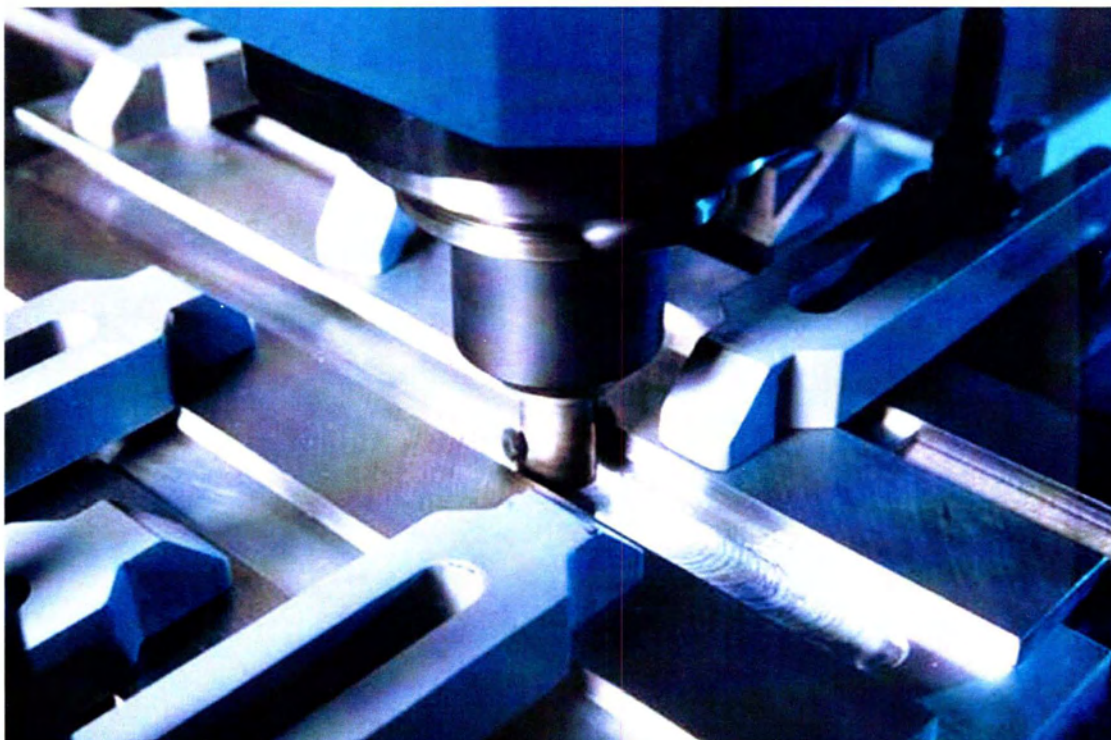


Διπλωματική εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ
ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (FSW) ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ Mg**



ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΜΑΡΚΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού
2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12925/1
Ημερ. Εισ.: 24-07-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2014
ΧΩΡ

© 2014 ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΜΑΡΚΟΣ

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη, Διδ. ΠΔ 407/80
(Επιβλέπουσα)

Δεύτερος Εξεταστής Καθηγητής, Γρηγόρης Ν. Χαιδεμενόπουλος

Τρίτος Εξεταστής Επίκουρος καθηγητής Αλέξιος Κερμανίδης

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. κ. Άννα Ζερβάκη για την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη βοήθεια της καθόλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διευθυντή του Εργαστηρίου Υλικών κ. Γρηγόρη Ν. Χαϊδεμενόπουλο για την εμπιστοσύνη του ως προς την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής μου και τη συμβολή του στη διαμόρφωση της επιστημονικής μου επάρκειας ως μηχανικό. Ευχαριστώ την εταιρία ΜΕΤΚΑ ΑΕ. για την κατασκευή του εργαλείου και συγκεκριμένα τον κ. Ιωάννη Στάμου, υπεύθυνο του Τμήματος Σχεδίασης, τον προϊστάμενο του Μηχανουργείου κ. Α. Χατζηδημητρίου και τον εργοδηγό του Μηχανουργείου κ. Δ. Ζαφειρίου. Ευχαριστίες οφείλω επίσης στην εταιρία ΣΚΛΕΡΟ ΑΕ. για την παραχώρηση υλικού και την θερμική κατεργασία του εργαλείου και συγκεκριμένα στον κ. Ε. Κεχαγιά και στην εταιρία ΕΒΕΤΑΜ ΑΕ. και συγκεκριμένα στον κ. Αθ. Στάμου για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο των συγκολλήσεων. Είμαι ευγνώμων στα μέλη του εργαστηρίου Δρ. Ελένη Καμούτση και την κ. Π. Σαράφογλου για την πολύτιμη βοήθειά τους, όποτε αυτή ζητήθηκε και στον φίλο Σπύρο για την προθυμία και βοήθειά του.

Αφιερώνω την εργασία μου στους γονείς μου Γιώργο και Νικολέττα για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Χωριανόπουλος Μάρκος

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (FSW) ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ Mg

ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΜΑΡΚΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010

Επιβλέπουσα: Δρ. Άννα Δ. Ζερβάκη, Διδ. ΠΔ 407/80

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συγκολλησιμότητα των ελατών κραμάτων Mg WE43-T5 και AZ31, πάχους 2 mm, με τη μέθοδο συγκόλλησης στερεάς κατάστασης δια τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding).

Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη φρέζα του Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος, ενώ παράλληλα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εργαλείο συγκόλλησης κατάλληλο για το πάχος των ελασμάτων. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν απλά περάσματα και για τα δύο κράματα παράλληλα στη διεύθυνση έλασής τους, ενώ με βάση τις βέλτιστες πειραματικές συνθήκες που προσδιορίστηκαν πραγματοποιήθηκαν μετωπικές συγκολλήσεις στο κράμα AZ31, τόσο παράλληλα όσο και κάθετα στη διεύθυνση έλασής του.

Τα δοκίμια των απλών περασμάτων (bead on plate) και των μετωπικών συγκολλήσεων αξιολογήθηκαν Εργαστηριακά με οπτική μικροσκοπία, μικροσκληρομετρήσεις και δοκιμές εφελκυσμού, έτσι ώστε να γίνει συσχέτιση των πειραματικών συνθηκών με τις μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα η συγκόλληση με τις βέλτιστες ιδιότητες είναι αυτή με συνθήκες: R(ταχύτητα περιστροφής)= 820-830 rpm, V(ταχύτητα πρόωσης)= 59 mm/min και F(κάθετη εφαρμοζόμενη δύναμη)= 420 kg και κλίση εργαλείου στις 2°. Το όριο αντοχής στη θραύση της συγκόλλησης αποτιμήθηκε ίσο με το 81 % του αντίστοιχου ορίου του βασικού μετάλλου. Σε όλα τα δοκίμια εφελκυσμού υπήρξε θραύση τους στην περιοχή απαγωγής υλικού και στα περισσότερα από αυτά στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Το παραπάνω αποτέλεσμα, όπως και η μικροδομή των συγκολλητών δοκιμίων έρχεται σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Τέλος, για τις εφαρμοζόμενες συνθήκες, ήταν αναπόφευκτη η απομάκρυνση υλικού υπό τη μορφή αποβλίττου, το μέγεθος του οποίου επίσης συσχέτιστηκε με τις πειραματικές συνθήκες.

Με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης το κράμα AZ31 μπορεί να συγκολληθεί με επιτυχία στην υπάρχουσα φρέζα, ενώ για το κράμα WE43 απαιτείται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση σε συγκεκριμένο εύρος συνθηκών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή - Σκοπός της εργασίας	13
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	15
2.1. Εισαγωγή/Αρχή λειτουργίας	15
2.2. Εργαλείο συγκόλλησης	16
2.2.1. Επιλογή υλικού εργαλείου-Προδιαγραφές	16
2.2.2. Σχεδιασμός εργαλείου	17
2.2.2.1. Σχεδιασμός pin	18
2.2.2.2. Σχεδιασμός περιαιχενίου	19
2.3. Διαμόρφωση μικροδομής στην FSW	20
2.3.1. Περιοχές συγκόλλησης	20
2.3.2. Σφάλματα συγκόλλησης	22
2.4. FSW - Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	23
2.5. Κράματα Μαγνησίου	25
2.5.1. Εισαγωγή-Φυσικές ιδιότητες	25
2.5.2. Κραμάτωση μαγνησίου	26
2.5.3. Ονομασία κραμάτων Μαγνησίου	26
2.5.4. Ιστορική αναδρομή	27
2.5.5. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και ανάλυση.....	27
2.5.6. Εφαρμογές.....	28
2.6. Κράματα μαγνησίου και FSW.....	31
3. Πειραματική Διαδικασία.....	36
3.1. Μηχανή συγκόλλησης.....	36
3.2. Υλικό και παράμετροι συγκόλλησης.....	37
3.3. Χαρακτηρισμός συγκολλήσεων.....	39
3.3.1. Μακροσκοπικός έλεγχος.....	39
3.3.1.1. Ραδιογραφία.....	39
3.3.2. Παρατήρηση μικροδομής.....	39
3.3.3. Μικροσκοπιομετρήσεις.....	39
3.3.4. Δοκιμές εφελκυσμού.....	39
4. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	40
4.1. Κράμα μαγνησίου WE43-T5.....	40
4.2. Κράμα μαγνησίου AZ31.....	43
4.2.1. Εισαγωγή.....	43
4.2.2. Αποτελέσματα μεταλλογραφίας των περασμάτων.....	44
Bead on plate I.....	46
Bead on plate II.....	51
Bead on plate IV.	54
Bead on plate X	56
Bead on plate e.....	59
Bead on plate ι.....	60
Bead on plate λ.....	62
Bead on plate μ.....	64
Bead on plate ν.....	66
4.2.3. Συσχέτιση μακροσκοπικών χαρακτηριστικών με πειραματικές συνθήκες.	68

4.2.4. Σχολιασμός διαγραμμάτων	71
4.2.5. Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων στα απλά περάσματα	71
4.3. Μετωπικές συγκολλήσεις.....	75
4.3.1. Αποτελέσματα μεταλλογραφίας μετωπικών συγκολλήσεων	77
Συγκολλήσεις κάθετα στη διεύθυνση έλασης.....	77
Butt Weld 1.....	77
Butt Weld 2.....	78
Butt Weld 3.....	80
Συγκολλήσεις παράλληλα στη διεύθυνση έλασης.....	81
Butt Weld 4.....	81
Butt Weld 5.....	82
Butt Weld 6.....	83
4.3.2. Προφίλ σκληρομετρήσεων σε μετωπικές συγκολλήσεις	84
4.3.3. Δοκιμές εφελκυσμού.....	86
Butt Weld 1.....	87
Butt Weld 2.....	88
Butt Weld 3.....	89
Butt Weld 4.....	89
Butt Weld 5.....	91
4.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	93
5. Συμπεράσματα.....	95
6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	96
Βιβλιογραφία.....	97

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 2.....	15
Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης (FSW)	16
Εικόνα 2: Διαμορφώσεις ακίδων: a: Κυλινδρική με σπείρωμα και κυκλικό κάτω μέρος και περιαιχένιο με κοιλότητα, b: Κυλινδρική με σπείρωμα και κυκλικό κάτω μέρος, c: Ακίδα κόλουρου κόνου, d: Ακίδα χωρίς σπείρωμα	19
Εικόνα 3: Αριστερά: Εικ. 3a: Περιαιχένιο με ελικώσεις, Δεξιά: Εικ. 3b: Περιαιχένιο με κυρτή διαμόρφωση.....	20
Εικόνα 4: Περιοχές συγκόλλησης και μικροδομή αυτών	21
Εικόνα 5: a: Εσωτερικοί πόροι στην AS, b: Ατελής διείδυση εργαλείου.....	23
Εικόνα 6: a: Σφάλμα τύπου tunnel, b: Ελάττωμα kissing bond.....	23
Εικόνα 7: Πυκνή εξαγωνική δομή Mg.....	24
Εικόνα 8: Αξιοποίηση κραμάτων Mg στην αυτοκίνηση	29
Εικόνα 9: Στατιστικά χρήσης κραμάτων Mg στην αυτοκίνηση	30
Εικόνα 10: Χρήσεις χυτού we43 στο πλαίσιο του κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και του συστήματος κίνησης (δεξιά)	30
Εικόνα 11: Εξαρτήματα αυτοκινήτων με βάση τα κράματα μαγνησίου. Πάνω αριστερά: Περίβλημα κιβωτίου ταχυτήτων, Πάνω δεξιά: Πλαίσιο τιμονιού, Κάτω αριστερά: Φλάντζα στεγάνωσης, Κάτω δεξιά: Μηχανισμός κίνησης καθισμάτων	31
Εικόνα 12: Διάγραμμα φάσεων του κράματος AZ31.....	33
Εικόνα 13: Υποπεριοχές ανάδευσης στο συγκολλητό κράμα AZ31, a: για μικρές και b: για μεγάλες προώσεις.....	33
Εικόνα 14: Συνθήκες bead on plate και επίδραση αυτών στην ποιότητα συγκόλλησης.....	34
Κεφάλαιο 3.....	36
Εικόνα 15: Κατασκευαστικό σχέδιο εργαλείου συγκόλλησης	36
Εικόνα 16: Εργαλείο συγκόλλησης	37
Κεφάλαιο 4.....	40
Εικόνα 17: Μακροσκοπική απεικόνιση απλών περασμάτων στο κράμα μαγνησίου WE43-T5	40
Εικόνα 18: Μακροσκοπική απεικόνιση απλών περασμάτων στο κράμα μαγνησίου WE43-T5	40
Εικόνα 19: Μικροδομή ελάσματος AZ31 στις τρεις (3) διευθύνσεις. Μέσο μέγεθος κόκκου 13-18μm	43
Εικόνα 20: Μικροδομή ελάσματος WE43-T5 στις τρεις (3) διευθύνσεις. Μέγεθος κόκκου με μεγάλη διασπορά τιμών 20-80μm. Μέσο μέγεθος 60μm	43
Εικόνα 21: Διάγραμμα ως προς συνθήκες bead on plate κράματος AZ31.....	44
Εικόνα 22: Απεικόνιση μεγεθών προς μέτρηση στην περιοχή συγκόλλησης ...	45

Εικόνα 23: Εικόνα στερεοσκοπίου. Διευκρινίζονται οι περιοχές AS και RS. Η φορά του βέλους πάνω από το δοκίμιο υποδεικνύει τη διεύθυνση πρόωσης (6.5x) .	46
Εικόνα 24: Βασικό μέταλλο (200x)	46
Εικόνα 25: HAZ (200x)	47
Εικόνα 26: Φαίνεται η διαγώνια γραμμή ανάδευσης. Αριστερά: Περιοχή ανάδευσης, Δεξιά: Θερμοεπηρεασμένη περιοχή. Η TMAZ είναι αμελητέα (50x)....	47
Εικόνα 27: Περιοχή NUGGET (50x).....	48
Εικόνα 28: Λοβός περιοχής NG (50x)	48
Εικόνα 29: Αριστερά: Από αριστερά στα δεξιά: Περιοχή NG, γραμμή ανάδευσης, HAZ. Δεξιά: Μορφολογία λοβού στην περιοχή RS (200x).....	49
Εικόνα 30: Περιοχή NUGGET (200x).....	50
Εικόνα 31: Περιοχή HAZ (200x).....	50
Εικόνα 32: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x).....	51
Εικόνα 33: a: Περιοχή HAZ, b: Βασικό μέταλλο, c: περιοχή NG (200x)	52
Εικόνα 34: a: Περιλαμβάνονται: NG, πόροι, γραμμή ανάδευσης, TMAZ, HAZ (50x), b: Όμοια της Εικ. 34a (100x), c: Περιοχή NG (200x), d: Εμφάνιση πόρων λόγω μειωμένης κάθετης φόρτισης (100x)	53
Εικόνα 35: a: Περιοχή NG (50x), b: NG στην περιοχή του λοβού (200x), c: Εσωτερικός πόρος στην περιοχή NG (200x)	53
Εικόνα 36: Παρατηρούνται σφάλμα τύπου tunnel και flash (6.5x).....	54
Εικόνα 37: Μακροσκοπική παρατήρηση της περιοχής συγκόλλησης (6.5x)	54
Εικόνα 38: a: NG/HAZ στην περιοχή AS (50x), b: Υποπεριοχές της περιοχής NG (100x), c: NG/HAZ (200x), d και e: Πόροι στη ρίζα της συγκόλλησης, στην περιοχή AS (100x)	55
Εικόνα 39: Περιοχή NG (50x).....	56
Εικόνα 40: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (50x).....	56
Εικόνα 41: a: Περιοχή TMAZ αριστερά της περιοχής NG, b: TMAZ, περιοχή RS .	57
Εικόνα 42: Ακαθόριστο όριο μεταξύ περιοχών NG και HAZ. Ροή υλικού όπως υποδεικνύει το βέλος (50x)	57
Εικόνα 43: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	58
Εικόνα 44: Μικροσκοπικός πόρος στην ρίζα της συγκόλλησης στην περιοχή AS (50x)	58
Εικόνα 45: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x).....	59
Εικόνα 46: a: Περιοχή AS, πόρος στη ρίζα της συγκόλλησης, b: TMAZ στην περιοχή RS (50x).....	60
Εικόνα 47: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x).....	60
Εικόνα 48: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)	60
Εικόνα 49: a: Σαφή όρια της περιοχής ανάδευσης στην AS (50x), b: Ροή υλικού στην περιοχή ανάδευσης στην RS (50x).....	61

Εικόνα 50: a: Περιοχή BM, b: Περιοχή HAZ, c: Περιοχή TMAZ, d: Περιοχή NG (500x).....	61
Εικόνα 51: Μακροσκοπική ανάλυση του περάσματος λ. Στην εικόνα φαίνεται η κατανομή της κάθετης φόρτισης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.....	62
Εικόνα 52: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x).....	62
Εικόνα 53: Μικροσκοπικοί πόροι στην περιοχή AS (50x)	63
Εικόνα 54: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	63
Εικόνα 55: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (10x).....	64
Εικόνα 56: a: TMAZ στην περιοχή RS, b: TMAZ στην περιοχή AS (50x)	64
Εικόνα 57: a: Πόρος στη ρίζα της συγκόλλησης, περιοχή AS, b: Επιφανειακή αυλάκωση, περιοχή AS (50x).....	65
Εικόνα 58: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	65
Εικόνα 59: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x).....	66
Εικόνα 60: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	66
Εικόνα 61: Αριστερά: Προσκόλληση υλικού σε περιαιχένιο και ακίδα, Δεξιά: Απομάκρυνση μερών της ραφής ως αναξιοποίητα μέρη	68
Εικόνα 62: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίτου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη	69
Εικόνα 63: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίτου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη	70
Εικόνα 64: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίτου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη	70
Εικόνα 65: Μεθοδολογία ανάπτυξης σκληρομετρήσεων	71
Εικόνα 66: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου I.....	72
Εικόνα 67: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου II.....	72
Εικόνα 68: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου IV.....	73
Εικόνα 69: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου Χ.....	73
Εικόνα 70: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου	74
Εικόνα 71: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου λ.....	74
Εικόνα 72: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου μ.....	75
Εικόνα 73: Συγκόλληση ελασμάτων AZ31 παράλληλα στη διεύθυνση ελάσεώς τους.....	76
Εικόνα 74: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)	77
Εικόνα 75: Φιλμ ραδιογραφίας για συγκόλληση 1	77
Εικόνα 76: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	78
Εικόνα 77: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)	78
Εικόνα 78: Σχηματισμός μικροσπών στην άνω επιφάνεια της ραφής (50x).....	79

Εικόνα 79: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	79
Εικόνα 80: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)	80
Εικόνα 81: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	80
Εικόνα 82: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)	81
Εικόνα 83: Μακροσκοπική απεικόνιση ραφής συγκόλλησης (6.5x)	81
Εικόνα 84: Απεικόνιση της περιοχής NG(50x)	82
Εικόνα 85: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x).....	82
Εικόνα 86: Μακροσκοπική απεικόνιση ραφής συγκόλλησης (6.5x)	83
Εικόνα 87: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 1	84
Εικόνα 88: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 2	84
Εικόνα 89: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 3	85
Εικόνα 90: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 4	85
Εικόνα 91: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 5	86
Εικόνα 92: Δοκίμιο εφελκυσμού 1.....	87
Εικόνα 93: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 1 (6.5x).....	87
Εικόνα 94: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.Συγκόλληση 1	87
Εικόνα 95: Δοκίμιο εφελκυσμού 2.....	88
Εικόνα 96: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 2 (6.5x).....	88
Εικόνα 97: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.Συγκόλληση 2	88
Εικόνα 98: Δοκίμιο εφελκυσμού 3.....	89
Εικόνα 99: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 3 (6.5x).....	89
Εικόνα 100: Δοκίμιο εφελκυσμού 4_4	89
Εικόνα 101: Δοκίμιο εφελκυσμού 4_5	90
Εικόνα 102: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 4_4 (6.5x)	90
Εικόνα 103: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 4_5 (6.5x)	90
Εικόνα 104: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.Συγκόλληση 4_5.....	91
Εικόνα 105: Δοκίμιο εφελκυσμού 5_4	91
Εικόνα 106: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 5_4 (6.5x)	92
Εικόνα 107: Σύγκριση ορίου διαρροής συγκολλήσεων με BM	92
Εικόνα 108: Σύγκριση μέγιστης αντοχής συγκολλήσεων με BM	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 2.....	15
Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες του Mg, Al και Fe	26
Πίνακας 2: Προδιαγραφή ASTM για την ονομασία κραμάτων μαγνησίου	27
Πίνακας 3: Στοιχεία αναφορών FSW σε κράματα μαγνησίου	32
Κεφάλαιο 3.....	36
Πίνακας 4: Χημική σύσταση κραμάτων	37
Πίνακας 5: Συνθήκες περασμάτων του κράματος WE43-T5	38
Πίνακας 6: Συνθήκες περασμάτων του κράματος AZ31	38
Πίνακας 7: Συνθήκες συγκολλήσεων κράματος AZ31	39
Κεφάλαιο 4.....	40
Πίνακας 8: Θερμική αγωγιμότητα στοιχείων	42
Πίνακας 9: Μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών περιοχών συγκόλλησης.....	69
Πίνακας 10: Μέγεθος αποβλίττου ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες..	83

1. Εισαγωγή - Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη και εφαρμογή συγκολλήσεων δια τριβής και ανάδευσης (Friction Stir Welding-FSW) σε κράματα Mg. Η μέθοδος FSW είναι μία σχετικά νέα μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που αναπτύχθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) το 1991 και εξαιτίας των μεγάλων της πλεονεκτημάτων έχει βρει ήδη μεγάλη βιομηχανική εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπορική βιομηχανία καθώς και σε ειδικές μεταλλικές κατασκευές είτε εκτοπίζοντας τις παραδοσιακές συγκολλήσεις τήξης ή δίνοντας τη δυνατότητα συγκολλήσεων σε υλικά που εμφάνιζαν σημαντικά προβλήματα συγκολλησιμότητας λόγω προβλημάτων που συνδέονται με την τήξη στη λίμνη συγκόλλησης.

Παρόλο που η εφαρμογή της μεθόδου κυρίως στα κράματα Al, γνωρίζει ευρεία βιομηχανική εφαρμογή, στα κράματα Mg ευρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο με αρκετές δημοσιευμένες εργασίες τα τελευταία χρόνια, κυρίως ως προς την προσπάθεια προσδιορισμού βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης. Τα κράματα Mg λόγω του χαμηλού βάρους, αποτελούν κορυφαία κατασκευαστική επιλογή ως ελατά, χυτά ή σφυρήλατα αντικείμενα κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία και την αυτοκινητοβιομηχανία επειδή λόγω χαμηλού βάρους εξοικονομείται καύσιμο συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στις Περιβαλλοντικές δεσμεύσεις των προηγμένων τεχνολογικά χωρών.

Τα κράματα Mg, που επιλέχθηκαν ως αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, ήταν τα ελατά κράματα AZ31 και WE43 τα οποία έχουν εφαρμογές στην αεροπορική βιομηχανία. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος με κατάλληλα τροποποιημένη φρέζα. Για τα πειράματα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδικό εργαλείο συγκόλλησης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε αρχικά σημαντικό αριθμό απλών περασμάτων (bead-on-pate) για κάθε κράμα ξεχωριστά. Οι πειραματικές συνθήκες επιλέχθηκαν με βάση τη βιβλιογραφία, τον διαθέσιμο εξοπλισμό και την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας. Τα δοκίμια αξιολογήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών με μη καταστρεπτικές και καταστρεπτικές μεθόδους και προσδιορίστηκαν βέλτιστες συνθήκες για το κράμα AZ31 με βάση τις οποίες πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια μετωπικές συγκολλήσεις. Για το κράμα WE45 δεν κατέστη δυνατόν να προσδιοριστεί αντίστοιχα περιοχή βέλτιστων συνθηκών για λόγους που εξηγούνται αναλυτικά στο αντίστοιχο Κεφάλαιο της εργασίας.

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν οι εξής έλεγχοι:

- Ραδιογραφία (μόνο για τις μετωπικές συγκολλήσεις)
- Οπτικός έλεγχος με στερεοσκόπιο τόσο στην επιφάνεια όσο και στην εγκάρσια τομή των συγκολλήσεων
- Έλεγχος μακροδομής
- Έλεγχος μικροδομής
- Μετρήσεις μικροσκληρότητας
- Δοκιμές εφελκυσμού (μόνο για τις μετωπικές συγκολλήσεις)

Με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των συγκολλήσεων είναι δυνατόν να παραχθούν αξιόπιστες και με επαναλήψιμα χαρακτηριστικά συγκολλήσεις χωρίς επιφανειακά και εσωτερικά σφάλματα, με μικροδομή αντίστοιχη με αυτή της

βιβλιογραφίας και αντοχή που φτάνει σε ποσοστό 80% αυτής του βασικού μετάλλου.

Η διπλωματική διαρθρώνεται στα εξής Κεφάλαια:

Κεφ. 1: Εισαγωγή-Σκοπός

Κεφ. 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κεφ. 3: Πειραματική διαδικασία

Κεφ. 4: Αποτελέσματα – Συζήτηση

Κεφ. 5: Συμπεράσματα

Κεφ. 6: Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή/Αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος της συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης, ή αλλιώς Friction Stir Welding (FSW), αναπτύχθηκε στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI) το 1991, και εφαρμόστηκε αρχικά σε κράματα αλουμινίου. Πρόκειται για μια κατεργασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κατά την οποία ένα μη αναλίσκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο (Εργαλείο Συγκόλλησης-Welding Tool) με ειδικά σχεδιασμένη ακίδα (Pin) και κατάλληλο περιαιχένιο (Shoulder), εισέρχεται στις εφαιπτόμενες ακμές των καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής σύνδεσης. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργείται θερμότητα, λόγω τριβής μεταξύ του περιστρεφόμενου εργαλείου συγκόλλησης και των υπό συγκόλληση τεμαχίων η οποία ανεβάζει τη θερμοκρασία στο 80-90% του σημείου τήξης αυτών. Ταυτόχρονα, το τοπικά πλαστικοποιημένο υλικό αναδεύεται και μεταφέρεται από τη μία πλευρά στην άλλη από την περιστρεφόμενη ακίδα του εργαλείου συγκόλλησης παράγοντας ραφές συγκόλλησης υψηλής ποιότητας χωρίς ατέλειες ή ελαττώματα.

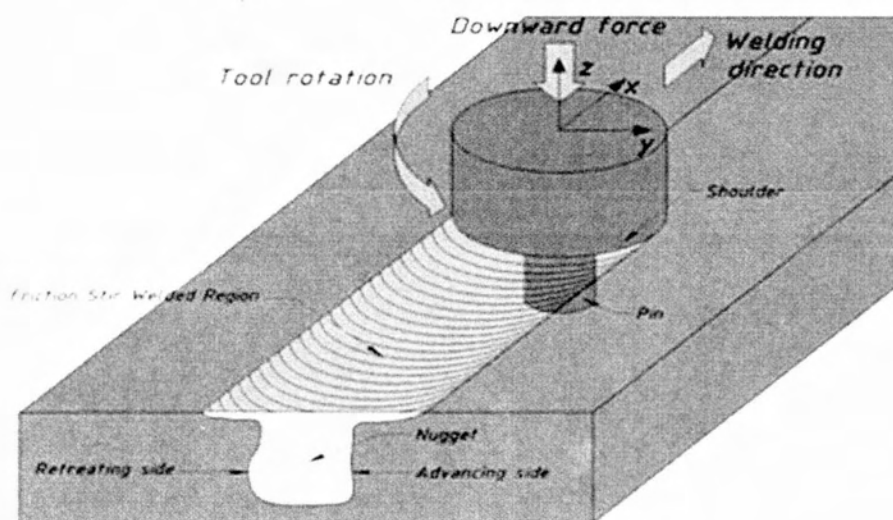
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι τέτοια ώστε σήμερα να βρίσκει ευρεία βιομηχανική εφαρμογή. Η αρχή λειτουργίας της FSW είναι ιδιαίτερα απλή και παρουσιάζεται στην Εικ. 1. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι κατασκευασμένο από υλικό υψηλής αντοχής ώστε να μη φθείρεται και να το καθιστά μη αναλώσιμο. Τα περισσότερα εργαλεία είναι κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβες ενώ έχουν αναφερθεί και εργαλεία από άλλα υλικά όπως κράματα νικελίου και πυρίμαχα υλικά. Όπως υποδηλώνει η Εικ. 1, το εργαλείο αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα:

- το περιαιχένιο (shoulder), το οποίο περιστρεφόμενο λόγω τριβής με τις επιφάνειες των μετάλλων, αυξάνει τη θερμοκρασία, μαλακώνει τα μέταλλα και διευκολύνει την ανάδευσή τους, και
- την ακίδα (pin) μικρότερης διαμέτρου, η οποία καθώς περιστρέφεται, διεισδύει στις διεπιφάνειες προς συγκόλληση και τις αναδεύει μεταφέροντας υλικό από τη μία πλευρά στην άλλη προκαλώντας τη συνένωσή τους

Παράλληλα, υπάρχει σχετική κίνηση ανάμεσα στο εργαλείο και τα μέταλλα προς συγκόλληση κατά μήκος των διεπιφανειών (weld direction) και έτσι δημιουργείται η ραφή συγκόλλησης.

Όπως φαίνεται στην Εικ. 1 στην περιοχή ανάδευσης του υλικού (ή αλλιώς NUGGET ZONE, NG), διακρίνονται δύο περιοχές: η περιοχή απαγωγής υλικού (Advancing Site ή AS) από όπου η ακίδα εισέρχεται και απάγει υλικό για να το μεταφέρει από τη μια πλευρά της συγκόλλησης στην άλλη και η περιοχή εναπόθεσης υλικού (Retreating Site ή RS) όπου η ακίδα εναποθέτει το μεταφερόμενο υλικό.

Στην Εικ. 1, η ακίδα περιστρέφεται αριστερόστροφα (CCW) και η διεύθυνση πρόωσης του εργαλείου είναι κάθετη στο επίπεδο παρατηρησης. Επομένως καθώς η ακίδα περιστρέφεται, μεταφέρει το υλικό από την δεξιά περιοχή της ραφής (AS) για να το εναποθέσει στην αριστερή περιοχή (RS) και πίσω της.



Principle of FSW

Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης δια τριβής και ανάδευσης (FSW)

2.2. Εργαλείο συγκόλλησης

Το εργαλείο που πραγματοποιεί τη συγκόλληση επιτελεί τρεις ξεχωριστές, αλλά άμεσα συνδεδεμένες μεταξύ τους, λειτουργίες. Αρχικά, το περιαιχένιο περιστρεφόμενο, όταν έρθει σε επαφή με τα μέταλλα αναπτύσσουν τριβή με αυτά. Κατά συνέπεια οι προς συνένωση περιοχές, μαλακώνουν και έτσι αφενός διευκολύνεται η διαδικασία της συγκόλλησης και αφετέρου το εργαλείο διασφαλίζεται από τυχόν φθορές. Παράλληλα, το περιαιχένιο περιορίζει τη ροή του μετάλλου εκτός περιοχής συγκόλλησης. Καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται τοπικά είναι λίγο κάτω από το σημείο τήξεως των μετάλλων, η παραμόρφωση του υλικού είναι ιδιαίτερα έντονη. Η τρίτη λειτουργία αφορά την συνένωση των υλικών, για την οποία κύριο ρόλο παίζει η ακίδα του εργαλείου, καθώς αυτή περιστρεφόμενη μεταφέρει το υλικό που βρίσκεται γύρω από αυτή προς τη δημιουργία της σύνδεσης [1].

2.2.1. Επιλογή υλικού εργαλείου-Προδιαγραφές

Η μέθοδος FSW είναι μια διαδικασία όπου η θερμοκρασία του εργαλείου φτάνει στο 80-90% του σημείου τήξης του μετάλλου προς συγκόλληση. Είναι σημαντικό, επομένως, το υλικό κατασκευής του εργαλείου να είναι το κατάλληλο, έτσι ώστε να οδηγεί σε ποιοτικές συγκολλήσεις και οι πιθανότητες φθοράς του να είναι μηδαμινές.

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την επιλογή υλικού του εργαλείου όπως οι φυσικές ιδιότητες του μετάλλου προς συγκόλληση, η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής του εργαλείου και η εμπειρία και οι προτιμήσεις του συγκολλητή. Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή των χαρακτηριστικών που πρέπει να ληφθούν υπ όψιν ώστε η επιλογή του υλικού κατασκευής του εργαλείου να είναι η κατάλληλη:

Υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και υψηλές θερμοκρασίες: Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της συγκόλλησης, πρέπει να έχει διασφαλιστεί ότι το εργαλείο δε θα υποστεί καμία παραμόρφωση ή, ακόμα περισσότερο, θραύση. Καθώς διεισδύει αρχικά, το εργαλείο δέχεται θλιπτικές δυνάμεις ενώ όσο πραγματοποιείται η συγκόλληση, όσο αυτό περιστρέφεται δέχεται μεγάλη καταπόνηση λόγω τριβών. Λογικό είναι επομένως το υλικό του εργαλείου να έχει αντοχές τόσο στη θλίψη όσο και στη διάτμηση μεγαλύτερες από τα φορτία που ασκούνται σε αυτό.

Αντοχή στον ερπυσμό: Τα υποψήφια υλικά για την κατασκευή του εργαλείου πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κάτω από το 30%-40% του σημείου τήξεως τους. Κάθε φορά που το εργαλείο θα βρίσκεται σε χρήση, μπορεί να υπόκειται σε υπεργήρανση, ανόπτηση καθώς και επαναφορά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Ως αποτέλεσμα, θα υφίστανται μεταβολές στην πυκνότητα και την κατανομή των αταξιών που με τη σειρά τους μειώνουν τη σκληρότητα του υλικού και γενικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Βάσει των παραπάνω, μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα, το εργαλείο θα χάσει τις διαστάσεις του και θα αστοχήσει.

Αντιδραστικότητα εργαλείου: Το επιλεγμένο υλικό θα πρέπει να μην αντιδρά με το μέταλλο προς συγκόλληση ή με το περιβάλλον του. Το τιτάνιο π.χ. αντιδρά με το περιβάλλον του σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα αναφλέγεται. Κατά συνέπεια μπορεί να υπάρξουν διαστασιακές μεταβολές με επιπτώσεις στην ποιότητα της συγκόλλησης.

Δυσθραυστότητα: Κατά την πρώτη επαφή της ακίδας με το υλικό προς συγκόλληση ασκούνται τάσεις και παραμορφώσεις ικανές να την οδηγήσουν στη θραύση της. Η καταπόνηση του εργαλείου εξαρτάται από τις συνθήκες συγκόλλησης και πιο συγκεκριμένα από τη διείσδυση του εργαλείου και τα επίπεδα αναπτυσσόμενων τριβών. Το υλικό του εργαλείου, λοιπόν, πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η ενέργεια που απορροφά να είναι μικρότερη από αυτή που οδηγεί στη θραύση του.

Διαμορφωσιμότητα: Στις περισσότερες των περιπτώσεων η κατασκευή του εργαλείου συνδέεται με ιδιαίτερες διαμορφώσεις μικρών διαστάσεων όποτε βασική προϋπόθεση είναι το υλικό να διαμορφώνεται εύκολα [1].

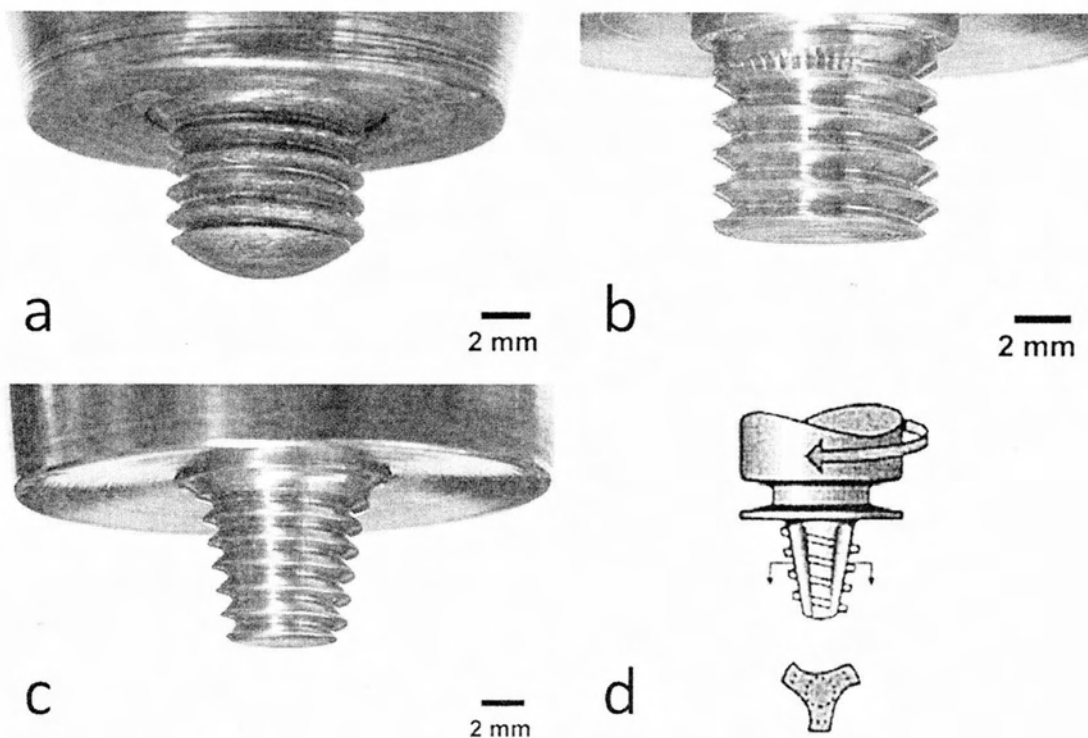
2.2.2. Σχεδιασμός εργαλείου

Στην ανοιχτή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα δημοσιευμένων μελετών, οι οποίες υποδεικνύουν ότι ανάλογα με τη διαμόρφωση που εμφανίζει το εκάστοτε εργαλείο για συγκολλήσεις FSW, η ποιότητα της ραφής που προκύπτει, ποικίλει. Χαρακτηριστικά, η ερευνητική ομάδα του P. Motalleb-nejad καταλήγει, έπειτα από μια σειρά πειραματικών διαδικασιών, στο συμπέρασμα ότι συγκολλήσεις με τις καλύτερες ιδιότητες επιτυγχάνονται με ακίδα διαμόρφωσης κόλουρου κώνου [2]. Περιληπτικά, παρακάτω, εμφανίζονται οι κύριες διαμορφώσεις της ακίδας και του περιαυχένιου που έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της ραφής συγκόλλησης.

2.2.2.1. Σχεδιασμός pin [1]

Η μελέτη όσον αφορά τον σχεδιασμό των ακίδων, αποσκοπεί στην καλύτερη μεταφορά του αναδεδυόμενου υλικού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκόλλησης χωρίς ελαττώματα. Παρακάτω παρατίθενται οι πλέον γνωστές διαμορφώσεις ακίδων που χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις FSW:

- Κυλινδρική με σπείρωμα και κυκλικό κάτω μέρος (Εικ. 2a): Γενικά, η χρήση σπειρώματος στις ακίδες έχει ως στόχο την προώθηση και καλύτερη μεταφορά το υλικού από το περιαιχένιο κατακόρυφα προς τα κάτω. Έτσι επιτυγχάνεται το κλείσιμο των μικροσπών που δημιουργούνται χαμηλά στην AS κυρίως αλλά και πίσω από την ακίδα καθώς αυτή προχωράει στη διεύθυνση της ραφής. Η διαμόρφωση του κυκλικού κάτω μέρους της ακίδας αποσκοπεί να δημιουργεί ποιοτική ανάδευση στη ρίζα στη συγκόλλησης ενώ η διαμόρφωση από μόνη της δεν κινδυνεύει από συγκεντρώσεις τάσεων που θα οδηγήσουν σε φθορά του εργαλείου.
- Κυλινδρική με σπείρωμα και επίπεδο κάτω μέρος (Εικ. 2b): Πρόκειται για την πιο κοινή μορφή ακίδας. Όπως θα φανεί και στην Πειραματική διαδικασία, η παρούσα διαμόρφωση είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Εφόσον στο εργαλείο συγκόλλησης έχει δοθεί κλίση προκύπτει ότι το κατώτερο σημείο της συγκεκριμένης ακίδας έχει μεγαλύτερη γραμμική ταχύτητα από το αντίστοιχο σημείο της προαναφερθείσας διαμόρφωσης και επομένως, προκαλείται ισχυρότερη ανάδευση. Επίσης, με εφαρμογή κατάλληλων συνθηκών συγκόλλησης απόφευγεται η καταπόνηση και μακροχρόνια η φθορά του εργαλείου.
- Κόλουρου κώνου (Εικ. 2c): Δέχονται μικρότερα εγκάρσια φορτία σε σύγκριση με ακίδες σπειρωειδούς διαμόρφωσης. Γι'αυτό και χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλου πάχους σε μεγάλες ταχύτητες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με αυτού του τύπου την ακίδα έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχημένες συγκολλήσεις κράματος ορείχαλκου με αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες γύρω από τους 1000°C.
- Ακίδα με σπείρωμα με μορφολογία δίνης: Πρόκειται για μια εκ των πρωτοποριακών σχεδιασμών ακίδας. Όπως με τις ακίδες κόλουρου κώνου, οι μειωμένες εγκάρσιες τάσεις που δέχεται, επιτρέπουν τις συγκολλήσεις σε μεγάλες ταχύτητες πρόωσης. Το ελικοειδές σπείρωμα που παρουσιάζει, παίζει καταλυτικό ρόλο στην ποιότητα της ραφής. Η συχνότητα του μεταφερόμενου όγκου προς τον όγκο της δινητής ακίδας είναι ίσος με 1.8 ενώ ο αντίστοιχος λόγος στα σπειρωτά κυλινδρικά σπειρώματα ισούται με 1.1. Παράδειγμα τέτοιας διαμόρφωσης δίνεται στην Εκ. 2d.
- Άλλοι καινοτόμοι σχεδιασμοί αφορούν ακίδες με αυλακώσεις ενώ σε εξαιρετικές συνθήκες, όπως την συγκόλληση κραμάτων τιτανίου, χρησιμοποιούνται ακίδες κυλινδρικές χωρίς σπείρωμα αφού οι τυχόν διαμορφώσεις θα φθείρονταν κατά τη διάρκεια της εφαρμογής. Παράλληλα υφίστανται ακίδες με επιπλέον διαμορφώσεις για εντονότερη ανάδευση του υλικού.



