



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

«ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ ΣΕ ΜΟΝΑΔΑ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ FSW (ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ)
ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ 5083-H111»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΑΡΓΥΡΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Δ.Ι.Παντελής

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Προκειμένου για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, η οποία έλαβε χώρα αρχικά στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ANATEKO Α.Ε. στη Μεταμόρφωση και εν συνεχεία με το πέρας της κατασκευής της μηχανής στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου , απαιτήθηκε η συμβολή αρκετών ανθρώπων τους οποίους θα ήθελα με την ευκαιρία να ευχαριστήσω.

Καταρχάς θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Δημήτρη Παντελή ο οποίος είχε τη γενική εποπτεία της εργασίας και παρείχε όλες τις απαραίτητες τεχνικές γνώσεις επί του αντικειμένου. Πρέπει επίσης να ευχαριστήσω το προσωπικό του μηχανουργείου της εταιρείας ANATEKO το οποίο συνέβαλε ενεργά στη μετατροπή της εργαλειομηχανής σε μηχανή συγκόλλησης FSW σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ακολουθώντας πιστά τις οδηγίες μας αλλά και προτείνοντας εναλλακτικές λύσεις όπου χρειαζόταν ,όπως επίσης και τον πατέρα μου και Διευθύνοντα Σύμβουλο της εταιρείας για την χορηγία και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Σταύρο Χιονόπουλο , Διδάκτορα και τον κύριο Νίκο Δανιόλο ,Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών χάρη στους οποίους υπήρχε απρόσκοπτη πρόσβαση σε όλο το απαιτούμενο ακαδημαϊκό υλικό αλλά και στον εργαστηριακό εξοπλισμό για την εκπόνηση της παρούσας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding) αποτελεί ίσως την πιο σημαντική τεχνολογική εξέλιξη στην μηχανική των συγκολλήσεων των μετάλλων τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των συγκολλήσεων δια τριβής, όπου η τριβή αποτελεί το θερμομηχανικό μέσο πρόσδοσης θερμότητας στη συμβολή συγκόλλησης. Αποτελεί δε εξέλιξη των συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης δια τριβής καθώς εισάγει τη λειτουργία της ανάδευσης του πλαστικοποιημένου υλικού με κατάλληλο περιστρεφόμενο και μη καταναλισκόμενο εργαλείο συγκόλλησης, γεγονός το οποίο διευρύνει τις δυνατότητες στη συγκόλληση.

Στα πλαίσια της παρούσας πραγματοποιήθηκε η κατασκευή μίας τέτοιας μηχανής συγκόλλησης FSW με τη λογική της μετατροπής μίας υφιστάμενης μεταχειρισμένης συμβατικής εργαλειομηχανής σε μονάδα γραμμικής συγκόλλησης. Μετά από θεωρητική προσέγγιση και βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιευμένων εργαστηριακών δοκιμών με σκοπό τον καθορισμό των απαιτούμενων τεχνικών προδιαγραφών της εργαλειομηχανής, ακολούθησε έρευνα αγοράς και εν συνεχεία, μετά την προμήθεια, εκπόνηση κατασκευαστικών σχεδίων και μετατροπή της μηχανής σε μηχανουργείο. Κατασκευάστηκαν κεφαλές συγκόλλησης, ιδιοσυσκευές συναρμολόγησης της κεφαλής στην άτρακτο και ιδιοσυσκευές σύσφιξης των δοκιμίων επί της μηχανής.

Με την ολοκλήρωση της μονάδας, την πραγματοποίηση γενικών δοκιμών και τη μεταφορά της στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής, ακολούθησαν εργαστηριακές δοκιμές σε ελάσματα αλουμινίου ποιότητας 5083-H111 πάχους 6 χλστ με εναλλαγές στις παραμέτρους συγκόλλησης με σκοπό τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων. Τέλος, με χρήση μικροσκοπίου και στερεοσκοπίου, έγινε μεταλλογραφική παρατήρηση των συγκολλημένων δοκιμίων και στη συνέχεια μέτρηση μικροσκληρότητας σε ορισμένα από αυτά.

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is probably the most significant evolutionary method in the field of welding engineering from the early 90's to date. As a solid state joining technique, it belongs in the general category of friction welding methods. FSW stands out in comparison with the other known conventional methods due to the pioneering stirring function that is introduced and which plays the key role in the deformation and flow pattern of the base metal. A nonconsumable rotating tool that is specially designed for the application is inserted into the abutting edges of plates to be joined and subsequently traversed along the joint line, producing quality welds of high mechanical properties in a wide range of applications.

Scope of the present work was the retrofitting of a conventional second hand milling machine into a linear friction welding unit. After tracing and defining the required general technical characteristics of the milling machine, by means of literature review of published laboratory work of our interest, we went through a market research. After the procurement of the unit and the preparation of the technical drawings, the milling machine was then delivered to the machine shop in order to be setup. A series of welding tools as well as mounting jigs were manufactured and after a general functional checkup the machine was delivered to the Shipbuilding Technology Laboratory of the University.

Finally, a series of combinations of FSW welding parameters were applied in order to create linear friction butt welds of 6 mm thick 5083-H111 aluminum plates and to determine the optimal processing parameters through metallographic observation by means of microscopes and stereoscopes and also micro-hardness testing.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ	7
1.1 Συγκολλήσεις Στερεάς Φάσης	7
1.2 Εισαγωγή – Ιστορικό	8
1.3 Κατηγορίες Συγκολλήσεων Δια Τριβής	9
1.3.1 Περιστροφική Συγκόλληση Δια Τριβής	10
1.3.2 Περιστροφική Συγκόλληση Αδράνειας	12
1.3.3 Ακτινική Συγκόλληση Δια Τριβής	14
1.3.4 Μη Περιστροφική Συγκόλληση Δια Τριβής	16
1.3.4.1 Γραμμική Συγκόλληση Δια Τριβής	17
1.3.4.2 Τροχιακή Συγκόλληση Δια Τριβής	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	21
2.1 Συγκολλήσεις Στερεάς Φάσης	21
2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας	22
2.3 Παράμετροι Συγκόλλησης FSW	24
2.4 Μικροδομή της Ζώνης Συγκόλλησης στην FSW	25
2.5 Παραλλαγές της Μεθόδου FSW	27
2.5.1 Μέθοδος Twin Stir.....	27
2.5.2 Μέθοδος Re-Stir	29
2.5.3 Μέθοδος Com-Stir	30
2.5.4 Μέθοδος Dual Rotation	32
2.6 Πλεονεκτήματα της Συγκόλλησης Δια Τριβής με Ανάδευση	33
2.7 Εφαρμογή στη Βιομηχανία	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Υλικό Κατασκευής Εργαλείου Συγκόλλησης	37
3.2.1 Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υλικού.....	37
3.2.2 Ποιότητες Υλικών Κατασκευής	39
3.3 Σχεδιασμός Ώμου Εργαλείου Συγκόλλησης	41
3.3.1 Εισαγωγή.....	41
3.3.2 Ώμοι Κοίλου Προφίλ	41
3.3.3 Ώμοι Κυρτού Προφίλ.....	43
3.3.4 Άλλες Διαμορφώσεις Επιφάνειας Ώμων	45
3.3.5 Bobbin Stir Welding	46
3.4 Σχεδιασμός Πείρου Εργαλείου Συγκόλλησης	47

3.4.1 Εισαγωγή.....	47
3.4.2 Κυλινδρικοί Πείροι με Σπείρωμα και Σφαιρική Απόληξη.....	48
3.4.3 Κυλινδρικοί Πείροι με Σπείρωμα και Επίπεδη Απόληξη	49
3.4.4 Πείροι με Γεωμετρία Κόλουρου Κώνου και Σπείρωμα.....	50
3.4.5 Κεφαλές τύπου Whorl	51
3.4.6 Κεφαλές τύπου MX-Triflute	52
3.4.7 Κεφαλές τύπου Trivex και MX-Trivex.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΗΣ , ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ	54
4.1 Εισαγωγή	54
4.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Επιλογή Εργαλειομηχανής.....	55
4.3 Σχεδιασμός και Κατασκευή Κεφαλής Συγκόλλησης	58
4.4 Σχεδιασμός και Κατασκευή Ιδιοσυσκευής Συγκράτησης Δοκιμίων	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	65
5.1 Ποιότητες Υλικών Δοκιμίων και Μηχανικές Ιδιότητες.....	65
5.2 Προετοιμασία Δοκιμίων για Μεταλλογραφική Μελέτη.....	66
5.2.1 Κοπή Δοκιμίων.....	66
5.2.2 Λείανση και Στίλβωση	67
5.2.3 Χημική Προσβολή	67
5.3 Οπτική Στερεοσκοπία	68
5.4 Οπτική Μικροσκοπία	68
5.5 Σκληρομέτρηση	69
5.5.1 Μικροσκληρομετρήσεις	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	70
6.1 Δοκιμές για Βελτιστοποίηση Παραμέτρων	70
6.2 Μεταλλογραφική Παρατήρηση των Βέλτιστα Συγκολλημένων Δοκιμίων.....	84
6.3 Κατανομή Μικροσκληρότητας	87
6.4 Επίδραση των Παραμέτρων στις Συγκολλήσεις.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ

1.1 Συγκολλήσεις Στερεάς Φάσης

Η κατηγορία των συγκολλήσεων δια τριβής ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των συγκολλήσεων στερεάς φάσης (solid phase/state welding). Στην ως άνω κατηγορία ανήκουν επίσης η συγκόλληση με διάχυση (diffusion welding), η συγκόλληση με εκρηκτικά (explosive welding), η συγκόλληση με υπερήχους (ultra sonic welding), όπως επίσης και κάποιοι τύποι συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση (electric resistance welding). Επιγραμματικά αναφέρονται και οι υπόλοιπες βασικές κατηγορίες μεθόδων συγκόλλησης [2] :

- Συγκόλληση με τήξη (fusion welding)
- Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electrical resistance welding)
- Ετερογενής συγκόλληση (liquid-solid phase joining)
- Ένωση με κόλλα (adhesive bonding)

Η συγκόλληση στερεάς φάσης ορίζεται ως η ομάδα μεθόδων συγκόλλησης των οποίων κοινό βασικό γνώρισμα είναι το γεγονός ότι ο δεσμός μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν το σημείο τήξης, δεν περνάνε ποτέ δηλαδή σε υγρή φάση, παρά μένουν σε στερεά φάση, σε αντίθεση για παράδειγμα με την ευρέως διαδεδομένη συγκόλληση με τήξη όπου έχουμε το γνωστό σε όλους λουτρό τήξης. Εξαίρεση αποτελεί κατά περίπτωση ένα πολύ λεπτό στρώμα στα σύνορα των ακμών συγκόλλησης. Κάποιες κατηγορίες συγκολλήσεων στερεάς φάσης πραγματοποιούνται με θερμοκρασία, κάποιες με εφαρμογή πίεσης και κάποιες και με τα δύο.

Η συγκόλληση στερεάς φάσης είναι πιθανώς η αρχαιότερη μέθοδος συγκόλλησης που γνώρισε ο άνθρωπος. Αρχαιολογικά ευρήματα στην Ιρλανδία που χρονολογούνται στην εποχή του Χαλκού αποκαλύπτουν χρήση της μεθόδου για συγκόλληση χρυσού με σφυρηλάτηση [1]. Οι συγκολλήσεις στερεάς φάσης μπορούν να επιτευχθούν σε μεγάλα εύρη θερμοκρασιών, πιέσεων και μηχανικών παραμορφώσεων και αυτά ποικίλουν ακόμα περισσότερο ανάλογα με το υλικό/υλικά προς συγκόλληση αλλά και τη μέθοδο που ακολουθείται κάθε φορά, οπότε δεν είναι δυνατός ένας μονοσήμαντος ορισμός. Είναι δυνατή ωστόσο η αναφορά στους βασικούς παράγοντες και στην επίδρασή τους στη δημιουργία της ζώνης συγκόλλησης.

Ελκτικές Δυνάμεις: Οι δύο επιφάνειες προς συγκόλληση θα πρέπει να έρθουν σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους, ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη ενδοατομικών ελκτικών δυνάμεων. Στα μέταλλα για παράδειγμα πρέπει να επιτευχθεί ο λεγόμενος μεταλλικός δεσμός, που μπορεί να περιγραφεί απλοϊκά ως ένα νέφος αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων που περιβάλλουν ιονισμένα θετικά άτομα και έτσι δημιουργείται ένα σύνολο λόγω των μεταξύ τους ελκτικών δυνάμεων. Επίσης μικρή συνεισφορά έχουν και οι δυνάμεις van der Waals όπως και οι ηλεκτροστατικές

δυνάμεις μεταξύ δίπολων. Ως γενικό συμπέρασμα εξάγεται το γεγονός ότι οι συγκολλήσεις στερεάς φάσης οφείλονται σε ενδοατομικές ελκτικές δυνάμεις για αυτό το λόγο οι επιφάνειες προς συγκόλληση πρέπει να πλησιάσουν μεταξύ τους σε επίπεδο ατομικών αποστάσεων.

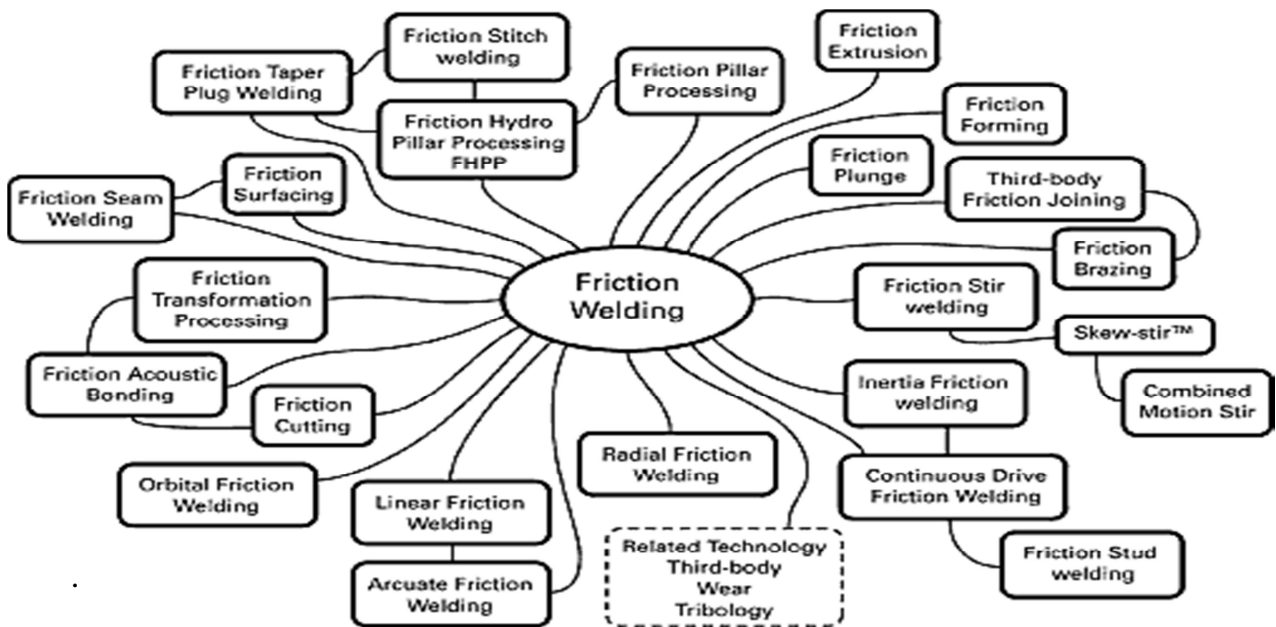
Μηχανική Παραμόρφωση: Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω , για την ανάπτυξη των ως άνω δεσμών, πρέπει να επιτευχθεί άμεση επαφή των δύο επιφανειών. Εξάλλου για να υπάρξει άμεση επαφή πρέπει σχεδόν να εκμηδενιστούν οι επιφανειακές τραχύτητες . Η απαιτούμενη λοιπόν μηχανική παραμόρφωση πρέπει προφανώς να υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού. Σε μέταλλα όπως το αλουμίνιο το οποίο δημιουργεί στην επιφάνειά του ψαθυρά οξειδία του αλουμινίου , η απαιτούμενη παραμόρφωση για να σπάσει το στρώμα οξειδίων και να εμφανιστεί καθαρό μαλακό αλουμίνιο προς συγκόλληση είναι σαν ποσοστό επί του ορίου διαρροής αρκετά μεγαλύτερη από άλλα μέταλλα. Όταν όμως τα προς συγκόλληση τεμάχια έχουν μια σχετική επαπτομενική κίνηση μεταξύ τους , τότε τα σχηματιζόμενα επιφανειακά στρώματα οξειδίων διαλύονται ευκολότερα , με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία ιδιαίτερα μεγάλη μηχανική παραμόρφωση.

Πίεση και διάχυση: Η διάχυση συνδέεται με τις κατά τόπους κινήσεις των ατόμων εντός του πυρήνα. Κάθε άτομο ταλαντώνεται διαρκώς εντός κάποιων ορίων , και όταν η ταλάντωση αυτή (oscillation) γίνεται αρκετά βίαια , τότε το αναγκάζει να μεταφερθεί σε γειτονικά όρια. Έτσι το φαινόμενο της διάχυσης στις επιφάνειες προς συγκόλληση παίζει ένα σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της συγκόλλησης στερεάς φάσης. Σε ανεβασμένες θερμοκρασίες που προκαλούνται από μηχανική πίεση στη διεπαφή , το φαινόμενο της διάχυσης παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις καθώς τα άτομα μεταναστεύουν με μεγαλύτερη ευκολία.

1.2 Εισαγωγή –Ιστορικό

Οι συγκολλήσεις δια τριβής αντιπροσωπεύουν την κατηγορία συγκολλήσεων όπου η τριβή αποτελεί το θερμομηχανικό μέσο πρόσδοσης θερμότητας στη συμβολή συγκόλλησης. Μέχρι και σήμερα έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από διαφορετικές μεθόδους συγκόλλησης δια τριβής , των οποίων εκτενέστερη αναφορά γίνεται στις επόμενες παραγράφους.

Η ιδέα να ενωθούν δύο υλικά χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια όταν αυτά τρίβονται μεταξύ τους πάει πίσω στον 19^ο αιώνα [3]. Σύμφωνα με τον AWS (American Welding Society) η επινόηση της συγκόλλησης με τριβή έλαβε χώρα στις Η.Π.Α. το 1891 οπότε εκδόθηκε και το πρώτο σχετικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Στα επόμενα χρόνια ωστόσο η δραστηριότητα μεταφέρθηκε στην Ευρώπη όπου κατοχυρώθηκαν αντίστοιχα διπλώματα από το 1920 ως και το 1944, όπως επίσης και στην πρώην Σοβιετική Ένωση (1956) όπου ο Α.Ι. Chudikov χρησιμοποιώντας έναν τροποποιημένο τórνο κατάφερε να επιτύχει μετωπική συγκόλληση μεταλλικών μπαρών με αξιόλογες μηχανικές ιδιότητες. Αυτή ήταν ουσιαστικά και η πρώτη επιστημονικά τεκμηριωμένη εργασία στη συγκόλληση δια τριβής [4]. Τη δεκαετία 1960-1970 η μέθοδος αναπτύχθηκε περισσότερο στις Η.Π.Α από τις εταιρείες AMF, Caterpillar και Rockwell International ,κάθε μία από τις οποίες κατασκεύασε μηχανήματα για την προσαρμοσμένη χρήση στη βιομηχανική της παραγωγή. Με την πάροδο των χρόνων η συγκόλληση δια τριβής υιοθετήθηκε σε αρκετές βιομηχανίες ανά τον κόσμο όπως για παράδειγμα στην Toyota Industries Corp. Όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία , στην αεροναυπηγική βιομηχανία και άλλους τομείς υψηλής τεχνολογίας. Με βάση τις ανάγκες της κάθε παραγωγικής διαδικασίας αναπτύχθηκαν διάφορες κατηγορίες συγκόλλησης δια τριβής, οι περισσότερες από τις οποίες φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 1.



Σχήμα 1

1.3 Κατηγορίες Συγκολλήσεων Δια Τριβής

Στην παρούσα εργασία, εκτός από τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (friction stir welding) που αποτελεί και το βασικό αντικείμενο, γίνεται επίσης αναφορά στην περιστροφική συγκόλληση δια τριβής (rotary friction welding), στην ακτινική συγκόλληση δια τριβής (radial friction welding), και στην κατηγορία μη περιστροφικών συγκολλήσεων δια τριβής (non rotary friction welding).

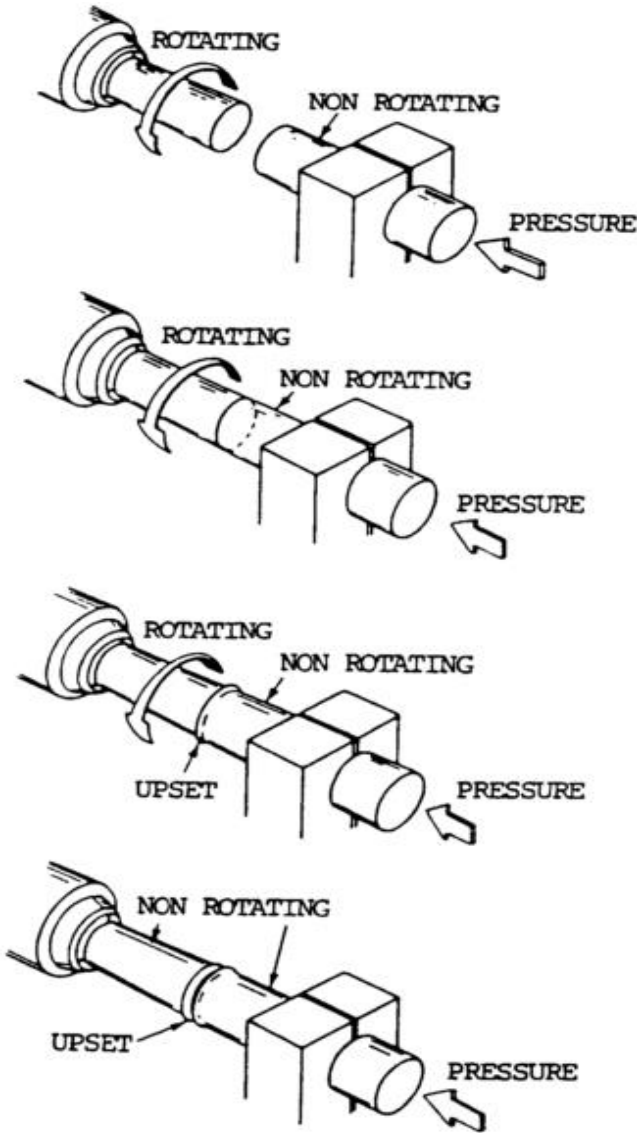
1.3.1 Περιστροφική Συγκόλληση Δια Τριβής

Η περιστροφική συγκόλληση δια τριβής (Rotary Friction Welding, RFW) είναι μία από τις πρώτες μεθόδους συγκόλλησης τριβής που αναπτύχθηκαν και είχαν εμπορική εφαρμογή.

Η βασική της αρχή είναι η περιστροφή του ενός εκ των δύο τεμαχίων σε επαφή με το δεύτερο το οποίο δεν περιστρέφεται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Εφαρμόζοντας αξονική δύναμη κατά τη διάρκεια της περιστροφής στο μη περιστρεφόμενο τεμάχιο, αναπτύσσεται θερμότητα εκ τριβής. Αυτός ο συνδυασμός πίεσης και θερμότητας δημιουργεί το δεσμό στη διεπιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η γεωμετρία ενός τουλάχιστον από τα δύο προς συγκόλληση τεμάχια πρέπει να είναι κυλινδρική.

Στην πράξη, το περιστρεφόμενο τεμάχιο συσφίγγεται σε μία ιδιοσυσκευή όπως το τσοκ του τόννου και περιστρέφεται με έναν κινητήρα υδραυλικό ή ηλεκτρικό. Η αξονική δύναμη που συνεισφέρει στη συγκόλληση παρέχεται συνήθως από υδραυλικό έμβολο μεγάλης διατομής και μικρής διαδρομής. Η γραμμική κίνηση που κάνει το μη περιστρεφόμενο τεμάχιο για να πλησιάσει στο τσοκ πρέπει να είναι ακριβείας, γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται μηχανοποιημένες γλύστρες (ράγες), όπως ακριβώς σε έναν τόννο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος συγκόλλησης σε διάμετρο κυλινδρικών τεμαχίων αυτών των μηχανών κυμαίνεται από διαμέτρους $\Phi 1$ - $\Phi 200$ [mm] για μασίφ διατομές, ενώ για δακτυλιοειδείς διατομές (σωλήνες) το εύρος κυμαίνεται από $\Phi 10$ ως $\Phi 450$ [mm]. Η μεγαλύτερη ως τώρα μηχανή έχει δυνατότητα εφαρμογής αξονικής δύναμης 2.000 kN [5].

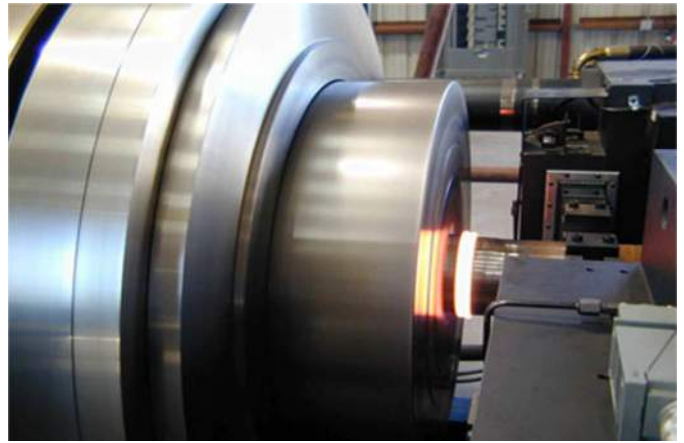


Σχήμα 2

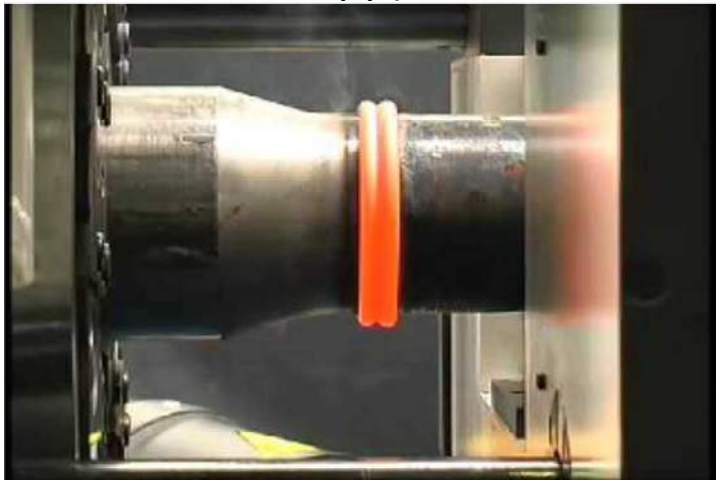
Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες της μεθόδου αλλά και μηχανών περιστροφικής συγκόλλησης. Όπως φαίνεται στις εικόνες 2,3&4 κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης παρατηρείται και η δημιουργία της χαρακτηριστικής εξογκωμένης ράχης της σύνδεσης, το λεγόμενο κολάρο εκροής του μετάλλου (flash collar) που είναι το συμπιεσμένο υλικό εκτός του επιπέδου σύνδεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια μήκους των παραγόμενων τεμαχίων η οποία εξάλλου προβλέπεται εκ των προτέρων ούτως ώστε το τελικό συνολικό μήκος να είναι το επιθυμητό.



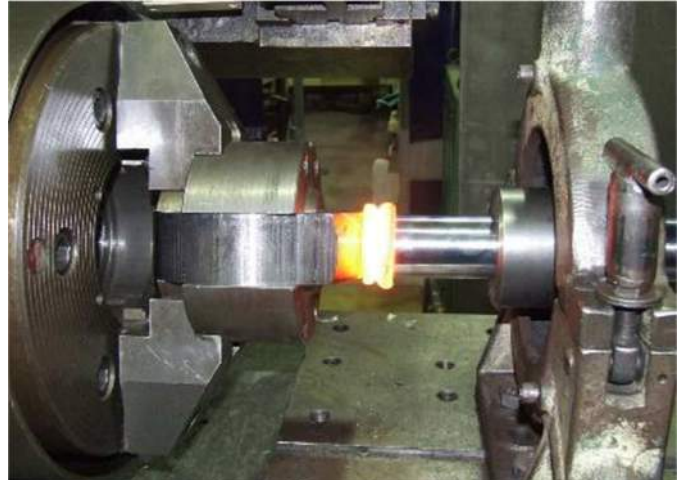
Εικόνα 1 :Μηχανή Περιστροφικής Συγκόλλησης με Τριβή



Εικόνες 2,3 &4: Κολλάρο Εκροής (Flash)



Εικόνα 3



Εικόνα 4

Σε μελέτες σχετικές με την περιστροφική συγκόλληση δια τριβής κραματωμένων χαλύβων που διεξήχθησαν από τους P.L. Threadgill και P.D. Sketchley [6],[7], αναφέρεται ότι η αντοχή των δοκιμίων στη ζώνη συγκόλλησης έφτασε σε ποσοστό 87-92% της αντοχής του μετάλλου βάσης, ενώ η θραύση στα πειράματα εφελκυσμού έγινε στη θέση συγκόλλησης ή κοντά σε αυτή. Επίσης προέκυψε ότι δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι η μέθοδος προκαλεί αλλαγές στη σκληρότητα του μετάλλου στην περιοχή της συγκόλλησης. Από την εξέταση των συγκολλήσεων φάνηκε και η καλή τους ποιότητα καθώς δεν παρουσίασαν καμία ρωγμή ή άλλη ατέλεια.



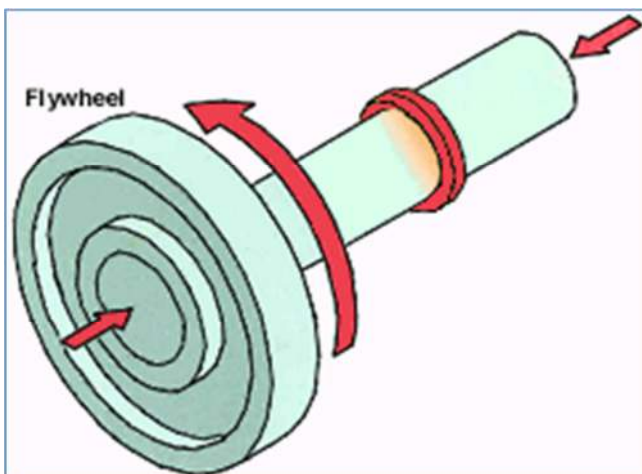
Εικόνες 5&6 - Προϊόντα περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής

Η κατηγορία περιστροφικών συγκολλήσεων δια τριβής που περιγράφηκε παραπάνω ονομάζεται *συνεχούς οδήγησης (direct drive friction method)*, βασικό χαρακτηριστικό της οποίας είναι το ότι η περιστροφική κίνηση του εξαρτήματος είναι συνεχής, δηλαδή δεν διακόπτεται μέχρι το πέρας της συγκόλλησης η ισχύς του κινητήρα. Εκτός από τη συνεχούς οδήγησης περιστροφική συγκόλληση, υπάρχει και η *περιστροφική συγκόλληση αδρανείας (Inertia or stored energy friction method)*, ή αλλιώς με χρήση σφονδύλου.

1.3.2 Περιστροφική Συγκόλληση Αδρανείας

Η *συγκόλληση τριβής αδρανείας (inertia or flywheel rotary friction welding)* είναι μια παραλλαγή της περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής και αναπτύχθηκε το 1962 από το τμήμα έρευνας και τεχνολογίας της εταιρείας Caterpillar Tractor Company στις Η.Π.Α. Στη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται ένας σφόνδυλος (flywheel) στον οποίο αποθηκεύεται η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία της συγκόλλησης.

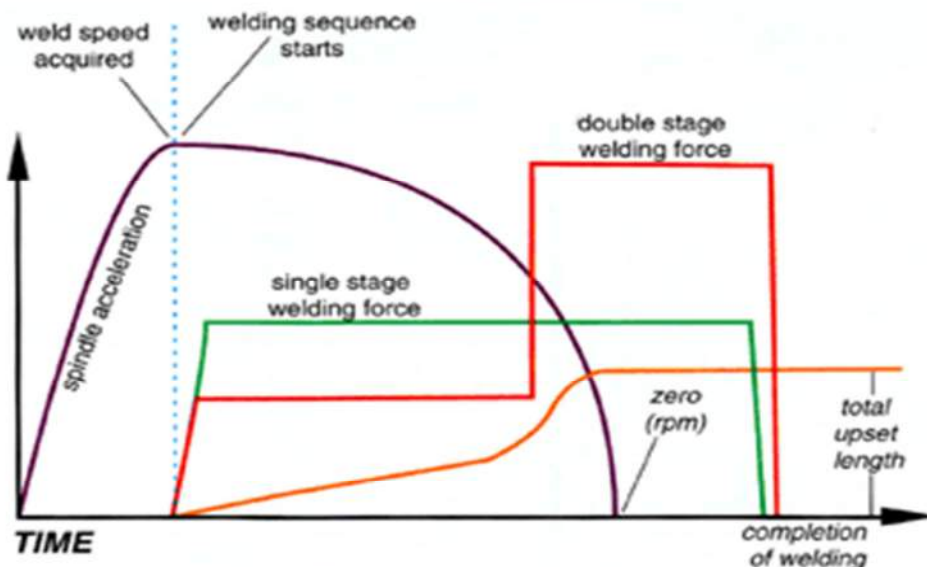
Στη μέθοδο αδρανείας το ένα από τα δύο προς συγκόλληση τεμάχια συνδέεται με ένα σφόνδυλο (βολάν) ενώ το άλλο είναι σταθερά συνδεδεμένο χωρίς δυνατότητα περιστροφής.



Σχήμα 3

Ο σφόνδυλος (Σχήμα 3) στον οποίο είναι προσδεδεμένο το τεμάχιο που περιστρέφεται, επιταχύνεται από την ηρεμία μέχρι μια προκαθορισμένη περιστροφική ταχύτητα N [RPM]. Για να ξεκινήσει η διαδικασία της συγκόλλησης το μη περιστρεφόμενο τεμάχιο σπρώχνεται με συγκεκριμένη και σταθερή πίεση προς το άλλο τεμάχιο. Στο εντωμεταξύ διάστημα το περιστρεφόμενο τεμάχιο απεμπλέκεται από την ισχύ του κινητήρα και φτάνει γρήγορα στην ηρεμία μέσω της τριβής στη διεπιφάνεια η οποία

δημιουργεί θερμότητα και πλαστική ροή στη συμβολή με αποτέλεσμα τη συγκόλληση των τεμαχίων.



Διάγραμμα 1

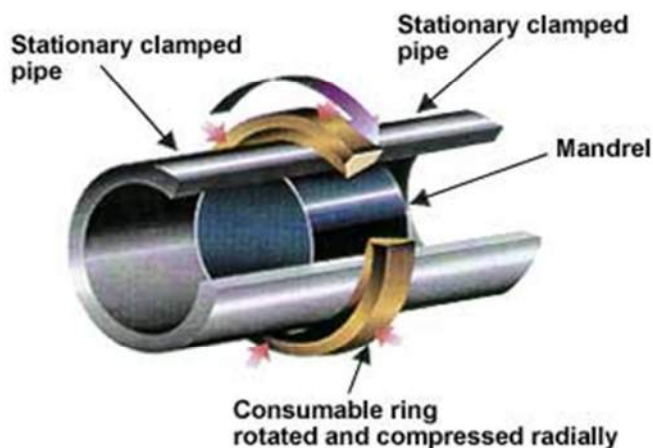
Η σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών παραμέτρων συγκόλλησης της μεθόδου εμφανίζεται στο *Διάγραμμα 1*. Στο διάγραμμα εκτός από τις πραγματικές στροφές [N] του περιστρεφόμενου τεμαχίου φαίνεται και το αξονικό φορτίο που ασκείται, το οποίο μπορεί να παραμένει σταθερό καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας (single stage welding force), ή να αυξάνεται πριν την αποπεράτωσή της (double stage welding force).

Η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων περιστροφικής συγκόλλησης που παρουσιάστηκαν σχετίζονται κυρίως με τον ρυθμό πρόσδοσης του ποσού της ενέργειας που αποδίδεται στη διεπιφάνεια. Η μέθοδος αδρανείας μπορεί να προσφέρει αρκετά υψηλά ποσά ενέργειας ενώ αυτή της συνεχούς οδήγησης έχει τη δυνατότητα να ελέγχει το χρόνο παροχής ενέργειας. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα όταν απαιτείται μεγαλύτερη παροχή θερμότητας ώστε να μειωθεί ο ρυθμός ψύξεως. Η επιλογή της μίας ή της άλλης μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από τα προς συγκόλληση τεμάχια (μέγεθος, υλικό και γεωμετρικά χαρακτηριστικά).

Εξάλλου, υπάρχει και η *μικτή ή υβριδική περιστροφική συγκόλληση δια τριβής*, η οποία δεν αποτελεί ξεχωριστή μέθοδο, παρά είναι συνδυασμός των μεθόδων συνεχούς οδήγησης και αδρανείας. Ο εξοπλισμός είναι ο ίδιος με τη μέθοδο αδρανείας, αλλά ο κινητήρας απεμπλέκεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα επαφής των δοκιμίων. Μπορεί να πει κανείς ότι στην αρχή λειτουργεί ως direct drive μέχρι ένα σημείο και αμέσως μετατρέπεται σε inertia.

1.3.3 Ακτινική Συγκόλληση Δια Τριβής

Η ακτινική συγκόλληση δια τριβής είναι μια τεχνική που αναπτύχθηκε για τη συγκόλληση σωλήνων [8] από το TWI (The Welding Institute) το 1975. Αποτελεί μαζί με τις μεθόδους direct drive και inertia την τρίτη εκ των πιο διαδεδομένων μεθόδων περιστροφικής συγκόλλησης. Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι τα τεμάχια, εδώ οι σωλήνες, δεν περιστρέφονται. Η βασική αρχή της μεθόδου περιγράφεται παρακάτω (βλ. Σχήμα 4)



Σχήμα 4

Ένα δαχτυλίδι με εσωτερική διάμετρο σχετικά μεγαλύτερη από την εξωτερική διάμετρο των προς συγκόλληση δοκιμίων περιστρέφεται μέχρι ένα όριο στροφών και εν συνεχεία οδηγείται μέσω ακτινικής συμπίεσης στις επιφάνειες των σωλήνων, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε παραμένουν στάσιμες (clamped) καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η διεύθυνση της δύναμης συμπίεσης είναι προφανώς κάθετη στον άξονα περιστροφής του δαχτυλιδιού.

