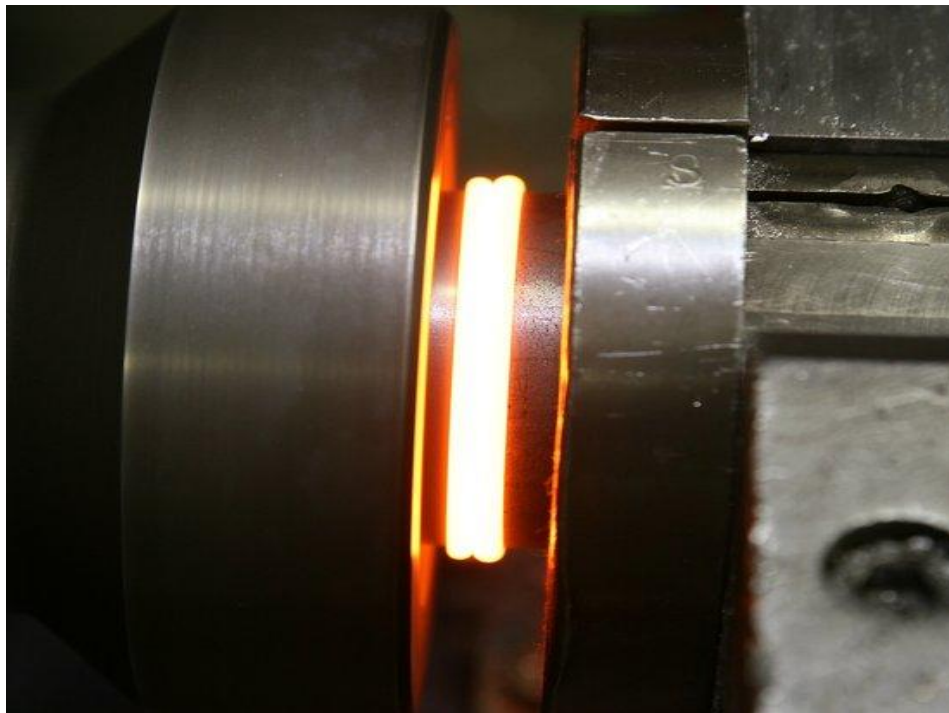




**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΤΡΙΒΗ**



Εκπονητής: Κασσελάκης Ανδρέας

Επιβλέποντες Καθηγητές: Δρ. Βαΐρης Αχιλλέας

Δρ. Πετούσης Μάρκος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2018

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην περάτωση της. Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου τον κ. Δρ. Βαΐρη Αχιλλέα και τον κ. Δρ. Πετούση Μάρκο για την ανάθεση και την επίβλεψη της πτυχιακής μου εργασίας καθώς και για τις συμβουλές και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν καθ' όλη τη διάρκεια. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους συναδέλφους μου Βάμβουκα Βασίλη, Μουντάκη Νίκο και Φρουδαράκη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια τους στην υλοποίηση του project της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της πρακτικής μου άσκησης στο Εργαστήριο Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης Μηχανικής του ΤΕΙ Κρήτης. Τέλος θέλω να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στους φίλους για την αγάπη και την υποστήριξη που μου δίνουν όλα αυτά τα χρόνια.

Κασσελάκης Ανδρέας

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην τεχνολογία της συγκόλλησης με τριβή, η οποία είναι μια διαδικασία συγκόλλησης κατά την οποία η θερμότητα που απαιτείται για την ένωση δύο τεμαχίων παρέχεται στο σύστημα από την απ' ευθείας μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμική επί των προς συγκόλληση επιφανειών. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται μία λεπτομερή αναφορά στην διαδικασία των διάφορων ειδών συγκόλλησης τριβής που υπάρχουν, στις παραμέτρους που έχει η κάθε μέθοδος, στις μηχανές συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται, αλλά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος της Συγκόλλησης Τριβής με Γραμμική Παλινδρόμηση στην οποία γίνεται συγκόλληση μεταξύ δύο ορθογώνιων τεμαχίων αναλύοντας την διαδικασία της συγκόλλησης.

Μετά γίνεται περιγραφή στη μέθοδο Συγκόλλησης Τριβής με Περιστροφή στην οποία γίνεται συγκόλληση μεταξύ κυλινδρικών τεμαχίων. Έπειτα γίνεται αναφορά στις δύο πιο νέες μεθόδους συγκόλλησης με τριβή. Πρώτα γίνεται αναφορά στην μέθοδο Συγκόλλησης Τριβής με Κίνηση σε Τροχιά στην οποία γίνεται συγκόλληση ορθογώνιων τεμαχίων. Έπειτα περιγράφεται η μέθοδος Συγκόλλησης Τριβής με Τοξοειδή Περιστροφή στην οποία γίνεται συγκόλληση μεταξύ κυλινδρικών κοίλων τεμαχίων. Μετά γίνεται ανάλυση της μεθόδου Συγκόλλησης Τριβής με Ανάδευση. Αρχικά γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας μέσα από στοιχεία που μελετήθηκαν μέσω της βιβλιογραφίας. Μετά γίνεται αναφορά στην πειραματική διαδικασία του συγκεκριμένου είδους συγκόλλησης που ενεργήθηκε ως project σε πρακτική άσκηση στο ΤΕΙ Κρήτης με τη βοήθεια μίας εργαλειομηχανής CNC.

Abstract

This thesis deals with friction welding technology, which is a welding process in which the heat required for the joining of two pieces provided in the system by directly converting mechanical power into heat on the surfaces to weld. In this thesis is a detailed reference to the procedure of the various friction welding species present, on the parameters of each method, the welding machines used, and to the advantages and disadvantages of each method. Next described in detail the method of Linear Friction Welding in which the weld between two rectangular pieces analyzing the welding process.

Then a description is made of the Rotary Friction Welding method in which welding is made between cylindrical pieces. Then reference is made to the two most recent methods of friction welding. First, reference is made to the method of Orbital Friction Welding in which rectangular pieces are welded. Then describes the Radial Friction Welding method in which welding is made between cylindrical hollow blocks. Following is an analysis the method of Friction Stir Welding. Initially, the process is described through elements studied through the bibliography. Then a reference is made to the experimental process of the particular welding that was activated as a project in practice at Technological Educational Institute of Crete with the help of a CNC machine.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Περιεχόμενα.....	4
Κεφάλαιο 1: Συγκολλήσεις Μετάλλων.....	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2. Ειδή συγκόλλησης μετάλλων.....	8
1.2.1 Συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη (Οξυγονοκόλληση).....	9
1.2.2 Ηλεκτροσυγκόλληση τόξου.....	9
1.2.3 Συγκόλληση T.I.G. (Tungsten Inert Gas).....	10
1.2.4 Συγκόλληση M.I.G. (Metal Inert Gas).....	11
1.2.5 Ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση.....	12
1.2.6 Συγκόλληση με υπερήχους.....	12
1.2.7 Συγκόλληση με Laser.....	13
1.2.8 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος.....	14
1.2.9 Συγκόλληση με τριβή (Friction Welding).....	14
Κεφάλαιο 2: Συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση– (Linear Friction Welding).....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Περιγραφή διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	18
2.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	19
2.4 Φάσεις της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	21
2.4.1 Αρχική φάση.....	21
2.4.2 Φάση μετάβασης.....	23
2.4.3 Φάση εξισορρόπησης.....	24
2.4.4 Φάση επιβράδυνσης.....	26
2.5 Παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	27

2.6 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	28
2.7 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	28
2.8 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).....	29
Κεφάλαιο 3: Συγκόλληση τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding).....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Περιγραφή διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	30
3.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	32
3.4 Στάδια συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	33
3.5 Παράμετροι της μεθόδου συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	35
3.6 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	36
3.7 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	36
3.8 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).....	37
Κεφάλαιο 4: Συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά - (Orbital Friction Welding).....	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	39
4.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	41
4.4 Παράμετροι συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	42
4.5 Τομείς εφαρμογής της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	44
4.6 Πλεονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	44
4.7 Μειονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).....	44
Κεφάλαιο 5: Συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή – (Radial Friction Welding).....	46
5.1 Εισαγωγή.....	46
5.2 Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	46
5.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	48

5.4 Παράμετροι συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	50
5.5 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	51
5.6 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	51
5.7 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).....	52
Κεφάλαιο 6: Συγκόλληση τριβής με ανάδευση - (Friction Stir Welding).....	53
6.1 Εισαγωγή.....	53
6.2 Περιγραφή της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	53
6.3 Ζώνες συγκόλλησης.....	58
6.4 Εργαλειομηχανή CNC συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	59
6.5 Παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	60
6.6 Γεωμετρία συγκόλλησης.....	63
6.7 Ροή Υλικού.....	64
6.8 Συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων.....	65
6.9 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	65
6.10 Πλεονεκτήματα Συγκόλλησης Τριβής με Ανάδευση (FSW).....	65
6.11 Μειονεκτήματα Συγκόλλησης Τριβής με Ανάδευση (FSW).....	66
Κεφάλαιο 7: Πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) στο Εργαστήριο Μηχανολογίας Ακρίβειας και Αντίστροφης Μηχανικής του ΤΕΙ Κρήτης.....	67
7.1 Εισαγωγή.....	67
7.2 Έρευνα παραμέτρων της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	67
7.3 Σχεδιασμός και κατασκευή εργαλείου συγκόλλησης (FSW).....	68
7.4 Κατασκευή βάσης κατεργασίας.....	71
7.5 Διαδικασία πειραμάτων συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	73
7.5.1 Πρώτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	74
7.5.2 Δεύτερη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	78
7.5.3 Τρίτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	79

7.5.4 Τέταρτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	81
7.5.5 Πέμπτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).....	82
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα.....	83
Βιβλιογραφία.....	85

Κεφάλαιο 1: Συγκολλήσεις Μετάλλων

1.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση των μετάλλων είναι μία διαδικασία που υφίσταται από τα αρχαία και μάλιστα οι πρώτες ενδείξεις συγκόλλησης υπάρχουν από την εποχή του χαλκού περί το 4000 π.Χ. με την κατασκευή όπλων, κοσμημάτων αλλά και μικρών στρογγυλών κιβωτίων από χρυσό τα οποία κατασκευάστηκαν με τη εφαρμογή πολύ μεγάλης πίεσης. Την εποχή του σιδήρου οι Αιγύπτιοι και οι κάτοικοι στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου έμαθαν να συγκολλούν κομμάτια σιδήρου μεταξύ τους με την κατασκευή εργαλείων αυτών να χρονολογείται περίπου το 1000 π.Χ.. Την εποχή του μεσαίωνα αναπτύχθηκαν τα πρώτα σιδηρουργεία και ως αποτέλεσμα διάφορα είδη σιδήρου συγκολλήθηκαν με σφυρηλάτηση.

Έως και το 1880 πραγματοποιηθήκαν υποτυπώδεις διαδικασίες συγκόλλησης υλικών. Το 1881 ο Ρώσος με ελληνική καταγωγή εφευρέτης Nikolay Benardos και ο Πολωνός μηχανικός Stanislaw Olszewski εφηύραν τη συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο, ενώ μία δεκαετία αργότερα το 1891 ανακαλύφθηκε η ασετυλίνη με την οποία λειτουργεί η οξυγονοκόλληση. Από τότε και ενώ παράλληλα ακολούθησε η εποχή της βιομηχανικής επανάστασης η εξέλιξη της μοντέρνας τεχνολογίας των συγκολλήσεων ήταν ραγδαία. Κατά την διάρκεια του 20ού αιώνα ανακαλύφθηκαν νέα είδη συγκολλήσεων όπως η συγκόλληση με ηλεκτρόδια, η μέθοδος TIG, η συγκόλληση τριβής και η συγκόλληση με δέσμη φωτός (laser).

1.2 Είδη συγκόλλησης μετάλλων

Η συγκόλληση αποτελεί πλέον την πιο γνωστή μέθοδο σύνδεσης δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων έτσι ώστε να συμπεριφέρονται ως ένα σώμα. Τα κυριότερα είδη συγκόλλησης είναι τα εξής:

- **Συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη (Οξυγονοκόλληση)**
- **Ηλεκτροσυγκόλληση τόξου**

- Συγκόλληση T.I.G. (Tungsten Inert Gas)
- Συγκόλληση M.I.G. (Metal Inert Gas)
- Ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση
- Συγκόλληση με υπερήχους
- Συγκόλληση με Laser
- Συγκόλληση με πλάσμα
- Συγκόλληση με τριβή

1.2.1 Συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη (Οξυγονοκόλληση)

Η συγκόλληση με οξυγονοασετυλίνη ή οξυγονοκόλληση είναι ένα είδος συγκόλλησης στο οποίο η τήξη των δύο άκρων προς συγκόλληση τεμαχίων και με προσθήκη ή όχι συγκολλητικού υλικού όμοιο με τα συγκολλημένα τεμάχια (εικόνα 1.1). Η απαραίτητη θερμότητα για τη συγκόλληση παράγεται με την βοήθεια του οξυγόνου (O_2) και της ασετυλίνης (C_2H_2).