Εικόνα 2: Διαμορφώσεις ακίδων: a: Κυλινδρική με σπείρωμα και κυκλικό κάτω μέρος και περιαιχένιο με κοιλότητα, b: Κυλινδρική με σπείρωμα και κυκλικό κάτω μέρος, c: Ακίδα κόλουρου κόνου, d: Ακίδα χωρίς σπείρωμα

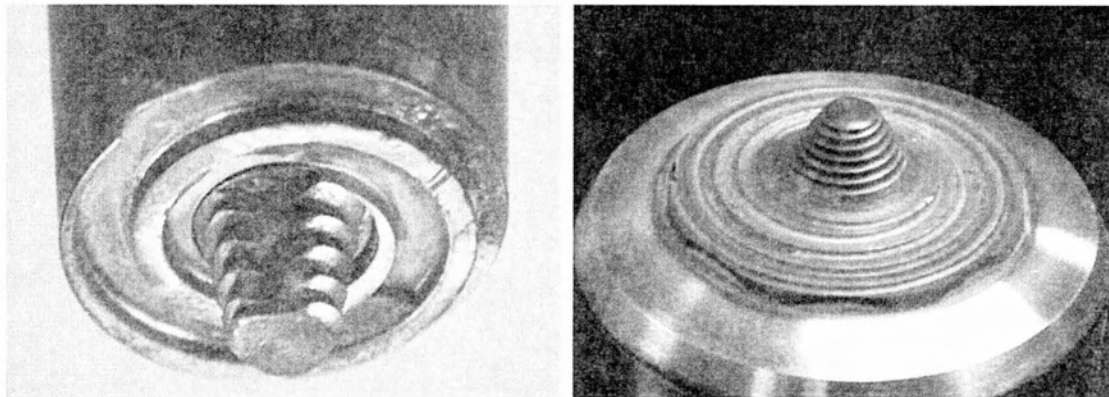
2.2.2.2. Σχεδιασμός περιαιχενίου (shoulder)

- Περιοιχένιο με κοιλότητα: Η διαμόρφωση αυτού του τύπου εργαλείου είναι ιδιαίτερα εύκολη, παράγει ποιοτικές συγκολλήσεις και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο. Το όνομά του αποδίδεται στην κοιλότητα που διαμορφώνεται γύρω από την ακίδα, μεταξύ 6° και 10° (Εικ. 2a). Κατά τη διεύθυνσή της, η ακίδα εκτοπίζει υλικό το οποίο εγκλωβίζεται στην κοιλότητα, όπου εν συνεχεία αξιοποιείται ως αποθήκη για τη μεταφορά υλικού στο εσωτερικό της ραφής. Έτσι, κατά τη μετακίνηση του εργαλείου στη διεύθυνση της πρόωσης κατά dx , νέα ποσότητα υλικού, όγκου dV , εισάγεται στην κοιλότητα για να μεταφερθεί μέσω της ακίδας. Για καλύτερη απόδοση, προτείνεται να δίνεται στο εργαλείο τέτοιας μορφής κλίση 2° - 3° από την κατακόρυφο και προς τα πίσω.
- Περιοιχένια με διαμορφώσεις: Οι διαμορφώσεις αυτές αφορούν ελικοειδής διαμορφώσεις, ραβδώσεις, οδοντώσεις και ομόκεντρους κύκλους με σκοπό την καλύτερη ανάδευση του υλικού.

Η πιο συνηθισμένη διαμόρφωση από τις παραπάνω είναι αυτή του περιοιχένιου με ελικωηδή διαμόρφωση (Εικ. 3a). Ο ρόλος των ελικώσεων αφορά την καλή μεταφορά υλικού από τη γύρω περιοχή στην ακίδα, αποφεύγοντας έτσι την πρόσδωση κλίσης στο εργαλείο. Οι διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του περιοιχένιου και του υλικού είναι τέτοιες ώστε να προσδίδονται υψηλά ποσά θερμότητας και να διευκολύνεται η παραμόρφωση του μετάλλου. Παράλληλα, διαμέσω του εργαλείου τέτοιας μορφής παράγονται ραφές με μειωμένο εκτοπισμένο

υλικό στην περιοχή RS, ενώ, λόγω της καλής ανάδευσης, μειώνεται το ποσοστό της ραφής που απομακρύνεται στην αρχή της συγκόλλησης. Παρόλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα όμως, να αναφερθεί ότι η διαμόρφωση του περιαιχενίου πρέπει να διεισδύει 0.1 με 0.25 mm μέσα στο υλικό. Μικρότερη ή μεγαλύτερη επαφή θα οδηγήσει σε κακή ραφή.

- Κυρτά περιαιχένια (Εικ. 3b): Βάσει της αναφοράς [1], επιτυχημένη συγκόλληση έχει παρατηρηθεί με shoulder διαμέτρου 5 mm σε έλασμα 0.4 mm. Πλεονέκτημα αυτών των διαμορφώσεων είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται σε επαφή όλη η επιφάνεια του περιαιχενίου με το μέταλλο ώστε το δεύτερο να παραμορφώνεται κατάλληλα. Η χρήση του δεν είναι διαδεδομένη καθώς σε πολλές περιπτώσεις συνδέεται με εκτόπισμα υλικού εκτός ραφής.



Εικόνα 3: Αριστερά:Εικόνα 3a: Περιαιχένιο με ελικώσεις, Δεξιά:Εικόνα 3b: Περιαιχένιο με κυρτή διαμόρφωση

2.3. Διαμόρφωση μικροδομής στην FSW

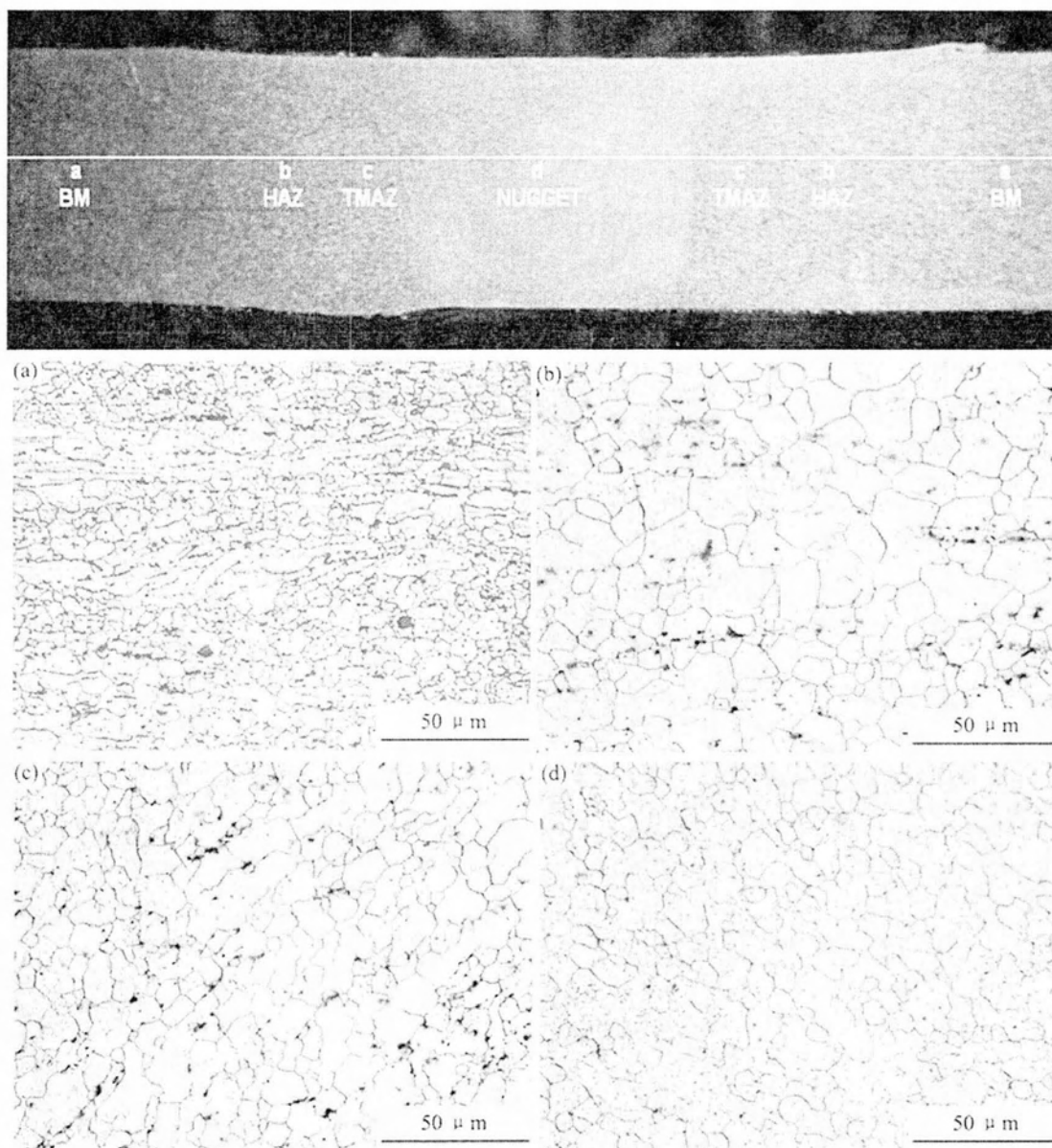
2.3.1. Περιοχές συγκόλλησης

Πριν την έναρξη συγκόλλησης FSW είναι σημαντικό να έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες συνθήκες που θα οδηγήσουν σε αποδεκτό αποτέλεσμα τόσο μακροσκοπικά όσο και σε επίπεδο μικροδομής και επίσης θα έχουν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Στις συγκολλήσεις FSW αναπτύσσονται τέσσερις διακριτές περιοχές, όπως φαίνεται και στην Εικ. 4. Οι περιοχές αυτές είναι:

- **Περιοχή ανάδευσης υλικού/Weld Nugget (NG):** Πρόκειται για την περιοχή όπου στο μέταλλο υφίσταται ανάδευση κάτω από την επίδραση της ακίδας και του περιαιχενίου. Εδώ η μικροδομή χαρακτηρίζεται από ισομεγέθεις απαραμόρφωτους κόκκους οι οποίοι έχουν υποστεί ανακρυστάλλωση και το μέγεθός τους μπορεί να είναι μικρότερο από αυτό του βασικού μετάλλου, ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες. Το άνω μέρος της περιοχής αυτής (flow arm zone) αποτελείται από το υλικό το οποίο είναι σε επαφή με το περιαιχένιο (shoulder).

Να αναφερθεί ότι η ομοιογένεια στη ζώνη ανάδευσης είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς τέτοιου είδους μικροδομή παρουσιάζει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στην κόπωση και καλή διαμορφωσιμότητα [1].

- **Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ):** Ευρίσκεται ανάμεσα στην θερμοεπηρεασμένη ζώνη και την περιοχή ανάδευσης του υλικού. Οι κόκκοι εδώ είναι παραμορφωμένοι και παρουσιάζουν κατευθυντικότητα υπό την επίδραση της περιστρεφόμενης ακίδας. Παρόλα αυτά τα ποσά θερμότητας που παράγονται κατά τη διαδικασία, επιδρούν και αυτά στο υλικό. Όσον αφορά το αλουμίνιο, είναι δυνατό να υπάρξει σημαντική παραμόρφωση στην περιοχή TMAZ χωρίς να υπάρξει ανακρυστάλλωση.
- **Θερμοεπηρεασμένη ζώνη (HAZ):** Η περιοχή αυτή παρατηρείται μεταξύ του βασικού μετάλλου και της TMAZ. Στη HAZ τα ποσά θερμότητας που απάγονται από την ζώνη ανάδευσης προκαλούν μετασχηματισμούς στερεάς κατάστασης.
- **Βασικό μέταλλο (BM):** Πρόκειται για την περιοχή μακριά από τη ραφή συγκόλλησης, όπου το υλικό παραμένει ανεπηρέαστο από αυτή.

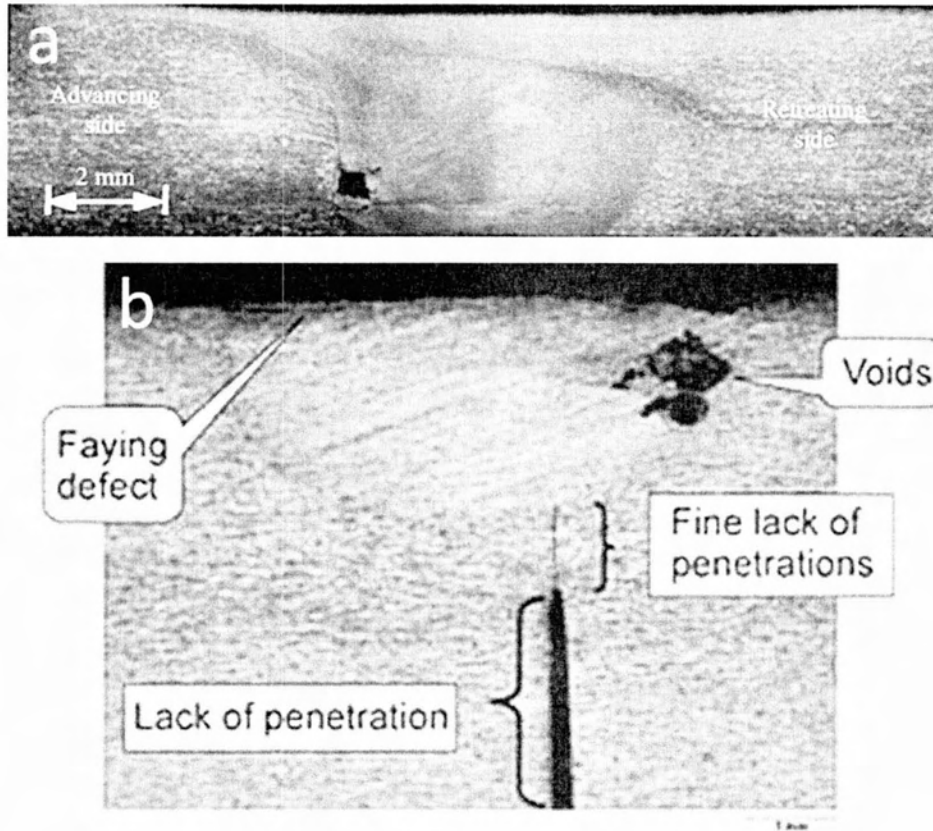


Εικόνα 4: Περιοχές συγκόλλησης και μικροδομή αυτών [3]

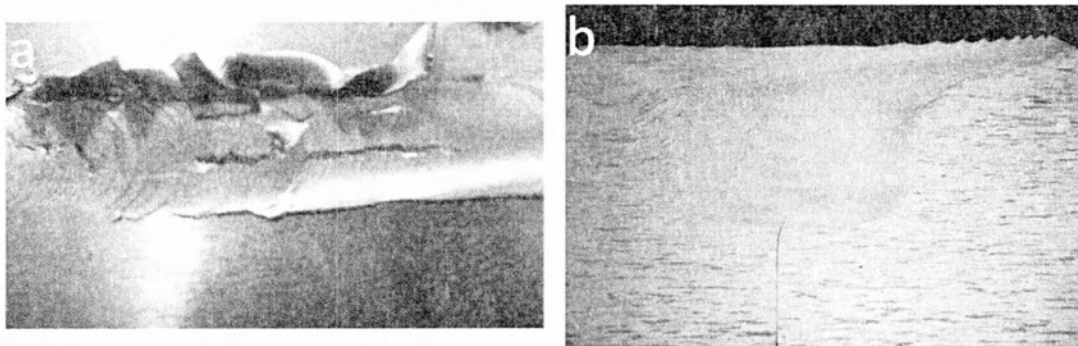
2.3.2. Σφάλματα συγκόλλησης

Όπως όλες οι μέθοδοι συγκολλήσεων, έτσι και η μέθοδος FSW δεν είναι απαλλαγμένη από ατέλειες. Αντίθετα, αν οι εφαρμοζόμενες συνθήκες δεν είναι οι κατάλληλες και η διαμόρφωση του εργαλείου δεν είναι τέτοια ώστε να διευκολύνει την διαδικασία, τότε θα προκύψει ραφή που θα παρουσιάζει μακροσκοπικές και μικροσκοπικές ατέλειες (Εικ. 5,6). Αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Εσωτερικοί πόροι: Συνήθως παρατηρούνται στην περιοχή απαγωγής του μετάλλου αλλά μπορεί να εμφανιστούν και σε αυτήν εναπόθεσης υλικού. Η εμφάνισή τους σχετίζεται με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες. Εάν η ταχύτητα πρόωσης του υλικού είναι πολύ μεγάλη ή η κάθετη φόρτιση είναι μικρή, τότε η πρόσδωση θερμότητας του εργαλείου στο υλικό θα είναι μικρότερη της απαιτούμενης. Επομένως η ροή του υλικού θα είναι αδύνατη ώστε να κλείσει το κενό που δημιουργήθηκε στην AS και έτσι το κενό αυτό θα αποτελέσει έναν πόρο της συγκόλλησης. Η δημιουργία εσωτερικών πόρων μπορεί να προκύψει και από ακατάλληλο σχεδιασμό του περιαιχενίου και της ακίδας.
- Ατελής διείδυση: Τα αίτια που οδηγούν σε αυτήν ατέλεια είναι: η μικρή κάθετη φόρτιση ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη διείδυση της ακίδας, η χρήση ακατάλληλου μήκους ακίδας το οποίο θα είναι αναντίστοιχο με το πάχος του ελάσματος προς συγκόλληση και με κακή ευθυγράμμιση του εργαλείου με την ακίδα. Αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη μιας ανεπηρέαστης ζώνης μεταξύ του κάτω μέρους της περιοχής ανάδευσης και του κάτω μέρος του μετάλλου, διαφορετικής κοκκομετρίας (Εικ. 5).
- Σφάλμα τύπου tunnel: Πρόκειται για μακροσκοπικές αυλακώσεις που είναι εμφανείς χωρίς τη βοήθεια μικροσκοπίου. Προκύπτουν λόγω ανεπαρκούς κάθετης φόρτισης ώστε να υπάρξει η απαιτούμενη τριβή εργαλείου/μετάλλου ώστε να υπάρξει ροή του δεύτερου ή λόγω κακής διαμόρφωσης του περιαιχενίου (Εικ. 6).
- Kissing bond: Αφορά ένα στρώμα οξειδίου διαμέσου της περιοχής ανάδευσης (NG). Προκύπτει λόγω ανεπαρκούς καθαρισμού των επιφανειών προς συγκόλληση ή λόγω ανεπαρκούς παραμόρφωσης του υλικού. Παρατηρείται σπάνια στις συγκολλήσεις (Εικ. 6).



Εικόνα 5: α: Εσωτερικοί πόροι στην AS, β: Ατελής διείσδυση εργαλείου



Εικόνα 6: α: Σφάλμα τύπου tunnel , β: Ελάττωμα kissing bond

2.4. FSW-Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η μέθοδος των συγκολλήσεων δια τριβής και ανάδευσης εμφανίζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

- Στις συγκολλήσεις FSW τα μέταλλα προς συγκόλληση παραμένουν σε στερεή κατάσταση. Η ραφή συγκόλλησης δεν εμφανίζει τα προβλήματα που συνδέονται με την στερεοποίηση, όπως συμβαίνει με τις κλασικές μεθόδους συγκολλήσεων με τήξη [4]. Ένας από τα συνηθέστερα προβλήματα που συνδέονται με την στερεοποίηση της ραφής συγκόλλησης είναι η εμφάνιση εσωτερικών πόρων λόγω εγκλωβισμού αερίων σε αυτήν,

ενώ ως προς την ψύξη σύνηθες είναι το φαινόμενο της θερμής ρηγμάτωσης όπου το υλικό δεν έχει στερεοποιηθεί πλήρως και επομένως δεν μπορεί να προβάλλει την αναγκαία αντίσταση στις τάσεις που του ακούονται, με αποτέλεσμα το «διαχωρισμό» της μικροδομής [5].

- Καλές μηχανικές ιδιότητες. Όταν η επιλογή εργαλείου και συνθηκών είναι κατάλληλα, τότε η συγκόλληση θα είναι απαλλαγμένη από εσωτερικά και εξωτερικά σφάλματα. Κατά συνέπεια τα επίπεδα των μηχανικών ιδιοτήτων θα είναι εξαιρετικά
- Τα εργαλεία συγκόλλησης δεν αναλίσκονται. Αντιθέτως είναι κατασκευασμένα από υλικά πολύ σκληρότερα από τα μέταλλα που συγκολλούν έτσι ώστε να μηδενίζονται οι πιθανότητες φθοράς τους. Στατιστικά, ένα εργαλείο από εργαλειοχάλυβα με ακίδα με σπείρωμα έχει τη δυνατότητα δημιουργία μήκους ραφής 1 km σε αλουμίνιο χωρίς την προσθήκη τρίτου υλικού ή προστατευτικού αερίου [4].
- Βελτιωμένη ασφάλεια, εφόσον δεν χρησιμοποιούνται προστατευτικά αέρια που πιθανώς να δημιουργήσουν βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα προβλήματα υγείας. Μειωμένη επιβάρυνση του περιβάλλοντος εφόσον αποφεύγεται η χρήση αερίων για την προστασία της συγκόλλησης
- Στις περισσότερες φρέζες συγκόλλησης η διαδικασία είναι ως επί το πλείστον αυτοματοποιημένη. Έτσι δεν απαιτείται ιδιαίτερη εκπαίδευση για τη χρήση τους [4].
- Εφόσον δεν υφίσταται λίμνη συγκόλλησης, μπορεί να υπάρξει συγκόλληση σε πολλές θέσεις
- Εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκολλητά μέρη αλουμίνιου ή μαγνησίου μέσω FSW βρίσκουν ευρείς εφαρμογές αντικαθιστώντας τμήματα από βαρύτερα υλικά μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου.

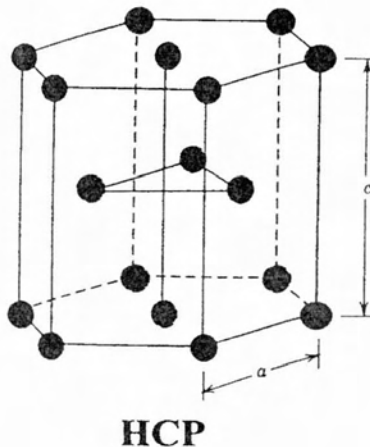
Παρόλα τα προτερήματα που παρουσιάζει η μέθοδος όμως, εμφανίζει και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τόσο οι δυνάμεις που ασκούνται κατακόρυφα από το εργαλείο όσο και η πίεση που ασκείται από αυτό στη διεύθυνση πρόωσης είναι τέτοιας τάξης μεγέθους ώστε να απαιτείται ισχυρή συγκράτηση των ελασμάτων προς συγκόλληση. Σε αντίθετη περίπτωση το αποτέλεσμα δε θα είναι το επιθυμητό [4].
- Εσωτερικά και εξωτερικά σφάλματα. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, εφόσον οι εφαρμοζόμενες συνθήκες δεν είναι οι ιδανικές για την συνένωση δύο μετάλλων, η ραφή συγκόλλησης θα παρουσιάσει είτε εξωτερικά, μακροσκοπικά σφάλματα είτε εσωτερικές ατέλειες των οποίων η παρατήρηση γίνεται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.
- Ανεπαρκείς θερμοκρασίες συγκόλλησης λόγω των χαμηλών στροφών ή υψηλές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα ασυνέχειας στα προς συγκόλληση τεμάχια, δυσκολία στην ανάμειξη κτλ.

2.5. Κράματα Μαγνησίου

2.5.1. Εισαγωγή-Φυσικές ιδιότητες

Το όνομα “Μαγνήσιο” προέρχεται από τη Μαγνησία της Θεσσαλίας από όπου προέρχεται το κοίτασμα του μαγνησίτη $MgCO_3$. Είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Mg και πρόκειται για ένα μέταλλο, το οποίο είναι 8^ο στη σειρά σε αφθονία στο φλοιό της γης. Η δομή του είναι πυκνή εξαγωνική (HCP) με $a=0.32$ nm, $c=0.52$ nm (Εικ. 7) και επομένως λόγω παραμέτρων $c/a=1.624$, κοντά δηλαδή στον ιδανική λόγο 1.63 [6]. Το μαγνήσιο εμφανίζει παρεμφερή αντοχή στη διάβρωση με το μαλακό χάλυβα και μικρότερη από αυτή του αλουμινίου. Έχει την τάση να αντιδρά με το οξυγόνο αλλά όχι έντονα, καθώς αναπτύσσει προστατευτικό επιφανειακό στρώμα οξειδίου του Μαγνησίου (MgO), ενώ αντιδραστικότητα υφίσταται άμα έρθει σε επαφή με το νερό. Εντούτοις, παρόλο που η πυκνότητά του είναι σχετικά μικρή (1.738 kg/m³) και μάλιστα είναι στα 2/3 αυτής του αλουμινίου, είναι ένα ιδιαίτερα ανθεκτικό μέταλλο, το οποίο με την πάροδο του χρόνου βρίσκει όλο και περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές. Βέβαια, λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει ως καθαρό μαγνήσιο, η είσοδος του στην παγκόσμια βιομηχανία συνδέεται με την ανάμιξή του με κραματικά στοιχεία [7]. Στον Πίνακα 1 συγκρίνονται οι φυσικές ιδιότητες του μαγνησίου με αυτές του αλουμινίου και του σιδήρου.



Εικόνα 7: Πυκνή εξαγωνική δομή Mg

Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες του Mg, Al και Fe [8]

Ιδιότητες	Mg	Al	Fe
Πυκνότητα (kg/m ³)	1.74	2.38	7.87
Σημείο τήξης (°C)	650	660	1535
Συντελεστής κυβικής διαστολής (°C ⁻¹)	2.61.10 ⁻⁵	2.4.10 ⁻⁶	12.2.10 ⁻⁵
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	44	68	200
UTS (MPa)	90	100	540
Ειδικό μέτρο ελαστικότητας (GPa.g ⁻¹ .cm ³)	25	28	25
Ειδικό UTS (MPa.g ⁻¹ .cm ³)	52	42	69

2.5.2. Κραμάτωση μαγνησίου [6]

Η κραμάτωση του μαγνησίου χρησιμοποιείται για να βελτιωθούν οι ιδιότητές του. Τα πιο κοινά κραματικά στοιχεία είναι το Al, ο Zn, το Mn, το Zr, ο Ag, το Yt. Το Al βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων και με περιεκτικότητα στο 6% επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικών ιδιοτήτων και ολκιμότητας. Ο ψευδάργυρος (Zn) βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όταν αυτό συνυπάρχει με το αλουμίνιο [6]. Ο άργυρος (Ag) προβάλλει καλή αντίσταση στη γήρανση του κράματος αλλά η χρήση του είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού του κόστους. Το ύτριο συμβάλλει στην αντοχή του κράματος στον ερπυσμό και η χρήση των σπάνιων γαιών συμβάλλει στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, στην αντοχή του στον ερπυσμό και στην μείωση μικροσπών κατά τη χύτευση.

2.5.3. Ονομασία κραμάτων Μαγνησίου [8]

Συνήθως η ονομασία των κραμάτων μαγνησίου αποτελείται από δύο γράμματα ακολουθούμενα από δύο αριθμούς. Τα γράμματα αναφέρονται στα δύο κύρια κραματικά στοιχεία που αποτελούν το κράμα και οι αριθμοί στην περιεκτικότητά τους σε αυτό. Για παράδειγμα, το κράμα AZ31 είναι ένα κράμα με κύρια κραματικά στοιχεία το αλουμίνιο (A) και τον ψευδάργυρο (Z) και η περιεκτικότητά τους κ.β. είναι 3% και 1% αντίστοιχα. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τη λίστα με τα συνηθέστερα κραματικά στοιχεία, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM (American Society for Testing and Materials).

Πίνακας 2: Προδιαγραφή ASTM για την ονομασία κραμάτων μαγνησίου [8]

Γράμμα	Κραματικό στοιχείο
A	Aluminium
C	Copper
E	Rare earth metals
H	Thorium
J	Strontium
K	Zirconium
L	Lithium
M	Manganese
Q	Silver
S	Silicon
W	Yttrium
X	Calcium
Z	Zinc

2.5.4. Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά, οι πρώτες χρήσεις του στοιχείου βρίσκονται στον 1^ο κι έπειτα στον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο. Το κράμα μαγνησίου που χρησιμοποιήθηκε την περίοδο εκείνη ήταν το κράμα Electron, το οποίο σήμερα περιλαμβάνει ένα εύρος περίπου 100 κραμάτων με την ίδια ονομασία. Έκτοτε, όμως, και για 5 δεκαετίες το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευσή του μειώθηκε κατακόρυφα. Το μαγνήσιο είναι εύφλεκτο υλικό όταν είναι σε μικρά κομμάτια ή σε σκόνη και αυτή είναι η ιδιότητά του που αξιοποιήθηκε κατά κύριο λόγο εκείνη τη χρονική περίοδο αφού χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή φλογοβόλων όπλων και βομβών. Συγχρόνως βρήκε εφαρμογές στην κατασκευή πολεμικών οχημάτων και αεροσκαφών, όπως τα ζέπελιν [9].

Ο ρυθμός κατανάλωσής του το 1944 ανερχόταν στους 228000 τόνους αλλά έπειτα περιορίστηκε στους 10000 τόνους. Παρόλα αυτά, η ανάγκη των βιομηχανιών για μείωση του βάρους των κατασκευών, αλλά η αναγκαιότητα μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων σε αυτοκίνηση και αεροναυπηγική, αποτέλεσαν κριτήριο για την εκ νέου χρησιμοποίηση κραμάτων με βάση το μαγνήσιο. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το 1998 η κατανάλωσή του αυξήθηκε στους 336000 τόνους [10]. Σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό του Mg και των κραμάτων του παράγεται μέσω της χύτευσης ενώ υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό παραγωγής τους μέσω των κατεργασιών της σφυρηλάτησης, της διέλασης και της έλασης [6].

2.5.5. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και ανάλυση

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα οφέλη που συνδέονται με τα κράματα μαγνησίου αλλά και οι περιορισμοί που τίθενται για τη χρήση αυτού. Ως προς τα πλεονεκτήματά του:

- Αποτελεί το ελαφρύτερο κατασκευαστικό μέταλλο και τρίτο σε χρήση μετά τον χάλυβα και το αλουμίνιο [7]
- Υψηλή ειδική αντοχή. Συγκριτικά, ο σίδηρος με αντοχή στη θραύση τα 540 MPa και πυκνότητα τα 7.87 g/cm³ παρουσιάζει ειδική αντοχή 69 MPa.g⁻¹.cm³

και το μαγνήσιο με αντοχή τα 90 MPa και πυκνότητα τα 1.738 g/cm^3 έχει αντίστοιχη τιμή τα $52 \text{ MPa}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm}^3$ (Πιν. 1)

- καλές ιδιότητες κατά τη χύτευση
- καλή συγκολλησιμότητα
- όσο πιο καθαρό είναι το μαγνήσιο από προσμίξεις, τόσο πιο καλή είναι η συμπεριφορά του στη διάβρωση
- υπάρχει άφθονο τόσο ως ορυκτό (μαγνησίτης, δολομίτης)

Σε αντίθεση με παραπάνω, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί ως προς τη χρήση του μαγνησίου και των κραμάτων του. Συγκεκριμένα:

- χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (45 GPa). Ο σίδηρος, συγκριτικά, έχει αντίστοιχη τιμή στα 200 GPa (Πιν. 1) [8].
- περιορισμένη διαμορφωσιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου
- περιορισμένη αντοχή στη θραύση και αντοχή στον ερπυσμό. Άλλωστε, το χαμηλό σημείο τήξης του καθαρού Mg στους 650°C από μόνο του, περιορίζει τις εφαρμογές του σε υψηλές θερμοκρασίες
- υψηλή χημική αντιδραστικότητα
- σε ορισμένα κράματα παρατηρείται χαμηλή αντίσταση στη διάβρωση
- μειωμένη ολκιμότητα [6].

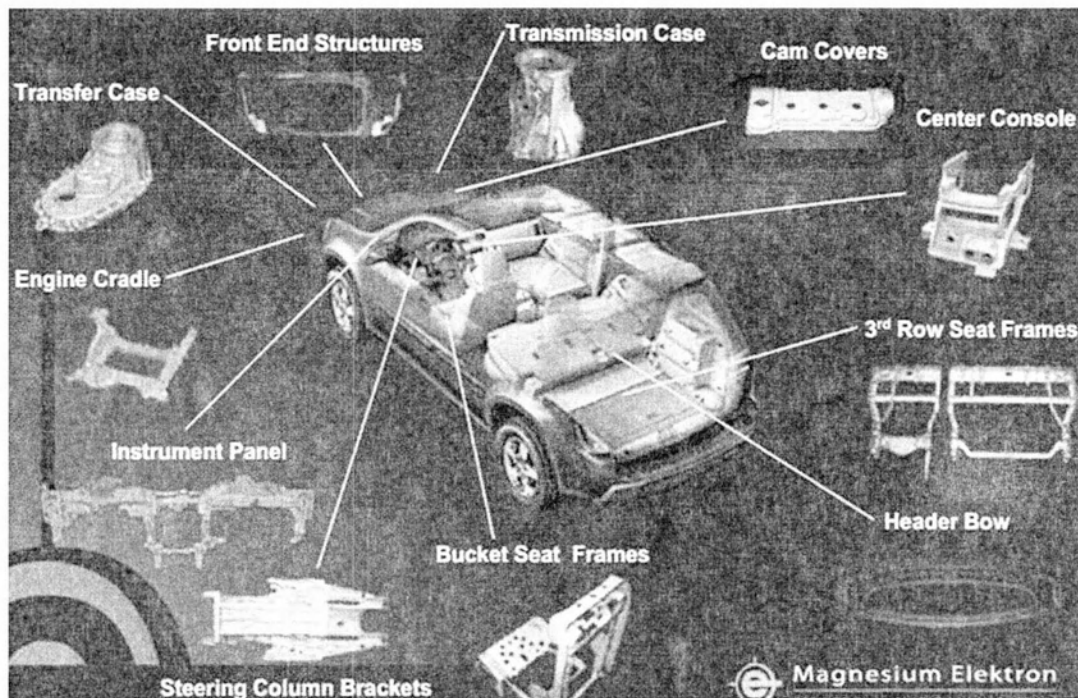
Σύμφωνα με το κριτήριο συμβατότητας απαιτούνται πέντε (5) ανεξάρτητα συστήματα ολίσθησης σε έναν πολυκρυστάλλο, ώστε να υπάρξει πλαστική παραμόρφωση μέσω ολίσθησης των αταξιών. Η HCP δομή του Mg διαθέτει δύο μόνο ανεξάρτητα συστήματα. Συγκεκριμένα η βασική ολίσθηση αταξιών στο μαγνήσιο γίνεται στο σύστημα $(0001)\langle 1120 \rangle$ ενώ το δεύτερο σύστημα είναι αυτό της πρισματικής ολίσθησης, $(1010)\langle 1120 \rangle$ [11]. Η συμπεριφορά αυτή και γενικά τα μειονεκτήματα που εμφανίζει το μέταλλο είναι δυνατόν να αλλάξουν με την κραμάτωσή του.

Σήμερα έχουν δημιουργηθεί διάφορα κράματα, καθένα από τα οποία βρίσκει διαφορετικές χρήσεις. Κράματικά συστήματα όπως αυτά των Mg-Si, Mg-Al-Ca-(RE) και Mg-Li-X δημιουργούν μία μικτή μικροδομή BCC και HCP με βελτιωμένη ολκιμότητα [10]. Η προσθήκη Al σε περιεκτικότητα 6% δίνει τον βέλτιστο συνδυασμό αντοχής και ολκιμότητας. Στοιχεία όπως ο Αργυρος (Ag), το ύπτριο (Y) και ο κασσίτερος (Sn) βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου ενώ οι σπάνιες γαίες (RE) και το θόριο βελτιστοποιούν την αντοχή στον ερπυσμό [6].

2.5.6. Εφαρμογές

Η χρήση των κραμάτων μαγνησίου περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που αφορά την κατασκευή πυροτεχνημάτων και μεταλλουργικές, χημικές, ηλεκτροχημικές και κατασκευαστικές εφαρμογές. Πάνω από τη μισή ετήσια παραγωγή του μαγνησίου, σήμερα, καταναλώνεται ως υποκατάστατο υλικό του αλουμινίου σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές και αντοχή στη διάβρωση. Η υπόλοιπη παραγωγή χρησιμοποιείται ως χυτά ή σφυρήλατα εξαρτήματα, όπου αξιοποιείται κυρίως η καλή αναλογία αντοχής/βάρους του υλικού. Η χρησιμότητα των κραμάτων μαγνησίου σε αυτούς τους τομείς είναι τέτοια ώστε τα τελευταία χρόνια να υπάρχει μεγάλη ερευνητική προσπάθεια ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητές τους.

Ο τομέας στον οποίο τα κράματα μαγνησίου έχουν μπει δυναμικά, είναι αυτός της αυτοκίνησης καθώς όλο και περισσότερα μέρη με βάση το αλουμίνιο αντικαθίστανται. Επομένως, το αυτοκίνητο γίνεται ακόμα ελαφρύτερο, κάτι που συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση καυσίμων και άρα μικρότερη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Πλέον, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, τα πλαίσια του τιμονιού και του ταμπλώ, τα περιβλήματα του κιβωτίου ταχυτήτων και του συμπλέκτη, τα πλαίσια των καθισμάτων και οι μηχανισμοί κίνησής τους, οι φλάντζες στεγάνωσης και άλλα μέρη των αυτοκινήτων κατασκευάζονται από κράματα Mg [10]. Στα αγωνιστικά αυτοκίνητα δε, χρησιμοποιούνται ζάντες μαγνησίου. Η Εικ. 9 άλλωστε αποδεικνύει ότι οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στραφεί στη χρήση μετάλλου αυτού και των κραμάτων του βάσει στατιστικών στοιχείων του 2007 [12]. Αξιοποίηση των κραμάτων μαγνησίου παρατηρείται και στις αερομεταφορές. Από τον β' παγκόσμιο πόλεμο χρησιμοποιούνταν στα μαχητικά αεροπλάνα, ενώ στις μέρες μας χρησιμοποιούνται και στα συμβατικά. Το συμβατικό αεροσκάφος EMB ERJ χρησιμοποιεί χυτό ZE41 στο πλαίσιο των τουρμπίνων του, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα αεροσκάφη τύπου Cessna. Τα κιβώτια ταχυτήτων διαφόρων ελικοπτέρων χρησιμοποιούν χυτό WE43 ενώ το ίδιο κράμα χρησιμοποιείται στο σύστημα μετάδοσης των αεροσκαφών Bell Agusta 609 [12].



Εικόνα 8: Αξιοποίηση κραμάτων Mg στην αυτοκίνηση [12]

Major Platforms Using Magnesium

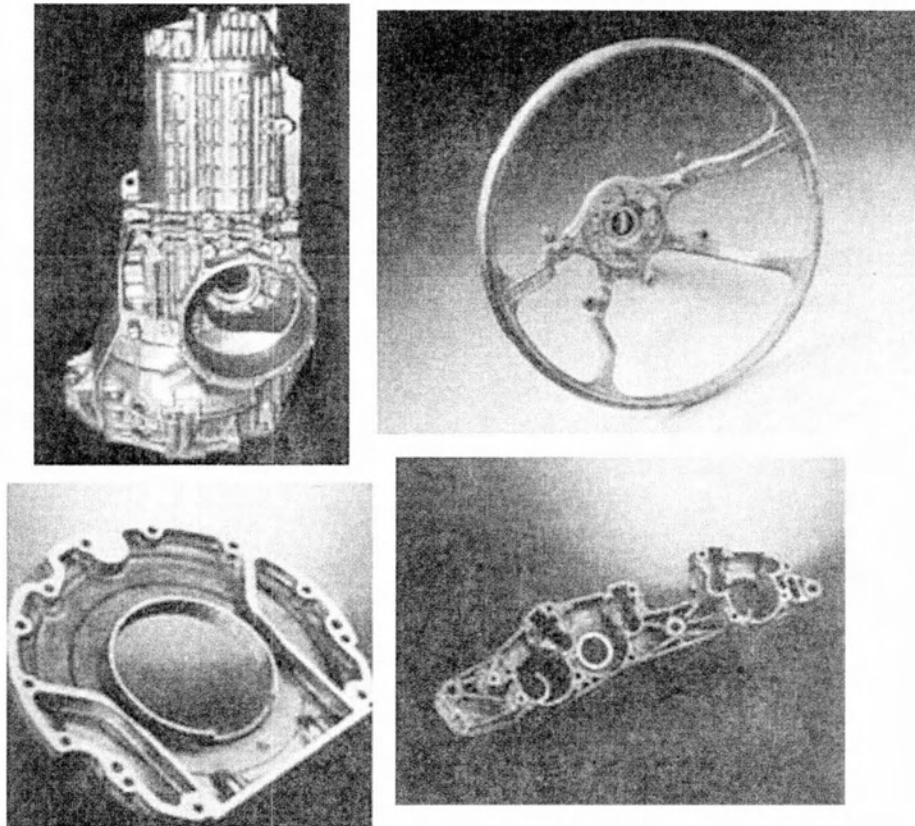
- GM Full Sized Vans - Savana & Express - up to 26,3 kg
- Audi A6-2,8 Multitronic - up to 20,31 kg
- GM Minivans - Safari & Astro - up to 16,7 kg
- Ford F-150 Truck - 14,9 kg
- VW Passat, Audi A4 & A6 - from 13,6 to 14,5 kg
- Audi TT - from 11,48 to 12,51 kg
- Porsche Boxster Roadster - 9,9 kg
- Buick Park Avenue - 9,5 kg
- Alfa Romeo 156 - 9,3 kg
- Jaguar XJ - 8,7 kg
- Golf & Polo - from 8,16 to 9,19 kg
- DaimlerChrysler SLK Roadster - 7,7 kg



Εικόνα 9: Στατιστικά χρήσης κραμάτων Mg στην αυτοκίνηση [12]



Εικόνα 10: Χρήσεις χυτού we43 στο πλαίσιο του κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και του συστήματος κίνησης (δεξιά) [12]



Εικόνα 11: Εξαρτήματα αυτοκινήτων με βάση τα κράματα μαγνησίου. Πάνω αριστερά: Περίβλημα κιβωτίου ταχυτήτων, Πάνω δεξιά: Πλαίσιο τιμονιού, Κάτω αριστερά: Φλάντζα στεγάνωσης, Κάτω δεξιά: Μηχανισμός κίνησης καθισμάτων [10]

2.6. Κράματα μαγνησίου και FSW

Τα τελευταία χρόνια οι χρήσεις των κραμάτων Mg πληθαίνουν όλο και περισσότερο ενώ παράλληλα οι συγκολλήσεις FSW κερδίζουν επίσης έδαφος σε τομείς όπως η αυτοκίνηση ή αεροδιαστημική, κ.α.. Πολλά είναι τα ερευνητικά κέντρα, όπου την τελευταία δεκαετία έχουν προχωρήσει σε πειραματικές μελέτες, ώστε να μελετηθεί η συγκολλησιμότητα των συγκεκριμένων κραμάτων υπό αυτή τη μέθοδο. Στον Πίνακα 3 γίνεται αναφορά στα κράματα όπου έχει εφαρμοστεί η μέθοδος FSW, με το κράμα AZ31 να παρουσιάζει τις περισσότερες αναφορές. Στην Εικ. 12 φαίνεται και το διάγραμμα φάσεων του συγκεκριμένου κράματος. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των ερευνητικών αυτών αναφορών που εστιάζουν σε:

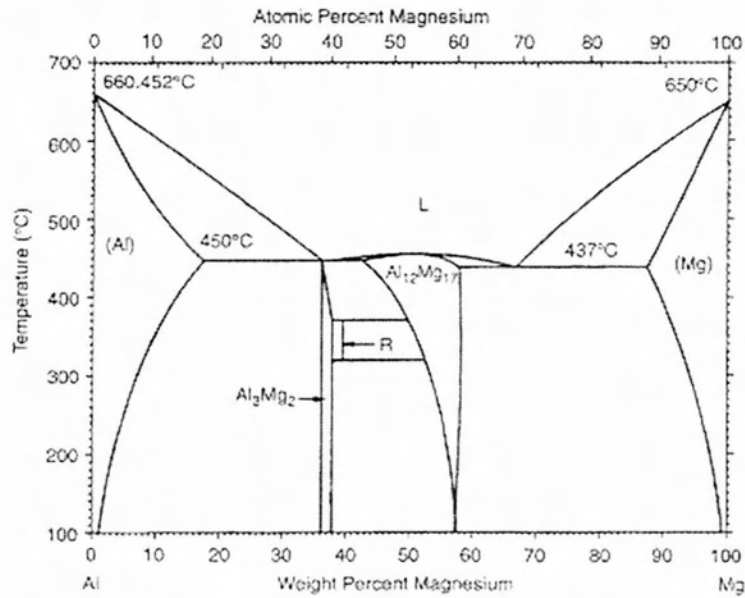
1. Προσδιορισμός συνθηκών που θα συγκολλούν τα κράματα αποτελεσματικά, ώστε αυτά να είναι απαλλαγμένα από εσωτερικές και εξωτερικές ατέλειες. Η συνθήκες συγκόλλησης αφορούν
 - I. την ταχύτητα περιστροφής R (rpm)
 - II. την ταχύτητα πρόωσης V (mm/min)
 - III. την κάθετη φόρτιση F (kg)
2. Κατανόηση του μηχανισμού FSW εφόσον μία ή περισσότερες παράμετροι αλλάζουν
3. Συσχέτιση των συνθηκών συγκόλλησης με την μικροδομή
4. Μέτρηση των σφαλμάτων και η σύνδεσή τους με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες, εάν αυτά υπάρχουν

5. Η μελέτη επιρροής των διαμορφώσεων της ακίδας και του περιαιχένιου του εργαλείου στη μικροδομή της σύνδεσης.