Τα δοκίμια συνήθως έχουν διαμόρφωση τύπου V notch (φρέζα) στα άκρα συγκόλλησης ενώ ο δακτύλιος έχει αντίστοιχη διαμόρφωση στις δύο επιφάνειές του, με ελαφρώς μικρότερη κλίση με αποτέλεσμα να δημιουργείται και μία αποθήκη για τμήμα του υλικού που εκρέει (απορρίπτεται) κατά τη διαδικασία. Το τελευταίο σχετίζεται με το κολάρο εκροής που αναφέρθηκε στην περιστροφική συγκόλληση συνεχούς οδήγησης. Είναι προφανές ότι ο περιστρεφόμενος δακτύλιος αποτελεί αναλώσιμο της μεθόδου, δηλαδή είναι μέρος του μετάλλου συγκόλλησης (weld metal). Ανάλογα με την εφαρμογή, προστίθεται εσωτερικά των σωλήνων ένα κυλινδρικό υπόθεμα (mandrel) το οποίο έχει εξωτερική διάμετρο ίση ή σχετικά μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο των σωλήνων. Το μάνδρεν υποστηρίζει μηχανικά τις σωλήνες εσωτερικά, δηλαδή δεν τις αφήνει να συμπιεστούν περισσότερο από ότι πρέπει. Επίσης παίζει το ρόλο του back strip δηλαδή εξασφαλίζει ομαλότητα στη ρίζα της συγκόλλησης, δεν επιτρέπει δηλαδή στο μέταλλο συγκόλλησης να «κρεμάσει» (flash). Ωστόσο σχεδόν πάντα παρατηρείται ελαφρά μείωση της εσωτερικής διαμέτρου των σωλήνων που πολλές φορές λόγω εφαρμογής πρέπει να εξομαλυνθεί, όπως για παράδειγμα όταν πρόκειται για σωλήνες δικτύων πίεσης και όχι σωλήνων κατασκευών. Η συγκόλληση μπορεί να παραμετροποιηθεί κατά τον ίδιο τρόπο με την περιστροφική συγκόλληση, μπορεί δηλαδή να

είναι συνεχούς οδήγησης ή αδράνειας. Σε παραλλαγή της μεθόδου, αντί για δακτυλίδι συμπίεσης χρησιμοποιείται δακτυλίδι εκτόνωσης.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά για τη συγκόλληση σωλήνων μεγάλου μήκους επιτόπου στο Έργο. Εναλλακτική εφαρμογή της μεθόδου είναι η συγκόλληση μεταλλικών δακτυλίων ή φλαντζών γύρω από συμπαγείς κυλίνδρους ή ενίσχυση σωλήνων με επιθέματα στην εξωτερική ή την εσωτερική διάμετρο των σωλήνων.



Εικόνα 7: Εξαρτήματα RFW



Εικόνα 8: Δοκίμο Σωλ. Τιτανίου RFW

Βασικό πλεονέκτημα έναντι της περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής είναι το γεγονός ότι δεν περιστρέφονται τα προς συγκόλληση τεμάχια, κάτι που γενικά είναι δύσκολο όταν αυτά έχουν μεγάλο μήκος. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η πολυπλοκότητα της κατασκευής κυρίως λόγω της χρήσης μηχανισμού ακτινικής συμπίεσης.

Έρευνες έδειξαν ότι η μέθοδος είναι ιδανική για περιφερειακή συγκόλληση κραμάτων τιτανίου. Αρκετές βιομηχανίες έχουν εγκαταστήσει μηχανές ακτινικής συγκόλλησης με εύρος $\Phi 150\text{-}\Phi 300$ [mm] (6'-12'). Επίσης η στρατιωτική βιομηχανία έχει δείξει ενδιαφέρον για την κατασκευή των πυροβόλων εφαρμόζοντας τη μέθοδο με δακτυλίους από κράματα χαλκού (με διάμετρο $\Phi 20\text{-}\Phi 150$ [mm] και άνω) με απώτερο σκοπό τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής των στρατιωτικών οχημάτων που θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου τους (πυρομαχικά). Τέλος, ποιότητες υλικού για τους δακτυλίους που έχουν δοκιμαστεί έως τώρα είναι χαλκός και κράματα αυτού, αλουμίνιο και μαλακός χάλυβας.

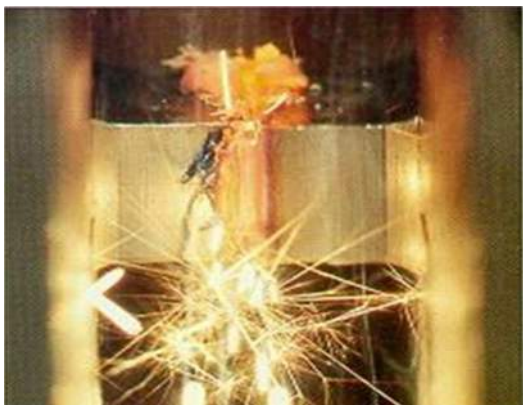
1.3.4 Μη Περιστροφική Συγκόλληση Δια Τριβής

Η μη περιστροφική συγκόλληση δια τριβής είναι και αυτή μία κατηγορία συγκολλήσεων όπου η τριβή μεταξύ των προς συγκόλληση τεμαχίων σε συνδυασμό με πίεση για την αύξηση της θερμοκρασίας είναι οι παράγοντες για τη δημιουργία μεταλλικών δεσμών στη διεπιφάνεια. Ωστόσο οι μη περιστροφικές συγκολλήσεις δια τριβής διαφέρουν ως προς τις περιστροφικές σε ορισμένα βασικά σημεία :

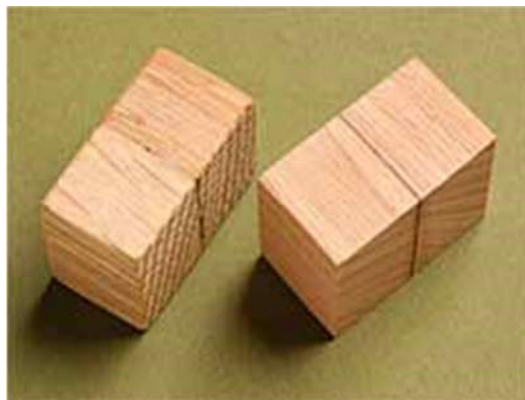
A) Τα κινούμενα μέρη ταλαντώνονται κατά το επίπεδο που ορίζουν οι ακμές συγκόλλησης , αντί να περιστρέφονται όπως παραπάνω.

B) Η τριβή , αν αντιστοιχηθεί ως η σχετική ταχύτητα των δύο επιφανειών, κατανέμεται ομοιόμορφα στη διεπιφάνεια με αποτέλεσμα την ομοιομορφία στη ζώνη συγκόλλησης. Αναφέρουμε εδώ ότι στην περιστροφική συγκόλληση η γραμμική ταχύτητα στη ρίζα της συγκόλλησης είναι μικρότερη από τη γραμμική ταχύτητα στην εξωτερική επιφάνεια λόγω διαφοράς στις ακτίνες.

Γ) Αίρεται ο γεωμετρικός περιορισμός που καθιστούσε μέχρι τώρα αναγκαίο το ένα από τα δύο τεμάχια να έχει κυκλική συμμετρία.



Εικόνα 9:Γραμμική Συγκόλληση Δια Τριβής



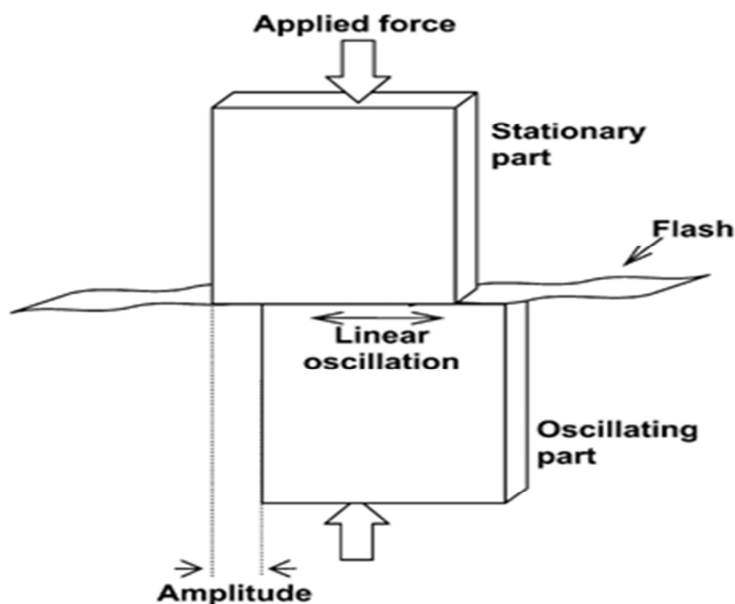
Εικόνα 10: Γεωμετρία Γραμμικής Συγκόλλησης

Η μέθοδος χωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες που διαφέρουν ως προς τη σχετική κίνηση μεταξύ των τεμαχίων:

- Γραμμική συγκόλληση δια τριβής (*linear friction welding*)
- Τροχιακή συγκόλληση δια τριβής (*orbital friction welding*)
- Γωνιακή συγκόλληση δια τριβής (*angular friction welding*)

1.3.4.1 Γραμμική Συγκόλληση Δια Τριβής

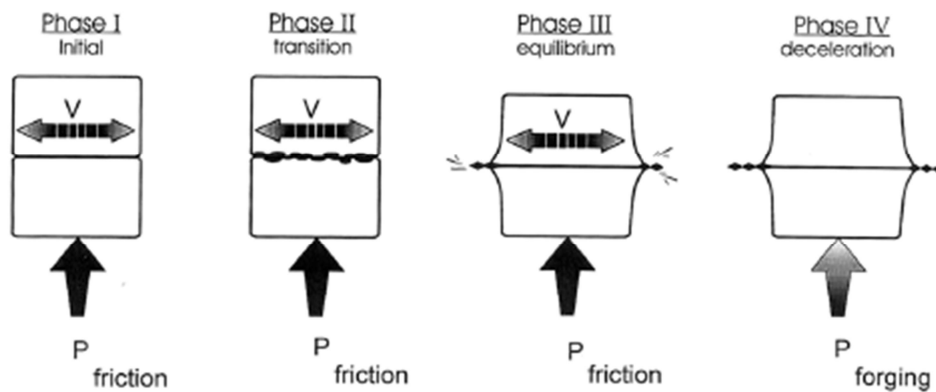
Η βασική αρχή της μεθόδου φαίνεται και στο Σχήμα 5. Το ένα από τα δύο τεμάχια είναι σταθερά πακτωμένο ενώ το άλλο εκτελεί γραμμική ταλάντωση συγκεκριμένης συχνότητας με μικρό εύρος, ενώ ταυτόχρονα ασκείται σε αυτό αξονική δύναμη.



Σχήμα 5

Η σχετική κίνηση των δύο τεμαχίων παράγει θερμότητα η οποία αναγκάζει το υλικό να περάσει στην πλαστική περιοχή ούτως ώστε να είναι δυνατή η συγκόλληση. Καθώς η διαδικασία εξελίσσεται, το ασκούμενο αξονικό φορτίο προκαλεί εξώθηση όλων των επιφανειακών ακαθαρσιών ή και των προσχηματισμένων οξειδίων της διεπιφάνειας και τη συγκέντρωσή τους στο λεγόμενο κολάρο εκροής (flash collar).

Σύμφωνα με τις εργασίες των A.Vairis και M.Frost [9] η διαδικασία της γραμμικής συγκόλλησης δια τριβής μπορεί να υποδιαιρεθεί χρονικά σε τέσσερις διαφορετικές φάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6 το οποίο ακολουθεί.



Σχήμα 6 : Οι τέσσερις φάσεις της Γραμμικής Συγκόλλησης Δια Τριβής

- Στην πρώτη φάση (initial phase) της διαδικασίας έρχονται σε επαφή τα δύο τεμάχια και αρχίζει η σχετική μεταξύ τους κίνηση υπό την επίδραση του αξονικού φορτίου. Καθώς έρχονται σε επαφή τα δύο τεμάχια η αρχική επιφάνεια επαφής είναι μικρότερη από ότι στην εξέλιξη του φαινομένου καθώς στις επιφάνειες υπάρχει τραχύτητα. Καθώς πλαστικοποιείται το υλικό στη διεπιφάνεια το εμβαδό επαφής αυξάνεται καθώς μηδενίζονται οι εκατέρωθεν επιφανειακές τραχύτητες και έχουμε πλέον άμεση επαφή. Στην πρώτη φάση δεν παρατηρείται ακόμα μείωση του μήκους των δοκιμίων.
- Στη δεύτερη φάση (transition), το εμβαδό επιφάνειας επαφής αυξάνεται μέχρι το ανώτατο όριο του το οποίο αντιστοιχεί στο εμβαδό της εγκάρσιας τομής του μικρότερου εκ των δύο τεμαχίων. Η φάση αυτή συνοδεύεται από αύξηση της ισχύος που απαιτείται για τη γραμμική ταλάντωση.
- Στην τρίτη φάση (equilibrium) , σταθεροποιείται η απαιτούμενη ισχύς για τη γραμμική ταλάντωση και παρατηρείται μείωση του μήκους των τεμαχίων με την εμφάνιση του χαρακτηριστικού κολάρου εκροής του μετάλλου.
- Στην τέταρτη και τελευταία φάση (deceleration) η κίνηση σταματάει απότομα και τα δοκίμια ευθυγραμμίζονται . Στις περισσότερες εφαρμογές ασκείται τότε και κρουστικό φορτίο συμπίεσης (forge) μέχρι τη στερεοποίηση της ένωσης.



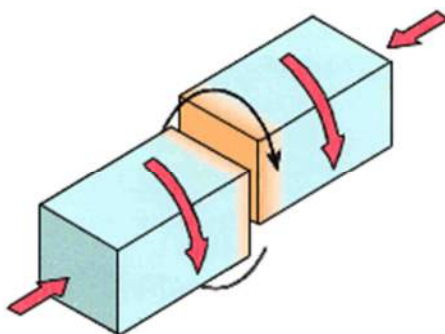
Εικόνες 11 , 12 &13 : Προϊόντα Γραμμικής Συγκόλλησης Δια Τριβής

Παραπάνω φαίνονται στις φωτογραφίες προϊόντα και δοκίμια γραμμικής συγκόλλησης δια τριβής. Η μέθοδος έχει αποδειχθεί ιδανική τεχνική για τη συγκόλληση πτερυγίων στους στροβίλους των αεροπορικών κινητήρων, από κράματα τιτανίου . Η μέθοδος δεν έχει αποκτήσει εύρος σε εμπορικές εφαρμογές κυρίως λόγω του κόστους κατασκευής του μηχανήματος της κίνησης και συγκόλλησης. Σε υψηλές ωστόσο τεχνολογίες , όπου το κόστος των παραγόμενων προϊόντων είναι πολύ υψηλό , το κόστος κεφαλαίου για την αγορά των μηχανημάτων αποσβένεται ικανοποιητικά, όπως για παράδειγμα στην υπεργολαβία της αεροπορικής βιομηχανίας. Με την πάροδο του χρόνου φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κομμάτι στις συγκολλήσεις υλικών καθώς συνδυάζει αρκετά πλεονεκτήματα.

Το σημαντικότερο από αυτά είναι ότι με τη μέθοδο είναι δυνατόν να συγκολληθούν σχεδόν όλες οι γεωμετρίες και σχεδόν όλες οι ποιότητες υλικών με υψηλές μηχανικές ιδιότητες στη ζώνη συγκόλλησης. Επιπρόσθετα η γραμμική συγκόλληση δια τριβής έχει πολύ υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους και μηδενική προετοιμασία των ακμών συγκόλλησης.

1.3.4.2 Τροχιακή Συγκόλληση Δια Τριβής

Η μέθοδος της τροχιακής συγκόλλησης δια τριβής αυξάνει ακόμη περισσότερο το εύρος το εύρος συγκολλούμενων γεωμετριών (joints). Με την επίδραση ενός αξονικού φορτίου, τα προς συγκόλληση τεμάχια τρίβονται μεταξύ τους διατηρώντας και τα δύο ελλειπτική τροχιά. Η ανάπτυξη θερμότητας λόγω της τριβής προκαλεί την πλαστικοποίηση της διεπιφάνειας των δύο τεμαχίων. Με το πέρας της φάσεως τριβής, αφού έχουν δημιουργηθεί οι κατάλληλες συνθήκες, η κίνηση σταματάει και τα τεμάχια ευθυγραμμίζονται στην τελική θέση τους ενώ η δύναμη διατηρείται σταθερή ή αυξάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της συγκόλλησης.



Σχήμα 7

Βασισμένη στην ίδια περίπου αρχή λειτουργίας, υπάρχει και η κατηγορία *γωνιακών συγκολλήσεων δια τριβής*. Η βασική διαφορά είναι ότι η τροχιά που διαγράφουν τα προς συγκόλληση τεμάχια είναι τμήμα κυκλικού τόξου, με εύρος μερικές μοίρες. Στη γωνιακή συγκόλληση τα εξαρτήματα τακτοποιούνται στην τελική τους θέση και μετά ξεκινάει η ταλάντωση στην τροχιά του τόξου. Μόλις η φάση τριβής ολοκληρωθεί επιστρέφουν στην αρχική τους θέση πριν το πέρας της συγκόλλησης οπότε εξασφαλίζεται τέλεια ευθυγράμμιση. Η γωνιακή συγκόλληση χρησιμοποιείται για κυκλικά εξαρτήματα όπου η ακρίβεια στην ευθυγράμμιση των τεμαχίων είναι κρίσιμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ (FSW)

2.1 Εισαγωγή -Ιστορική Αναδρομή FSW

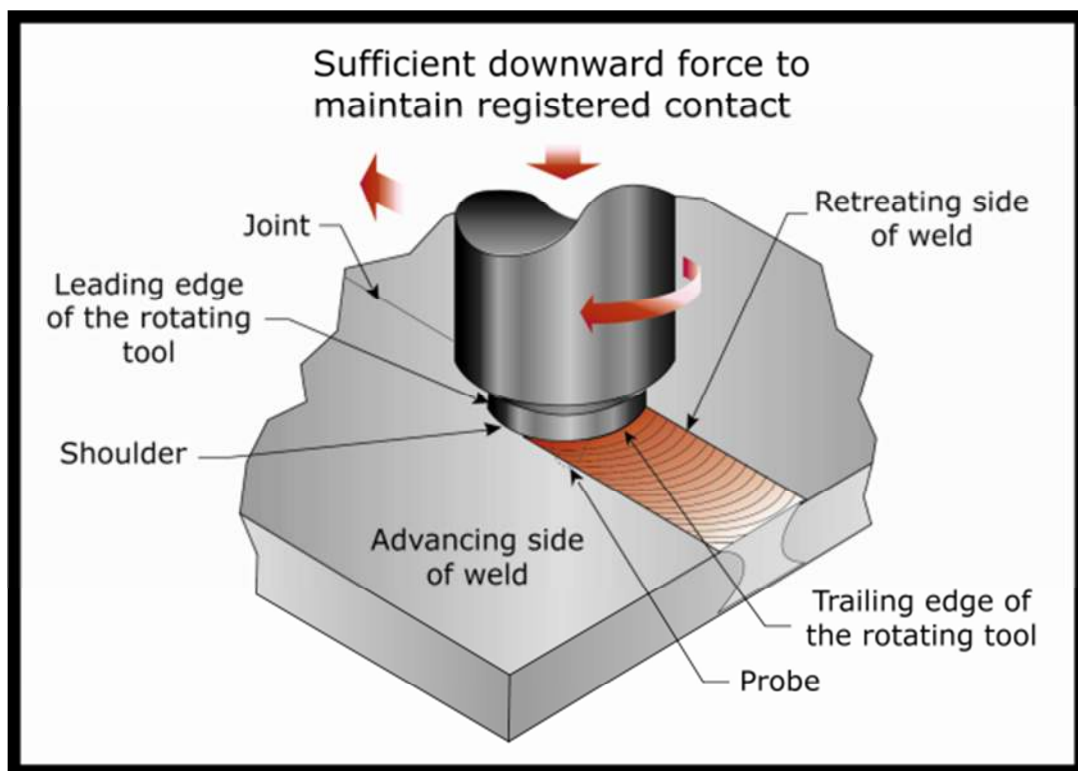
Η μέθοδος της Συγκόλλησης Δια Τριβής με Ανάδευση (Friction Stir Welding) είναι γενικά μία νέα μέθοδος συγκόλλησης σε σύγκριση με την πλειονότητα των προαναφερόμενων μεθόδων. Επινοήθηκε το Δεκέμβριο του 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (The Welding Institute , TWI). Η μέθοδος κατοχυρώθηκε με την κατάθεση διεθνούς διπλώματος ευρεσιτεχνίας. Στις πρώτες παρουσιάσεις της μεθόδου χρησιμοποιούνταν ο όρος "Friction Stir Butt Welding" καθώς αρχικά εφαρμόστηκε σε μετωπικές συμβολές συγκόλλησης. Εξάλλου , και η κατασκευή του μηχανήματος που αποτελεί και το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας ,αφορά μόνο σε μετωπικές συγκολλήσεις. Στη συνέχεια ωστόσο η μέθοδος επεκτάθηκε και σε άλλους τύπους συμβολών συγκόλλησης και έτσι καθιερώθηκε η σημερινή της ονομασία παγκοσμίως ως " Friction Stir Welding " [10] .

Αν και νέα σχετικά μέθοδος , η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχει καθιερωθεί σε αρκετές εφαρμογές στη βιομηχανία , καθώς εκτός από τη δυνατότητα για συγκόλληση αρκετών κατηγοριών ανομοιογενών μετάλλων όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης δια τριβής , προσφέρει και αρκετά ικανοποιητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων στη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone). Στο εμπόριο υπάρχουν πλέον διαθέσιμες αρκετές μηχανές FSW και σε δεκάδες επιχειρήσεις και οργανισμούς έχουν παραχωρηθεί δικαιώματα χρήσης της μεθόδου από το TWI [11].

Η ναυπηγική βιομηχανία ήταν από τους πρώτους τομείς όπου εισάχθηκε η μέθοδος στην παραγωγική διαδικασία, κυρίως στις συγκολλήσεις υπερκατασκευών από αλουμίνιο .Το αλουμίνιο είναι ίσως το υλικό που έχει την καλύτερη συμπεριφορά από εμπορική σκοπιά στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση για αυτό και οι συγκολλήσεις αλουμινίου κατέχουν ένα μεγάλο μερίδιο στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Άλλοι τομείς που ακολούθησαν στην υιοθέτηση της μεθόδου σε εφαρμογές τους είναι η αεροδιαστημική βιομηχανία , η αεροναυπηγική βιομηχανία , η σιδηροδρομική βιομηχανία , η αυτοκινητοβιομηχανία , η βιομηχανία ιατρικών μηχανημάτων και εργαλείων , και πολλές άλλες κατά περίπτωση.

Στις μέρες μας , καθώς εξελίσσεται συνεχώς και αναβαθμίζεται και όλο και περισσότεροι μελετητές , σχεδιαστές και άνθρωποι της βιομηχανίας έρχονται σε επαφή με την FSW , τη συναντάμε σε περισσότερες εφαρμογές καθώς γίνονται περισσότερο προφανή τα πλεονεκτήματά της , τα οποία αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας



Σχήμα 8

Η βασική αρχή της FSW είναι αξιολογικά απλή. Ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο που στο κάτω άκρο του έχει μία ειδικά σχεδιασμένη προεξοχή (probe:πείρος) , εισέρχεται μεταξύ των δύο επιφανειών προς συγκόλληση, οι οποίες σημειώνεται ότι δεν έχουν διάκενο μεταξύ τους, και ενώ αυτό περιστρέφεται, κινείται και γραμμικά κατά μήκος της συμβολής συγκόλλησης «ανακατεύοντας» εκατέρωθεν το υλικό. Εξάλλου από το τελευταίο προέκυψε και ο όρος « Stir » της ονομασίας της μεθόδου. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας , όπως άλλωστε και σε όλες τις μεθόδους συγκόλλησης δια τριβής , εφαρμόζεται αξονική δύναμη , αυτή τη φορά όμως σε διαφορετική διεύθυνση ως προς τα δοκίμια. Το τελευταίο βέβαια έχει να κάνει γενικά και με τη γεωμετρία των δοκιμίων αλλά και με τη γεωμετρία της συμβολής συγκόλλησης (μετωπική , αυχενική κτλ).

Στο Σχήμα 8 φαίνονται και οι ορολογίες στα Αγγλικά, οι οποίες αφορούν στο εργαλείο συγκόλλησης και στα δοκίμια συγκόλλησης, οι οποίες μεταφράζονται και εξηγούνται αναλυτικότερα παρακάτω.

- Advancing Side of weld : η προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης
- Retreating Side of weld : η υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης
- Leading Edge of the Rotating Tool : η πλευρά του εργαλείου με κατεύθυνση προς το πέρας της συγκόλλησης
- Trailing Edge of the Rotating Tool : η πλευρά του εργαλείου με κατεύθυνση προς την αρχή της συγκόλλησης
- Shoulder : Περιαιχένιο (ώμος) του εργαλείου συγκόλλησης
- Probe ή Pin : Πείρος του εργαλείου (βρίσκεται βυθισμένος στη συμβολή συγκόλλησης)
- Download Force : Η αξονική σταθερή δύναμη που εφαρμόζεται

Οι όροι «προωθούμενη πλευρά» και « υποχωρούσα πλευρά» απαιτούν γνώση της φοράς περιστροφής του εργαλείου και της φοράς της κίνησής του. (travel direction). Στο σχήμα 8 , το εργαλείο περιστρέφεται με ωρολογιακή φορά , ενώ κινείται από δεξιά προς τα αριστερά . Με δεδομένα τα παραπάνω η προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης ορίζεται ως η πλευρά στην οποία η φορά περιστροφής του εργαλείου είναι ομόρροπη στιγμιαία με τη φορά κατεύθυνσής του. Στο σχήμα μας , η πλευρά αυτή βρίσκεται εξ'αριστερών του εργαλείου , αναφορικά πάντα με τη διεύθυνση της συμβολής συγκόλλησης (joint). Αντίστοιχα η υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης (retreating side) βρίσκεται εκ δεξιών του εργαλείου , δηλαδή από τον ορισμό στην πλευρά όπου η φορά περιστροφής του εργαλείου είναι αντίρροπη με τη φορά κατεύθυνσής του [12].

Το εργαλείο συγκόλλησης έχει τρεις συνολικά λειτουργίες που συντελούν στη συγκόλληση των ελασμάτων , οι οποίες είναι η πρόσδοση θερμότητας , η κίνηση του υλικού για να επιτευχθεί η συγκόλληση και η « συγκράτηση» της θερμότητας που παράγεται κάτω των ορίων της επιφάνειας του περιαιχένιου.

Η θερμότητα που προσδίδεται στη διεπιφάνεια παράγεται : α) Δια τριβής από την περιστροφή του πείρου ο οποίος βρίσκεται βυθισμένος στη συμβολή συγκόλλησης. β) Δια τριβής από την περιστροφική κίνηση του περιαιχένιου του εργαλείου συγκόλλησης επάνω στην επιφάνεια των ελασμάτων , σε συνδυασμό με την αξονική δύναμη που εφαρμόζεται προς αυτά. γ) Ως αποτέλεσμα της σημαντικής πλαστικής παραμόρφωσης στην οποία υπόκειται το υλικό.

Η τοπική άνοδος της θερμοκρασίας μαλακώνει το υλικό γύρω από τον πείρο και σε συνδυασμό με την περιστροφή του εργαλείου επιτυγχάνεται κίνηση του υλικού από το εμπρός (leading edge of the rotating tool) προς το πίσω (trailing edge of the rotating tool) μέρος του εργαλείου . Αποτέλεσμα είναι να « γεμίζει» με πλαστικοποιημένο υλικό το ίχνος του πείρου , το οποίο δημιουργείται όπως το εργαλείο μετακινείται προς τα εμπρός. Το περιαιχένιο , το οποίο έχει πολύ μεγαλύτερη διατομή σε σχέση με τον πείρο , περιορίζει την κίνηση του υλικού κάτωθεν της επιφάνειάς του , η οποία ταυτίζεται με την άνω επιφάνεια των ελασμάτων. Το τελευταίο συντελεί και στην καλή αισθητική της παραγόμενης ραφής συγκόλλησης, για την οποία διακρίνεται η FSW.

2.3 Παράμετροι Συγκόλλησης FSW

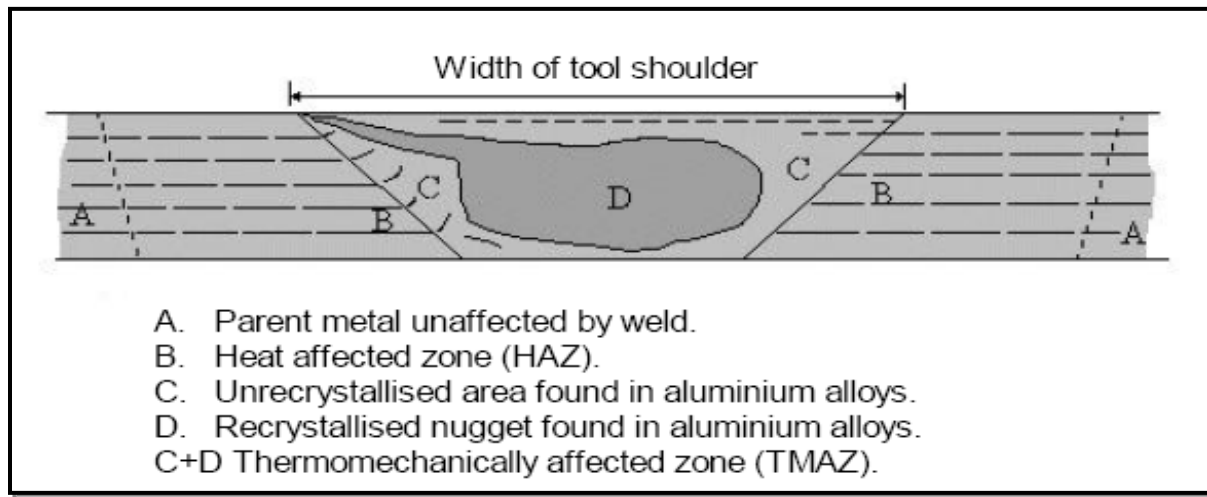
Όπως εύκολα μπορεί να συμπεράνει κανείς, οι βασικές παράμετροι που επιδρούν στην ποιότητα της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου , η γραμμική ταχύτητα κίνησης του εργαλείου (travel speed) , η γεωμετρία του εργαλείου συγκόλλησης και το απόλυτο μέγεθος της κάθετης αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, όπως επίσης και άλλοι.

Ταχύτητα Περιστροφής και Μεταφορική Ταχύτητα Εργαλείου : Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου και κατ'επέκταση του πείρου σχετίζεται με το επίπεδο ανάδευσης και ανάμιξης των υλικών γύρω από το εργαλείο, όπως επίσης και με την τριβή που δημιουργεί η επαφή της κάτω επιφάνειας του ώμου με τα ελάσματα και κατά συνέπεια τη θέρμανσή τους. Η δε γραμμική-μεταφορική ταχύτητα του εργαλείου σε συνδυασμό με την περιστροφική ταχύτητα σχετίζεται με το ρυθμό εναπόθεσης πλαστικοποιημένου υλικού από την εμπρός πλευρά του εργαλείου προς την πίσω , προς το ίχνος δηλαδή που αφήνει ο πείρος κατά την κίνησή του. Είναι προφανές ότι οι δύο αυτές παράμετροι λειτουργούν σε συνδυασμό μεταξύ τους , επομένως θα πρέπει να μελετάται περισσότερο ο μεταξύ τους λόγος , παρά να εξετάζονται ως απόλυτες τιμές , εφόσον φυσικά οι τιμές τους βρίσκονται εντός κάποιων ορίων που έχουν προκύψει από τις δοκιμές και δημοσιεύσεις.

Γεωμετρία Εργαλείου : Οι γεωμετρίες τόσο του πείρου (probe) όσο του ώμου ή και περιουχενίου (shoulder) του εργαλείου συγκόλλησης είναι καθοριστικές για τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση . Επίσης καθοριστική είναι η ποιότητα του υλικού κατασκευής του εργαλείου , η επιφανειακή του σκληρότητα , η διάμετρος κ.α. , ωστόσο τα διάφορα εργαλεία FSW αναπτύσσονται ως προς το σχεδιασμό τους στο Κεφάλαιο 3.

Άλλες Παράμετροι : Σημαντική επίδραση στην ποιότητα της συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW έχουν και μία σειρά από άλλοι παράγοντες όπως το μέγεθος της αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται , η πάκτωση και σύσφιξη των δοκιμίων , η πλάκα έδρασή τους , η ενδεχόμενη διάταξη ψύξης της κεφαλής (εργαλείου) συγκόλλησης , ο καθαρισμός των επιφανειών από ακαθαρσίες και επιφανειακές ενώσεις και πολλά άλλα.

2.4 Μικροδομή της Ζώνης Συγκόλλησης στην FSW



Σχήμα 10

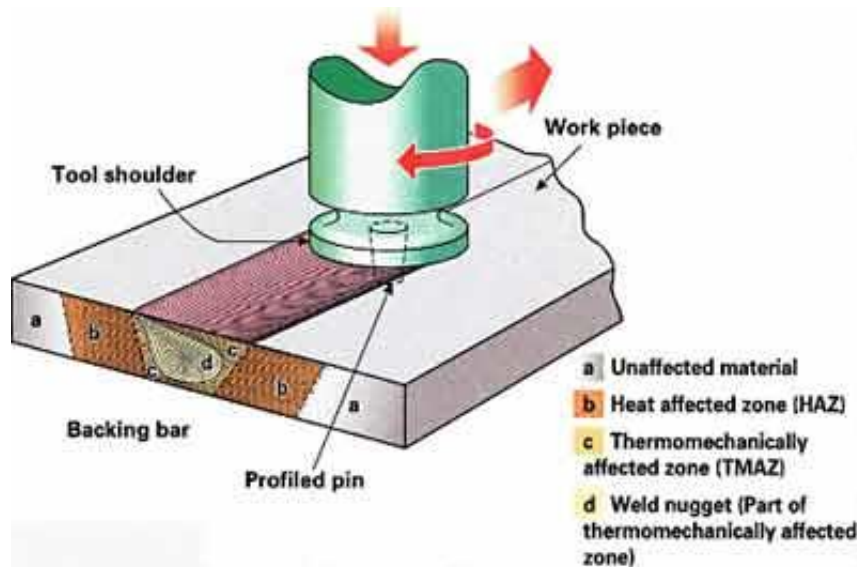
Όπως και σε κάθε νέα τεχνολογία που προκύπτει, απαιτείται πρόσθετη νέα ορολογία από τους ερευνητές προκειμένου για την καταγραφή, μελέτη και σύγκριση των παρατηρήσεων τους. Σχετικά με τη μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, ο P.L. Threadgill [13] ήταν ο πρώτος ο οποίος εισήγαγε τις ορολογίες που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Το σύστημα κατηγοριοποιεί τη ζώνη συγκόλλησης σε τέσσερις ξεχωριστές κατηγορίες. Παρατηρώντας και το Σχήμα 10, όπου φαίνεται και υπό κλίμακα η διάμετρος του ώμου συγκόλλησης σαν μέγεθος, βλέπουμε τις διαφορετικές ζώνες με τις αγγλικές ονοματολογίες που έχουν επικρατήσει:

Ζώνη A (Parent Metal Unaffected by Weld): Είναι το υλικό βάσης (base ή parent metal) το οποίο είναι σχετικά απομακρυσμένο από το νοητό άξονα της συγκόλλησης (joint) και το οποίο παρά τη θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή του, έχει μείνει ανεπηρέαστη τόσο η κρυσταλλική του δομή όσο και οι μηχανικές του ιδιότητες, μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης.

Ζώνη B (Heat Affected Zone /HAZ): Στην περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ) το υλικό έχει υποστεί τέτοια θερμική κατεργασία (thermal cycle) που έχει τροποποιηθεί η μικροδομή του ή/και οι μηχανικές του ιδιότητες σε σχέση με τη ζώνη A. Ωστόσο, το υλικό σε αυτή τη ζώνη δεν έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Το μέγεθος των κόκκων είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από αυτό του υλικού στις ζώνες C & D.

Ζώνη C (Part of Thermomechanically Affected Zone /TMAZ) : Στο τμήμα αυτό της Θερμομηχανικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΜΕΖ) , η οποία συντίθεται από τις ζώνες C & D , το εργαλείο συγκόλλησης έχει παραμορφώσει πλαστικά το υλικό και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται έχει επιφέρει αλλαγές στη δομή και τις ιδιότητες του υλικού. Στην περίπτωση των κράματων αλουμινίου είναι δυνατό να υπάρχει σημαντική πλαστική παραμόρφωση χωρίς ανακρυστάλλωση εντός της περιοχής αυτής . Εντούτοις, μελέτες σε άλλα υλικά έδειξαν ότι το αλουμίνιο συμπεριφέρεται κατά τρόπο διαφορετικό, δεδομένου ότι μπορεί να υποστεί πλήρη μετασχηματισμό σε υψηλή θερμοκρασία χωρίς ανακρυστάλλωση. Σε άλλα υλικά φαίνεται ότι ολόκληρη η ΘΜΕΖ έχει υποστεί ανακρυστάλλωση. Αυτό ισχύει βεβαίως για υλικά που δεν προκαλείται θερμικά μετασχηματισμός φάσεων που θα προκαλούσε ανακρυστάλλωση χωρίς παραμόρφωση, όπως στο καθαρό τιτάνιο και στα κράματά του φάσης β, στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και στο χαλκό. Σε υλικά όπως στους φερριτικούς χάλυβες και στα διφασικά κράματα α+β του τιτανίου η κατανομή της μικροδομής λόγω και του θερμικά προκαλούμενου μετασχηματισμού φάσεως, αλλά ακόμη και τα όρια των ΘΕΖ/ΘΜΕΖ, είναι δυσδιάκριτα.

Ζώνη D (Weld nugget ή Stir Zone) : Πρόκειται για τον πυρήνα ή αλλιώς ζώνη ανάδευσης της συγκόλλησης όπου το υλικό είναι δυναμικά ανακρυσταλλωμένο . Το μέγιστο εύρος/πλάτος που μπορεί να έχει ο πυρήνας συγκόλλησης δε μπορεί να ξεπεράσει τη διάμετρο του ώμου (αλλιώς περιαιχένιο) του εργαλείου συγκόλλησης. Ο διαχωρισμός της ζώνης D και της ζώνης C είναι περισσότερο ευδιάκριτος στην προελαύνουσα πλευρά της συγκόλλησης (advancing side) σε σχέση με την υποχωρούσα (retreating).



