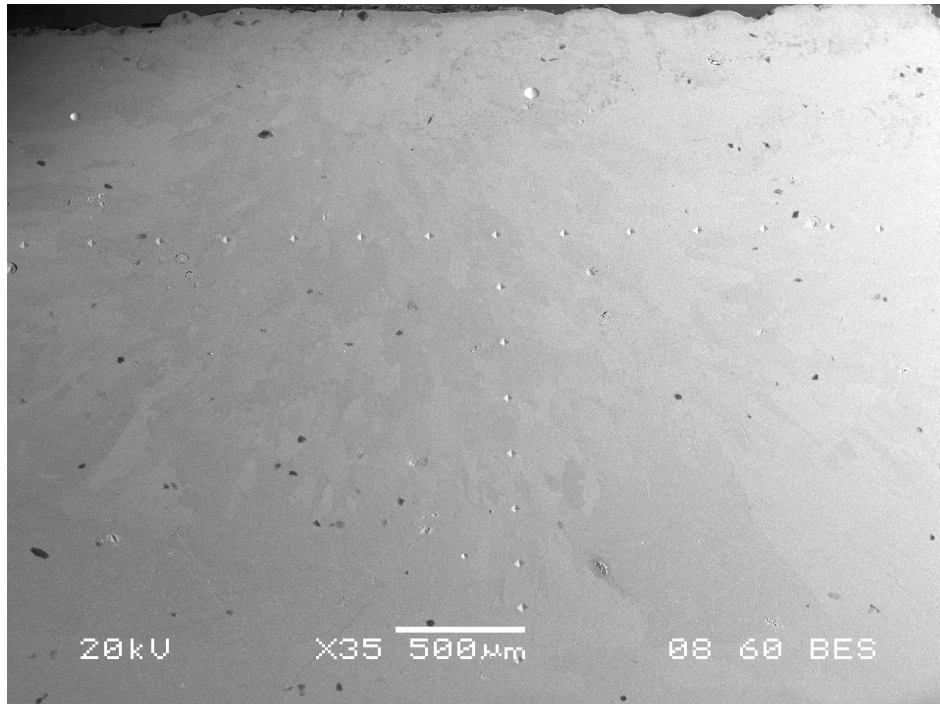


Εικόνα 50 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση.

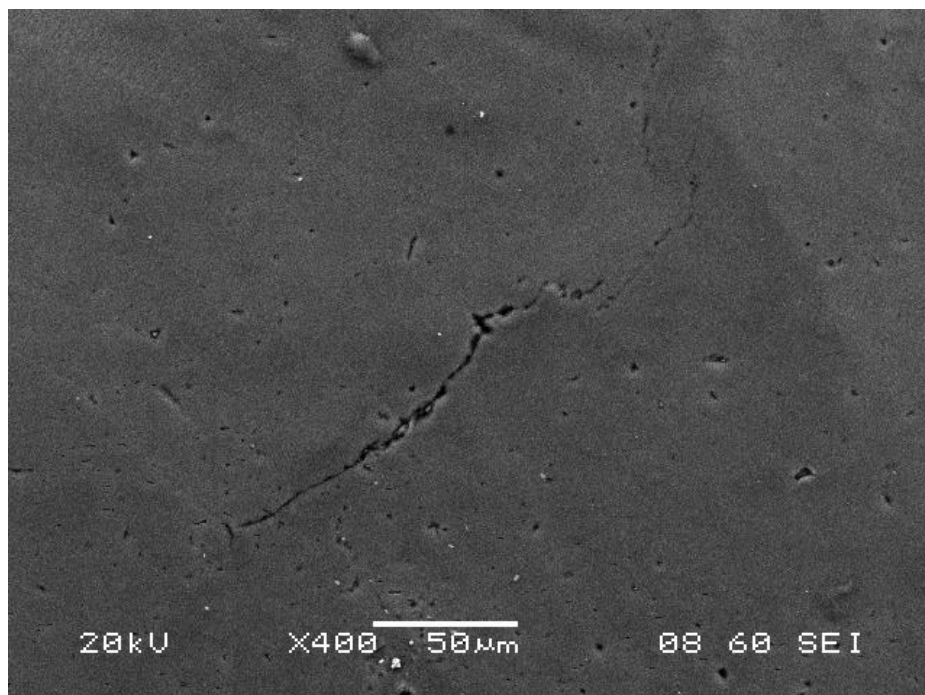


Εικόνα 51 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). BM AA6063. Παρουσία ενώσεων AlFeSi

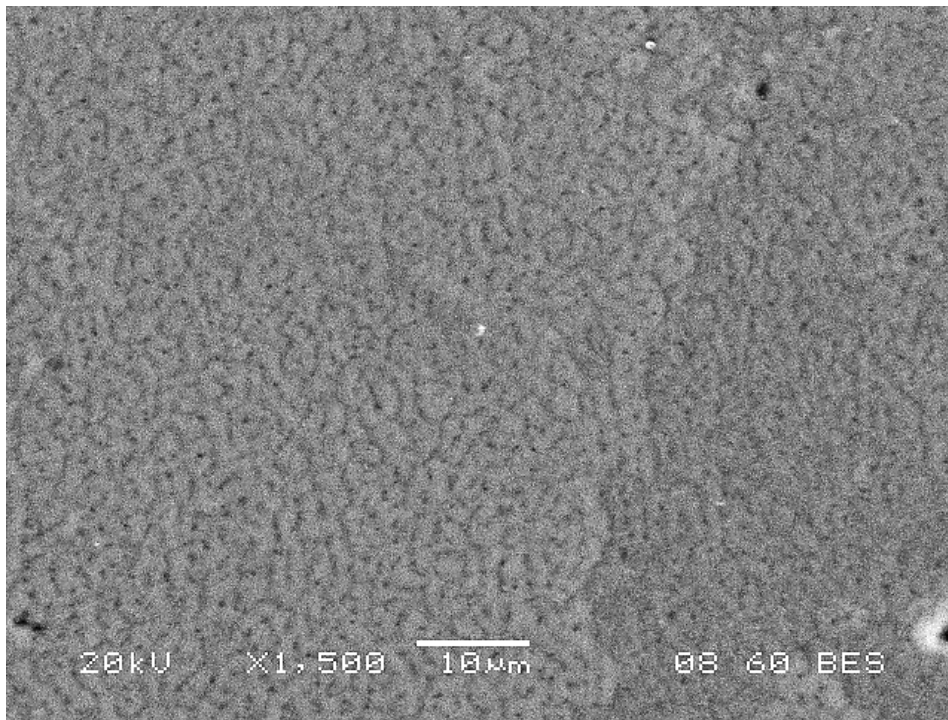
3.2.2 Δοκίμιο Β (P = 3000W)



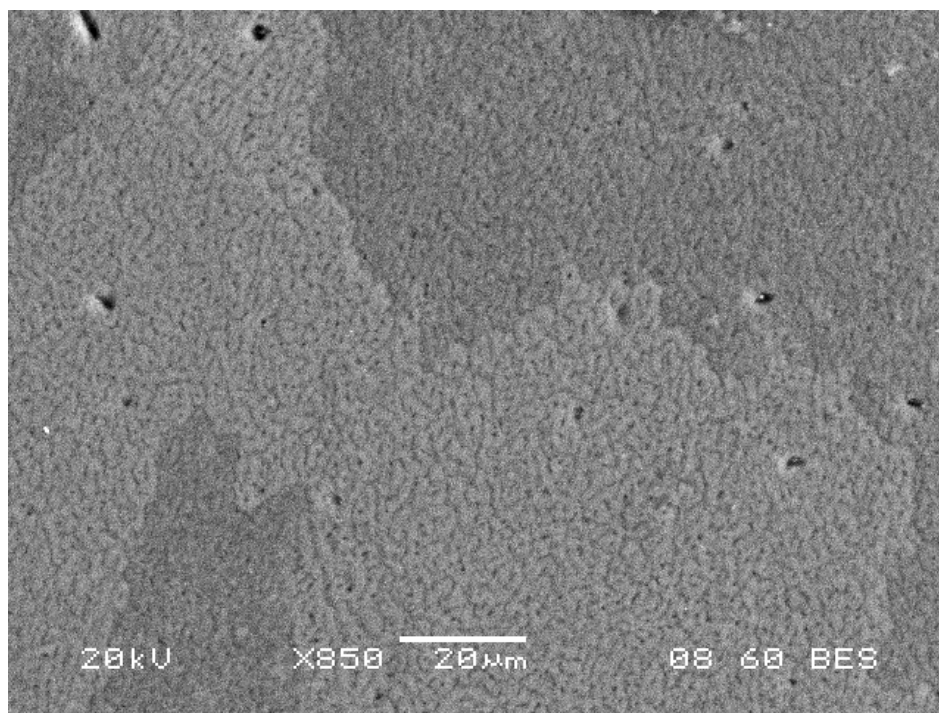
Εικόνα 52 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Γενικευμένη εικόνα του δοκιμίου.