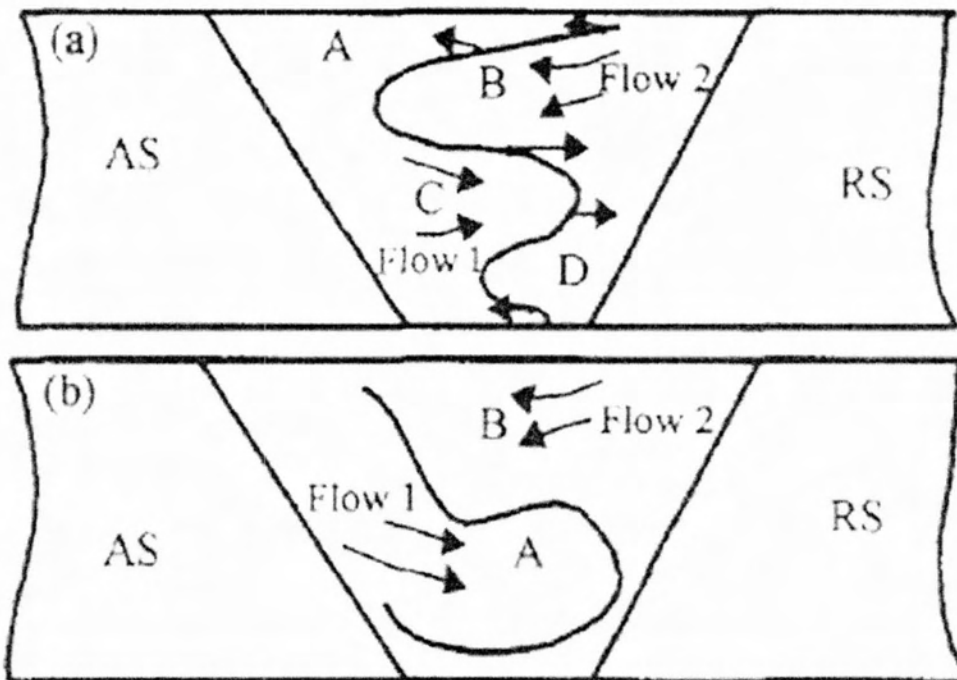
Πίνακας 3: Στοιχεία αναφορών FSW σε κράματα μαγνησίου

Κράμα	Πάχος Ελάσματος(mm)	Αριθμός αναφορών	Κράμα	Πάχος Ελάσματος(mm)	Αριθμός αναφορών
AZ31	2	1	AZ61	3	1
	3	1	MB3	3	1
	4	1	WE43	6	1
	5	3	ZRE1	6	1
	6	1	MSR-B	6	1
AZ91	6	1			

Σε πολλές από τις δημοσιευμένες εργασίες ο σχεδιασμός της συγκόλλησης είναι τέτοιος ώστε κατά τη διάρκεια των περαμάτων, διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης από συγκόλληση σε συγκόλληση κι έπειτα αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Σε αυτή την κατεύθυνση κινείται η μελέτη της ερευνητικής ομάδας του H. Zhang κατά τη συγκόλληση του κράματος AZ31, πάχους 3 mm [13]. Για συγκολλήσεις με περιστροφή του εργαλείου στα 1000 rpm και προώσεις από 40-600 mm/min καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι για $0.04 < V/R < 0.2$ ραφές συγκόλλησης είναι απαλλαγμένες από ελαττώματα. Πόρος δημιουργείται στη ρίζα της περιοχής NG για συγκολλήσεις με πρόωση στα 200 mm/min ($V/R=0.2$), ενώ όσο μεγαλώνει η ταχύτητα πρόωσης, οι πόροι αυξάνονται σε αριθμό και μεταφέρονται στην περιοχή AS και προς τα πάνω ενώ το μέγεθός τους αυξάνεται. Σε παρεμφερή μελέτη του Zhang Hua, για $R=1000$ rpm, πόροι υπεισέρχονται για $V/R=0.5$, κάτι που σημαίνει ότι η κάθετη φόρτιση εδώ είναι μεγαλύτερη. Παρατηρεί ότι για μικρές προώσεις διακρίνονται τέσσερις υποπεριοχές ανάδευσης. Οι δύο από αυτές περιλαμβάνουν υλικό μεταφερόμενο από την περιοχή AS στην RS και οι άλλες δύο επιτελούν την αντίστροφη διαδικασία. Οι περιοχές αυτές εμφανίζονται εναλλάξ και σε μεγάλες προώσεις, οι υποπεριοχές μειώνονται σε δύο [14].



Εικόνα 12: Διάγραμμα φάσεων του κράματος AZ31

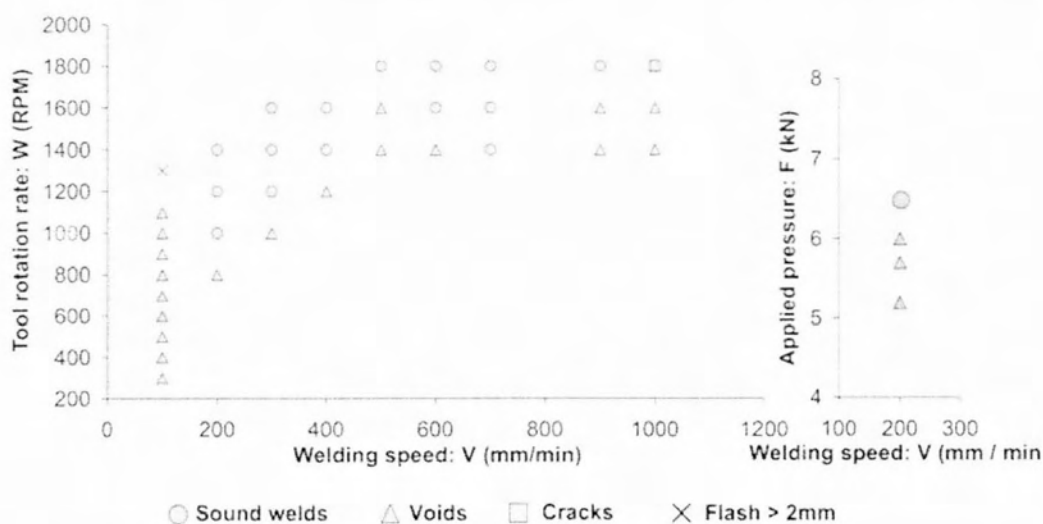


Εικόνα 13: Υποπεριοχές ανάδευσης στο συγκολλητό κράμα AZ31, α: για μικρές και β: για μεγάλες προώσεις [14]

Η ερευνητική ομάδα G. Radmanaban, από την άλλη, δίνει έμφαση στην επιρροή των διαστάσεων και των διαμορφώσεων που εμφανίζουν τα εργαλεία συγκόλλησης στην ποιότητα αυτής σε κράμα AZ31B 6 mm, όπως και το ρόλο του υλικού του εργαλείου [15]. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιούνται με ακίδα με διάμετρο 6 mm και σταθερή περιστροφή και πρόωση. Το φάσμα των πειραμάτων ήταν ευρύ για να αποδειχθεί ότι ποιοτικές ραφές με καλές μηχανικές ιδιότητες παράγονται με εργαλείο ανθρακοχάλυβα ακίδας κυλινδρικής με σπείρωμα με

διάμετρο 6 mm και διάμετρο περιαιχηνίου 18 mm. Για το ίδιο κράμα, ο P. Mottaleb-nejad στο ίδιο μοτίβο πραγματοποιεί συγκολλήσεις με σταθερή συχνότητα $R/V=10$ και για τρία διαφορετικά προφίλ [2]. Καλές συγκολλήσεις επιτυγχάνονται με κυλινδρική με σπείρωμα και με κωνικής διαμόρφωσης ακίδες ενώ με ακίδα της δεύτερης διαμόρφωσης οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής είναι βέλτιστες. Διαπιστώνεται παράλληλα ότι για υψηλές προώσεις και χαμηλές περιστροφές, η προκύπτουσα μικροδομή είναι τέτοια που εξηγεί τις βέλτιστες τις μηχανικές τις ιδιότητες.

Η έρευνα του L. Commin και των συνεργατών του βρίσκεται σε συμφωνία με το αμέσως προηγούμενο συμπέρασμα [16]. Σε ελατό κράμα AZ31 πάχους 2 mm, προτείνουν ότι για την δημιουργία ποιοτικών ραφών απαιτούνται προώσεις μεγαλύτερες από 200 mm/min (Εικ. 13). Η εξακρίβωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τις αρχικές αναφορές, αλλά δικαιολογείται καθώς οι εφαρμοζόμενες φορτίσεις εδώ είναι μεγαλύτερες από 600 kg. Μάλιστα βάσει πίνακα, επιτυχή bead on plates επιτυγχάνονται για 1000-1800 rpm και 200-900 mm/min. Επίσης, φαίνεται ότι το μοντέλο που ανέπτυξαν οι Arbegast and Hartley όσον αφορά την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στην περιοχή NG στα αλουμίνια με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες, $\left(\frac{T}{T_m}\right) = K \left(\frac{W^2}{V \cdot 10^4}\right)^\alpha$, όπου K και α είναι σταθερές, T_m το σημείο τήξης του υλικού και W και V οι ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης αντίστοιχα, βρίσκει χρήσεις και στις συγκολλήσεις του AZ31. Παρακάτω αναφέρεται ότι οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και τάσεις διαφέρουν μεταξύ της περιοχών AS και RS ενώ οι προκύπτουσες μηχανικές ιδιότητες είναι υποδεέστερες από αυτές του BM. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε ταύτιση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν στις έρευνες των Wang Xunhong [17] και YU Sirong [3] για κράματα AZ31 και AZ31B με Ce. Μάλιστα, στην πρώτη αναφορά εξ αυτών υποδηλώνεται ότι επιτυγχάνεται αντοχή στη θραύση σε ποσοστό 93% του BM εφόσον οι συνθήκες είναι οι εξής: $R=1500$ rpm, $V=90$ mm/min και $F=150$ N. Στη δεύτερη αναφορά εξ αυτών, η μικροσκοπική ανάλυση παρουσιάζει κόκκους στο NG ελαφρά μεγαλύτερους από αυτούς στο BM, οι μικρότερες τιμές σκληρότητας παρατηρούνται στη HAZ ενώ η σκληρότητα της ραφής αυξάνεται από την επιφάνειά της προς τη ρίζα της συγκόλλησης.



Εικόνα 14: Συνθήκες bead on plate και επίδραση αυτών στην ποιότητα συγκόλλησης [16]

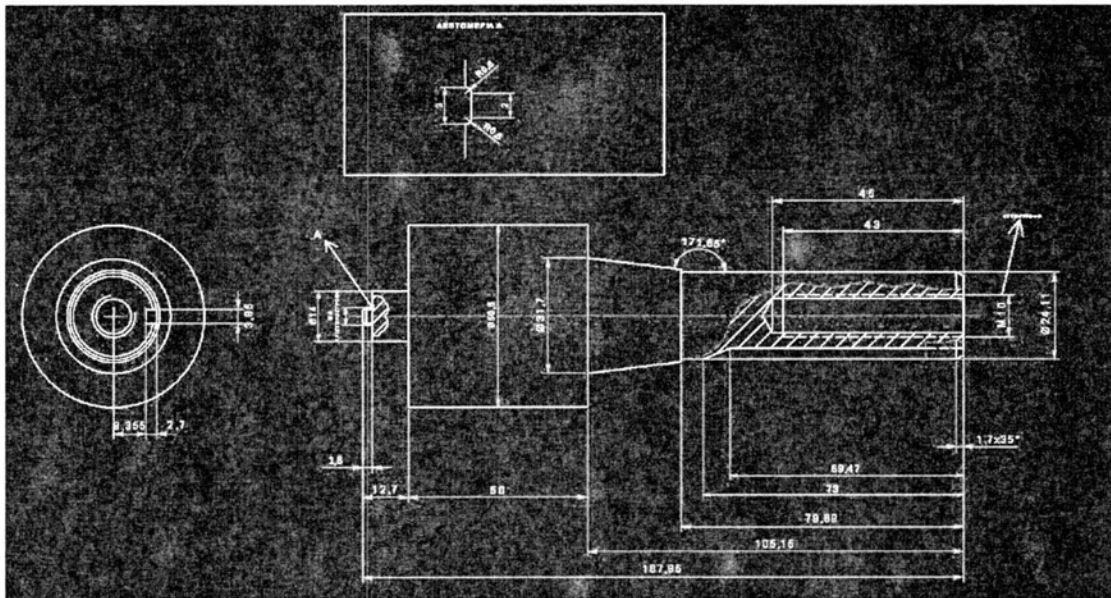
Αναφορές συγκολλήσεων FSW υφίστανται και για άλλα κράματα μαγνησίου. Η ερευνητική ομάδα του D. Miara εξετάζει τη συγκολλησιμότητα των κραμάτων AZ91, ZRE1, MB3, MSR-B και WE43 [18], όπου το τελευταίο κράμα θα ξανασυζητηθεί παρακάτω στην πειραματική διαδικασία. Φαίνεται ότι για $R=355$ rpm και $V=188-355$ mm/min παράγονται ποιοτικές συγκολλήσεις. Βάσει μετρήσεων θερμοστοιχείων προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα προαναφερθέντα κράματα πάχους 6 mm, είναι μεταξύ $160-220^{\circ}\text{C}$. Παράλληλα μέσω μηχανικών δοκιμών διαπιστώνεται η ψαθυρότητα της μικροδομής του κράματος AZ91. Τέλος, καλής ποιότητας συγκολλήσεις προκύπτουν για το κράμα AZ61, για $R=1220$ rpm και $V=1.5$ mm/s [19]. Το προφίλ σκληρομετρήσεων που προκύπτει πάντως δείχνει να είναι ομοιόμορφο και μικρότερες τιμές στην περιοχή ανάδευσης, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις υπόλοιπες δημοσιεύσεις.

3. Πειραματική Διαδικασία

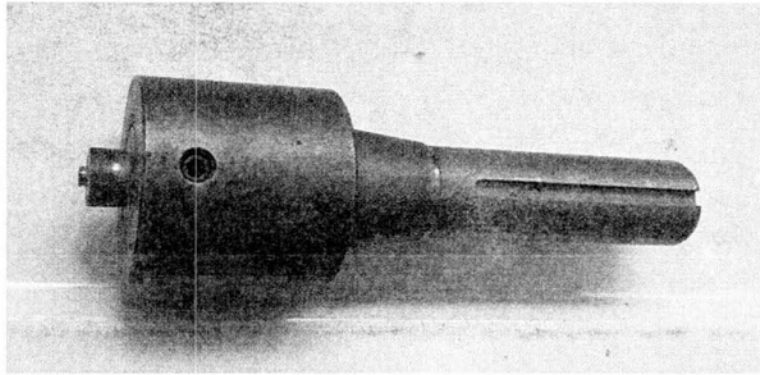
3.1. Μηχανή συγκόλλησης

Για τις συγκολλήσεις FSW χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη φρέζα του Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος. Η μετατροπή της φρέζας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας του Σ. Αθανασιάδη [20]. Λεπτομέρειες για τη μετατροπή της φρέζας καθώς και για την εγκατάσταση των αυτοματισμών που διαθέτει η μηχανή δίδονται στην εν λόγω Διπλωματική Εργασία.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε νέο εργαλείο συγκόλλησης, φαίνεται στις Εικ. 15 16. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χάλυβας AISI H13, και αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος του εργαλείου είναι ο κορμός του, ο οποίος βιδώνεται στη μηχανή συγκόλλησης. Το δεύτερο μέρος του είναι το περιαιχένιο και η ακίδα τα οποία βιδώνονται ένθετα στον κορμό του εργαλείου και είναι κατασκευασμένα επίσης από τον ίδιο χάλυβα. Η ακίδα είναι κυλινδρική με σπείρωμα. Το μήκος της είναι 1.8 mm, η διάμετρός της είναι 5 mm, ενώ το περιαιχένιο έχει διάμετρο 14 mm.



Εικόνα 15: Κατασκευαστικό σχέδιο εργαλείου συγκόλλησης



Εικόνα 16: Εργαλείο συγκόλλησης

3.2. Υλικό και παράμετροι συγκόλλησης

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν απλά περάσματα (bead on plate) στα ελατά κράματα μαγνησίου WE43-T5 και AZ31 με διαστάσεις 20x50x2 mm και 124x57x2 mm αντίστοιχα, ενώ πραγματοποιήθηκαν μετωπικές συγκολλήσεις στο κράμα AZ31, τόσο παράλληλα όσο και κάθετα στη διεύθυνση έλασής του. Η σύσταση των κραμάτων φαίνεται στον Πίνακα 4.

Τα απλά περάσματα πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλο εύρος πειραματικών συνθηκών πρόωσης (V), περιστροφής (R) και κάθετης φόρτισης (F), με σκοπό να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για συγκολλήσεις χωρίς εσωτερικά ή εξωτερικά σφάλματα. Περάσματα πραγματοποιήθηκαν και στα δύο ελάσματα, παράλληλα στη διεύθυνση έλασής τους.

Παρόλα αυτά, με την υπάρχουσα φρέζα και την εμπειρία του συγκολλητή, μόνο για το κράμα AZ31 προσδιορίστηκαν βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης. Οι πειραματικές συνθήκες για τα απλά περάσματα στα κράματα WE43-T5 και AZ31, δίδονται στους Πίνακες 5 και 6, αντίστοιχα.

Πίνακας 4: Χημική σύσταση κραμάτων

	Yt	Al	RE	Zn	Zr	Mn	Fe	Ni	Cu	Si	Mg
AZ31	-	3,06	-	0,80	-	0,25	0,003	<0.001	0.001	-	bal.
WE43	3.7-4.3	-	2.4-4.4	-	0.4	-	-	-	-	-	bal.

Πίνακας 5: Συνθήκες περασμάτων του κράματος WE43-T5

Ταχύτητα περιστροφής- R (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης-V (mm/min)	Κάθετη φόρτιση-F (kg)
355	140	500
355	150	230
355	180	180
355	280	240
355	300	500
355	500	500
355	500	230
830	25	330
830	25	460
830	25	580
830	50	625
1000	36.5	140
1000	50	175
1000	100	240
1000	100	400
1000	100	450
1150	26	250
1150	55	110

Πίνακας 6: Συνθήκες περασμάτων του κράματος AZ31

Bead on plate	Ταχύτητα περιστροφής R (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης V (mm/min)	F (kg)
I	820-830	50-55	390
II	820-830	50-55	410
IV	820-830	50-55	350-370
X	820-830	55-58	430
XI	820-830	55-58	400-430
XII	820-830	55-58	410-430
α	820-830	60	420-430
β	820-830	60	500
ε	820-830	88-90	420
ζ	820-830	88-90	408-418
η	820-830	88-90	410-430
θ	820-830	88-90	440-450
ι	820-830	88-90	460
κ	820-830	88-90	420-440
λ	820-830	113	410-430
μ	820-830	113	390

Από την πειραματική διερεύνηση, οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης που προέκυψαν είναι έξι και με αυτές έγιναν μετωπικές συγκολλήσεις (Πιν. 7), όλες με σταθερή ταχύτητα περιστροφής στα 825 rpm κατά μ.ο. Οι τρεις πρώτες εξ αυτών πραγματοποιήθηκαν κάθετα στη διεύθυνση της έλασης και οι υπόλοιπες τρεις παράλληλα σε αυτήν. Σε όλες τις συγκολλήσεις, υπήρχε κλίση του εργαλείου από την κατακόρυφο και αντίθετα από τη φορά πρόωσης κατά 2°.

Πίνακας 7: Συνθήκες συγκολλήσεων κράματος AZ31

Συγκολλήσεις	Συνθήκες		
	R (rpm)	V (mm/min)	F (kg)
1 ^η	820-830	58-60	450
2 ^η	820-830	58-60	420
3 ^η	820-830	88-90	440-450
4 ^η	820-830	55-56	450-460
5 ^η	820-830	80	440-460
6 ^η	820-830	102	430-455

3.3. Χαρακτηρισμός συγκολλήσεων

Για την αξιολόγηση των συγκολλήσεων που παρήχθησαν (bead-on-plate και μετωπικές συγκολλήσεις) ακολουθήθηκαν οι παρακάτω Εργαστηριακοί Έλεγχοι:

3.3.1. Μακροσκοπικός έλεγχος

3.3.1.1. Ραδιογραφία

Η πρώτη εκ των έξι (6) συγκολλήσεων υποβλήθηκε στον μη καταστρεπτικό έλεγχο της ραδιογραφίας. Η μηχανή ήταν τύπου Andrex και οι εφαρμοζόμενες συνθήκες ήταν 80 kV, και 2.0 mA.

3.3.2. Παρατήρηση μικροδομής

Η παρατήρηση της μικροδομής πραγματοποιήθηκε σε εγκάρσιες τομές σε μικροσκόπια μάρκας Leitz ARISTOMET και Leitz LABORLUX 12 ME S σε μεγεθύνσεις από 50x έως 500x. Τα δείγματα προς παρατήρηση αρχικά εγκιβωτίστηκαν σε καλούπια με χρήση ακρυλικής ρητίνης. Λειάνθηκαν σε λειαντικούς δίσκους SiC κοκκομετρίας από 500 έως 2400 grit. Ακολούθησε η στίλβωσή τους με διαμαντόπαστα κοκκομετρίας 1 μm και στο τελικό στάδιο με αλουμίνα.

Η χημική προσβολή των δοκιμών έγινε μέσω ασετοπικρικού διαλύματος (4.2 g πικρικό οξύ, 10 ml ασετικό οξύ, 10 ml απεσταγμένο νερό και 70 ml αιθανόλη).

3.3.3. Μικροσκληρομετρήσεις

Σε καθένα από τα bead on plate δημιουργήθηκαν από δύο προφίλ μικροσκληρομετρήσεων. Ένα κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης και ένα κοντά στη ρίζα της. Οι μικροσκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μικροσκληρόμετρο τύπου WOLPERT GROUP με φορτίο 300 gr, ενώ για κάθε μια από τις μετωπικές συγκολλήσεις δημιουργήθηκε ένα μόνο προφίλ στο κέντρο αυτής. Οι αποστάσεις των μετρήσεων είναι κατά μέσο όρο τα 500 μm.

3.3.4. Δοκιμές εφελκυσμού

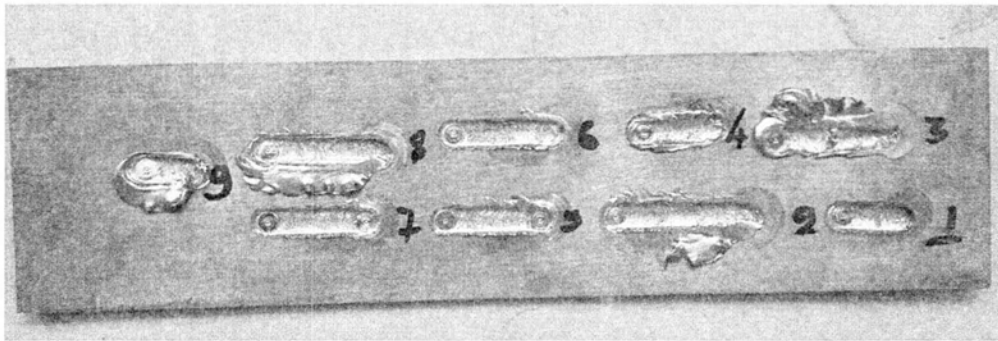
Δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στη σερβοϋδραυλική μηχανή INSTRON 8801 με δυναμικότητα 10 ton, του Τμήματος σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8. Τα δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν εγκάρσια στη ραφή συγκόλλησης.

4. Αποτελέσματα και συζήτηση

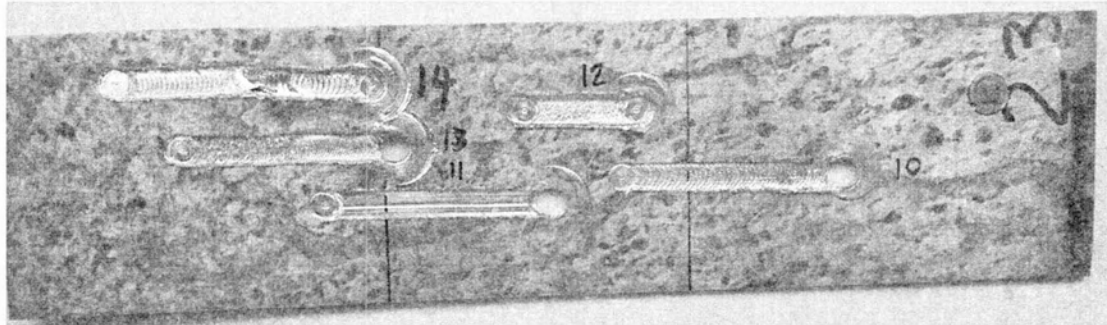
4.1. Κράμα μαγνησίου WE43-T5

Ως προς το κράμα WE43-T5 (Πίν. 5), πραγματοποιήθηκε πληθώρα περασμάτων γύρω από ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Οι συνθήκες που έχουν επισημανθεί με κόκκινο χρώμα είναι οι μοναδικές στις οποίες το εργαλείο είχε κλίση 2° από την κατακόρυφο και αντίθετα από τη φορά πρόωσης. Η μεθοδολογία αυτή δεν απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και το γιατί, εξηγείται στην §. 4.3.1.

Βάσει της εμπειρίας του συγκολλητή, τις πειραματικές συνθήκες (Πίν. 5) και τον διαθέσιμο εξοπλισμό, το αποτέλεσμα των περασμάτων στο κράμα WE43 είναι αυτό των Εικ. 17 και 18.



Εικόνα 17: Μακροσκοπική απεικόνιση απλών περασμάτων στο κράμα μαγνησίου WE43-T5



Εικόνα 18: Μακροσκοπική απεικόνιση απλών περασμάτων στο κράμα μαγνησίου WE43-T5

Μελετώντας την μακροδομή του κράματος WE43-T5 προκύπτουν τα εξής.

- Όπως φαίνεται, η προσπάθεια συνένωσης του υλικού αριστερά και δεξιά της ακίδας έχει αποτύχει, αφού περιοχή ανάδευσης δεν υπάρχει. Σε καθένα από τα περάσματα παρατηρείται η δημιουργία ενός αυλακιού με πλάτος αυτό της ακίδας και μήκος αυτό του περάσματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων δε, το υλικό δεν πλαστικοποιείται ενώ κατά τη διάρκεια όλων των περασμάτων παρατηρήθηκε ότι το έλασμα δεν ανέπτυξε υψηλή θερμοκρασία. Έτσι, η γενική διαπίστωση δηλαδή, είναι ότι τόσο κατά τη διείδυση της ακίδας, όσο και κατά την πρόωσή της, το υλικό έμοιαζε να θρυμματίζεται και να απομακρύνεται από τη ραφή και κυρίως στην περιοχή RS, σε λεπτές νιφάδες σε σχήμα μισοφέγγαρου. Το σχήμα αποδίδεται στην περιφέρεια της ακίδας που είναι κυκλική, αφού εκεί δημιουργούνταν οι νιφάδες.

Τα κύρια κραματικά στοιχεία του παρόντος κράματος είναι το Yt, οι σπάνιες γαίες, το Zr ενώ σε περιεκτικότητα <2% κ.β. περιέχεται και η σπάνια γαία του Nd. Βάσει στοιχείων που παρατίθενται σε επιστημονική έρευνα του Εργαστηρίου των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας [6], τα κραματικά αυτά στοιχεία στοχεύουν στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος τόσο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, σε βάρος της ολκιμότητας του υλικού. Παράλληλα, εάν τα κραματικά Mg-Re-Zr-Zn (όπως είναι και το κράμα WE43-T5) έχουν υποστεί θερμική κατεργασία κάτω από τους 200°C (το κράμα WE43-T5 έχει υποστεί γήρανση στους 200°C για 16 h), τότε στη μικροδομή του καθιζάνουν οι λεγόμενες β'' φάσεις Mg₃Nd [6]. Σημειώνεται ότι σε θερμική κατεργασία τύπου T5 η διασπορά της φάσης αυτής είναι μεγάλη και αρκετά λεπτομερής [21]. Η φάση αυτή είναι δομής πυκνής εξαγωνικής (HCP) όπως ακριβώς και του καθαρού Μαγνησίου. Όπως είναι γνωστό, οι φάσεις αυτές παρουσιάζουν μειωμένη δυνατότητα παραμόρφωσης και επομένως περιορισμένη ολκιμότητα. Τέλος η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα των κραματικών στοιχείων (Πίν. 7) πιθανολογείται να επηρεάζει την ολκιμότητα του υλικού και τη δυνατότητά του για παραμόρφωση όσο του ασκούνται δυναμικά φορτία από την ακίδα του εργαλείου. Η δυνατότητα απορρόφησης της θερμότητας που δημιουργείται λόγω τριβών, όπως φαίνεται, από τα κραματικά στοιχεία είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ιδιότητα του καθαρού Μαγνησίου, γεγονός που δυσχεραίνει τη δυνατότητα της πλαστικοποίησης του υλικού. Τα παραπάνω δεν συνεπάγονται, παρόλα αυτά, ότι το κράμα WE43, δεν είναι συγκολλησιμο. Η δημοσιευμένη έρευνα του D. Miara [18] καθορίζει βέλτιστες συνθήκες για τη συγκόλληση του κράματος. Αυτό που ισχύει όμως, είναι ότι η δημιουργία ποιοτικής ραφής για το κράμα αυτό, συμπεριλαμβάνεται ενδεχομένως σε ένα ιδιαίτερα περιορισμένο εύρος συνθηκών.

Σημειώνεται ότι μετά από κάθε πέραςμα το εργαλείο καθαριζόταν με διάλυμα 5% κ.β. NaCl σε απεσταγμένο νερό.

Πίνακας 8: Θερμική αγωγιμότητα στοιχείων [8]

Στοιχείο	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
Nd	13
Yt	14.6
Zr	16.7
Mg	159

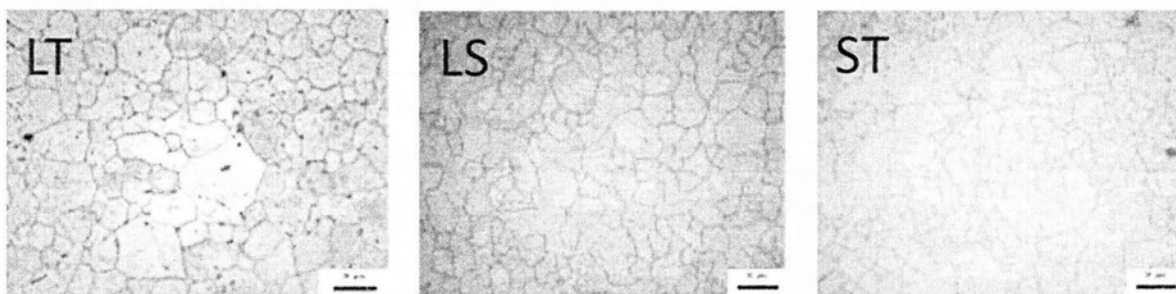
- Στις πειραματικές συνθήκες που επισημαίνονται με έντονο μαύρο χρώμα στον Πίνακα 5, υπάρχει η εξής ιδιαιτερότητα. Μετά τη διείδυση της ακίδας και πριν την έναρξη της πρόωσής της, μειώθηκε στατικά η κάθετη φόρτιση σε πολύ χαμηλές τιμές με σκοπό να αυξηθεί κατά την πρόωσή της στα επιθυμητά μεγέθη. Η μέθοδος αυτή δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς δεν οδήγησε σε ανάδευση του υλικού. Καθώς η ακίδα εισέρχεται περιστρεφόμενη στο έλασμα, οι κάθετες φορτίσεις είναι πολύ υψηλές και μάλιστα υψηλότερες από τις επιθυμητές τιμές. Παρόλα αυτά, το περιαιχένιο βρίσκεται σε επαφή με το έλασμα ώστε, μέσω τριβής, να το μαλακώσει και να δημιουργήσει αποτελεσματική ανάδευση, μειώνοντας σταδιακά τις κάθετες φορτίσεις στα επιθυμητά επίπεδα. Αντίθετα, μειώνοντας τις κάθετες φορτίσεις σε ελάχιστες τιμές στατικά, ώστε να αυξηθούν κατά την πρόωση του εργαλείου, το περιαιχένιο χάνει την επαφή του με το υλικό. Με αυτό τον τρόπο δεν προσδίδεται η απαιτούμενη θερμότητα ενώ η ακανόνιστη ροή του υλικού μέσω της ακίδας δημιουργεί απόβλιττο που αποτρέπει την επαφή του περιαιχενίου με το έλασμα. Το αποτέλεσμα μη επιτυχές αποτέλεσμα συγκόλλησης.

4.2. Κράμα μαγνησίου AZ31

4.2.1. Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το κράμα αυτό έχει ως κύρια κραματικά στοιχεία το αλουμίνιο και τον ψευδάργυρο (Εικ. 12). Το συγκεκριμένο κράμα έδειξε αποδεκτή συγκολλησιμότητα τόσο στη διεύθυνση έλασής του όσο και κάθετα σε αυτή, παρόλο που κατά την εφαρμογή ορισμένων συνθηκών παρατηρήθηκαν εσωτερικοί πόροι, όπως και εξωτερικά σφάλματα.

Παρακάτω στις Εικ. 19 και 20 γίνεται εμφανής η διαφορά της μικροδομής, όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων, του κράματος AZ31 σε σχέση με αυτό του κράματος WE43 μέσω μεταλλογραφιών στις τρεις διευθύνσεις του ελάσματος. Είναι λεπτόκοκκο χωρίς ιζήματα ώστε να περιορίζεται η παραμόρφωσή του. Από τις εικόνες, φαίνεται ότι το κράμα WE43-T5 έχει εργοσκληρύνει αρκετά, αφού εμφανίζει εκτεταμένα διδυμίες, γεγονός που σημαίνει ότι θα παρουσιάζει σχετική ευαισθησία σε περαιτέρω φόρτισή του, πόσο μάλλον όταν αυτή είναι δυναμική, όπως συμβαίνει στις συγκολλήσεις δια τριβής και ανάδευσης. Αντίθετα, το κράμα AZ31 παρουσιάζει απαρόμοφτους κόκκους στις τρεις διευθύνσεις.



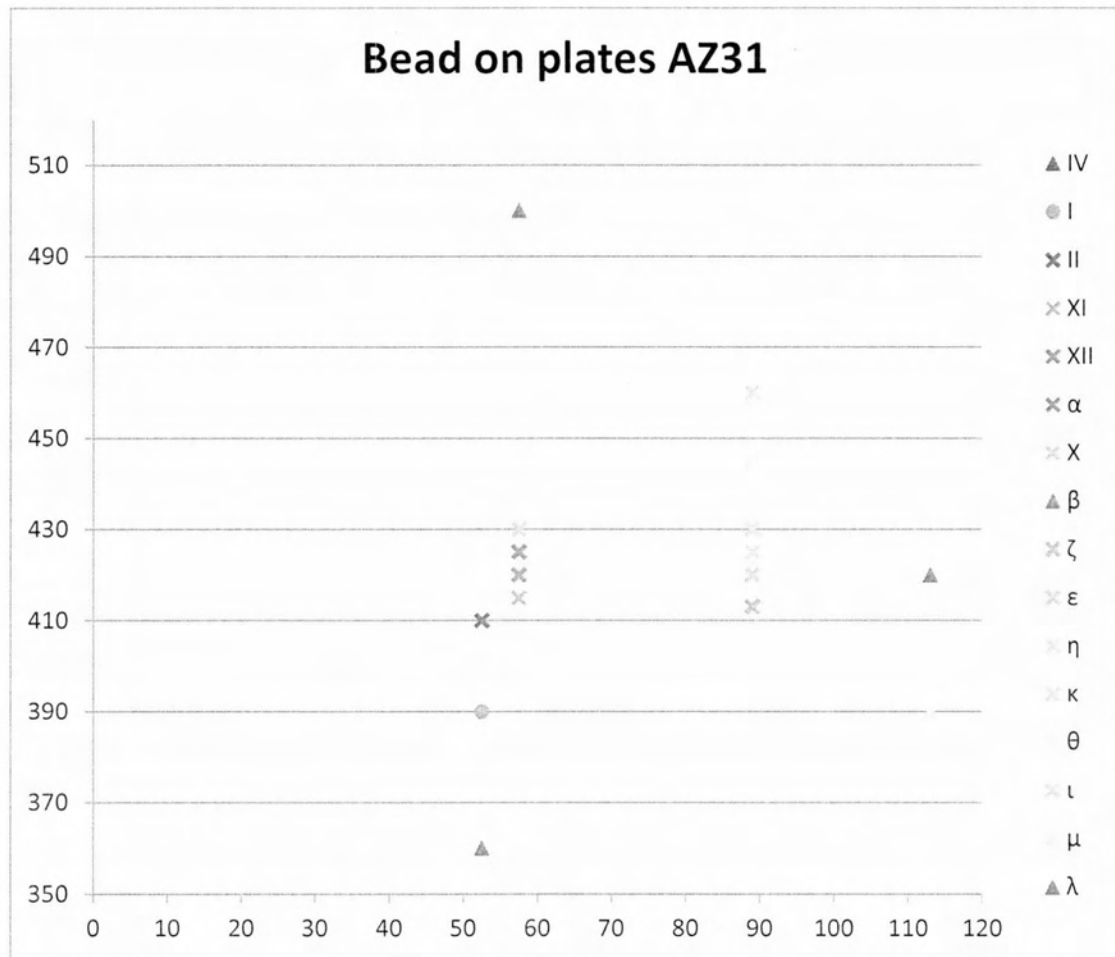
Εικόνα 19: Μικροδομή ελάσματος AZ31 στις τρεις (3) διευθύνσεις. Μέσο μέγεθος κόκκου 13-18μm [6]



Εικόνα 20: Μικροδομή ελάσματος WE43-T5 στις τρεις (3) διευθύνσεις. Μέγεθος κόκκου με μεγάλη διασπορά τιμών 20-80μm. Μέσο μέγεθος 60μm [6]

4.2.2. Αποτελέσματα μεταλλογραφίας των περασμάτων

Τα bead on plate του εξεταζόμενου κράματος είναι συνολικά δεκαέξι (16) και συνοψίζονται στον Πίνακα 6 και στην Εικ. 21.

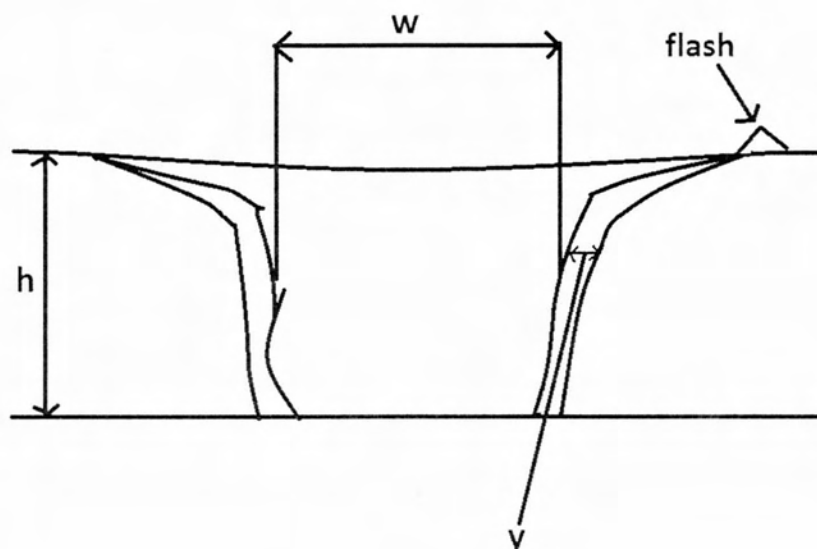


Εικόνα 21: Διάγραμμα ως προς συνθήκες bead on plate κράματος AZ31

Σημειώνεται ότι τα περάσματα του κράματος AZ31 είχαν όλα σταθερή ταχύτητα περιστροφής στα 825 rpm M.O.. Καθεμιά από τις σημάνσεις που φαίνονται στην Εικ. 21 ερμηνεύεται ως εξής:

- **Κυκλική σήμανση:** Υποδηλώνει ποιοτικό πέραςμα, όπου το υλικό που απομακρύνεται από την περιοχή ανάδευσης με τη μορφή αποβλίττου (flash), έχει πλάτος μικρότερο από 2 mm
 - **Σήμανση σχήματος "x":** πέραςμα με flash > 2 mm
 - **Τριγωνική σήμανση:** Πέραςμα με εσωτερικές ή και εξωτερικές αυλακώσεις
- Τόσο στα περάσματα όσο και στα συγκολλητά δοκίμια πραγματοποιήθηκε παρατήρηση μέσω οπτικού στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου, ώστε να ποσοτικοποιηθούν τα παρακάτω μεγέθη (Εικ. 22):
- Το μέγεθος του αποβλίττου (flash)
 - το πλάτος του NG, w
 - το βάθος της διείδυσης, h
 - το πλάτος της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης, γ

Οι φωτογραφίες μέσω του οπτικού στερεοσκοπίου αρκούν για τη μέτρηση των τριών πρώτων μεγεθών, ενώ για τη μέτρηση της TMAZ χρησιμοποιήθηκαν και αυτές του οπτικού μικροσκοπίου. Συνολικά η παρουσίαση των αποτελεσμάτων δίδεται στον Πίνακα 9.