2.5 Παραλλαγές της Μεθόδου FSW

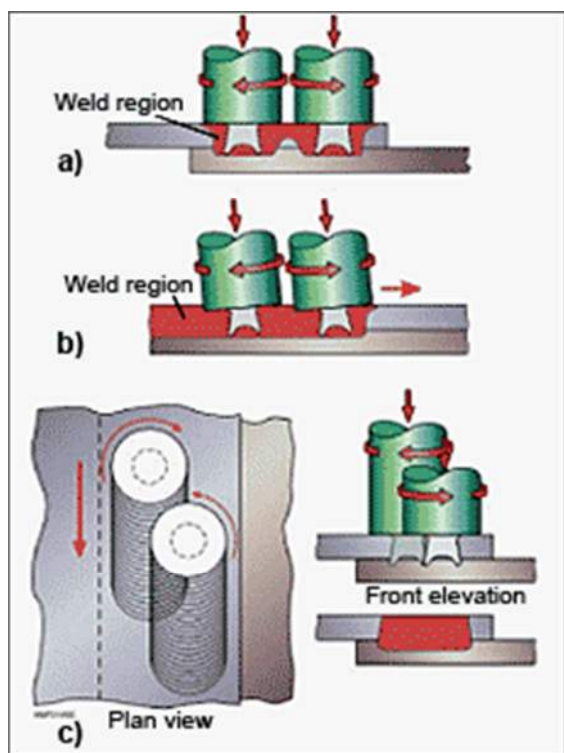
Η συστηματική ανάπτυξη της μεθόδου οδήγησε παράλληλα στην ανακάλυψη νέων παραλλαγών τις μεθόδου βασισμένες στις βασικές αρχές λειτουργίας της. Οι κυριότερες παραλλαγές τις μεθόδου που έχουν παρουσιαστεί είναι οι εξής:

- Twin-stir
- Reversal stir welding – Re-stir
- Com-stir
- Dual-rotation friction stir welding
- Skew-stir
- Pro-stir
- Thermal stir welding

Τα ονόματά τους προέκυψαν είτε από το ειδικό εργαλείο που χρησιμοποιούν είτε από τη σχετική κίνηση που κάνει αυτό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από αυτές.

2.5.1 Μέθοδος Twin-Stir

Όταν για την επίτευξη της συγκόλλησης χρησιμοποιείται σύστημα δύο κεφαλών συγκόλλησης, η μέθοδος γενικά ονομάζεται Twin-Stir. Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσεται το σύστημα των δύο κεφαλών υποκατηγοριοποιεί τη μέθοδο Twin-Stir ως εξής [14]:



Σχήμα 11 a,b,c

a) Parallel twin-stir: Πρόκειται για σύστημα δύο κεφαλών σε παράλληλη μεταξύ τους διάταξη οι οποίες κινούνται με κοινή ταχύτητα κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης, η οποία αυτή τη φορά είναι διπλή (βλ. Σχήμα 11.a). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μεθόδου περιορίζουν την εφαρμογή της σε συμβολές συγκόλλησης τύπου lap joint (συγκόλληση με επικάλυψη), καθώς σε διαφορετική περίπτωση η ανάδευση θα γινόταν εκατέρωθεν της συμβολής. Με τη μέθοδο Parallel twin stir παρέχεται ιδιαίτερα αυξημένο ρεύμα θερμότητας προς τη συμβολή με αποτέλεσμα την ποσοστιαία αύξηση της απαιτούμενης μεταφορικής ταχύτητας των κεφαλών, γεγονός που εκτιμάται από άποψη παραγωγικότητας. Οι κεφαλές έχουν αντίρροπες περιστροφικές ταχύτητες όπως φαίνεται και στο σχήμα.

b) Tandem twin-stir: Πρόκειται για σύστημα δύο κεφαλών εν σειρά, όπου η δεύτερη κεφαλή, με αντίρροπη φορά περιστροφής, ακολουθεί σε σταθερή απόσταση την πρώτη, αναδεύοντας σε

δεύτερο στάδιο το ήδη πλαστικοποιημένο υλικό (Σχ.11b). Η χρήση της ,σε αντίθεση με τη μέθοδο parallel twin-stir, βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους τύπους συμβολών συγκόλλησης.

c) Staggered twin-stir: Σε αυτήν την περίπτωση (Σχ.11c) οι δύο κεφαλές κινούνται σε παράλληλες διευθύνσεις όπως στην περίπτωση (a), αλλά σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους κατά το διαμήκη άξονα ώστε ο πείρος της δεύτερης κεφαλής να περιστρέφεται εντός της ραφής συγκόλλησης της προηγούμενης κεφαλής. Και σε αυτή τη διάταξη οι φορές περιστροφής των κεφαλών είναι αντίρροπες. Η μέθοδος staggered twin-stir εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο στις συμβολές τύπου lap-joint, όπου και προσδίδει ιδιαίτερα αυξημένο πλάτος ραφής.

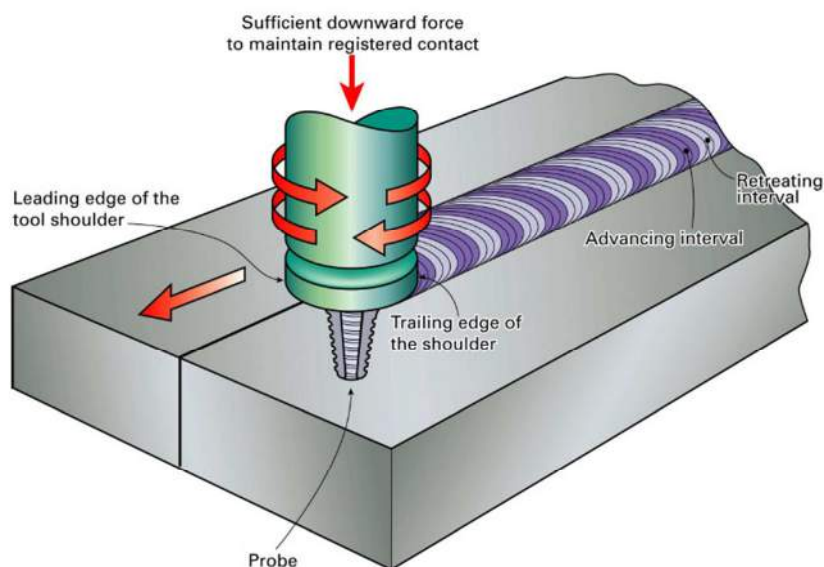
Η χρήση των μεθόδων twin-stir γενικά αυξάνει το πάγιο κόστος κτήσης ή κατασκευής του κινητήριου μηχανισμού εφόσον απαιτείται περισσότερος και πολυπλοκότερος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (βλ.Σχ.12).



Εικόνα 14: Εργαλείο Twin-Steer

2.5.2 Μέθοδος *Reversal-Stir* ή *Re-Stir*

Η διαφορά της με τη συμβατική μέθοδο έγκειται στο στοιχείο της περιοδικής αναστροφής της φοράς της περιστροφικής κίνησης του εργαλείου συγκόλλησης. Αναλυτικότερα, το εργαλείο αλλάζει φορά περιστροφής είτε ανά μία πλήρη περιστροφή, είτε ανά περισσότερες, διατηρώντας σταθερή τη μεταφορική του ταχύτητα .[14]

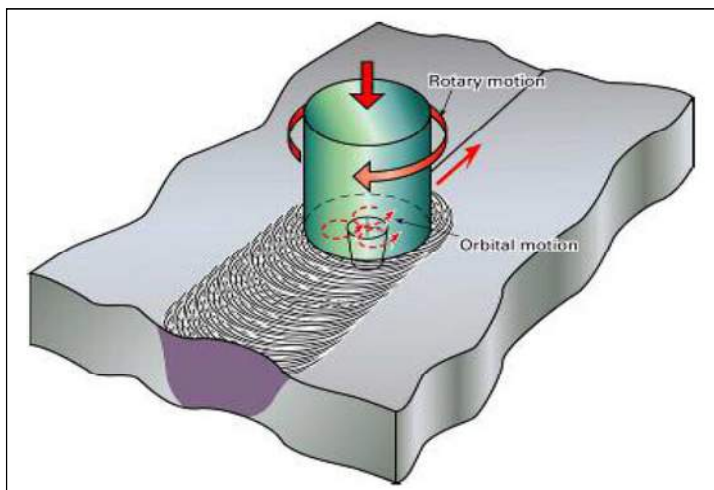


Σχήμα 13

Η αρχική έρευνα για τη μέθοδο έχει καταδείξει ότι μπορεί να προσφέρει σημαντικό όφελος και να παράξει ιδιαίτερα συμμετρικές συγκολλήσεις και ως εκ τούτου έχει τη δυνατότητα να ξεπεράσει μερικά από τα προβλήματα που συνδέονται με την ασυμμετρία που παρουσιάζεται στη συμβατική μέθοδο. Η μέθοδος *Re-Stir* βρίσκεται υπό ανάπτυξη και απαιτούνται ακόμη πολλές έρευνες για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για εμπορικούς σκοπούς. Η διαδικασία έχει φέρει σημαντικά αποτελέσματα στις δοκιμές αλλά οι παράμετροι συγκόλλησης όπως η γεωμετρία του πείρου, η περιστροφική ταχύτητα και η συχνότητα εναλλαγών επιδέχονται βελτιστοποίησης. Επίσης δε, είναι επιτακτική η χρήση μιας δυνατής και στιβαρής διάταξης παροχής ισχύος περιστροφής με αρκετά μεγάλη ροπή ώστε να υπερνικά τη μηχανική αντίσταση του υλικού κατά τις συνεχείς εναύσεις και αλλαγές φοράς, ικανής επίσης να ανθίσταται στην κόπωση από καταπόνηση εναλασσόμενου φορτίου, γεγονός που θεωρείται μειονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες παραλλαγές της μεθόδου.

2.5.3 Μέθοδος Com-Stir

Μια άλλη νέα παραλλαγή της περιστροφικής συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση που έχει αναπτυχθεί είναι η Com-stir. Περιγράφεται από το συνδυασμό μιας περιστροφικής (rotary) και μίας τροχιακής (orbital) κίνησης (Σχήμα 13). Από το συνδυασμό αυτό προκύπτει και το όνομά της (Compound motion). [14]



Σχήμα 14

Στη συμβατική μέθοδο FSW η σχετική ταχύτητα στην περιοχή της ανάδευσης κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός, στο κέντρο του πείρου, μέχρι τη μέγιστη τιμή της, στην εξωτερική διάμετρο του ώμου. Η συνδυασμένη μέθοδος Com-Stir μπορεί να μειώσει αυτές τις διαφορές στις ταχύτητες μέσω του συνδυασμού της περιστροφικής και της τροχιακής κίνησης της κεφαλής συγκόλλησης. Με αυξομείωση των ταχυτήτων των δύο κινήσεων και της εκκεντρότητας της κίνησης της κεφαλής, παράμετροι οι οποίοι μπορούν να προγραμματίζονται εκ των προτέρων (πχ με PLC) ώστε να αλλάζουν και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, παρέχεται ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων στη συγκόλληση. Σημειώνεται ότι ενώ στο σχήμα 14 φαίνεται ότι οι φορές περιστροφής είναι αντίρροπες μεταξύ τους, η μέθοδος εφαρμόζεται κατά περίπτωση και με ομόρροπες φορές. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι για τις πρόσθετες δυνατότητες της μεθόδου απαιτείται και σύνθετος, πρόσθετος μηχανολογικός εξοπλισμός

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της παραλλαγμένης αυτής μεθόδου σε σχέση με τη συμβατική FSW αναφέρονται συνοπτικά εδώ:

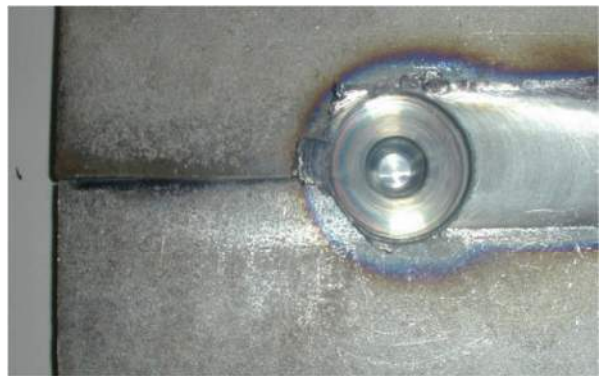
- 1) Προκύπτει γενικά μεγαλύτερο πλάτος συγκόλλησης λόγω της εκκεντρότητας στην περιστροφή, γεγονός που αυξάνει την αντοχή συγκολλητών κατασκευών κυρίως όταν πρόκειται για συνδέσεις με επικάλυψη ή αυχενικές. (lap or T joints).
- 2) Η διαδικασία διάσπασης των επιφανειακών ενώσεων, που όπως είδαμε και στις συγκολλήσεις τριβής γενικότερα αποτελεί βασική διαδικασία, πραγματοποιείται σε ευρύτερη περιοχή επομένως είναι αποτελεσματικότερη.
- 3) Η κατανομή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται περισσότερο ομοιόμορφα στην περιοχή, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ομοιογένεια στον πυρήνα της ζώνης συγκόλλησης.

4) Υπερτερεί έναντι των υπολοίπων μεθόδων όταν πρόκειται για συγκόλληση ανομοιογενών μετάλλων.

Τέλος ,σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο (FSW) όπου κατά την απομάκρυνση του εργαλείου συγκόλλησης από τα τεμάχια έχουμε την εμφάνιση οπής (keyhole), στην Com-Stir δεν παρουσιάζεται κάτι τέτοιο, αλλά έχουμε την εικόνα που παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 15 α).



**Εικόνα 15(α) : Σημείο Απομάκρυνσης
Εργαλείου Com-Stir**



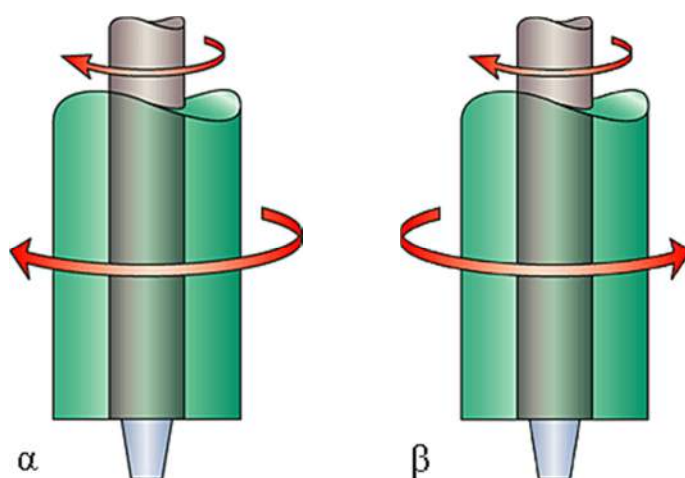
Εικόνα 15(β): Keyhole σε συμβατική FSW



**Εικόνα 15(γ) Keyholes: μέθοδος Tandem
Twin Steer**

2.5.4 Μέθοδος *Dual-Rotation Friction Stir Welding*

Η παραλλαγή αυτή της συμβατικής μεθόδου είναι σχετικά νέα και δοκιμάζεται εργαστηριακά ακόμη στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (TWI) όπου και επινοήθηκε. Η διαφοροποίησή της ως προς τη συμβατική FSW αφορά στη διαφορετική φορά περιστροφής του πείρου (probe/rod) από την κεφαλή συγκόλλησης. Εφόσον λοιπόν ο πείρος περιστρέφεται από διαφορετική πηγή ισχύος, είναι δυνατή και η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του σε τιμές διαφορετικές από το κυρίως εργαλείο συγκόλλησης. Εξάλλου, η φορά περιστροφής του πείρου μπορεί να είναι ίδια (Σχήμα 16α) ή αντίθετη (Σχήμα 16β).



Σχήμα 15 : Dual Rotation FSW

Με κατάλληλο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (inverters & plc) εκτός από προεπιλογή των δυο ταχυτήτων περιστροφής, είναι δυνατόν με κατάλληλη διάταξη αυτές να προγραμματίζονται ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης. Για παράδειγμα, ανάλογα με τα προς συγκόλληση τεμάχια και τις συνθήκες που επικρατούν υπάρχει η περίπτωση, λόγω αυξημένης θερμοκρασίας στο υλικό που έρχεται σε επαφή με τον ώμο, να υπάρξει τήξη σε μικρή κλίμακα στην περιοχή αυτή. Με τη μέθοδο dual rotation μπορεί να μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής του ώμου, ώστε να αποφευχθούν αυτά τα φαινόμενα διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του πείρου.

2.6 Πλεονεκτήματα της Συγκόλλησης Δια Τριβής με Ανάδευση

Η μέθοδος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση θεωρείται ως η πιο αξιόλογη εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων των μετάλλων τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τη ραγδαία αύξηση που παρατηρήθηκε και καταγράφηκε την προηγούμενη δεκαετία ,στον αριθμό των δημοσιεύσεων με κεντρικό θέμα τη μέθοδο [15]. Το «Institute for Scientific Information Web of Science » καταγράφει ότι στην περίοδο 2000-2006 εκατονταπλασιάστηκαν οι δημοσιεύσεις που σχετίζονται με την FSW. Η μέθοδος παρουσιάζει μία σειρά πλεονεκτήματα μεταλλουργικής , μηχανικής , ενεργειακής, οικονομικής , παραγωγικής και περιβαλλοντικής φύσεως (μερικά από τα οποία βεβαίως αφορούν γενικότερα στη συγκόλληση δια τριβής), τα οποία συγκεντρώνονται εδώ :

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ

- Δυνατότητα συγκόλλησης ανομοιογενών μετάλλων , ως μέθοδος που ανήκει στην κατηγορία συγκολλήσεων δια τριβής.
- Δυνατότητα συγκόλλησης όλων των σειρών του αλουμινίου , από 1000-9000
- Μειωμένες, σχεδόν μηδενικές θερμικές παραμορφώσεις λόγω του ότι η θερμοκρασία στην περιοχή συγκόλλησης ποτέ δεν ξεπερνά το 80% του σημείου τήξης του υλικού βάσης.
- Πολύ καλή ανακρυσταλλωμένη μικροδομή στον πυρήνα της συγκόλλησης.
- Απουσία ατελειών συγκόλλησης που σχετίζονται με την τήξη και το λουτρό τήξης όπως πόροι και δημιουργία εγκλεισμάτων. Εξάλλου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δεν υπάρχει ιδιαίτερη αλληλεπίδραση με τον ατμοσφαιρικό αέρα και τα στοιχεία του.
- Απουσία ατελειών συγκόλλησης που σχετίζονται με τη στερεοποίηση του τηγμένου μετάλλου στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. (πχ solidification cracking)
- Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες στη ζώνη συγκόλλησης όπως αντοχή σε εφελκυσμό , κάμψη και κόπωση.
- Πολύ καλή αντοχή του μετάλλου συγκόλλησης (weld metal) σε διάβρωση.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ & ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ

- Δεν απαιτείται προετοιμασία της ραφής (φρεζάρισμα ακμών) για τη συγκόλληση
- Αποφεύγονται οι κοχλιωτές συνδέσεις ή άλλου τύπου κοστοβόρες μέθοδοι για την ένωση ανομοιογενών υλικών.
- Δεν απαιτείται καθαρισμός των επιφανειών για αφαίρεση των σχηματισμένων επιφανειακών ενώσεων.
- Δεν απαιτείται εκπαίδευση και εμπειρία συγκολλητή. Τα περιθώρια του ανθρώπινου λάθους μειώνονται δραστικά και ως συνέπεια μειώνεται το κόστος του Μη Καταστροφικού Ελέγχου και του Ποιοτικού Ελέγχου των συγκολλήσεων γενικότερα.
- Προσφέρεται ιδιαίτερα καλή εμφάνιση ραφής συγκόλλησης και ως εκ τούτου μηδενίζονται οι εργατοώρες σε τροχίσματα και το κόστος των αναλωσίμων λείανσης.

- Δεν υπάρχει σημαντικό κόστος αναλωσίμων στη διαδικασία. Αποφεύγονται τα προστατευτικά αέρια συγκόλλησης και η διαχείρισή τους (shielding gases) , τα σύρματα και ηλεκτρόδια συγκόλλησης , τα αναλώσιμα τσιμπίδας και άλλα. Εξαιρείται η αντικατάσταση του εργαλείου συγκόλλησης ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η οποία βέβαια σχετίζεται και με τη σωστή χρήση του κάθε εργαλείου για την κάθε εφαρμογή.
- Η διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη στο 100% , μπορεί δηλαδή να εκτελεστεί θεωρητικά άπειρες φορές με τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους και τα ίδια αποτελέσματα , όπως η ρομποτική συγκόλληση τόξου.

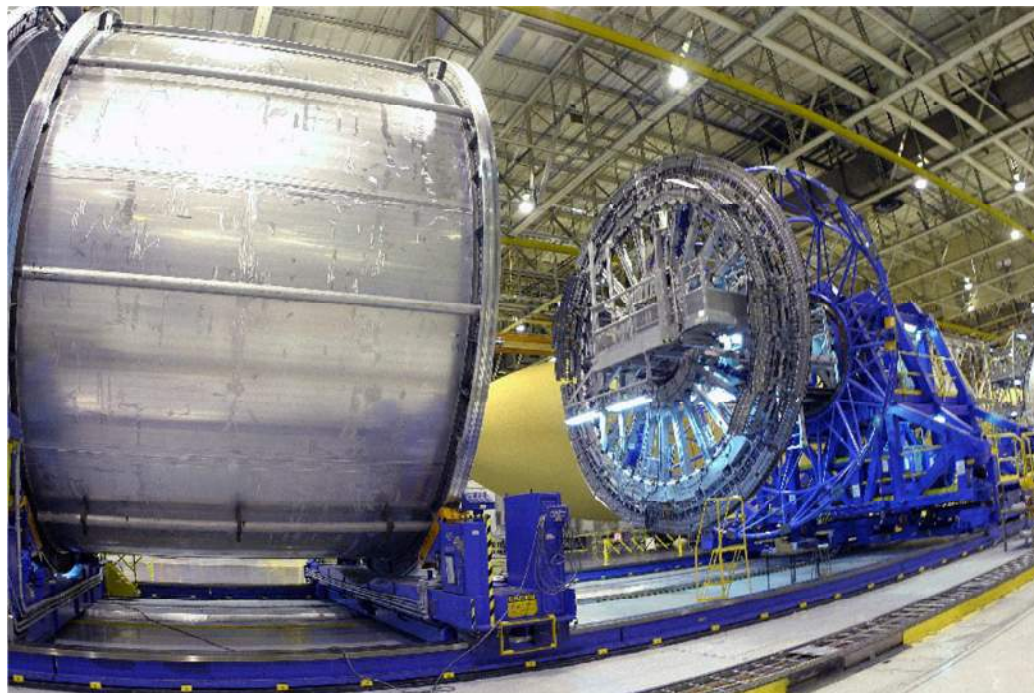
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ

- Σε σύγκριση με τη συγκόλληση με laser , η FSW απαιτεί μόνο το 2.5% της αντίστοιχης ενέργειας. Εξάλλου είναι γνωστό ότι σε εγκαταστάσεις βιομηχανοποίησης μεταλλικών κατασκευών , ένα μεγάλο ποσοστό κατανάλωσης ρεύματος οφείλεται στις μηχανές συγκόλλησης κυρίως σύρματος.(GMAW)
- Η απουσία των βλαβερών για τον άνθρωπο και το περιβάλλον εκπομπών αερίων κατά τη συγκόλληση.
- Η μείωση του βάρους των κατασκευών που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου, συντελεί στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων στην αεροπορία , τη ναυπηγική και την αεροδιαστημική.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

- Η μη φορητότητα του εξοπλισμού συγκόλλησης που έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να εφαρμοστεί σε εργασίες που πρέπει να γίνουν στο Έργο (on site) και όχι εντός των εργοστασιακών εγκαταστάσεων.
- Η συγκράτηση των ελασμάτων προς συγκόλληση που σε πολλές εφαρμογές είτε είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα , είτε δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί καθόλου. Για κάθε καινούριο σχέδιο προς κατασκευή , θα πρέπει να προβλέπονται νέες συσκευές σύσφιξης ,γεγονός που εκτοξεύει το κόστος παραγωγής και περιορίζει την εφαρμογή της μεθόδου κυρίως σε επαναλαμβανόμενες διαδικασίες εντός της παραγωγής.
- Η μη αποτελεσματικότητά της σε δύσκολες γεωμετρίες

2.7 Εφαρμογή της Συγκόλλησης Δια Τριβής με Ανάδευση στη Βιομηχανία



Εικόνα 16 : Κατασκευές στην Αεροδιαστημική με FSW

Τα μέταλλα τα οποία συγκολλούνται σήμερα στη βιομηχανία με τη μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι κυρίως το αλουμίνιο και τα κράματά του , το τιτάνιο και τα κράματά του , ο χαλκός , οι μαλακοί και οι μαγγανιούχοι χάλυβες , ο μόλυβδος , τα πολυμερή και σε μικρότερη κλίμακα οι χάλυβες κατασκευών και οι ανοξείδωτοι χάλυβες.

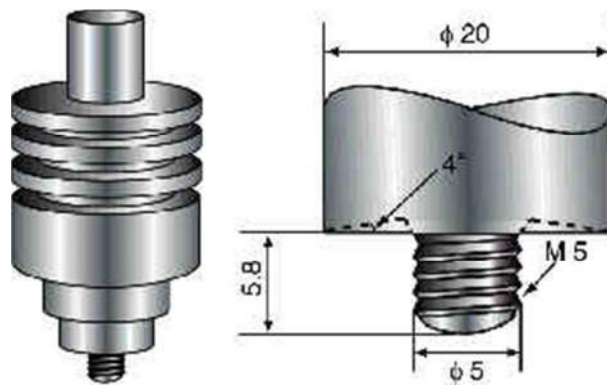
Οι εφαρμογές της FSW απαντώνται και στη ναυπηγική βιομηχανία και ειδικότερα στην προκατασκευή αλουμινένιων καταστρωμάτων , σε προκατασκευή φρακτών μετά των ενισχυτικών τους, σε γάστρα και υπερκατασκευές , στις πλατφόρμες προσγείωσης ελικοπτέρων όπου απαιτείται μειωμένη παραμόρφωση αλλά και σε παράκτιες θαλάσσιες κατασκευές.

Άλλες βιομηχανίες οι οποίες έχουν υιοθετήσει τη μέθοδο είναι η αεροδιαστημική βιομηχανία σε μεγάλη κλίμακα , η αεροπορική βιομηχανία ,η αυτοκινητοβιομηχανία ,η βιομηχανική υπεργολαβία και άλλες. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή πρόκειται για νέα μέθοδο συγκόλλησης, η έλλειψη σε πρότυπα , κανονισμούς και αντίστοιχα πιστοποιητικών καταλληλότητας , η κατά τα άλλα επαναστατική μέθοδος δεν εξαπλώνεται τόσο ραγδαία όσο θα περίμενε κανείς. Ας αναλογιστούμε και το γεγονός ότι η συγκόλληση με τόξο μαζί με το ανθρώπινο δυναμικό που απασχολείται σε αυτήν είναι σήμερα μία βιομηχανία δισεκατομμυρίων ευρώ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Εύκολα μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο ρόλος του εργαλείου στη μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι καθοριστικός για το αποτέλεσμα. Όπως αναφέρθηκε και αναλυτικότερα στο προηγούμενο κεφάλαιο , το εργαλείο είναι αυτό που παράγει τη θερμομηχανική παραμόρφωση του υλικού και προσδίδει στα δοκίμια την απαιτούμενη θερμότητα για τη συγκόλληση.



Το εργαλείο συγκόλλησης όπως είδαμε διακρίνεται σε δύο βασικά μέρη του , τον ώμο (shoulder) και τον πείρο (probe ή pin). Ο ώμος είναι η επιφάνεια του εργαλείου που έρχεται σε επαφή με την άνω επιφάνεια των ελασμάτων και έχει κατά κανόνα κυκλική τομή. Ο ώμος συνεισφέρει στην άνοδο της θερμοκρασίας των δοκιμίων μέσω της τριβής που αναπτύσσεται από την περιστροφή σε συνδυασμό με την κάθετη αξονική δύναμη η οποία εφαρμόζεται επί αυτών. Επίσης λόγω της αυξημένης του - σε σχέση με τον πείρο- διατομής , αμβλύνει την περιοχή όπου πλαστικοποιείται το υλικό και συγκρατεί το αναδευόμενο από τον πείρο υλικό εντός των επιθυμητών ορίων, δηλαδή κάτω από την επιφάνειά του. Η επαφή του πείρου με το υλικό προκαλεί θέρμανση αφενός λόγω της τριβής και αφετέρου λόγω της παραμόρφωσης στην οποία υπόκειται το υλικό.

Προκειμένου για το σχεδιασμό του εργαλείου συγκόλλησης πρέπει να ληφθούν υπόψη μία σειρά από παράμετροι οι οποίες σχετίζονται με την ποιότητα του υλικού κατασκευής του εργαλείου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και για τις οποίες γίνεται εκτενής αναφορά παρακάτω.

3.2 *Υλικό Κατασκευής Εργαλείου Συγκόλλησης*

Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, στα εργαλεία FSW αναπτύσσονται θερμοκρασίες που πλησιάζουν το 80% του σημείου τήξης των μετάλλων που συγκολλούνται. Πολύ περισσότερο, σε αυτές τις θερμοκρασίες, τα εργαλεία υπόκεινται και σε σημαντικές συνδυασμένες φορτίσεις. Η επιλογή της κατάλληλης ποιότητας υλικού για την κατασκευή του εργαλείου συγκόλλησης πρέπει να προκύψει μετά από συνεκτίμηση ορισμένων παραμέτρων οι οποίες αφορούν στα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του υλικού κατασκευής

3.2.1 *Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υλικού Κατασκευής Εργαλείων FSW*

Αντοχή Υλικού: Το εργαλείο σε γενικές γραμμές πρέπει να έχει υψηλή αντοχή σε θλίψη και διάτμηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και να διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και στις θερμοκρασίες που αναμένεται να αναπτυχθούν κατά τη συγκόλληση. Κατά την πρώτη επαφή του με το υλικό, το εργαλείο δέχεται μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις ικανές να το παραμορφώσουν αλλά ακόμα και να προκαλέσουν θραύση. Οι δυνάμεις αυτές μειώνονται με την εξέλιξη της διαδικασίας καθώς το υλικό μαλακώνει και δεν ανθίσταται στην ίδια κλίμακα. Προκύπτει από πειραματικές διαδικασίες ότι οι περισσότερες αστοχίες υλικών έχουν λάβει χώρα είτε κατά τη διαδικασία βύθισης του εργαλείου στη συμβολή συγκόλλησης, είτε κατά το χρόνο παραμονής του στην αρχική θέση πριν αρχίσει να μεταφέρεται γραμμικά [16]. Η δυσθραυστότητα του υλικού αποτελεί επίσης έναν καθοριστικό παράγοντα.

Το να υπολογίσει κανείς τις ακριβείς τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την FSW είναι μία δύσκολη διαδικασία που απαιτεί πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς και κατάλληλη προσομοίωση. Κατά κύριο λόγο, οι απαιτήσεις σε αντοχή καθορίζονται σήμερα με βάση τη μέχρι τώρα εμπειρία. Το ελάχιστο που εξάγεται από τα παραπάνω είναι ότι το υλικό κατασκευής του εργαλείου πρέπει να παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε θλίψη και να διατηρεί τις τιμές αυτές κατά το δυνατόν και στις υψηλές θερμοκρασίες.

Αντοχή σε Ερπυσμό: Το υλικό κατασκευής του εργαλείου πρέπει να έχει και την ικανότητα διατήρησης των μηχανικών του ιδιοτήτων και σε συνάρτηση με το χρόνο συγκόλλησης. Σε συγκολλήσεις με μεγάλο μήκος ραφής, έχει παρατηρηθεί ότι κάποια εργαλεία δεν διατηρούν τη γεωμετρία τους και τις μηχανικές του ιδιότητες μέχρι το τέλος της συγκόλλησης. Επιπλέον, οι εναλλαγές της θερμοκρασίας στο εργαλείο, ειδικότερα όταν πρόκειται για μη συνεχείς συγκολλήσεις (spot welding), μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση και αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου μέσω του ερπυσμού από κόπωση.

Αντοχή σε Φθορά: Η φθορά του εργαλείου συγκόλλησης και η αλλοίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του με συνέπεια τη συνεχή αντικατάστασή του, είναι ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου. Η επιλογή του υλικού πρέπει να εξασφαλίζει πολύ υψηλή αντοχή στη φθορά η οποία μπορεί να δημιουργηθεί είτε από την τριβή, οπότε μιλάμε για υλικά με υψηλή επιφανειακή σκληρότητα, είτε από χημική φθορά. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της χημικής φθοράς, πρέπει το υλικό να είναι γενικά αδρανές όταν έρχεται σε επαφή τόσο με τα δοκίμια όσο και με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Για παράδειγμα όταν συγκολλούνται υλικά από

τιτάνιο, που είναι γνωστό ότι σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αρκετά ενεργό, αυτό μπορεί να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις στις επιφάνειες του εργαλείου συγκόλλησης και να αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά του. Η οξειδωση του εργαλείου από τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι ένα ακόμα φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει τη συγκόλληση και πρέπει να αποφευχθεί με τη χρήση υλικού που παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε διάβρωση.

Συντελεστής Θερμικής Διαστολής: Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού κατασκευής του εργαλείου συγκόλλησης προτιμάται να κυμαίνεται σε χαμηλές σχετικά τιμές καθώς δεν είναι επιθυμητή η αυξομείωση των διαστάσεων του κατά τις συνεχείς εναλλαγές της θερμοκρασίας. Όταν μάλιστα το εργαλείο συγκόλλησης είναι κατασκευασμένο από δύο διαφορετικές ποιότητες υλικού, δηλαδή ο πείρος έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής σε σχέση με τον ώμο, τότε υπάρχει η περίπτωση να παρατηρηθεί διαστολή του πείρου σε σχέση με τον ώμο, ή αντίστοιχα διαστολή του ώμου σε σχέση με τον πείρο. Το τελευταίο αυξάνει τις τάσεις στην κρίσιμη διατομή (στο σημείο που αλλάζει η διάμετρος) και ενδέχεται να επέλθει αστοχία. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή, οι συντελεστές θερμικής διαστολής πρέπει εκτός από χαμηλοί να έχουν και τιμές σχετικά ίδιες.

Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας: Η επιλογή του υλικού πρέπει να γίνει και με κριτήριο χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται τόσο η μεταφορά θερμότητας από τα δοκίμια προς το εργαλείο όσο και η μεταφορά θερμότητας από το εργαλείο προς τη μηχανή συγκόλλησης και τα ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματά της.

Σημείο Τήξης: Είναι προφανές ότι το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το εργαλείο συγκόλλησης θα πρέπει να έχει υψηλότερο σημείο τήξης από το υλικό που συγκολλείται. Οι θερμοκρασίες στην περιοχή συγκόλλησης όπως έχει ήδη αναφερθεί κυμαίνονται μέχρι το 80% του σημείου τήξης του υλικού συγκόλλησης.

Κατεργασιμότητα: Όπως θα δούμε και παρακάτω, οι γεωμετρίες των εργαλείων συγκόλλησης, και ειδικότερα ο πείρος του εργαλείου μπορεί να έχει αρκετά πολύπλοκη γεωμετρία. Απαιτείται οπότε, το εργαλείο να είναι κατασκευασμένο από υλικό που επιδέχεται εύκολα μηχανουργική κατεργασία, δηλαδή από υλικό με καλή κατεργασιμότητα. Επειδή γενικά οι διαστάσεις του πείρου είναι μικρές, για παράδειγμα διάμετρος Φ5 [χλστ] με μήκος 5[χλστ], αντιλαμβάνεται κανείς ότι για να δημιουργηθούν οι πολύπλοκες γεωμετρίες που απαιτούνται, χρειάζονται εργαλεία μορφής με αντίστοιχα μικρή διάμετρο και διαστάσεις τα οποία είναι ευαίσθητα στη χρήση. Η καλή κατεργασιμότητα λοιπόν αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα στη διαδικασία επιλογής υλικού για την κατασκευή του εργαλείου συγκόλλησης.

Διαθεσιμότητα/Κόστος: Η διαθεσιμότητα/εμπορικότητα του υλικού είναι επίσης ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό του εργαλείου. Στη βιομηχανία, όπου οι απαιτήσεις σε ταχύτητα παραγωγής είναι υψηλές, ένα υλικό που δεν βρίσκεται εύκολα και γρήγορα ή είναι απαγορευτικά ακριβό, είναι άχρηστο, όσο καλές μηχανικές ιδιότητες και αν έχει.

3.2.2 Ποιότητες Υλικών Κατασκευής Εργαλείων FSW [12]

Λόγω του ότι σε πολλές δημοσιεύσεις δεν αναφέρεται καθόλου η ποιότητα υλικού κατασκευής του εργαλείου , ενώ σε άλλες αναφέρεται απλώς η ομάδα που ανήκει το υλικό , η ομαδοποίηση που ακολουθεί δε θα πρέπει να θεωρηθεί περιοριστική.

Εργαλειοχάλυβες (Tool Steels) : Οι εργαλειοχάλυβες είναι η πιο διαδεδομένη ομάδα υλικών που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση. Η εκτεταμένη αναφορά στους εργαλειοχάλυβες έγκειται και στο γεγονός ότι οι περισσότερες δημοσιεύσεις αφορούν σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου ,τα οποία συγκολλούνται εύκολα με κεφαλή συγκόλλησης κατασκευασμένη από εργαλειοχάλυβα. Πλεονεκτήματα αυτής της ομάδας υλικών είναι η διαθεσιμότητα , το χαμηλό κόστος , η καλή κατεργασιμότητα και η τυποποίησή τους σε μεγάλη κλίμακα λόγω της ευρείας χρήσης τους στη βιομηχανία κατασκευής κοπτικών εργαλείων. Σε πολλές εφαρμογές αναφέρεται ο εργαλειοχάλυβας AISI H13 κατά ASME ή X40CrMoV5-4 , ο οποίος είναι ένας χρωμο-μολυβδενιούχος θερμικά κατεργασμένος χάλυβας με εξαιρετική αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες , υψηλή αντοχή σε φθορά και τριβή , υψηλή δυσθραυστότητα και χαμηλές απαιτήσεις σε ψύξη κατά τη λειτουργία. Άλλοι εργαλειοχάλυβες που αναφέρονται σε δημοσιεύσεις είναι ο AISI D2 , τον οποίο επιλέξαμε και για την κατασκευή των εργαλείων στα πλαίσια της παρούσης, όπως επίσης και οι ποιότητες υλικών Orvar Supreme και Divar της γνωστής Σουηδικής εταιρείας «Uddeholm»

Νικελιούχοι και Κοβαλτιούχοι Κραματομένοι Χάλυβες : Η ομάδα αυτών των υψηλά κραματομένων χαλύβων διαδόθηκε στη βιομηχανία κυρίως από τη χρήση της στην κατασκευή εξαρτημάτων για αεροπορικούς κινητήρες. Τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν είναι μεταξύ άλλων η υψηλή αντοχή σε θραύση , η αντοχή σε ερπυσμό , η αντοχή σε διάβρωση και η ολκιμότητα. Η θερμοκρασία σχεδιασμού σε συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση με εργαλείο από νικελιούχο-κοβαλτιούχο κράμα δε θα πρέπει να ξεπερνάει τους 700 [C]. Οι περισσότερες εφαρμογές αναφέρουν τις ποιότητες υλικών IN 738LC , IN 939 , MAR-M-002 , Stelite 12 , IN-100 και PM 3030.