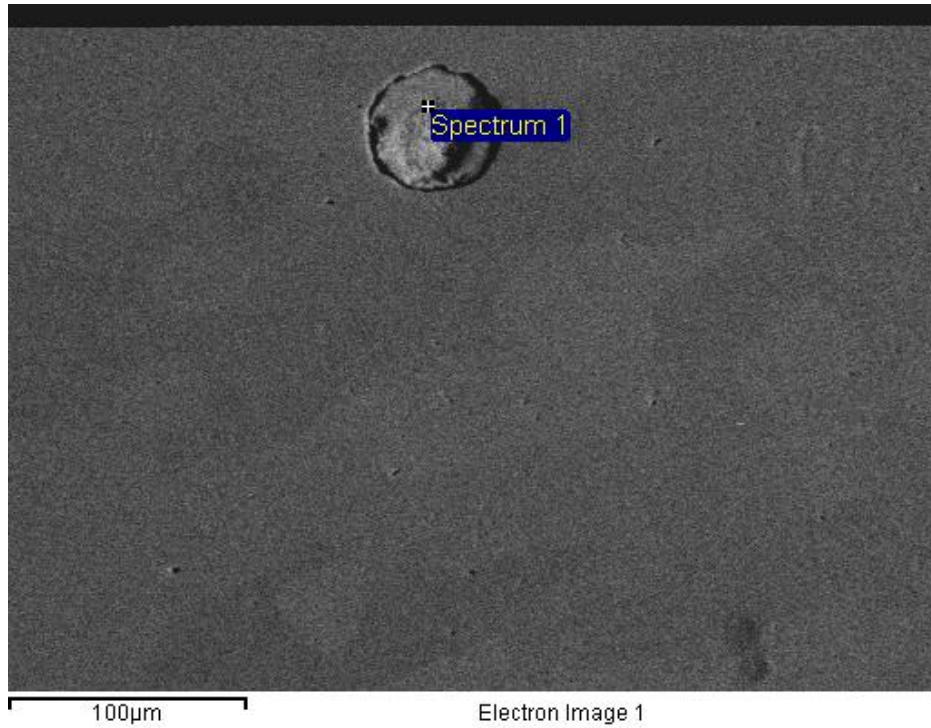
Εικόνα 53 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI). Μικρορωγμές στη ζώνη τήξης



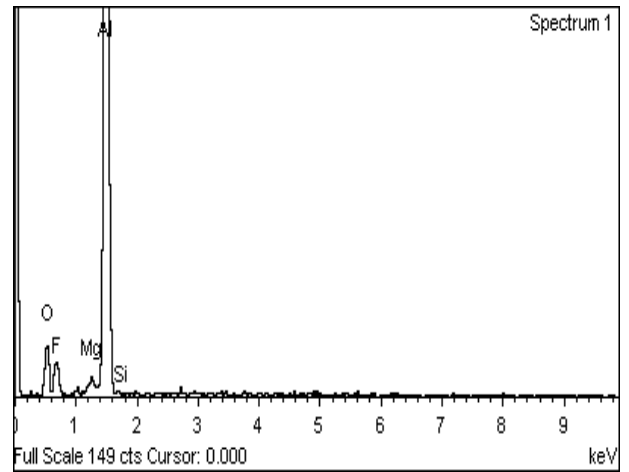
Εικόνα 55 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Ζώνη τήξης



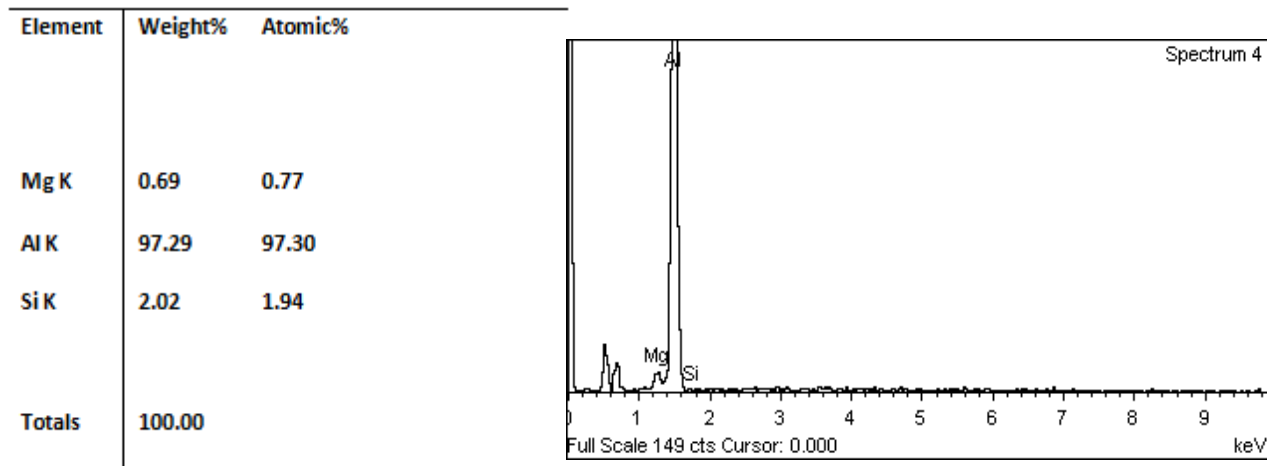
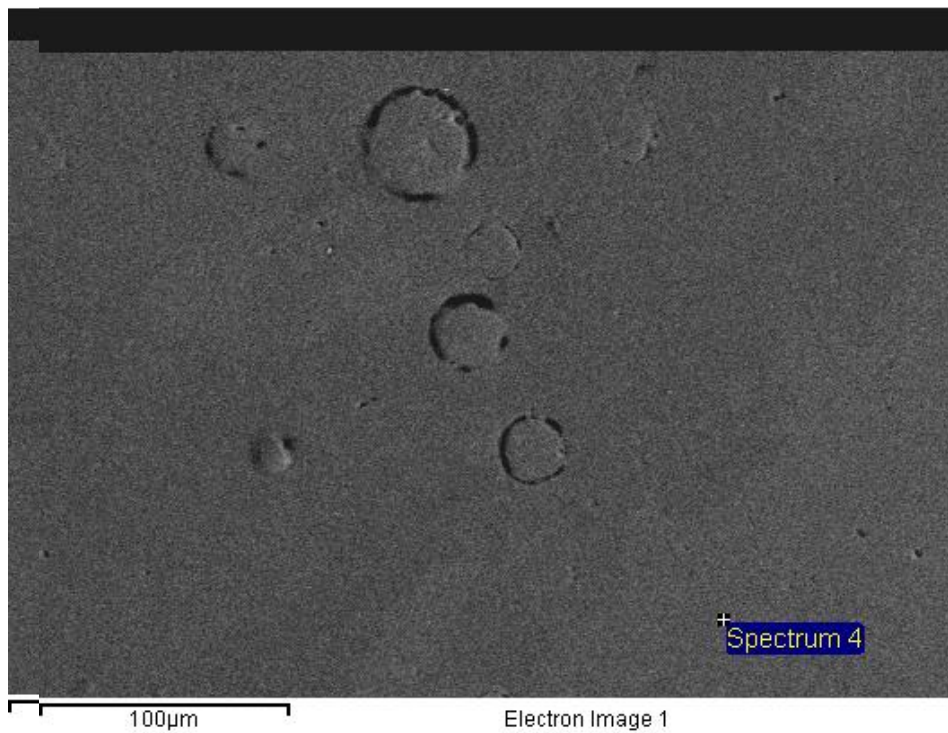
Εικόνα 54 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Ζώνη τήξης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση