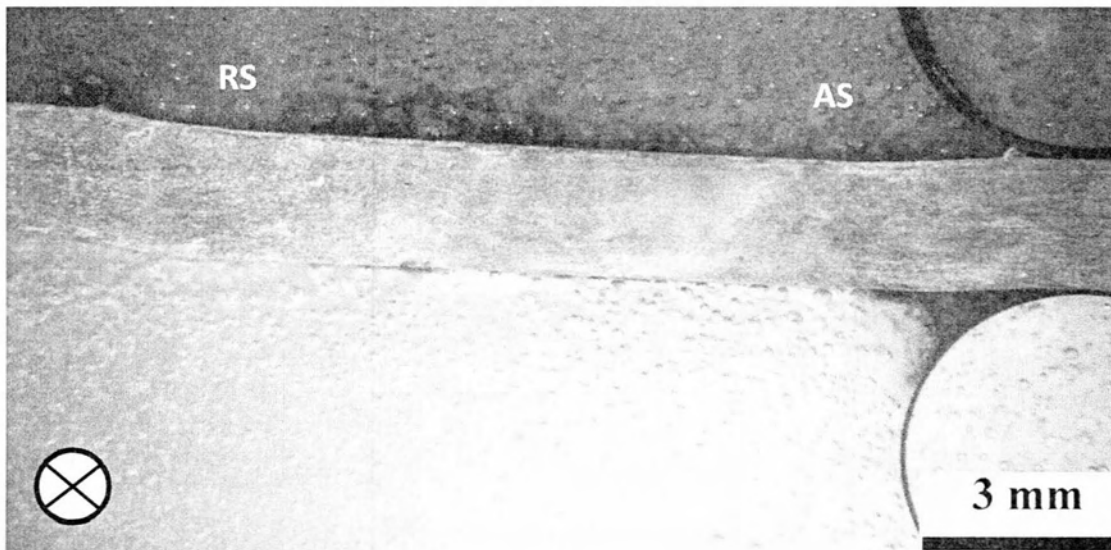


Εικόνα 22: Απεικόνιση μεγεθών προς μέτρηση στην περιοχή συγκόλλησης

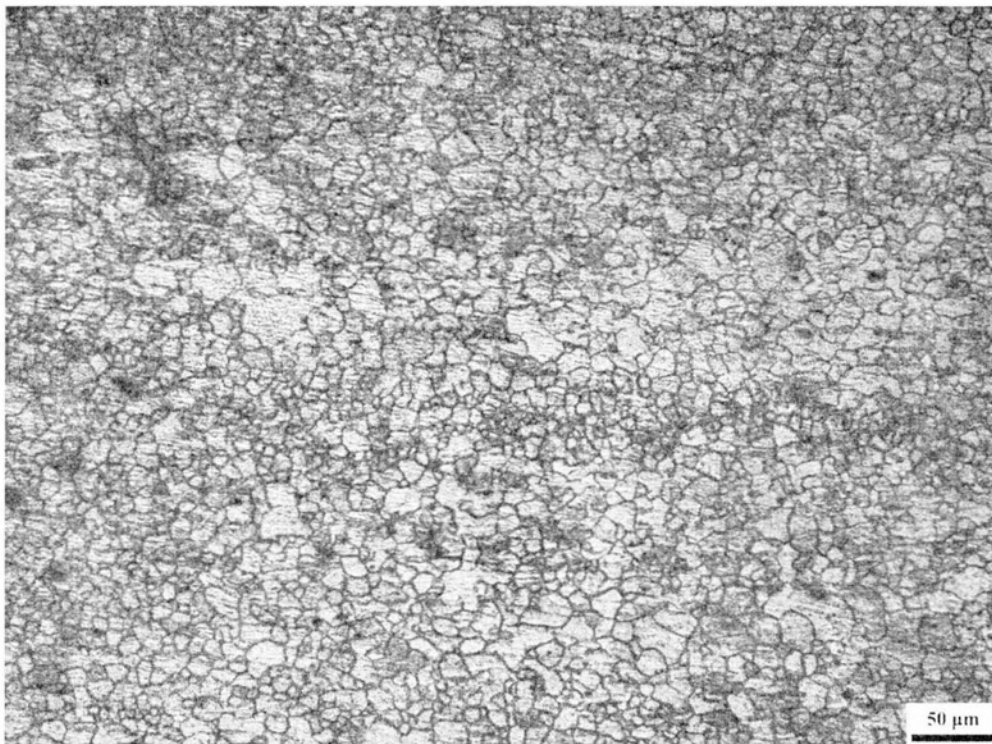
Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση καθενός από τα δοκίμια που εξετάστηκαν με φωτογραφίες μεγέθυνσης από 6.5x έως 500x. Καθένα από αυτά θα συνοδεύεται με ξεχωριστή ονομασία για τη διευκόλυνση του αναγνώστη. Στις φωτογραφίες καλύπτονται οι εξής περιοχές των περασμάτων: το βασικό μέταλλο (BM), η θερμοεπηρεασμένη ζώνη (HAZ), η περιοχή ανάδευσης του υλικού ή NUGGET (NG) και η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ), όπου αυτή είναι εμφανής.

Σε κάθε ανάλυση περάσματος παρατίθενται πρώτα οι στερεοσκοπικές φωτογραφίες για την παρουσίαση γενικών πληροφοριών των δοκιμίων. Εμφανίζονται δηλαδή η μορφολογία της περιοχής NG, οι περιοχές AS και RS, η διεύθυνση πρόωσης καθώς και η παραμόρφωση του δοκιμίου, εάν αυτή υφίσταται.

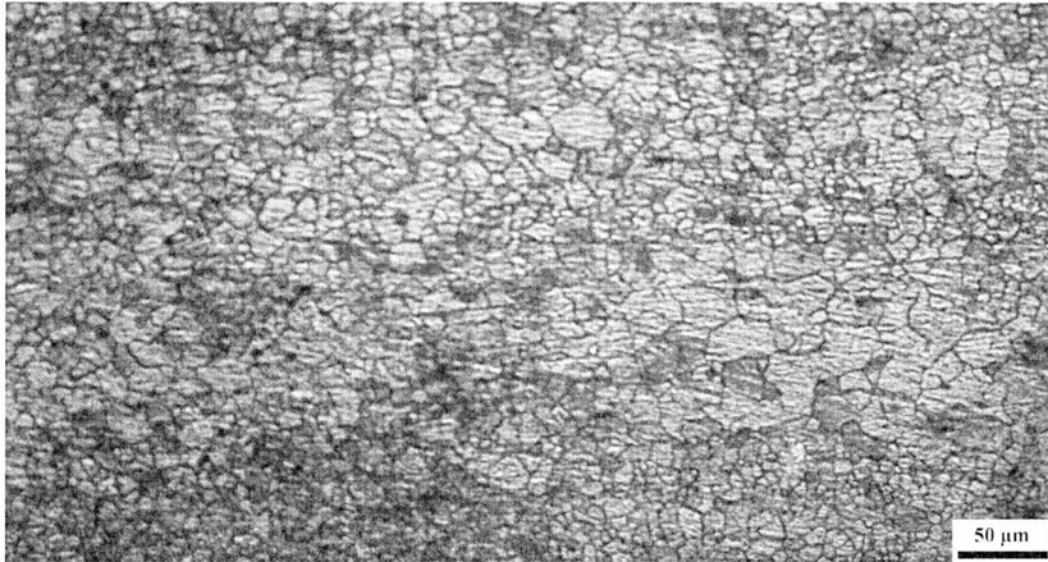
Bead on plate I



Εικόνα 23: Εικόνα στερεοσκοπίου. Διευκρινίζονται οι περιοχές AS και RS. Η φορά του βέλους πάνω από το δοκίμιο υποδεικνύει τη διεύθυνση πρόωσης (6.5x)

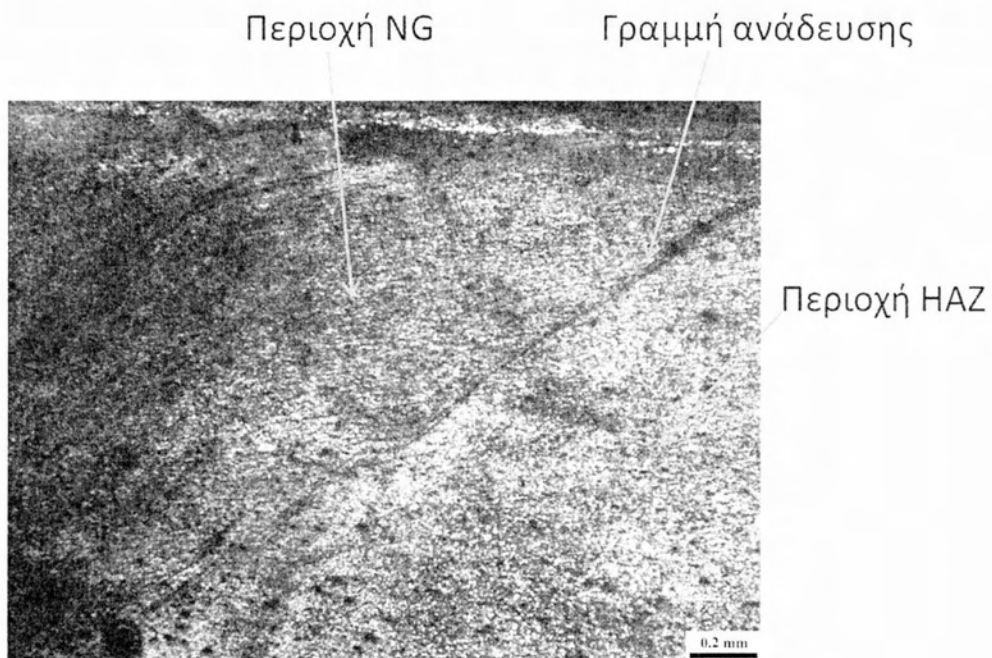


Εικόνα 24: Βασικό μέταλλο (200x)



Εικόνα 25: HAZ (200x)

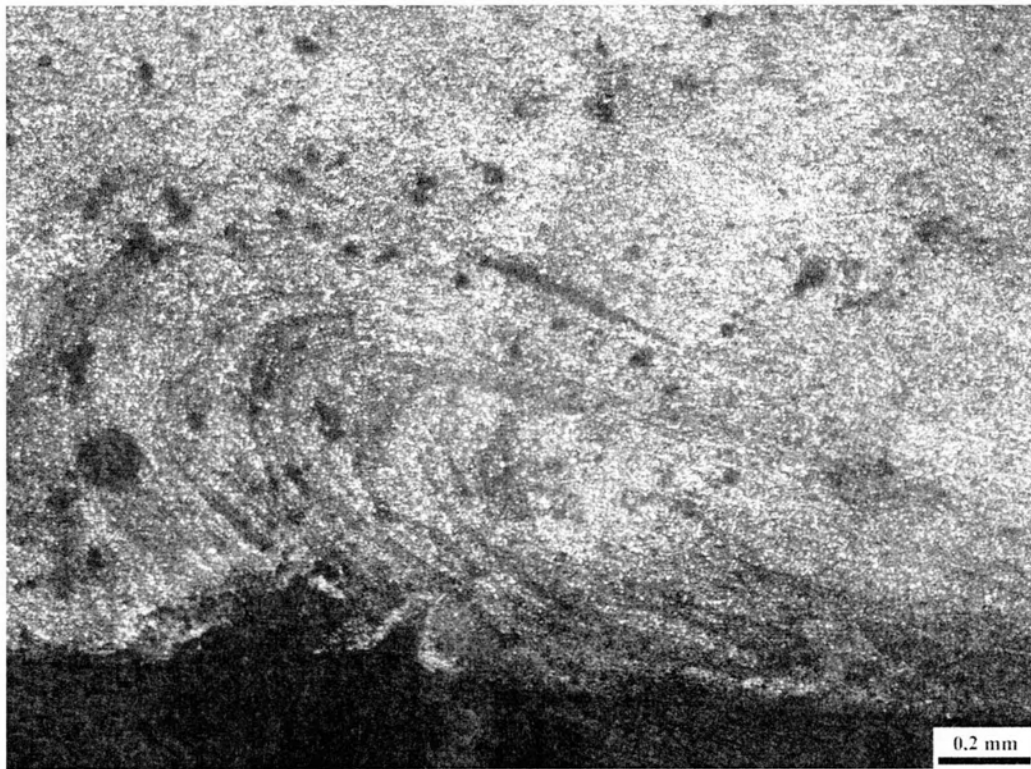
Η πρώτη πληροφορία για το συγκεκριμένο δοκίμιο προέρχεται από την Εικ. 23. Αρχικά, φαίνεται να υπάρχει πλήρης διείσδυση της ακίδας. Παράλληλα, το δοκίμιο έχει υποστεί μακροσκοπική παραμόρφωση, γεγονός που προκύπτει από την μεγάλη κάθετη φόρτιση (390-420 kg) σε συνδυασμό με τη μέτρια συγκράτηση του ελάσματος. Περνώντας στις φωτογραφίες του οπτικού μικροσκοπίου, η πρώτη εικόνα (Εικ. 24) παρουσιάζει το βασικό μέταλλο του υλικού. Έχοντας την εικόνα αυτή σαν βάση, είναι αντιληπτή η διαφορά μεγέθους των κόκκων της με αυτούς της Εικ. 25. Η συγκεκριμένη απεικόνιση αφορά την περιοχή HAZ, όπου οι κόκκοι είναι εμφανώς πεπλατυσμένοι. Αντίθετα, στη NG η μικροδομή είναι λεπτόκοκκη με απαραμόρφωτους κόκκους λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης (Εικ. 26-30).



Εικόνα 26: Φαίνεται η διαγώνια γραμμή ανάδευσης. Αριστερά: Περιοχή ανάδευσης, Δεξιά: Θερμοετηρεασμένη περιοχή. Η TMAZ είναι αμελητέα (50x)



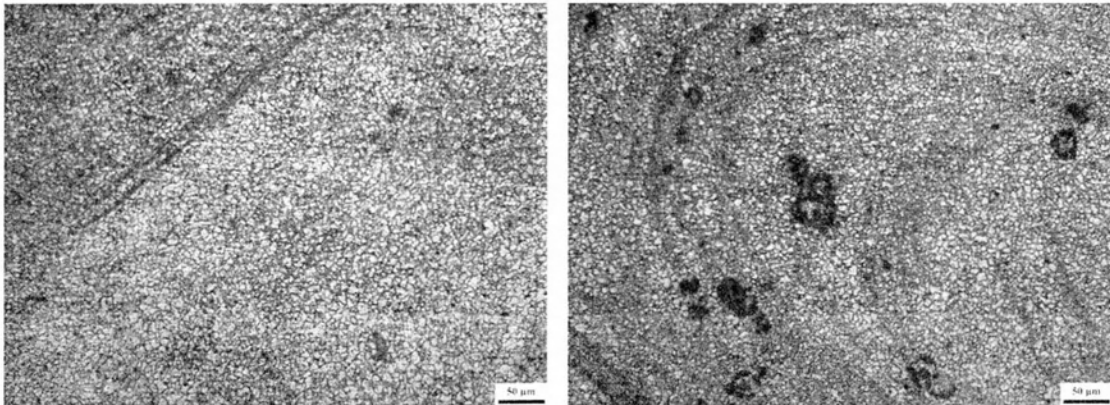
Εικόνα 27: Περιοχή NUGGET (50x)



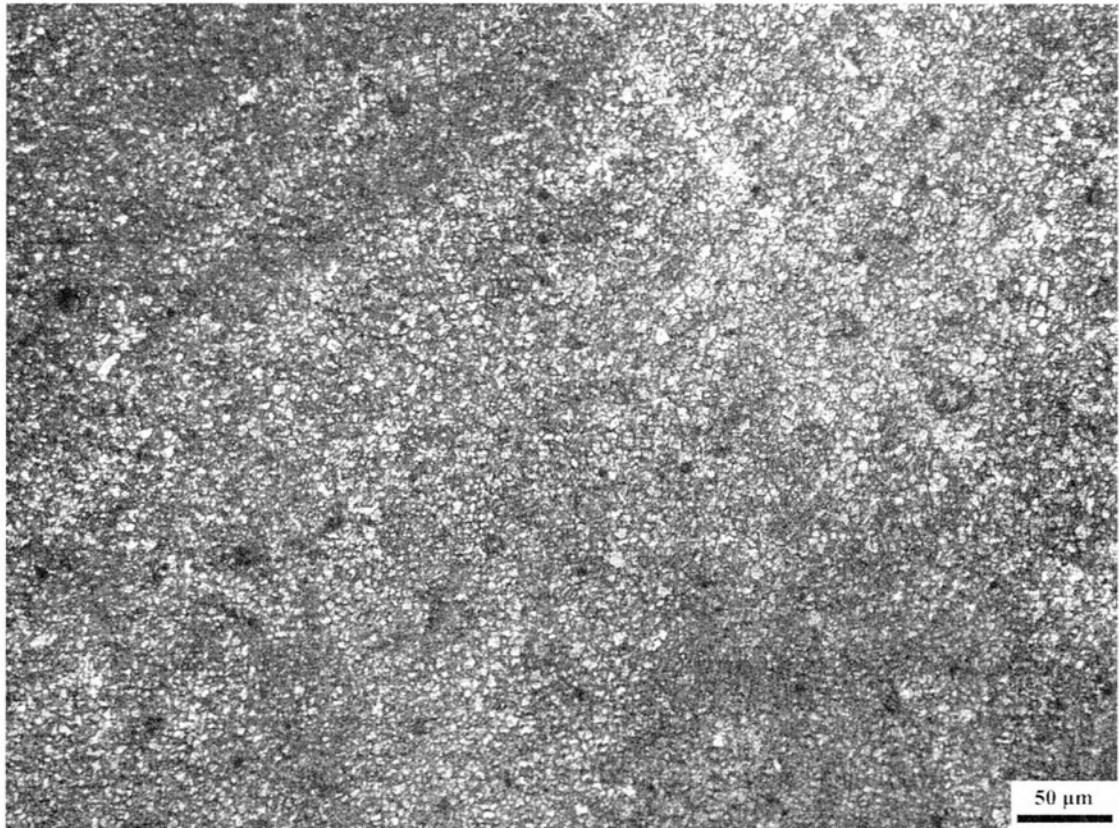
Εικόνα 28: Λοβός περιοχής NG (50x)

Στην Εικ. 26 φαίνονται καθαρά το NUGGET, η γραμμή ανάδευσης και η HAZ και όπως φαίνεται η TMAZ εδώ είναι δυσδιάκριτη καθώς δεν είναι εκτεταμένο το μέγεθός της. Στην Εικ. 27 γίνεται αντιληπτή η λεπτόκοκκη μικροδομή του υλικού στο NUGGET. Η Εικ. 28 εμφανίζει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της περιοχής NG. Πρόκειται για τμήμα της περιοχής ανάδευσης χαμηλά στη ρίζα της συγκόλλησης και στην περιοχή RS η οποία παρουσιάζει κατευθυντικότητα των κόκκων και θα συναντηθεί σε όλα τα περάσματα και τις συγκολλήσεις. Η μορφολογία της είναι τέτοια ώστε να εμφανίζει σχήμα λοβού και η εμφάνισή του συνδέεται άμεσα με τη διαμόρφωση της ακίδας. Θα φανεί αργότερα ότι η διαμόρφωση αυτή θα πάρατηρείται αποκλειστικά στην περιοχή RS.

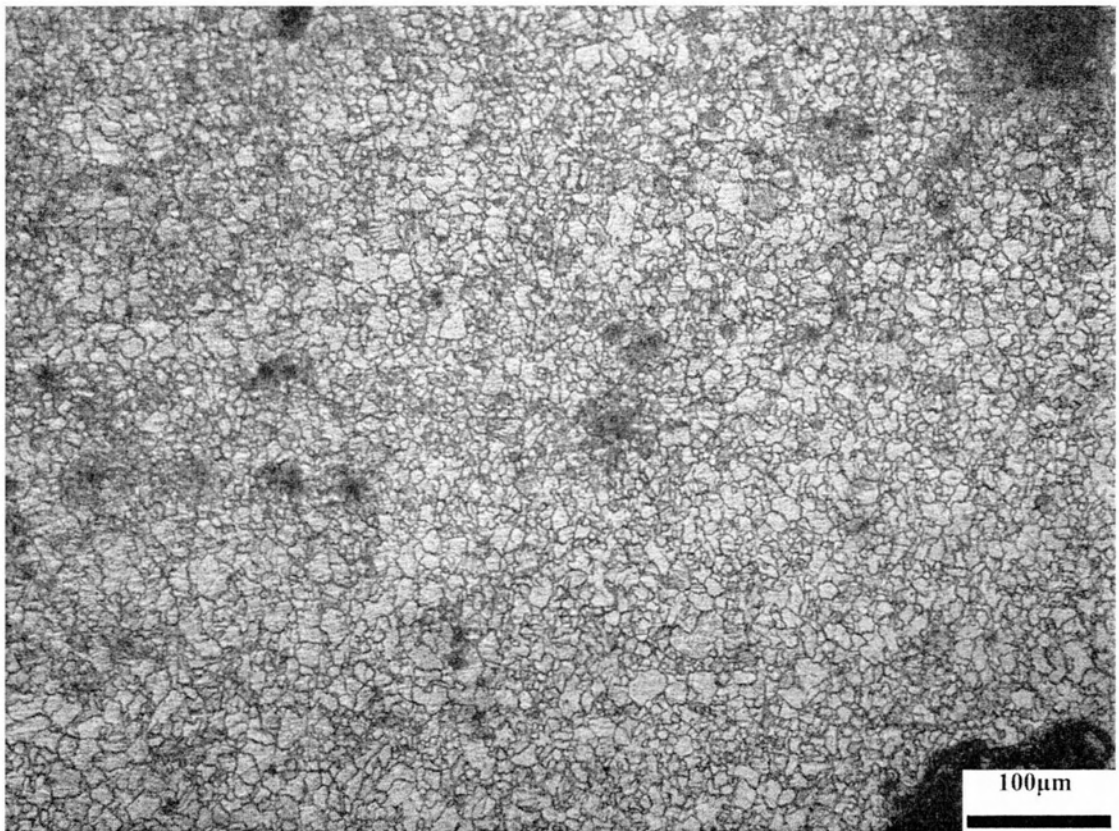
Παρακάτω στην Εικ. 29 δίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση μια απεικόνιση των περιοχών του NG, της γραμμής ανάδευσης και της περιοχής HAZ. Στις Εικ. 30 και 31 απεικονίζονται η περιοχή NG και η HAZ αντίστοιχα και γίνεται σαφής η διαφορά στην κοκκομετρία τους.



Εικόνα 29: Αριστερά: Από αριστερά στα δεξιά: Περιοχή NG, γραμμή ανάδευσης, HAZ. Δεξιά: Μορφολογία λοβού στην περιοχή RS (200x)



Εικόνα 30: Περιοχή NUGGET (200x)



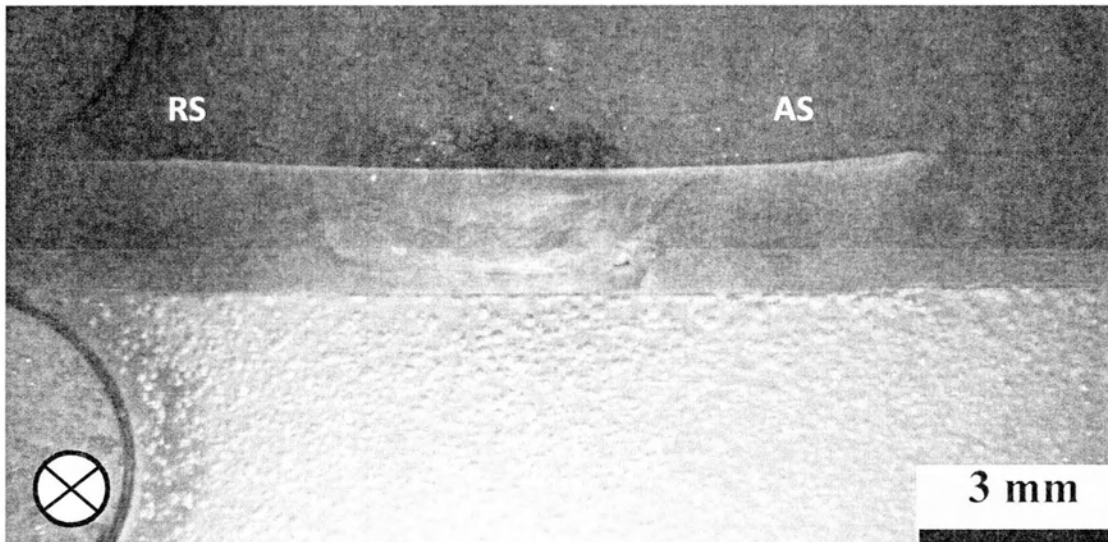
Εικόνα 31: Περιοχή HAZ (200x)

Κλείνοντας, οι γενικές παρατηρήσεις για το πέρασμα I είναι πως ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή του υλικού τα μεγέθη των κόκκων ήταν αναμενόμενα σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία. Εσωτερικά σφάλματα δεν παρατηρήθηκαν ενώ το μέγεθος της TMAZ είναι μικρό. Τέλος τα μαύρα στίγματα έχουν να κάνουν με ακαθαρσίες από την προετοιμασία καθώς το υλικό είναι πολύ ευαίσθητο και σε ορισμένο βαθμό θα ξανασυναντηθούν σε επόμενες αναλύσεις δοκιμών.

Στα περάσματα II και IV η κατάσταση είναι διαφορετική. Η κάθετη φόρτιση είναι ελαφρώς χαμηλότερη, σύμφωνα και με την Εικ. 21, και έτσι εμφανίζονται εσωτερικά σφάλματα.

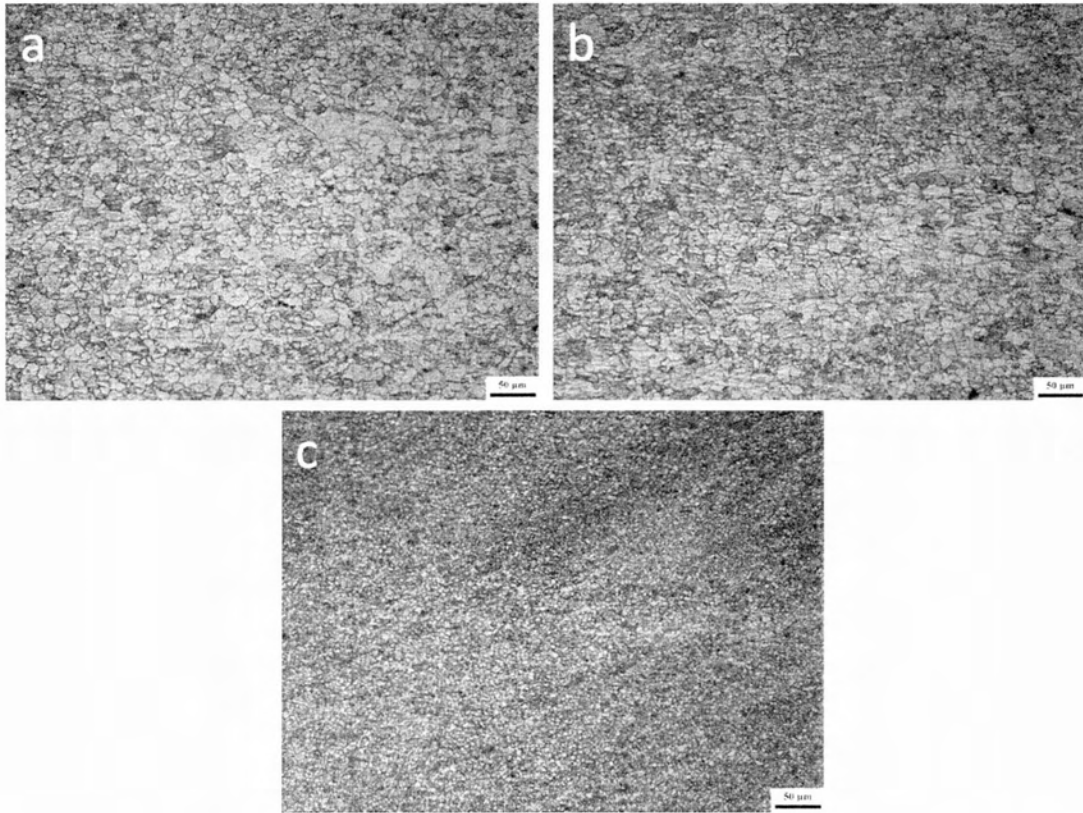
Bead on plate II

Η πρώτη εικόνα για τις συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης είναι η Εικ. 34. Παρότι πρόκειται για μακροσκοπική φωτογραφία είναι ήδη εμφανείς οι εσωτερικοί πόροι. Βρίσκονται χαμηλά στα όρια NUGGET/TMAZ τόσο στην περιοχή AS, όσο και στην περιοχή RS, ενώ παρατηρείται ότι η διείδυση δεν είναι πλήρης.



Εικόνα 32: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x)

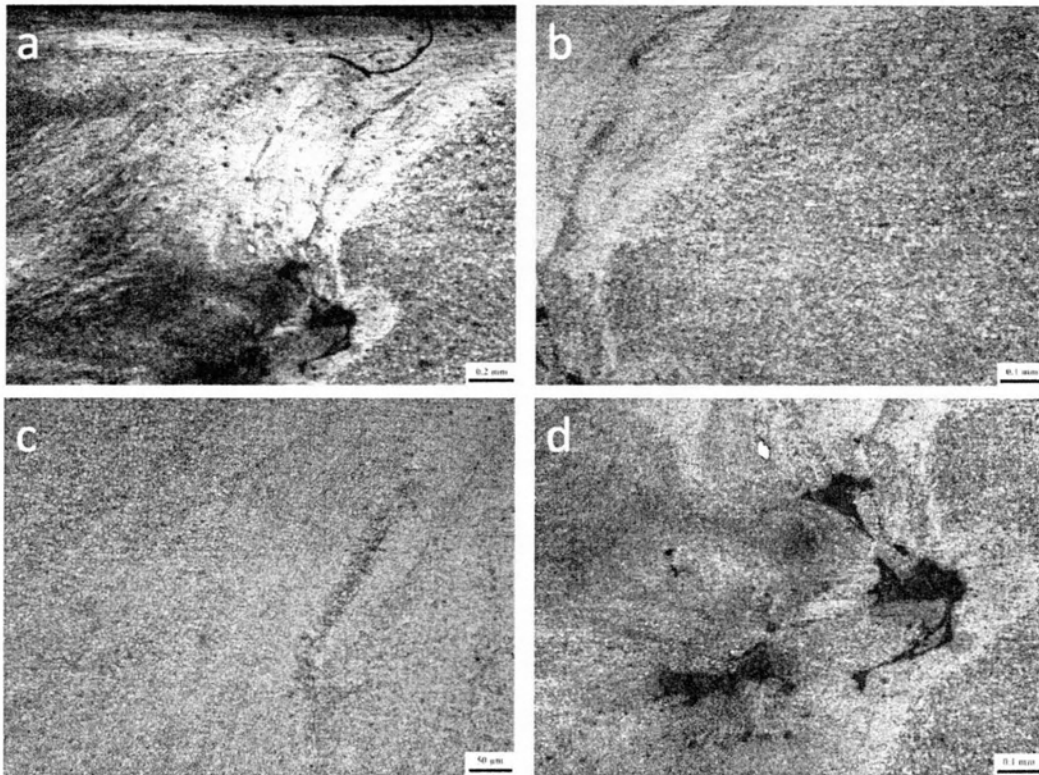
Όπως και στο δοκίμιο I, ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή, το μέγεθος των κόκκων αλλάζει. Οι πρώτες τρεις εικόνες που συμπεριλαμβάνονται στην Εικ. 33 επιβεβαιώνουν τη γενική τάση των κόκκων που τους θέλει να έχουν μικρότερο μέγεθος στο NG και μεγαλύτερο στη HAZ ($NG < BM < HAZ$).



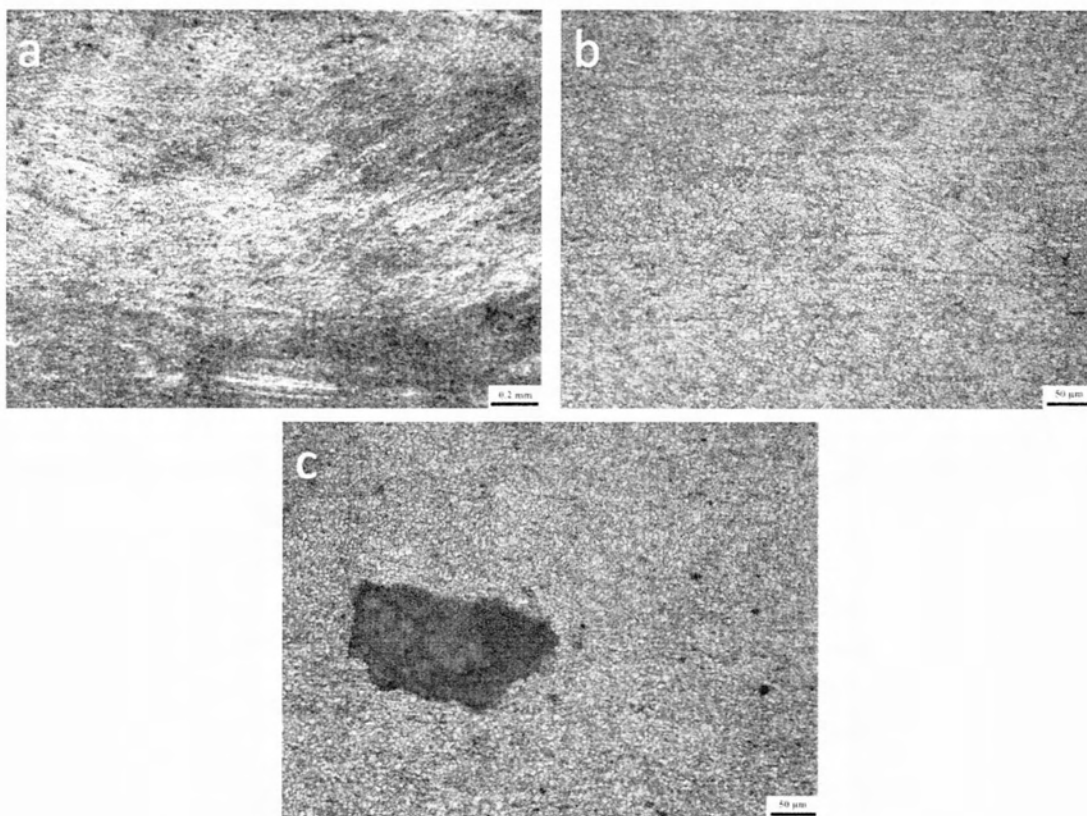
Εικόνα 33: α: Περιοχή HAZ, β: Βασικό μέταλλο, γ: περιοχή NG (200x)

Παρακάτω ακολουθούν ομάδες εικόνων, ως εξής:

1. Εικ. 34a: Βρίσκεται στην περιοχή AS. Από τα αριστερά προς τα δεξιά περιλαμβάνονται οι περιοχές: NG, εσωτερικά σφάλματα, γραμμή ανάδευσης, TMAZ και HAZ. Σε μεγαλύτερη ανάλυση από την ίδια περιοχή περιλαμβάνονται οι εξής εικόνες:
 2. Εικ. 34b: Όμοια της Εικ. 36a. Φαίνεται καλύτερα η TMAZ ενώ δεν συμπεριλαμβάνονται τα εσωτερικά σφάλματα
 3. Εικ. 34c: Περιοχή NG
 4. Εικ. 34d: Απεικόνιση εσωτερικού σφάλματος/πόρου λόγω ανεπαρκούς κάθετης φόρτισης
- Εικ. 35a: Περιοχή NG. Οι εικόνες που περιλαμβάνονται είναι:
 1. Εικ. 35b: Παρουσιάζεται η λεπτόκοκκη μικροδομή της περιοχής και η κατευθυντικότητα των κόκκων, καθώς αυτή βρίσκεται κοντά στην περιοχή του λοβού.
 2. Εικ. 35c: Περιοχή NG κοντά στη ρίζα της συγκόλλησης και στην περιοχή RS. Απεικονίζεται ο πόρος που έχει δημιουργηθεί λόγω κακών συνθηκών.



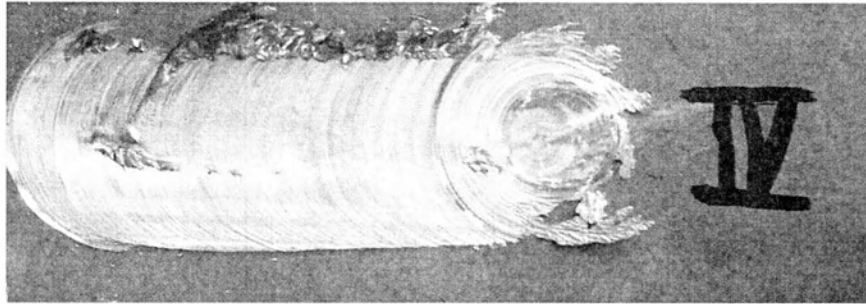
Εικόνα 34: α: Περιλαμβάνονται: NG, πόροι, γραμμή ανάδευσης, TMAZ, HAZ (50x), β: Όμοια της Εικ. 34α (100x), γ: Περιοχή NG (200x), δ: Εμφάνιση πόρων λόγω μειωμένης κάθετης φόρτισης (100x)



Εικόνα 35: α: Περιοχή NG (50x), β: NG στην περιοχή του λοβού (200x), γ: Εσωτερικός πόρος στην περιοχή NG (200x)

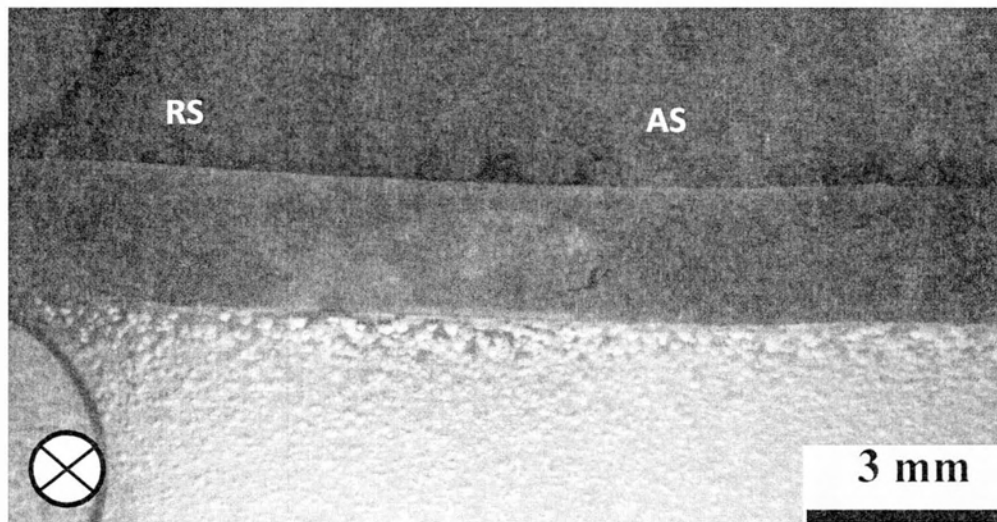
Bead on plate IV

Η κάθετη φόρτιση στη συγκεκριμένη συγκόλληση ανέρχεται στα 350-370 kg. Είναι δηλαδή ακόμα μικρότερη από αυτή του δοκιμίου II. Εδώ, από την οπτική παρατήρηση του περάσματος φαίνονται τα πρώτα επιφανειακά σφάλματα, καθώς το υλικό τείνει δημιουργήσει σφάλματα τύπου tunnel ενώ δημιουργείται και flash (Εικ. 36).



Εικόνα 36: Παρατηρούνται σφάλμα τύπου tunnel και flash (6.5x)

Η στερεοσκοπική Εικ. 37 απεικονίζει την περιοχή συγκόλλησης του υλικού σε τομή κάθετα στην ταχύτητα πρόωσης (όπως και για τα προηγούμενα δοκίμια). Εξετάζοντας την πρώτη φωτογραφία φαίνεται ότι δεν υπάρχει πλήρης διείσδυση του εργαλείου. Στην περιοχή AS σχηματίζεται πόρος, όπου το μέγεθός του είναι μεγαλύτερο από αυτού που παρατηρήθηκε στο δοκίμιο II.