Εικόνα 1.1: Διαδικασία συγκόλλησης με οξυγονοασετυλίνη (Οξυγονοκόλληση).

1.2.2 Ηλεκτροσυγκόλληση τόξου

Η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου είναι συγκόλληση τήξης, με θερμότητα η οποία παράγεται από ηλεκτρικό τόξο. Με τη συγκόλληση αυτή επιτυγχάνεται η

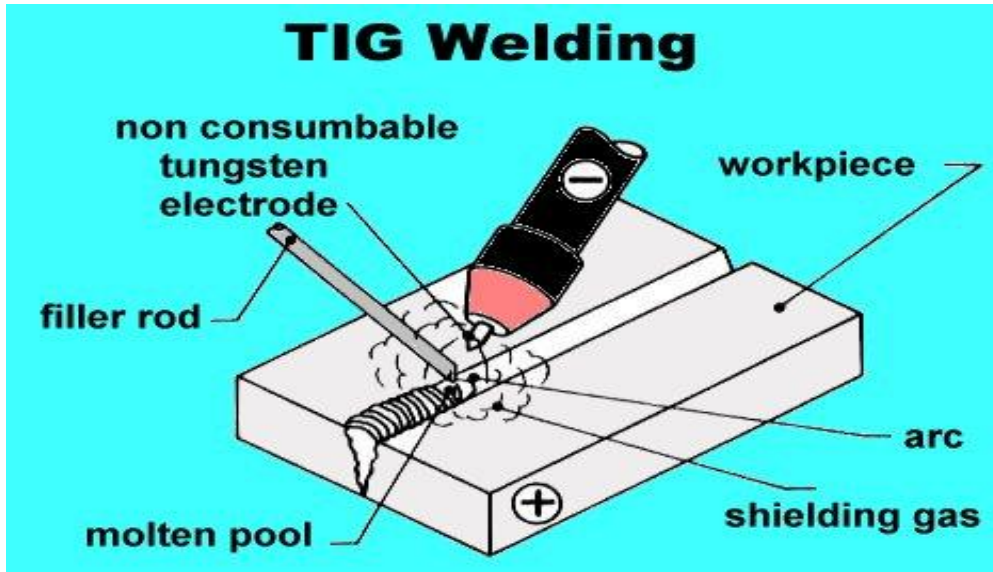
μόνιμη σύνδεση δύο μεταλλικών τεμαχίων ή η συμπλήρωση μιας κοιλότητας με τη βοήθεια ηλεκτρόδιου (**εικόνα 1.3**). Για τη αύξηση της θερμότητας χρησιμοποιείται μία ηλεκτροσυγκολλητική μηχανή η οποία αποτελείται από το πρωτεύον και το δευτερεύον πηνίο. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η ένταση και η μείωση της τάσης.



Εικόνα 1.2: Διαδικασία συγκόλλησης τόξου ή ηλεκτροσυγκόλλησης.

1.2.3 Συγκόλληση T.I.G. (Tungsten Inert Gas)

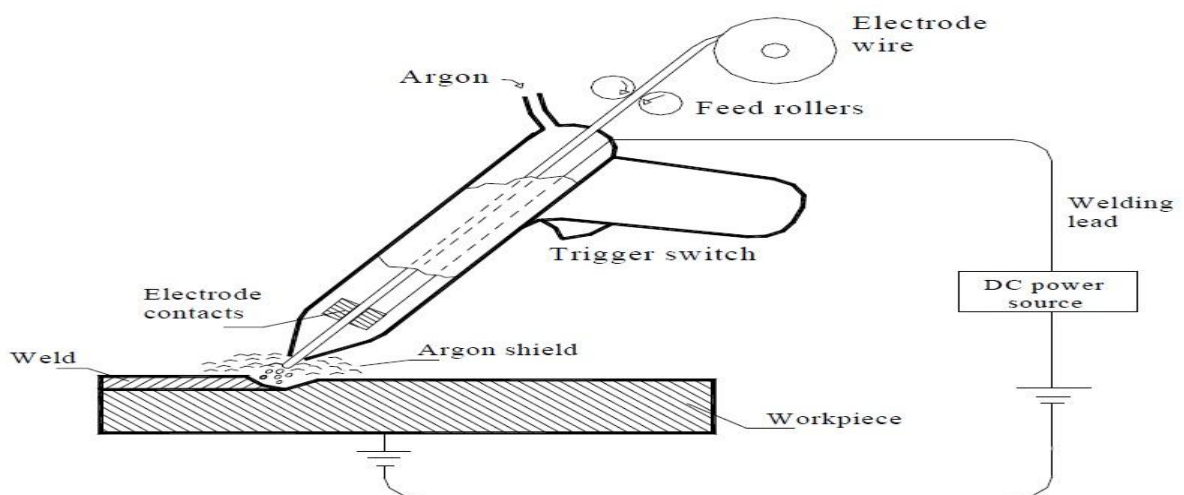
Η μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Το χρησιμοποιούμενο μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο είναι από βολφράμιο ενώ επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προστιθέμενο μέταλλο. (**εικόνα 1.6**).



Εικόνα 1.3: Διαδικασία συγκόλλησης T.I.G..

1.2.4 Συγκόλληση M.I.G. (Metal Inert Gas)

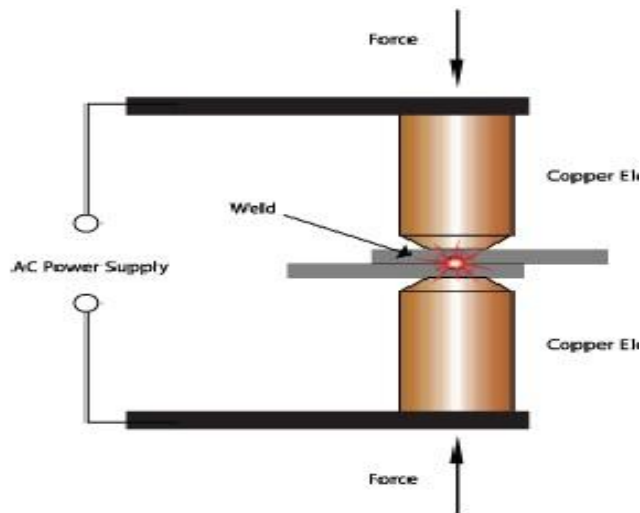
Στη συγκόλληση M.I.G. δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο και τήξη του ηλεκτροδίου λόγω των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Κατά την αρχική επαφή του ηλεκτροδίου με τα σώματα που συγκολλούνται αναπτύσσεται υψηλό ρεύμα που υπερθερμαίνει το άκρο του. Η μικρή απομάκρυνση του ηλεκτροδίου προκαλεί τον σχηματισμό τόξου μεταξύ του ηλεκτροδίου και των συγκολλημένων σωμάτων. (εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Διαδικασία συγκόλλησης M.I.G..

1.2.5 Ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση

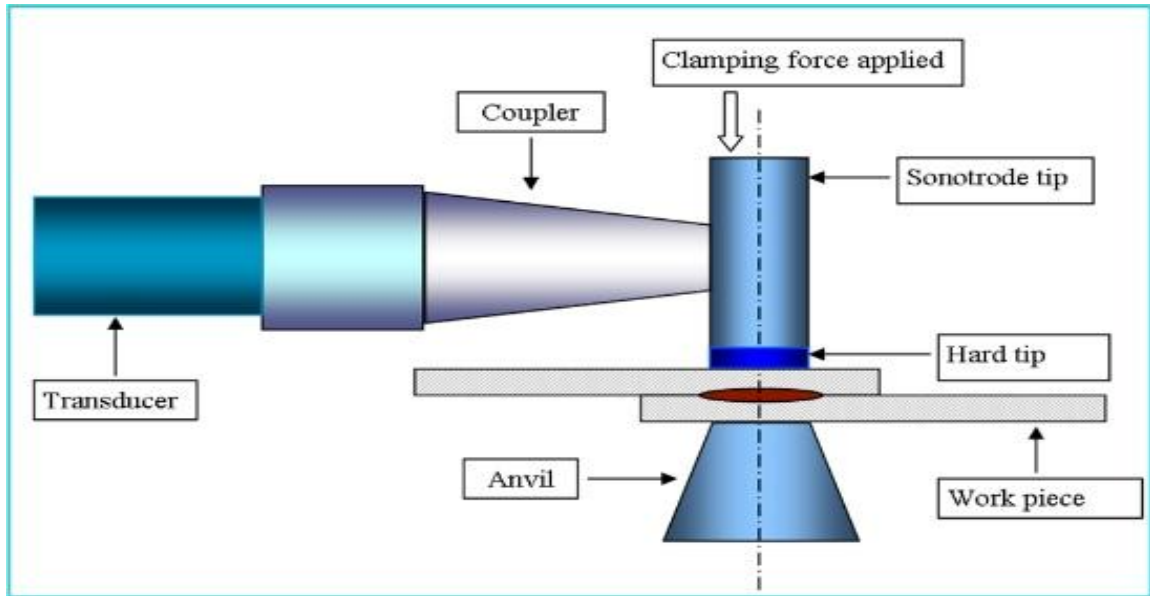
Στην ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν θερμαίνονται συμπιεσμένα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και συγκολλούνται μεταξύ τους. (εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Διαδικασία ηλεκτροσυγκόλλησης με αντίσταση.

1.2.6 Συγκόλληση με υπερήχους

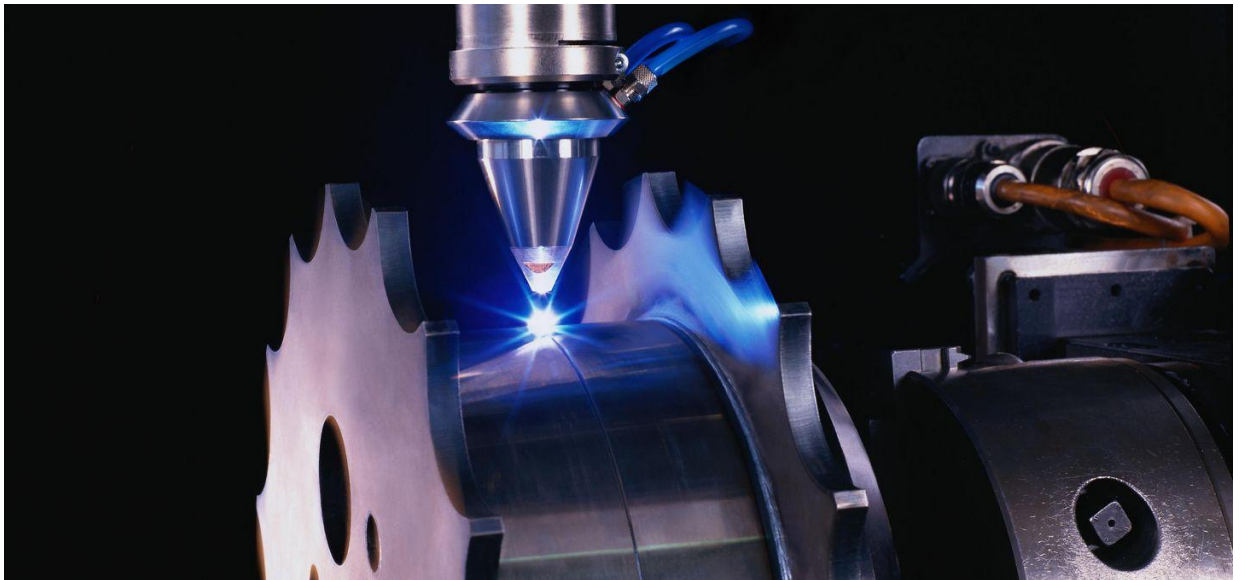
Η συγκόλληση με υπερήχους χρησιμοποιεί ένα εργαλείο το οποίο ονομάζεται converter (μετατροπέας) και το οποίο μετατρέπει τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος σε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται μέσω ενός κρυστάλλου στο ηλεκτρόδιο. Η ενέργεια αυτή μέσω τριβής μετατρέπεται σε θερμότητα και έτσι πραγματοποιείται η συγκόλληση των τεμαχίων (εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6: Διαδικασία συγκόλλησης με υπερήχους.