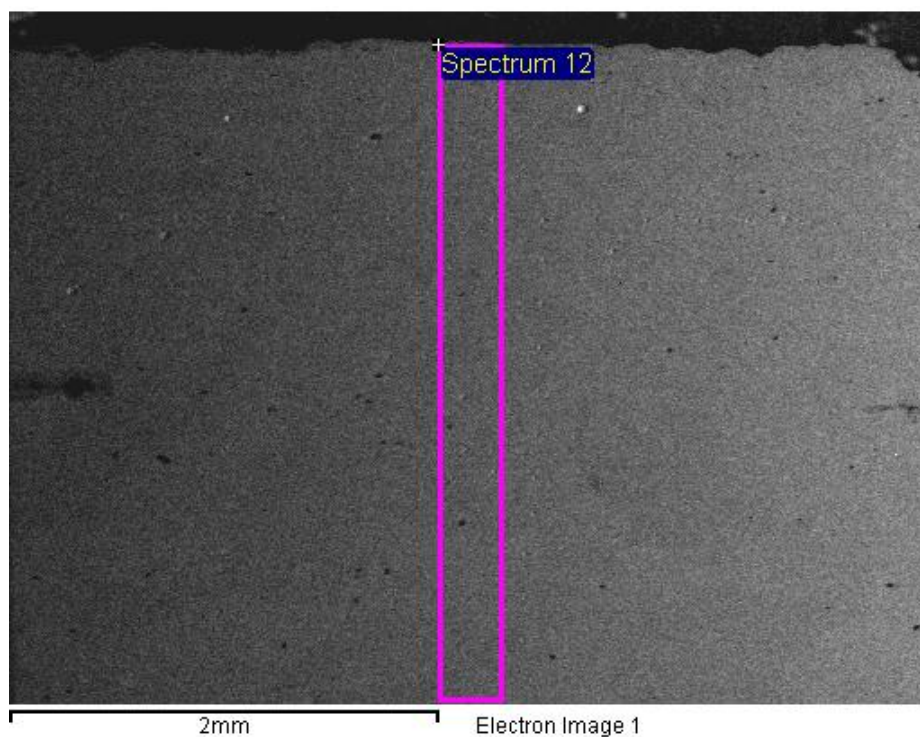
Element	Weight%	Atomic%
OK	20.05	27.97
FK	16.61	19.52
MgK	0.99	0.91
AlK	62.66	51.84
SiK	-0.30	-0.24
Totals	100.00	



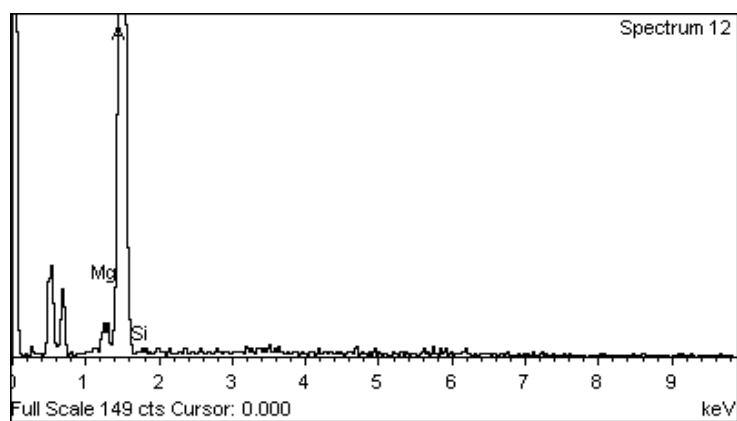
Εικόνα 56 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση πορώδους.



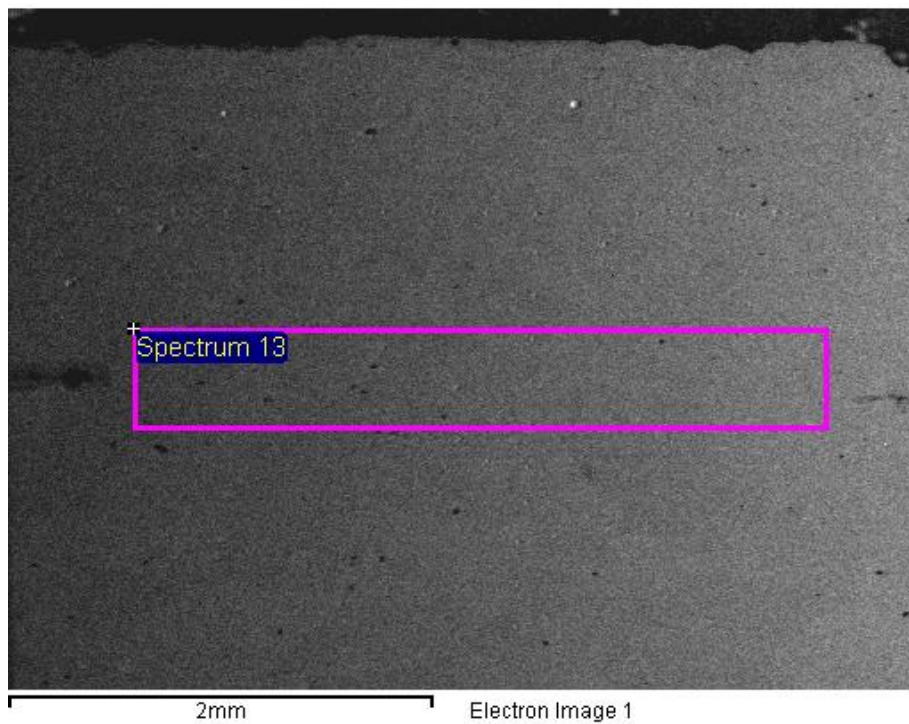
Εικόνα 57 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση.



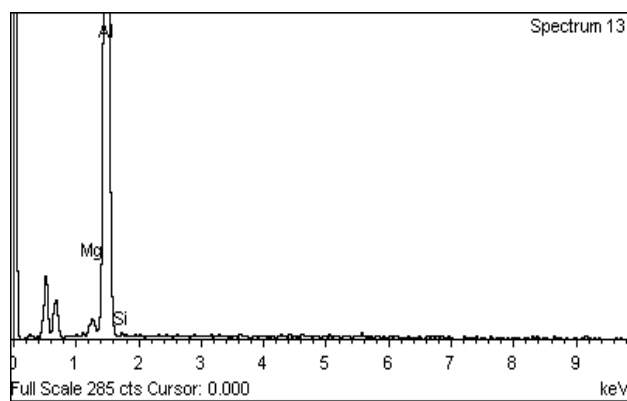
Element	Weight%	Atomic%
Mg K	2.00	2.21
Al K	97.18	97.00
Si K	0.83	0.79
Totals	100.00	



Εικόνα 58 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση

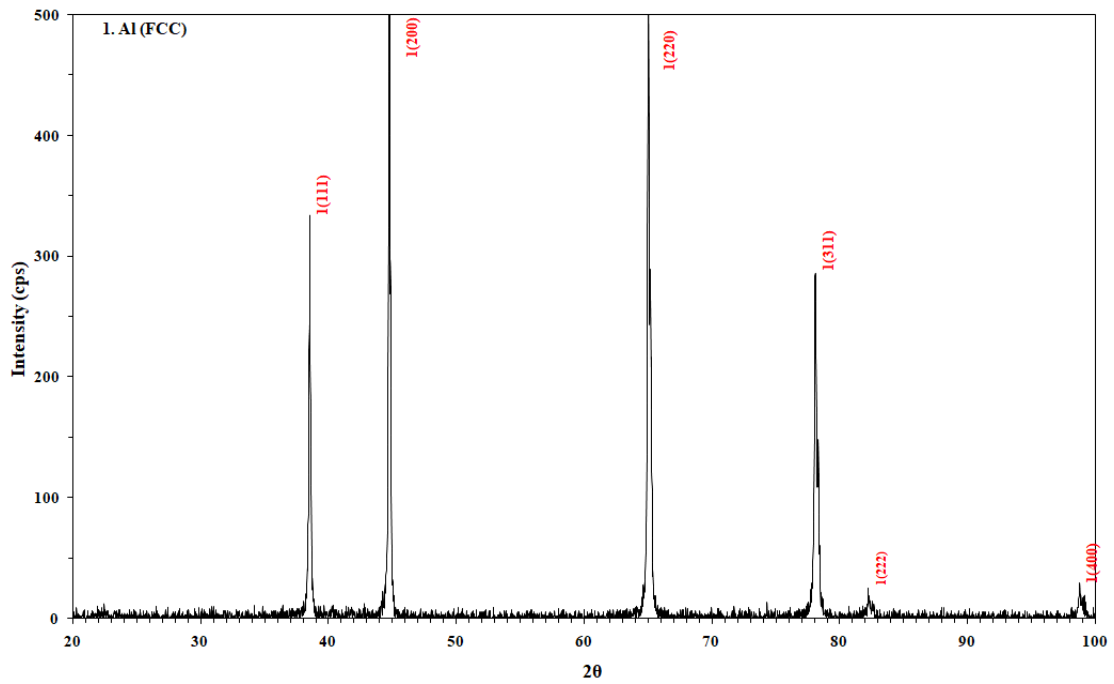


Element	Weight%	Atomic%
Mg K	1.93	2.14
Al K	97.52	97.33
Si K	0.55	0.53
Totals	100.00	