Πυρίμαχα Μέταλλα : Τα πυρίμαχα μέταλλα όπως το βολφράμιο , το μολυβδένιο , το νιόβιο και το ταντάλιο, χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για τις ιδιότητές τους σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες όπως και για την υψηλή πυκνότητά τους σε βαλλιστικές εφαρμογές. Η αντοχή των περισσότερων από τα παραπάνω διατηρείται σχεδόν μέχρι το σημείο τήξης τους. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι η δύσκολη μηχανουργική κατεργασία τους , το υψηλό κόστος και η μη διαθεσιμότητα στο εμπόριο των μορφών που απαιτούνται. Σε αρκετές εφαρμογές συγκόλλησης χαλκού , ορείχαλκου, τιτανιούχων κραμάτων και χαλύβων με τη μέθοδο FSW , χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία βολφραμιούχα κράματα. Αναφορές έχουν γίνει στις ποιότητες W , W-25%Re , Densimet και W-1%LaO₂. Λιγότερες αναφορές έχουμε για το μολυβδένιο , για το οποίο αναφέρεται γενικά ότι τα εργαλεία που έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί , έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής.

Νιτρίδια Βορίου Κυβικής Κρυσταλλικής Δομής : Η ομάδα των υλικών αυτών αναπτύχθηκε αρχικά για την κατασκευή εργαλείων που κατεργάζονται τους εργαλειοχάλυβες. Έχουν εξαιρετικά υψηλή σκληρότητα αλλά παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή δυσθραυστότητα , οπότε ο σχεδιασμός του εργαλείου απαιτεί πολλή προσοχή. Γνωστότερο από αυτά είναι το υλικό PCBN που χρησιμοποιείται σε αρκετές δύσκολες εφαρμογές.

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται τα υλικά προς συγκόλληση σε αντιστοιχία με την ποιότητα υλικού κατασκευής των εργαλείων συγκόλλησης για εφαρμογές FSW.

Ομάδα Υλικού	Πάχος Ελάσματος [χλστ]	Ομάδα Υλικού Κατασκευής Εργαλείου FSW
Κράματα Αλουμινίου	t < 12	Εργαλειοχάλυβες , Καρβίδια
Κράματα Αλουμινίου	t < 26	Νικελιούχοι και Κοβαλτιούχοι Χάλυβες
Κράματα Μαγνησίου	t < 6	Εργαλειοχάλυβες , Καρβίδια
Χαλκός και Κράματα Χαλκού	t < 11	Εργαλειοχάλυβες
Χαλκός και Κράματα Χαλκού	t < 50	Νικελιούχοι Χάλυβες , PCBN , Κράματα Βολφραμίου
Κράματα Τιτανίου	t < 6	Κράματα Βολφραμίου
Ανοξειδωτοι Χάλυβες	t < 6	PCBN , Κράματα Βολφραμίου
Χαμηλά Κραματωμένοι Χάλυβες	t < 10	Καρβίδια , PCBN
Κράματα Νικελίου	t < 6	PCBN

Πίνακας 1

3.3 Σχεδιασμός Ώμου Εργαλείου Συγκόλλησης

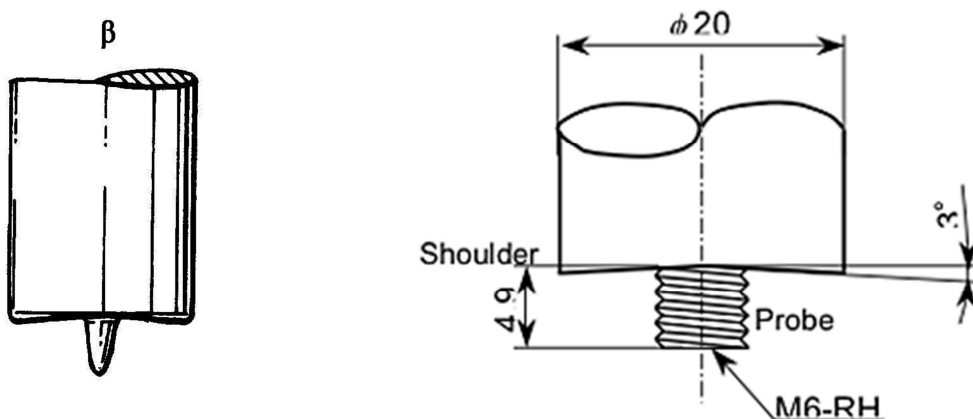
3.3.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος του ώμου του εργαλείου στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι η παραγωγή θερμότητας -μέσω της τριβής και της πλαστικής παραμόρφωσης-στην ευρύτερη περιοχή κάτω από την επιφάνεια των ελασμάτων. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος των ελασμάτων προς συγκόλληση , τόσο περισσότερο συμμετέχει ο ώμος στην παραγωγή θερμότητας για τη συγκόλληση , σε σχέση με τον πείρο. Επιπρόσθετα ο ώμος περιορίζει την κίνηση του πλαστικοποιημένου υλικού που αναδεύεται , κάτω από την επιφάνειά του , «στρώνει» θα μπορούσε να πει κανείς τη ραφή συγκόλλησης. Εξάλλου , το πολύ καλό αισθητικό αποτέλεσμα της FSW οφείλεται ακριβώς σε αυτήν την τελευταία λειτουργία του ώμου.

Ποικίλες μορφές ώμων εργαλείων έχουν παρουσιαστεί και χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση όπως ώμοι με κοίλο ή κυρτό προφίλ, ώμοι με ραβδώσεις , απλοί επίπεδοι ώμοι κ.α. Η εργαστηριακή μελέτη δοκιμίων FSW έχει επιβεβαιώσει ότι τόσο η επιφανειακή τραχύτητα όσο και η παραμόρφωση της μεταλλικής δομής στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια , είναι δύο παράμετροι οι οποίες επηρεάζονται σε μεγάλο ποσοστό από τη γεωμετρία του ώμου του εργαλείου συγκόλλησης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, μία από τις βασικές λειτουργίες του ώμου είναι η επιτυχής συγκράτηση ή αποθήκευση και διαχείριση του υλικού εκροής (flash collar) , όπως αυτό ορίστηκε στο πρώτο κεφάλαιο.[17]

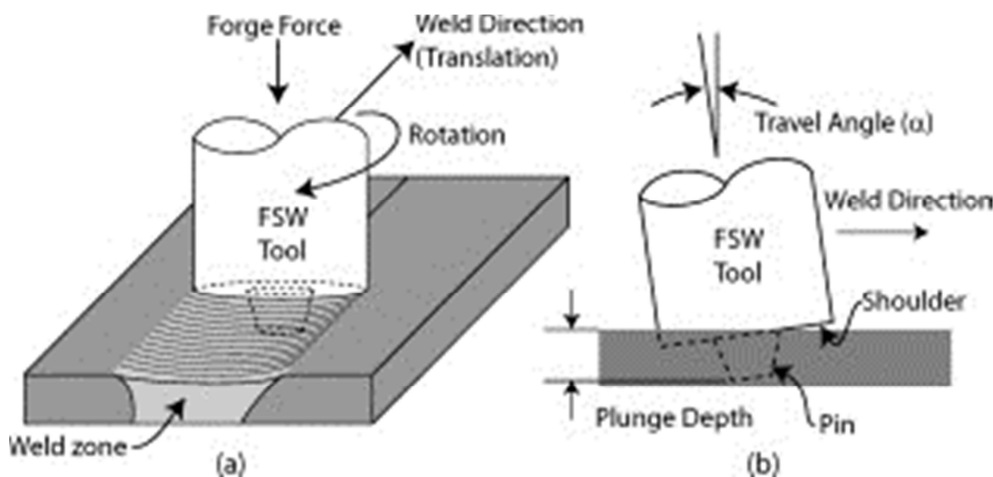
3.3.2 Ώμοι Κοίλου Προφίλ

Ο ώμος με κοίλο προφίλ (concave shoulder) είναι το πρώτο σχέδιο που παρουσιάστηκε σε ώμους εργαλείων FSW και θεωρείται μέχρι σήμερα ως το βασικότερο και ευρέως διαδεδομένο σχέδιο . Οι ώμοι τύπου concave εκτός από το καλό αποτέλεσμα που προσδίδουν στη συγκόλληση, είναι και αρκετά εύκολο να κατασκευαστούν στο μηχανουργείο. Το γεωμετρικό κοίλο δημιουργείται με μία γωνία 3-10 μοιρών μεταξύ της εξωτερικής άνω διαμέτρου του πείρου και της εξωτερικής διαμέτρου του ώμου ως προς το οριζόντιο επίπεδο των ελασμάτων.



Σχήμα 16

Κατά τη βύθιση του εργαλείου στα δοκίμια , το υλικό το οποίο μετατοπίζεται από την περιστροφή του πείρου εισέρχεται εντός της διαμορφωμένης αυτής κοιλότητας μεταξύ πείρου και ώμου. Η ποσότητα αυτή του υλικού μπορεί να περιγραφεί ως το πρώτο γέμισμα της αποθήκης που δημιουργείται από την κοιλότητα. Με την έναρξη της πρόωσης (traveling) , νέα ποσότητα υλικού οδηγείται εντός του κοίλου , αναγκάζοντας έτσι το υφιστάμενο υλικό να οδηγηθεί εκτός του κοίλου και εντός της ροής του πείρου με αποτέλεσμα να αναδευτεί εντός της ραφής. Για την αποτελεσματικότερη παραπάνω λειτουργία επιβάλλεται μικρή γωνία εκτροπής 2-4 μοίρες (tilt ή travel angle) μεταξύ του άξονα z της κεφαλής συγκόλλησης και του κάθετου άξονα των συντεταγμένων με τη φορά που φαίνεται στο Σχήμα 17 (b).



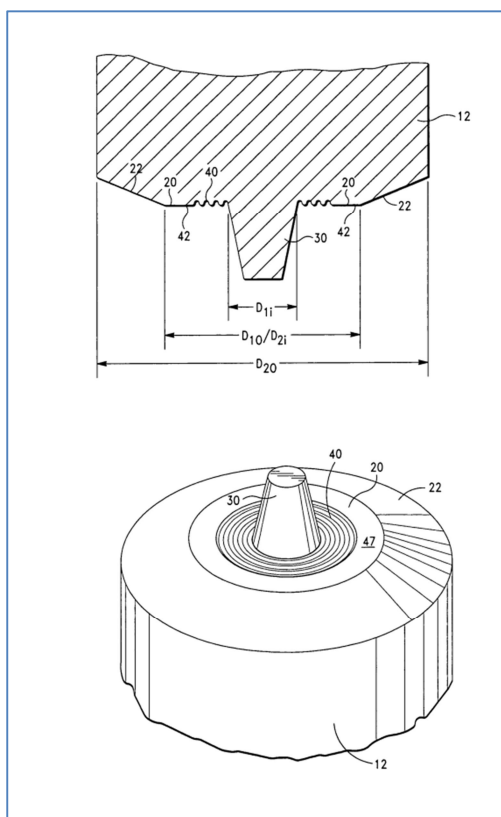
Σχήμα 17

Όπως φαίνεται η γωνία εκτρέπει την κεφαλή συγκόλλησης αντίθετα από τη φορά κατεύθυνσης της συγκόλλησης. Η εκτροπή αυτή καθιστά δυνατή την ανακυκλοφορία του υλικού εντός της κοιλότητας , δηλαδή την είσοδο και έξοδο από την «αποθήκη» και ταυτόχρονα επιτρέπει στην πίσω πλευρά του εργαλείου (trailing edge) να εφαρμόσει την αναγκαία δύναμη συμπίεσης στα ελάσματα. Η εκτροπή αυτή δεν μπορεί ωστόσο να εφαρμοστεί σε μη γραμμικές ραφές συγκόλλησης , εκτός αν το σύστημα της κεφαλής συγκόλλησης είναι πολυαξονικό , οπότε και έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται ανάλογα με τη φορά της ραφής συγκόλλησης.

Εξάλλου , διακρίνονται άλλοι δύο τύποι ώμων αναφορικά με την κλίση ή καμπυλότητα της επιφάνειάς τους , οι επίπεδοι και οι κυρτοί ώμοι. Οι απλοί επίπεδοι ώμοι δεν έχουν κάτι ιδιαίτερο στη γεωμετρία τους και χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές χωρίς προβλήματα. Σημειώνεται ότι η κατασκευή των εργαλείων συγκόλλησης που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσης εργασίας αφορούσε απλούς επίπεδους ώμους.

3.3.3 Ώμοι Κυρτού Προφίλ

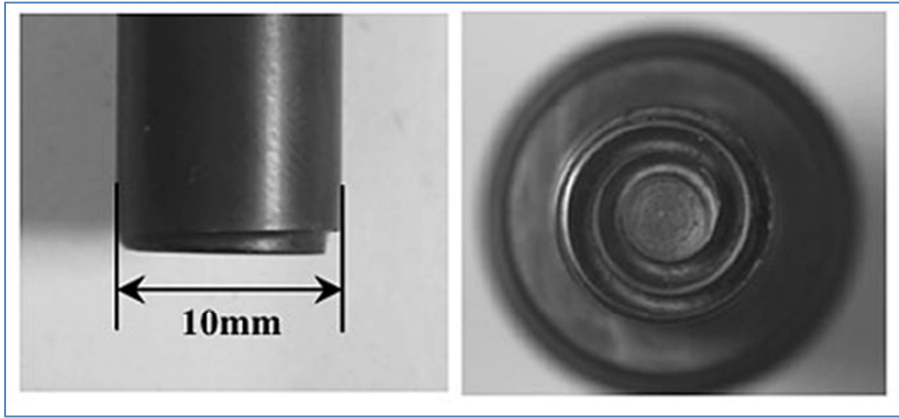
Ο ώμος του εργαλείου συγκόλλησης μπορεί να έχει κυρτό προφίλ, δηλαδή αντίθετη γωνία κλίσης ή φορά καμπυλότητας σε σχέση με τον κοίλο. Οι ώμοι αυτοί που είναι γνωστοί ως «convex shoulders» αρχικά δεν είχαν ιδιαίτερη επιτυχία σε εφαρμογές FSW καθώς η κυρτότητα της γεωμετρίας τους οδηγεί το υλικό μακριά από την περιοχή λειτουργίας του πείρου. Ωστόσο παρουσιάζουν ένα βασικό συγκριτικό πλεονέκτημα : Λόγω του κυρτού της γεωμετρίας τους δεν χρειάζεται να έρθει σε επαφή με τα δοκίμια η εξωτερική διάμετρος του ώμου, δηλαδή να επιτευχθεί πλήρης διείσδυση , αλλά αρκεί η επαφή οποιασδήποτε τομής μεταξύ των δύο διαμέτρων (ελάχιστη και μέγιστη). Με άλλα λόγια προσδίδεται μεγαλύτερη ευελιξία στη μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας του ώμου που έρχεται σε επαφή με τα δοκίμια. Το τελευταίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό όταν πρόκειται για συμβολές συγκόλλησης με μεγάλη ανοχή στην ευθυγράμμιση των επιφανειών των ελασμάτων ή για συμβολές συγκόλλησης με διαφορετικά πάχη ελασμάτων εκατέρωθεν. Σημειώνεται εδώ ότι η κυρτότητα μπορεί να είναι είτε κωνική είτε καμπύλη.



Σχήμα 18 : Ώμος Κυρτού Προφίλ (Convex)

Προκειμένου λοιπόν για την εκμετάλλευση των παραπάνω συγκριτικών πλεονεκτημάτων των ώμων κυρτού προφίλ δοκιμάστηκαν εργαστηριακά διάφοροι συνδυασμοί της κυρτής γεωμετρίας με άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κεφαλής συγκόλλησης, με σκοπό να συγκρατείται το υλικό εντός της περιοχής επιρροής του πείρου ,διατηρώντας ταυτόχρονα το κυρτό της γεωμετρίας και τα πλεονεκτήματα. Προέκυψε ότι αν η επιφάνεια του ώμου έχει πατούρες (scrolls) δηλαδή « χαραγμένα κανάλια» τα οποία μπορεί να είναι παραλληλόγραμμης ή ημικυκλικής διατομής τότε η ποιότητα της συγκόλλησης αυξάνεται σημαντικά.

Οι πατούρες αυτές μπορεί να έχουν διάφορα μοτίβα. Η πιο διαδεδομένη διάταξη είναι η σπειροειδής. Το κανάλι ξεκινά από την άκρη του ώμου και διαγράφοντας μία σπειροειδή τροχιά εισέρχεται στην περιοχή του πείρου. Το πλαστικοποιημένο υλικό οδηγείται έτσι από την εξωτερική διάμετρο του ώμου προς τον πείρο και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το τέλος της ραφής. Με τους ώμους αυτούς αποφεύγεται και η γωνία εκτροπής της κεφαλής (tilt),



Σχήμα 19

που χρειάζεται οπωσδήποτε στους ώμους κοίλου προφίλ (concave). Με την κατάργηση της γωνίας εκτροπής μπορούν να συγκολληθούν και ραφές που δεν είναι γραμμικές (αλλάζουν κατεύθυνση στο επίπεδο) χωρίς ακριβό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Στους ώμους κοίλου προφίλ, με την αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται μικρή ανύψωση της κεφαλής σε σχέση με το δοκίμιο, γεγονός το οποίο απουσιάζει στις εφαρμογές με scrolls, όπου μπορεί και να αυξηθεί σχετικά η ταχύτητα και να μειωθούν οι χρόνοι παραγωγής. Επιπλέον οι ώμοι με αυτή τη διαμόρφωση αυξάνουν την τριβή και την πλαστικοποίηση του υλικού στη ζώνη συγκόλλησης.

Εκτός από το μοτίβο με σπείρες, οι πατούρες μπορούν να χαραχθούν και με άλλες διατάξεις. Μία επίσης διαδεδομένη διάταξη πατούρων σε ώμους με κυρτό προφίλ είναι οι ομόκεντρες κυκλικές κατεργασίες με αυξανόμενη διάμετρο από κάτω προς τα πάνω και σταθερό βήμα.

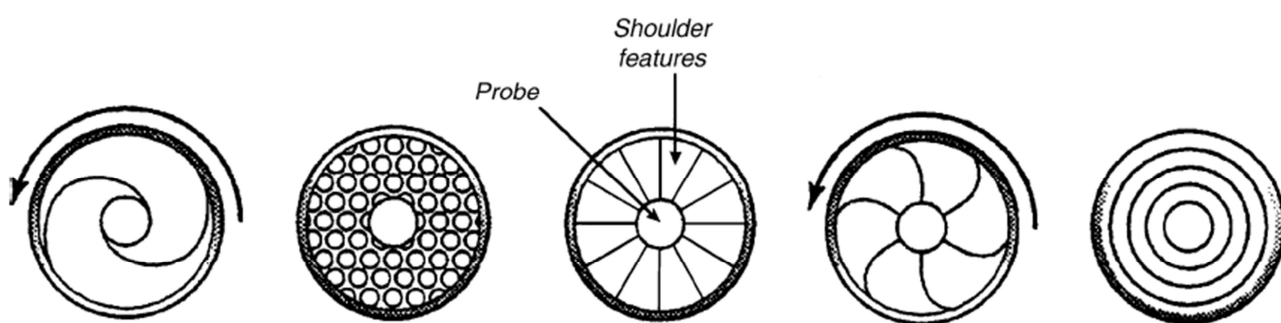


Σχήμα 20

Εξάλλου οι κατεργασίες ώμων αυτού του τύπου μπορούν να εφαρμοστούν και σε επίπεδους ώμους με ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά και σε ώμους κοίλου προφίλ, με λιγότερη επιτυχία.

3.3.4 Άλλες Διαμορφώσεις Επιφάνειας Ώμων

Προκειμένου για την αύξηση της ποσότητας του υλικού που παραμορφώνεται πλαστικά κατά τη συγκόλληση, με σκοπό την καλύτερη ανάμιξη των υλικών και κατ'επέκταση την καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης, έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία επιφάνειες ώμων με διάφορα χαρακτηριστικά, πέραν της λείας επιφάνειας ώμου. Έτσι προκύπτουν επιφάνειες ώμων με ομόκεντρους κύκλους, εξογκώματα, αυλακώσεις, ακτίνια, κυκλικούς τομείς και άλλες διαμορφώσεις, πολύπλοκες ή μη. Οι διαμορφώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε συνδυασμό με οποιαδήποτε από τις τρεις βασικές κατηγορίες ώμων, δηλαδή σε κοίλους (concave), σε κυρτούς (convex) –όπως εξάλλου είδαμε παραπάνω- και σε επίπεδους ώμους (flat).



Σχήμα 21 : Επιφανειακά Χαρακτηριστικά Ώμων (Shoulder Features)

Δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με τις διαμορφώσεις επιφανειών των ώμων συγκόλλησης αφορούν κυρίως σε ομόκεντρους κύκλους [18] και σε πατούρες (scoops) [19].



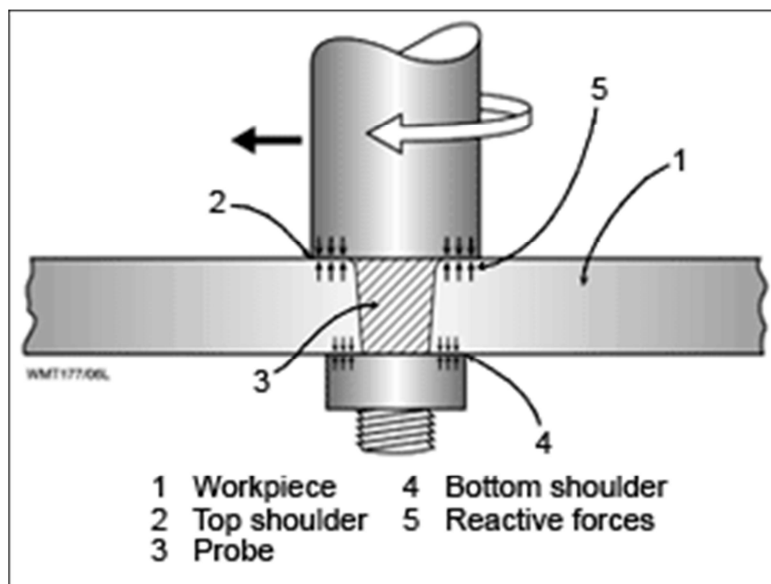
Εικόνα 17: Διαμόρφωση Επιφάνειας Ώμου



Εικόνα 18: Διάφορες Διαμορφώσεις Επιφάνειας Ώμων

3.3.5 Bobbin Stir Welding

Εδώ αξίζει να γίνει αναφορά σε μία παραλλαγή του εργαλείου συγκόλλησης που είναι διεθνώς πατενταρισμένη και αφορά στη γεωμετρία του ώμου [20]. Το βασικό γνώρισμα της μεθόδου η οποία ονομάζεται « Bobbin Stir Welding» είναι η ύπαρξη και ενός δεύτερου ώμου ο οποίος περιστρέφεται στην κάτω επιφάνεια των ελασμάτων. Μεταξύ των δύο ώμων παρεμβάλλεται ο πείρος (βλ Σχήμα 22).



Σχήμα 22

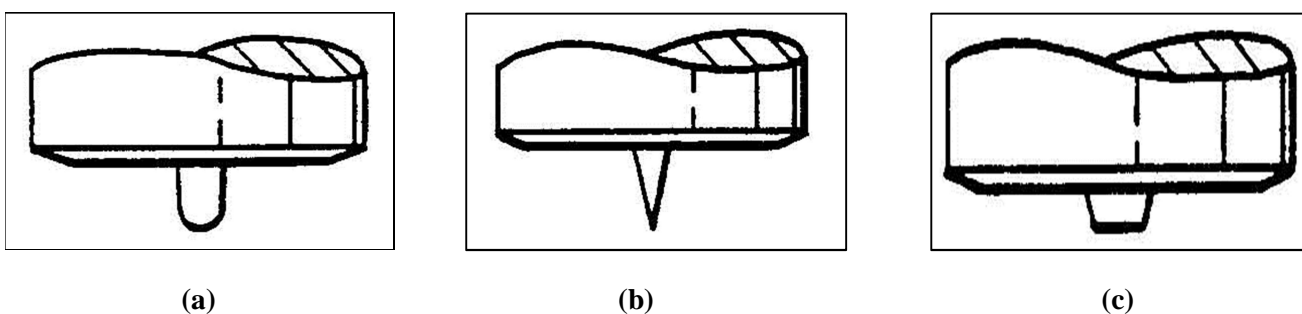
Με χρήση των εργαλείων αυτού του είδους μειώνεται η κάθετη αξονική δύναμη που εφαρμόζεται στα δοκίμια και επιπλέον οι μηχανικές δράσεις και αντιδράσεις εντός της ζώνης περιορίζονται καθώς είναι γενικά ίσες και αντίθετες. Τα πλεονεκτήματα των κεφαλών « Bobbin Tool» είναι περισσότερο εμφανή σε μεγάλα πάχη ελασμάτων καθώς έχουμε καλύτερη κατανομή της δια τριβής παραγόμενης θερμότητας και πλαστικής παραμόρφωσης. Δοκιμές σε κράματα αλουμινίου 6082-T6 πάχους 25[χλστ] έδειξαν πολύ καλά αποτελέσματα σε ποιότητα συγκόλλησης. Με τη μέθοδο μειώνονται δραστικά τα σφάλματα συγκόλλησης όπως η μερική διείσδυση (μη πλήρης διείσδυση) ή οι ατέλειες στη ρίζα (root defects).

Οι δύο ώμοι μπορούν να οδηγούνται από έναν κινητήρα ή να έχουν ανεξάρτητη κίνηση μεταξύ τους. Σε παραλλαγή της μεθόδου η απόσταση μεταξύ των δύο ώμων μπορεί να είναι ρυθμιζόμενη και κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης (adaptive technique). Η μέθοδος αυτή βρίσκει επίσης εφαρμογή σε συμβολές συγκόλλησης με επικάλυψη και στην κατασκευή μη τυποποιημένων κοίλων διατομών αλουμινίου με μεγάλο πάχος.

3.4 Σχεδιασμός Πείρου Εργαλείου Συγκόλλησης

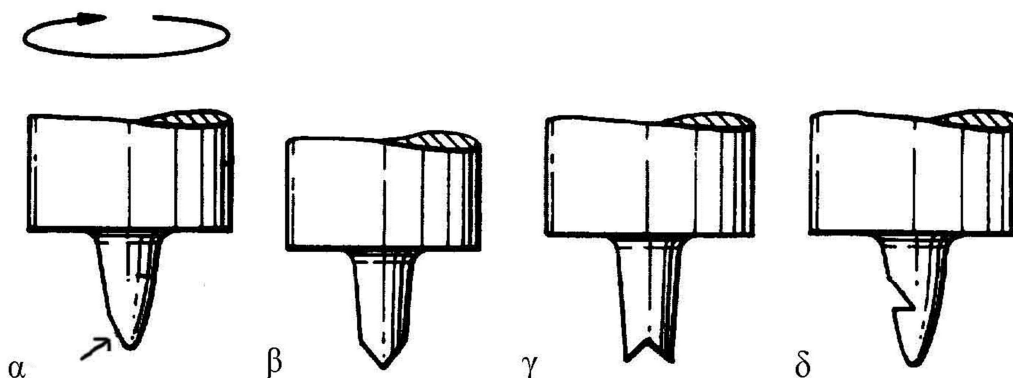
3.4.1 Εισαγωγή

Ανατρέχοντας στο διαδίκτυο αντιλαμβάνεται κανείς ότι οι παραλλαγές στη σχεδίαση του πείρου (pin ή probe) του εργαλείου συγκόλλησης είναι πάρα πολλές και διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα και με την κάθε εφαρμογή. Διαφορετικά υλικά και διαφορετικά πάχη δοκιμίων απαιτούν διαφορετική γεωμετρία πείρου. Υπάρχουν και γεωμετρίες πείρων που έχουν πατενταριστεί ή βρίσκονται στη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, για τις οποίες δεν υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία για εμπορικούς σκοπούς. Σε αυτήν την παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια καταγραφής και ομαδοποίησης των γεωμετριών των πείρων στην FSW που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, χωρίς όμως η καταγραφή αυτή να είναι περιοριστική.



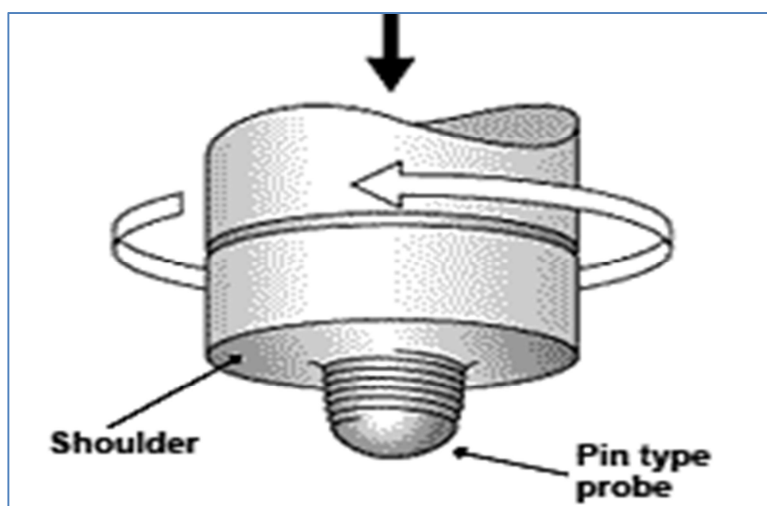
Σχήμα 23

Στην πρώτη παρουσίαση της μεθόδου στο TWI ο πείρος έχει κυλινδρικό σχήμα με σφαιρική απόληξη όπως στο Σχήμα 23 (a). Στη συνέχεια παρουσιάστηκε ο πείρος με κωνική διαμόρφωση Σχήμα 23 (b), ο οποίος έχει σαν πλεονέκτημα την εύκολη διείσδυση στο μέταλλο ενώ παραλλαγή του είναι ο κόλουρος κώνος ή κύλινδρος, Σχήμα 23 (c). Με τον καιρό παρουσιάστηκαν και άλλοι τύποι πείρων όπως πείροι τετράγωνης ή πολύγωνης διατομής, πείροι με προεξοχές, πείροι με πατούρες ή διαμορφώσεις και άλλοι συνδυασμοί.



3.4.2 Κυλινδρικοί Πείροι με Σπείρωμα και Σφαιρική Απόληξη

Όπως προαναφέρθηκε , ο κυλινδρικός πείρος με σπείρωμα και σφαιρική απόληξη ήταν ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε κατά την επίδειξη της αρχικής πατέντας το 1991 από το TWI [21]. Ο σχεδιασμός του έλαβε χώρα στα πλαίσια του συγχρηματοδοτούμενου τότε προγράμματος 5651 (project number) και από τότε αναφέρεται αρκετές φορές στη βιβλιογραφία ως εργαλείο συγκόλλησης 5651. Όπως και σε όλους τους πείρους με σπείρωμα ή ελικοειδή διαμόρφωση , ο ρόλος των σπειρών είναι να «σπρώχνουν» το πλαστικοποιημένο υλικό προς τα κάτω. Έτσι, αν το σπείρωμα του πείρου είναι αριστερόστροφο, τότε το διάνυσμα της περιστροφής του εργαλείου θα πρέπει να είναι προς τα κάτω (clockwise). Αντίστοιχα, αν το σπείρωμα του πείρου είναι δεξιόστροφο, τότε το εργαλείο θα πρέπει να περιστρέφεται αριστερόστροφα (counterclockwise).

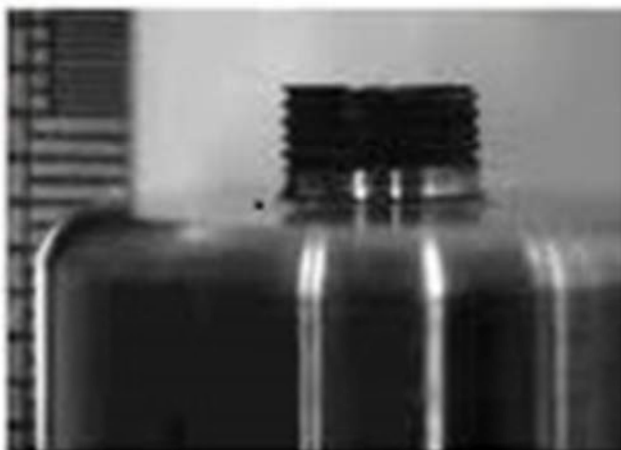


Σχήμα 24 : Κυλινδρικός Πείρος με Σπείρωμα και Σφαιρική Απόληξη

Η σφαιρική διαμόρφωση στο τελείωμα του πείρου αποσκοπεί περισσότερο στην ελαχιστοποίηση της φθοράς που παρατηρείται στον πείρο κατά το στάδιο της βύθισης στα δοκίμια όπως επίσης και της συγκέντρωσης τάσεων στο τελείωμα του σπειρώματος . Επιπρόσθετα συντελεί στη βελτίωση της ρίζας της συγκόλλησης , η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την απόληξη του πείρου. Έχει παρατηρηθεί ότι η ακτίνα καμπυλότητας που επιφέρει επιθυμητά αποτελέσματα κυμαίνεται σε τιμές γύρω από το 75% της διαμέτρου του πείρου. Η μηχανουργική κατεργασία που απαιτείται για την κατασκευή του κυλινδρικού πείρου με σπείρωμα και σφαιρική απόληξη είναι σχετικά απλή.

3.4.3 Κυλινδρικοί Πείροι με Σπείρωμα και Επίπεδη Απόληξη

Σε αντίθεση με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η σφαιρική απόληξη του πείρου και τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω , στις περισσότερες εφαρμογές FSW χρησιμοποιείται πείρος με επίπεδη απόληξη (flat bottom cylindrical pin). Η επιλογή του ενός ή του άλλου τύπου εργαλείου συγκόλλησης έχει αποτελέσει πεδίο διαφωνιών. Οι διαφωνίες αυτές σχετίζονται με τις διαφορές των ταχυτήτων του ρέοντος πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο.



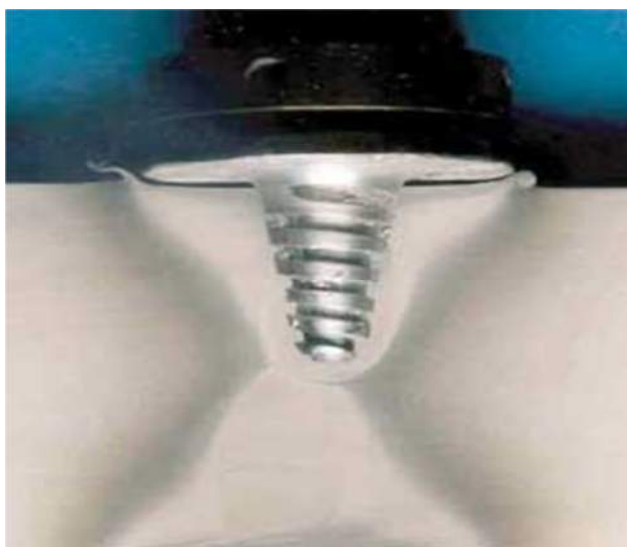
Εικόνα 19: Κυλινδρικός Πείρος με Σπείρωμα και Επίπεδη Απόληξη

Στον πείρο με σφαιρική απόληξη είναι προφανές ότι τα διανύσματα των ταχυτήτων είναι κατά απόλυτη τιμή σχεδόν ίδια, δηλαδή δεν έχουν μεγάλη διασπορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πείρος έχει απόλυτο κυλινδρικό σχήμα με αποτέλεσμα η γραμμική ταχύτητα να είναι ίδια καθ' όλο το ύψος του. Με άλλα λόγια έχουμε μικρό διαφορικό ταχυτήτων.

Αντίθετα , λόγω της σφαιρικής απόληξης, στον άλλο τύπο , έχουμε μεγάλο διαφορικό ταχυτήτων, εφόσον η διάμετρος του κυλίνδρου ξεκινάει από μία σταθερή τιμή και καθώς κατεβαίνουμε προς τα κάτω σχεδόν μηδενίζεται στο κάτω εφαπτόμενο άκρο της σφαίρας. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι το βασικό πλεονεκτήματα του πείρου με επίπεδη απόληξη σε σχέση με τον πείρο με σφαιρική απόληξη είναι η ικανότητά του να «πετάει» υλικό με μεγάλη ταχύτητα καθ' όλο το ύψος του και κατά συνέπεια καθ' όλο το πάχος των ελασμάτων. Επιπλέον η μηχανουργική κατεργασία για την κατασκευή του είναι πολύ πιο εύκολη. Τέλος ,σχετικά με τη φθορά του εργαλείου , αυτή μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης.

3.4.4 Πείροι με Γεωμετρία Κόλουρου Κώνου και Σπείρωμα

Οι κυλινδρικοί πείροι δοκιμάστηκαν και αποδείχθηκαν επαρκείς για συγκολλήσεις ελασμάτων αλουμινίου μέχρι πάχους 12 [χλστ]. Όσο όμως η έρευνα προχωρούσε σε μεγαλύτερα πάχη το κυλινδρικό σχήμα δεν κάλυπτε τις απαιτήσεις τόσο σε ποιότητα αλλά και σε ταχύτητα συγκόλλησης. Έτσι εισήχθησαν στην παραγωγή οι πείροι με γεωμετρία κόλουρου κώνου (truncated cone pins), οι οποίοι έχουν το πλεονέκτημα ότι λόγω της γεωμετρίας τους δέχονται χαμηλότερα διατμητικά φορτία τριβής από το περιρρέον υλικό. Το υψηλότερο σε τιμή διατμητικό φορτίο περιορίζεται στο άνω τους μέρος, όπου ο πείρος έχει και τη μεγαλύτερη διατομή άρα και αντοχή.