1.2.7 Συγκόλληση με Laser

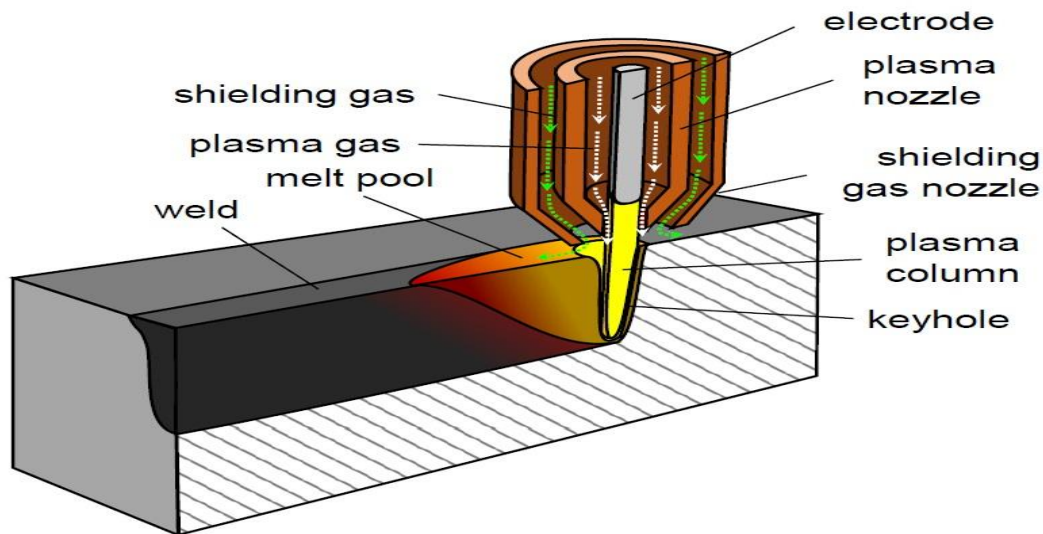
Η συγκόλληση με λέιζερ πραγματοποιείται με τη βοήθεια θερμότητας από μια ισχυρή δέσμη φωτονίων που προσκρούει πάνω στις επιφάνειες των υπό συγκόλληση μετάλλων. (εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7 Διαδικασία συγκόλλησης με Laser.

1.2.8 Συγκόλληση με τόξο πλάσματος

Η ένωση στην μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται με τη μετάδοση θερμότητας από ένα τόξο που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση ελασμάτων ή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ακροφυσίου. (εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Διαδικασία συγκόλλησης με τόξο πλάσματος.

1.2.9 Συγκόλληση με τριβή (Friction Welding)

Η συγκόλληση με τριβή είναι μια διαδικασία συγκόλλησης κατά την οποία η θερμότητα που απαιτείται για την ένωση δύο τεμαχίων παρέχεται στο σύστημα από την απ' ευθείας μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμική επί των προς συγκόλληση επιφανειών. Το συγκεκριμένο είδος συγκόλληση αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στη Σοβιετική Ένωση, με τα πρώτα μηχανήματα και πειράματα να πραγματοποιούνται το 1956. Μεταγενέστερα η τεχνολογία αυτή διαδόθηκε και σε άλλες χώρες όπως στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και στη Μεγάλη Βρετανία ενώ τα τελευταία χρόνια υπάρχουν μηχανήματα συγκόλλησης και σε χώρες της Ασίας.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία συγκόλλησης η οποία αναφέρεται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, πραγματοποιείται κατά τη συνεχή κίνηση του ενός εκ των δύο τεμαχίων ενώ έρχεται σταδιακά σε επαφή με το ακίνητο στέλεχος του δεύτερου τεμαχίου υπό σταθερή είτε υπό αυξανόμενη πίεση υπό σταθερή είτε υπό αυξανόμενη πίεση. Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται πάνω στις δύο επιφάνειες αυξάνουν σημαντικά τη θερμοκρασία των δύο τεμαχίων στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η κατεργασία. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται λόγω της πίεσης που ασκείται πάνω στα τεμάχια όταν η παραπάνω θερμικά επηρεασμένη ζώνη βρίσκεται στην πλαστική περιοχή. Η συγκόλληση με τριβή χρησιμοποιείται σε μέταλλα και θερμοπλαστικά και κυρίως στην αεροναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη παραμένει σχετικά μικρή λόγω του συνδυασμού της γρήγορης ένωσης (της τάξης μερικών δευτερολέπτων) και της άμεσης εισροής θερμότητας πάνω στις επιφάνειες των τεμαχίων.
- Δεν παρουσιάζονται απόβλητα και καπνοί που παρατηρούνται σε άλλα είδη συγκόλλησης.
- Η μέθοδος είναι ευκόλως αυτοματοποιήσιμη ενώ και ο έλεγχος των παραμέτρων της κατεργασίας κατά τη διάρκεια αυτής είναι σχετικά απλός.
- Επιπλέον είναι δυνατή η συγκόλληση μετάλλων τα οποία δύσκολα συγκολλούνται με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης λόγω της δημιουργίας εύθραυστων ή ψαθυρών ενώσεων.
- Χρησιμοποιείται σε θερμοπλαστικά, τα οποία δρουν με τρόπο ανάλογο με τα μέταλλα υπό κατάλληλες συνθήκες θερμότητας και πίεσης.
- Η μη ύπαρξη απόβλητα και καπνοί που εμφανίζονται σε αντίστοιχες συμβατικές κατεργασίες.
- Παρουσιάζεται χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με τα άλλα είδη συγκόλλησης.

- Το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης είναι εύκολο και αυτοματοποιημένο και ο έλεγχος των παραμέτρων της κατεργασίας κατά τη διάρκεια αυτής είναι σχετικά απλός.
- Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προστασία των περιοχών συγκόλλησης κατά την κατεργασία όπως π.χ. παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας.
- Η δυνατότητα να συγκολληθούν πληθώρα σιδηρούχων και μη κραμάτων όπως επίσης μέταλλα με πολύ διαφορετικές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον είναι δυνατή η συγκόλληση μετάλλων τα οποία δύσκολα συγκολλούνται με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης λόγω της δημιουργίας εύθραυστων ή ψαθυρών ενώσεων.

Η κατάταξη των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης με τριβή γίνεται ανάλογα με τη σχετική κίνηση των τεμαχίων που τίθενται για συγκόλληση και με βάση την παροχή της ισχύος στο σύστημα. Με βάση την κίνηση των τεμαχίων είδη συγκόλλησης με τριβή τα οποία αναφέρονται στα επόμενα κεφάλαια αναλυτικά είναι τα εξής:

- **Συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction Welding).**
- **Συγκόλληση τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding).**
- **Συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά (Orbital Friction Welding).**
- **Συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή – Radial Friction Welding (RFW).**
- **Συγκόλληση τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding).**

Κεφάλαιο 2: Συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση – (Linear Friction Welding)

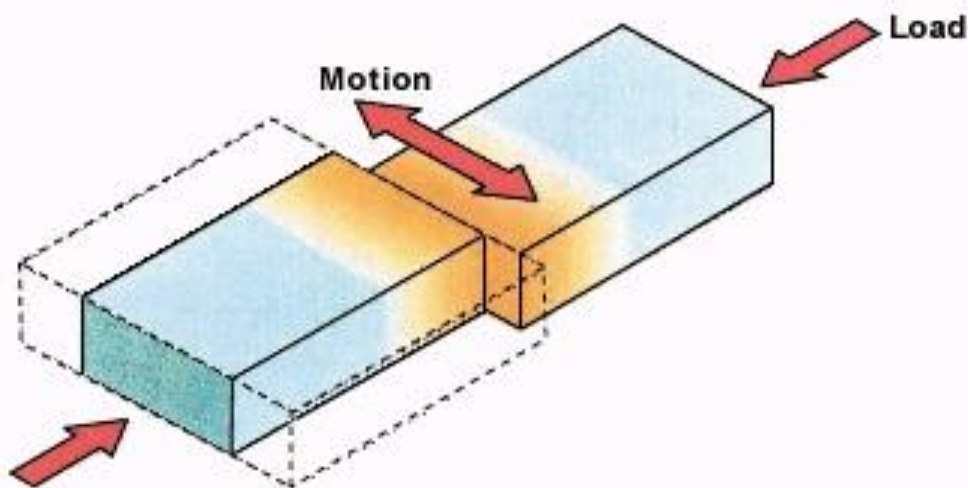
2.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction Welding) ή LFW είναι το πρώτο είδος συγκόλλησης τριβής που πραγματοποιήθηκε το 1956 στην Σοβιετική Ένωση το 1956 και τα πρώτα πειράματα έγιναν από τον Α. Ι. Chudikov, και τις πρώτες βιομηχανίες στις χώρες του Δυτικού κόσμου εμφανίζονται το 1965. Το 1969 στη Μεγάλη Βρετανία γίνεται αναφορά σε ένα μηχανισμό γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκόλληση μαλακού χάλυβα. Αυτή είναι και η πρώτη καταγεγραμμένη χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης η οποία αποτέλεσε την απαρχή για τη δημιουργία και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου που σήμερα είναι ευρέως γνωστή ως Συγκόλληση Τριβής με Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Friction Welding – LFW). Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο οργανισμός έρευνας και τεχνολογίας με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο TWI (The Welding Institute) παρουσίασε μία μηχανολογική διάταξη με την οποία ήταν δυνατή η συγκόλληση με γραμμική παλινδρόμηση. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πρωτότυπης ηλεκτρομηχανολογικής συσκευής η οποία χρησιμοποιούσε τη γραμμική παλινδρόμηση ακολούθησε στα μέσα της ίδιας δεκαετίας. Δύο παρόμοιες μηχανολογικές διατάξεις βρίσκονται στις εγκαταστάσεις μεγάλης αεροπορικής βιομηχανίας στην Ευρώπη ενώ αρκετά παρόμοια μηχανήματα υπάρχουν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, την Ευρώπη και τα τελευταία χρόνια και στην Ασία. Η Συγκόλληση Τριβής με Γραμμική Παλινδρόμηση χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροναυπηγική από εταιρίες που κατασκευάζουν κινητήρες αεροπλάνων.

Η Γραμμική Συγκόλληση Τριβής με Γραμμική Παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση μετάλλων όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός και το νικέλιο αλλά και για τη συγκόλληση μεταλλικών κραμάτων. Επίσης αυτό το είδος συγκόλλησης χρησιμοποιείται για την ένωση χαλκού και αλουμινίου για την κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών.

2.2 Περιγραφή διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

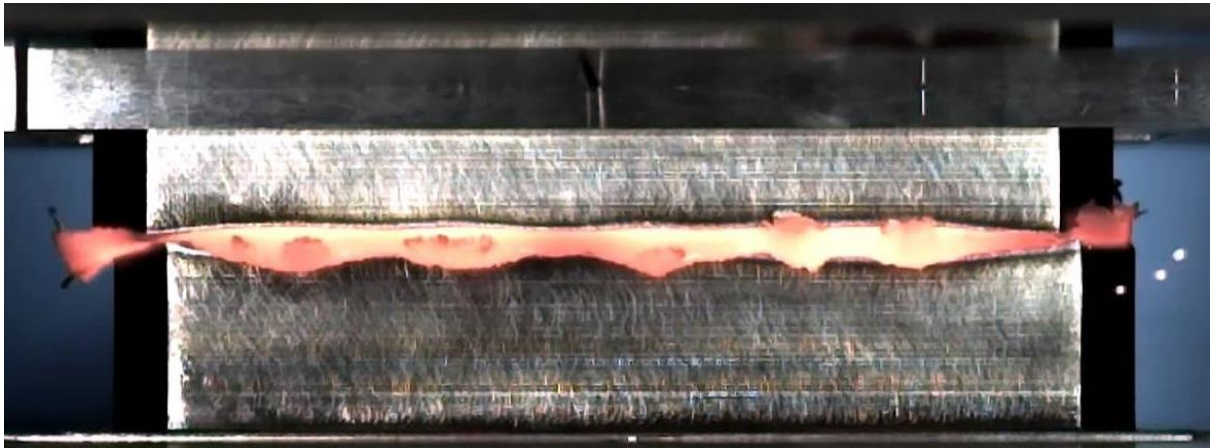
Η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση επιτυγχάνεται μέσω της γραμμικής κίνησης μεταξύ δύο τεμαχίων στα οποία το ένα παραμένει σταθερό και το άλλο εκτελεί παλινδρομική κίνηση, με παράλληλη εφαρμογή δύναμης κάθετης στην επιφάνεια επαφής. Η θερμότητα που παράγεται από την τριβή καθώς και οι τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια συγκόλλησης μέσω της παλινδρομικής κίνησης, παρουσιάζεται σε πρώτο στάδιο την εξάλειψη τοπικών ανωμαλιών και ατελειών των επιφανειών των δύο τεμαχίων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η πλαστικοποίηση του υλικού των τεμαχίων στην περιοχή της συγκόλλησης (εικόνα 2.1). Για να επιτευχθεί η απαραίτητη για την συγκόλληση πλαστικοποίηση του υλικού είναι αναγκαίο το κινούμενο τεμάχιο μέσω της παλινδρομικής κίνησης που εκτελεί, να προσδώσει στις δύο επιφάνειες ποσό θερμότητας ικανό να υπερκαλύψει τις απώλειες θερμότητας προς την ατμόσφαιρα και τη βάση στήριξης των τεμαχίων.