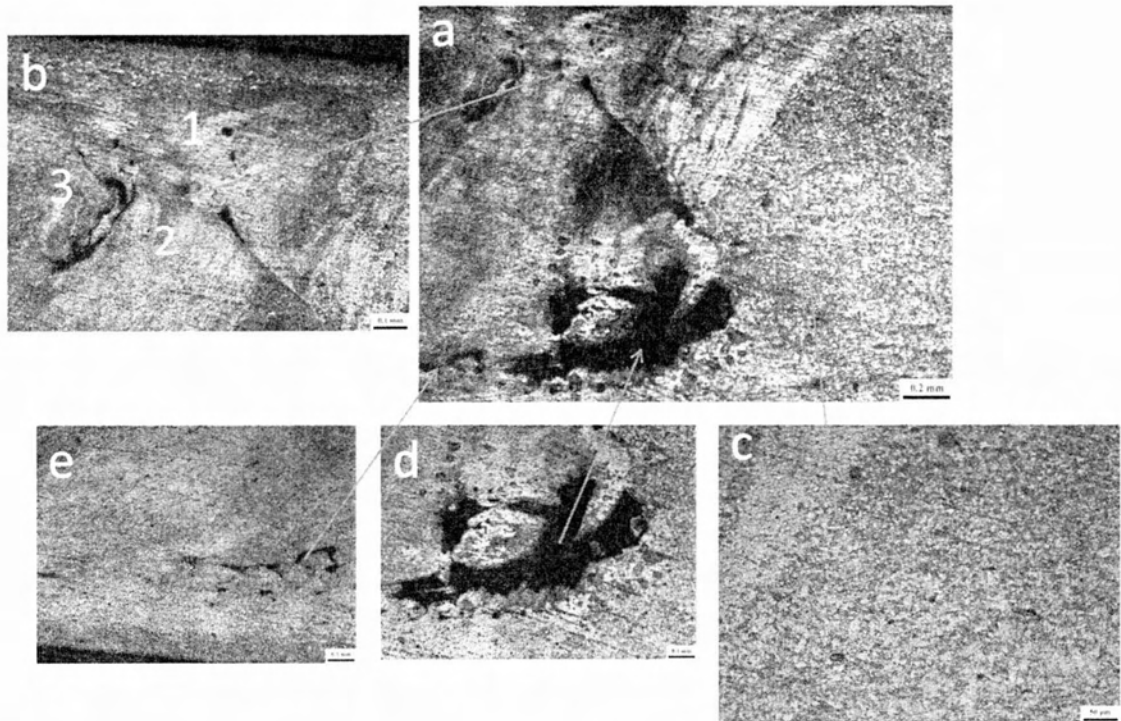
Εικόνα 37: Μακροσκοπική παρατήρηση της περιοχής συγκόλλησης (6.5x)

Παρακάτω παρουσιάζονται ομάδες εικόνων από το οπτικό μικροσκόπιο ώστε να παρατηρηθούν εκτενέστερα η μικροδομή και τα σφάλματα που αναπτύσσει το υλικό. Τα γκρουπ εικόνων είναι τα εξής:

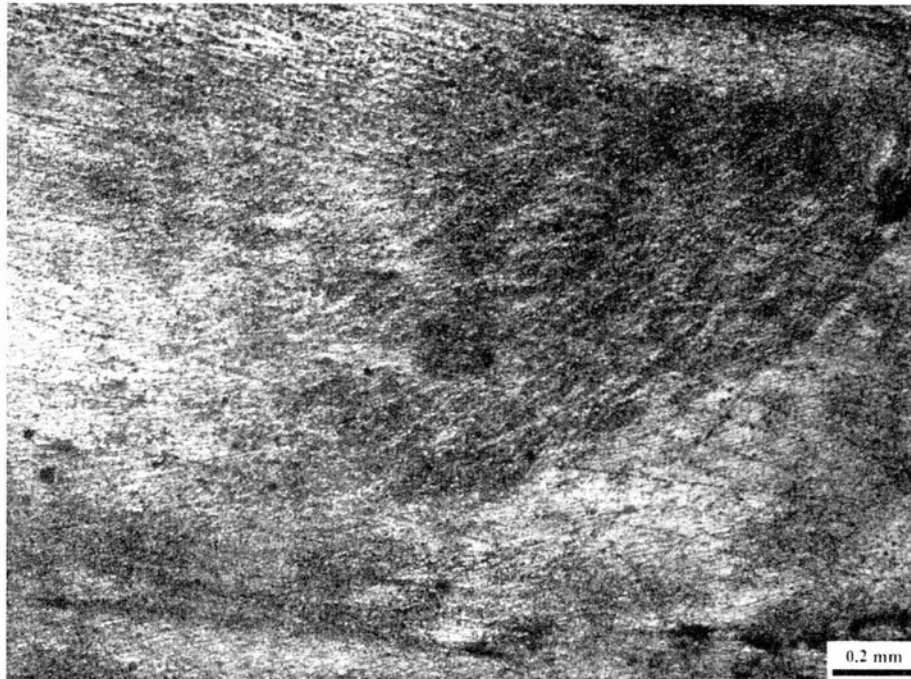
- Εικ. 38a: Απεικονίζει τη περιοχή του NG στην περιοχή εναπόθεσης υλικού. Από αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται: εσωτερικά σφάλματα στο NG και η HAZ. Η TMAZ εδώ δεν είναι ακόμα εμφανής. Παρατηρείται ότι στην περιοχή αυτή εμφανίζονται και νέα εσωτερικά σφάλματα που δεν φαινόταν

μακροσκοπικά. Η θέση τους βρίσκεται κοντά στην ζώνη ανάδευσης και πιο κοντά στην πάνω επιφάνεια του υλικού. Επίσης, το NG φαίνεται να χωρίζεται εκεί σε τρεις ζώνες (από 1 έως 3 στην Εικ. 40b) και κάθε μια από αυτές έχει ξεχωριστή κλίση. Οι ένθετες εικόνες είναι:

1. Εικ. 38b: Φαίνονται σε μεγαλύτερη ανάλυση οι ζώνες που έχουν δημιουργηθεί στην περιοχή ανάδευσης του υλικού, όπως και οι πόροι σε αυτή.
 2. Εικ. 38c: Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται: η γραμμή ανάδευσης και η HAZ. Δεν παρατηρείται σημαντική κατευθυντικότητα των κόκκων. Η TMAZ είναι περιορισμένη.
 3. Εικ. 38d κα 38e: Απεικονίζεται ο κύριος πόρος, ο οποίος ακολουθείται από αρκετούς μικρότερους στο κάτω μέρος της περιοχής ανάδευσης.
- Εικ. 39: Περιοχή NG.



Εικόνα 38: a: NG/HAZ στην περιοχή AS (50x), b: Υποπεριοχές της περιοχής NG (100x), c: NG/HAZ (200x), d και e: Πόροι στη ρίζα της συγκόλλησης, στην περιοχή AS (100x)



Εικόνα 39: Περιοχή NG (50x)

Συνοψίζοντας για το συγκεκριμένο δοκίμιο, η χαμηλή δύναμη που εφαρμόστηκε είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση επιφανειακών σφαλμάτων, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στο δοκίμιο II, ενώ οι εσωτερικοί πόροι είχαν μεγαλύτερο μέγεθος. Παράλληλα, παρατηρείται για πρώτη φορά ο διαχωρισμός της περιοχής ανάδευσης σε διαφορετικές υποπεριοχές.

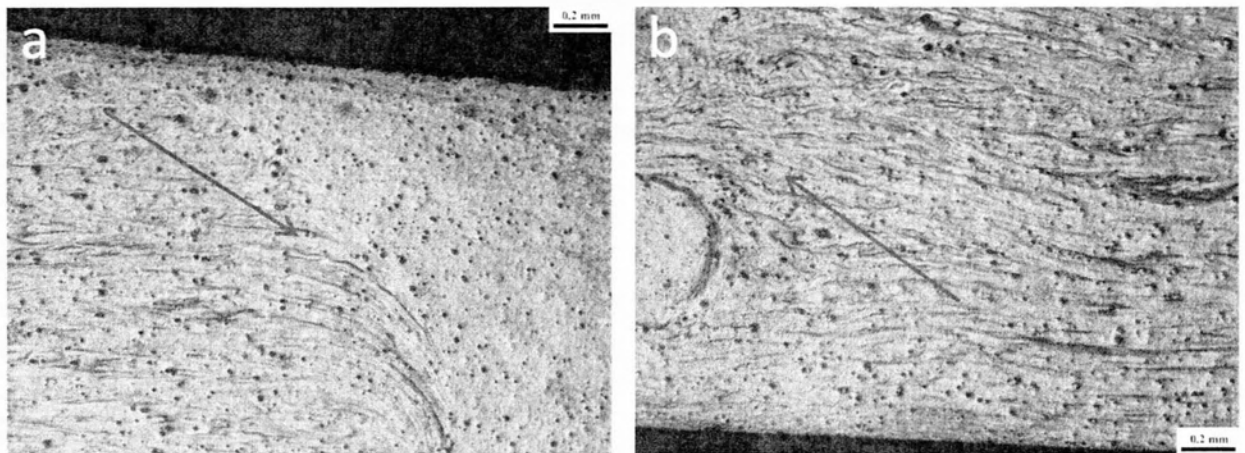
Bead on plate X



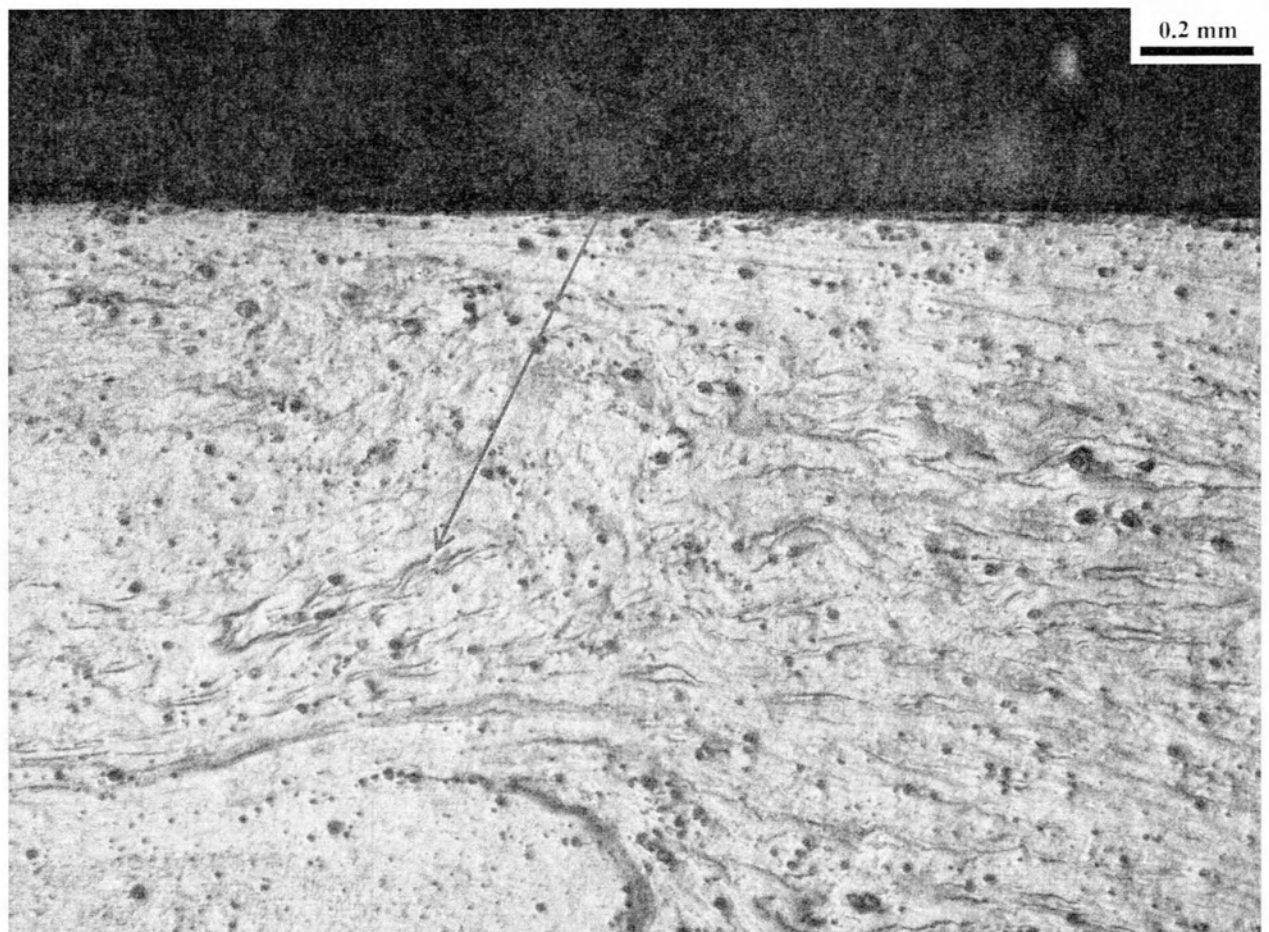
Εικόνα 40: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (50x)

Η διαμόρφωση της περιοχής ανάδευσης, είναι αυτή της Εικ. 40. Σε αυτή υποδεικνύονται οι περιοχές εναπόθεσης και απαγωγής υλικού ενώ σημειώνεται και η διεύθυνση πρόωσης του εργαλείου. Εδώ είναι σαφέστερη, από οποιαδήποτε άλλη εικόνα έως τώρα, η ροή που ακολουθεί το υλικό καθώς αυτό παραμορφώνεται από την ακίδα. Η περιοχή TMAZ είναι εμφανής τόσο στην AS (Εικ. 41a) όσο και στην RS (Εικ. 42b) και υποδεικνύεται με τα βέλη, και η μορφολογία λοβού παρατηρείται στην περιοχή RS (Εικ. 42). Παράλληλα, από τις φωτογραφίες προκύπτει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό. Ενώ στην περιοχή AS το όριο μεταξύ NG και TMAZ είναι

εμφανές, στην περιοχή εναπόθεσης υλικού και πάνω από το λοβό, φαίνεται να υπάρχει ροή υλικού μεταξύ της περιοχής ανάδευσης και της HAZ (Εικ. 42).

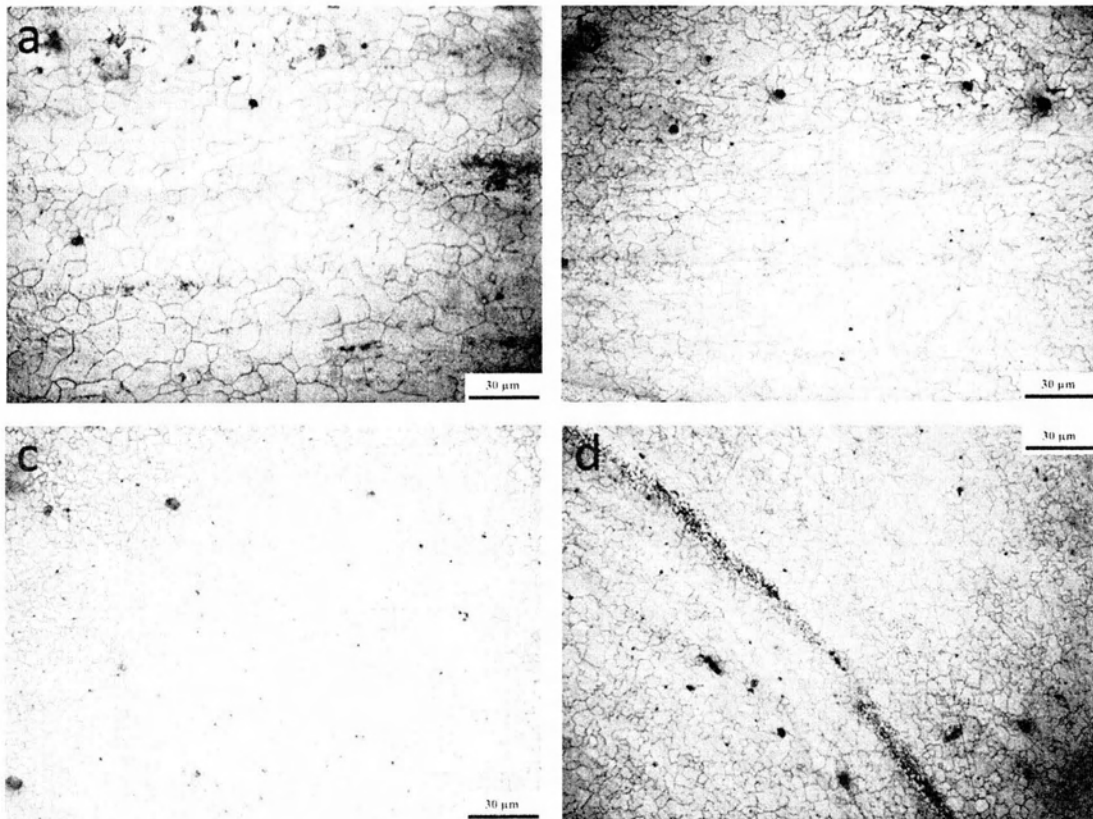


Εικόνα 41: a: Περιοχή TMAZ αριστερά της περιοχής NG, b: TMAZ, περιοχή RS

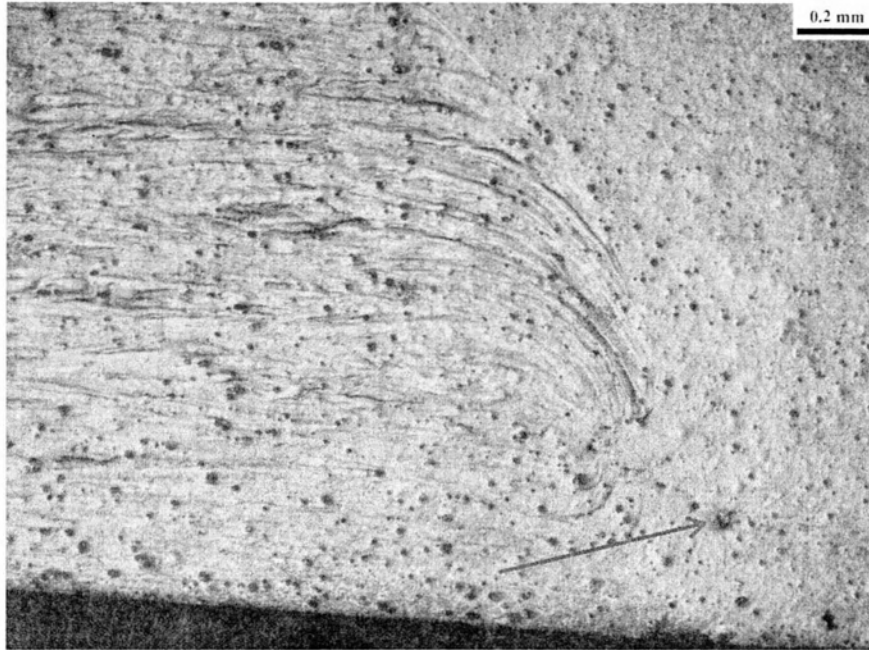


Εικόνα 42: Ακαθόριστο όριο μεταξύ περιοχών NG και HAZ. Ροή υλικού όπως υποδεικνύει το βέλος (50x)

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των μικροδομών που προκύπτουν ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή. Από την Εικ. 43 φαίνεται ότι μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων εμφανίζεται στην HAZ ενώ το μικρότερο μέγεθος αυτών στην NG. Η Εικ. 43d δείχνει την κατευθυντικότητα των κόκκων καθώς αυτοί πλησιάζουν στην γραμμή ανάδευσης ενώ η σειρά μεγέθους των κόκκων φαίνεται να είναι η εξής: NG<TMAZ<HAZ<BM. Τέλος, σύμφωνα με την Εικ. 44, στη ρίζα της συγκόλλησης στην περιοχή AS φαίνεται να υπάρχει μικροσκοπικός πόρος. Επίσης η διείσδυση στην περιοχή αυτή δεν είναι πλήρης, σε αντίθεση με την περιοχή RS.

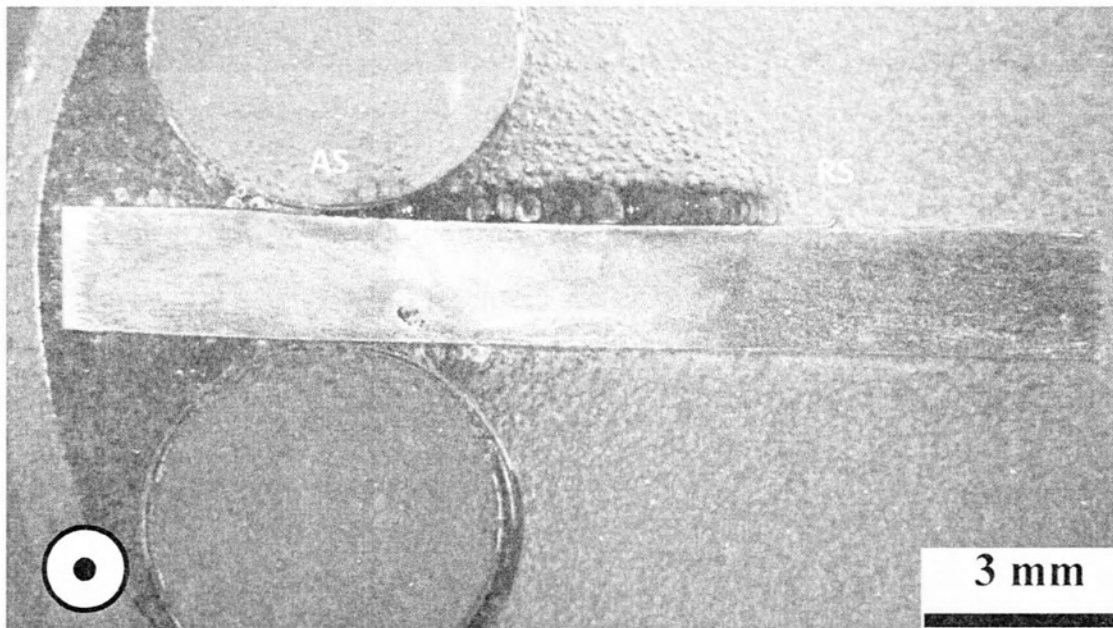


Εικόνα 43: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)



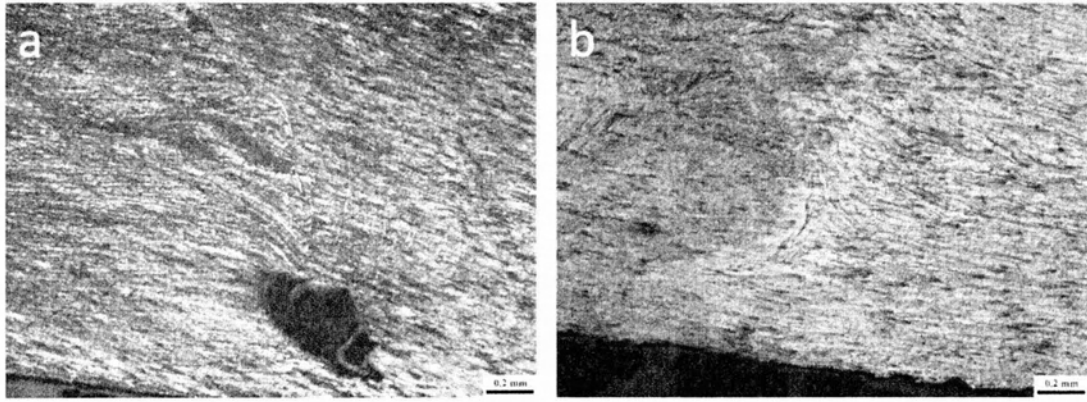
Εικόνα 44: Μικροσκοπικός πόρος στην ρίζα της συγκόλλησης στην περιοχή AS (50x)

Bead on plate e



Εικόνα 45: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x)

Οι συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο πέρασμα αυτό δεν ήταν οι κατάλληλες, σύμφωνα και με την Εικ. 45, καθώς χαμηλά στην περιοχή AS φαίνεται ο σχηματισμός οπής. Αυτή απεικονίζεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση παρακάτω. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται και η περιοχή TMAZ τόσο αριστερά όσο και δεξιά της περιοχής ανάδευσης (Εικ. 46). Η διείσδυση, επίσης, δεν είναι πλήρης.

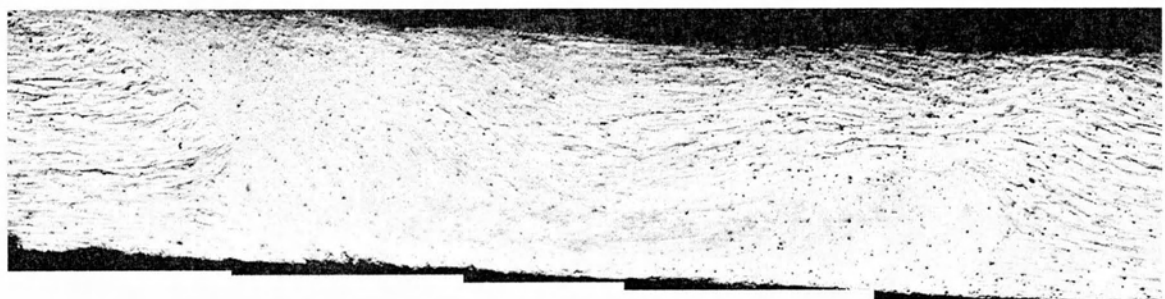


Εικόνα 46: α: Περιοχή AS, πόρος στη ρίζα της συγκόλλησης, β: TMAZ στην περιοχή RS (50x)

Bead on plate ι

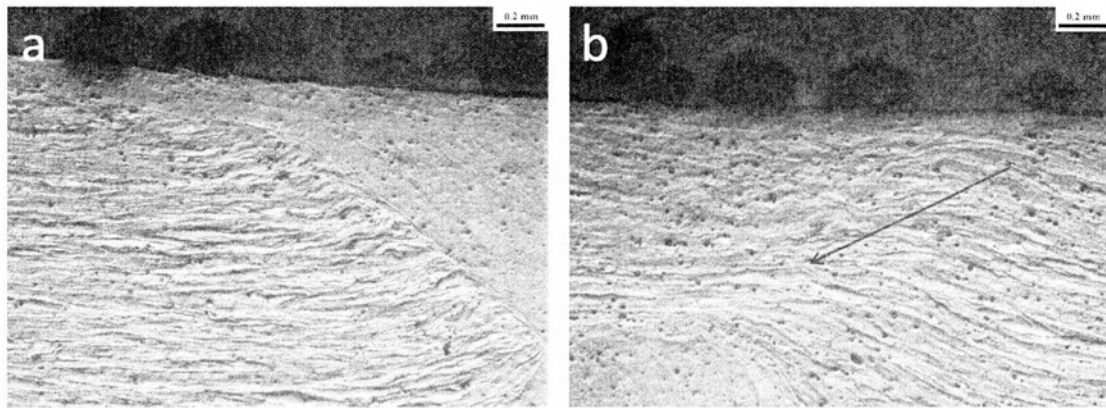


Εικόνα 47: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x)

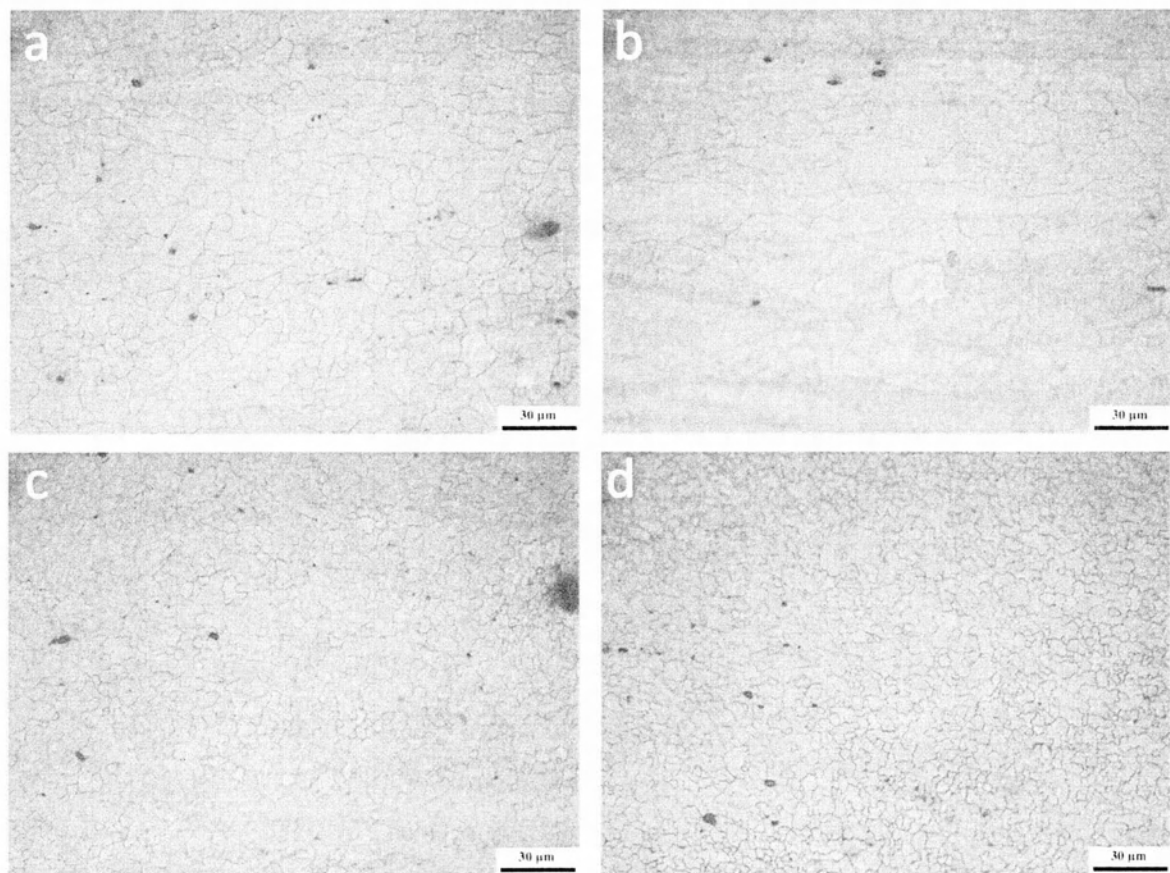


Εικόνα 48: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)

Η Εικ. 47 αφορά τη μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής ανάδευσης, ενώ αυτή φαίνεται και σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στην Εικ. 48. Η διείσδυση είναι πλήρης. Πάνω από το σχηματισμό του λοβού παρατηρείται ροή υλικού, σε αντίθεση με την περιοχή απαγωγής υλικού όπου τα όρια της περιοχής ανάδευσης είναι εμφανή (Εικ. 49). Η Εικ. 50 παρουσιάζει τη διαφορά της κοκκομετρίας στην περιοχή συγκόλλησης με τους κόκκους της HAZ να έχουν μεγαλύτερο μέγεθος.



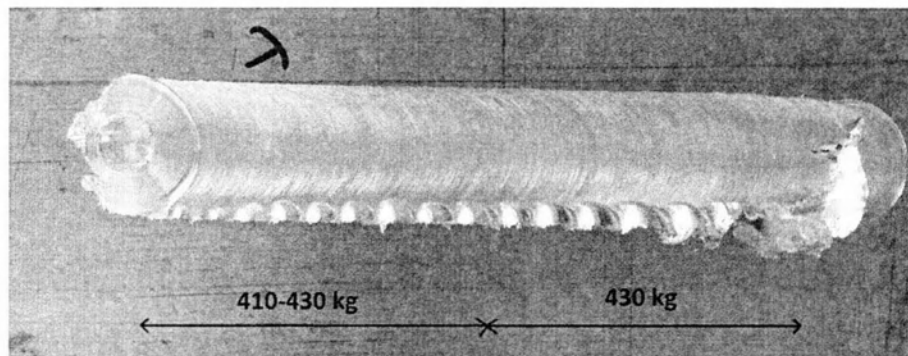
Εικόνα 49: a: Σαφή όρια της περιοχής ανάδευσης στην AS (50x), b: Ροή υλικού στην περιοχή ανάδευσης στην RS (50x)



Εικόνα 50: a: Περιοχή BM, b: Περιοχή HAZ, c: Περιοχή TMAZ, d: Περιοχή NG (500x)

Bead on plate λ

Στο συγκεκριμένο bead on οι συνθήκες είναι οι εξής. Η κάθετη φόρτιση κυμαίνεται μεταξύ 410-430 kg και η κατανομή της φαίνεται στην Εικ. 51. Σημειώνεται ότι η τιμή της κάθετης φόρτισης δεν είναι σταθερή καθώς η τράπεζα, όπου στερεώνεται το έλασμα, δεν είναι αρκετά στιβαρή και έτσι μετακινείται στην κατακόρυφη διεύθυνση.



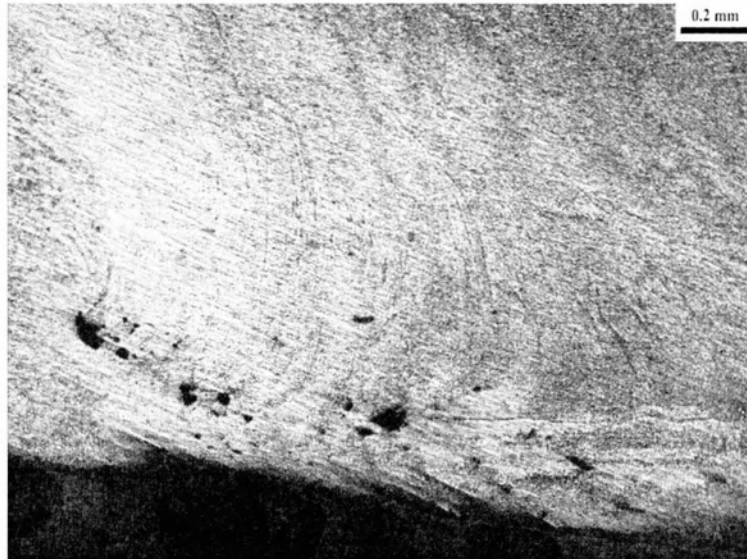
Εικόνα 51: Μακροσκοπική ανάλυση του περάσματος λ. Στην εικόνα φαίνεται η κατανομή της κάθετης φόρτισης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας



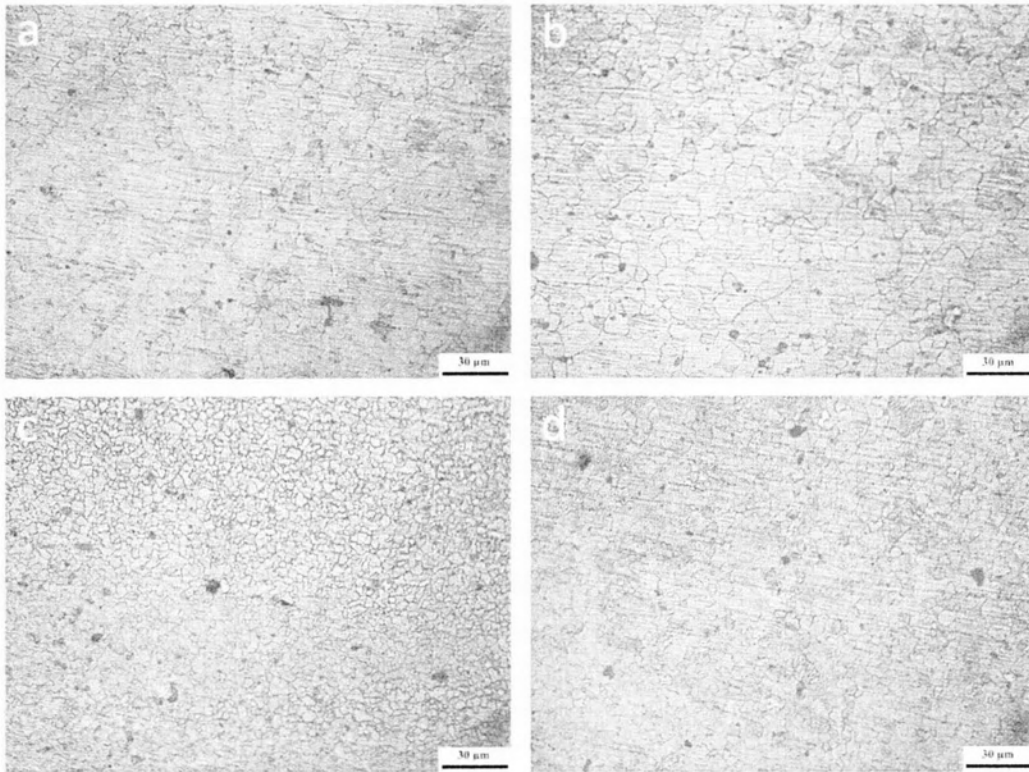
Εικόνα 52: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x)

Από τη μακροσκοπική απεικόνιση της Εικ. 52 φαίνεται ότι η διεύσδυση δεν είναι πλήρης. Επίσης, εδώ είναι διακριτά τα σημεία από τα οποία δημιουργήθηκαν τα προφίλ σκληρομετρήσεων.

Η Εικ. 53 δείχνει ότι στην περιοχή AS, στη ρίζα της συγκόλλησης υπάρχουν μικροσκοπικοί πόροι ενώ στην Εικ. 54 φαίνεται η διαφορά των κοκκομετριών που δημιουργούνται στην περιοχή συγκόλλησης.



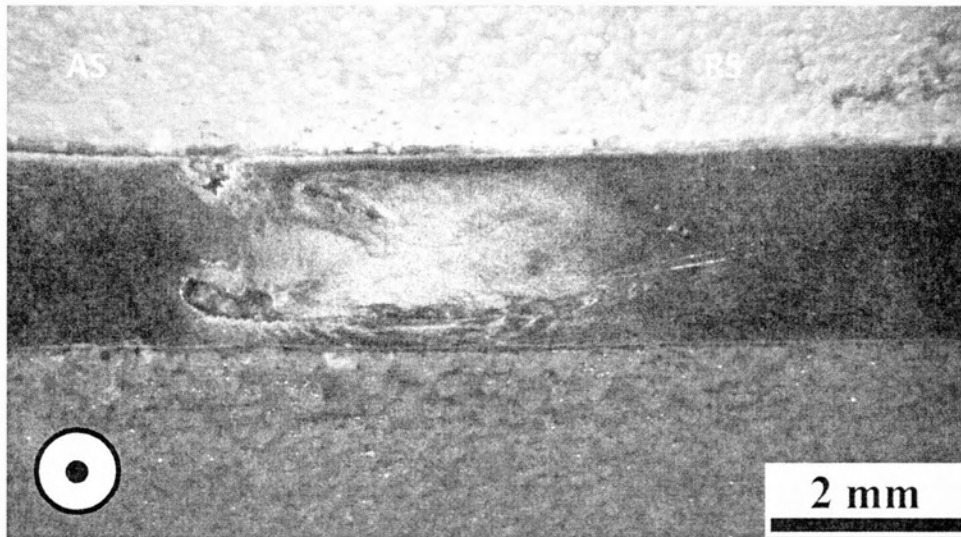
Εικόνα 53: Μικροσκοπικοί πόροι στην περιοχή AS (50x)



Εικόνα 54: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)

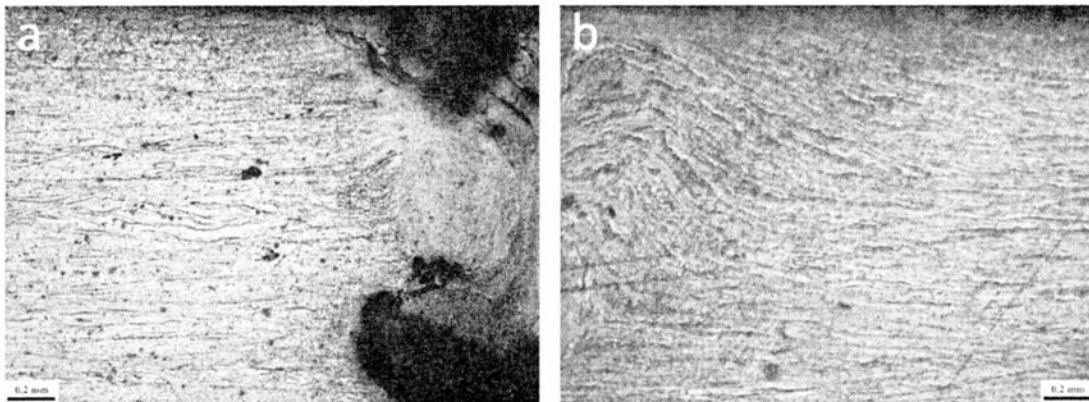
Bead on plate μ

Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στην Εικ. 55.

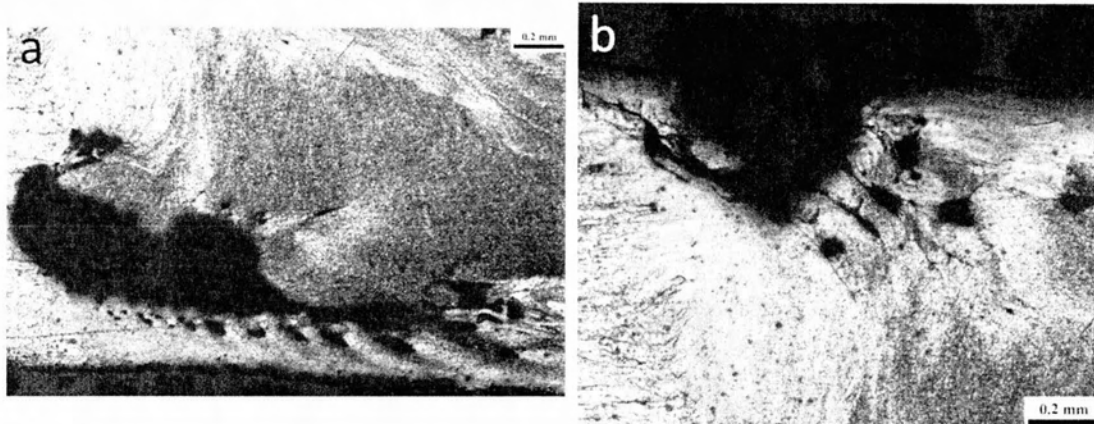


Εικόνα 55: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (10x)

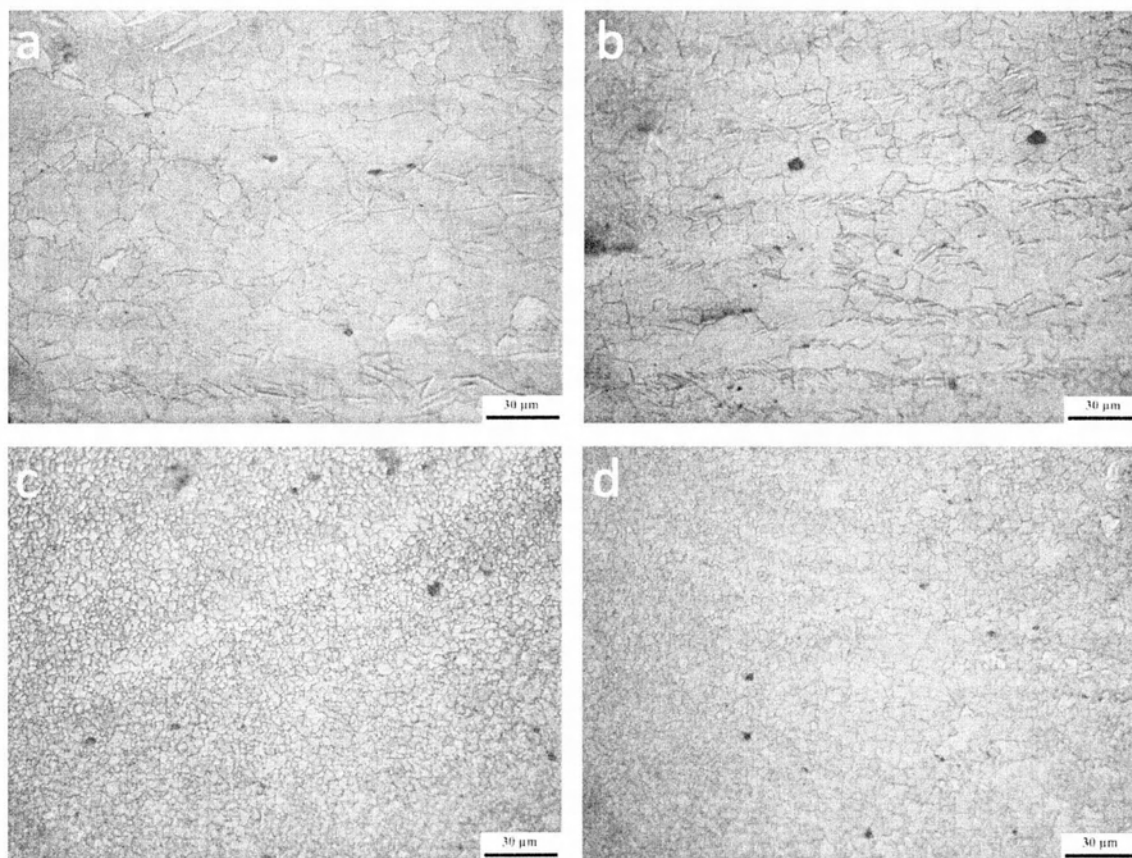
Ο σχηματισμός λοβού παρατηρείται αμυδρά στην περιοχή απαγωγής, όπου η TMAZ είναι και εντονότερη (Εικ. 56). Οι εφαρμοζόμενες συνθήκες στην συγκόλληση αυτή, δημιουργούν πόρο χαμηλά στην περιοχή εναπόθεσης, και σφάλμα τύπου tunnel στην επιφάνεια (Εικ. 57). Η Εικ. 58 παρουσιάζει τις διαφορές της μικροδομής που προκύπτουν ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή.