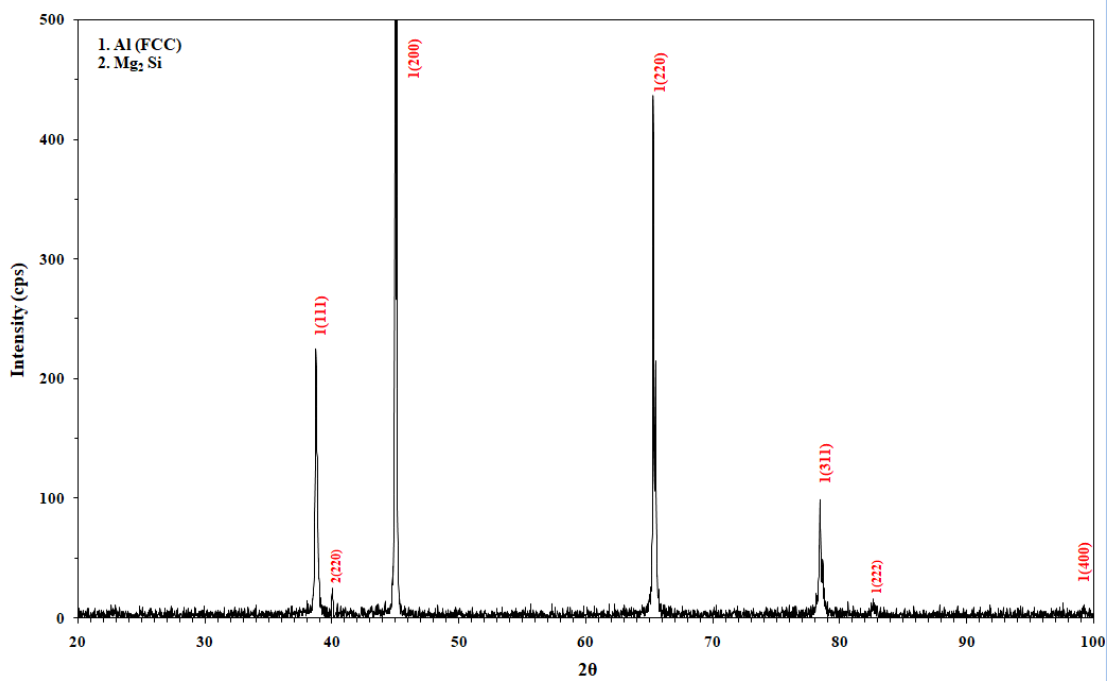


Εικόνα 59 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Στοιχειακή ανάλυση.

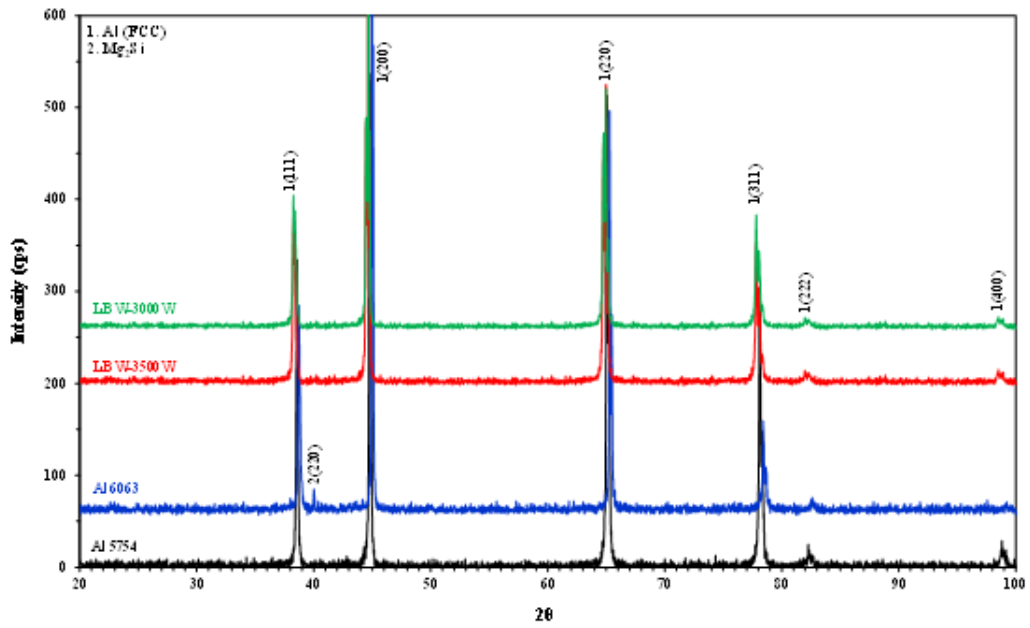
3.3 Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD)