Εικόνα 2.1: Διαδικασία συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

Η πλαστικοποίηση του υλικού και η ταυτόχρονη εφαρμογή της δύναμης συμπίεσης έχει ως αποτέλεσμα μια ποσότητα υλικού των δύο τεμαχίων να εξωθηθεί εκτός της επιφάνειας επαφής δημιουργώντας γρέζι και έτσι εμφανίζεται μία μόνιμη παραμόρφωση της πλαστικοποιημένης ζώνης. Το

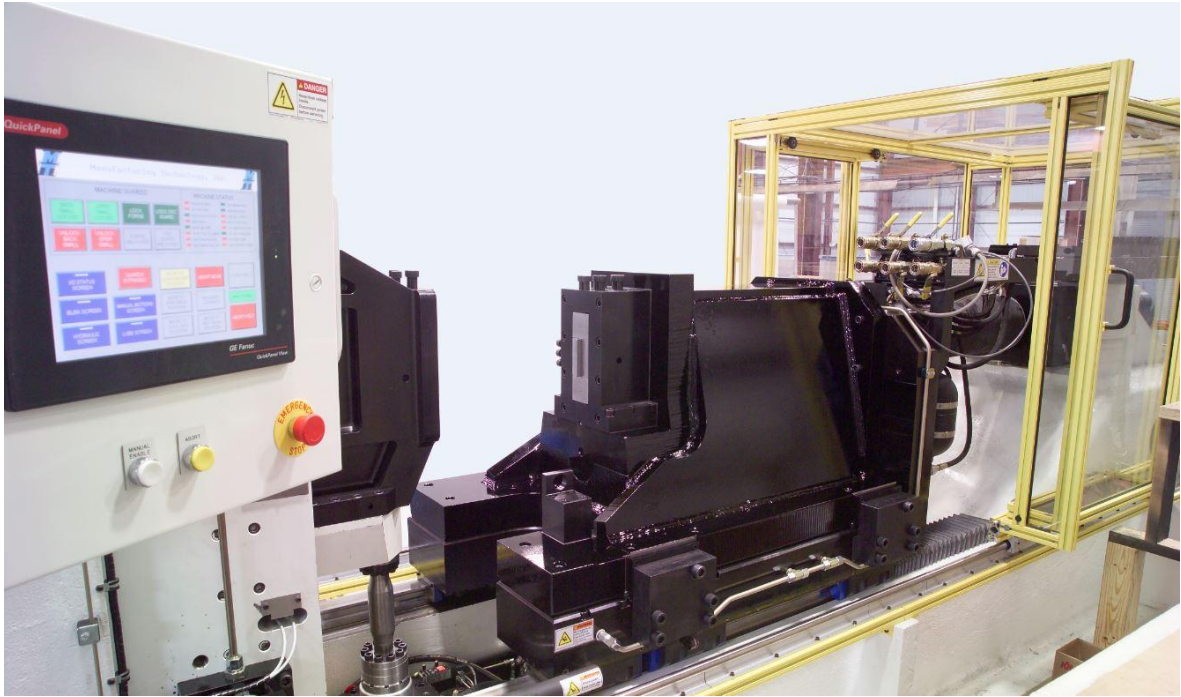
μήκος των δύο τεμαχίων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και παράλληλα ποσότητα υλικού συνεχίζει να αποβάλλεται από την επιφάνεια επαφής. Όταν η συγκόλληση πραγματοποιηθεί με επιτυχία ακολουθεί η ακαριαία παύση της παλινδρομικής κίνησης και η εφαρμογή υψηλής αξονικής δύναμης ώστε να εδραιωθεί και να ισχυροποιηθεί η ένωση των τεμαχίων (**εικόνα 2.2**).



Εικόνα 2.2: Συγκόλληση δύο τεμαχίων χάλυβα με συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

2.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

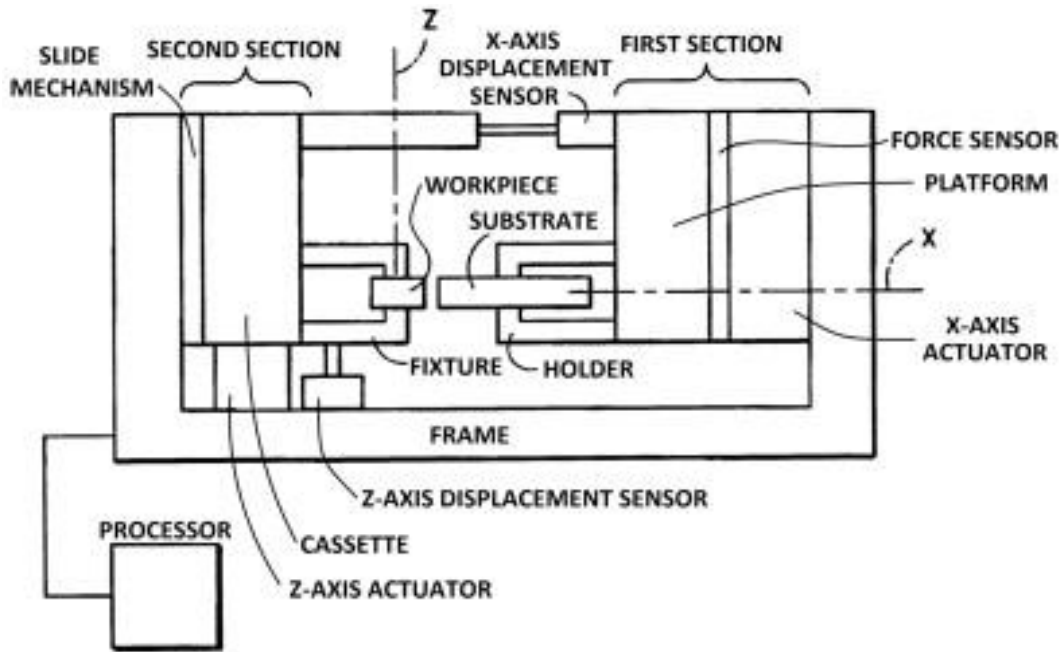
Στην **εικόνα 2.2** δείχνει μία μηχανή συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση και στην οποία γίνεται η διεργασία.



Εικόνα 2.2: Μηχανή συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

Στην **εικόνα 2.3** παρουσιάζεται ένα σχέδιο της μηχανής συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση με δύο τεμάχια προς συγκόλληση να είναι συνδεδεμένα πάνω στη μηχανή και στην οποία αναφέρονται τα βασικά σημεία της μηχανής τα οποία είναι τα εξής:

- Επεξεργαστής της μηχανής
- Μηχανισμός ολίσθησης
- Αισθητήρας μετατόπισης του άξονα x
- Αισθητήρας δύναμης
- Πλατφόρμα
- Ενεργοποιητής του άξονα x
- Αισθητήρας μετατόπισης του άξονα z
- Ενεργοποιητής του άξονα z
- Πλαίσιο - σκελετός μηχανής



Εικόνα 2.3: Σχέδιο μηχανής συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

2.4 Φάσεις της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

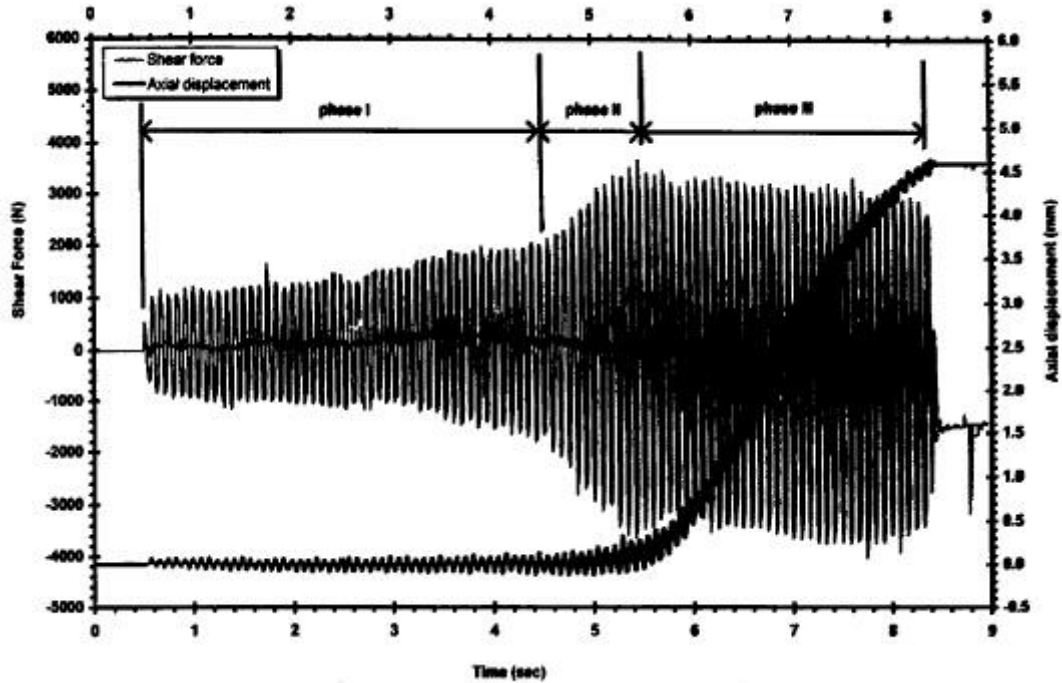
Η συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση χωρίζεται σε τέσσερις φάσεις:

- Αρχική φάση (Initial phase).
- Φάση μετάβασης (Transition phase).
- Φάση εξισορρόπησης (Equilibrium phase).
- Φάση επιβράδυνσης (Deceleration phase).

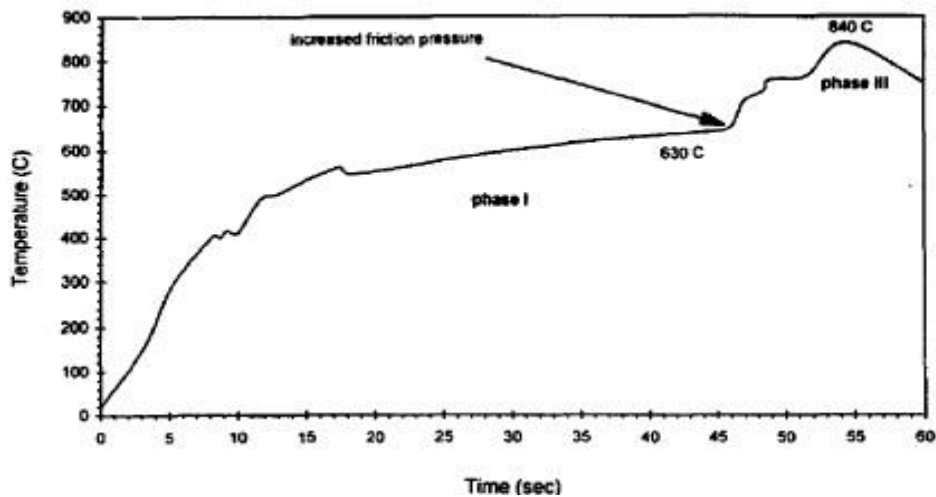
2.4.1 Αρχική φάση

Η εκκίνηση της διαδικασίας γίνεται αφού πρώτα οι δύο επιφάνειες έρθουν σε επαφή. Λόγω της τραχύτητας οι επιφάνειες των τεμαχίων δεν βρίσκονται σε απόλυτη επαφή. Καθώς εκτελείται η παλινδρομική κίνηση, η τριβή προκαλεί την αύξηση της παραγόμενης θερμότητας και η επιφάνεια επαφής συνεχώς αυξάνεται. Η άνοδος της θερμοκρασίας προκαλεί τη μείωση του ορίου διαρροής λόγω διάτμησης και έτσι η διατμητική δύναμη στο στάδιο αυτό παραμένει σταθερή (εικόνα 2.4) ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που

αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής των δύο τεμαχίων από χάλυβα κυμαίνεται στους 630 °C (εικόνα 2.5).

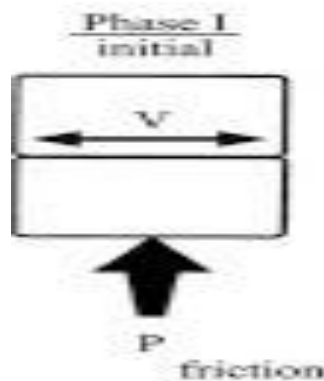


Εικόνα 2.4: Διάγραμμα χρόνου και διατμητικής τάσης κατά τη διάρκεια συγκόλλησης τριβής με παλινδρόμηση μεταξύ δύο τεμαχίων από χάλυβα.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα χρόνου και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια συγκόλλησης τριβής με παλινδρόμηση (LFW) μεταξύ δύο τεμαχίων από χάλυβα.

Πολύ σημαντικό ρόλο κατά την πρώτη φάση της συγκόλλησης διαδραματίζει η ταχύτητα κίνησης του τεμαχίου στο οποίο γίνεται παλινδρομική κίνηση για μία συγκεκριμένη τιμή αξονικής δύναμης. Στην περίπτωση που η ταχύτητα κίνησης είναι χαμηλή η θερμότητα που θα δημιουργηθεί δεν θα είναι ικανή να υπερκεράσει τις απώλειες προς το περιβάλλον και τη βάση στήριξης του τεμαχίου. Αν συμβεί αυτό τότε οι ανωμαλίες στις επιφάνειες επαφής δεν θα εξαλειφθούν ενώ θα είναι αδύνατο να πλαστικοποιηθεί η περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια ώστε η διαδικασία να περάσει στην επόμενη φάση (**εικόνα 2.6**).