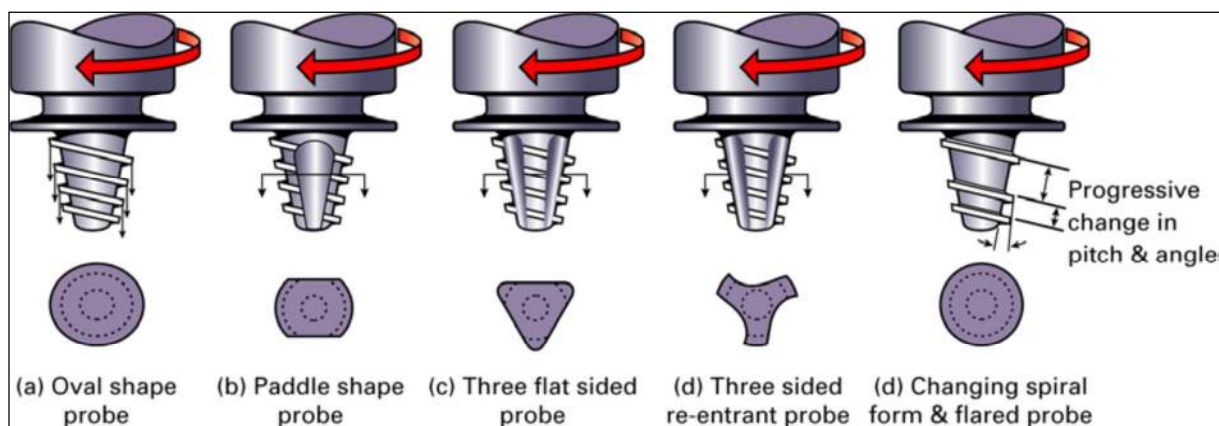


Εικόνα 20: Κωνικός Πείρος με Σπείρωμα

Όταν πρόκειται για συγκόλληση υλικού με αρκετά υψηλές τιμές αντοχής παρατηρείται συχνά αστοχία στις σπείρες των κοχλιοτομήσεων. Η δε ολική αφαίρεση του σπειρώματος από τη γεωμετρία δεν αποτελεί λύση καθώς τότε δεν επιτυγχάνεται επαρκής ανάδευση και οδήγηση του υλικού, δηλαδή απουσία των σπειρωμάτων δεν έχουμε την επιθυμητή ροή. Για τη λύση του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιείται στην FSW πείρος τύπου κόλουρου κώνου με κατεργασία βαθμωτής σπείρας (stepped spiral tool). Έτσι διατηρούνται τα πλεονεκτήματα που έχουμε στην ανάδευση και οδήγηση του υλικού, έχοντας εξασφαλίσει ταυτόχρονα την αντοχή του εργαλείου στα διατμητικά φορτία, καθώς στη σπείρα δεν έχουμε μικρά πάχη όπως στη σπειροτόμηση. Εξάλλου η κατεργασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κωνικούς πείρους, λόγω γεωμετρικού περιορισμού.

3.4.5 Κεφαλές τύπου Whorl

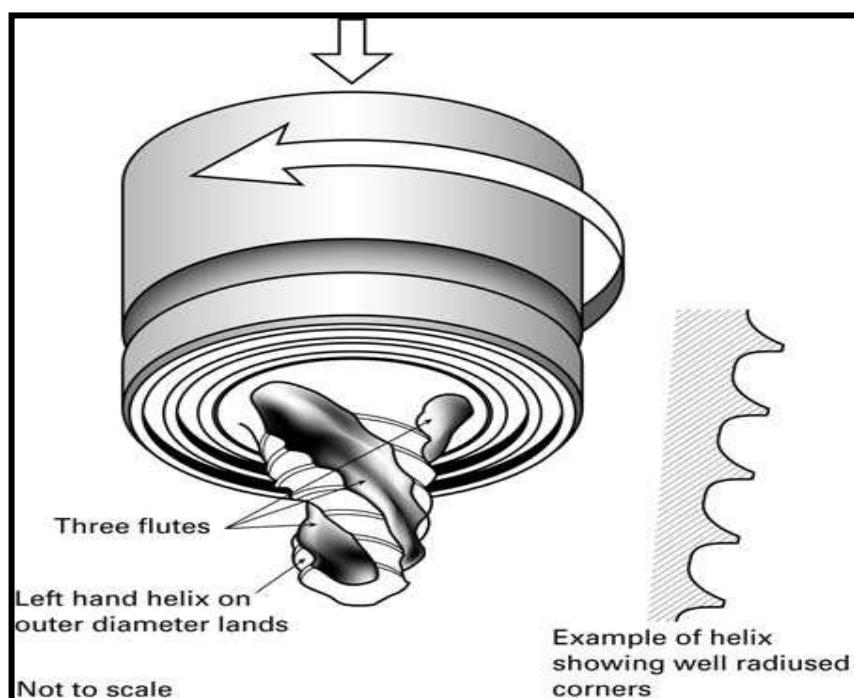
Με την πάροδο του χρόνου και την εισαγωγή της μεθόδου στην παραγωγική διαδικασία, το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (TWI) συνεχίζοντας την έρευνα παράλληλα με άλλους φορείς, επινόησε και κατηγοριοποίησε ορισμένες ομάδες εργαλείων συγκόλλησης ανάλογα με τη μορφή τους. Μία από τις πατέντες του TWI είναι και οι κεφαλές τύπου Whorl. Η κύρια διαφοροποίηση τους από τους συμβατικούς κοχλιοτομημένους πείρους έγκειται στο γεγονός ότι εδώ η ελίκωση η οποία «σπρώχνει» το υλικό προς τα κάτω δεν είναι μία απλή σπειροτόμηση όπως σε έναν τυποποιημένο κοχλία, αλλά μοιάζει περισσότερο με την ελίκωση ενός τρυπανιού, γεγονός το οποίο αυξάνει σημαντικά το επιθυμητό αποτέλεσμα (downward movement). Στο Σχήμα 24 d2 φαίνεται ότι η ελικοειδής αυτή διαμόρφωση μπορεί να είναι και προοδευτικά μειούμενου βήματος (pitch). Χαρακτηριστικό των κεφαλών τύπου Whorl είναι ότι σε σχέση με τους κυλινδρικούς πείρους ίδιας διαμέτρου, καταλαμβάνουν 60% λιγότερο όγκο. Μικρότερος όγκος επιφέρει και χαμηλότερες ασκούμενες τάσεις στο εργαλείο επομένως και δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας πρόωσης (traveling speed) για το ίδιο αποτέλεσμα.



Σχήμα 24

Η τυποποιημένη γεωμετρική μορφή των κεφαλών τύπου Whorl είναι κόλυρος κώνος με εξομαλυμένη σφαιρική απόληξη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 24 (α). Εξάλλου, στα παράπλευρα σχήματα (b), (c) και (d) ο κώνος έχει κατεργαστεί με τομές οι οποίες του προσδίδουν πεπλατυμένη, τριγωνική ή και ελικοειδή διατομή, γεγονός που μειώνει ακόμη περισσότερο τον όγκο που καταλαμβάνει. Για μία επιτυχή συγκόλληση, η σπειροτόμηση του εργαλείου θα πρέπει να ακολουθεί τον κανόνα που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να «σπρώχνει» το πλαστικοποιημένο υλικό προς τα κάτω. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 24 αν παρατηρήσει κανείς την κλίση της ελίκωσης σε σχέση με τη φορά του ανύσματος περιστροφής.

3.4.6 Κεφαλές τύπου MX Triflute

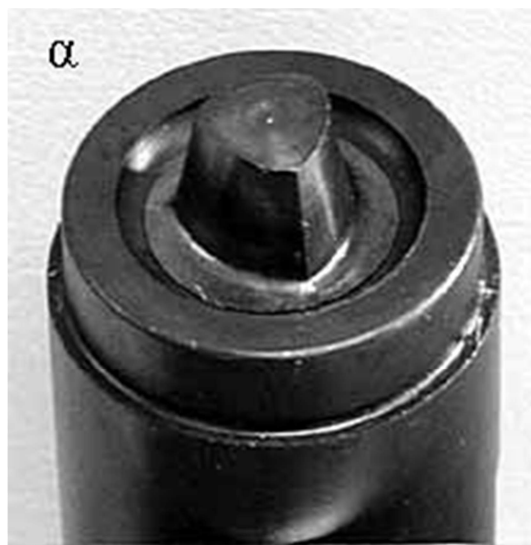


Σχήμα 25

Η Κεφαλή τύπου MX-Triflute (βλ Σχήμα 25) αποτελεί μία περαιτέρω παραλλαγή της τυπικής μορφής κεφαλής τύπου Whorl ως εξής: Στον κωνικό διαμορφωμένο πείρο με αριστερόστροφη ελίκωση έχουν προστεθεί τρεις δεξιόστροφες ελικοειδείς αυλακώσεις (flutes) με γωνία κλίσης περίπου ίση με αυτή του κώνου. Οι πρόσθετες αυτές αυλακώσεις μειώνουν ακόμα περισσότερο τον όγκο του πείρου σε σχέση με τον κυλινδρικό και συνεισφέρουν επιπρόσθετα στην αύξηση της ταχύτητας πρόωσης. Στα δεξιά του Σχήματος 25 φαίνεται ημιτομή του εργαλείου με το προφίλ της κοχλιοτόμησης. Σημειώνεται ότι ο όρος MX σε οποιαδήποτε ονομασία πείρου υποδηλώνει γενικά μηχανουργική κατεργασία που περιλαμβάνει σπειροτόμηση.

Ένα βασικό μέγεθος που υπολογίζεται για τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας των διαφόρων τύπων πείρων των εργαλείων συγκόλλησης στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι ο λόγος του όγκου που εκτοπίζει ο πείρος προς τον όγκο του πείρου. Οι πείροι τύπου MX-Triflute μπορούν να πλησιάσουν τιμές 2.5/1, ενώ ακολουθούν οι πείροι τύπου Whorl με ανώτατη τιμή 1.8/1.

3.4.7 Κεφαλές τύπου Trivex και MX-Trivex



Εικόνα 20: Κεφαλή Trivex



Εικόνα 21: Κεφαλή MX-Trivex

Οι κεφαλές τύπου Trivex έχουν σχήμα κόνου πυραμίδας με τρεις πλευρές οι οποίες είναι κυρτές. Η ονομασία αυτού του τύπου κεφαλών δόθηκε από τους Sherchiff και Colegrove ως σύμπτυξη των αγγλικών λέξεων Triangle (Τρίγωνο) και Convex (Κυρτό). Οι δε κεφαλές τύπου MX-Trivex είναι ουσιαστικά κεφαλές Trivex με κοχλιοτόμηση στις τρεις πλευρές του πείρου.

Σε εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια αλουμινίου 7075-T7351 και πάχους 6,35 [χλστ] εξήχθη το συμπέρασμα ότι η χρήση και των δύο τύπων πείρων επιφέρει μείωση 18-25% στις διατμητικές δυνάμεις και 12% στις κάθετες δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση, σε σχέση με τον πείρο MX-Triflute. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι και οι δύο τύποι πείρων παρήγαγαν συγκολλήσεις με αξιόλογες μηχανικές ιδιότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΗΣ FSW ,ΚΕΦΑΛΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Προκειμένου για την κατασκευή της μηχανής γραμμικής συγκόλλησης FSW που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας , έγινε έρευνα αγοράς για την προμήθεια κατάλληλης μεταχειρισμένης εργαλειομηχανής (φρέζας) με κριτήριο τα τεχνικά της χαρακτηριστικά και την τιμή διάθεσής της. Μετά την προμήθεια και την τοποθέτηση της εργαλειομηχανής στο Εργαστήριο Συγκολλήσεων της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ακολούθησε η μετατροπή της κεφαλής της εργαλειομηχανής με σκοπό να υποδέχεται κεφαλή συγκόλλησης FSW, ο σχεδιασμός και η κατασκευή μίας σειράς κεφαλών συγκόλλησης και τέλος ο σχεδιασμός και η κατασκευή της ιδιοσυσκευής συγκράτησης των δοκιμίων συγκόλλησης ,μετά από δοκιμές.

Η προμήθεια της εργαλειομηχανής έγινε από την εταιρεία ANATEKO A.E. η οποία έχει έδρα στη Μεταμόρφωση και έχει ως αντικείμενο το εμπόριο βιομηχανικού εξοπλισμού αλλά και τη βιομηχανοποίηση μεταλλικών κατασκευών.



Εικόνα 22 : Εργαλειομηχανή FSW εγκατεστημένη στη Σχολή NMM ΕΜΠ

Το εργοστάσιο της εταιρείας περιέχει και μηχανουργικό τμήμα , στο οποίο και βιομηχανοποιήθηκαν όλες οι απαιτούμενες προκατασκευές και κατασκευές που απαιτούνταν για τη μετατροπή της εργαλειομηχανής σε μηχανή γραμμικής συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση και οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

4.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Επιλογή Εργαλειομηχανής



Εικόνα 23 : Τραπεζί Εργαλειομηχανής FSW

Τα κυριότερα τεχνικά και μη χαρακτηριστικά τα οποία αναζητήθηκαν για την προμήθεια της μεταχειρισμένης φρέζας ήταν μεταξύ άλλων τα παρακάτω:

- Ημιαυτόματη πρόωση κατά το διαμήκη άξονα (άξονας x)
- Ημιαυτόματη ή εναλλακτικά χειροκίνητη πρόωση κατά τον εγκάρσιο άξονα (άξονας y)
- Χειροκίνητη κίνηση στον κάθετο άξονα (άξονας z)
- Ελάχιστη Διάσταση Τραπεζιού 800 x 250 [mm]
- Διαδρομή τραπεζιού τουλάχιστον 500 [mm] στον άξονα x
- Διαδρομή τραπεζιού τουλάχιστον 300 [mm] στον άξονα y
- Δυνατότητα κλίσης της κεφαλής στο επίπεδο xz (για επίτευξη του tilt – travel angle) τουλάχιστον από -15 ως +15 μοίρες
- Δυνατότητα μηχανικής ρύθμισης κατά θέσεις της ταχύτητας περιστροφής της κεφαλής (adjustable rotational speed) σε ικανό εύρος
- Δυνατότητα μηχανικής ρύθμισης κατά θέσεις της ταχύτητας πρόωσης (adjustable traveling speed) σε ικανό εύρος
- Στιβαρότητα της κατασκευής για τη διατήρηση της κάθετης αξονικής δύναμης που είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη που ασκείται από τα δοκίμια. (download axial force maintenance)
- Τριφασική Παροχή Ρεύματος
- Ανταγωνιστική τιμή διάθεσης
- Μακροχρόνια πίστωση για την εξόφληση

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής που προμηθεύτηκε φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 2 , 3 & 4.

Κατασκευαστής	Societatea Uzina Mecanica Cugir S.A
Προέλευση	Ρουμανία
Τύπος	UMC Cugir 602
Διατάσεις Τραπεζιού	1350 x 300 [mm]
Διαδρομή στον άξονα x	1000 [mm]
Πρόωση στον άξονα x	Ημιαυτόματη Ηλεκτρική
Διαδρομή στον άξονα y	350 [mm]
Πρόωση στον άξονα y	Ημιαυτόματη Ηλεκτρική
Διαδρομή στον άξονα z	400 [mm]
Πρόωση στον άξονα z	Χειροκίνητη με τραπεζοειδή ντίζα
Έυρος κλίσης στο επίπεδο xz	[-45 / +45] μοίρες
Εξωτερικές Διαστάσεις	1770 x 2526 x 1600 [mm]
Βάρος	2250 [kg]
Πίνακας 2 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φρέζας	

19	30	60	75	85	118	150	190	235	300	375	475	600	750	950
Πίνακας 3 : Ταχύτητες Πρόωσης Άξονας X [mm/min]														

30	37,5	47,5	60	75	95	118	150	190
235	300	375	475	600	750	950	1180	1500
Πίνακας 4 : Ταχύτητες Περιστροφής Κεφαλής [RPM]								

Όπως φαίνεται και παραπάνω η μηχανή εξασφαλίζει 270 διαφορετικούς συνδυασμούς πρόωσης και περιστροφής (18 X 15) , γεγονός το οποίο μπορεί να δώσει αρκετή ευελιξία σε δοκιμές και πειράματα τα οποία θα λάβουν χώρα στα πλαίσια μελλοντικών διπλωματικών εργασιών της Σχολής. Ωστόσο πριν την προμήθεια και έρευνα αγοράς είχε πραγματοποιηθεί ανεύρεση ενδεικτικών παραμέτρων σε δημοσιεύσεις που αφορούσαν κυρίως συγκολλήσεις FSW σε αλουμίνιο. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες εδώ:

Πάχος Δοκιμίων [mm]	Ποιότητα Υλικού	Ταχύτητα Πρόωσης [mm/min]	Ταχύτητα Περιστροφής [RPM]	Reference
2,3	ALU 2024-T3&7075-T6	138-336	300-983	[22]
3	ALU 2024-T3	120	400	[23]
6	ALU 6082-T6	280	-	[24]
6	ALU 5083-O	114	-	[24]
6	ALU 6061-T6	280	-	[24]
6,5	ALU 6061-T6	190	344	[25]

Πίνακας 5 :Παράμετροι FSW σε αλουμίνιο από δημοσιεύσεις

Είναι προφανές ότι η εργαλειομηχανή έχει τη δυνατότητα να καλύψει πλήρως τις παραπάνω παραμέτρους συγκόλλησης. Σημειώνουμε ότι σε αρκετές δημοσιεύσεις οι εκδότες αποφεύγουν να καθορίσουν τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν , κυρίως για εμπορικούς σκοπούς.

4.3 Σχεδιασμός και Κατασκευή Κεφαλής Συγκόλλησης

Έχοντας καλύψει τις ανάγκες μας σε ταχύτητες πρόωσης , περιστροφικές ταχύτητες και γενικά ότι αφορά στη μηχανολογική υποστήριξη της διαδικασίας , περνάμε πλέον στο σχεδιασμό και την κατασκευή του εργαλείου συγκόλλησης . Η φάση αυτή αποτελεί και τον παράγοντα κλειδί για την επιτυχή ή μη , ολοκλήρωση του όλου εγχειρήματος.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία και καταγράφοντας μία σειρά από σχεδιαστικές παραμέτρους καθώς και διαστασιολογήσεις των υφιστάμενων εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν σε δημοσιευμένες εργασίες ([12] , [13], [20] , [22] , [23] , [24] , [25] , [26]) ,ομαδοποιήθηκαν ορισμένες βασικές αρχές που αφορούν στο σχεδιασμό της κεφαλής συγκόλλησης και παραμετροποιήσεις που βασίζονται στο πάχος των δοκιμίων συγκόλλησης. Σημειώνεται ότι η κατεύθυνση που δόθηκε από τον καθηγητή ήταν για συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου με πάχος 6 [χλστ] , επομένως δόθηκε περισσότερη προσοχή σε αντίστοιχα papers. Παραθέτονται εδώ τα αποτελέσματα:

- 1) Η εξωτερική διάμετρος του πείρου (pin) της κεφαλής συγκόλλησης φαίνεται να είναι περίπου ίση με το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων ,επομένως για πάχος 6 [χλστ] η διάμετρος του πείρου μπορεί να λαμβάνει τιμές γύρω από Φ6 [χλστ].
- 2) Το κυλινδρικό μήκος του πείρου (pin) της κεφαλής συγκόλλησης , δηλαδή το ύψος του πείρου , καταγράφεται από την παραμετροποίηση οριακά μικρότερο από το πάχος των δοκιμίων. Εδώ για πάχος 6 [χλστ] προκύπτει κυλινδρικό μήκος από 5.5 -5.9 [χλστ] , η εκλογή δε της ακριβούς διάστασης εξαρτάται και από τις ανοχές τόσο των κινήσεων της εργαλειομηχανής (τζόγος) όσο και από την ανοχή στην κατεργασία της επιφάνειας της πλάκας πρόσδεσης των δοκιμίων αλλά και του πάχους των ελασμάτων αυτό καθ'αυτό. Σε καμία περίπτωση δεν είναι επιθυμητή η επαφή του κάτω μέρους του πείρου με τη χαλύβδινη πλάκα υποστήριξης των δοκιμίων . Αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του κυλινδρικού μήκους του πείρου με το πάχος των δοκιμίων ,τόσο ανεπαρκέστερη η ανάδευση και συγκόλληση του υλικού στη ρίζα συγκόλλησης.
- 3) Σε περίπτωση που ο πείρος φέρει κοχλιοτόμηση (σπείρωμα) ή οποιουδήποτε άλλου τύπου ελίκωση , όπως συμβαίνει στην πλειονότητα των περιπτώσεων- εξάλλου και στη δική μας περίπτωση , τότε η φορά της κοχλιοτόμησης ή ελίκωσης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το πλαστικοποιημένο υλικό να οδηγείται προς τα κάτω .Έτσι, αν το σπείρωμα του πείρου είναι αριστερόστροφο, τότε το διάνυσμα της περιστροφής του εργαλείου θα πρέπει να είναι προς τα κάτω (clockwise). Αντίστοιχα, αν το σπείρωμα του πείρου είναι δεξιόστροφο, τότε το εργαλείο θα πρέπει να περιστρέφεται αριστερόστροφα (counterclockwise).
- 4) Η διάμετρος του ώμου συγκόλλησης (shoulder) καταγράφεται από 3 έως 4 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη διάμετρο του πείρου . Για παράδειγμα για έλασμα πάχους 6 [χλστ] που απαιτεί πείρο διαμέτρου έστω 5.8[χλστ] προκύπτει διάμετρος ώμου μεταξύ Φ17.4 και Φ23.2 [χλστ]. Αυτό είναι λογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι ελάσματα

μεγαλύτερου πάχους απαιτούν μεγαλύτερη συνεισφορά θερμότητας και τριβής από τον ώμο του εργαλείου. Στην κατασκευή του εργαλείου μας σχεδιάστηκε η διάμετρος κοντά στο άνω όριο για λόγους ασφαλείας.

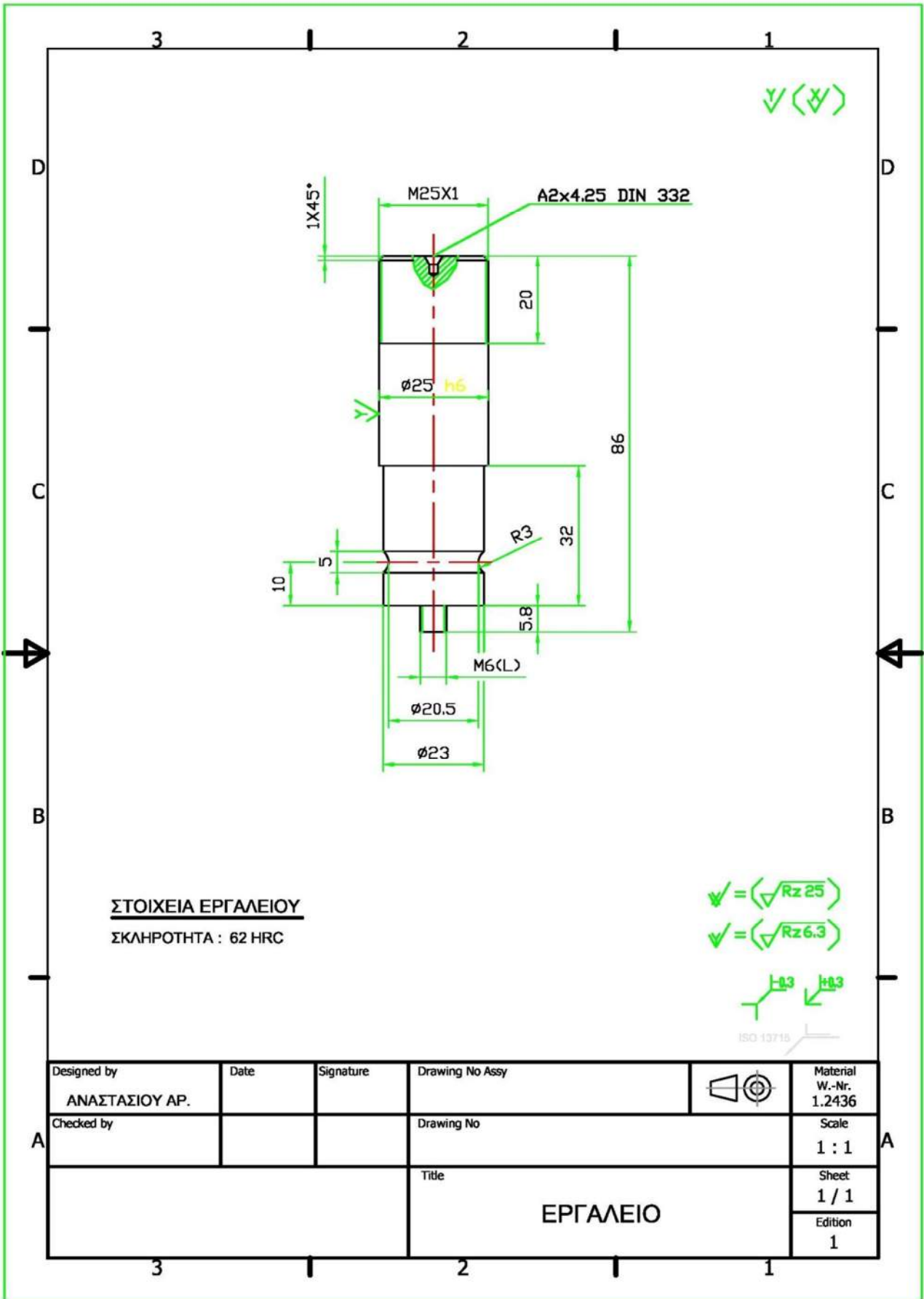
- 5) Σχετικά με την ποιότητα του υλικού κατασκευής της κεφαλής και λαμβάνοντας υπόψη τα των παραγράφων 3.2.1 και 3.2.2 του Κεφαλαίου 3 της παρούσης επιλέχθηκε εργαλειοχάλυβας AISI D2 (D2 tool steel) κατά ASME ή EN-GJSA-XNiCr20-2 (EN-JS3011) κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο (Euronorm). Πρόκειται για χρωμονικελιούχο κραματωμένο ανθρακοχάλυβα με την παρακάτω χημική σύνθεση:

C	Si	Mn	Ni	P	Cr	Cu
max 3	1.5 - 3	0.5 - 1.5	18 - 22	max 0.08	1 - 3.5	max 0.5

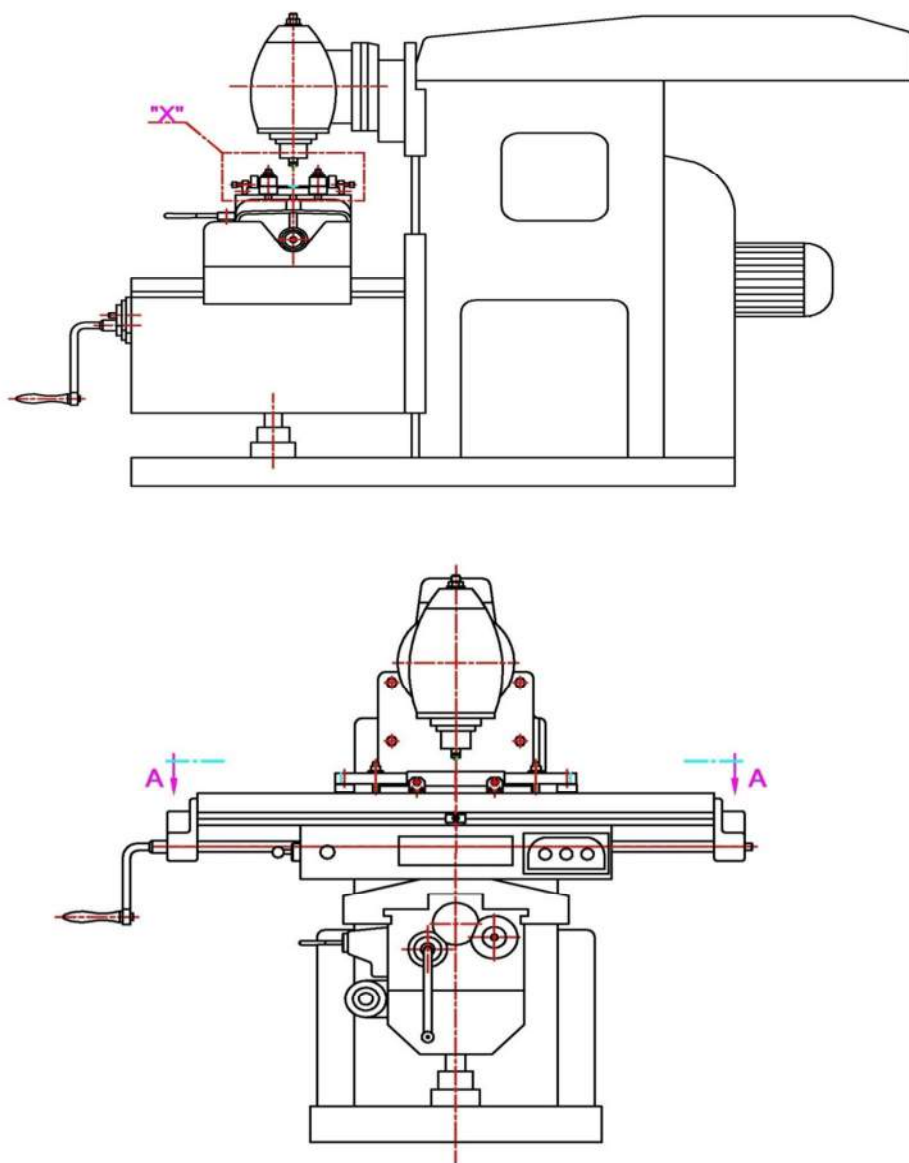
Πίνακας 6 : Χημική σύνθεση εργαλειοχάλυβα D2

Η επιλογή του έγινε περισσότερο βάσει της καταλληλότητάς του για FSW σε αλουμίνια ως 12 χιλιοστά πάχος (βλέπε Πίνακα 1 Παρ. 3.2.2) αλλά επίσης λόγω της διαθεσιμότητάς του στο εμπόριο , της καλής κατεργασιμότητάς του από μηχανουργικής απόψεως και επιπρόσθετα λόγω του λογικού του κόστους. Σημειώνεται ότι μετά το πέρας της μηχανουργικής κατεργασίας του εργαλείου ακολούθησε θερμική κατεργασία (βαφή) με σκοπό την αύξηση της σκληρότητας του υλικού σε 62 βαθμούς της κλίμακας Rockwell ή HRC 62 ([22] ,[24]). Το τελευταίο γίνεται για την αύξηση της αντοχής του εργαλείου στη φθορά την οποία υπόκειται αυτό κατά τη διαδικασία. Σημειώνεται ότι ιδιαίτερα ευαίσθητο σημείο αποτελούν οι σπείρες της ελίκωσης λόγω του μικρού πάχους.

Στην επόμενη σελίδα παρατίθεται το τελικό μηχανολογικό-κατασκευαστικό σχέδιο της κεφαλής συγκόλλησης που προσαρμόστηκε. Για τη σχεδιάσή του ελήφθησαν υπόψη όλα τα παραπάνω καθώς και η γνώση από τα κεφάλαια 2 και 3, δεδομένης και της εξειδίκευσης της εφαρμογής σε αλουμίνια πάχους 6-6.5 [χλστ]. Ο πείρος του εργαλείου μας που φαίνεται στο σχέδιο ανήκει στην ομάδα των κυλινδρικών πείρων με σπείρωμα και επίπεδη απόληξη « flat bottom cylindrical pin» . Στα πλαίσια της εργασίας και για τη διεύρυνση του πεδίου έρευνας των επόμενων διπλωματικών εργασιών που θα βασιστούν στην κατασκευή της μηχανής, κατασκευάσαμε άλλη μία κεφαλή με σφαιρικά απόληξη (round bottom cylindrical pin) όπως επίσης και άλλες δύο κεφαλές με κωνική απόληξη χωρίς σπείρωμα.

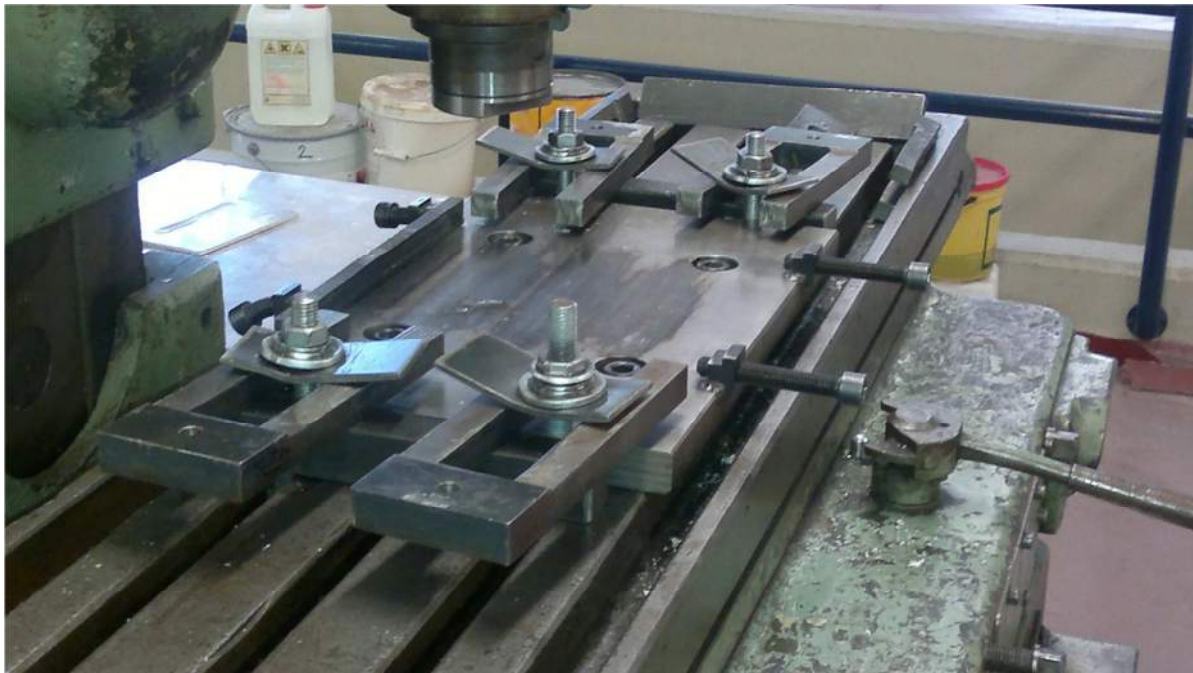


Όπως φαίνεται και στο παραπάνω μηχανολογικό σχέδιο, στο άνω μέρος υπάρχει αρσενικό σπείρωμα M 25 X 1 μήκους 20 [χλστ] καθώς και οπή στην άνω πλευρά προκειμένου για τη συναρμολόγηση του εργαλείου επί της κεφαλής της εργαλειομηχανής. Η συναρμολόγηση γίνεται με τη χρήση ενός ενδιάμεσου ειδικού τεμαχίου που αποκαλείται «τσιμπίδι» και έχει αντίστοιχο θηλυκό σπείρωμα. Το συνολικό μήκος του εργαλείου δεν καθορίζεται στη βιβλιογραφία καθώς δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Με βάση την καλή πρακτική επιλέχθηκε μικρό σχετικά μήκος ($L=86$ [χλστ]) για την αποφυγή υψηλών καμπτικών ροπών και λαμβάνοντας υπόψη την ελεύθερη διαδρομή της κεφαλής της εργαλειομηχανής στον άξονα Z.



Σχήμα 26 a&b : Μηχανολογικά Σκαριφήματα υφιστάμενης εργαλειομηχανής FSW

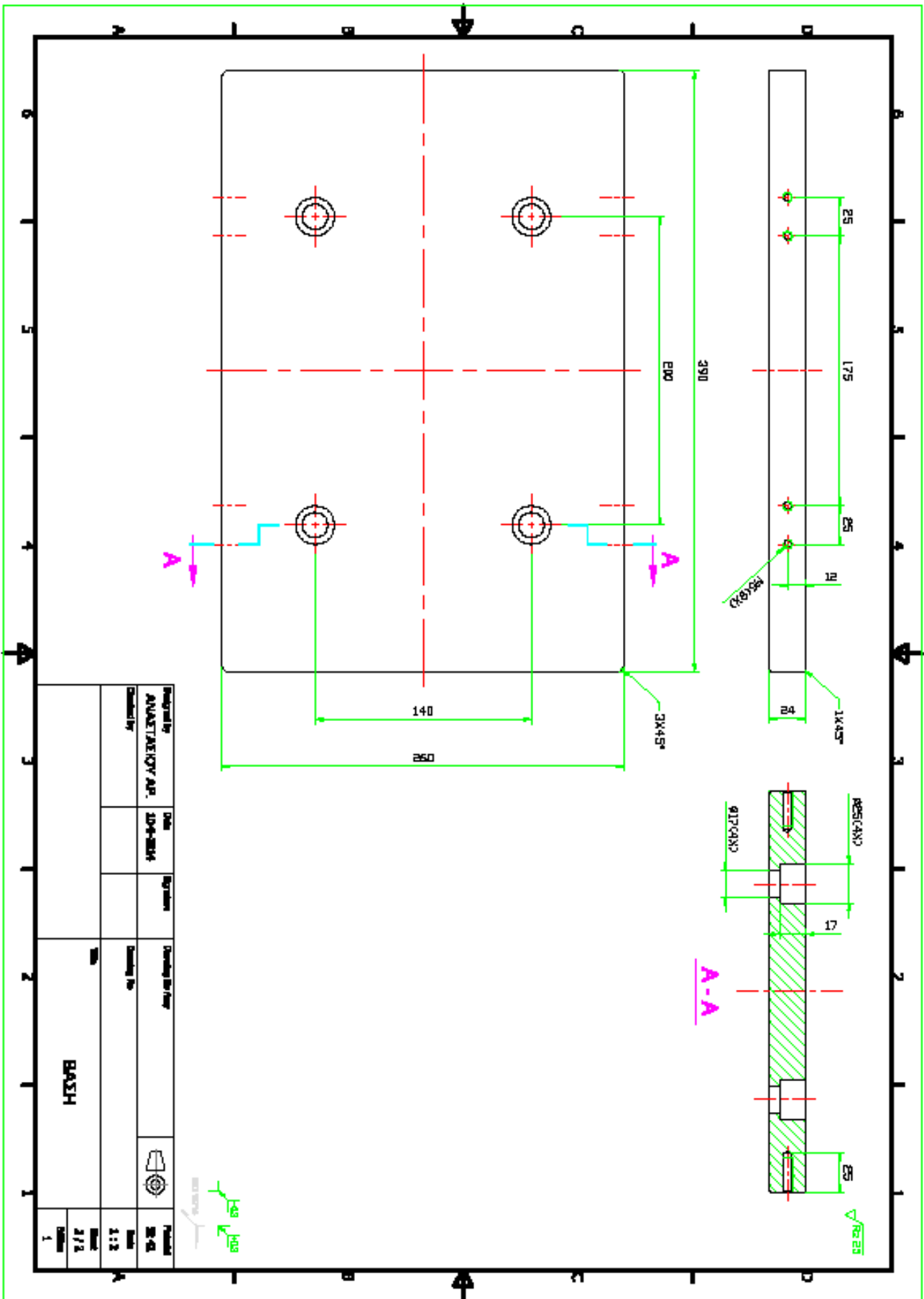
4.4 Σχεδιασμός και Κατασκευή Ιδιοσυσκευής Συγκράτησης Δοκιμίων

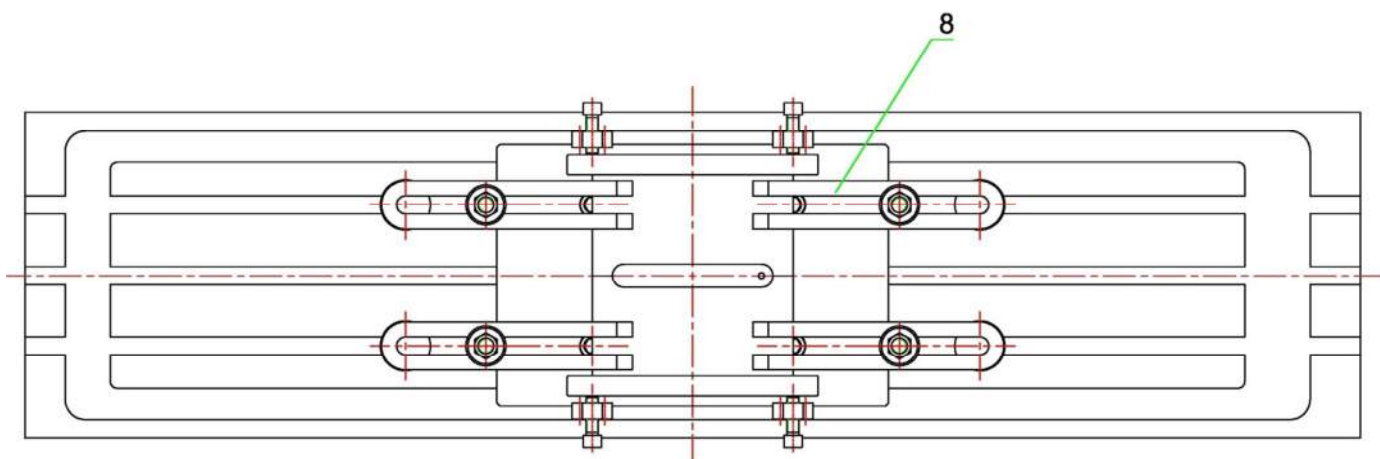


Εικόνα 24 : Ιδιοσυσκευή Συγκράτησης Δοκιμίων

Η αποτελεσματική συγκράτηση των προς συγκόλληση ελασμάτων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ,στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Εξάλλου, ένας από τους λόγους που η FSW καθίσταται αναποτελεσματική σε ραφές συγκόλλησης με πολύπλοκη γεωμετρία είναι η αδυναμία σωστής συγκράτησης-σύσφιξης των ελασμάτων ή το εξαιρετικά υψηλό κόστος για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στην δική μας περίπτωση όπου η εφαρμογή περιορίζεται σε γραμμική συγκόλληση δια τριβής και πολύ περισσότερο σε δοκίμια συγκόλλησης με σταθερές εξωτερικές διαστάσεις , εδώ 300 X 100 [χλστ] , τα πράγματα είναι απλούστερα.