Εικόνα 56: a: TMAZ στην περιοχή RS, b: TMAZ στην περιοχή AS (50x)



Εικόνα 57: a: Πόρος στη ρίζα της συγκόλλησης, περιοχή AS, b: Επιφανειακή αυλάκωση, περιοχή AS (50x)

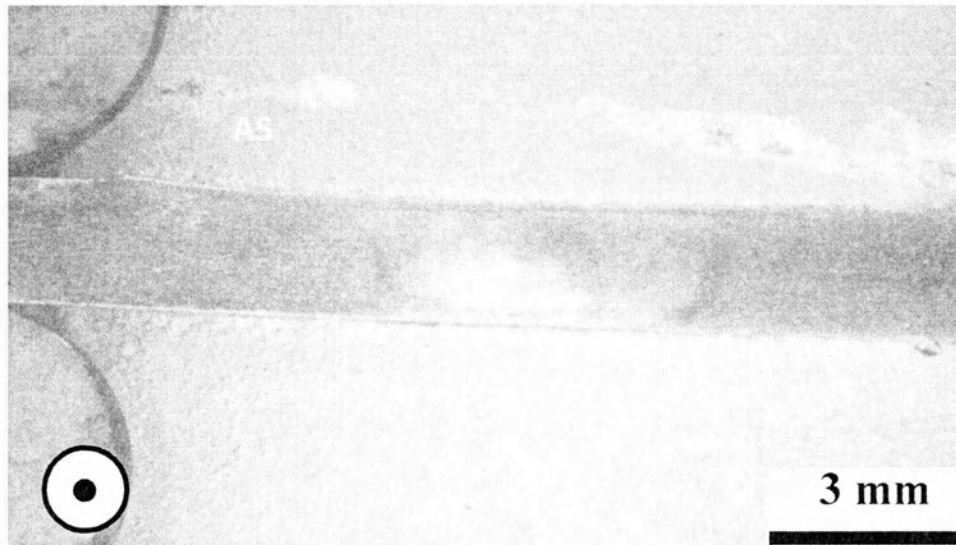


Εικόνα 58: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)

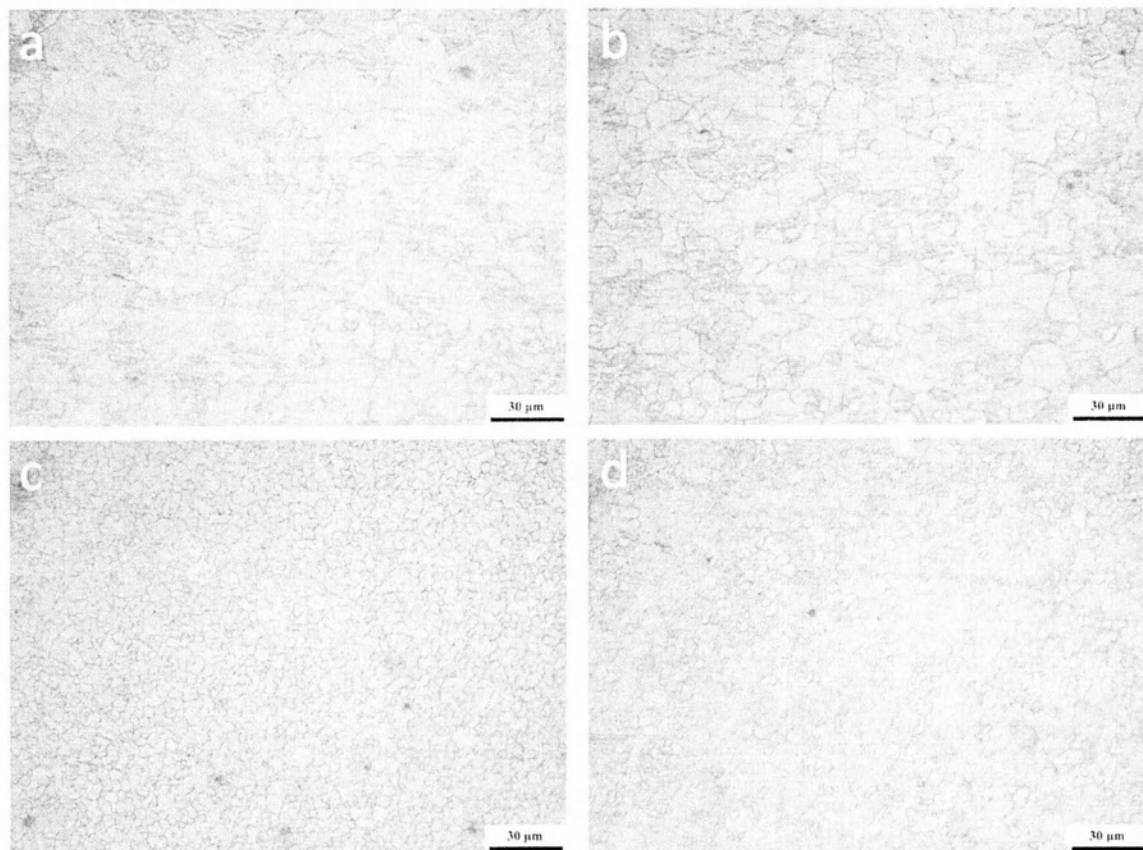
Όπως και στα προηγούμενα περάσματα, η σειρά μεγέθους των κόκκων είναι η εξής: NG<TMAZ<BM<HAZ. Σημειώνεται ξανά, ότι η περιοχή TMAZ είναι εντονότερη εκεί όπου παρατηρείται η μορφολογία του λοβού.

Bead on plate v

Η μακροδομή της συγκόλλησης φαίνεται στην Εικ. 59, και η μικροδομή στις χαρακτηριστικές περιοχές της συγκόλλησης στην Εικ. 60.



Εικόνα 59: Μακροσκοπική απεικόνιση της περιοχής NG (6.5x)



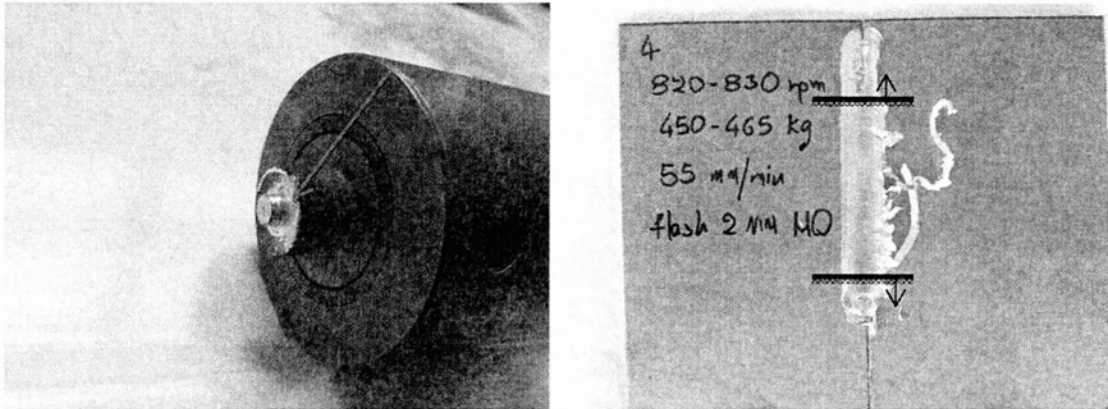
Εικόνα 60: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)

Ως προς το κράμα μαγνησίου AZ31 τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι οι εξής:

- Προσκόλληση υλικού στο εργαλείο (Εικ. 61): Ισχύει ο γενικός κανόνας που θέλει τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση να είναι μεταξύ του 80-90 % του σημείου τήξεως του υλικού. Εντούτοις το υλικό είναι ιδιαίτερα μαλακό γύρω από την ακίδα και λόγω ισχυρών τριβών είναι δυνατό να προσκολληθεί σε αυτή. Το υλικό που προσκολλάται στην ακίδα "εξαφανίζει" τη διαμόρφωσή της. Επομένως μειώνεται η αποτελεσματικότητά της για συγκόλληση και κατά συνέπεια απαιτείται καθαρισμός του εργαλείου που συνεπάγεται ότι αυτό για περιορισμένο χρονικό διάστημα βγαίνει εκτός λειτουργίας. Έτσι υφίσταται ζημία που σχετίζεται με μειωμένη παραγωγικότητα. Σημειώνεται ότι μετά από κάθε πέρασμα το εργαλείο καθαριζόταν με διάλυμα 5% κ.β. NaCl σε απεσταγμένο νερό.
- Δεν είναι αξιοποιήσιμο όλο το μήκος της ραφής συγκόλλησης (Εικ. 61). Αρχικά, χρειάζεται κάποιο μικρό χρονικό διάστημα έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι επιλεγείσες συνθήκες συγκόλλησης ώστε να παράξουν μια αποδεκτή ραφή, ενώ στο τέλος της συγκόλλησης είναι αναπόφευκτη η οπή εξόδου της ακίδας. Τόσο το κομμάτι της αρχής της συγκόλλησης όσο και αυτό στο τέλος της δεν είναι αξιοποιήσιμα και απομακρύνονται από τη ραφή, κάτι που συνεπάγεται απώλεια υλικού. Οι προαναφερθείσες περιοχές σημειώνονται με βέλη στην παρακάτω εικόνα.
- Σε γενικές γραμμές, οι κάθετες φορτίσεις εμφάνιζαν στις περισσότερες των περιπτώσεων υψηλές τιμές (έως και 500 kg). Όσον αφορά το κράμα AZ31, το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με δημοσιευμένες έρευνες όπως αυτή του de. L Commin, ο οποίος συνιστά κάθετες φορτίσεις $F > 500$ kg. Αντίθετα, η ερευνητική ομάδα του D. Miara [18] τόσο σε συγκόλληση του κράματος WE43, όσο και σε αυτή κράματος μαγνησίου της σειράς AZ (AZ91), χρησιμοποιεί κάθετες φορτίσεις < 200 kg. Οι συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν ακολουθούν εν μέρει την παραπάνω διαπίστωση της ομάδας του de. L Commin, καθώς οι φορτίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν μεταξύ 420-450 kg και η περιστροφή του εργαλείου ήταν σταθερή και κατά Μ.Ο. στα 820 rpm. Οι τρεις πρώτες εξ αυτών πραγματοποιήθηκαν κάθετα στη διεύθυνση της έλασης και οι υπόλοιπες τρεις παράλληλα σε αυτήν.
- Η απομάκρυνση του υλικού με τη μορφή αποβλίττου είναι αναπόφευκτη. Το μικρότερο μέγεθος αποβλίττου που παρατηρήθηκε για ποιοτική ραφή είναι κατά Μ.Ο. 2.3 mm. Η μεγαλύτερη τιμή που παρατηρήθηκε είναι αυτή των 10 mm. Πρωτεύοντα ρόλο για αυτό παίζουν οι αργές τιμές της πρόωσης του εργαλείου σε συνδυασμό με τις υψηλές φορτίσεις.
- Όσα πέρασματα παρουσίασαν μικροοπές, αυτές εμφανίζονταν στη ρίζα της συγκόλλησης και στην περιοχή AS. Αυτό είναι λογικό καθώς από εκείνη την περιοχή η ακίδα παίρνει υλικό ώστε να το μεταφέρει στην περιοχή εναπόθεσης υλικού. Ταυτόχρονα με αυτή τη λειτουργία, η ακίδα μεταφέρει με το πίσω μέρος της υλικό με την αντίστροφη διαδικασία ώστε να καλυφθεί το κενό που στιγμιαία δημιουργήθηκε στην AS. Εάν η περιστροφή του εργαλείου δεν είναι ισχυρή ή οι κάθετες φορτίσεις δεν είναι αρκετές για να

δημιουργήσουν πλήρη διείσδυση του εργαλείου, παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο

- Μέσω των φωτογραφιών μικροδομής που παρατέθηκαν για λόγους σύγκρισης, προκύπτει ότι το μέγεθος των κόκκων ακολουθεί την εξής κατανομή: $NG < TMAZ < BM < HAZ$, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία
- Δεν παρατηρήθηκε το εσωτερικό σφάλμα kissing bond.



Εικόνα 61: Αριστερά: Προσκόλληση υλικού σε περιαιχένιο και ακίδα, Δεξιά: Απομάκρυνση μερών της ραφής ως αναξιοποίητα μέρη

4.2.3. Συσχέτιση μακροσκοπικών χαρακτηριστικών με πειραματικές συνθήκες.

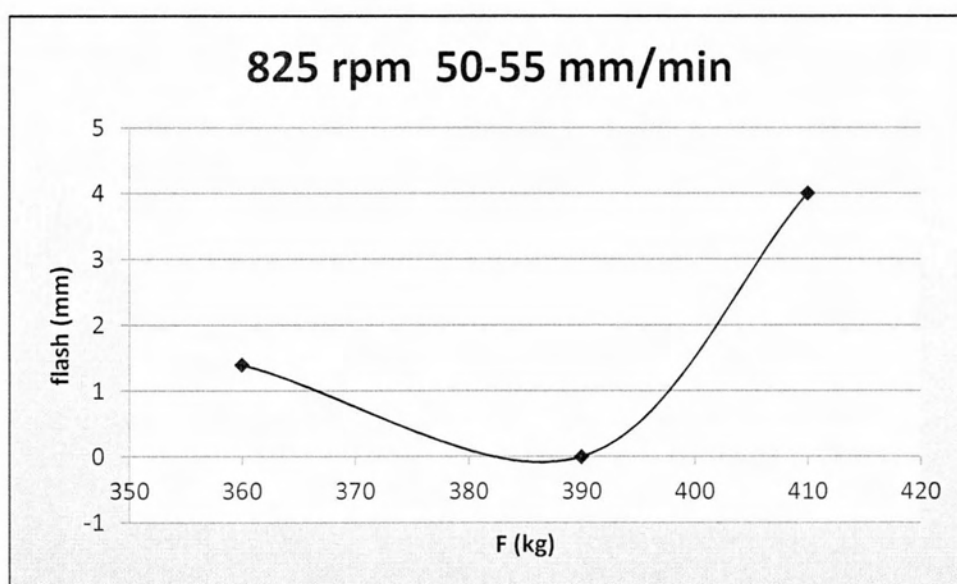
Οι χαρακτηριστικές μετρήσεις γεωμετρικών μεγεθών των απλών περασμάτων συνοψίζονται στον Πίνακα 9 και αποτελούν τον μέσο όρο επιμέρους μετρήσεων στις υπό μελέτη περιοχές.

Για εύρος $7.3 < R/V < 15.71$, φαίνεται ότι όλα τα περάσματα συνδέονται με απομάκρυνση υλικού με τη μορφή αποβλίττου μεγέθους μεγαλύτερου από 2 mm. Εξάιρεση αποτελούν το δοκίμιο I και το δοκίμιο IV που όμως παρουσίασε επιφανειακές αυλακώσεις (tunnel). Καλύτερο συνδυασμό μεταλλογραφικής ανάλυσης και μέτρησης αποβλίττου εμφανίζει το δοκίμιο I. Ως προς τα υπόλοιπα δοκίμια φαίνεται ότι οι χαμηλές φορτίσεις οδηγούν σε εσωτερικά σφάλματα, ενώ οι υψηλές στη δημιουργία αποβλίττου.

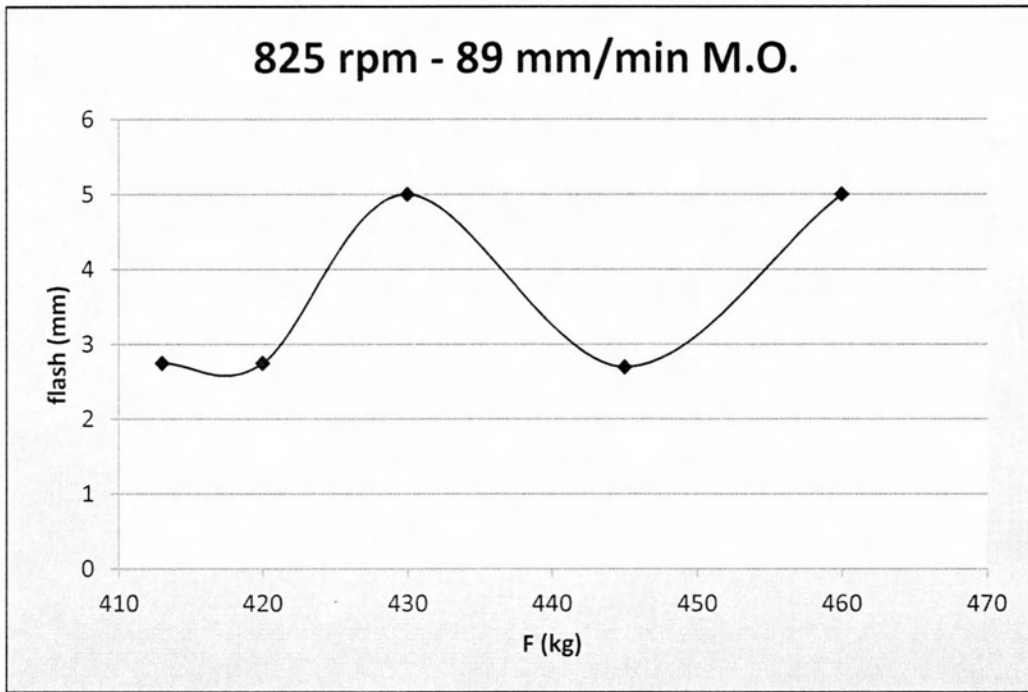
Πίνακας 9: Μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών περιοχών συγκόλλησης

	πλάτος NG,w (mm)	Δείσδυση,h (mm)	TMAZ, γ (mm)		Flash (mm)
			AS	RS	
Δοκίμιο Ι	5.625	2	0.03	0.06	0
Δοκίμιο ΙΙ	5.25	1.5	0.03	0.134	4
Δοκίμιο ΙV	5.25	1.65	0.06	0.15	1.5
Δοκίμιο λ	5.275	1.575	0.12	0.129	2.3
Δοκίμιο Χ	5.42	1.82	0.38	0.42	-
Δοκίμιο ε	4.982	1.79	0.135	0.196	2.75
Δοκίμιο ι	5.5	2	0.2971	0.386	5
Δοκίμιο μ	4.351	1.74	0.0625	0.88	10
Δοκίμιο ν	5.196	1.8	0.226	0.238	2.4

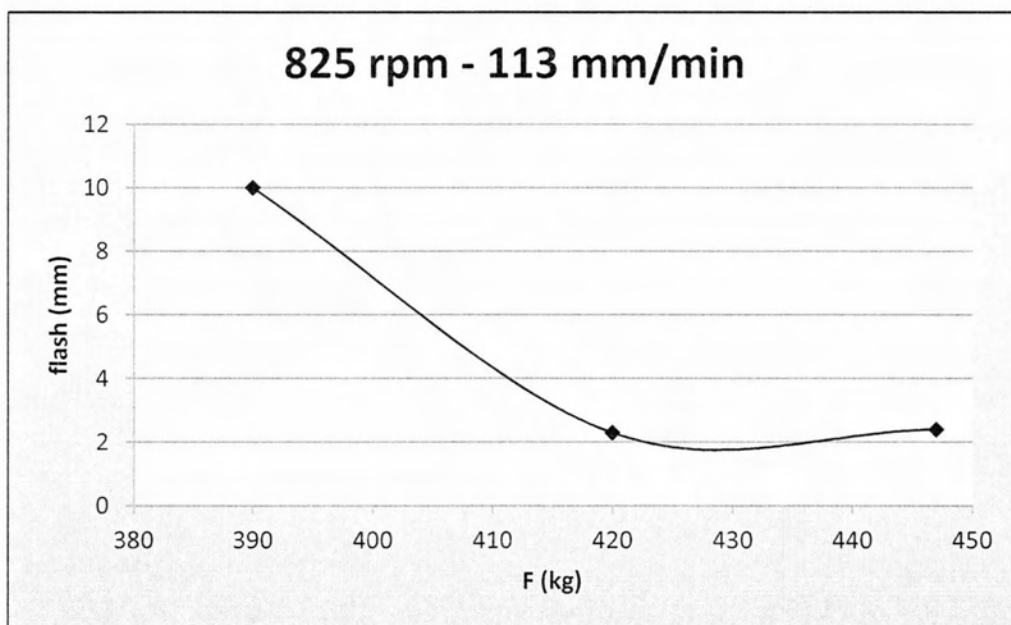
Με βάση τα αποτελέσματα του Πιν. 9 κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα των Εικ. 62-64 και αφορούν το μήκος του αποβλίττου συναρτήσει της κάθετης φόρτισης.



Εικόνα 62: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίττου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη



Εικόνα 63: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίττου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη



Εικόνα 64: Συσχέτιση δημιουργίας αποβλίττου με την εφαρμοζόμενη κάθετη δύναμη

4.2.4. Σχολιασμός διαγραμμάτων

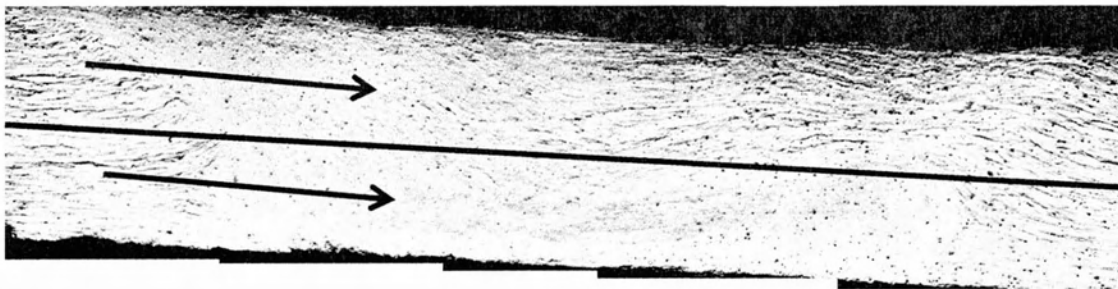
Διάγραμμα 1: Σε αυτό παρατηρείται ένα ακρότατο και αυτό είναι τοπικό ελάχιστο. Μάλιστα, πρόκειται για δοκίμιο χωρίς εσωτερικά σφάλματα και το μέγεθος του αποβλίττου που παρατηρείται είναι 0 mm. Παρόλα αυτά διατηρείται μια επιφύλαξη για την τιμή που προκύπτει καθώς αυτή αφορά μικρή περιοχή της ραφής συγκόλλησης. Πριν από αυτό το σημείο και για 360 kg μ.ο. το μέγεθος του αποβλίττου είναι μεγαλύτερο του 0 και αφορά ραφή με επιφανειακές αυλακώσεις (tunnel). Επομένως το περιουχένιο εδώ δεν έχει τοποθετηθεί κατάλληλα ώστε να περιορίζει τη ροή του υλικού εντός της ραφής. Για κάθετες φορτίσεις των 400 kg και άνω η κάθετη φόρτιση υπερβαίνει τις πρόπουσες τιμές.

Διάγραμμα 2: Το τοπικό μέγιστο και το τοπικό ελάχιστο για τα 430 kg και 445 kg αντίστοιχα, χρήζουν σχολιασμού. Για το πρώτο σημείο εξ αυτών, φαίνεται ότι το περιουχένιο αδυνατεί να περιορίσει τη ροή εντός της ραφής συγκόλλησης και επομένως το μέγεθος του αποβλίττου στην περιοχή RS παίρνει τιμές με Μ.Ο τα 5mm. Καθώς η κάθετη φόρτιση παίρνει μεγαλύτερες τιμές, τα αντίστοιχα μεγέθη του του αποβλίττου μειώνονται για να ακολουθήσει το σημείο που αντιστοιχεί στη βέλτιστη κάθετη φόρτιση. Αυτή οδηγεί στο μικρότερο δυνατό μέγεθος αποβλίττου, το οποίο όμως είναι μεγαλύτερο από 2.5 mm (2.75 mm Μ.Ο). Μεγαλύτερες τιμές κάθετης φόρτισης θεωρούνται μη αποδεκτές.

Διάγραμμα 3: Παρομοίως οι διαθέσιμες συνθήκες είναι οι ελάχιστες δυνατές. Φαίνεται ότι μέγεθος αποβλίττου μικρότερο των 2.5 mm, παρατηρείται για $F=420$ kg και αντιστοιχεί στο πέρασμα ν. Παρόλα αυτά μέσω της μεταλλογραφίας του, προκύπτει ότι οι συγκεκριμένες συνθήκες οδηγούν σε μικροσπές χαμηλά στην περιοχή απαγωγής υλικού. Αυτό σημαίνει ότι αποδεκτές συγκολλήσεις χωρίς εσωτερικά σφάλματα ενδέχονται για $F>420$ kg, κάτι που όμως συνεπάγεται αυξημένο μέγεθος αποβλίττου.

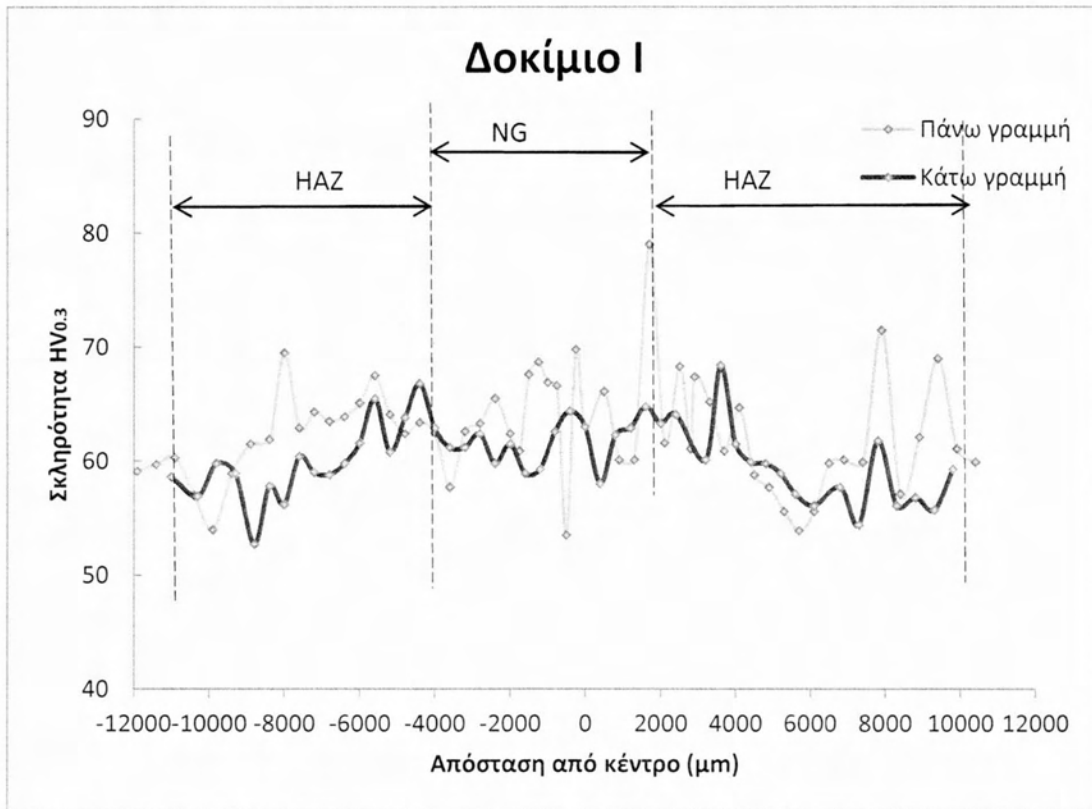
4.2.5. Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων στα απλά περάσματα

Για κάθε δοκίμιο μετρήθηκαν δύο προφίλ σκληρομετρήσεων (σύμφωνα με τα βέλη της Εικ. 65), ένα 500 μm Μ.Ο. από την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου και ένα 300-400 μm από την κάτω. Η μικροσκληρότητα του βασικού μετάλλου του κράματος AZ31, εγκάρσια στη διεύθυνση έλασης, είναι ίση με 55 HV [6].

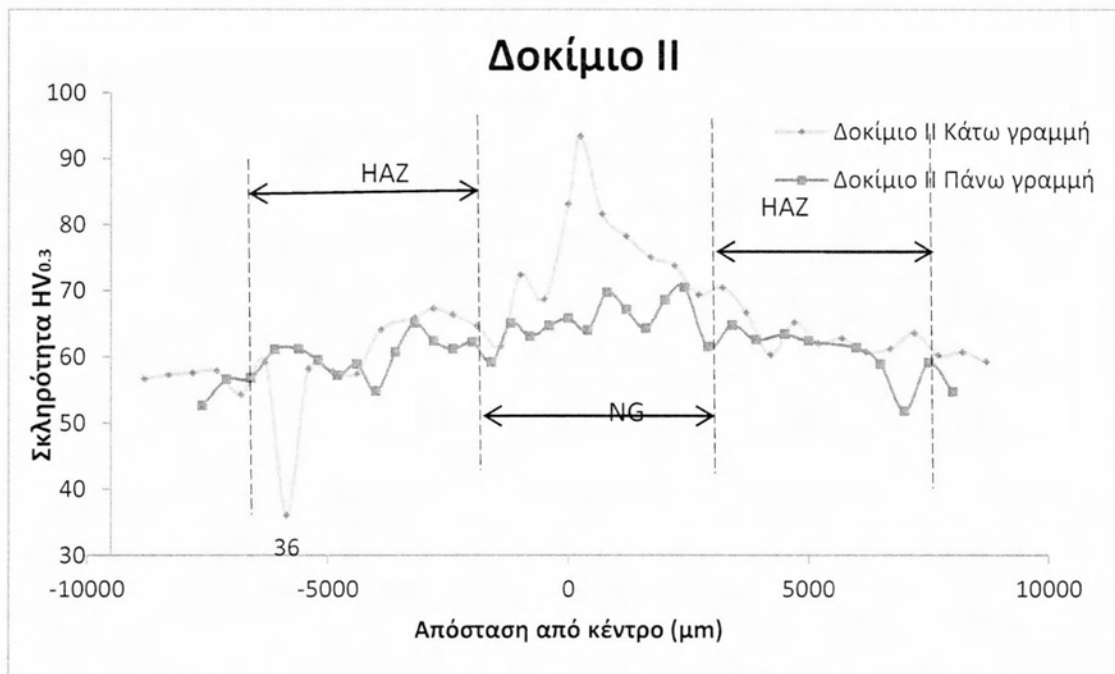


Εικόνα 65: Μεθοδολογία ανάπτυξης σκληρομετρήσεων

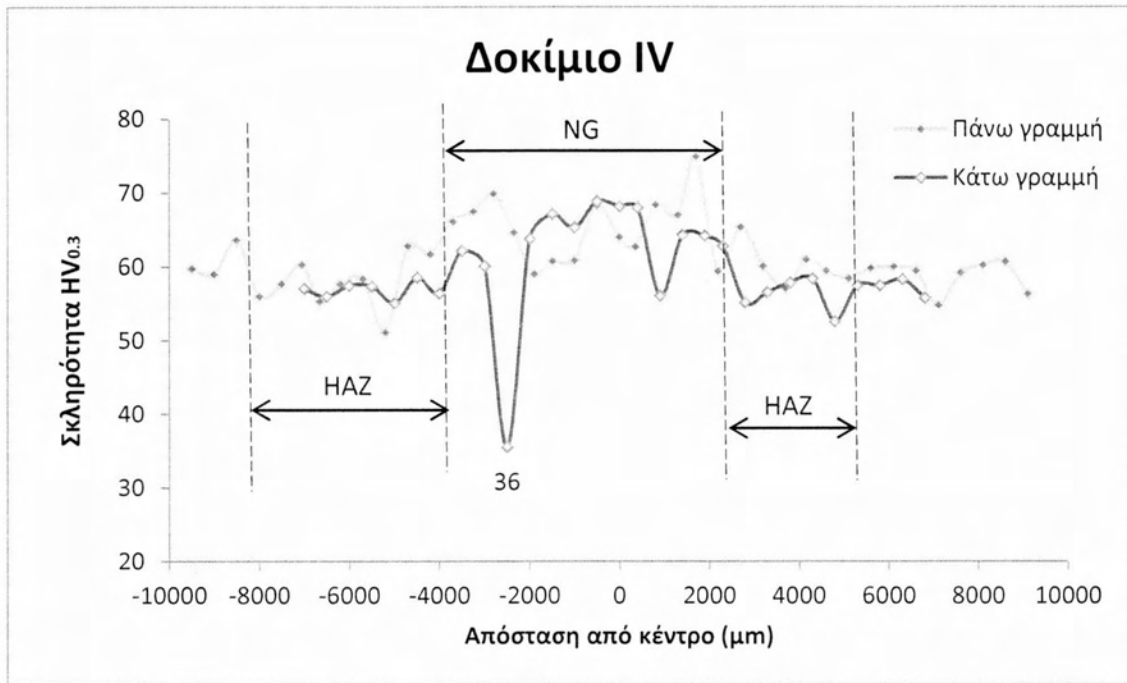
Τα προφίλ φαίνονται παρακάτω για κάθε δοκίμιο, ενώ οι ασυνήθιστα χαμηλές τιμές σημειώνονται πάνω στο διάγραμμα.



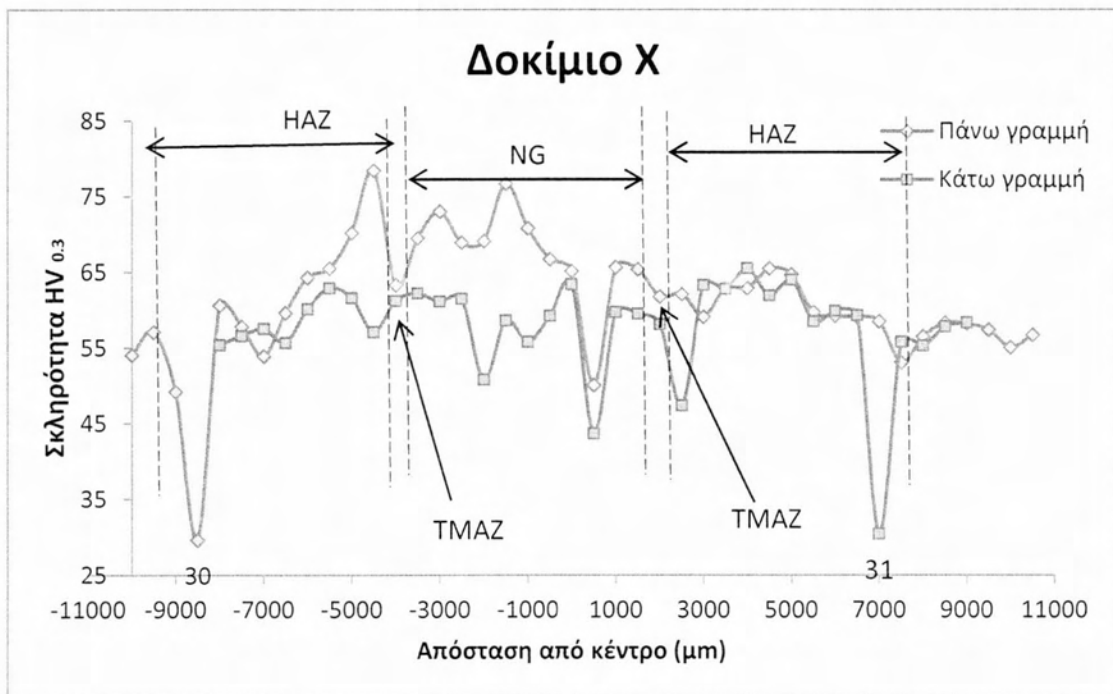
Εικόνα 66: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκίμιου I



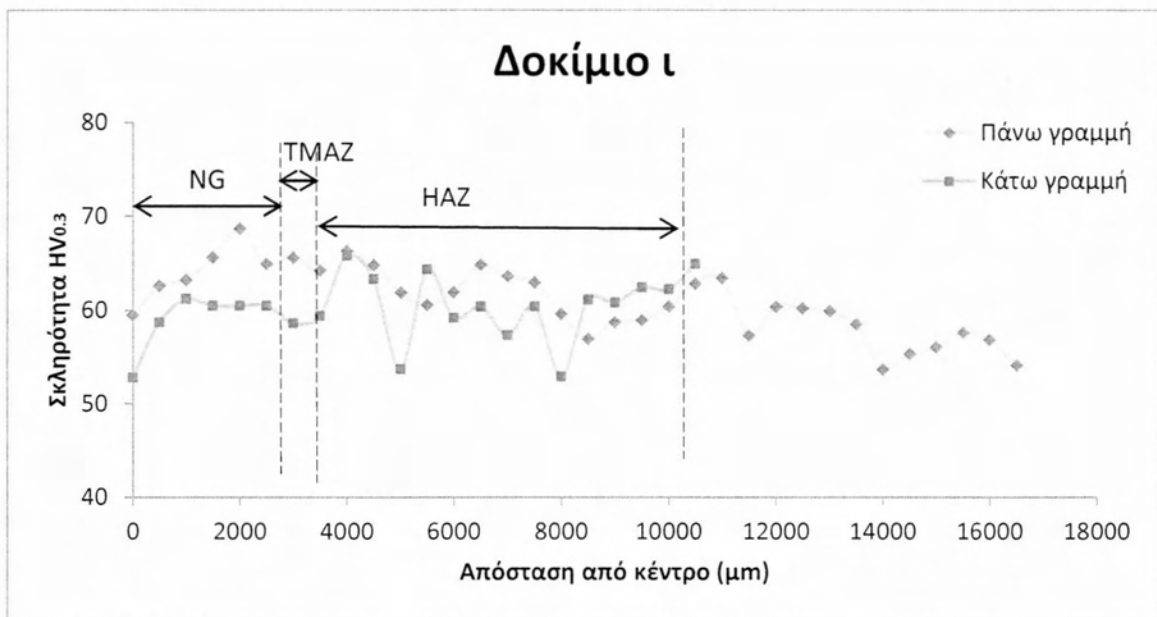
Εικόνα 67: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκίμιου II



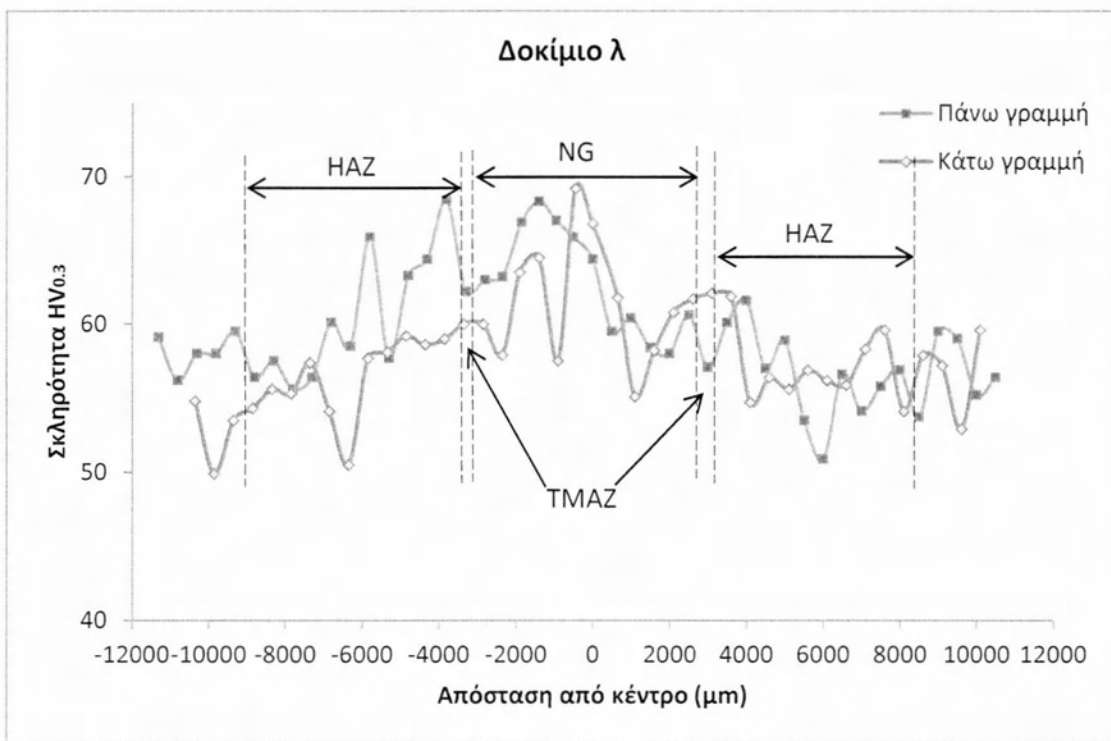
Εικόνα 68: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου IV



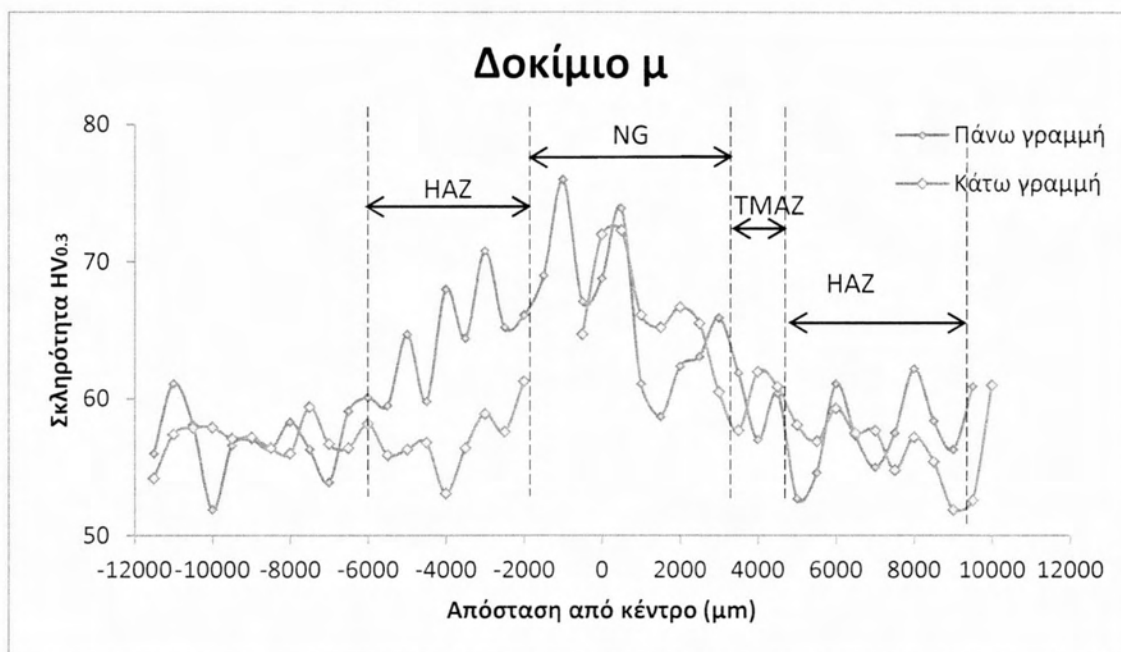
Εικόνα 69: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου X



Εικόνα 70: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου ι



Εικόνα 71: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου λ



Εικόνα 72: Προφίλ σκληρομετρήσεων δοκιμίου μ

Τα προφίλ σκληρομετρήσεων είναι δεκατέσσερα, όπου σε κάθε δοκίμιο αντιστοιχούν δύο. Από αυτά μόνο τα τέσσερα (4) περάσματα αποτελούσαν τμήματα ποιοτικών ραφών και αυτά είναι των δοκιμίων Ι και ι. Να αναφερθεί ότι για το πέραςμα ι υπήρξε δυνατότητα μετρήσεων μόνο στην περιοχή εναπόθεσης υλικού. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ατα εξής:

- Για κάθε δοκίμιο, τα προφίλ σκληρομετρήσεων παρουσιάζουν μεταξύ τους παρεμφερείς τιμές. Οι εφαρμοζόμενες συνθήκες των δοκιμίων εμφανίζουν υψηλό λόγο (R/V). Αυτό σημαίνει ότι η πρόωση του εργαλείου είναι τόσο αργή, ώστε να διαχυθεί η θερμότητα από το περιουχένιο έως τη ρίζα της συγκόλλησης και η σκληρότητα στην κατακόρυφο να είναι ομοιόμορφη
- Μελετώντας καθένα προφίλ σκληρομέτρησης ξεχωριστά, φαίνεται ότι για υψηλό λόγο (R/V), δεν υφίσταται διασπορά τιμών με εξαίρεση την περιοχή ανάδευσης. Εκεί η δομή είναι λεπτόκοκκη και επομένως παρατηρούνται υψηλές τιμές σκληρότητας. Αντίθετα, στο δοκίμιο λ και ακόμα περισσότερο στο δοκίμιο μ, διαμορφώνονται προφίλ σκληρομετρήσεων τα οποία θέλουν τις τιμές των μετρήσεων στην περιοχή NG και HAZ να είναι εμφανώς μεγαλύτερες και μικρότερες, αντίστοιχα, από αυτές του βασικού μετάλλου. Τα προφίλ αυτά προκύπτουν καθώς ο λόγος (R/V) εδώ, παίρνει μικρότερες τιμές.