Εικόνα 60 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για το κράμα 5754

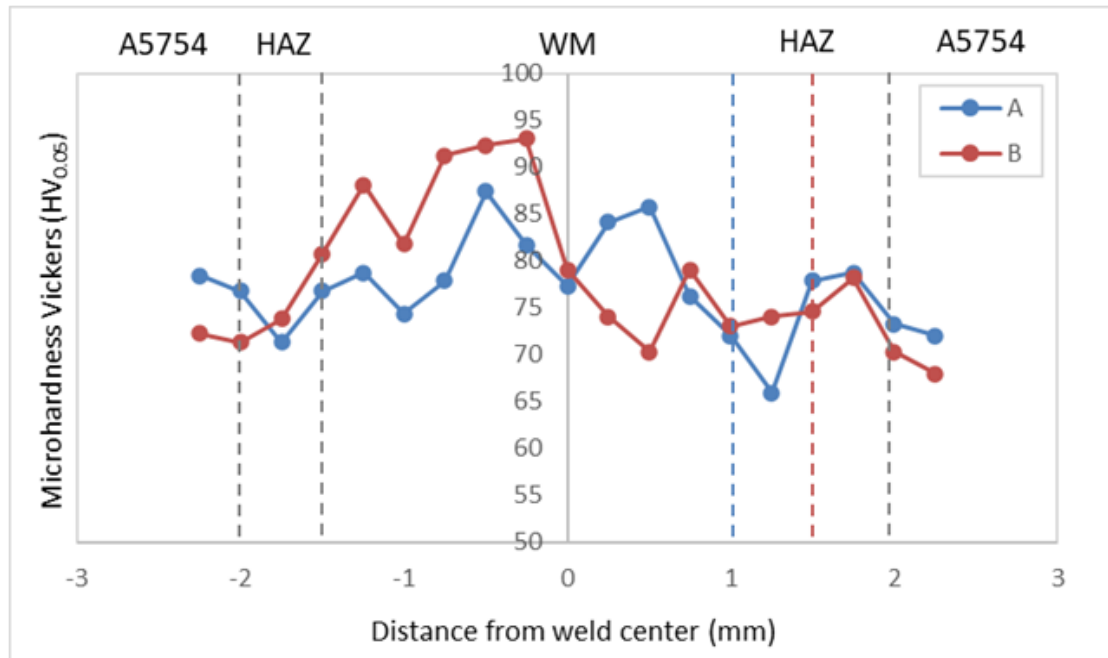


Εικόνα 61 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για το κράμα 6063



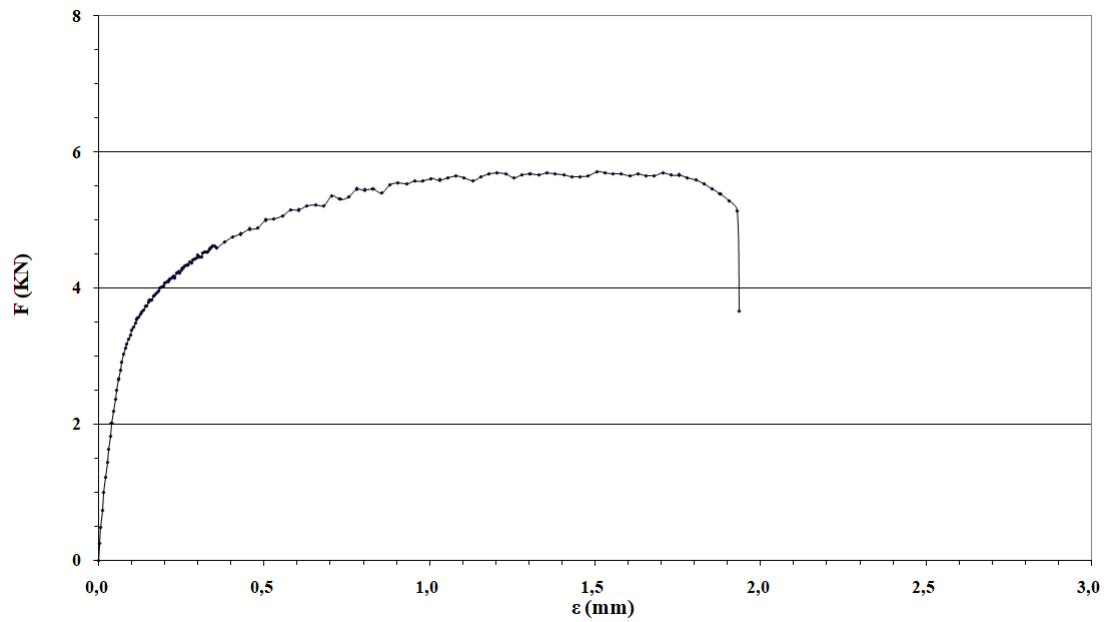
Εικόνα 62 : Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X για τα κράματα και τα συγκολλημένα δοκίμια.

3.4 Σκληρομέτρηση Vickers

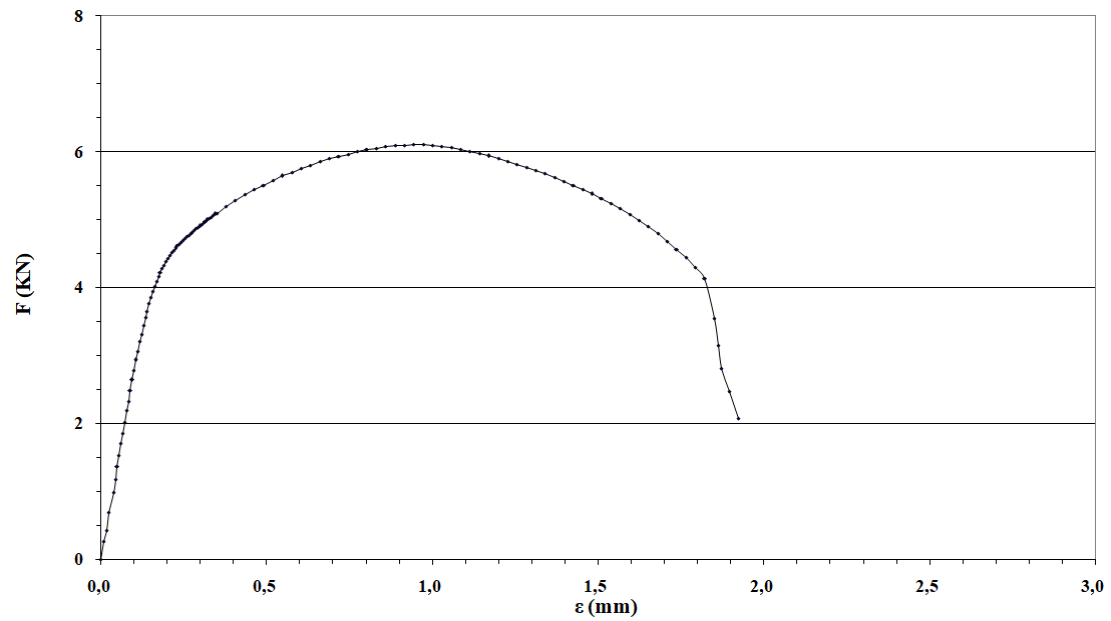


Εικόνα 63 : Μικροσκληρομετρήσεις των συγκολλημένων δειγμάτων με 3500 W (A) and 3000 W (B)

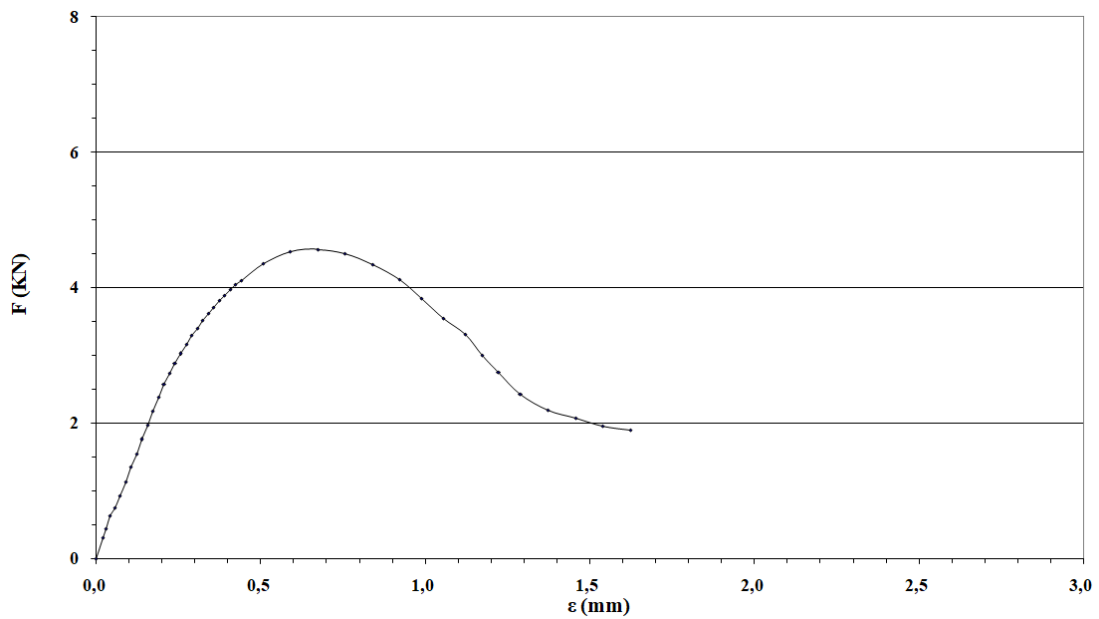
3.5 Δοκιμή εφελκυσμού



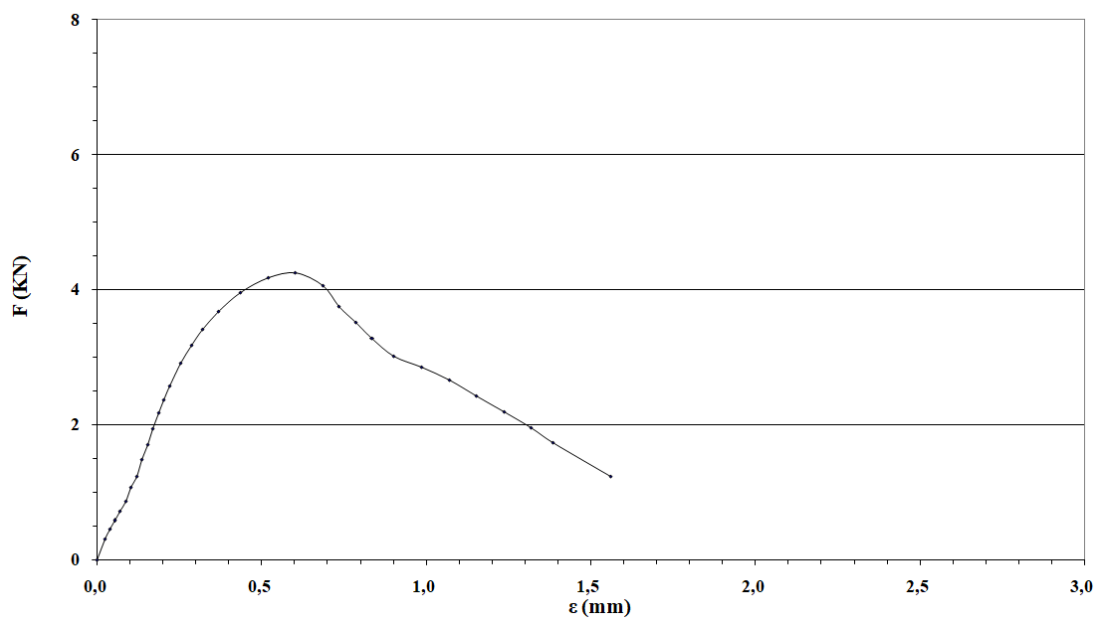
Εικόνα 64 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του κράματος 5754