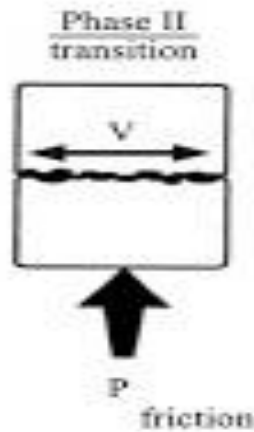


Εικόνα 2.6: Αρχική φάση της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

2.4.2 Φάση μετάβασης

Εφ' όσον η ταχύτητα κίνησης του κινούμενου τεμαχίου είναι αρκετή ώστε να επιτευχθεί πλαστικοποίηση του υλικού, η συγκόλληση εισέρχεται στην δεύτερη φάση(φάση μετάβασης). Η ταχύτητα και οι ανωμαλίες των επιφανειών επαφής εξαφανίζονται ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη επεκτείνεται συνεχώς μέχρι η διαδικασία να εισέλθει στην τρίτη φάση(φάση εξισορρόπησης). Στη φάση της μετάβασης η πλαστικοποιημένη ζώνη δεν έχει την ικανότητα να φέρει τα αξονικά φορτία και η διατμητική δύναμη αυξάνεται, ενώ παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία μείωση μήκους των τεμαχίων. Σε μακροσκοπικό επίπεδο η απόλυτη επαφή των τεμαχίων οδηγεί στην κοινή διάχυση των ατόμων και τη δημιουργία μεταλλικών δεσμών καθ' όλη την

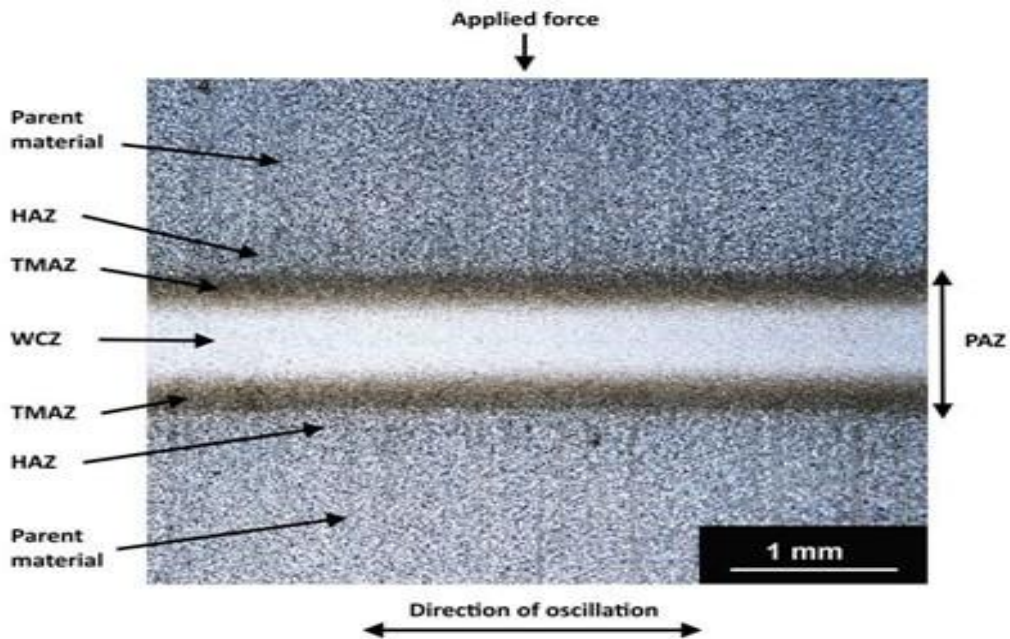
έκταση της επιφάνειας επαφής. Έτσι γίνεται την ένωση των δύο τεμαχίων (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Φάση μετάβασης της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

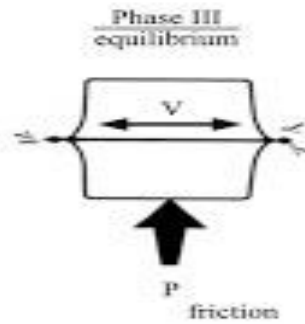
2.4.3 Φάση εξισορρόπησης

Κατά την τρίτη φάση της συγκόλλησης (φάση εξισορρόπησης) λαμβάνει χώρα η εξώθηση υλικού εκτός της επιφάνειας επαφής. Οι υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν την ελαστικότητα των τεμαχίων και τα αναγκάζουν να παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά. Υπό την επίδραση του αξονικού φορτίου ποσότητα μάζας του υλικού εξωθείται εκτός της επιφάνειας επαφής (γρέζι) περιμετρικά του τεμαχίου και έχει κυματοειδή μορφή. Άμεση συνέπεια της απώλειας μάζας είναι η μείωση του μήκους των τεμαχίων, η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο. Η Θερμομηχανικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΜΕΖ) - Thermomechanically Affected Zone (TMAZ) η οποία ξεκινά από την επιφάνεια επαφής, συνεχίζει να επεκτείνεται προς το υπόλοιπο σώμα των τεμαχίων κατά τη συγκεκριμένη φάση της συγκόλλησης (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση μικροδομών κατά τη διάρκεια της φάσης εξισορρόπησης της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW) μεταξύ δύο τεμαχίων στην οποία φαίνονται η Θερμομηχανικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΜΕΖ) - Thermomechanically Affected Zone (TMAZ), η Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ) - Heat Affected Zone (HAZ) και η Ζώνη Κέντρου Συγκόλλησης - Weld Centre Zone (WCZ).

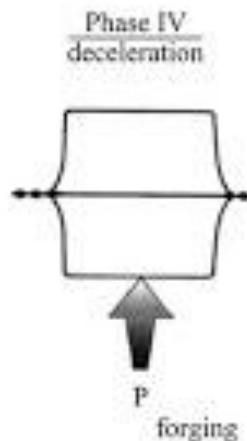
Στην περίπτωση που η θερμοκρασία δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στις επιφάνειες των δύο τεμαχίων αλλά παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε ένα τμήμα, η πλαστικοποιημένη ζώνη γίνεται λεπτότερη στο τμήμα αυτό και μεγαλύτερη ποσότητα υλικού αποβάλλεται. Αυτό οφείλεται στη μη παράλληλη ευθυγράμμιση των τεμαχίων και συντελεί στο να μετατοπιστεί η περιοχή μέγιστης θερμοκρασίας από το κέντρο της επιφάνειας (εκεί όπου βρίσκεται όταν τα τεμάχια είναι τοποθετημένα παράλληλα) επαφής σε πλευρική του κέντρου περιοχή. Το φαινόμενο αυτό είναι πιθανό να προκαλέσει μείωση της ισχύος του δεσμού και γι' αυτόν τον λόγο είναι πολύ σημαντική παράμετρος η σωστή τοποθέτηση και η ευθυγράμμιση των τεμαχίων πριν την έναρξη της συγκόλλησης (εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Φάση εξισορρόπησης της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

2.4.4 Φάση επιβράδυνσης

Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή μείωση μήκους η διαδικασία της συγκόλλησης τερματίζεται με την ακαριαία παύση της παλινδρομικής κίνησης. Τα δύο τεμάχια έχουν πάρει την τελική τους θέση και ακολουθεί η επιβολή ισχυρής αξονικής πίεσης, χωρίς αυτή βέβαια να είναι πάντα απαραίτητη. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το ποσό ενέργειας που έχει δαπανηθεί για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης είναι ίσο ή ελαχίστως περισσότερο από το απαιτούμενο με αποτέλεσμα η επιβολή μιας επιπλέον δύναμης πίεσης να είναι απαραίτητη ώστε η συγκόλληση να είναι αποτελεσματική (εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Φάση επιβράδυνσης της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW).

2.5 Παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

Οι παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση είναι οι εξής:

- Η Συχνότητα της παλινδρομικής κίνησης (f).
- Το πλάτος της παλινδρομικής κίνησης (a)
- Η αξονική δύναμη τριβής (P)
- Η μείωση του μήκους (S)

Στη συγκόλληση τριβής γραμμικής παλινδρόμησης υπάρχουν τέσσερις παράμετροι οι οποίοι αναφέρθηκαν πιο πάνω. Η συχνότητα κίνησης (f) το πλάτος ταλάντωσης (a) του κινούμενου τεμαχίου, η αξονική δύναμη πίεσης (P) και η απώλεια μήκους (s). Οι τιμές των παραμέτρων επηρεάζουν αποφασιστικά τη διαδικασία συγκόλλησης και καθορίζουν το χρόνο συγκόλλησης, τα χαρακτηριστικά της μικροδομής στην περιοχή συγκόλλησης και στην Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη (Thermomechanically Affected Zone), τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης και είναι αυτές που καθορίζουν αν η ένωση των τεμαχίων είναι επιτυχής ή όχι.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση μέχρι σήμερα δεν έχει εξερευνηθεί πλήρως. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται σειρές πειραματικών δοκιμών με μηχανές συγκόλλησης μέσω των οποίων είναι δυνατός ο έλεγχος και καθορισμός των παραμέτρων αυτών, έτσι ώστε εξετάζοντας τα αποτελέσματα να γίνει εκτίμηση για το εύρος των τιμών που οδηγούν σε μια ισχυρή συγκόλληση για κάθε παράμετρο ξεχωριστά αλλά και για συνδυασμούς παραμέτρων συνολικά. Αυτό που είναι σαφές με βεβαιότητα είναι ότι απαιτείται ένα ελάχιστο, κρίσιμο ποσό θερμικής ενέργειας για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς συγκόλλησης. Στην περίπτωση που ο συνδυασμός των παραμέτρων αποδίδει στα προς συγκόλληση τεμάχια ποσό θερμότητας μικρότερο από αυτό, τότε η επίτευξη μιας ισχυρής ένωσης μεταξύ των τεμαχίων είναι αδύνατη.

2.6 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

Η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση εφαρμόζεται στους εξής τομείς

- Στην ναυπηγική
- Στη αεροναυπηγική
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Στη συγκόλληση αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Σε στρατιωτικό εξοπλισμό

2.7 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

Η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση είναι μια νέα σχετικά μέθοδος συγκόλλησης η οποία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Η απλοποιημένη λειτουργία της μεθόδου.
- Οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις.
- Επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα επειδή η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη και οι παράμετροι της αυστηρά ελεγχόμενες.
- Δεν παρουσιάζονται ανεπιθύμητες επιφανειακές στρώσεις, οξειδώσεις και ανωμαλίες της προς συγκόλληση επιφάνειας εξαλείφονται από την θερμότητα που παράγεται κατά την τριβή.
- Εφόσον έχουν διερευνηθεί και αποφασισθεί οι τιμές των παραμέτρων η συγκόλληση πραγματοποιείται σε μερικά δευτερόλεπτα.
- Η θερμότητα διαχέεται ταχύτατα, με αποτέλεσμα να διασκορπίζεται σε μία περιορισμένη περιοχή των συγκολλημένων τεμαχίων αφήνοντας το υπόλοιπο υλικό ανεπηρέαστο.

- Η απώλεια υλικού και η μείωση μήκους σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους συγκόλλησης είναι σημαντικά μικρότερη.
- Είναι δυνατή η συγκόλληση μετάλλων διαφορετικής σύστασης, συμπεριλαμβανομένων αρκετών, τα οποία δεν είναι δυνατόν να συγκολληθούν με τήξη.
- Η εξαιρετικά λεπτόκοκκη μικροδομή του υλικού στη ζώνη συγκόλλησης προσδίδει σε αυτό πολύ υψηλή αντοχή σε θραύση και κόπωση.

2.8 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW)

Η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση εμφανίζει ένα μικρό αριθμό μειονεκτημάτων μερικά από τα οποία όμως είναι αρκετά σημαντικά και αποτελούν εμπόδιο για την περαιτέρω εξάπλωση και εξέλιξη της εφαρμογής της. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται είναι τα εξής:

- Η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται σε ορθογωνικά τεμάχια.
- Μέχρι και σήμερα είναι δυνατή η συγκόλληση αποκλειστικά τεμαχίων με μικρές διαστάσεις.
- Η συγκόλληση χαλύβων με υψηλή περιεκτικότητα άνθρακα παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες.
- Οι υψηλές αξονικές δυνάμεις απαιτεί δυνατές κατασκευές.
- Σε μερικές περιπτώσεις η ποσότητα μάζας που αποβάλλεται (γρέζι) είναι υπερβολικά μεγάλη.
- Οι μηχανές συγκόλλησης έχουν υψηλό κόστος στην αγορά και απαιτούν για τη χρήση τους εξειδικευμένο προσωπικό.