Εξαίρεση στην παραπάνω διαπίστωση είναι το επάνω προφίλ σκληρομέτρησης του δοκιμίου ΙΙ. Σε αντίθεση με τις αργές εφαρμοζόμενες συνθήκες της ραφής, οι μετρήσεις που προκύπτουν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην υπόθεση της εργοσκληύρυνσης της επιφάνειας του δοκιμίου κατά την κοπή του σε κοπτικό εργαλείο.

- Σε κάποια από τα παραπάνω προφίλ, εμφανίζονται ασυνήθιστα χαμηλές τιμές, οι οποίες σημειώνονται επάνω στο διάγραμμα. Όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται για δοκίμια τα οποία έχουν εμφανίσει

εσωτερικά σφάλματα. Επομένως είναι πιθανόν κάτω από τις περιοχές των μετρήσεων να υφίστανται μικροσπές.

4.3. Μετωπικές συγκολλήσεις

Οι μετωπικές συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν, βασίστηκαν στις βέλτιστες συνθήκες των περασμάτων του Πίνακα 9 του §. 4.2.3. Οι συνθήκες των συγκολλήσεων φαίνονται στον Πίνακα 7 του §. 3.2.. Από αυτές, οι τρεις πρώτες έγιναν κάθετα στη διεύθυνση της έλασής τους, ενώ οι τρεις τελευταίες πραγματοποιήθηκαν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασής τους. Για κάθε συγκόλληση παρατίθενται αρχικά φωτογραφία μικρής μεγέθυνσης όπου απεικονίζεται η περιοχή ανάδευσής της και ακολουθούν εικόνες υψηλής μεγέθυνσης όπου συγκρίνεται η κοκκομετρία των περιοχών συγκόλλησης με αυτή του ΒΜ.

Η συγκράτηση των ελασμάτων ήταν ισχυρή κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, ώστε να παραμείνουν ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους, και φαίνεται στην Εικ. 73.



Εικόνα 73: Συγκόλληση ελασμάτων AZ31 παράλληλα στη διεύθυνση ελάσεώς τους

4.3.1. Αποτελέσματα μεταλλογραφίας μετωπικών συγκολλήσεων

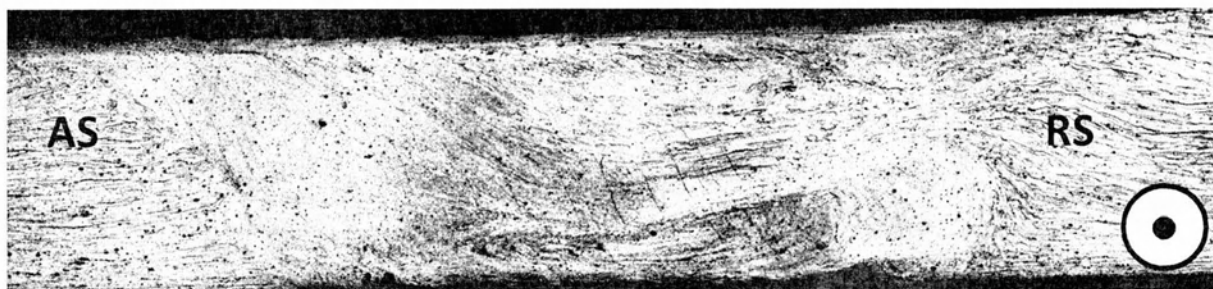
Συγκολλήσεις κάθετα στη διεύθυνση έλασης

Τα μεταλλογραφικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση των συγκολλήσεων δίνονται στις Εικ 74-81 για τις συγκολλήσεις 1-3 αντίστοιχα. Πρόκειται για συγκολλήσεις πλήρους διείδυσης. Στη συγκόλληση Νο. 1 πραγματοποιήθηκε μη καταστρεπτικός ραδιογραφικός έλεγχος, όπου δεν εντοπίστηκαν εσωτερικά σφάλματα (Εικ. 75).

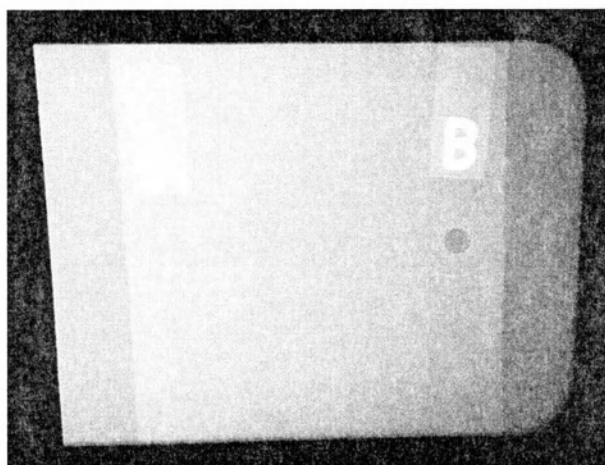
Στην συγκόλληση Νο. 2 παρατηρείται η δημιουργία δύο μικροσπών, όπως υποδηλώνουν τα βέλη, στην περιοχή απαγωγής υλικού, οι οποίες όμως σχηματίζονται λίγο πιο κάτω από την επαφή του υλικού με το περιαιχένιο (Εικ. 78).

Η συγκόλληση 3, όπως φαίνεται από την αντίστοιχη μεταλλογραφία, δεν παρουσιάζει εσωτερικά σφάλματα (Εικ. 80).

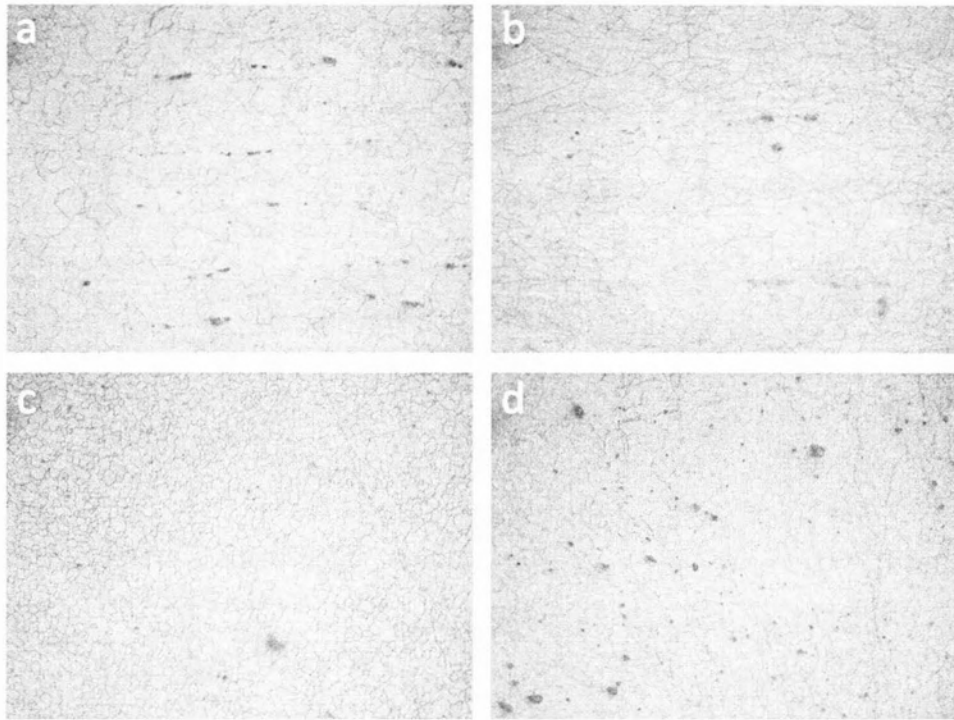
Butt Weld 1



Εικόνα 74: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)

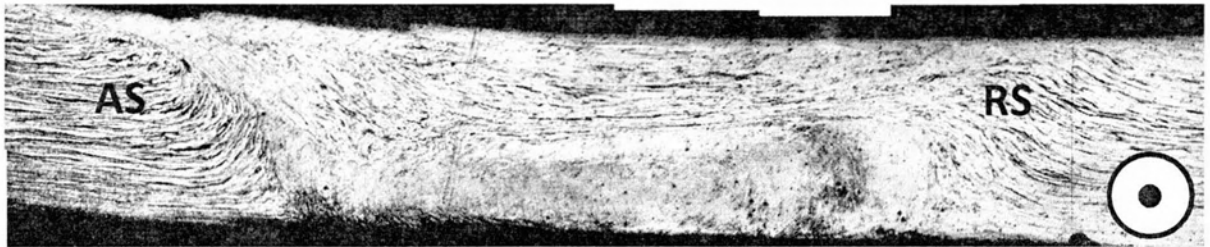


Εικόνα 75: Φιλμ ραδιογραφίας για συγκόλληση 1

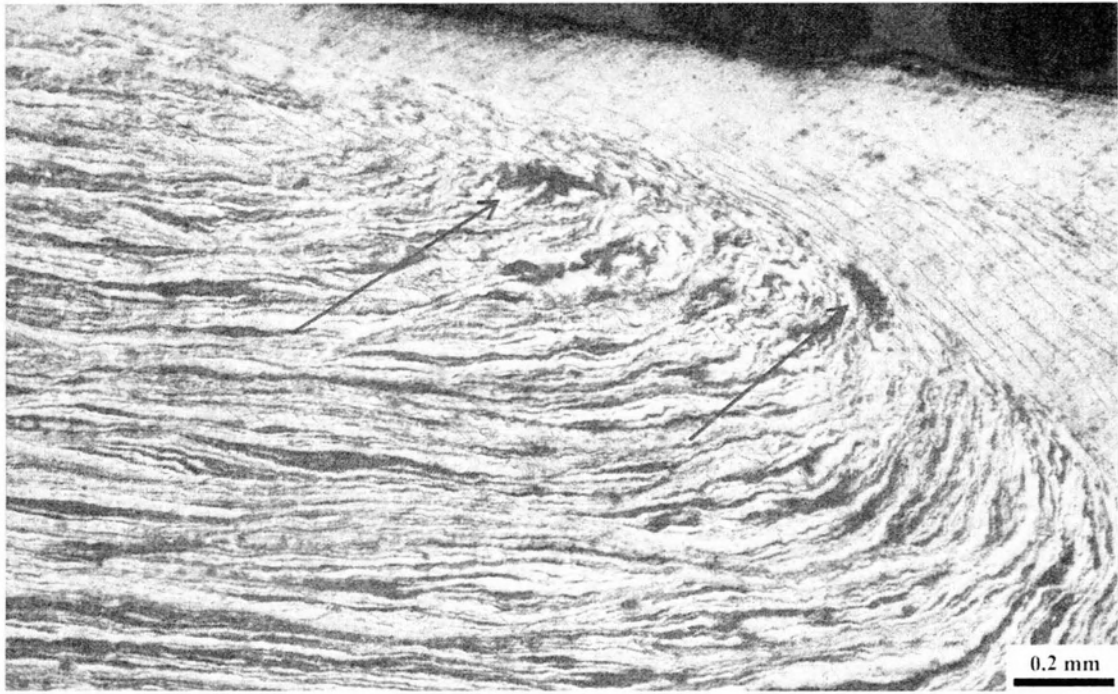


Εικόνα 76: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή ΒΜ, c: Περιοχή ΝG, d: Περιοχή ΤΜΑΖ (500x)

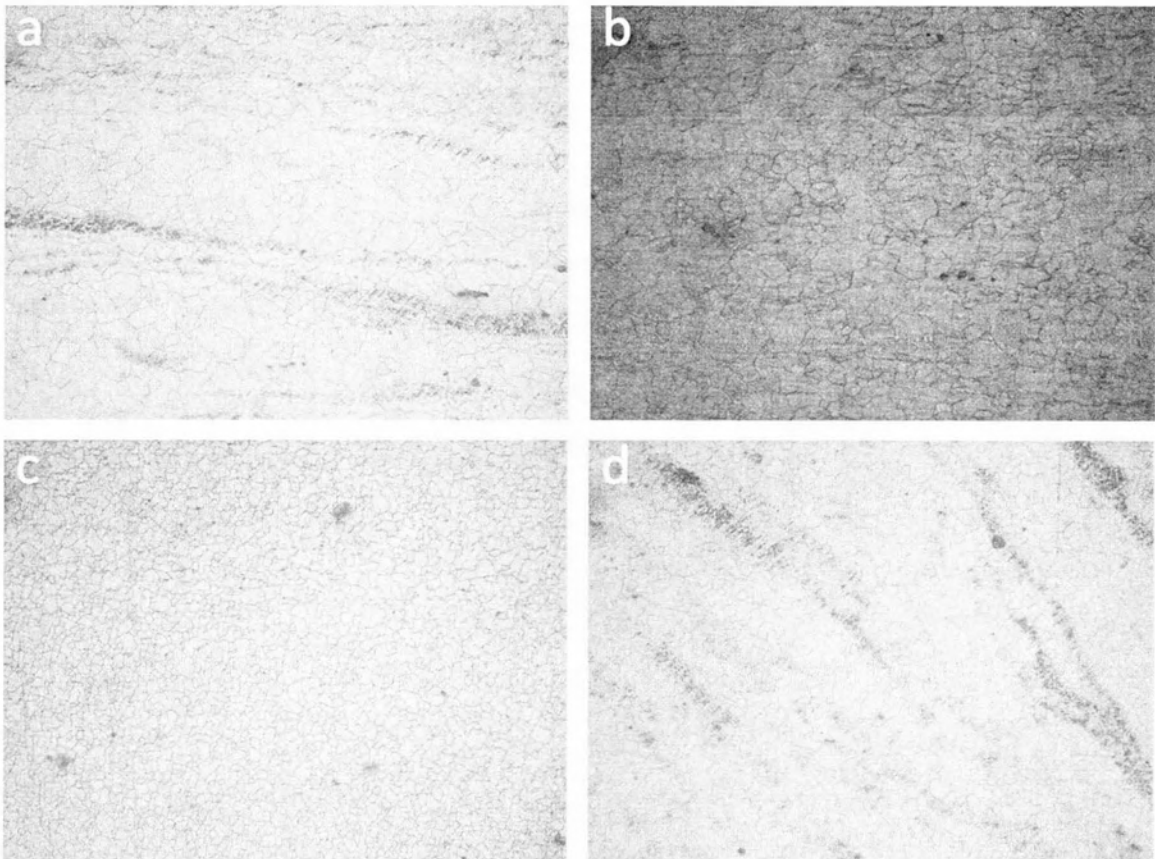
Butt Weld 2



Εικόνα 77: Απεικόνιση της περιοχής ΝG (50x)

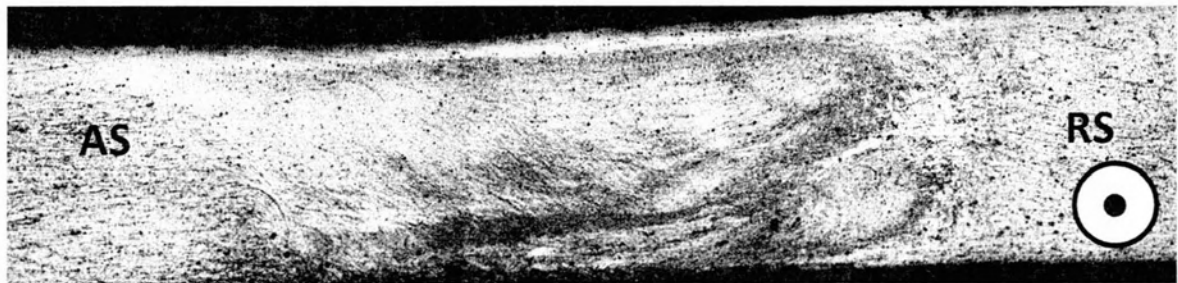


Εικόνα 78: Σχηματισμός μικροοπών στην άνω επιφάνεια της ραφής (50x)

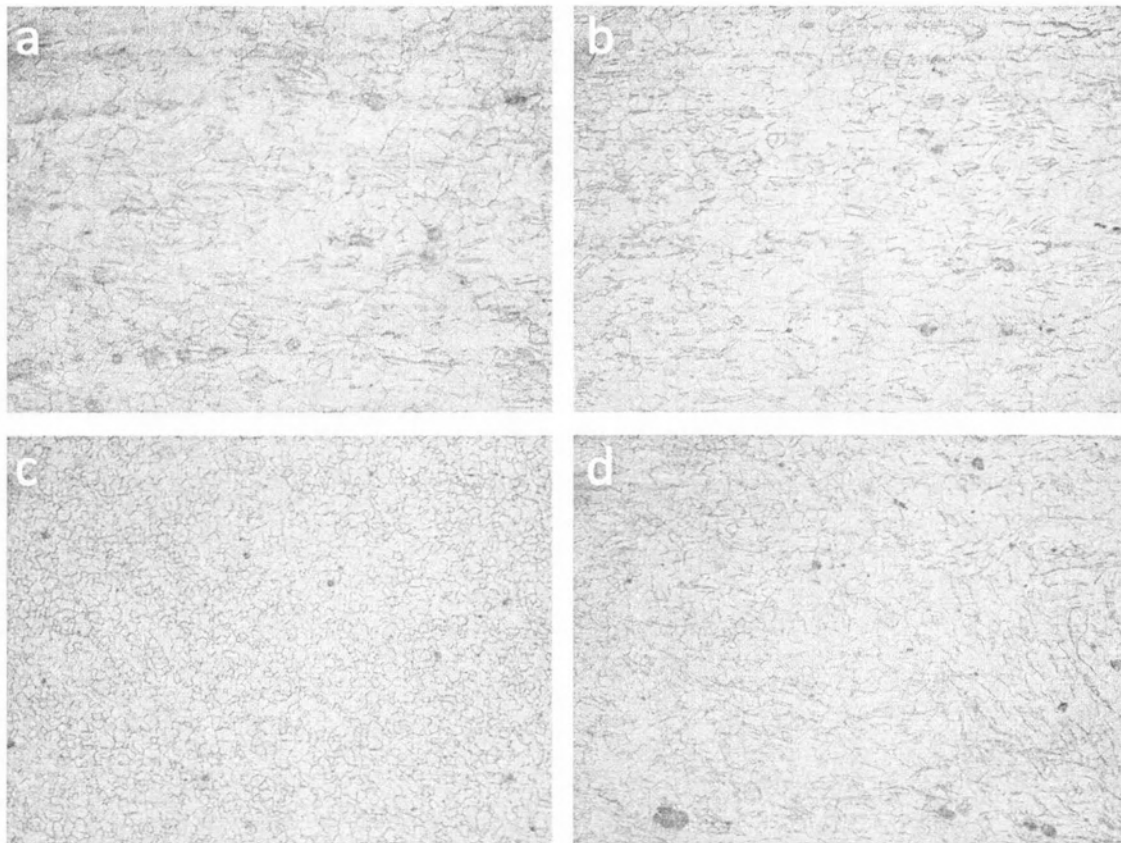


Εικόνα 79: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή ΒΜ, c: Περιοχή ΝΓ, d: Περιοχή ΤΜΑΖ (500x)

Butt Weld 3



Εικόνα 80: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)



Εικόνα 81: α: Περιοχή HAZ, β: Περιοχή ΒΜ, γ: Περιοχή ΝΓ, δ: Περιοχή ΤΜΑΖ (500x)

Συγκολλήσεις παράλληλα στη διεύθυνση έλασης

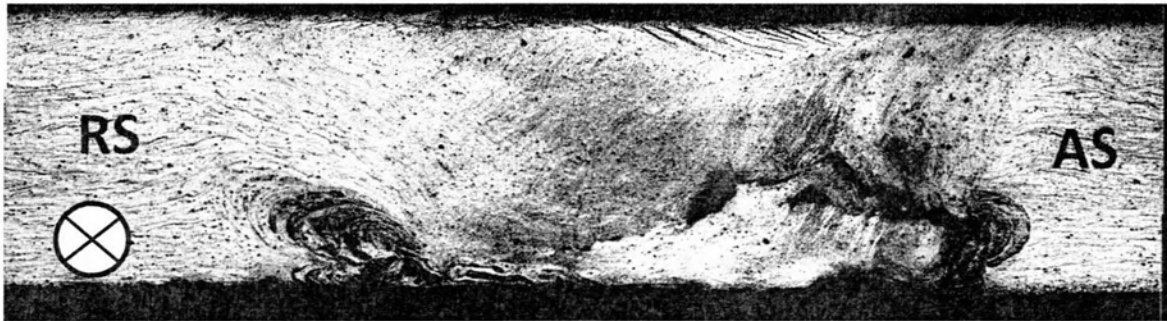
Οι συγκολλήσεις 4 και 5 παρατηρήθηκαν παράλληλα στη διεύθυνση πρόωσης. Και οι δύο συγκολλήσεις είναι πλήρους διείσδυσης αλλά οι μικροδομές τους παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Η συγκόλληση 4 εμφανίζει εσωτερικά σφάλματα και συγκεκριμένα τόσο χαμηλά στην περιοχή AS, όσο και στην περιοχή RS, παρατηρείται η δημιουργία τούνελ.

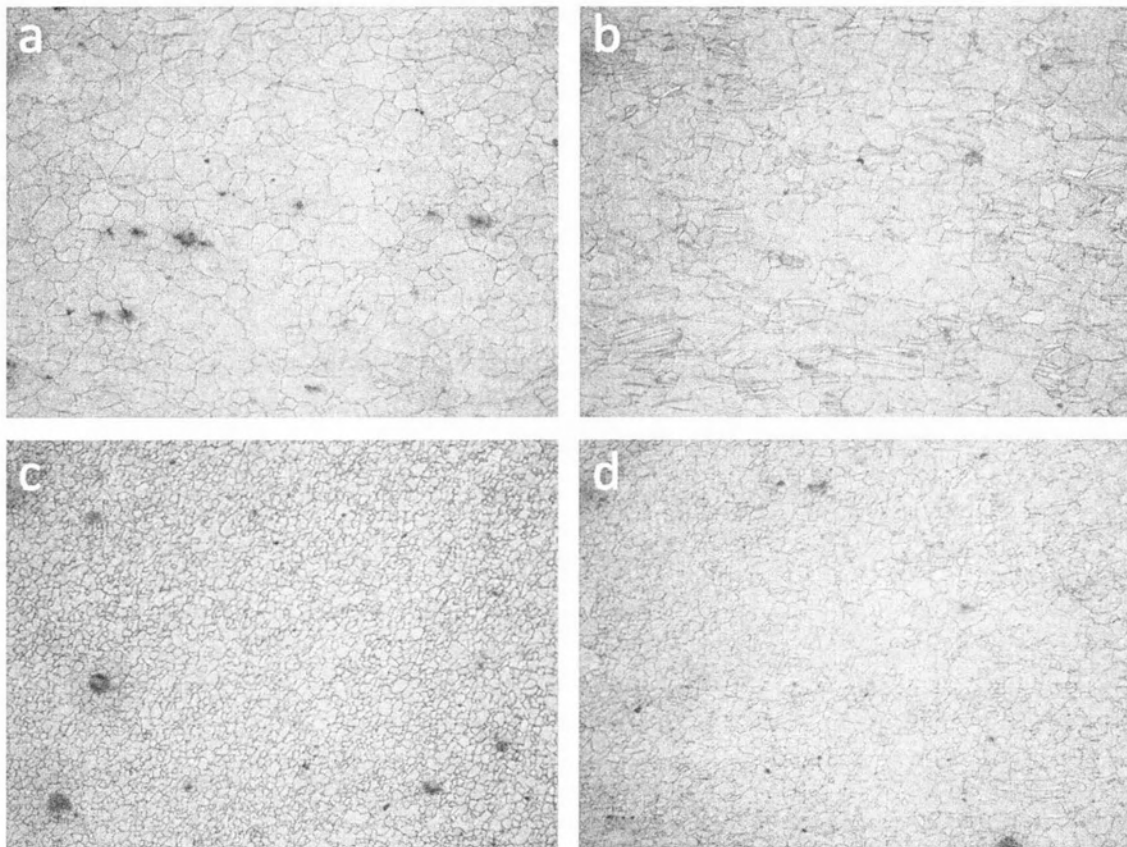
Αντίθετα, η συγκόλληση 5 δεν εμφανίζει εσωτερικά σφάλματα.

Από τη συγκόλληση 6 δεν εγκιβωτίστηκε δοκίμιο καθώς όπως φαίνεται από την Εικ. 86, η ραφή παρουσίασε ίχνη από επιφανειακές αυλακώσεις.

Butt Weld 4

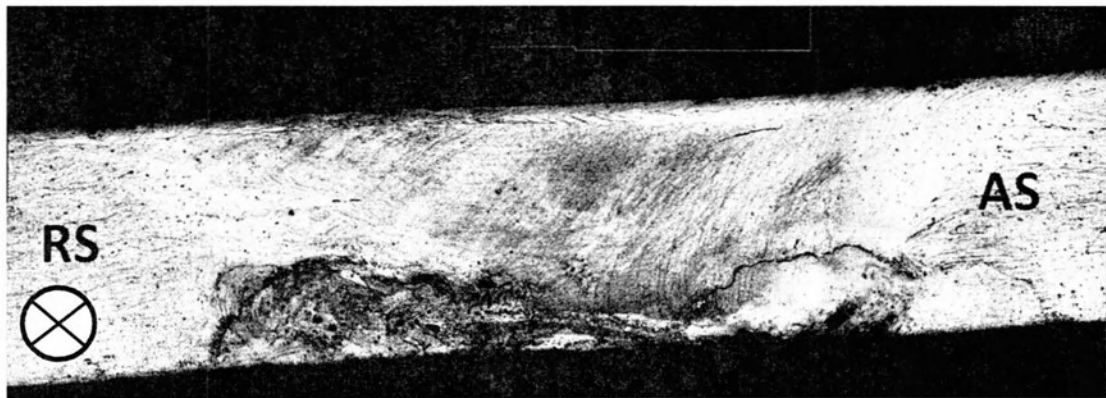


Εικόνα 82: Απεικόνιση της περιοχής NG (50x)

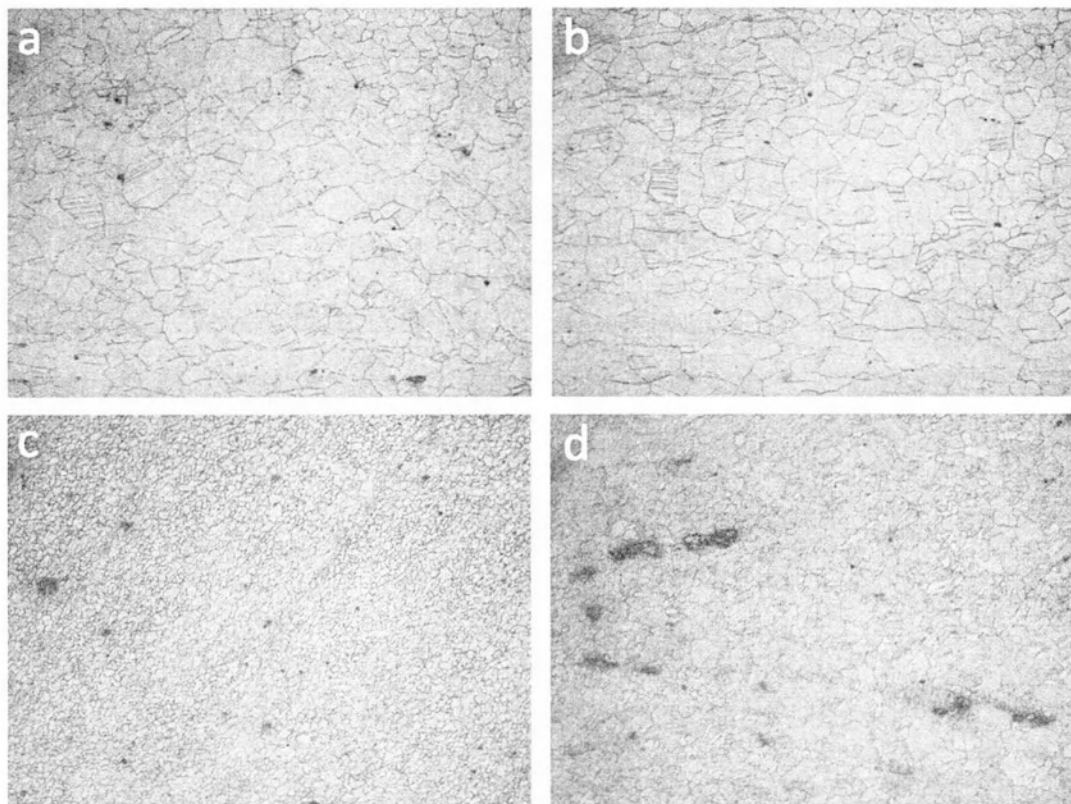


Εικόνα 83: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή BM, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)

Butt Weld 5

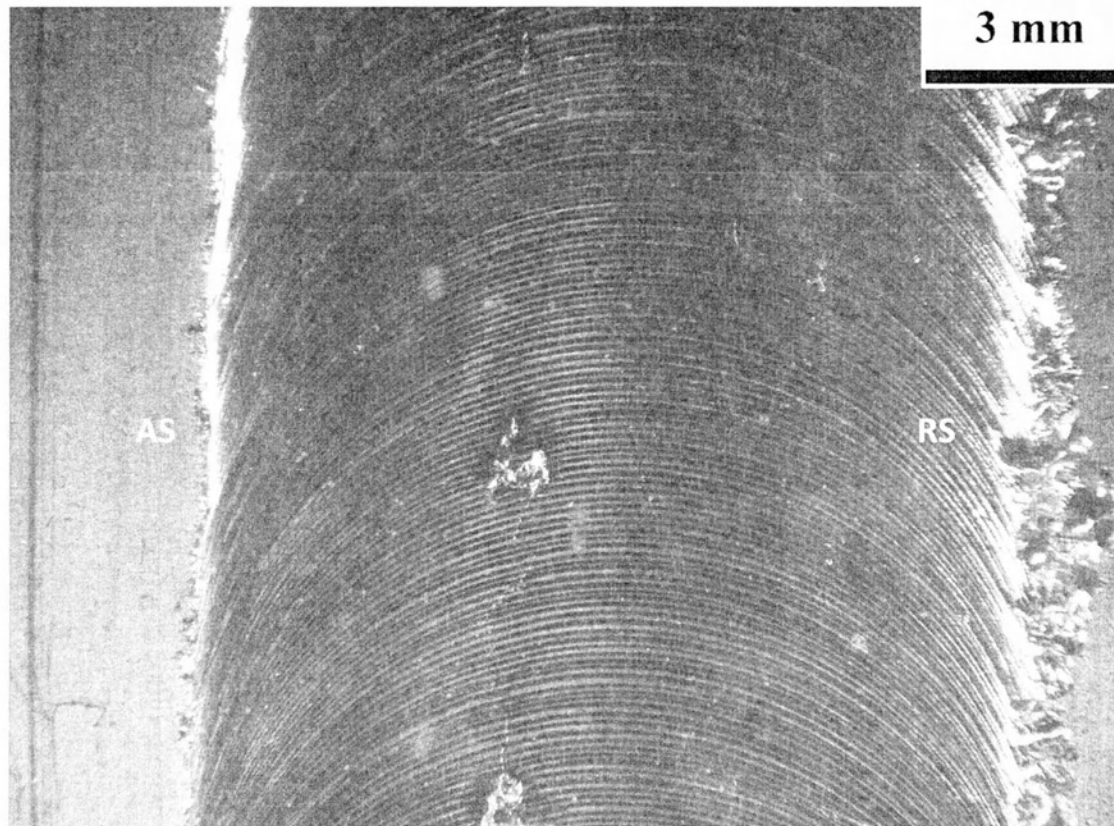


Εικόνα 84: Απεικόνιση της περιοχής NG(50x)



Εικόνα 85: a: Περιοχή HAZ, b: Περιοχή ΒΜ, c: Περιοχή NG, d: Περιοχή TMAZ (500x)

Butt Weld 6



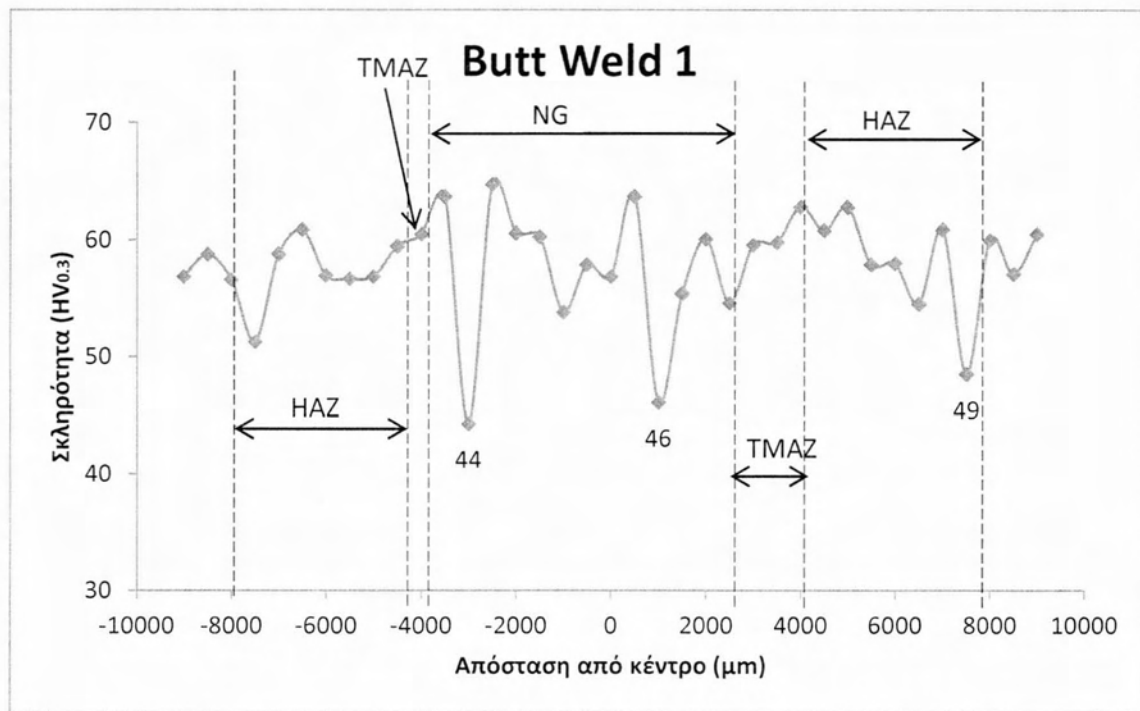
Εικόνα 86: Μακροσκοπική απεικόνιση ραφής συγκολλησης (6.5x)

Συνολικά για τις μετωπικές συγκολλήσεις οι μετρήσεις του αποβλίττου παρουσιάζονται στον Πίν. 10.

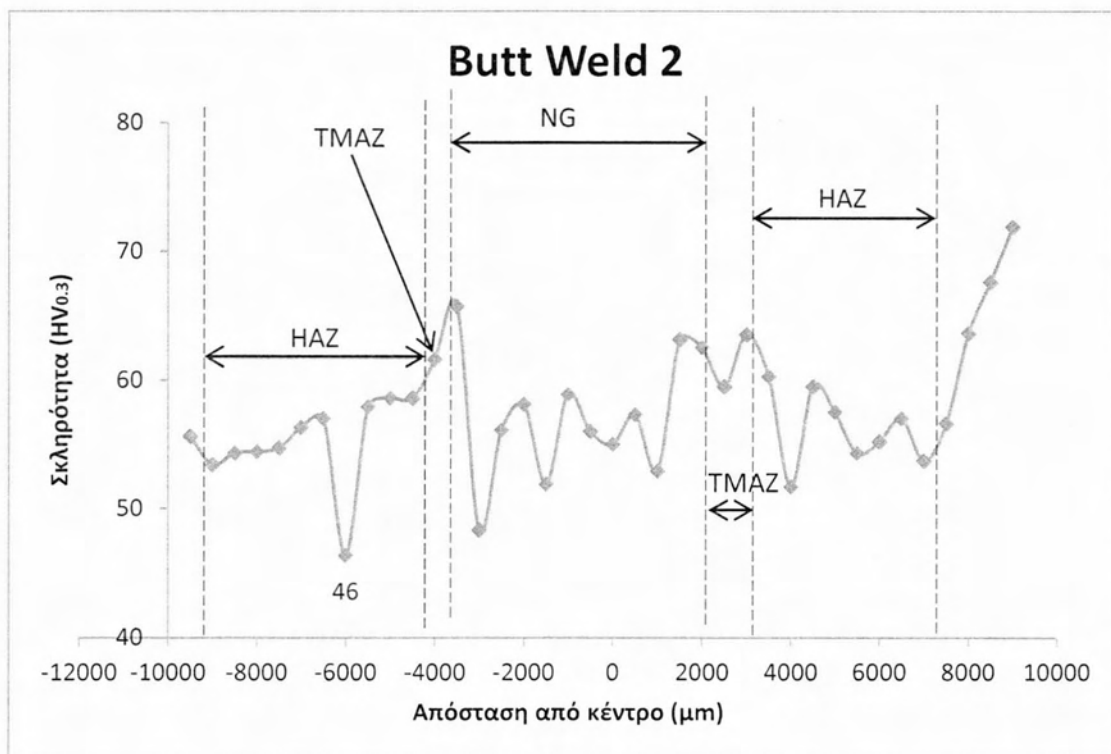
Πίνακας 10: Μέγεθος αποβλίττου ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες

Συγκολλήσεις	Συνθήκες			Μετρήσεις
	R (rpm)	V (mm/min)	F (kg)	Flash (mm)
1 ^η	820-830	58-60	450	3.5 M.O.
2 ^η	820-830	58-60	420	2.3 M.O.
3 ^η	820-830	88-90	440-450	2.3 M.O.
4 ^η	820-830	55-56	450-460	2.01 M.O.
5 ^η	820-830	80	440-460	2.9 M.O.
6 ^η	820-830	102	430-455	2.67 M.O.