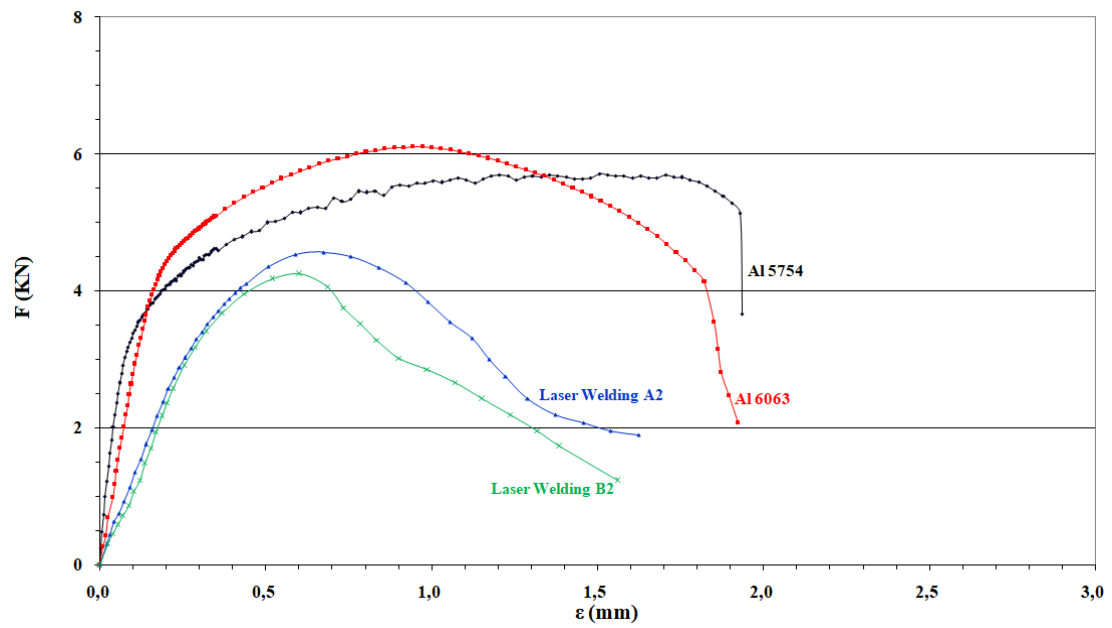
Εικόνα 65 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του κράματος 6063



Εικόνα 66 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του συγκολλημένου δοκιμίου A ($P = 3500W$)



Εικόνα 67 : Καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του συγκολλημένου δοκιμίου B ($P = 3000W$)



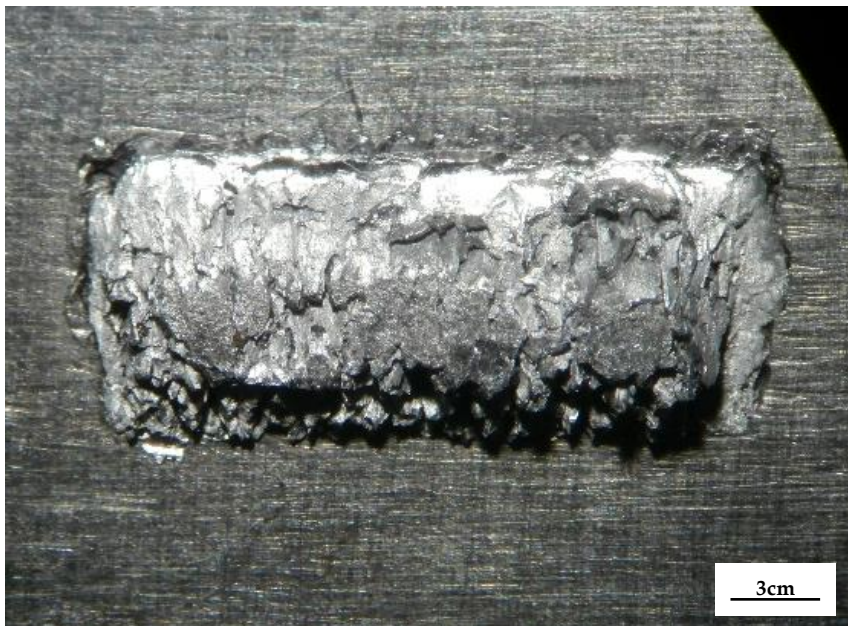
Εικόνα 68 : Συγκριτικές καμπύλες δύναμης – μετατόπισης

3.6 Στερεοσκόπιο

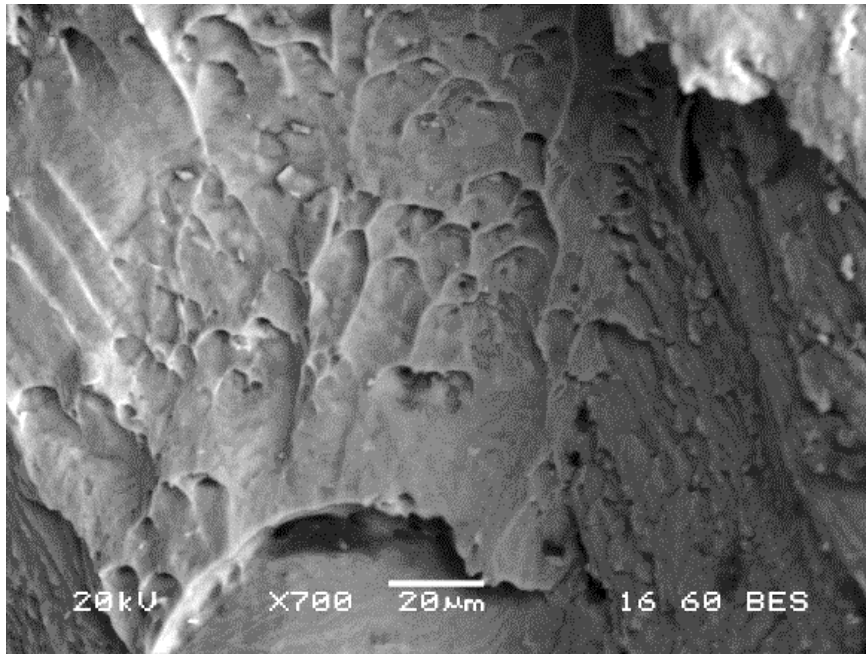
3.6.1 Δοκίμιο Α (P = 3500W)



Εικόνα 69 : Θραυστογραφία από το έλασμα 6063

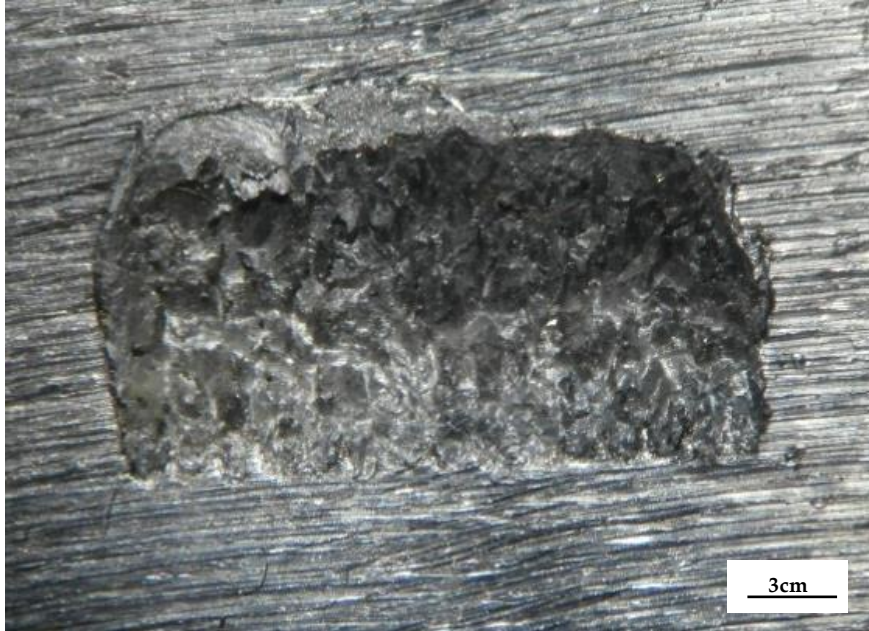


Εικόνα 70 : Θραυστογραφία από το έλασμα 5754



Εικόνα 71 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Θραυσιγενής επιφάνεια.