Κεφάλαιο 3: Συγκόλληση τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding)

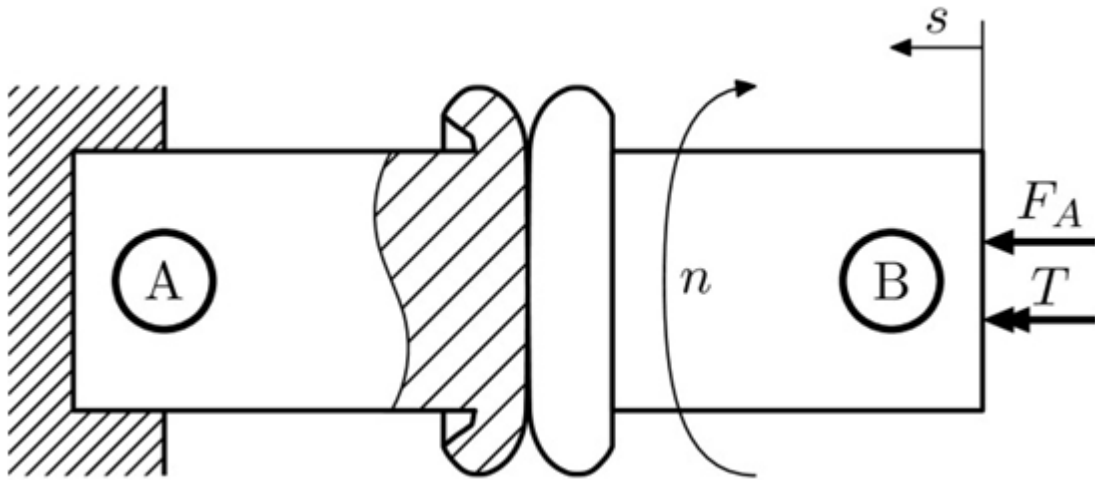
3.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding) είναι η πρώτη, η πιο γνωστή και η πιο απλή μέθοδος συγκόλλησης με τριβή με τα πρώτα μηχανήματα και πειράματα να πραγματοποιούνται αρχές της δεκαετία 50. Εφαρμόζεται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών από την αυτοκινητοβιομηχανία μέχρι τη σιδηροδρομική βιομηχανία αεροναυτική κ.α.. Είναι μία διαδικασία στερεάς κατάστασης στην οποία το ένα δοκίμιο περιστρέφεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, ενώ το άλλο δοκίμιο παραμένει ακίνητο. Η προκύπτουσα τριβή θερμαίνει τα δύο δοκίμια και πραγματοποιείται η συγκόλληση των δύο δοκιμίων.

3.2 Περιγραφή διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Η συγκόλληση τριβής με περιστροφή (Rotary Friction Welding) είναι μία διαδικασία συγκόλλησης δύο σωμάτων ή τεμαχίων με μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια από την τριβή μεταξύ των επιφανειών συγκόλλησης των δύο τεμαχίων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την πραγματοποίηση σχετικής περιστροφής μεταξύ των δύο τεμαχίων προς συγκόλληση, ενώ οι επιφάνειες συγκόλλησης παραμένουν σε "ενωμένες" μεταξύ τους. Σε μια συγκόλληση με τριβή το ένα από τα δύο ομοαξονικά τεμάχια εργασίας προσαρτάται σε ένα σφόνδυλο και συγκρατείται σε ένα σφιγκτήρα, περιστρέφεται σε μια προκαθορισμένη ταχύτητα περιστροφής και στη συνέχεια κινείται προς το δεύτερο τεμάχιο εργασίας χρησιμοποιώντας πίεση (ή ώθηση) που τροφοδοτείται από τη μηχανή συγκόλλησης. Οι επιφάνειες συγκόλλησης συναντώνται υπό γωνία 0 και έχουν αρχικό σημείο επαφής το οποίο είναι μετατοπισμένο προς την εξωτερική ακμή των τοιχωμάτων του τεμαχίου εργασίας. Μια σταθερή ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας στο σφόνδυλο όπου οι στροφές (n) ανά λεπτό είναι η προκαθορισμένη ταχύτητα του σφονδύλου και το l είναι η περιστροφική

αδράνεια η οποία μετατρέπεται έτσι σε θερμότητα με τριβή στη διεπαφή μεταξύ των επιφανειών συγκόλλησης σε συνδυασμό με την υψηλή πίεση που ασκείται, συγκολλούνται τα δύο τεμάχια μεταξύ τους. Κατά την αρχική επαφή μεταξύ των δύο επιφανειών συγκόλλησης αυξάνεται η θερμοκρασία στο σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων. Στη συνέχεια όταν η θερμοκρασία φτάσει σε αρκετά υψηλά ποσοστά πραγματοποιείται η τήξη του υλικού με τα δύο τεμάχια να πιέζονται μαζί με αποτέλεσμα να "αποβάλλεται" πλευρικά υλικό γύρω από το σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων (εικόνες 3.1 και 3.2).



Εικόνα 3.1: Σχεδιάγραμμα διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

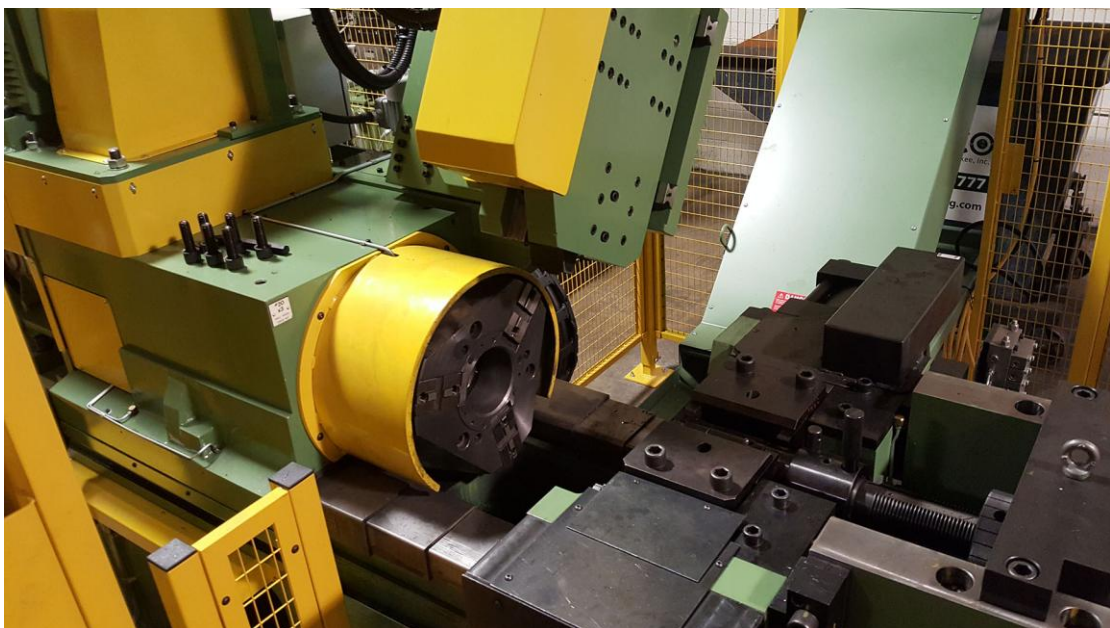


Εικόνα 3.2: Διαδικασία συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

Ωστόσο, οι μεταβολές των συνθηκών επαφής στις επιφάνειες συγκόλλησης οδηγούν σε διακυμάνσεις της διαδικασίας συγκόλλησης. Λόγω των ανοχών της μηχανικής κατεργασίας και των τάσεων που δημιουργούνται, οι επιφάνειες συγκόλλησης γενικά δεν είναι εντελώς επίπεδες, πράγμα που οδηγεί σε μη αξονική συμμετρική επαφή, δημιουργώντας διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας σε ορισμένα σημεία στο σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων. Σε εξαρτήματα με μεγάλες διαμέτρους με λεπτά τοιχώματα, όπως για παράδειγμα σε δίσκους συμπιεστών στροβίλων, αυτή η ανομοιόμορφη επαφή μπορεί να έχει αρκετές ατέλειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβλητότητα της αποτελεσματικότητας της τοπικής θέρμανσης και αλλά και της ψύξης στα σημεία όπου παρουσιάζονται αυτές οι ατέλειες. Η αδυναμία αυτή οφείλεται στο ότι η θερμότητα που παράγεται από την τριβή δεν αναπτύσσεται ομοιόμορφα στο σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων, αφού η ταχύτητα της σχετικής κίνησης αυξάνεται καθώς γίνεται η απομάκρυνση από το κέντρο και μετακινείται προς την περιφέρεια των κυλινδρικών τεμαχίων.

3.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

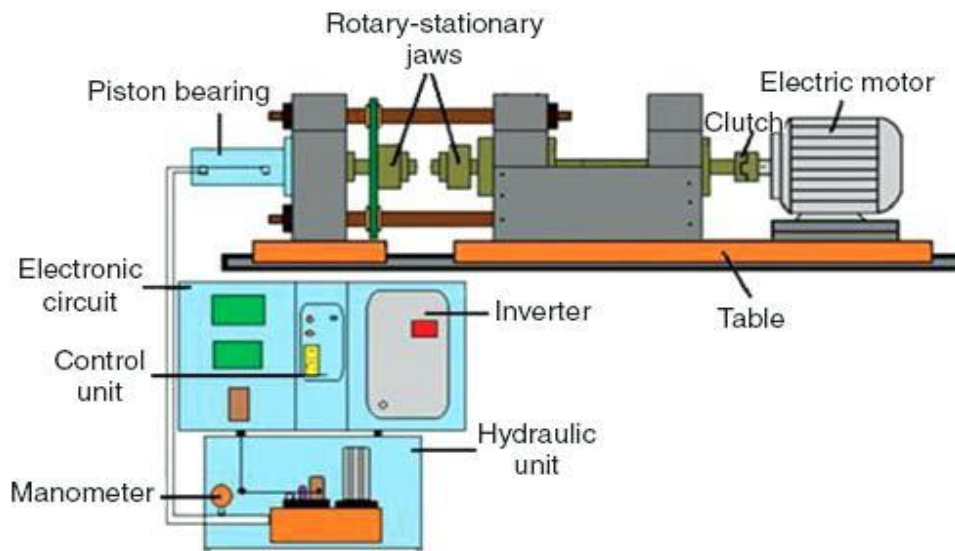
Στην εικόνα 3.3 φαίνεται μια μηχανή συγκόλλησης με περιστροφή.



Εικόνα 3.3: Μηχανή συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

Στην **εικόνα 3.4** παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά μίας μηχανής συγκόλλησης τριβής με περιστροφή τα οποία είναι τα εξής:

- Ηλεκτρικός κινητήρας
- Σφιγκτήρας
- Τράπεζα κατεργασίας
- Περιστροφικές σιαγώνες
- Σταθερές σιαγόνες
- Ρουλεμάν εμβόλου
- Ηλεκτρικό κύκλωμα
- Μονάδα ελέγχου
- Μανόμετρο
- Υδραυλική μονάδα



Εικόνα 3.4: Σχεδιάγραμμα μηχανής συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

3.4 Στάδια συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Η συγκόλληση τριβής με περιστροφή χωρίζεται σε τρία στάδια τα οποία είναι τα εξής:

➤ **Πρώτο στάδιο**

Αρχικά το ένα να δοκίμιο είναι τοποθετημένο σε ένα σταθερό σφινγκτήρα. Το δεύτερο δοκίμιο είναι τοποθετημένο στο περιστρεφόμενο άξονα, το οποίο στη συνέχεια φέρεται σε μια προκαθορισμένη ταχύτητα περιστροφής και την κατάλληλη στιγμή, εφαρμόζεται προκαθορισμένη αξονική δύναμη (εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Πρώτο στάδιο συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

➤ **Δεύτερο στάδιο**

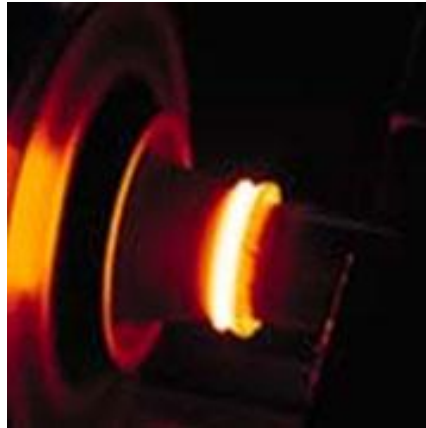
Στο δεύτερο στάδιο της πίεσης εφαρμόζεται πίεση έως ότου υπάρχουν οι επιθυμητές θερμοκρασίες . Σε αυτό το στάδιο τα δύο υλικά είναι πλαστικοποιημένα και τα οποία είναι "εύπλαστα" (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Δεύτερο στάδιο συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

➤ **Τρίτο στάδιο**

Η ταχύτητα περιστροφής σταματάει. Στη συνέχεια, αυξημένη αξονική δύναμη εφαρμόζεται για τη δημιουργία πίεσης για ένα άλλο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία της συγκόλλησης (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Τρίτο στάδιο συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW).