Ως βάση έδρασης των δοκιμίων συγκόλλησης χρησιμοποιείται μία χαλύβδινη πλάκα διαστάσεων 390 X 260 [χλστ] η οποία από αρχικό πάχος 25[χλστ] έχει πλανιστεί στις δύο μεγάλες της επιφάνειες ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η συνεπιπεδότητα καθ'όλο το μήκος της συγκόλλησης. Το τελικό της πάχος μετά την κατεργασία προέκυψε στα 24 [χλστ] ως έγγιστα. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχέδιο, η βάση έδρασης φέρει και 4 οπές διαμέτρου Φ17 με πατούρα για κοχλία M16 τύπου Allen σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους προκειμένου για την πρόσδεση στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Η πλάκα είναι επίσης εφοδιασμένη με αποσυναρμολογούμενα εξαρτήματα στις δύο διαμήκεις πλευρές της που εξασφαλίζουν το γώνιασμα των δοκιμίων , την παραλληλότητα δηλαδή της ραφής συγκόλλησης με τον άξονα x της διαδρομής της εργαλειομηχανής.





Σχήμα 27 : Κάτοψη Ιδιοσυσκευής Συγκράτησης Δοκιμίων σε απαρτία

Τα δοκίμια συγκρατούνται επί της μηχανοποιημένης βάσης έδρασης με τη βοήθεια ειδικών σφιγκτήρων τύπου «φουρκέτας» περισσότερο γνωστά και ως clamps, τέσσερα στον αριθμό. (βλ. Σχήμα 26 Pos 8).

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η σχεδίαση της πλάκας έδρασης των δοκιμίων πρέπει να γίνεται και με κριτήριο τη διαχείριση της θερμότητας που παράγεται δια τριβής (thermal management) στα πλαίσια μίας γενικής διαχείρισης θερμότητας στο σύστημα : Το σύστημα αποτελείται από την πλάκα έδρασης , τα δοκίμια , την κεφαλή συγκόλλησης και την άτρακτο της εργαλειομηχανής. Ο σκοπός της μελέτης , η οποία ανάγεται σε πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας, είναι κατά κύριο λόγο η συγκράτηση της θερμότητας εντός των ορίων των δοκιμίων συγκόλλησης για την επάρκεια του φαινομένου της θερμομηχανικής παραμόρφωσης και αντίστοιχα την απαγωγή της θερμότητας από την άτρακτο της εργαλειομηχανής για την αποφυγή θερμικών παραμορφώσεων. Ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, τόσο η βάση έδρασης όσο και το εργαλείο συγκόλλησης μπορούν είτε να ψύχονται είτε να θερμαίνονται. Στην περίπτωσή μας ωστόσο , αφενός επειδή πρόκειται για αλουμίνιο και δεν υπάρχει ανάγκη διαχείρισης της θερμότητας λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του και αφετέρου λόγω αύξησης του κόστους της κατασκευής , δεν προβλέφθηκε ψυκτική ή θερμαντική διάταξη στο σχεδιαζόμενο σύστημα.

Με την ολοκλήρωση και συναρμολόγηση όλων των επιμέρους προκατασκευών στη μηχανή πραγματοποιήθηκαν περιορισμένες στον αριθμό δοκιμές με διάφορες προώσεις και ταχύτητες περιστροφής με ικανοποιητικό εξ'αρχής αποτέλεσμα συγκόλλησης δια οπτικού και τυπικού μηχανικού ελέγχου. Έτσι, η μηχανή μεταφέρθηκε από τις εγκαταστάσεις της εταιρείας ANATEKO A.E. στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα πειράματα συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματοποιήθηκαν ομοειδείς συγκολλήσεις των κραμάτων αλουμινίου 5083-H111.

5.1 Ποιότητες Υλικών Δοκιμίων και Μηχανικές Ιδιότητες

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ήταν τα ακόλουθα:

- Ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5083- H111

Όλα τα ελάσματα είχαν πάχος 6 [χλστ] και η χημική σύνθεση του κράματος αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε όπως επίσης και οι μηχανικές ιδιότητές του , παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Στοιχείο	Σύσταση (% κ.β.)
Si	0.4
Fe	0.4
Cu	0.1
Mn	0.4-1.0
Mg	4.0-4.9
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.05-0.25
A	Balance

Πίνακας 7.1 : Χημική σύσταση του κράματος AA5083-H111.

Κράμα Αλουμινίου	Σκληρότητα	Μέτρο Ελαστικότητας	Σημείο Τήξης	Πυκνότητα
AA5083-H111	96 [HV]	70,3 [Gpa]	577 [°C]	2,66 g/cm ³

Πίνακας 7.2: Μηχανικές Ιδιότητες Υλικών Δοκιμίων

5.2 Προετοιμασία των Δοκιμίων για Μεταλλογραφική Μελέτη

Μετά τη συγκόλληση, τα δοκίμια που πρόκειται να μελετηθούν, πρέπει να υποστούν μια σειρά διεργασιών με σκοπό τη σωστή προετοιμασία της επιφάνειάς τους.

5.2.1 Κοπή Δοκιμίων

Το πρώτο βήμα της προετοιμασίας των δοκιμίων για την αποκάλυψη της μικροδομής τους είναι η κοπή τους στο κατάλληλο μέγεθος και στα κατάλληλα σημεία για περαιτέρω μελέτη. Τα δοκίμια κόπηκαν εγκάρσια στη ραφή, έτσι ώστε να είναι διακριτή η τομή της επιφάνειας που συγκολλήθηκε. Οι τομές πραγματοποιήθηκαν σε τυχαία σημεία των δοκιμίων, με σκοπό την παρατήρηση και παρουσίαση αυτών, έτσι ώστε να γίνει μελέτη και παρατήρηση της προκύπτουσας μικροδομής. Η κοπή πραγματοποιήθηκε σε δισκοπρίονο του οίκου Struers τύπου Discotom 50 που παρουσιάζεται στην εικόνα 24.



Εικόνα 25: Δισκοπρίονο ENT



Εικόνα 26: Μηχάνημα Λείανσης

5.2.2 Λείανση- Στίλβωση

Επόμενο βήμα αποτελεί η προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμίων για μεταλλογραφική παρατήρηση, με λείανση και στίλβωση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι η συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers (εικόνα 25). Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 50- 500 [RPM]. Για την ψύξη του δείγματος κατά την λείανση, χρησιμοποιείται παροχή νερού ενσωματωμένη στη συσκευή. Όταν το δοκίμιο έχει λειανθεί με το γυαλόχαρτο #80 πραγματοποιείται ξανά η ίδια διαδικασία λείανσης, χρησιμοποιώντας πιο λεπτόκοκκο γυαλόχαρτο έως ότου το δοκίμιο έχει ικανοποιητική επιφάνεια. Για τη λείανση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά SiC με μέγεθος κόκκων 80, 220, 500, 800, 1000, 1200, 2400 και 4000 grit [dots/in²]. Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της λείανσης ακολουθεί η στίλβωση. Χρησιμοποιείται δίσκος στίλβωσης από ειδικό βελούδο με τη βοήθεια πάστας αλουμίνας (Al₂O₃) μεγέθους κόκκων 1[μm] και 0,1 [μm].

5.2.3 Χημική Προσβολή

Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται για την αποκάλυψη της μικροδομής των δοκιμίων και την παρατήρησή τους στο οπτικό μικροσκόπιο. Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά γυαλισμένη επίπεδη επιφάνεια. Για την παρούσα πειραματική διαδικασία, η προσβολή του αλουμινίου έγινε με χημική και ηλεκτρολυτική προσβολή. Έπειτα από διάφορες δοκιμές με αντιδραστήρια, επιλέχθηκαν εκείνα, τα οποία παρείχαν τη δυνατότητα βέλτιστης παρατήρησης της μικροδομής. Για τη χημική προσβολή τα δοκίμια AA5083-H111 εμβαπτίστηκαν για 5-8 δευτερόλεπτα σε τροποποιημένο διάλυμα Poulton του οποίου η σύσταση φαίνεται παρακάτω:

- 20 [ml] Διάλυμα Poulton
- 10 [ml] HNO₃
- Διάλυμα 4,8 [gr] Cr₂O₃ σε 16 [ml] H₂O.

Διάλυμα Poulton:

- 12 [ml] HCl
- 1 [ml] HF
- 6 [ml] HNO₃
- 1 [ml] H₂O.

5.3 Οπτική Στερεοσκοπία

Για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο LEICA MZ6 (εικόνα 26), του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Το στερεοσκόπιο διαθέτει βηματικές μεγεθύνσεις (0,63x, 0,80x, 1,00x, 1,25x, 1,6x, 2,0x, 2,5x, 3,2x, 4,0x) για να είναι δυνατή η κατάλληλη μακροσκοπική εξέταση των δειγμάτων.



Εικόνα 27: Το Στερεοσκόπιο του ENT



Εικόνα 28: Το Οπτ. Μικροσκόπιο του ENT

Τα δοκίμια παρατηρήθηκαν αρχικά μακροσκοπικά, στο στερεοσκόπιο του εργαστηρίου, όπου και φωτογραφήθηκαν.

5.4 Οπτική Μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία είναι η μέθοδος της παρατήρησης της μικροδομής των εξεταζόμενων δοκιμίων. Στη μελέτη με το οπτικό μικροσκόπιο, η επιφάνεια ενός κατάλληλα προετοιμασμένου δοκιμίου εξετάζεται είτε πριν (για τον εντοπισμό ατελειών) είτε μετά από προσβολή. Το δοκίμιο πρέπει να είναι σωστά προετοιμασμένο, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή παρατήρηση της μικροδομής. Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση και η ερμηνεία των ζωνών συγκόλλησης, η σύγκριση της μεταξύ τους μικροδομής, καθώς και οι αλλαγές της μικροδομής σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Για να καταστεί αυτό δυνατό, προηγείται χημική προσβολή των δειγμάτων με τα διαλύματα που προαναφέρθηκαν. Για την μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το LEICA DM ILM (εικόνα 27), του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Πρόκειται για ένα οπτικό μικροσκόπιο ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει ενσωματωμένους φακούς x10, x20, x50 και x100 και προσοφθάλμιο φακό x10. Με τη χρήση αυτού του οπτικού μικροσκοπίου δίνεται δυνατότητα μεγέθυνσης έως και x1000. Διαθέτει τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας (x,y, α-περιστροφή) με δυνατότητα στήριξης φορτίου και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35W.

5.5 Σκληρομετρήσεις

Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται ως η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από από αυτή του εξεταζόμενου υλικού. Η σκληρότητα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διείσδυση του σκληρού υλικού αναφοράς. Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με διαφορετικό διεισδυτή, κλίμακα επιβαλλόμενων φορτίων και μετρούμενα μεγέθη.

5.5.1 Μικροσκληρομετρήσεις

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Vickers, όπου το ρόλο του διεισδυτή παίζει μια αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής 136 μοιρών. Οι τιμές Brinell (HB) και Vickers (HV) συμπίπτουν, σχεδόν, μέχρι περίπου την τιμή 400. Για τιμές σκληρότητας μεγαλύτερες των 400 η μέθοδος Vickers είναι ακριβέστερη. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης κάθετα και παράλληλα σε τομή των δοκιμίων, ανά 500 [μm]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια που κρίθηκαν βέλτιστα, είτε σε αυτά όπου οι ατέλειές τους ήταν αποδεκτές. Το φορτίο ήταν 300 [gr] και ο χρόνος διείσδυσης ήταν 15 [sec]. Για τη μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Πρόκειται για μικροσκληρόμετρο της εταιρίας Wolpert Wilson Instruments, τύπου 402NVD.



Εικόνα 29: Το Μικροσκληρόμετρο του ENT

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1. Πειράματα προς εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων

Πραγματοποιήθηκαν ραφές συγκόλλησης FSW σε πλάκες του κράματος αλουμινίου 5083-H111, πάχους 6mm, κάνοντας χρήση επτά διαφορετικών σετ παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Σκοπός των δοκιμών είναι η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για τη συγκόλληση του συγκεκριμένου κράματος.

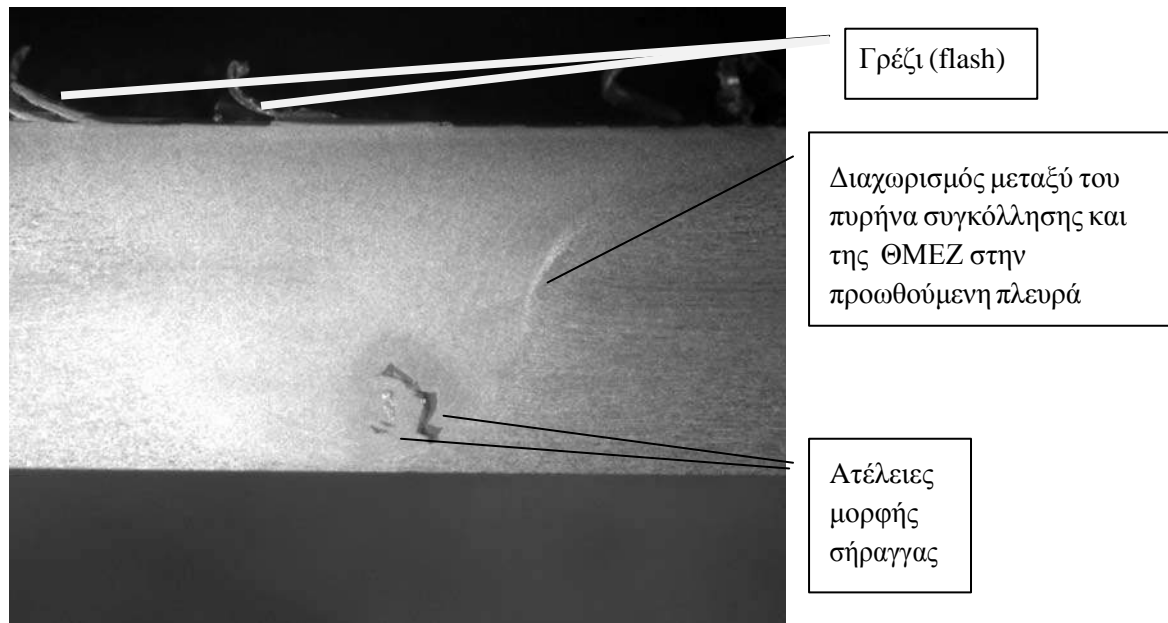
No.	Ταχύτητα Περιστροφής [RPM]	Ταχύτητα Πρόωσης [mm/min]	Τύπος Πείρου Συγκόλλησης	Κλίση Εργαλείου Συγκόλλησης
1	375	85	Κωνικός	-
2	475	85	Κωνικός	-
3	600	85	Κωνικός	-
4	300	118	Με σπείρωμα	-
5	375	85	Με σπείρωμα	-
6	600	85	Κωνικός	2
7	600	85	Με σπείρωμα	2

Πίνακας 8 : Παράμετροι πραγματοποίησης των συγκολλήσεων.

Η κλίση του εργαλείου συγκόλλησης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της συγκόλλησης, επηρεάζοντάς την είτε θετικά είτε αρνητικά. Σε όλες τις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι αρκετά ευδιάκριτες οι ζώνες που δημιουργούνται. Παρατηρείται επίσης, η αλληλοεξάρτηση των ταχυτήτων πρόωσης και περιστροφής και το πως αυτές συμβάλλουν στην καλή ανάδευση του υλικού, στο μέγεθος των ατελειών, καθώς και στο είδος τους. Όλες οι συγκολλήσεις του κράματος AA5083-H111 πραγματοποιήθηκαν με διεύθυνση συγκόλλησης κάθετη στη διεύθυνση της έλασης. Έγιναν πρώτα έξι δοκιμές με πέρασμα σε πλάκα (bead on plate) (πίνακας 8, αρ 1-5, 7) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ομοειδής συγκόλληση (αρ.6) κάνοντας χρήση των βέλτιστων λειτουργικών παραμέτρων. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα δοκίμια του κράματος AA5083- H111 πριν από τη στερεοσκοπική και μικροσκοπική παρατήρησή τους, προσβλήθηκαν με το τροποποιημένο χημικό διάλυμα Roulton. Οι συγκολλήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια ταξινομημένες (πίνακας 8), με κριτήριο το μέγεθος και το είδος των ατελειών που εμφανίζονται στις ραφές των συγκολλήσεων, σε φθίνουσα σειρά. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μακροσκοπική μελέτη των δοκιμών (μακρογραφίες, σχολιασμός) και ακολουθούν τα αποτελέσματα της μικροσκοπικής μελέτης.

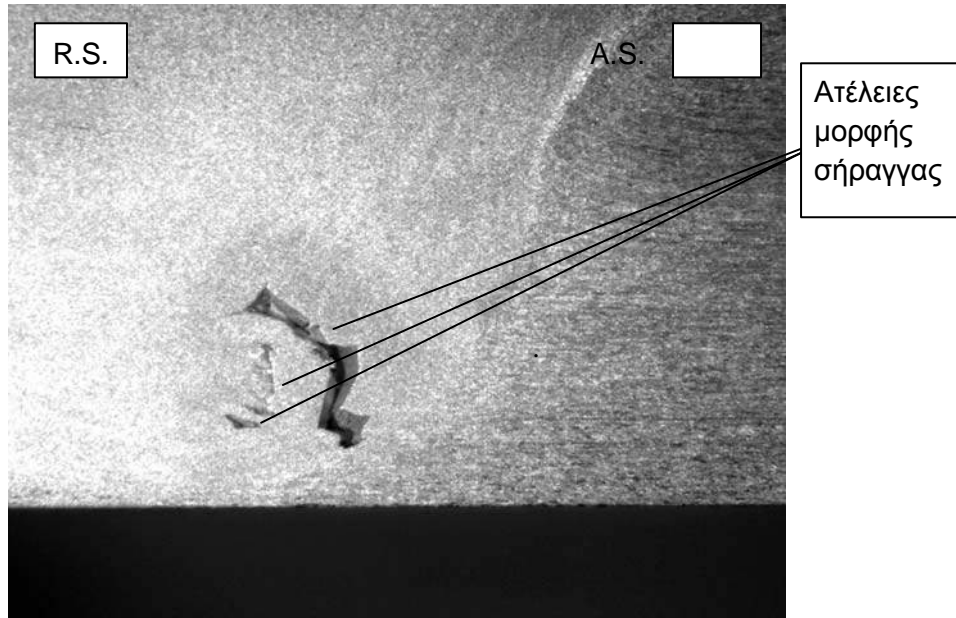
Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
118 mm/sec	300 rpm	Με σπείρωμα

Για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, επιλέχθηκε υψηλή ταχύτητα πρόωσης και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Το αποτέλεσμα της πρώτης συγκόλλησης καθορίζει τις αυξομειώσεις που θα γίνουν στην επιλογή των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες δοκιμές, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση μεγέθους ή απαλοιφή των ατελειών. Στόχος των δοκιμών είναι η επίτευξη ενός βέλτιστου συνδυασμού λειτουργικών παραμέτρων.



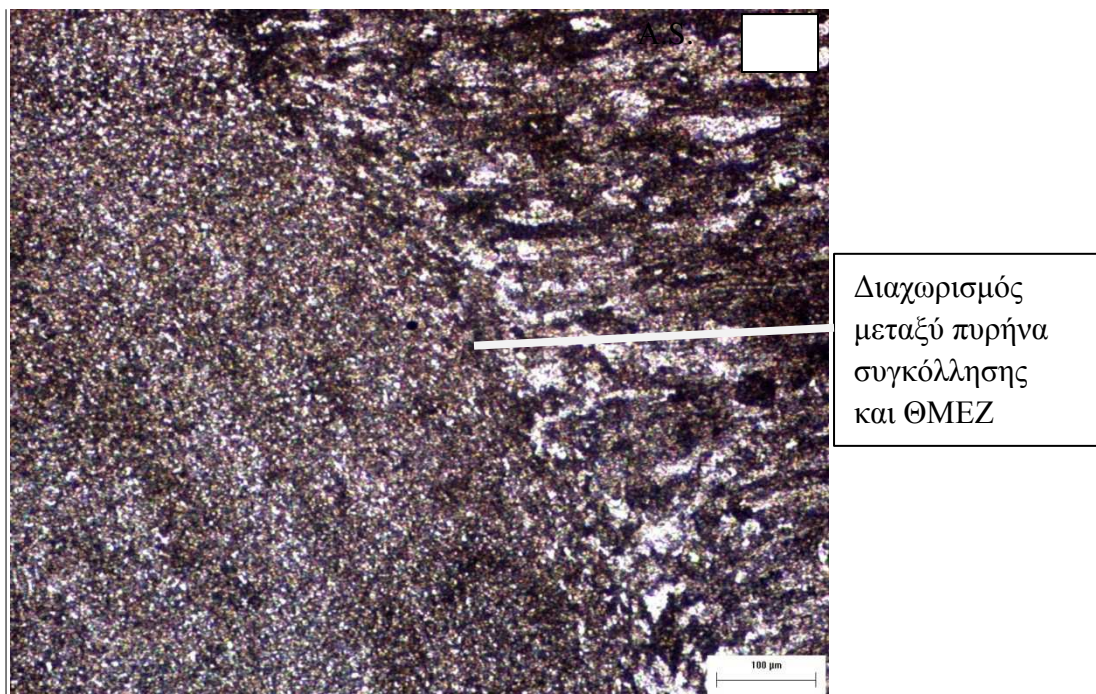
Εικόνα 30 : Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

Από τη μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου (εικόνα 30) συμπεραίνεται ότι παρουσιάζονται ατέλειες πολύ μεγάλου μεγέθους που συνεχίζονται καθ'όλο το μήκος της ραφής (ατέλεια μορφής σήραγγας). Επιπρόσθετα, στην επιφάνεια περιανυχνίου παρατηρείται το γρέζι (flash) που δημιουργείται από την πίεση που ασκεί το εργαλείο συγκόλλησης στην επιφάνεια των προς συγκόλληση τεμαχίων. Παρατηρώντας το δοκίμιο μακροσκοπικά (εικόνες 30, 31), φαίνεται καθαρά ο διαχωρισμός μεταξύ του πυρήνα της συγκόλλησης και της ΘΜΕΖ (TMAZ) στην προωθούμενη πλευρά (advancing side, AS) της συγκόλλησης. Αντίθετα, ο διαχωρισμός αυτός στην υποχωρούσα πλευρά (retreating side, RS) της συγκόλλησης γίνεται δυσδιάκριτος, ακόμη και στη μικροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων, λόγω της μη ύπαρξης σαφούς ορίου.



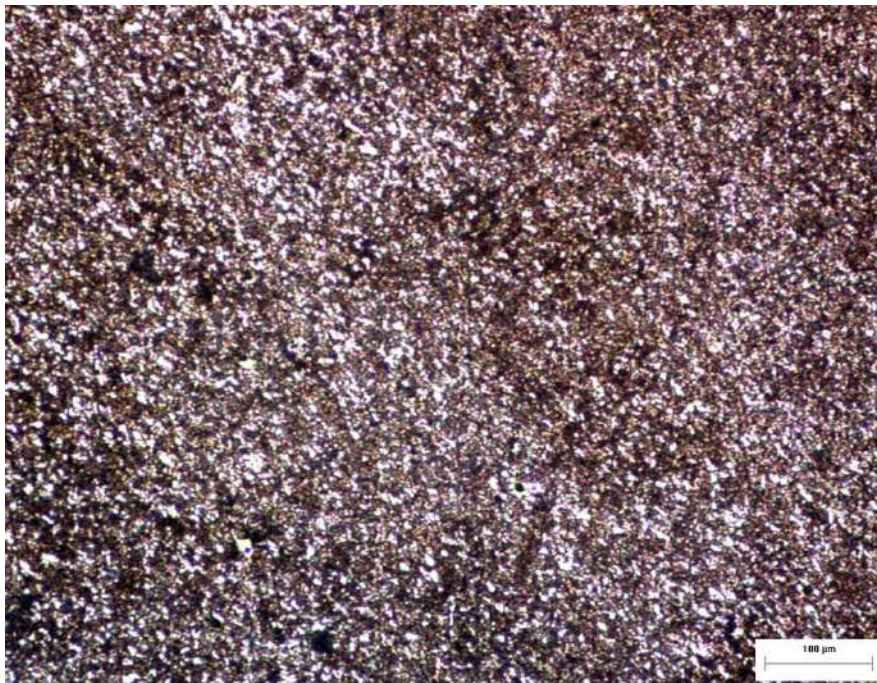
Εικόνα 31: Μεγέθυνση των παρατηρούμενων ατελειών στο στερεοσκόπιο.

Οι ατέλειες εμφανίζονται χαμηλά στον πυρήνα της συγκόλλησης, περιοχή που παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στην εμφάνιση ατελειών, όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Παρατηρείται ότι η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης δεν μπορεί να προσδώσει στο δοκίμιο την απαιτούμενη θερμική παροχή για την ικανοποιητική ανάδευση και συγκόλληση του υλικού.



Εικόνα 32: Μικρογραφία του πυρήνα συγκόλλησης (αριστερά), της ΘΜΕΖ (περίπου μέση) και της ΘΕΖ (δεξιά).

Στην εικόνα 32 γίνεται εμφανής ο διαχωρισμός μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Οι κόκκοι της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης προσανατολίζονται σύμφωνα με τη διεύθυνση της διαχωριστικής γραμμής μεταξύ των δυο ζωνών. Επιπρόσθετα έχουν μέγεθος εμφανώς μεγαλύτερο από εκείνο των κόκκων του πυρήνα συγκόλλησης.



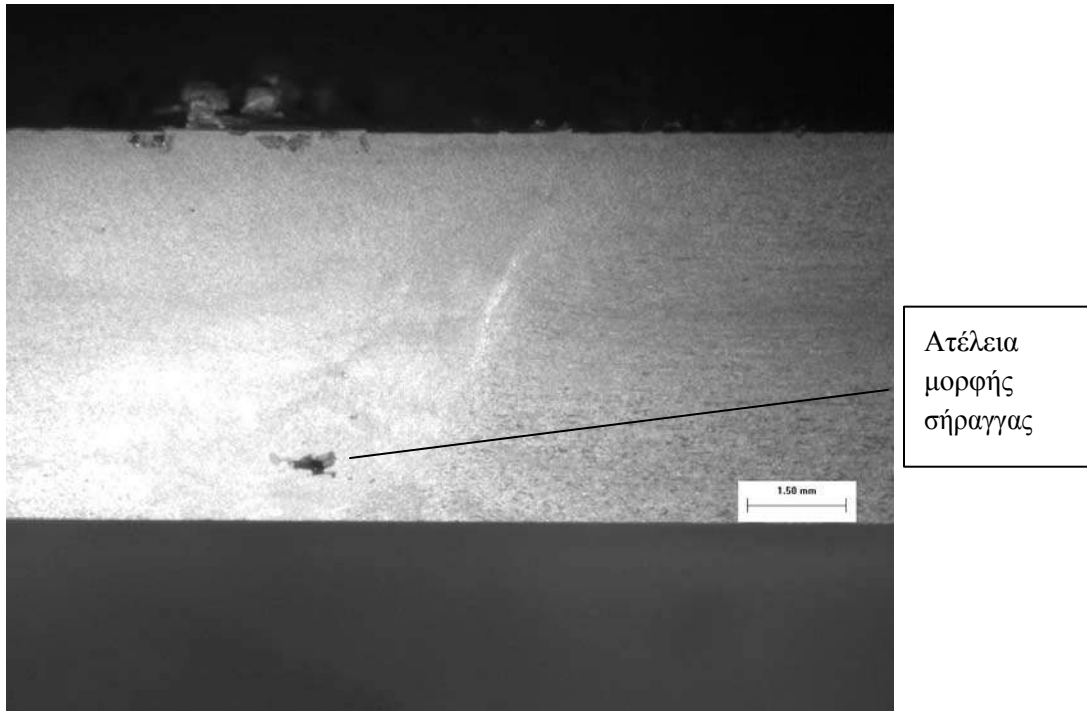
Εικόνα 33: Μικρογραφία του πυρήνα συγκόλλησης.

Ο πυρήνας συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρό μέγεθος κόκκων, που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1/10 του μεγέθους των κόκκων του μετάλλου βάσης. Η ζώνη αυτή αποτελείται από λεπτούς κόκκους που όταν προσβάλλονται μερικοί δεν αντανακλούν το φως και για αυτό το λόγο παρουσιάζονται ως σκοτεινές περιοχές.

Η δεύτερη συγκόλληση (αρ.5 βλ. πίνακα 8) πραγματοποιήθηκε υπό τις ακόλουθες λειτουργικές παραμέτρους:

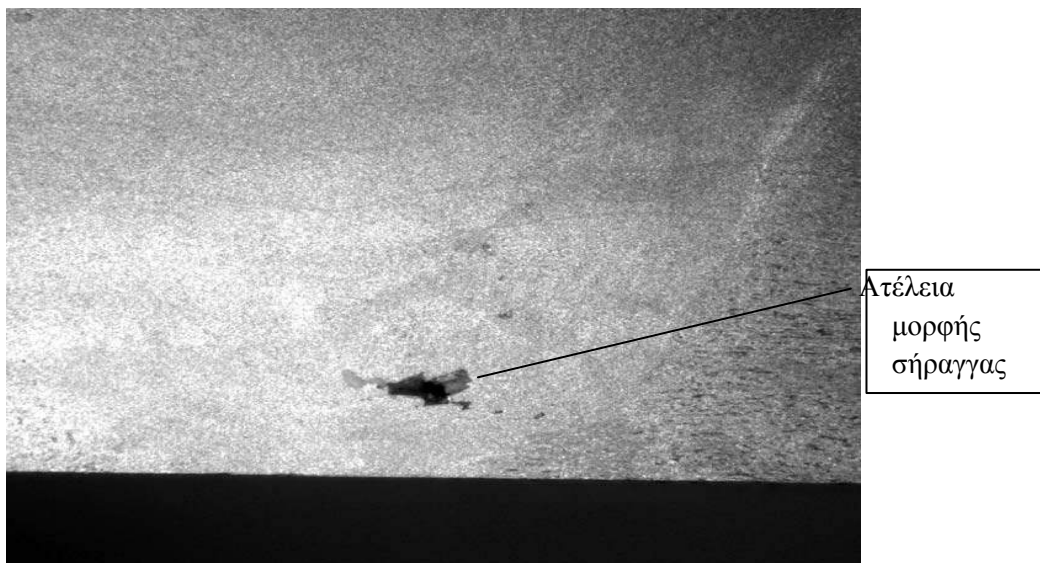
Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	375 rpm	Με σπείρωμα

Στην παρούσα συγκόλληση αυξήθηκε η ταχύτητα περιστροφής έτσι ώστε να υπάρξει ανάπτυξη μεγαλύτερης θερμοκρασίας, ενώ μειώθηκε η ταχύτητα πρόωσης με σκοπό την καλύτερη ανάδευση του πλαστικοποιημένου υλικού.

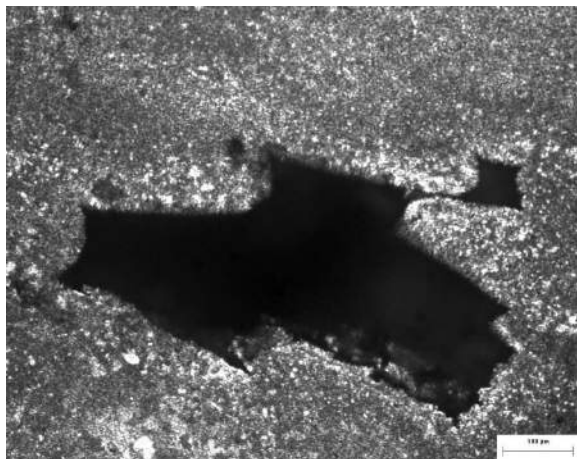


Εικόνα 34: Στερεοσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου.

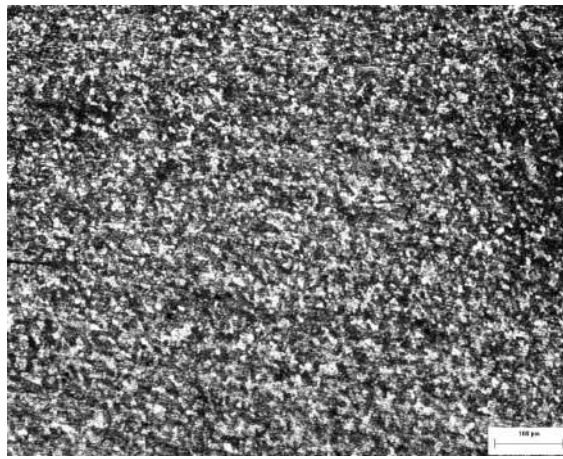
Όπως φαίνεται στη μακρογραφία της εικόνας 34 παρουσιάζεται ξανά ατέλεια μεγάλου μεγέθους στην ίδια περιοχή που παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο δοκίμιο, δηλαδή στην κατώτερη και προς τα δεξιά πλευρά του πυρήνα της συγκόλλησης. Πρέπει λοιπόν να αυξηθεί ακόμη περισσότερο η ταχύτητα περιστροφής αφού είναι η κύρια αιτία εμφάνισης ατελειών μορφής σήραγγας, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως. Οι εικόνες 35 και 36 παρουσιάζουν ευκρινέστερα το μέγεθος και τη μορφή των ατελειών. Η πρώτη εικόνα, προερχόμενη από τη στερεοσκοπική μελέτη του δοκιμίου, παρουσιάζει την ακριβή θέση των ατελειών. Η δεύτερη εικόνα, προϊόν της μικροσκοπικής παρατήρησης, δίνει μια καλύτερη αίσθηση τόσο του μεγέθους όσο και της μορφής των παρουσιαζόμενων ατελειών.



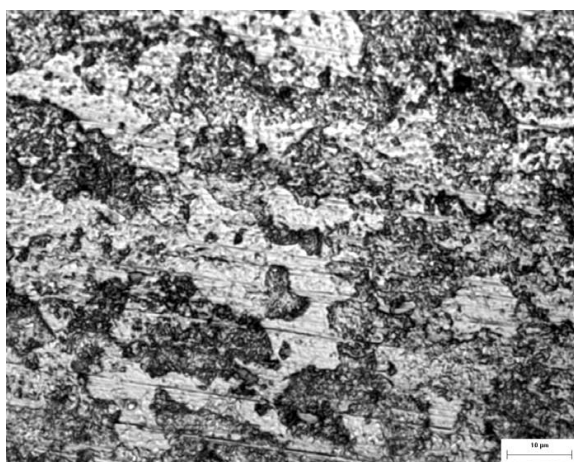
Εικόνα 35: Μακροσκοπική παρατήρηση της θέσης των παρατηρούμενων ατελειών.



Εικόνα 36: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής της ατέλειας.



Εικόνα 37 : Μικρογραφία του πυρήνα της συγκόλλησης



Εικόνα 38: Μικρογραφία του πυρήνα της συγκόλλησης (x1000).

Στην εικόνα 37, φαίνεται ο πυρήνας της συγκόλλησης και στην εικόνα 38 παρουσιάζονται οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης σε αρκετά μεγάλη μεγέθυνση.