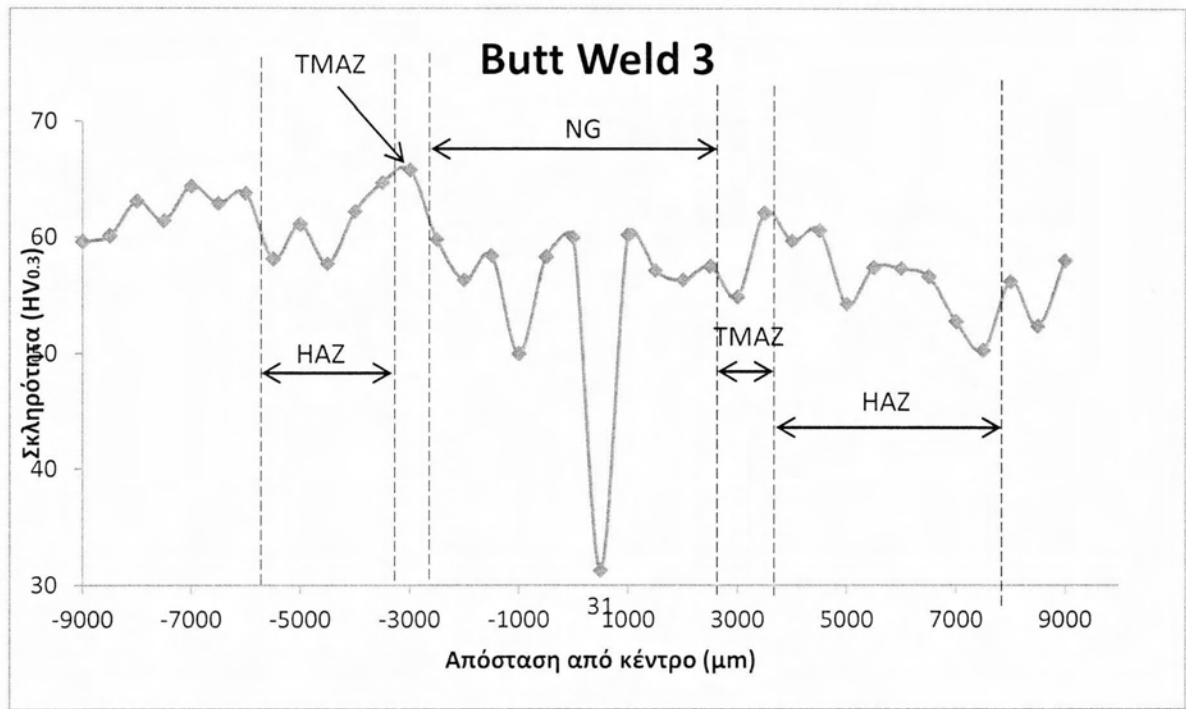
4.3.2. Προφίλ σκληρομετρήσεων σε μετωπικές συγκολλήσεις



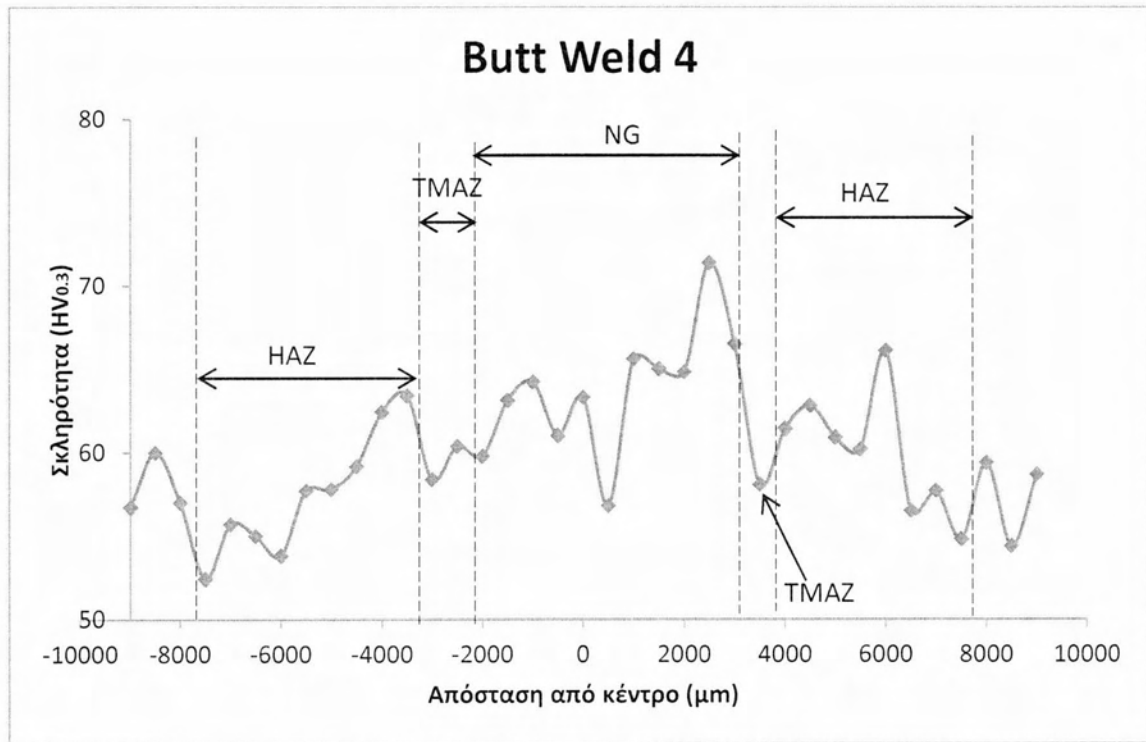
Εικόνα 87: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 1



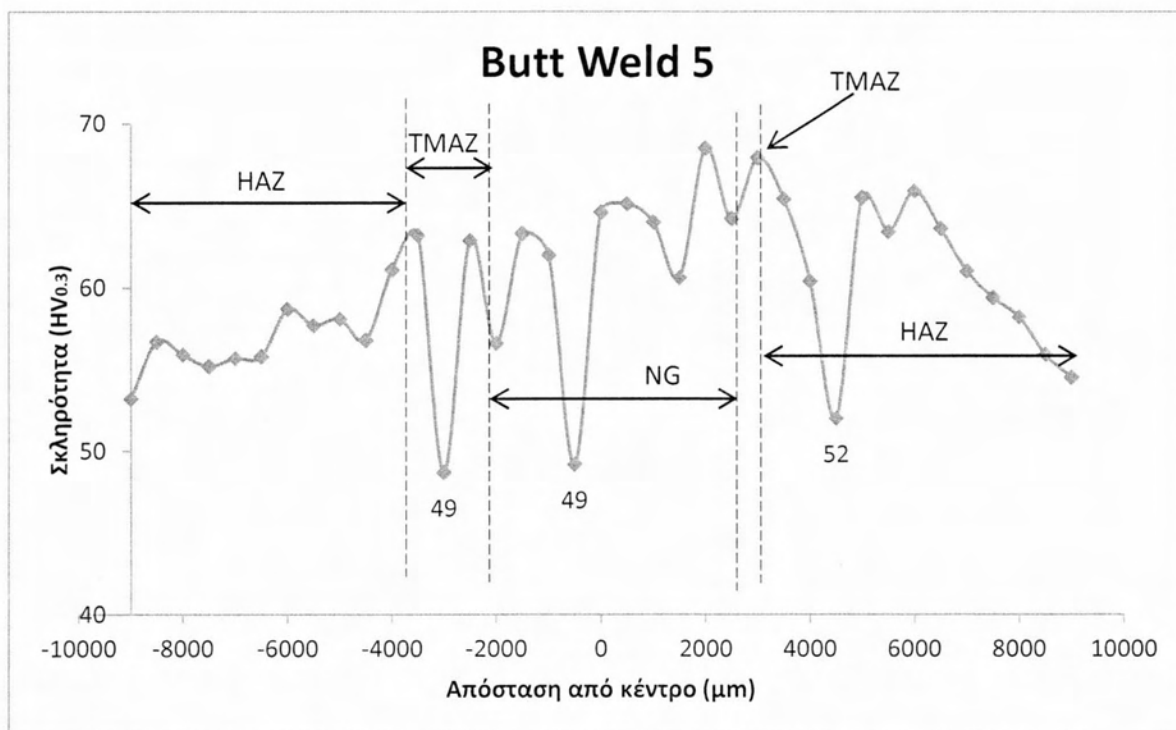
Εικόνα 88: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 2



Εικόνα 89: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 3



Εικόνα 90: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 4

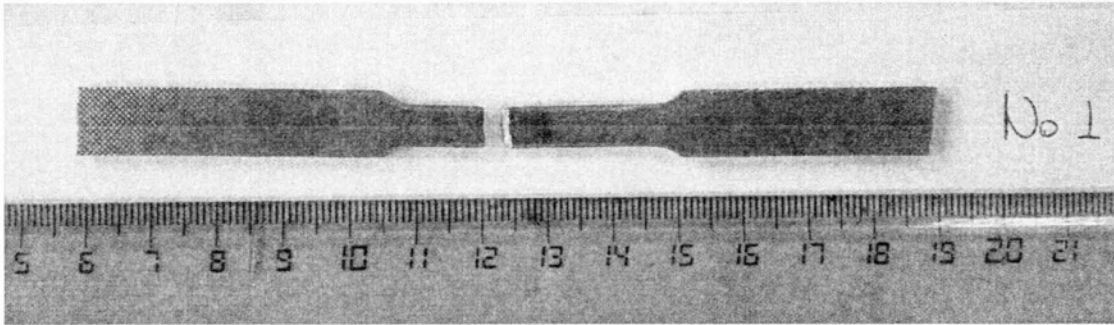


Εικόνα 91: Προφίλ σκληρομετρήσεων της συγκόλλησης Butt Weld 5

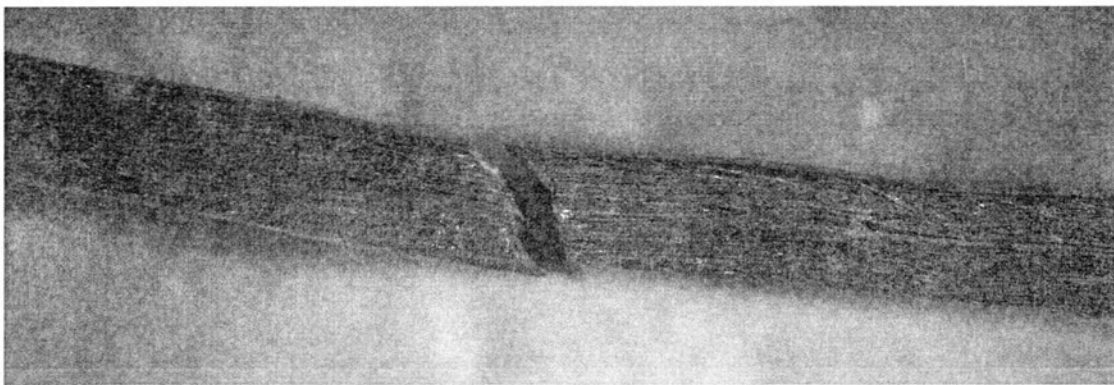
4.3.3. Δοκιμές εφελκυσμού

Στις πέντε πρώτες εκ των έξι συγκολλήσεων δημιουργήθηκαν δοκίμια εφελκυσμού εγκάρσια στις ραφές συγκόλλησης. Στην έκτη συγκόλληση δεν ήταν δυνατή η δημιουργία δοκιμίου καθώς, όπως φάνηκε από το μεταλλογραφικό της έλεγχο, παρουσίαζε εξωτερικές αυλακώσεις. Για κάθε μία από τις συγκολλήσεις δημιουργήθηκε ένα δοκίμιο. Παρακάτω συνοψίζονται ανά συγκόλληση οι μακροσκοπικές εικόνες στην περιοχή θραύσης τους καθώς και τα χαρακτηριστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Σημειώνεται ότι για κάποια από τα διαγράμματα δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή διαγραμμάτων.

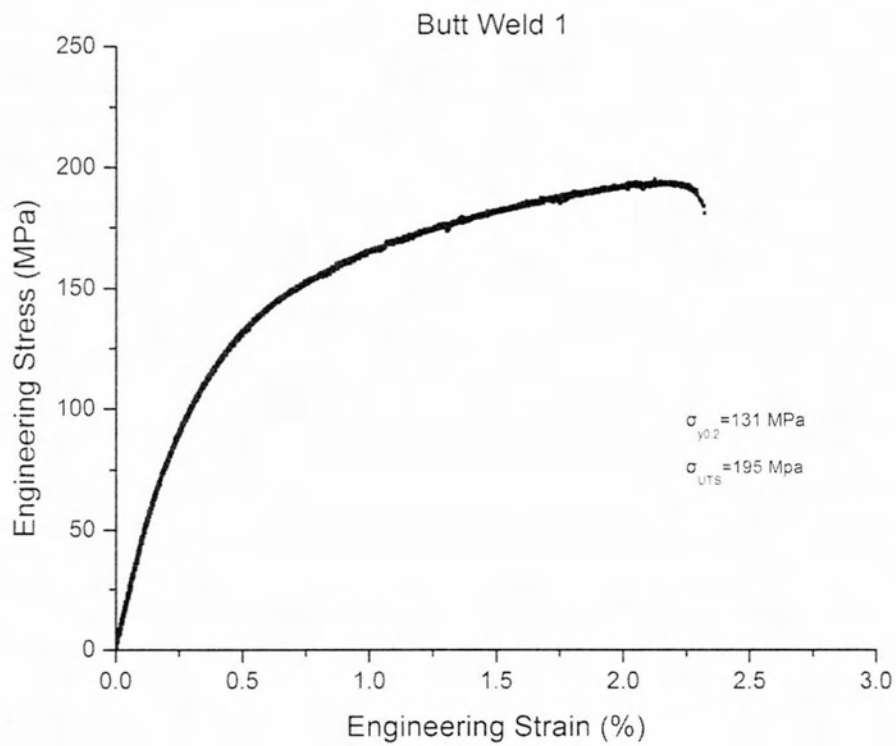
Butt Weld 1



Εικόνα 92: Δοκίμιο εφελκυσμού 1

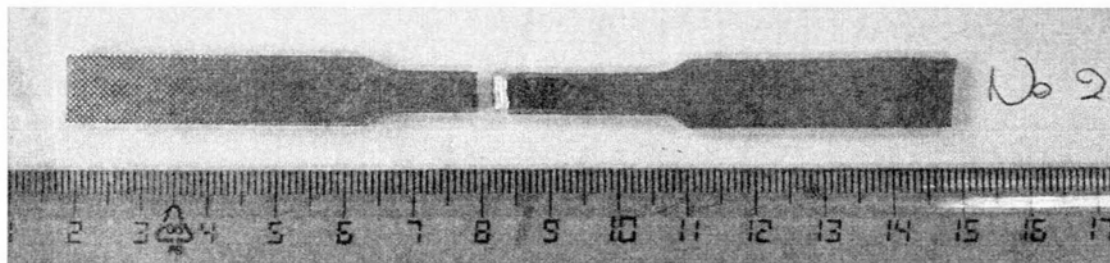


Εικόνα 93: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 1 (6.5x)

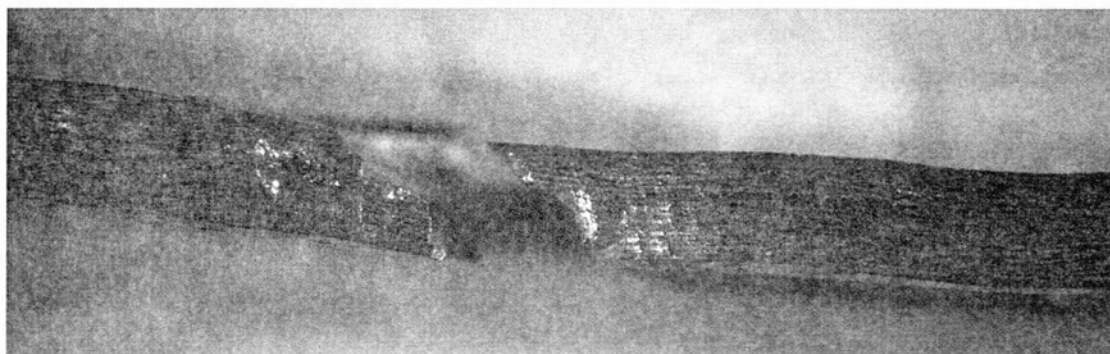


Εικόνα 94: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Συγκόλληση 1

Butt Weld 2

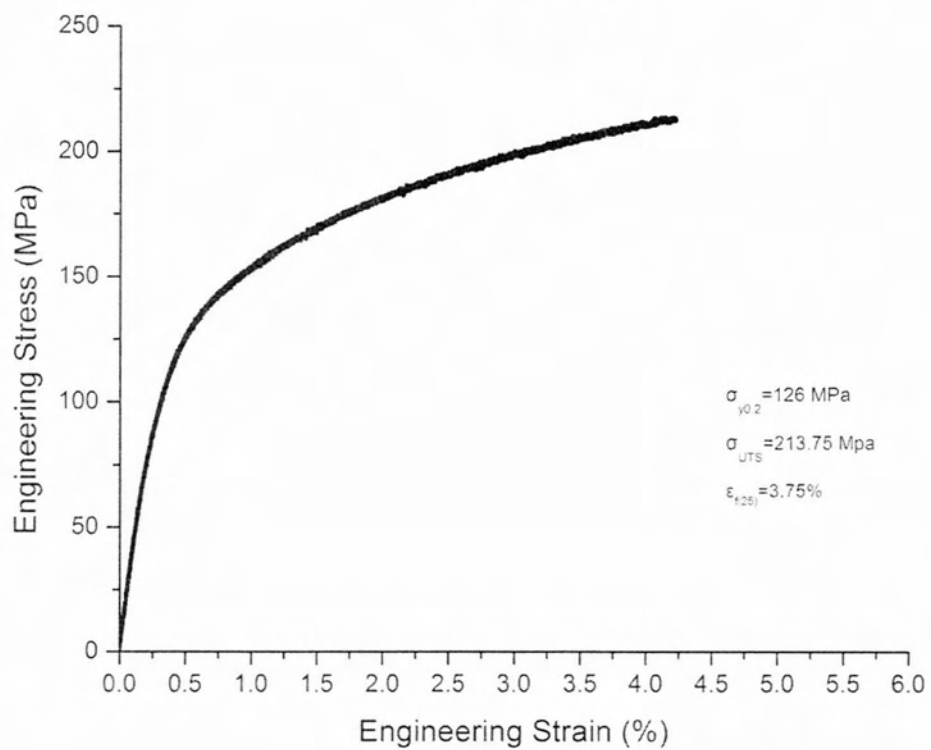


Εικόνα 95: Δοκίμιο εφελκυσμού 2



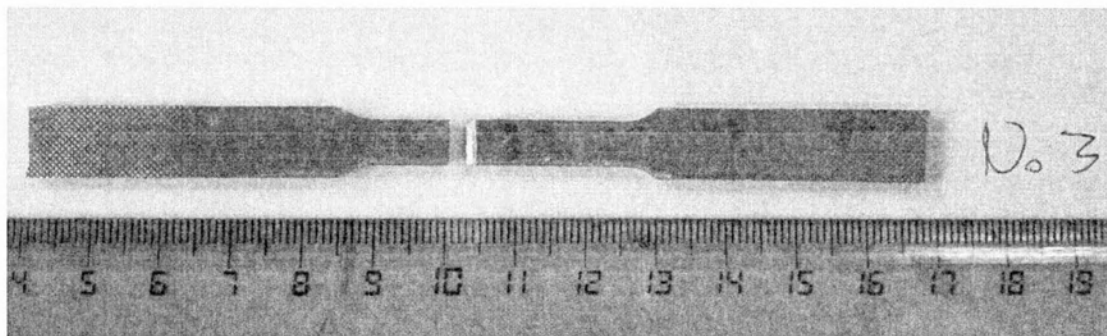
Εικόνα 96: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 2 (6.5x)

Butt Weld 2

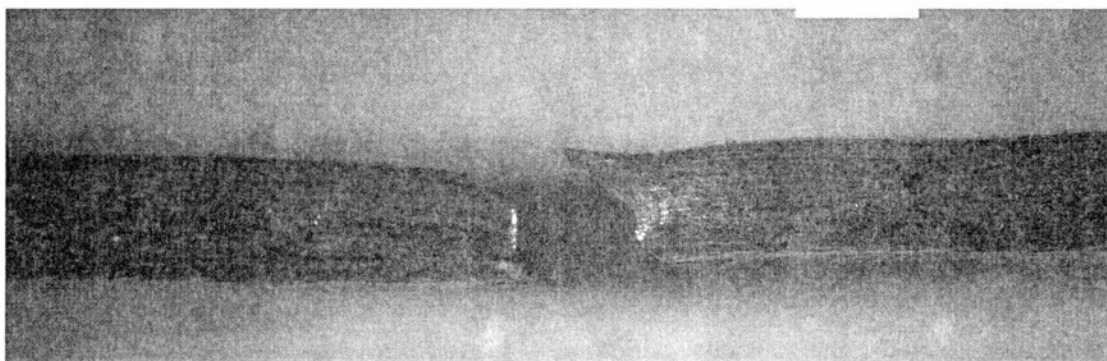


Εικόνα 97: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Συγκόλληση 2

Butt Weld 3



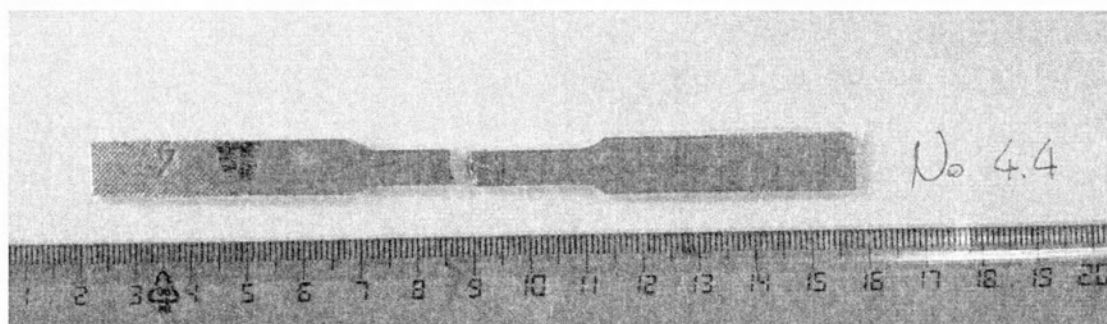
Εικόνα 98: Δοκίμιο εφελκυσμού 3



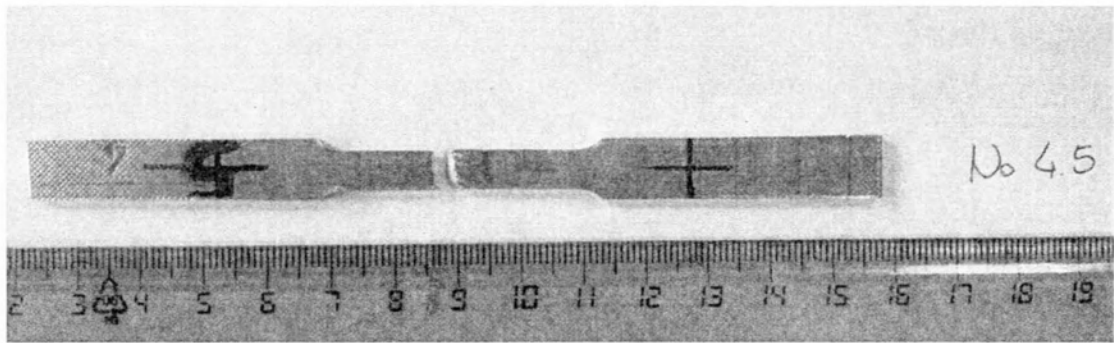
Εικόνα 99: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκίμιου 3 (6.5x)

Butt Weld 4

Δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια για τη συγκεκριμένη συγκόλληση. Η ονομασία αυτών φαίνεται στις παρακάτω μακροσκοπικές εικόνες.



Εικόνα 100: Δοκίμιο εφελκυσμού 4_4



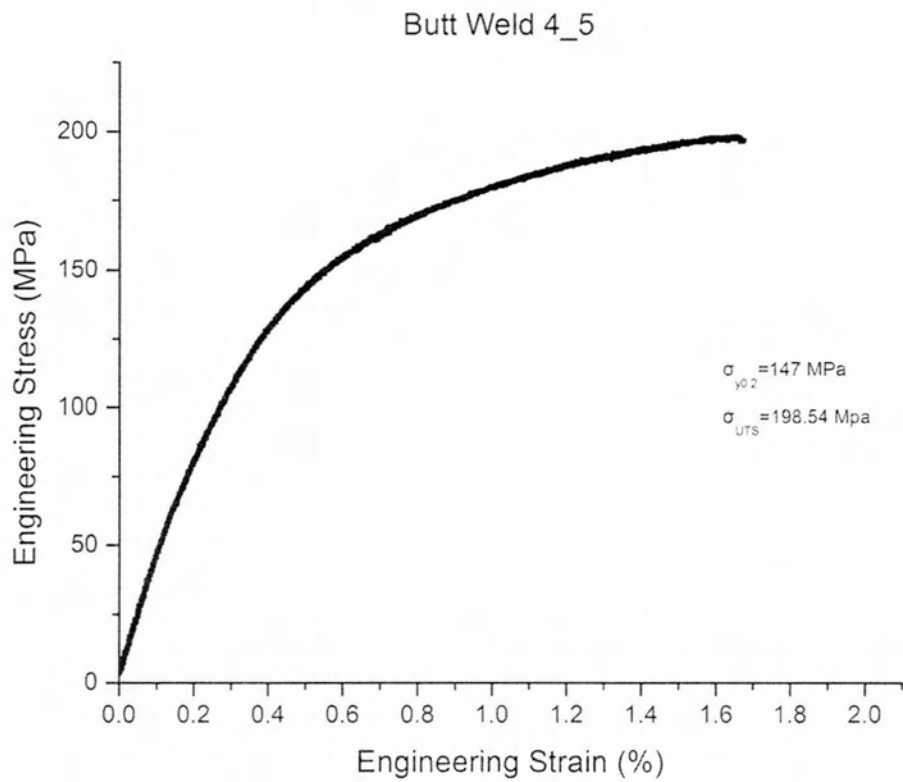
Εικόνα 101: Δοκίμο εφελκυσμού 4_5



Εικόνα 102: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 4_4 (6.5x)

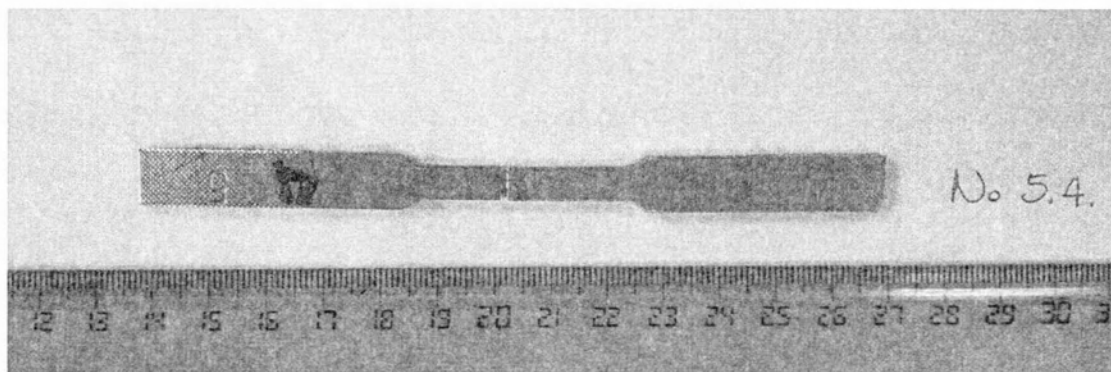


Εικόνα 103: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 4_5 (6.5x)

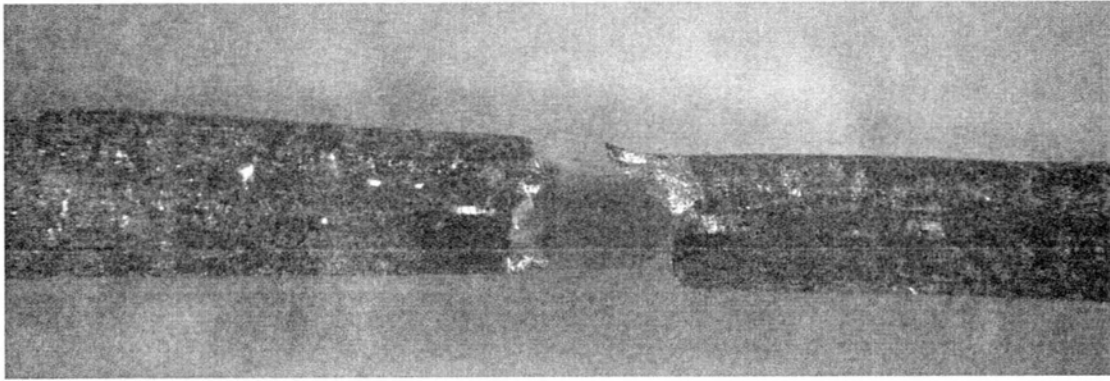


Εικόνα 104: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Συγκόλληση 4_5

Butt Weld 5

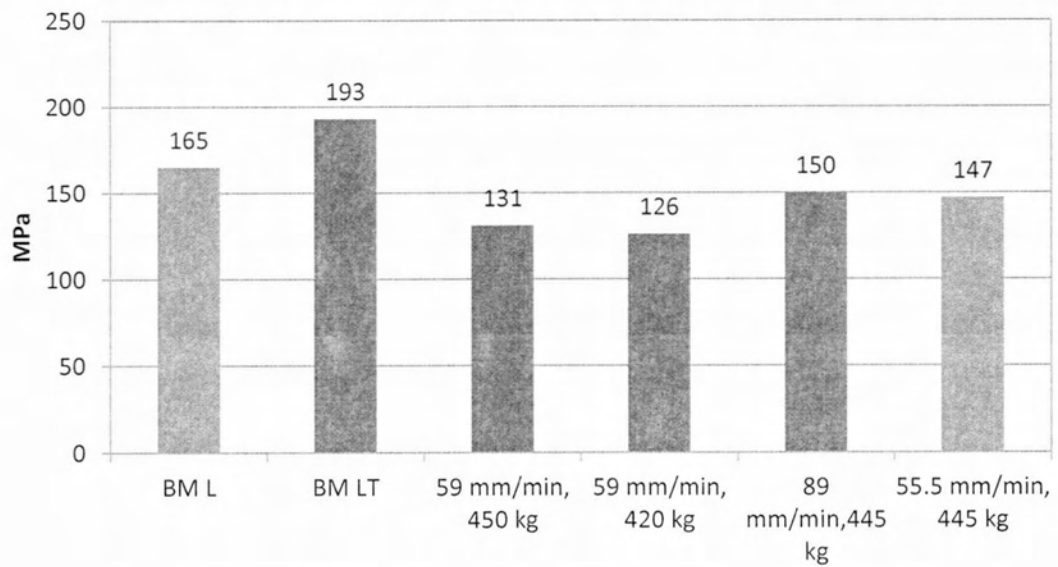


Εικόνα 105: Δοκίμιο εφελκυσμού 5_4



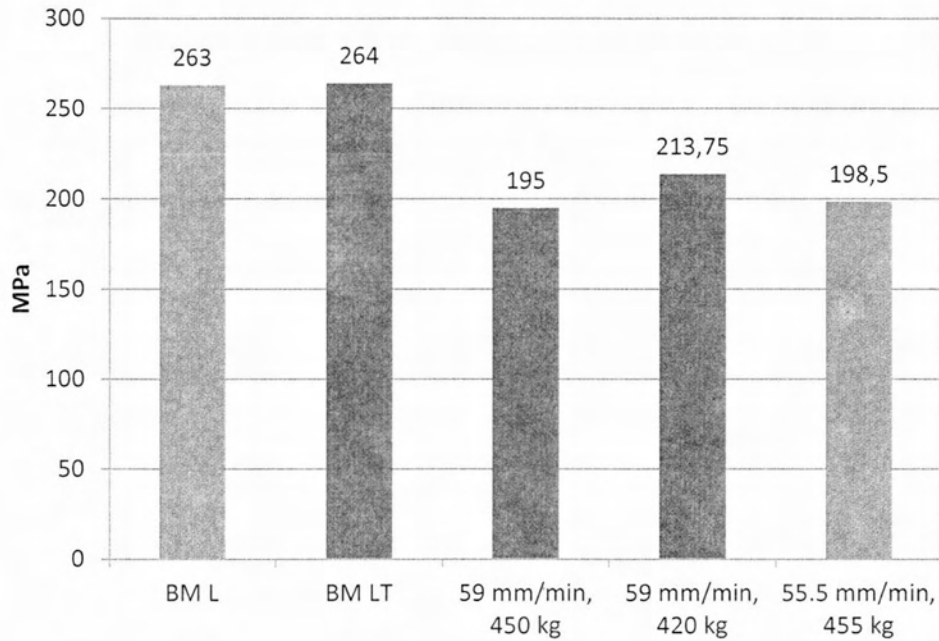
Εικόνα 106: Πλάγια όψη επιφάνειας θραύσης δοκιμίου 5_4 (6.5x)

Σύγκριση ορίου διαρροής συγκολλήσεων



Εικόνα 107: Σύγκριση ορίου διαρροής συγκολλήσεων με BM

Μέγιστη αντοχή συγκολλήσεων



Εικόνα 108: Σύγκριση μέγιστης αντοχής συγκολλήσεων με BM

Σημειώνεται ότι με μπλε χρώμα συγκρίνονται οι ιδιότητες της διεύθυνσης ελάσεως του κράματος AZ31. Η χρήση του δεύτερου χρώματος αφορά την εγκάρσια διεύθυνση αυτού.

4.4.Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παραπάνω παρητηρήθηκαν μικροσκοπικά έξι (6) μετωπικές συγκολλήσεις του κράματος AZ31. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Μελετώντας τη μικροδομή των συγκολλήσεων, φαίνεται ότι οι εφαρμοζόμενες συνθήκες οδήγησαν σε αποδεκτά αποτελέσματα, όσον αφορά τις τρεις πρώτες ραφές. Μάλιστα ο μη καταστρεπτικός έλεγχος της ραδιογραφίας επιβεβαίωσε ότι η 1^η ραφή δεν έχει εσωτερικά σφάλματα. Αντιθέτως για παρεμφερείς συνθήκες στις τρεις επόμενες ραφές, το αποτέλεσμα δεν ήταν το αναμενόμενο. Οι κάθετες φορτίσεις που ασκούσαν κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων δεν ήταν σταθερές, οπότε η στιγμιαία απόκλισή τους από τις επιθυμητές τιμές ίσως να οδήγησε στις παρατηρούμενες μικροδομές
- Διατηρώντας σταθερές την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (820-830 rpm) και το εύρος των κάθετων φορτίσεων (420-450 kg), φαίνεται ότι δεν μπορεί να υπάρξει ποιοτική ραφή για $V=102$ mm/min, όπως φάνηκε από την παρατήρηση της 6^{ης} συγκόλλησης.
- Μέσω των φωτογραφιών μικροδομής που παρατέθηκαν για λόγους σύγκρισης, προκύπτει ότι το μέγεθος των κόκκων ακολουθεί την εξής κατανομή: $NG < TMAZ < BM < HAZ$. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα δοκιμαστικά περάσματα.

- Παρατηρώντας τον Πίνακα 11, φαίνεται ότι μόνο η 4^η συγκόλληση παρουσίασε χαμηλό μέγεθος αποβλίττου (μ.ο. 2.01 mm), ενώ στις υπόλοιπες συγκολλήσεις το μέγεθος αυτού είναι μεγαλύτερο των 2.3 mm Μ.Ο.. Παρόλα αυτά, το γεγονός αυτό δεν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η 4^η συγκόλληση είναι ποιοτική καθώς εξετάζοντας τη μικροδομή της, προκύπτουν εσωτερικά σφάλματα τόσο στην περιοχή απαγωγής, όσο και σε αυτή της εναπόθεσης υλικού. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμαστικών περασμάτων.
- Σε όλα τα διαγράμματα των σκληρομετρήσεων, παρατηρήθηκε τουλάχιστον μία τιμή σκληρότητας, η οποία είναι ασυνήθιστα χαμηλή. Η χαμηλότερη αυτών μετρήθηκε στα 31.3 HV_{0.3} για την 3^η ραφή. Αυτό δε συνέβη και για την 4^η συγκόλληση που όμως διευκρινίστηκε βάσει μικροδομής ότι δεν είναι αποδεκτή. Εξηγήθηκε παραπάνω ότι δεν υπήρξε ραδιογραφικός έλεγχος για τις πέντε τελευταίες συγκολλήσεις και επομένως ενδέχεται να υπάρχουν σε αυτές εσωτερικά σφάλματα που να επηρεάζουν τις μετρήσεις
- Σε όλα τα δοκίμια εφελκυσμού, υπήρξε θραύση τους στην περιοχή απαγωγής υλικού. Εξετάζοντας μακροσκοπικά τις περιοχές θραύσης των δοκιμίων 1, 2, 3 και 4_5, προκύπτει ότι η θραύση τους επήλθε στην ζώνη ΤΜΑΖ. Όσον αφορά τα δοκίμια 4_4 και 5_4, φαίνεται ότι η θραύση των δοκιμίων ξεκινά στην περιοχή ανάδευσης της συγκόλλησης, πιθανώς λόγω εμφάνισης μικροσπών σε αυτήν. Η τελευταία διαπίστωση έρχεται σε συμφωνία και με τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων.
 Τα διαγράμματα εφελκυσμού που εμφανίζουν αποδεκτό προφίλ είναι τα 1, 2 και 4_4. Βάσει διαγραμμάτων, το δοκίμιο της 3^{ης} συγκόλλησης θραύεται μετά το όριο διαρροής του, κάτι που σημαίνει ότι η θραύση επήλθε λόγω μικροσπών χαμηλά στην περιοχή ανάδευσης. Εξετάζοντας το προφίλ μικροσκληρομετρήσεων, το μεταλλογραφικό έλεγχο, το διάγραμμα εφελκυσμού και την Εικ. 110, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αντιφατικά για τη συγκόλληση αυτή. Παρεμφερές είναι το συμπέρασμα για τις συγκολλήσεις 4 και 5 πραγματοποιώντας αντίστοιχη μελέτη.
 Από τις Εικ. 110 και 111, υψηλότερο όριο διαρροής εμφάνιζε η 3^η συγκόλληση, η οποία ήταν ίση με 77% του ΒΜ. Μέγιστη αντοχή παρουσιάζει η 2^η συγκόλληση, ίση με 80% του ΒΜ.
- Με βάσει τις βιβλιογραφικές αναφορές είναι δυνατόν να παραχθεί συγκόλληση FSW με τιμές ορίου διαρροής και ορίου θραύσης στο 90% των αντίστοιχων τιμών του βασικού μετάλλου. Οι πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν παρήγαγαν συγκολλήσεις με ελαφρώς χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές.

5. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα του Κεφ. 4, εξάγονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Το κράμα WE43-T5 δεν κατέστη δυνατό να συγκολληθεί στο εύρος των συνθηκών που εφαρμόστηκαν
- Για το κράμα μαγνησίου AZ31 επιτεύχθηκαν βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης. Καλύτερες μηχανικές ιδιότητες παρουσίασε η συγκόλληση με συνθήκες $R= 820-830$ rpm $V= 59$ mm/min και $F= 420$ kg με όριο διαρροής και αντοχή στη θραύση ίσα με 65 % και 81 % του βασικού μετάλλου, αντίστοιχα.
- Οι μετωπικές συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν για υψηλές τιμές του λόγου (R/V) ($9.27 < (R/V) < 13.98$). Για αυτό το εύρος τιμών παρατηρήθηκε ότι είναι αναπόφευκτη η απομάκρυνση υλικού υπό τη μορφή αποβλίττου (flash), μεγέθους > 2 mm
- Ως προς μικροδομή που προκύπτει, το μέγεθος των κόκκων ακολουθεί την εξής τάση: $NG < TMAZ < BM < HAZ$, η οποία βρίσκεται σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία
- Η θραύση των δοκιμών εφελκυσμού επήλθε στην περιοχή απαγωγής του υλικού (AS). Βάσει της μορφολογίας της επιφάνειας θραύσης, στα περισσότερα δοκίμια προκύπτει ότι η θραύση τους επήλθε στην περιοχή TMAZ. Το αποτέλεσμα αυτό είναι, επίσης, συμβατό με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Αρχικά, χρήσιμη θα ήταν η βελτίωση της στιβαρότητας της τράπεζας στερέωσης των ελασμάτων προς συγκόλληση. Έτσι, οι εφαρμοζόμενες κάθετες φορτίσεις θα είναι ακριβείς και δε θα παρουσιάζουν αστάθεια. Αυτό συνεπάγεται ασφαλέστερα αποτελέσματα ως προς τις συγκολλήσεις που προκύπτουν.
- Ως προς το κράμα μαγνησίου WE43, θα ήταν χρήσιμη έρευνα ως προς τη συγκόλληση των ελασμάτων του σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συνθήκη που είναι δυνατόν να επιτευχθεί με ταυτόχρονη θέρμανση της περιοχής (π.χ. με δέσμη laser). Το υλικό έτσι θα παρουσίαζε μεγαλύτερη διαλυτότητα στα κραματικά του στοιχεία και τα ιζήματα που παρεμποδίζουν την παραμόρφωσή του ίσως να ήταν λιγότερα και πιο χονδρόκοκκα. Έτσι η επιρροή τους στην ανάδευση του υλικού θα είναι ενδεχομένως μικρότερη.
- Όσον αφορά το κράμα μαγνησίου AZ31 θα μπορούσαν να δοκιμαστούν συγκολλήσεις μικρότερου λόγου (R/V), αρχικά για τα 820-830 rpm, ώστε να υπάρξει σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας με επόμενη και αργότερα σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής, όπως αυτές των 1000 rpm και 1200 rpm. Μάλιστα, ενδιαφέρουσες θα ήταν οι συγκρίσεις αποτελεσμάτων για συγκολλήσεις με προώσεις από χαμηλές τιμές, π.χ. 60 mm/min, έως προώσεις άνω των 200 mm/min. Όλα τα παραπάνω ώστε να συγκριθούν οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν.
- Επίσης, θα μπορούσαν να κατασκευαστούν εργαλεία με διαφορετικές διαμορφώσεις της ακίδας και του περιουχενίου ώστε να μελετηθεί η επιρροή τους στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων.
- Τέλος, χρήσιμη θα ήταν η ανάπτυξη έρευνας ως προς τις θερμοκρασίες που προκύπτουν στη ραφή συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας FSW. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να γίνει με κατάλληλη τοποθέτηση θερμοστοιχείων στο εργαλείο συγκόλλησης, καθώς και με υπολογισμούς του θερμοκρασιακού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία.

Βιβλιογραφία

- [1] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney ; Friction Stir Welding and Processing ; 2007
- [2] P. Motalleb, T. Saeid, A. Heidarzadeh, Kh. Darzi, M. Ashjari ; Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy ; Materials and design ; 2014 ; 221-226
- [3] YU Sirong, CHEN Xianjun, HUANG Zhiqiu, LIU Yaohui ; Microstructure and mechanical properties of friction stir welding of AZ31B magnesium alloy added with cerium ; JOURNAL OF RARE EARTHS ; April 2010 ; 28, No 2 , p.316
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding
- [5] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος; Συγκολλήσεις; ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ; 2010
- [6] G. N. Haidemenopoulos, H. Kamoutsi, A. Katsamas, M. Vlachogiannis, V. Bontozoglou, S. Samaras, Y. Haidemenopoulos; Aeronautical Applications of Wrought Magnesium ; 2009
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>
- [8] L. Commin; Joining magnesium alloys using friction stir welding and laser welding
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Elektron_\(alloy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Elektron_(alloy))
- [10] B. L. Mordike, T. Ebert; Magnesium Properties—applications— potential; Materilas Science and Engineering; 2001; A302, 37-45
- [11] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος ; Φυσική Μεταλλουργία ; ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ ; 2007
- [12] Bruce Gwynne, Paul Lyon; Magnesium Alloys in Aerospace Applications, Past Concerns, Current Solutions; Triennial International Aircraft Fire & Cabin Safety Research Conference; October; 2007
- [13] H. Zhang, S.B. Lin, L. Wu, J.C. Feng, Sh.L. Ma ; Defects formation procedure and mathematic model for defect free friction stir welding of magnesium alloy; Materials and Design; 2006; 27, 805-809
- [14] ZHANG Hua, Wu Huiqiang, Huang Jihua, WN Sanbao and WU Lin; Effect of welding speed on the material flow patterns in friction stir welding of AZ31 magnesium alloy ; RARE METALS ; April 2007; 26 No2,p. 158
- [15] G. Padmanaban, V. Balasubramanian; Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach ; Materials and design ; 2009 ; 30 , 2647-2656
- [16] L. Commin, M. Dumont, J.-E. Masse, L. Barrallier ; Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters; Acta Materialia; 2009 ; 57 , 326-334
- [17] Wang Xunhong, Wang Kuaishe ; Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy ; Materials Science and Engineering ; 2006 ; A 431 , 114-117
- [18] D. Miara, A. Pietras, K. Mroczka ; MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF FRICTION STIR BUTT-WELDED MAGNESIUM CASTING ALLOYS ; ARCHIVE OF METALLURGY AND MATERIALS ; 2011 ; Volume 56 ; Issue 3
- [19] Seung Hwan C. Park, Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa ; Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test ; Scripta Materialia; 2003; 49,161-16
- [20] Στέφανος Αθανασιάδης; ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΦΡΕΖΟΜΗΧΑΝΗΣ ΓΙΑ ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ FSW ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083-H32G

- [21] Kun Yu, Wenxian Li, Richu Wang, Bo Wang and Chao Li; Effect of T5 and T6 Tempers on a Hot-Rolled WE43 Magnesium Alloy; Materials Transactions ; 2008 ; Vol. 49,pp. 1018-1021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000124119