3.5 Παράμετροι της μεθόδου συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Παράμετροι της μεθόδου συγκόλλησης τριβής με περιστροφή είναι οι εξής:

- Η ταχύτητα περιστροφής (n)
- Η αξονική δύναμη F_A .
- Η ροπή T
- Η αξονική τροφοδοσία (s)

Στη συγκόλληση τριβής με περιστροφή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν τέσσερις παράμετροι. Η ταχύτητα περιστροφής (n) η οποία κυμαίνεται ανάλογα με τις συνθήκες μεταξύ 500 RPM και 2100 RPM, η αξονική δύναμη (F_A), η ροπή T και η αξονική τροφοδοσία (s). Αυτοί οι παράμετροι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για τη διαδικασία της συγκόλλησης. Με τη σωστή χρήση τους ανάλογα τις συνθήκες (είδος υλικού, μέγεθος -

διαστάσεις) το τελικό αποτέλεσμα έχει όσο τον δυνατόν λιγότερες έως και μηδενικές αστοχίες.

Για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με περιστροφή ακόμα και σήμερα πραγματοποιούνται πειράματα και δοκιμές πάνω σε νέα μηχανήματα προκειμένου να υπάρχουν όσο τον δυνατόν συγκολλήσεις με λιγότερες αστοχίες οι οποίες γίνονται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που υπάρχει σε διάφορα σημεία πάνω στο σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων προς συγκόλληση όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

3.6 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Η συγκόλληση τριβής με περιστροφή εφαρμόζεται στους εξής τομείς:

- Στην ναυπηγική
- Στη αεροναυπηγική
- Στη γεωργία
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Στην σιδηροδρομική βιομηχανία
- Σε κατασκευή οικοδομικών υλικών
- Στη συγκόλληση αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Σε στρατιωτικό εξοπλισμό

3.7 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Η συγκόλληση τριβής με περιστροφή προσφέρει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Υπάρχει 100% δεσμός στην περιοχή επαφής.
- Δυνατότητα να συγκολληθούν ανόμοια υλικά μεταξύ τους.
- Δημιουργία πολύ ισχυρών συγκολλήσεων.

- Διατηρούνται οι ιδιότητες των υλικών σε αρθρώσεις με περιορισμένες ζώνες προσβολής από θερμότητα και έτσι παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία σε όλο το δοκίμιο.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία.
- Ευκολία στη διαχείριση με μόνο με δύο παράμετροι ελέγχου ποιότητας να χρειάζονται, στροφές (RPM) και πίεση.
- Σύντομους χρόνους συγκόλλησης (περίπου 5 sec) εξοικονομώντας έτσι χρόνο με λιγότερο κόστος.
- Είναι εύκολα αυτοματοποιήσιμη.
- Αυξημένη μηχανική αντοχή λόγω της ελικοειδούς ροής της συγκόλλησης.
- Με τη γρήγορη συγκόλληση επιτρέποντας περισσότερα μέρη να ενωθούν σε λιγότερο χρόνο.
- Είναι μια διαδικασία φιλική προς το περιβάλλον αφού δεν χρησιμοποιούνται αναλώσιμα υλικά.
- Είναι μία διαθέσιμη σε οποιοδήποτε μέγεθος συγκόλλησης.

3.8 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με περιστροφή (RFW)

Η διαδικασία συγκόλλησης τριβής με περιστροφή παρά τα αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία διαθέτει έχει κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται σε κυλινδρικά τεμάχια.
- Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σε κάποιες περιπτώσεις κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης παρουσιάζονται διαφορετικές θερμοκρασίες σε κάποια σημεία πάνω στο σημείο διεπαφής των δύο τεμαχίων με αποτέλεσμα να υπάρχουν κάποιες παραμορφώσεις και αστοχίες στο τελικό αποτέλεσμα.
- Ορισμένες φορές εξαιτίας των ατελειών αυτών χρειάζεται και σε αυτό το είδος συγκόλλησης όπως στην (FSW) περαιτέρω επιφανειακή κατεργασία όπως για παράδειγμα η λείανση, είναι απαραίτητη για την τελειοποίηση του τελικού προϊόντος.

- Οι μηχανές συγκόλλησης τριβής με περιστροφή έχουν υψηλό κόστος στην αγορά και το κόστος συντήρησης τους είναι ιδιαίτερα ακριβό.
- Για τη χρήση των μηχανών συγκόλλησης τριβής με περιστροφή χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό.

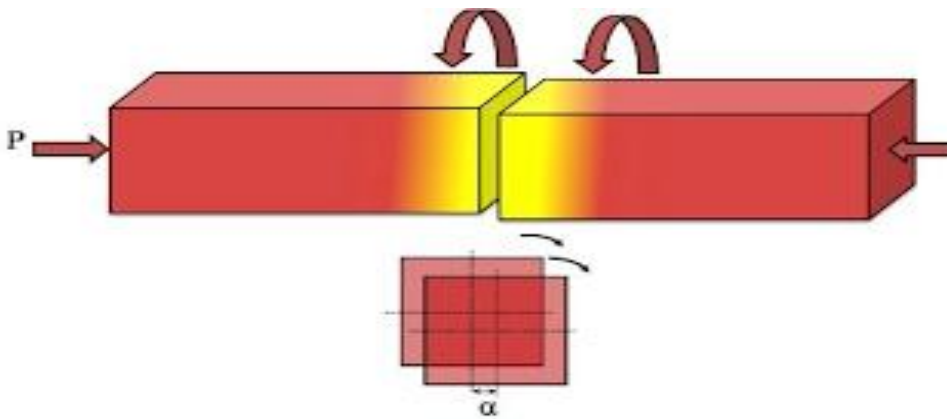
Κεφάλαιο 4: Συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά - (Orbital Friction Welding)

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρεται προηγουμένως η αρχική μέθοδος που χρησιμοποίησε την τριβή ως μέσο συγκόλλησης ήταν η συγκόλληση τριβής με περιστροφή των προς συγκόλληση τεμαχίων (ένα εκ των οποίων κινείται και το δεύτερο παραμένει σταθερό) σε κοινό άξονα (Rotary Friction Welding). Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή αποκλειστικά στη συγκόλληση κυλινδρικών τεμαχίων. Την αδυναμία αυτή ήρθε να καλύψει η συγκόλληση τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (Linear Friction Welding), η οποία δύναται να φέρει εις πέρας συγκόλληση τεμαχίων ορθογωνικής διατομής. Η συγκόλληση τριβής με κίνηση των προς συγκόλληση τεμαχίων σε τροχιά (Orbital Friction Welding) ή OFW αποτελεί μια ακόμη εξέλιξη των μεθόδων συγκόλλησης με χρήση της τριβής. Αποτελεί ουσιαστικά ένα συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων. Ονομάζεται έτσι διότι το κέντρο του κάθε τεμαχίου κατά την κίνησή του, σε σχέση με το έτερο, καταγράφει μία κυκλική τροχιά, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη σχετική κίνηση και επομένως τριβή μεταξύ των τεμαχίων.

4.2 Αρχή λειτουργίας συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Στη διαδικασία συγκόλλησης τα προς συγκόλληση ορθογωνικά τεμάχια κινούνται περί των αξόνων τους κατά την ίδια φορά και με την ίδια ταχύτητα περιστροφής. Οι δύο άξονες είναι παράλληλοι αλλά υπάρχει μια μικρή μετατόπιση του ενός σε σχέση με τον άλλο κατά απόσταση a . Κατά τη διάρκεια της περιστροφής εφαρμόζεται και στα δύο τεμάχια αξονική δύναμη P κάθετη στην επιφάνεια τριβής. Όπως και στην περίπτωση της συγκόλλησης τριβής με γραμμική παλινδρόμηση (LFW) έτσι και στην συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW), μετά την παύση της κίνησης και αφού τα δύο τεμάχια ευθυγραμμιστούν, εφαρμόζεται ισχυρή αξονική δύναμη ώστε να εδραιωθεί και ισχυροποιηθεί η ένωση των τεμαχίων (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Διαδικασία συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).

Σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους συγκόλλησης δια τριβής, η συγκόλληση με περιστροφή εκτός της αδυναμίας συγκόλλησης μη κυλινδρικών τεμαχίων παρουσιάζει και μια δεύτερη σημαντική αδυναμία. Η αδυναμία αυτή έγκειται στο ότι η θερμότητα που παράγεται από την τριβή δεν αναπτύσσεται ομοιόμορφα επί της επιφάνειας επαφής, αφού η ταχύτητα της σχετικής κίνησης αυξάνεται καθώς γίνεται η απομάκρυνση από το κέντρο και πλησιάζει προς την περιφέρεια των κυλινδρικών τεμαχίων. Και οι δύο αυτές εγγενείς ανωμαλίες της μεθόδου μπορούν να ξεπεραστούν χρησιμοποιώντας την LFW ή την OFW. Και στις δύο είναι δυνατή η συγκόλληση μη κυλινδρικών τεμαχίων, ενώ η θερμότητα στην επιφάνεια επαφής αναπτύσσεται σε μεγάλο βαθμό ομοιόμορφα. Σε σύγκριση με την LFW η OFW είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να δίνει ακόμα μεγαλύτερο βαθμό ομοιομορφίας της παραγόμενης θερμότητας, αφού τόσο το μέτρο όσο και η διεύθυνση της ταχύτητας της σχετικής κίνησης των δοκιμίων είναι αμετάβλητες.

Εξαιτίας της άμεσης μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε θερμική στις επιφάνειες επαφής η συγκόλληση χαρακτηρίζεται από ταχύτητα και οικονομία και για αυτό η OFW έχει εφαρμοστεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην βιομηχανία αφού είναι μια αξιόπιστη μέθοδος συγκόλλησης που εύκολα αυτοματοποιείται. Για παράδειγμα, τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη συγκόλληση τήξης χαλύβων που περιέχουν υψηλά ποσοστά άνθρακα, εξαιτίας της χαμηλής τους συγκολλησιμότητας, μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση της OFW.

4.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Στην **εικόνα 4.2** δείχνει μία μηχανή συγκόλλησης με κίνηση σε τροχιά (OFW).

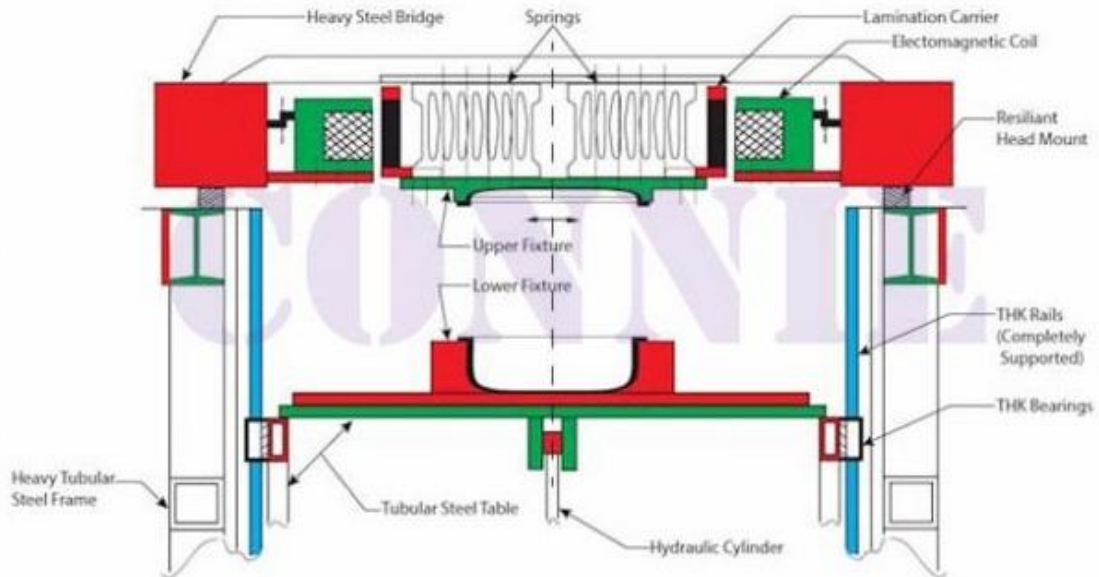


Εικόνα 4.2: Μηχανή συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).

Στην **εικόνα 4.3** απεικονίζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα βασικά μέρη μίας μηχανής συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά. και τα οποία είναι τα εξής:

- Υδραυλικός κύλινδρος
- Κυλινδρική τράπεζα ή βάση από χάλυβα
- Βαρύ κυλινδρικό πλαίσιο από χάλυβα
- Ρουλεμάν
- Δύο μπάρες στήριξης
- Δύο στηρίγματα της κεφαλής της μηχανής
- Ηλεκτρομαγνητικό πηνίο

- Δύο ελάσματα που στηρίζονται πάνω στην κεφαλή της μηχανής
- Ελατήρια
- Δύο "γέφυρες" από χάλυβα
- Πάνω μέρος συγκράτησης του στηρίγματος της μηχανής
- Κάτω μέρος συγκράτησης του στηρίγματος της μηχανής



Εικόνα 4.3: Σχεδιάγραμμα μηχανής συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW).