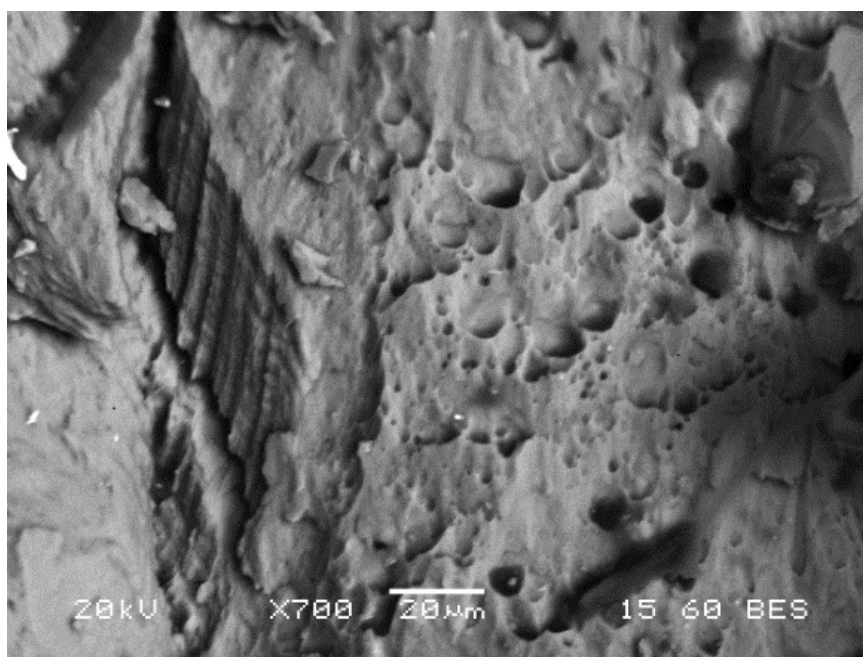
3.6.2 Δοκίμιο Β (P = 3000W)



Εικόνα 72 : Θραυστογραφία από το έλασμα 6063



Εικόνα 73 : Θραυστογραφία από το έλασμα 5754



Εικόνα 74 : Μικρογραφία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES). Θραυστηγενής επιφάνεια.

4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Οπτική μικροσκοπία

Αρχικά, στις μικρογραφίες των συγκολλημένων δοκιμίων, παρατηρείται η έντονη ανάπτυξη δενδριτών και συγκεκριμένα η παρουσία τους βρίσκεται στη ζώνη τήξης. Είναι κοινό χαρακτηριστικό που παρατηρείται κατά τις συγκολλήσεις.

Από τις μικρογραφίες σε μη πολωμένο φως αλλά και από τις μικρογραφίες σε πολωμένο φως παρατηρείται ξεκάθαρα το αντίκτυπο που έχει η διαφορετική τιμή της ισχύος του λέιζερ.

Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο Α, όπου η ισχύς ανέρχεται στα 3500W, παρατηρείται πιο έντονο πορώδες στη ζώνη τήξης του δοκιμίου, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι δεν προβλέφθηκε επαρκής χρόνος για την αποβολή του παγιδευμένου υδρογόνου [49], καθώς και δημιουργία μεγαλύτερων ρωγμών. Επιπλέον, η ζώνη τήξης καθώς και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλάτος.

Στο δοκίμιο Β, όπου η ισχύς ανέρχεται στα 3000W, το πορώδες είναι λιγότερο, οι ρωγμές είναι μικρότερες και η ζώνη τήξης καθώς και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι αισθητά μικρότερες.

Τέλος, όσον αφορά την ανάπτυξη των δενδριτών, στο δοκίμιο Α, οι δενδρίτες στη ζώνη τήξης έχουν μεγαλύτερο μήκος και εκτείνονται σε μεγαλύτερη απόσταση από ότι στο δοκίμιο Β.

4.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης

Αρχικά, κατά την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, παρατηρήθηκε εκ νέου ότι το πορώδες στο δοκίμιο B είναι λιγότερο έντονο από ότι στο A.

Όσον αφορά τις στοιχειακές αναλύσεις συγκεκριμένων περιοχών, και στα δύο δοκίμια ήταν έντονη η παρουσία Mg και Si, αποτέλεσμα που ήταν αναμενόμενο εξαιτίας της μεγάλης ποσότητάς τους στη χημική σύσταση των δύο κραμάτων.

Επιπλέον, όπως παρατηρείται και από την εικόνα 3.23, είναι αισθητή η παρουσία σιδήρου (Fe) και πυριτίου (Si), που οφείλεται στις ενδομεταλλικές ενώσεις AlFeSi που εμφανίζονται κατά τη συγκόλληση με δέσμη laser κραμάτων πλούσιων σε Al – Mg – Si [50] και ενδεχομένως μειώνουν την αντοχή στη διάβρωση [50].

4.3 Περίθλαση ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD)

Τα αποτελέσματα του XRD έδειξαν ότι και τα δύο κράματα αλουμινίου κρυσταλλώνονται στο εδροκεντρωμένο (FCC) σύστημα κρυστάλλων.

Η περίθλαση ακτίνων X για το AA6063 έδειξε την παρουσία Mg_2Si , φάση που κατακρημνίζεται μέσω κατεργασιών σκλήρυνσης με κατακρήμνιση και γήρανσης, και προσδίδει στο κράμα αυξημένη σκληρότητα [51].

Ωστόσο, κατά την περίθλαση ακτίνων X για τα συγκολλημένα δοκίμια, παρατηρήθηκε ότι και στις δύο περιπτώσεις (3500 και 3000 W) δεν ανιχνεύεται η ενδομεταλλική ένωση $MgSi_2$, η οποία βρέθηκε στο 6063.

Τέλος, παρατηρείται μια μετατόπιση των peaks προς τα αριστερά, που σημαίνει ότι υπάρχει εισαγωγή εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων.

4.4 Σκληρομέτρηση Vickers

Στο διάγραμμα 3.4 αποτυπώνονται οι τιμές της σκληρότητας των δοκιμίων A και B στις περιοχές της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ), της ζώνης τήξης (FZ) και των μετάλλων βάσης (BM).

Συγκεκριμένα, παρατηρείται μικρή μείωση της σκληρότητας στην περιοχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη του δείγματος A παρουσίασε μειωμένες τιμές μικροσκληρότητας σε σχέση με αυτές του δοκιμίου B, γεγονός που είναι αποτέλεσμα του θερμικού κύκλου και της θερμότητας που παράγεται από τη διαδικασία συγκόλλησης.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ισχύος του laser είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της σκληρότητας στο συγκολλημένο μέταλλο.

4.5 Δοκιμή εφελκυσμού

Στο διάγραμμα 3.9 αποτυπώνονται οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης των μη συγκολλημένων μετάλλων AA5754, AA6063 καθώς και των συγκολλημένων δοκιμίων A και B.

Τα AA5754 και AA6063 παρουσίασαν όριο θραύσης περίπου 5,7 kN και 6,1 kN αντίστοιχα, ενώ το όριο θραύσης των συγκολλημένων δειγμάτων μειώθηκε σημαντικά σε 4,6 για το δείγμα A και 4,2 για το δείγμα B.

Άρα, η αύξηση της ισχύος του laser αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες.

Η χαμηλότερη ισχύς του laser συντελεί και σε χαμηλότερη διείσδυση στο δοκίμιο B, η οποία με τη σειρά της μπορεί να μειώσει την ολκιμότητα του δοκιμίου και άρα να παρουσιάσει και χαμηλότερο όριο θραύσης [52].