Η τρίτη δοκιμή (**αρ.1 βλ. πίνακα 8**) πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση των ακόλουθων λειτουργικών παραμέτρων:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	375 rpm	Κωνικός

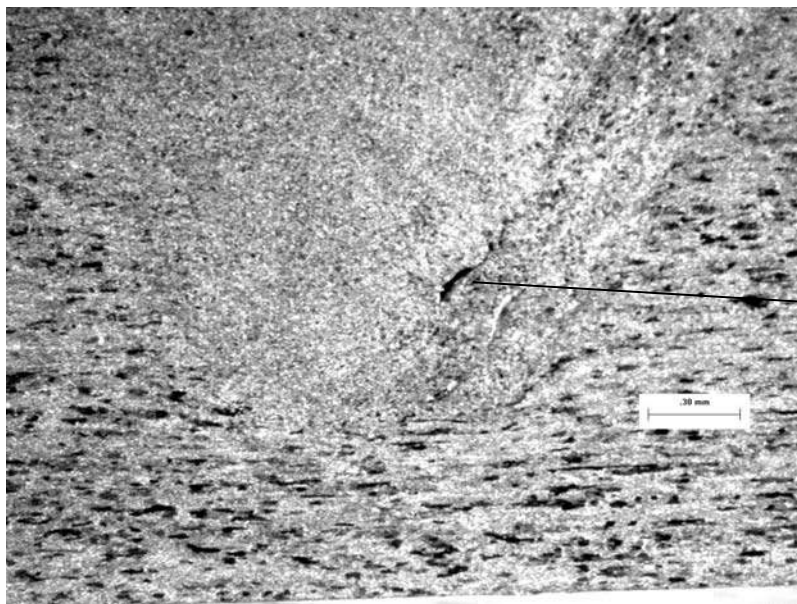
Όπως και στις προηγούμενες συγκολλήσεις, έτσι και σε αυτήν, παρουσιάζονται ατέλειες μορφής σήραγγας που γίνονται εμφανείς από την μακροσκοπική εξέταση του δοκιμίου.



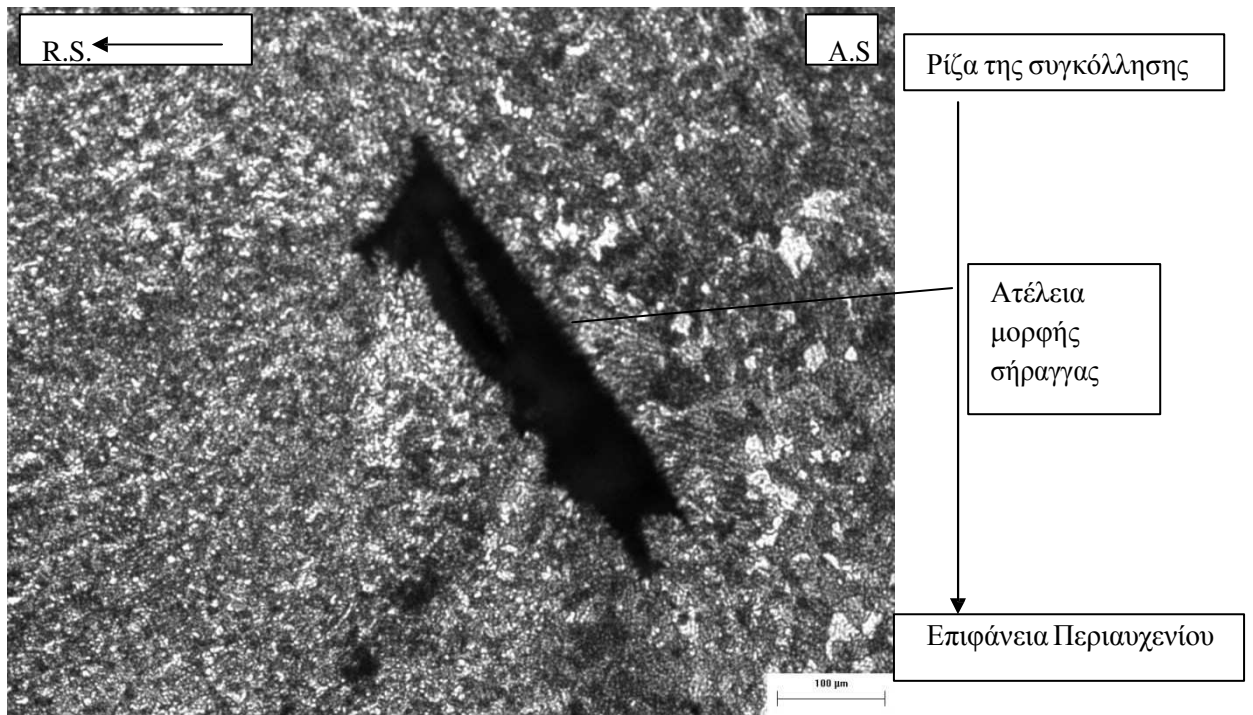
Ατέλεια μορφής
σήραγγας

Εικόνα 39: Μακρογραφία του δοκιμίου.

Οι ατέλειες κάνουν την εμφάνισή τους στο κάτω δεξί μέρος του πυρήνα συγκόλλησης, σχεδόν στην περιοχή διαχωρισμού του από τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Στην προκειμένη περίπτωση όμως παρατηρείται αισθητή μείωση του μεγέθους των ατελειών.

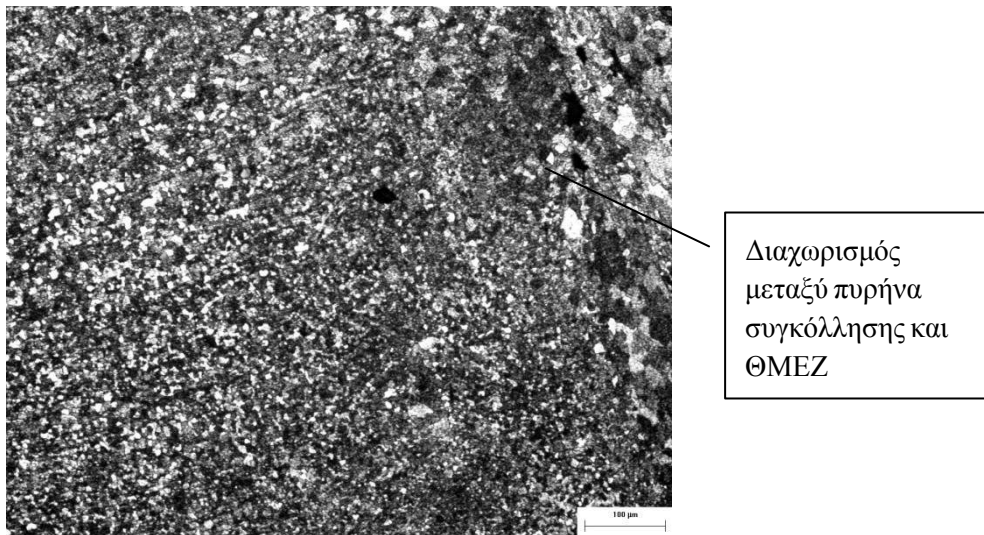


Εικόνα 40: Θέση της παρουσιαζόμενης ατέλειας



Εικόνα 41: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών.

Στην παραπάνω εικόνα 41 , που προέρχεται από τη μικροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου, φαίνεται καθαρά η περιοχή εμφάνισης των ατελειών που συμπίπτει με τα συμπεράσματα της μακροσκοπικής παρατήρησης. Τα μεγέθη των κόκκων (εικόνα 42) αριστερά (πυρήνας συγκόλλησης) και δεξιά (ΘΜΕΖ) της ατέλειας επιβεβαιώνουν τους προηγούμενους ισχυρισμούς, αφού γίνεται προφανές ότι οι ατέλειες εμφανίζονται ξανά κοντά στη διαχωριστική περιοχή μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης και της ΘΜΕΖ.



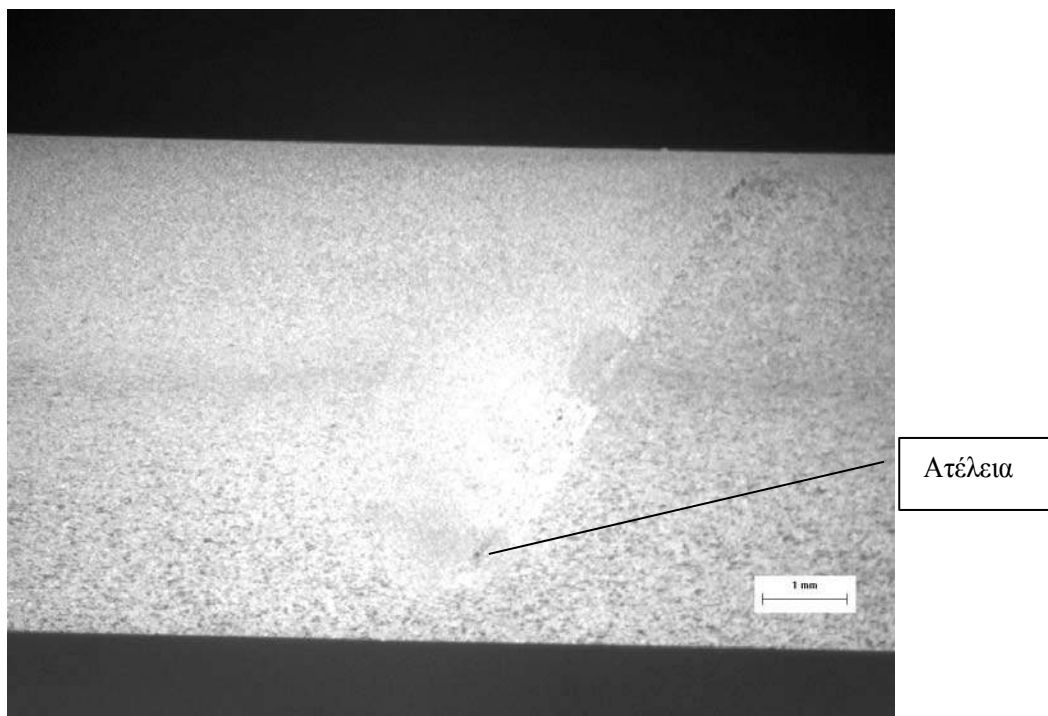
Εικόνα 42: Πυρήνας συγκόλλησης και ΘΜΕΖ

Στο δεξί μέρος της μικρογραφίας της εικόνας 42 φαίνονται καθαρά οι ευμεγέθεις κόκκοι της ΘΜΕΖ, ενώ αριστερά από την περιοχή μετάβασης φαίνονται οι πολύ μικρότεροι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης. Οι κόκκοι του πυρήνα συγκόλλησης παρουσιάζονται ομοιόμορφοι, ισαξονικοί και χωρίς προσανατολισμό. Είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκοι, τόσο που τα όρια τους γίνονται πολύ δύσκολα διακριτά. Το κυρίαρχο φαινόμενο που επικρατεί στη διαμόρφωση του μεγέθους των κόκκων είναι η δυναμική ανακρυστάλλωση.

Στην τέταρτη δοκιμή (αρ.2 βλ. πίνακα 8) επιλέχθηκαν οι εξής λειτουργικές παράμετροι:

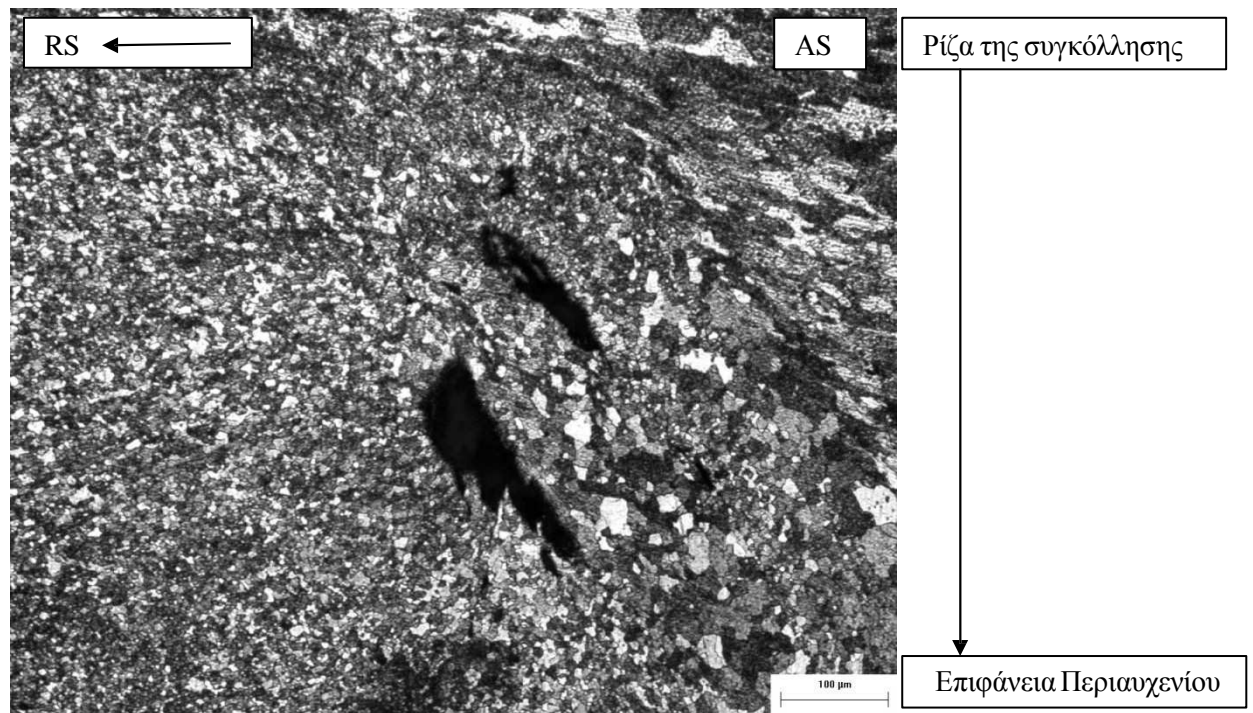
Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	475 rpm	Κωνικός

Στην ακόλουθη δοκιμή συγκόλλησης αυξήθηκε ακόμη περισσότερο η ταχύτητα περιστροφής, ενώ η ταχύτητα πρόωσης κρατήθηκε σταθερή. Πλέον, οι ατέλειες που εμφανίζονται είναι δύσκολο να φανούν στη μακροσκοπική παρατήρηση, πράγμα που σημαίνει ότι η βελτίωση στην ποιότητα των συγκολλήσεων είναι αισθητή. Επιπλέον, οι ατέλειες συνεχίζουν να εμφανίζονται στην περιοχή όπου αναμένονταν.

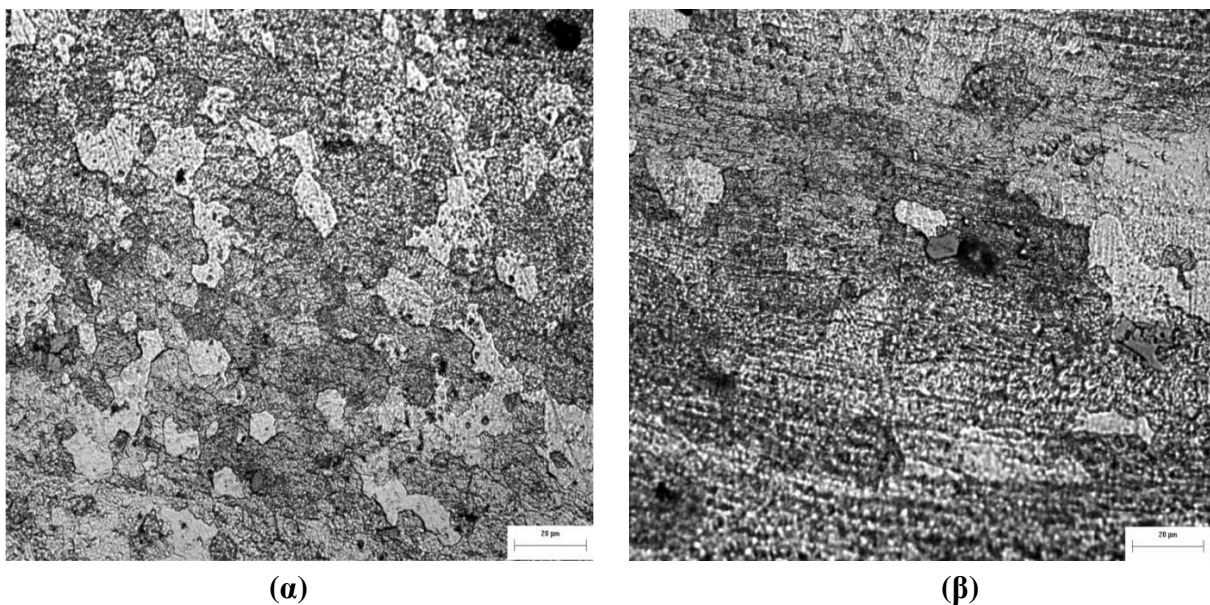


Εικόνα 43: Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου

Η μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου αποκαλύπτει την έκταση των ατελειών, τον αριθμό τους και τις ακριβείς περιοχές που αυτές εμφανίζονται.



Εικόνα 44: Μικροσκοπική παρατήρηση της μορφής και της θέσης των παρατηρούμενων ατελειών.

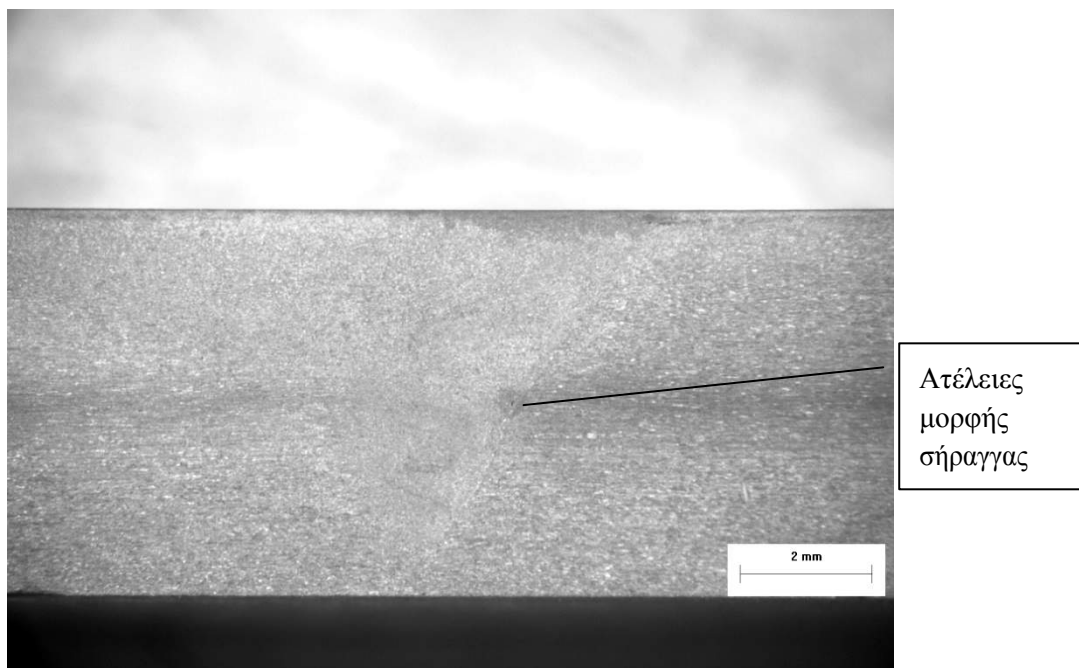


Εικόνα 45: Σύγκριση του μεγέθους των κόκκων μεταξύ (α) του πυρήνα συγκόλλησης και (β) της ΘΜΕΖ.

Η πέμπτη δοκιμή (αρ.3 βλ. πίνακα 8) πραγματοποιήθηκε με χρήση των ακόλουθων παραμέτρων:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Κωνικό

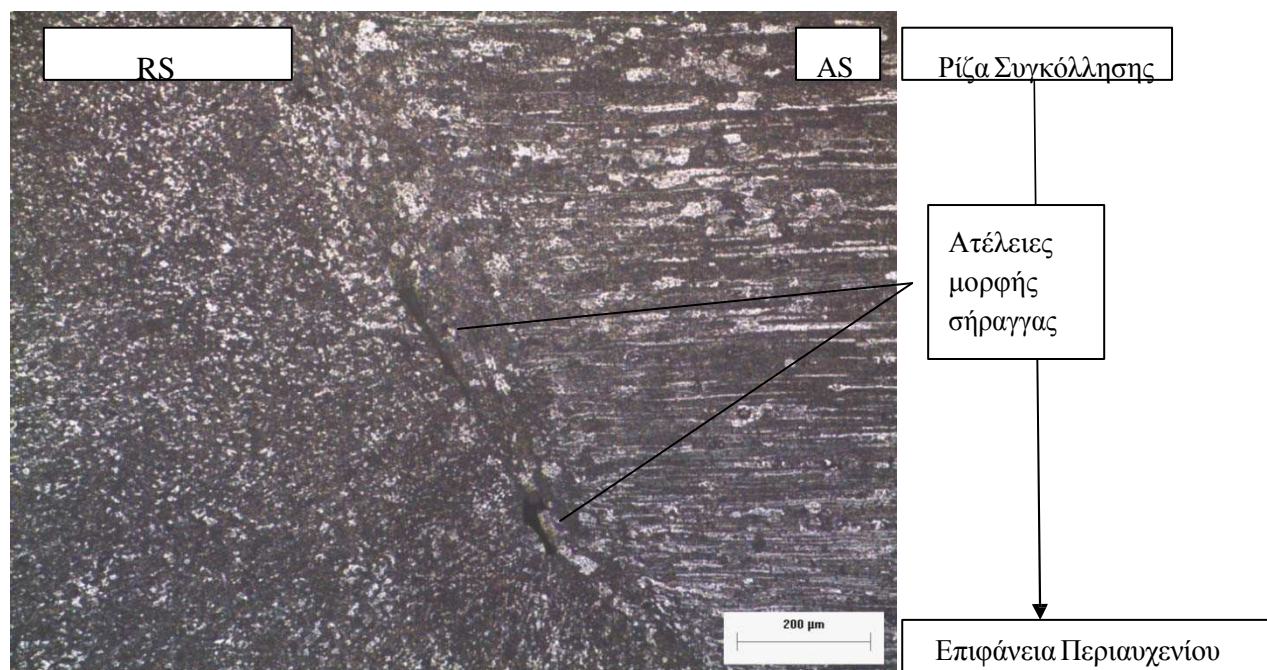
Η συνεχής εμφάνιση ατελειών μορφής σήραγγας μεγάλου μεγέθους, οδηγεί στην περεταίρω αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, ενώ η ταχύτητα πρόωσης διατηρείται σταθερή.



Εικόνα 46: Μακροσκοπική παρατήρηση της τομής του δοκιμίου.

Παρατηρείται μεγάλη μείωση στο μέγεθος των ατελειών. Οι ατέλειες εμφανίζονται στη μέση και δεξιά στον πυρήνα συγκόλλησης, σχεδόν πάνω στην περιοχή που διαχωρίζεται από τη ΘΜΕΖ, όπως φαίνεται και στη μακρογραφία της εικόνας 46.

Η μικροσκοπική παρατήρηση (εικόνα 47) αποκαλύπτει το μικρό μέγεθος των ατελειών, καθώς και την ακριβή περιοχή εμφάνισής τους.



Εικόνα 47: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μορφής σήραγγας.

Ατέλειες τέτοιου μεγέθους θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ελαττώματα 'flaws' (χαρακτηρίζονται ως 'flaws' οι ατέλειες που είναι επιτρεπτές). Εκτός του μεγέθους, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των ατελειών είναι η μορφή τους. Ατέλειες με στρογγυλεμένα άκρα δεν ευνοούν τη συγκέντρωση τάσεων. Στην παρούσα συγκόλληση οι ατέλειες, όπως φαίνεται (εικόνα 47), δεν έχουν τέτοια μορφή.

Στις ακόλουθες μικρογραφίες (εικόνα 48) φαίνονται οι κόκκοι των γειτονικών περιοχών ΘΜΕΖ και πυρήνα συγκόλλησης, η διαφορά μεγέθους τους, καθώς και ο έντονος προσανατολισμός των κόκκων της ΘΜΕΖ.

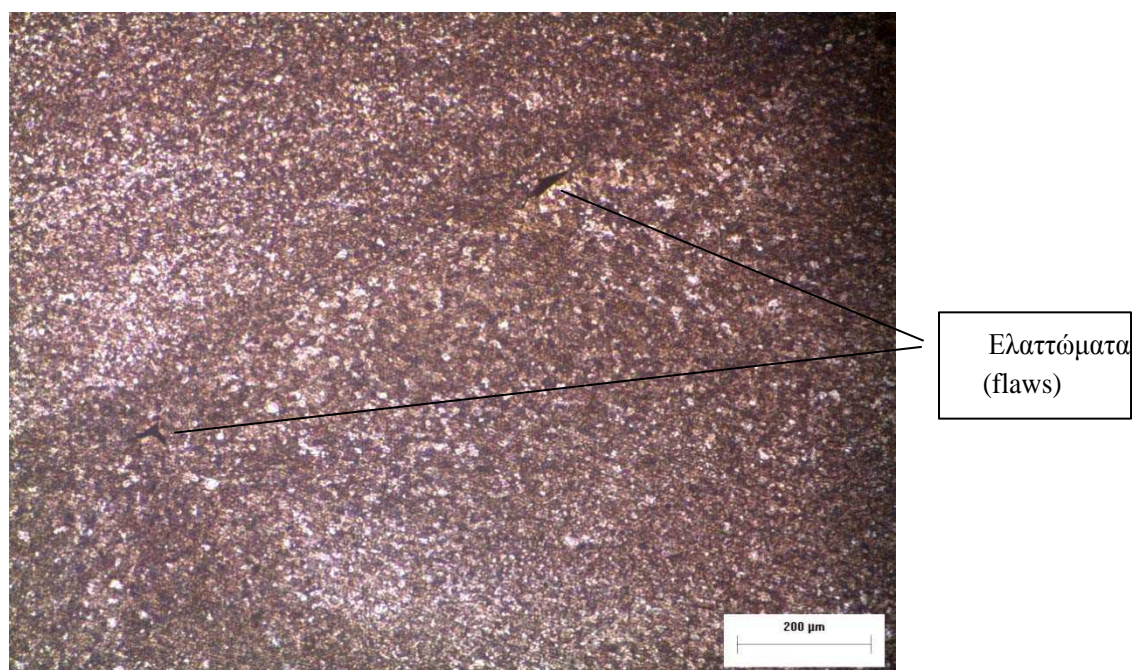


Εικόνα 48: Μικροσκοπική παρατήρηση του μεγέθους των κόκκων μεταξύ (α) ΘΜΕΖ και (β) πυρήνα συγκόλλησης.

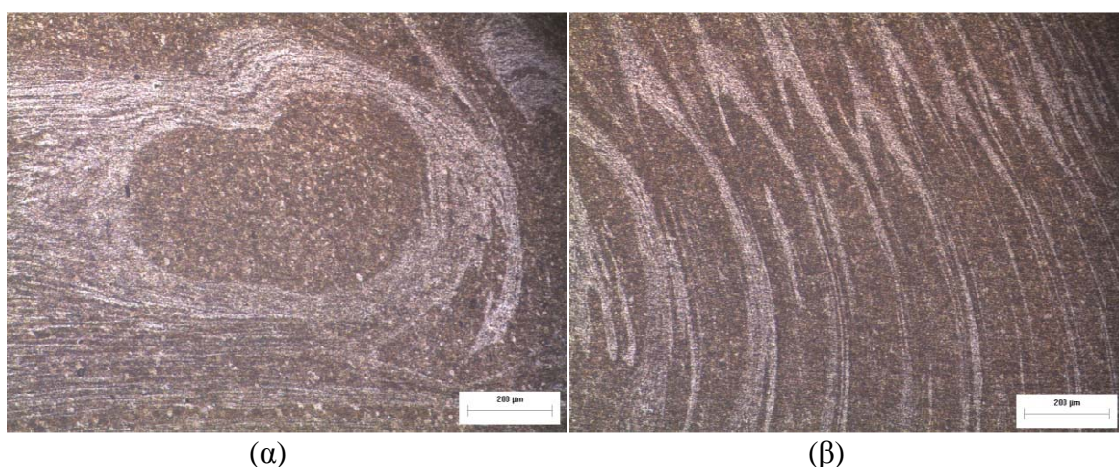
Για την έκτη δοκιμή (αρ.7 βλ. πίνακα 8) επιλέχθηκαν οι ακόλουθες λειτουργικές παράμετροι:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Σπείρωμα

Στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 2° . Στην παρούσα συγκόλληση δεν παρατηρούνται ατέλειες αλλά ελαττώματα, τα οποία φαίνονται μόνο στη μικροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου. Επιπρόσθετα, διακρίνεται η δακτυλιοειδής δομή, ως αποτέλεσμα της χρήσης του εργαλείου συγκόλλησης που φέρει σπείρωμα. Παρατηρείται ότι η δακτυλιοειδής δομή εμφανίζεται μόνο όταν γίνεται χρήση του εργαλείου αυτού.



Εικόνα 49: Μικροσκοπική παρατήρηση των ελαττωμάτων της συγκόλλησης.

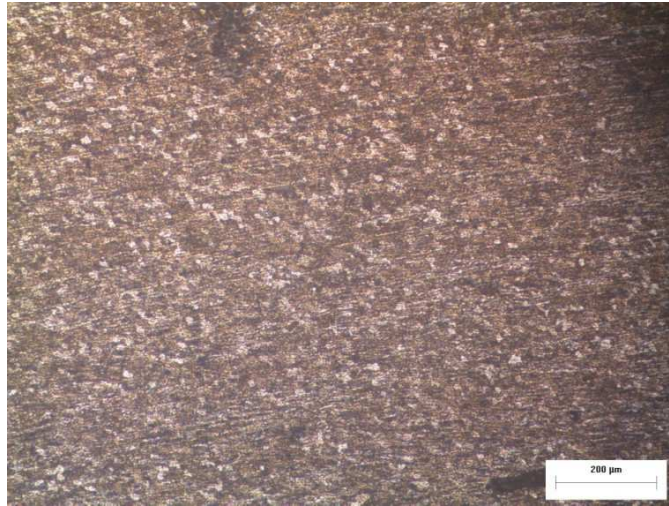


(α)

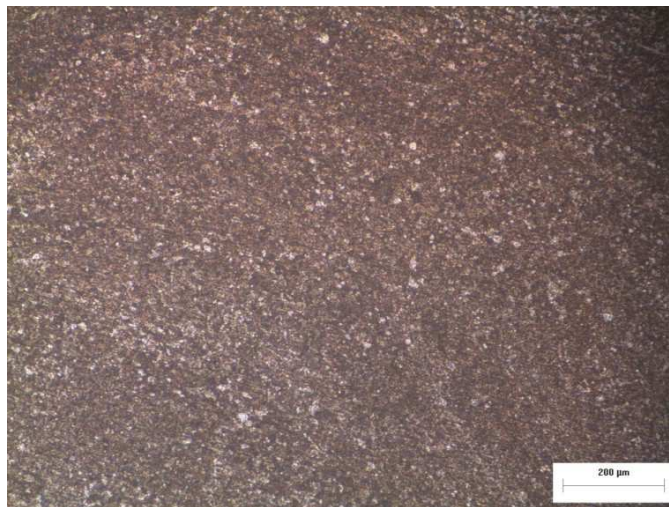
(β)

Εικόνα 50: Μικροσκοπική παρατήρηση της δακτυλιοειδούς δομής.

Τέλος, στις παρακάτω μικρογραφίες, παρουσιάζονται οι κόκκοι της άνω και της κάτω περιοχής του πυρήνα συγκόλλησης. Οι κόκκοι της κατώτερης περιοχής είναι εμφανώς μικρότεροι από τους κόκκους της ανώτερης. Η διαφορά του μεγέθους οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο περιοχών εξαιτίας της διαφορετικής θερμικής παροχής. Η θερμική παροχή είναι μεγαλύτερη στην ανώτερη περιοχή αφού είναι πιο κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης που έρχεται σε επαφή με το περιουχένιο.



Εικόνα 51: Ανώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.



Εικόνα 52 : Κατώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.

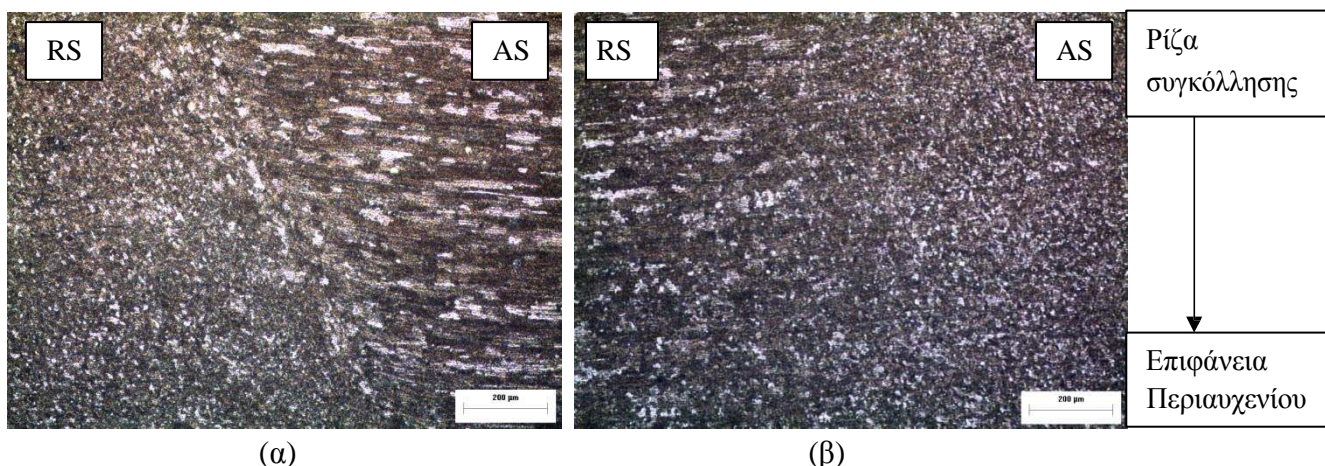
6.2 Μεταλλογραφική παρατήρηση των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων

Η έβδομη δοκιμή (αρ.6 βλ. πίνακα 8) πραγματοποιήθηκε με παραμέτρους οι οποίες αποτελούν τις βέλτιστες και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ταχύτητα Πρόωσης	Ταχύτητα Περιστροφής	Τύπος Πείρου
85 mm/sec	600 rpm	Κωνικός

Στο εργαλείο συγκόλλησης δόθηκε κλίση 2°. Επιπρόσθετα η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με διεύθυνση συγκόλλησης κάθετη στη διεύθυνση της έλασης του κράματος. Στην παρούσα δοκιμή δεν πραγματοποιήθηκε πέρασμα σε πλάκα, αλλά συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση του κράματος αλουμινίου 5083- H111 (πάχους 5,4mm). Το δοκίμιο δεν παρουσιάζει κανένα είδος ατέλειας.

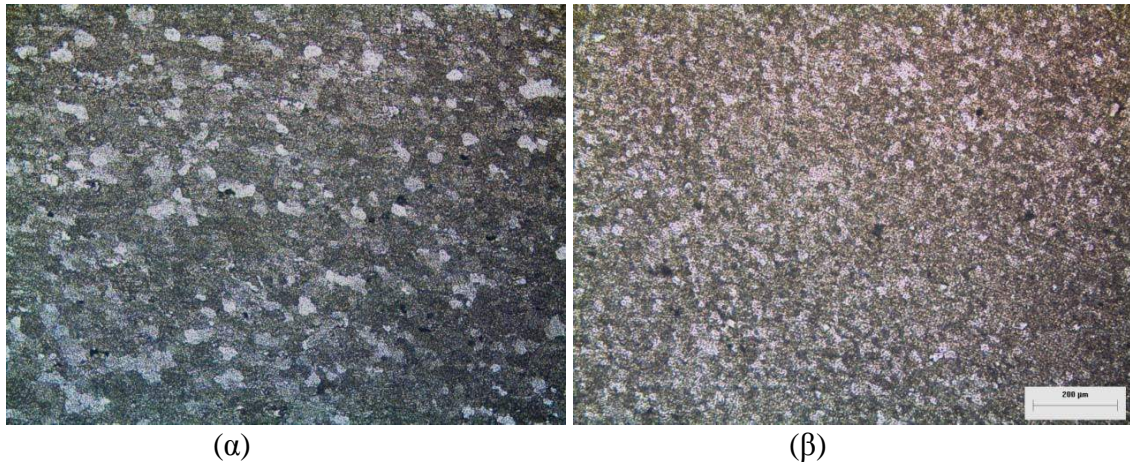
Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται οι περιοχές διαχωρισμού μεταξύ του πυρήνα συγκόλλησης, της ΘΜΕΖ της προωθούμενης πλευράς (AS) και της ΘΜΕΖ της υποχωρούσας (RS) πλευράς.



Εικόνα 53: Μικροσκοπική παρατήρηση του διαχωρισμού μεταξύ (α) πυρήνα συγκόλλησης και ΘΜΕΖ στην προωθούμενη πλευρά και (β) πυρήνα συγκόλλησης και ΘΜΕΖ στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης.

Ο διαχωρισμός μεταξύ των δυο ζωνών είναι εμφανέστατος στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης εξαιτίας των έντονα προσανατολισμένων κόκκων της ΘΜΕΖ. Αντίθετα, στην υποχωρούσα πλευρά, ο διαχωρισμός δεν είναι ευδιάκριτος, αλλά μπορεί να φανεί στη μικροσκοπική εξέταση του δοκιμίου, παρατηρώντας τις έντονες διαφορές μεταξύ των μεγεθών των κόκκων των δύο ζωνών.

Στις παρακάτω μικρογραφίες παρατηρείται η μεγάλη διαφορά του μεγέθους των κόκκων στην ανώτερη και την κατώτερη περιοχή του πυρήνα συγκόλλησης.



Εικόνα 54: Μικρογραφίες: (α) της ανώτερης και (β) της κατώτερης περιοχής του πυρήνα συγκόλλησης.

Τέλος, παρουσιάζεται ολοκληρωμένα η δομή της συγκόλλησης που αποτελείται από τις εξής ζώνες: πυρήνας συγκόλλησης, ΘΜΕΖ και ΘΕΖ στην προωθούμενη πλευρά καθώς και ΘΜΕΖ και ΘΕΖ στην υποχωρούσα πλευρά.

Ο πυρήνας συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από ισοαξονικούς, χωρίς συγκεκριμένο προσανατολισμό και μικρού μεγέθους κόκκους. Το μέγεθος των κόκκων ελαττώνεται με κατεύθυνση προς την επιφάνεια συγκράτησης, όπως φαίνεται και στις μικρογραφίες (α) και (ε) της εικόνας 55. Η ΘΜΕΖ αποτελείται από παραμορφωμένους κόκκους που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τους κόκκους του πυρήνα συγκόλλησης και μικρότερο από αυτό των κόκκων της ΘΕΖ (εικόνα 55: (β), (δ)).