4.6 Στερεοσκόπιο

Από τις εικόνες 3.33, 3.34, 3.36, 3.37 παρατηρείται πως η συγκόλληση με ισχύ 3500W στο δοκίμιο Α προκαλεί πιο τραχείς και έντονες θραυσσιγενείς επιφάνειες, ενώ μετά τον εφελκυσμό του δοκιμίου Β με την ισχύ του laser να ανέρχεται στα 3000W, το αποτέλεσμα των θραυσσιγενών επιφανειών είναι πιο ομαλό και ομοιόμορφο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο να μελετήσει την επίδραση μίας βασικής παραμέτρου στις συγκολλήσεις με δέσμη laser και δεν ήταν άλλη από την ισχύ του laser. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησε τη συγκόλληση κράματος αλουμινίου AA5754 με κράμα AA6063 με ισχύ δέσμης laser 3500W και 3000W. Βασικό στόχο αποτέλεσε η παρατήρηση της μικροδομής και η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκολλημένων δοκιμίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως με την αύξηση της ισχύος του laser παρατηρείται πιο έντονο πορώδες, μεγαλύτερες ρωγμές και μεγαλύτερη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Οι παραπάνω, όμως, ενδείξεις δεν συνδυάστηκαν και με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες καθώς τα κράματα που συγκολλήθηκαν με μεγαλύτερη ισχύ laser εμφάνισαν μεγαλύτερο όριο θραύσης. Και οι δύο συγκολλήσεις, πέραν από τις ατέλειες που είχαν, παρουσίασαν επιθυμητά αποτελέσματα και απέδειξαν ότι τα ελάσματα αλουμινίου που συγκολλήθηκαν υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να εξυπηρετήσουν τις βιομηχανικές ανάγκες για τις οποίες προορίζονται.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Lienert, S. S. Babu, T. A. Siewert, V. L. Acoff, *ASM Handbook Volume 06A - Welding Fundamentals and Processes*, 2011
- [2] J. L. Bromberg, *The Laser in America*, MIT Press, 1991
- [3] A. Eltze, *High Power Diode Lasers for Brazing, Welding, Cladding and Hardening*, 2009
- [4] Δ. Ι. Παντελής, Β. Ι. Παπάζογλου, Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων*, 2017
- [5] G. Verhaeghe and B. Dance, *An Assessment of the Welding Performance of High-Brightness Lasers and a Comparison with In-Vacuum Electron Beams*, Proceedings of the Laser Institute of America's ICALEO, 2008
- [6] E. V. Locke and R.A. Hella, *IEEE J. Quant Electron*, 1974
- [7] E.L. Baardsen, D.J. Schmatz, and R.E. Bisaro, *Weld. J*, 1973
- [8] T. Webber, *Laser Welding: Efficient Weld Width Generation*, Orlando, 1993
- [9] J. Mazumder and W.M. Steen, *Met. Constr*, 1980
- [10] Martukanitz, R. P, *A Critical Review of Laser Beam Welding*, Applied Research Laboratory, Pennsylvania State University, 2005
- [11] W.M. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing*, London, 2010
- [12] Sokolov, Mikhail, Antti Salminen, *Improving laser beam welding efficiency*, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2014
- [13] K. Behler, J. Berkmanns, A. Ehrhardt, W. Frohn , *Laser beam welding of low weight materials and structures*, Aachen, Germany, 1997
- [14] T.A. Barnes, I.R. Pashby, *Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles*, University of Warwick, International Manufacturing Centre, Coventry, 2000

- [15] E. Schubert, M. Klassen, I. Zerner, C. Walz, G. Sepold, *Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry*, Bremen Institute of Applied Beam Technology, Bremen, Germany, 2001
- [16] J. Dwight, *Aluminium design and construction*, CRC Press, London, 1998
- [17] A. L. McCormick, *Aluminum*, Enslow Publishing, New York, 2018
- [18] M. K. Kar, M. A. R. Önal, C. R. Borra, *Alumina recovery from bauxite residue: A concise review*, Resources, Conservation and Recycling, 2023
- [19] Γ.Κ. Τριανταφυλλίδης, *Μεταλλογνωσία*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016
- [20] R. P. Verma, M. K. Lila, *A short review on aluminium alloys and welding in Structural applications*, 2021
- [21] E. Georgantzia, M. Gkantou, G. S. Kamaris, *Aluminium alloys as structural material: A review of research*, Department of Civil Engineering, Liverpool John Moores University, United Kingdom, 2021
- [22] Davis, Joseph R. *Aluminum and aluminum alloys*, ASM international, 1993.
- [23] Sanders, R. E., Baumann, S. F., Stumpf, H. C., *Wrought non-heat treatable aluminum alloys*, London, United Kingdom, 2012
- [24] Anderson, K., Weritz, J., & Kaufman, J. G., *lxxx Aluminum Alloy Datasheets. Properties and Selection of Aluminum Alloys*, 2019
- [25] A. M. F. Muggerud, Y. Li, R. Holmestad, *Orientation Studies of α -Al (Fe,Mn)Si Dispersoids in 3xxx Al Alloys*, Switzerland, 2014
- [26] R. Zhanga, S.P. Knighta, R.L. Holtzb, R. Goswamib, C.H.J. Daviesc, N. Birbilis, *A Survey of Sensitisation in 5xxx series Aluminium Alloys*, 2016
- [27] JR Starke, A. Edgar, *Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications*, London, 2012
- [28] R. S. Mishra, H. Sidhar, *Friction stir welding of 2xxx aluminum alloys including Al-Li alloys*, 2016

- [29] R. Holmestad, C. D. Marioara, J. H. Ehlers, M. Torsaeter, R. Bjørge, J. Røyset, S. J. Andersen, *Precipitation in 6XXX aluminum alloys*, Yokohama, Japan, 2010
- [30] Rometsch, Paul A., Yong Zhang, Steven Knight, *Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys*, Department of Materials Engineering, Monash University, Australia, 2014
- [31] J.C. Ion, *Laser beam welding of wrought aluminium alloys*, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2000
- [32] O. O. Oladimeji, E. Taban, *Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys*, International Institute of Welding, 2016
- [33] Bhat, K. U., Panemangalore, D. B., Kuruveri, S. B., John, M., Menezes, P. L., *Surface modification of 6xxx Series aluminum alloys*, 2022
- [34] T Hausöl, HW Höppel, M Göken, *Microstructure and mechanical properties of accumulative roll bonded aluminium alloy AA5754*, Dresden, Germany, 2010
- [35] B. Inkson, *Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization*, The University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 2016.
- [36] G. F. V. Voort, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, ASM International, 2004.
- [37] C. E. Lyman, *Scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, and analytical electron microscopy: a laboratory workbook*, 1990
- [38] A. Mohammed, A. Abdullah, *Scanning Electron Microscopy: A review*, Romania, 2018
- [39] W. Zhou, R. P. Apkarian, Z. L. Wang, D. Joy, *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy*, 2006
- [40] A. Ul-Hamid, *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*, Center for Engineering Research, Dhahran, Saudi Arabia, 2018

- [41] N. Brodusch, H. Demers, R. Gauvin, *Imaging with a Commercial Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Camera in a Scanning Electron Microscope: A Review*, Canada, 2018
- [42] K.D. Vernon-Parry, *Scanning electron microscopy: an introduction*, 2000
- [43] A. A. Bunaciu, E. G. Udriștioiu, H. Y. Aboul-Enein, *X - RAY Diffraction: Instrumentation and Applications*, 2015
- [44] L. R. B. Elton, *X-Ray Diffraction and the Bragg Law*, 1966
- [45] J. Epp, *X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization*, Foundation Institute of Materials Science, Bremen, Germany, 2016
- [46] K. Herrmann, *Hardness testing: principles and applications*, ASM international, Ohio, 2011
- [47] J.M. Antunes, A. Cavaleiro, L.F. Menezes, M.I. Simoes, J.V. Fernandes, *Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter*, Portugal, 2002
- [48] J. R. Davis, *Tensile testing*. ASM international, Ohio, 2004
- [49] X. Cao, W. Wallace, C. Poon, J.-P. Immarigeon, *Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. I. Laser Welding Processes*, Canada, 2003
- [50] X. M. Chen, X. N. Wang, Q. P. Dong, J. M. Yu, Z. Zhu, H. Nagaumi , *The effect of AlFeSi intermetallics compounds morphology on the corrosion behavior of Al–Mg–Si alloy laser welds*, 2021
- [51] Z. Feng-li , W. Zhong-ling, L. Jin-feng, L. Chao-xing, T. Xing, Z. Zhao, Z. Zi-qiao, *Corrosion mechanism associated with Mg₂Si and Si particles in Al–Mg–Si alloys*, China, 2011
- [52] M. Kõrgesaar, J. Romanoff, H. Remes, P. Palokangas, *Experimental and numerical penetration response of laser-welded stiffened panels*, Finland, 2017
- [53] L. Huang, X. Hua, D. Wu, L. Fang, Y. Cai, Y. Ye, *Effect of magnesium content on keyhole-induced porosity formation and distribution in aluminum alloys laser welding*, 2018

[54] A. Deng, H. Chen, Y. Zhang, Y. Liu, X. Yang and B. Zhang, *Effect of filler materials on the porosity formation of aluminum alloy by laser welding with filler wire*, 2023

[55] J. Mertz, *Introduction to optical microscopy*, Cambridge University Press, 2019