Υποχωρούσα Πλευρά

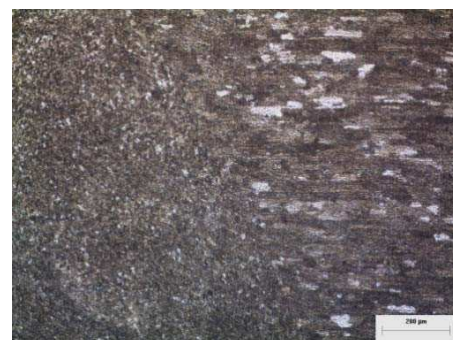


(β)



(α)

Προωθούμενη Πλευρά



(δ)



(γ)

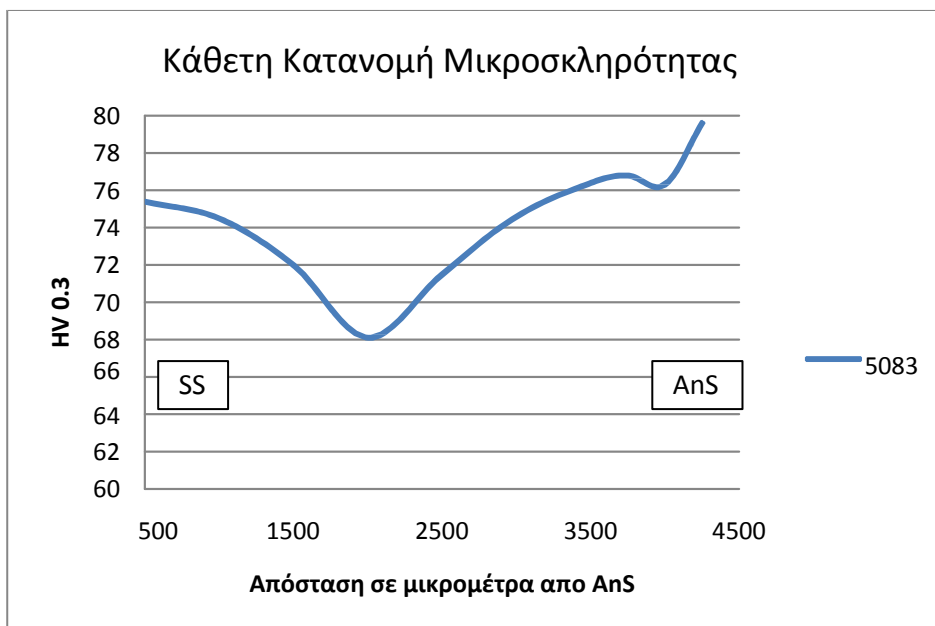


(ε)

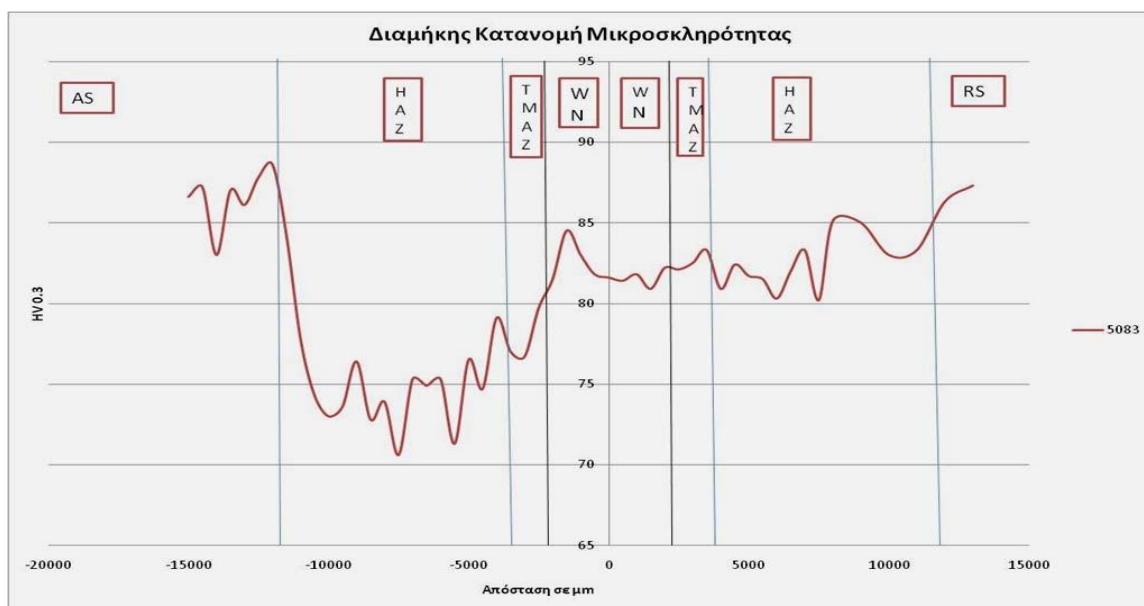
Εικόνα 55: Μικροσκοπική παρατήρηση των ζωνών της συγκόλλησης: (α) άνω μέρος πυρήνα συγκόλλησης, (β) ΘΕΖ (αριστερά) και ΘΜΕΖ (κέντρο) στην υποχωρούσα πλευρά, (γ) πυρήνας συγκόλλησης, (δ) ΘΕΖ (δεξιά) και ΘΜΕΖ (κέντρο) στην προωθούμενη πλευρά, (ε) κάτω μέρος πυρήνα συγκόλλησης.

6.3 Κατανομή μικροσκληρότητας των βέλτιστων συγκολλημένων δοκιμίων

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας της τομής του συγκολλημένου δοκιμίου. Οι μετρήσεις λήφθηκαν με φορά από την επιφάνεια περιαιχηνίου (shoulder surface, SS) προς την επιφάνεια συγκράτησης (anvil surface, AnS). Φαίνεται πως υπάρχει σχετική άνοδος των τιμών καθώς κατευθυνόμαστε προς την επιφάνεια συγκράτησης, αφού εκεί συναντώνται οι κόκκοι που έχουν το μικρότερο μέγεθος.



Διάγραμμα 2: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

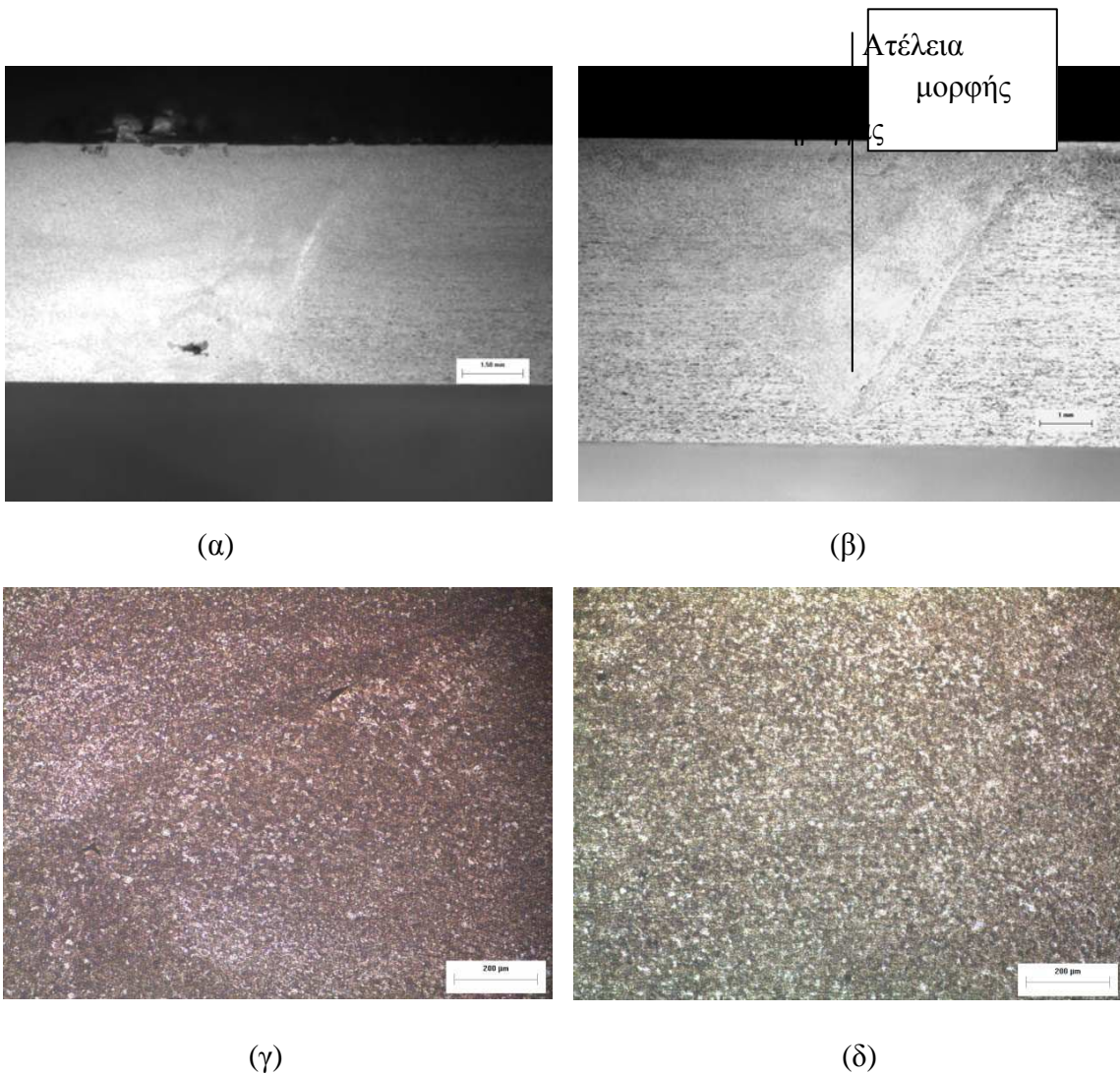


Διάγραμμα 3: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας του δοκιμίου.

6.4 Επίδραση των παραμέτρων στις συγκολλήσεις

Επίδραση του πείρου συγκόλλησης

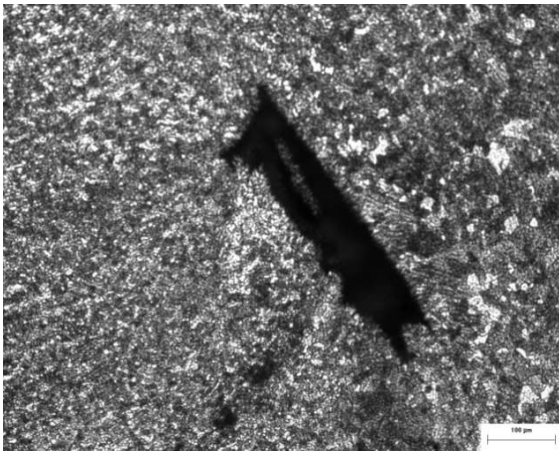
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των ραφών συγκόλλησης α) αρ.1 και αρ.5 καθώς και β) αρ.6 και αρ.7 (βλ. πίνακα 8), παρατηρείται ότι το εργαλείο συγκόλλησης που φέρει κωνικό πείρο παρουσιάζει πολύ καλύτερα αποτελέσματα, από απόψεως μεγέθους των ατελειών, από το εργαλείο που φέρει το σπείρωμα (εικόνα 56). Ο πείρος συγκόλλησης επιδρά και στο μέγεθος των ζωνών συγκόλλησης, αφού στις σχηματιζόμενες ζώνες κατά την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων με χρήση του πείρου που φέρει σπείρωμα, οι ζώνες συγκόλλησης έχουν μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τις ζώνες που σχηματίζονται κατά τη συγκόλληση που πραγματοποιείται με τον κωνικό πείρο χωρίς σπείρωμα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας τον πείρο που φέρει σπείρωμα είναι εφικτή η συγκόλληση πλακών λίγο μεγαλύτερου πάχους, λόγω της γεωμετρίας του, σε σχέση με συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας τον κωνικό πείρο χωρίς σπείρωμα. Άρα, η γεωμετρία του πείρου συγκόλλησης ασκεί σημαντική επίδραση στην ποιότητα της συγκόλλησης.



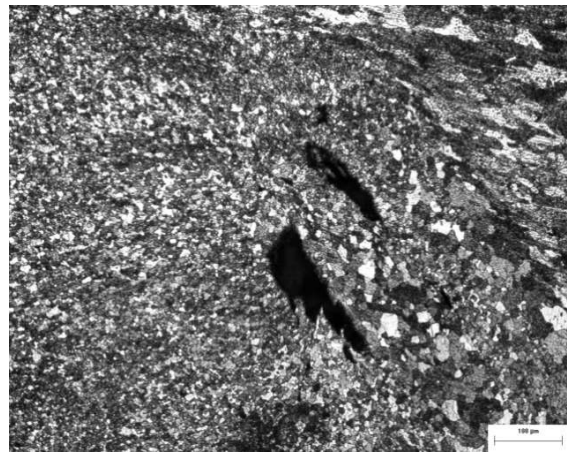
Εικόνα 56: (α) Μακρογραφίες της συγκόλλησης αρ.5 και (β) της συγκόλληση αρ.1. Μικρογραφίες του πυρήνα συγκόλλησης της συγκόλλησης (γ) αρ. 7 και (δ) αρ.6 (βλ. πίνακα 8).

Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

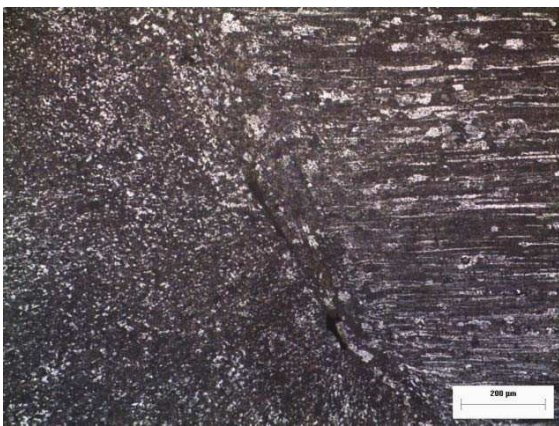
Για τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των ραφών συγκόλλησης αρ.1, αρ.2 και αρ.3 (βλ. πίνακα 8). Παρατηρείται ότι με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, το μέγεθος των εμφανιζόμενων ατελειών μειώνεται (εικόνα 57). Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί στην αύξηση της θερμικής παροχής. Έτσι έχουμε σωστότερη ανάδευση του μετάλλου και αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση του μεγέθους των δημιουργούμενων ατελειών.



(α)



(β)

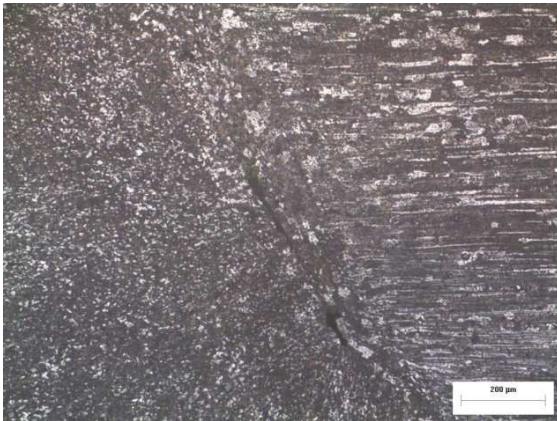


(γ)

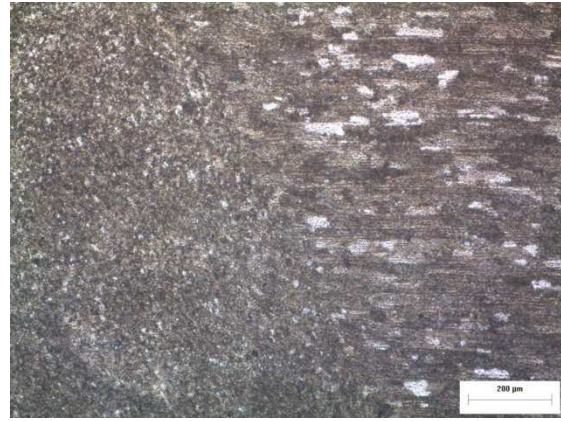
Εικόνα 57: Μικρογραφίες των ατελειών των ραφών συγκόλλησης (α) αρ.1, (β) αρ.2 και (γ) αρ.3 (βλ. πίνακα 6.1).

Επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης

Για τον καθορισμό της επίδρασης της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης εξετάζονται οι ραφές συγκόλλησης αρ.3 και αρ.6 (βλ. πίνακα 8). Η κατάλληλη επιλογή κλίσης βοηθάει ώστε το περιανχένιο του εργαλείου συγκόλλησης να συγκρατεί το αναδευόμενο υλικό και να μεταφέρει το υλικό που αναδευείται, από το μπροστινό προς το πίσω μέρος του πείρου συγκόλλησης. Έτσι, η συγκόλληση υπ'αριθμόν 6 (βλ. πίνακα 8) (δεν παρουσιάζει καμία ατέλεια), η οποία έγινε με κλίση του εργαλείου 2° , παρουσιάζει σαφώς πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τη συγκόλληση με αριθμό 3, που έγινε χωρίς κλίση του εργαλείου συγκόλλησης. Άρα, η επίδραση της κλίσης του εργαλείου συγκόλλησης είναι εμφανής.



(α)



(β)

Εικόνα 58: Μικρογραφίες στις οποίες παρουσιάζεται ο διαχωρισμός του WN και της TMAZ των συγκολλήσεων (α) αρ.6 και (β) αρ.3, καθώς και οι σχηματιζόμενες ατέλειες στη συγκόλληση (β) αρ.3 (βλ. πίνακα 8).

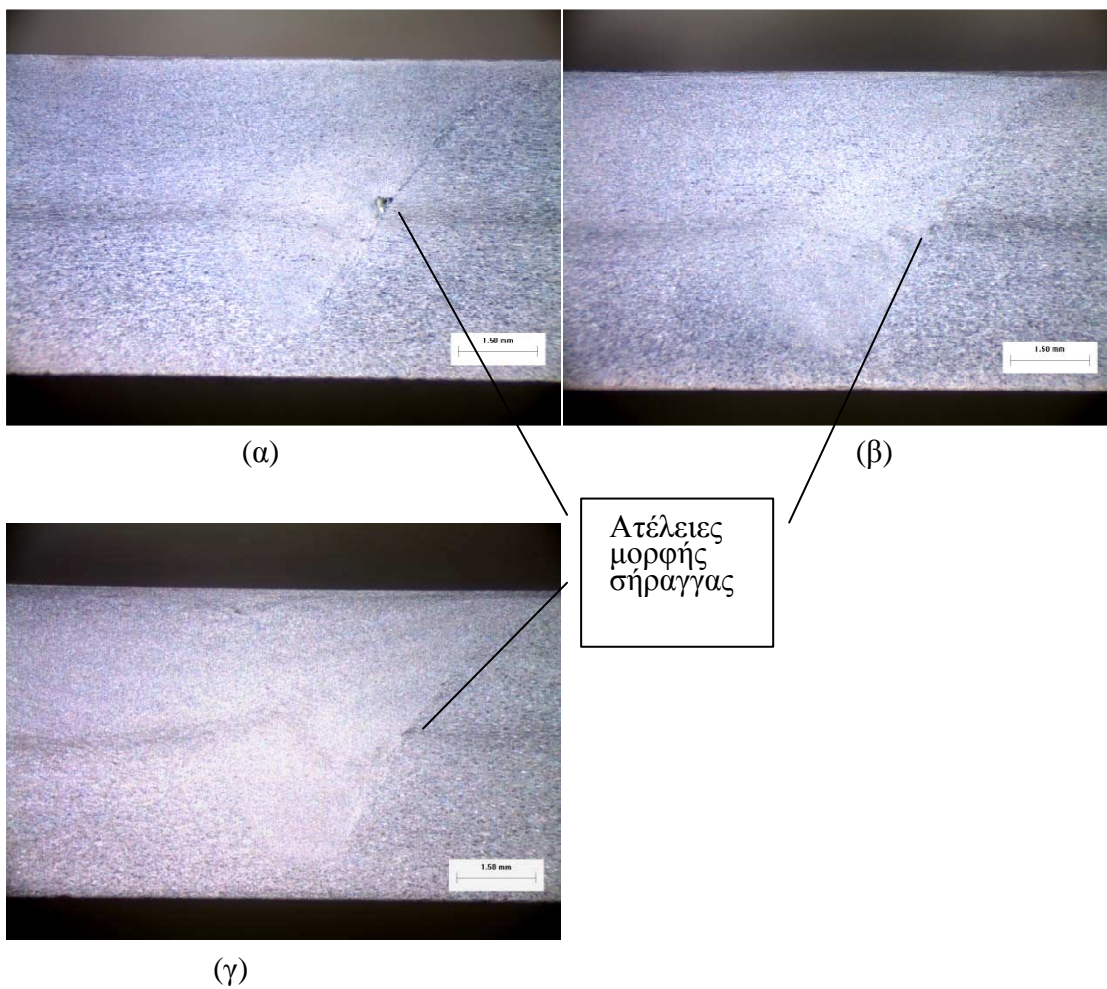
Επίδραση Ομόρροπων Πολλαπλών Περασμάτων (Run)

Πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις με εφαρμογή πολλαπλών (τριών) ομόρροπων περασμάτων του εργαλείου συγκόλλησης πάνω από την ίδια ραφή. Ο σκοπός ήταν η μελέτη της επίδρασης του κάθε περάσματος στη μικροδομή, το είδος και το μέγεθος των ατελειών και στη μικροσκληρότητα των συγκολλήσεων.

Οι λειτουργικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκολλήσεις φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

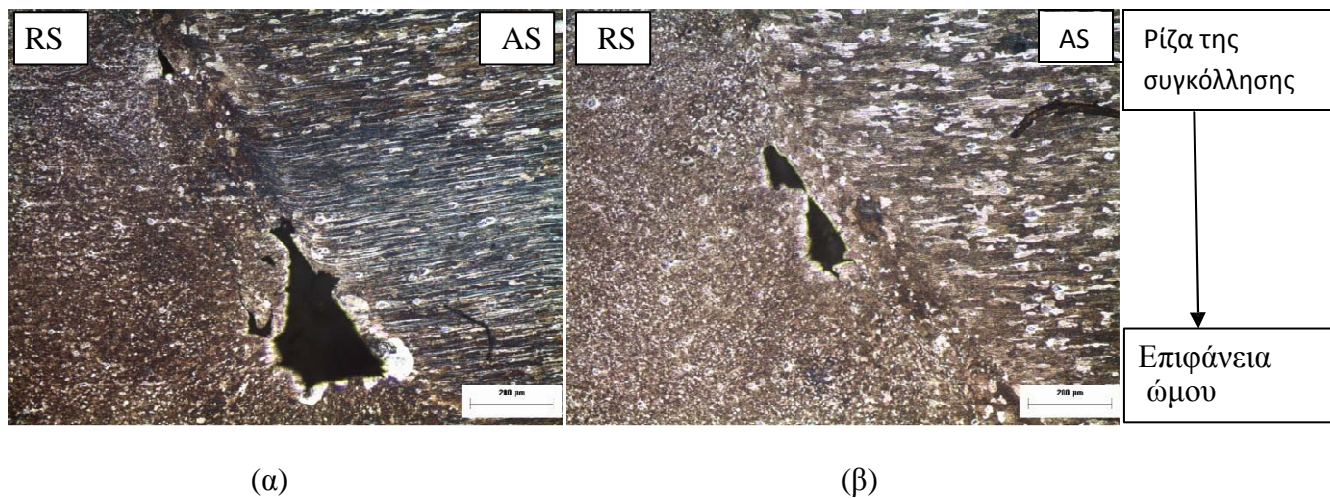
Ταχύτητα Περιστροφής	Ταχύτητα Πρόωσης	Τύπος Πείρου	Αριθμός Περασμάτων
475 [rpm]	75 [mm/min]	Κωνικός	3

Στις μακρογραφίες της εικόνας 59 παρουσιάζεται η μακροσκοπική μελέτη του δοκιμίου μετά από κάθε πέρασμα του εργαλείου συγκόλλησης.

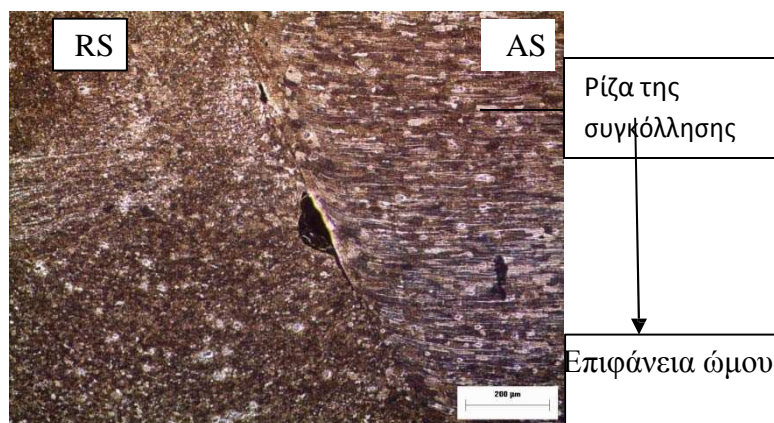


Εικόνα 59: Μακροσκοπική παρατήρηση του δοκιμίου μετά (α) το πρώτο, (β) το δεύτερο και (γ) το τρίτο πέρασμα.

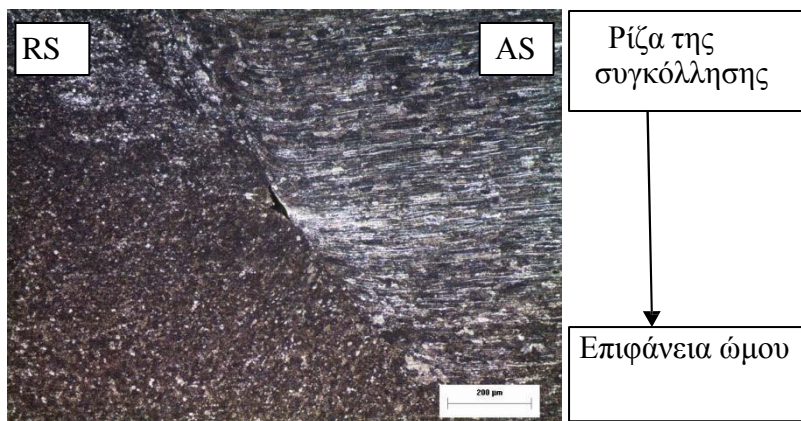
Γίνεται εμφανές ότι μετά από κάθε πέρασμα το μέγεθος των ατελειών μειώνεται αισθητά, ενώ άλλες ατέλειες απαλείφονται. Σε κάθε πέρασμα εφαρμόστηκε μεγαλύτερη κάθετη δύναμη από ότι στο προηγούμενο. Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται η μικροσκοπική παρατήρηση των εμφανιζόμενων ατελειών.



Εικόνα 60: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το πρώτο πέρασμα.



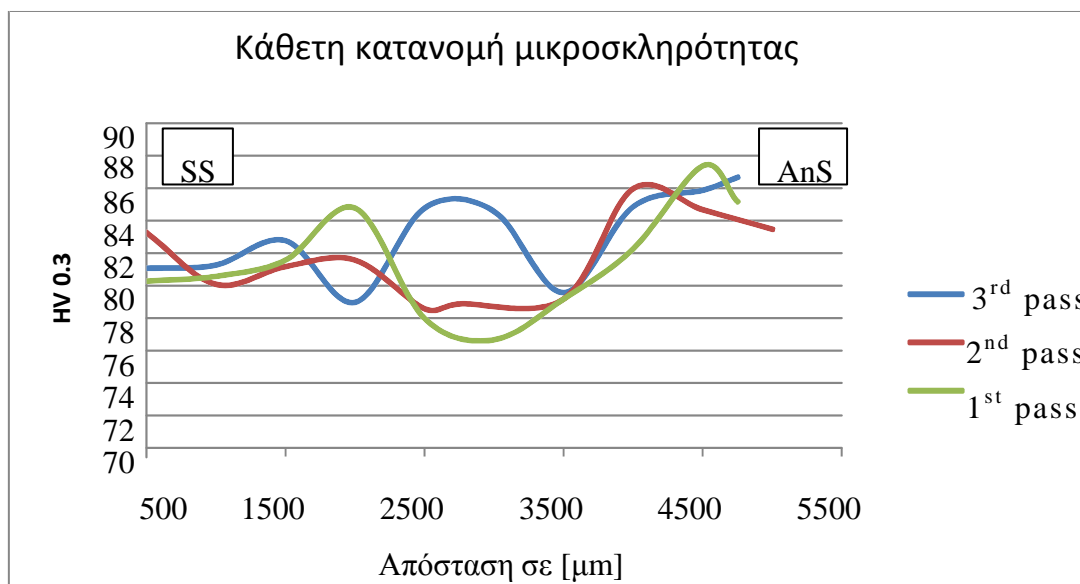
Εικόνα 61: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το δεύτερο πέρασμα.



Εικόνα 62: Μικροσκοπική παρατήρηση των ατελειών μετά το τρίτο πέρασμα.

Όσον αφορά στη μικροδομή, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές πριν και μετά το κάθε πέρασμα. Τόσο η δομή των ζωνών, όσο και τα μεγέθη των κόκκων τους παραμένουν αμετάβλητα.

Στο επόμενο σχήμα παρατηρείται η κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας για κάθε πέρασμα. Φαίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μικροσκληροτήτων μετά από κάθε πέρασμα, έτσι συμπεραίνεται ότι τα ομόρροπα περάσματα δεν επηρεάζουν σημαντικά τη μικροσκληρότητα του υλικού. Υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας, κατά μέσο όρο, παρατηρούνται στο μέσο του πυρήνα συγκόλλησης μετά το τρίτο πέρασμα. Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι καθώς προχωράμε προς τη ρίζα της συγκόλλησης υπάρχει άνοδος στην τιμή των μικροσκληροτήτων λόγω της μείωσης του μεγέθους των κόκκων, γεγονός που ισχύει για κάθε πέρασμα.

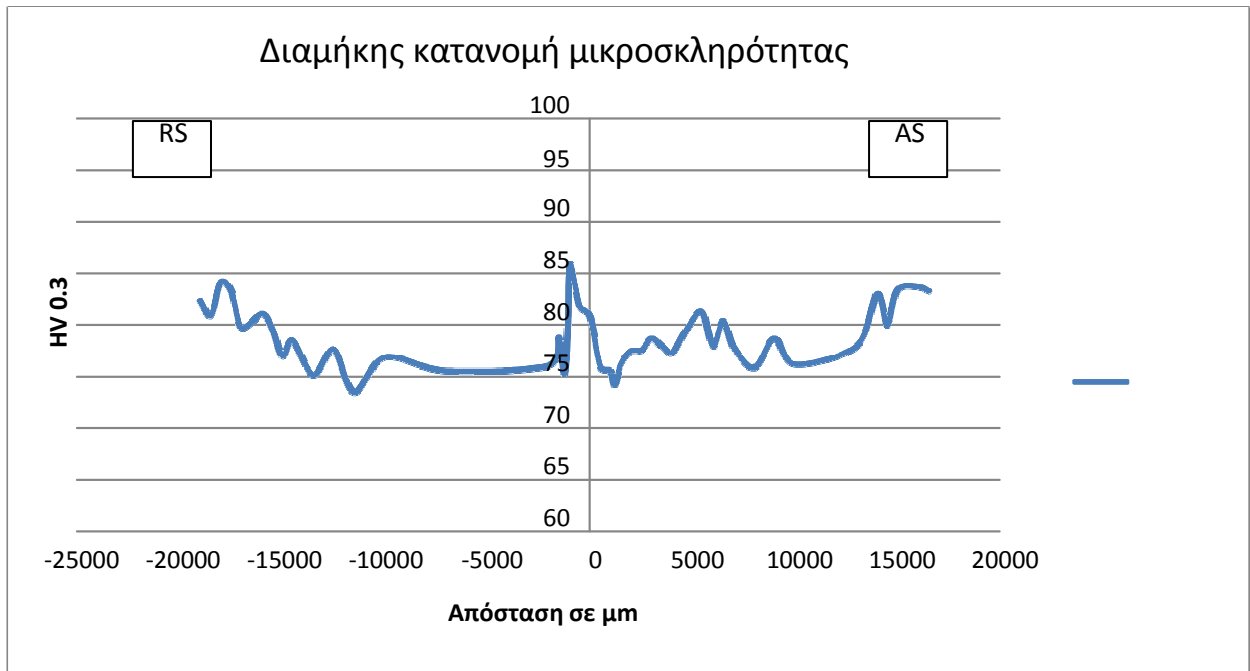


Διάγραμμα 4: Κάθετη κατανομή μικροσκληρότητας

S.S : Shoulder Surface

A.S.: Anvil Surface

Το διάγραμμα 5 δείχνει τη διαμήκη κατανομή της μικροσκληρότητας του δοκιμίου μετά το τρίτο πέρασμα.



Διάγραμμα 5: Διαμήκης κατανομή μικροσκληρότητας μετά το τρίτο πέρασμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 1) Η μετατροπή της συμβατικής εργαλειομηχανής σε μονάδα γραμμικής συγκόλλησης FSW στέφθηκε σε γενικές γραμμές με επιτυχία. Συγκολλήσεις καλής ποιότητας – με κριτήριο τον οπτικό έλεγχο – επιτεύχθηκαν από τις πρώτες κιόλας δοκιμές στο χώρο του μηχανουργείου.
- 2) Το εύρος στην ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής και στην ταχύτητα γραμμικής κίνησης (travelling) που διαθέτει η μηχανή αποδείχθηκε επαρκές τόσο για την εκπόνηση της παρούσας όσο και για εργαστηριακές δοκιμές και πειράματα που θα λάβουν ή έλαβαν χώρα στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών και δημοσιεύσεων. Είναι προφανές ότι σε περίπτωση που υπήρχε η δυνατότητα τοποθέτησης inverter στους κινητήρες της μηχανής , τότε η ευελιξία στην επιλογή παραμέτρων θα αυξανόταν σημαντικά.
- 3) Οι βασικές αρχές που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή των εργαλείων συγκόλλησης , οι οποίες βασίστηκαν σε ομαδοποίηση και κατηγοριοποίηση δεδομένων από δημοσιεύσεις , κρίνονται στη φάση της προμελέτης ικανοποιητικές. Η επιλογή της ποιότητας υλικού για την κατασκευή του εργαλείου (Εργαλειοχάλυβας D2 κατεργασμένος θερμικά) αποδείχθηκε θετική. Εξάλλου παρατηρήθηκε ότι η φθορά των εργαλείων είναι ελάχιστη σε σχέση με τα μέτρα συγκόλλησης που πραγματοποιούνται με αυτά.
- 4) Η μη δυνατότητα ρύθμισης της κάθετης αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται στα δοκίμια κατά τη συγκόλληση δεν φάνηκε να δημιουργεί κάποιο βασικό πρόβλημα , τουλάχιστον στις συγκολλήσεις ελασμάτων αλουμινίου 5083-H111. Ωστόσο, ένα αναβαθμισμένο σύστημα με δυνατότητα καταγραφής (monitoring) της κάθετης αξονικής δύναμης που εφαρμόζεται , ενδεχομένως να διεύρυνε το πεδίο μελέτης σε εργαστηριακές δοκιμές.
- 5) Οι παράμετροι συγκόλλησης όπως η ταχύτητα περιστροφής , η ταχύτητα πρόωσης , η γεωμετρία του εργαλείου καθώς και η κλίση του, επιδρούν όλες σημαντικά στην ποιότητα της παραγόμενης συγκόλλησης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.Oosterkamp , L.Djapic Oosterkamp and A.Nordeide - 'Kissing Bond Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys '
- [2] Β.Ι Παπάζογλου - ' Ναυπηγική Τεχνολογία' - (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις) ΕΜΠ 1995
- [3] Tylecote R.F. 1968- ' The Solid Phase Welding of Metals ' - New York St. Martins Press
- [4] B.Crossland - 'Friction Welding' -Contemporary Physics Vol.12 ,No 6, Nov 1971 , pp 559-574
- [5] E.D.Nicholas -' Friction Processing Technologies'- TWI 1999
- [6] P.D.Sketchley , P.L.Threadgil and I.G.Wright - ' Rotary Friction Welding of a Fe₃Al based Alloy' -Materials Science and Engineering A329 331 (2002) 756-762
- [7] B.J.Inkson and P.L.Threadgil – ' Friction Welding of FeA140 Grade 3 ODS Alloy ' – Materials Science and Engineering A258 (1998) 313-318
- [8] P.D.Sketchley and P.L.Threadgil - ' Radial Friction Welding ' – TWI February 2001
- [9] A.Vairis and M.Frost – ' High Frequency Linear Friction Welding of a Titanium Alloy ' - Wear 1998 , 217 , 117 -131
- [10] The Welding Institute TWI - www.twi.co.uk –
- [11] Stephan W.Kallee , E.Dave Nicholas and Wayne M.Thanas – ' Friction Stir Welding : Invention , Innovations and Industrialisation '
- [12] Rajiv S.Mishra and Murray W.Mahoney – 'Friction Stir Welding and Processing'
- [13] P.L.Threadgil – TWI Bull , March 1997
- [14] Γ.Χριστακόπουλος – ' Μελέτη ομοειδών και ετεροειδών συγκολλήσεων ναυπηγικών κραμάτων αλουμινίου με τη μέθοδο της τριβής με ανάδευση' Διπλ. Εργασία ΕΜΠ 2010
- [15] Institute for Scientific Information Web of Science
- [16] T.J.Lienert , W.L.Stellwag JR , B.B.Grimmett and R.W.Warke –' Friction Stir Welding Studies on Mild Steel'- Weld .J. , Jan 2003 , p 1-5

- [17] D.A.Burford , M.Tweedy and C.A.Widener – ‘ Influence of Shoulder Configuration and Geometric Features on FSW Track Properties’
- [18] S.Brinckmann , A.Von Strombeck , C.Schilling , J.F. dos Santos , D.Lohwasser and M.Kocak – ‘ Mechanical and Toughness Properties of Robotic-FSW Repair Welds in 6061-T6 Aluminum Alloys ’
- [19] R.Zettler , S.Lomolino , J.F. dos Santos , T.Donath , F.Beckmann , T.Lipmand and D.Lohwasser – ‘ A Stusy of Material Flow in FSW of AA2024-T351 and AA6056-T4 Alloys’
- [20] W.M.Thomas , G.Verhanghe , J.Martin , D.G.Staines and C.Stanhope – ‘Friction Stir Welding- Process Variants- and update’
- [21] W.M.Thomas et al. – ‘ Friction Stir Butt Welding’ – International Patent Application PCT/GB92/02203 and G.B Patent Application 9125978.8 (Dec 1991)
- [22] L.Cederqvist and A.P.Reynolds – ‘ Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints’
- [23] H.Schmidt and J.Hattel - ‘ A Local Model for the Thermomechanical Conditions in Friction Stir Welding’
- [24] T.J.Lienert , W.I. Stellwag Jr and L.R.Lehman - ‘ Comparison of Heat Inputs : FSW versus Arc Welding’
- [25] W.M.Zeng and H.L.Wu – ‘ Effect of Tool Wear on Microstructure , Mechanical Properties and Acoustic Emission of Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy’
- [26] M.Guerra , C.Schmidt , J.C. Mc Clure , L.E.Murr and A.C. Nunes – ‘ Flow Patterns during Friction Stir Welding’