4.4 Παράμετροι συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Στη μέθοδο συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά οι παράμετροι είναι οι εξής:

- Η σχετική ταχύτητα (v) με την οποία κινείται το ένα τεμάχιο προς το άλλο
- Η χρονική διάρκεια της συγκόλλησης (t)
- Η αξονική δύναμη (P)
- Η απόσταση μεταξύ δύο αξόνων (a)

Οι τιμές των παραμέτρων επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία συγκόλλησης, τα χαρακτηριστικά της μικροδομής, τις μηχανικές ιδιότητες της

συγκόλλησης και εν τέλει είναι αυτές που καθορίζουν αν η ένωση των τεμαχίων θα είναι επιτυχής ή όχι. Στα πρώτα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης οι οποίες είχαν ανεπιτυχή αποτέλεσμα και παρατηρήθηκε ότι η σχετική ταχύτητα (v) δεν ήταν σταθερή, αλλά μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την εκκίνηση της διαδικασίας η σχετική κίνηση ισούται με την απόσταση των αξόνων των δύο δοκιμίων, ύστερα από ένα μικρό χρονικό διάστημα η ταχύτητα μηδενίζεται. Ως αποτέλεσμα μετά από κάποιο χρονικό σημείο τα δύο τεμάχια κινούνται συγχρόνως αντί να κινούνται το ένα σε σχέση με το δεύτερο ώστε να δημιουργείται και η απαραίτητη τριβή. Η αιτία για το φαινόμενο αυτό είναι ότι οι δημιουργούμενοι μεταλλικοί δεσμοί μεταξύ των δύο επιφανειών τριβής δεν καταστρέφονται μετά από μικρό χρονικό διάστημα, όπως θα έπρεπε κανονικά να συμβεί, αλλά συνεχίζουν να υφίστανται καθιστώντας την συγκόλληση αδύνατη. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανεπαρκούς ποσότητας ενέργειας που παρέχεται στο σημείο διεπαφής της συγκόλλησης και η οποία ενέργεια καθορίζεται με τη σειρά της από την τιμή των παραμέτρων της συγκόλλησης.

Ακόμη ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τη διαδικασία των πρώτων πειραμάτων ήταν ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης μεταξύ δοκιμίων χάλυβα τα υψηλά αξονικά φορτία που ασκούσαν προκαλούσαν έντονη πλαστική παραμόρφωση μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονταν απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Για αυτό το λόγο διερευνήθηκαν οι συνεπαγόμενες αλλαγές φάσης με δοκιμές που επικεντρώθηκαν κυρίως πάνω στην αξονική πίεση και στην πλαστικής παραμόρφωσης που δημιουργείται κατά τη διαδικασία, καθώς και η επίδραση της παραμόρφωσης στην αλλαγή των φάσεων .

Μέχρι να βρεθεί ο σωστός συνδυασμός των παραμέτρων χρειάστηκαν να γίνουν πολλές δοκιμές και πειράματα. Επειδή η συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά είναι ένα είδος συγκόλλησης σε σχέση με τα άλλα είδη συγκόλλησης τριβής πραγματοποιούνται ακόμα πειράματα και διάφορες δοκιμές για τον κατάλληλο συνδυασμό παραμέτρων πάνε σε διάφορα υλικά όπως χάλυβα, αλουμίνιο κ.α..

4.5 Τομείς εφαρμογής της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Η συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ότι είναι νέο είδος συγκόλλησης τριβής και δεν είναι ακόμα τόσο διαδεδομένη όσο τα υπόλοιπα είδη συγκόλλησης και σήμερα εφαρμόζεται στους εξής τομείς:

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Στην ναυπηγική
- Στην αεροναυπηγική

4.6 Πλεονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά είναι τα εξής:

- Συγκόλληση μεταξύ θερμοπλαστικών τεμαχίων.
- Η θερμότητα στην επιφάνεια επαφής αναπτύσσεται σε μεγάλο βαθμό ομοιόμορφα και δεν υπάρχουν οι ατέλειες στο σημείο διεπαφής της συγκόλλησης όπως στην συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά.

4.7 Μειονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά (OFW)

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης τριβής με κίνηση σε τροχιά είναι τα εξής:

- Η πολυπλοκότητα των μηχανημάτων συγκόλλησης OFW
- Για τη χρήση των μηχανημάτων συγκόλλησης OFW χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό.
- Υψηλό κόστος συντήρησης των μηχανών
- Η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται σε ορθογωνικά τεμάχια όπως και στην LFW.

- Παρουσιάζεται σε αρκετές περιπτώσεις έντονη πλαστική παραμόρφωση.
- Επειδή είναι ένα νέο είδος συγκόλλησης τριβής δεν είναι δυνατή η συγκόλληση μεγάλων τεμαχίων με μεγάλες διαστάσεις.
- Πολλές φορές τα τεμάχια που συγκολλούνται χρειάζονται επιπλέον κατεργασία για την τελειοποίηση τους.

Κεφάλαιο 5: Συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή – (Radial Friction Welding)

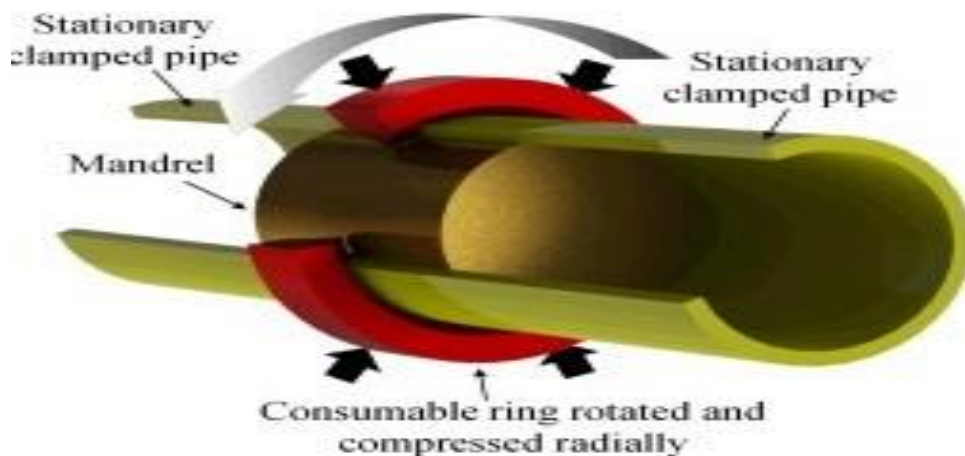
5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 2 έγινε περιγραφή της μεθόδου συγκόλλησης τριβής με περιστροφή - Rotary Friction Welding (RFW), η οποία χρησιμοποιείται χρήση για τη συγκόλληση σε κυλινδρικών τεμαχίων όπου ένα περιστρεφόμενο τεμάχιο έρχεται σε επαφή με ένα δεύτερο ακίνητο τεμάχιο και η συγκόλληση μεταξύ τους συντελείται υπό την επίδραση αξονικού φορτίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος όπως προαναφέρθηκε εφαρμόστηκε ευρέως για τη συγκόλληση εξαρτημάτων κυλινδρικής μορφής αφού προσφέρει υψηλή ποιότητα και είναι εύκολα αυτοματοποιήσιμη. Παρ' όλα αυτά δεν προσφέρεται για τη συγκόλληση κυλινδρικών κοίλων τεμαχίων όπως είναι οι σωλήνες, εξαιτίας των δυσκολιών που παρουσιάζονται και οι οποίες σχετίζονται με το μηχανισμό περιστροφής και την εφαρμογή ομοιόμορφων και σταθερών δυνάμεων στις επιφάνειες επαφής. Επιπλέον, ο σχηματισμός δύο εσωτερικών "κολάρων" αποτελούμενων από την αποβαλλόμενη μάζα δημιουργεί περαιτέρω εμπόδια στην συγκόλληση των εξαρτημάτων με σωληνοειδή μορφή. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος, η συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή - Radial Friction Welding (RFW).

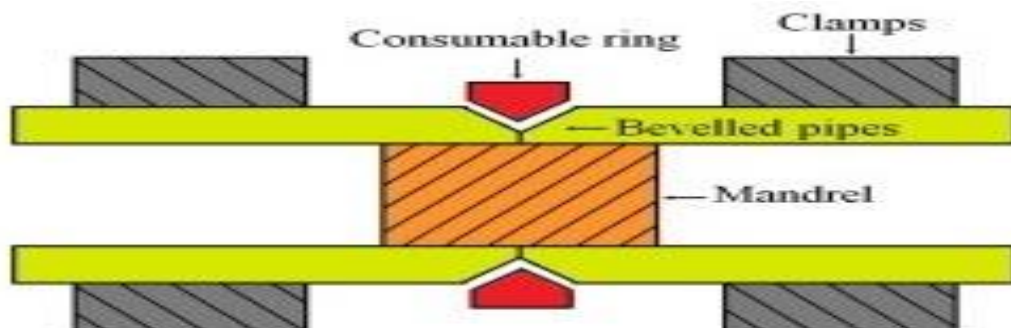
5.2 Αρχή λειτουργίας συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της συγκόλλησης με τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW) τα άκρα των δύο σωλήνων που πρόκειται να συγκολληθούν αρχικά υποβάλλονται σε κατεργασία έτσι ώστε όταν έρθουν σε επαφή να σχηματίζουν διατομή τύπου "V". Η διατομή που σχηματίζεται αποτελείται από μία επιφάνεια κάθετη στην ακτίνα των δύο κυκλικών σωλήνων και από μία δεύτερη επιφάνεια η οποία σχηματίζει μία αμβλεία γωνία σε σχέση με την ακτινική διεύθυνση των σωλήνων. Με αυτόν τον τρόπο

όταν τα άκρα των δύο σωλήνων έρθουν σε επαφή δημιουργείται μια εσοχή αποτελούμενη από τρεις πλευρές. Στη συνέχεια ένας δακτύλιος τραπεζοειδούς διατομής περιστρέφεται γύρω από τα άκρα των δύο ακίνητων σωλήνων εντός της διατομής που έχει σχηματιστεί, ενώ ταυτόχρονα υπόκειται σε επιβολή περιφερειακής πίεσης με αποτέλεσμα η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών του δακτυλίου και των τμημάτων του σωλήνα να συντελέσει στην δημιουργία των κατάλληλων θερμομηχανικών συνθηκών που απαιτούνται ώστε να επιτευχθεί η συγκόλληση. Ύστερα από συγκεκριμένη χρονική διάρκεια η περιστροφή του δακτυλίου σταματά. Παράλληλα το περιφερειακό φορτίο είτε διακόπτεται, είτε εξακολουθεί να εφαρμόζεται έτσι ώστε να ισχυροποιηθεί ο δημιουργούμενος δεσμός (εικόνες 5.1 και 5.2).



Εικόνα 5.1: Διαδικασία συγκόλλησης τριβής τοξοειδή περιστροφή (RFW) μεταξύ δύο σωλήνων.



Εικόνα 5.2: Σχεδιάγραμμα Διαδικασία συγκόλλησης τριβής τοξοειδή περιστροφή (RFW) μεταξύ δύο σωλήνων.

Η γωνία που σχηματίζουν οι μη παράλληλες πλευρές του δακτυλίου είναι μικρότερη από τη γωνία που σχηματίζουν οι πλευρές της διατομής που δημιουργούν τα άκρα των δύο σωλήνων. Η διαφορά αυτή αποσκοπεί στην εξασφάλιση του χώρου που απαιτείται ώστε να διοχετευτεί το υλικό που πλαστικοποιείται και εν συνεχεία αποβάλλεται από την επιφάνεια τριβής προς την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Τυπικές τιμές των δύο αυτών γωνιών είναι περίπου 45° για τη γωνία των πλευρών του δακτυλίου και 50° για τη γωνία των κεκλιμένων πλευρών των άκρων των σωλήνων. Σε περίπτωση που η διαφορά μεταξύ των δύο γωνιών είναι πολύ μικρή το αποτέλεσμα θα είναι ο περιορισμός της έκτασης της συγκολλημένης επιφάνειας με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση της αντοχής της συγκόλλησης.

Στο εσωτερικό των δύο σωλήνων, στην περιοχή της ένωσης των δύο άκρων τους, τοποθετείται μια μεταλλική υποστηρικτική μπάρα όπως φαίνεται προηγουμένως στις **εικόνες 5.1** και **5.2**. Η μπάρα αυτή εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Ο πρώτος είναι η στήριξη των άκρων των σωλήνων ώστε να αποφευχθεί πιθανή κατάρρευσή τους υπό το βάρος της περιφερειακής πίεσης, και ο δεύτερος, η διασφάλιση της ροής του υλικού που πλαστικοποιείται προς την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων ώστε να αποφευχθεί πιθανή είσοδος του υλικού προς την εσωτερική επιφάνειά τους. Είναι επίσης απαραίτητη η πάκτωση των προς συγκόλληση σωλήνων ώστε να καταστεί ανέφικτη οποιαδήποτε κίνηση είτε κατά την αξονική είτε κατά την ακτινική διεύθυνση. Έχει διαπιστωθεί ότι κράματα νικελίου αποτελούν ιδανική επιλογή για τις υποστηρικτικές μπάρες αφού παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στα αξονικά φορτία και τις υψηλές θερμοκρασίες που σημειώνονται κατά την συγκόλληση.

5.3 Μηχανή συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

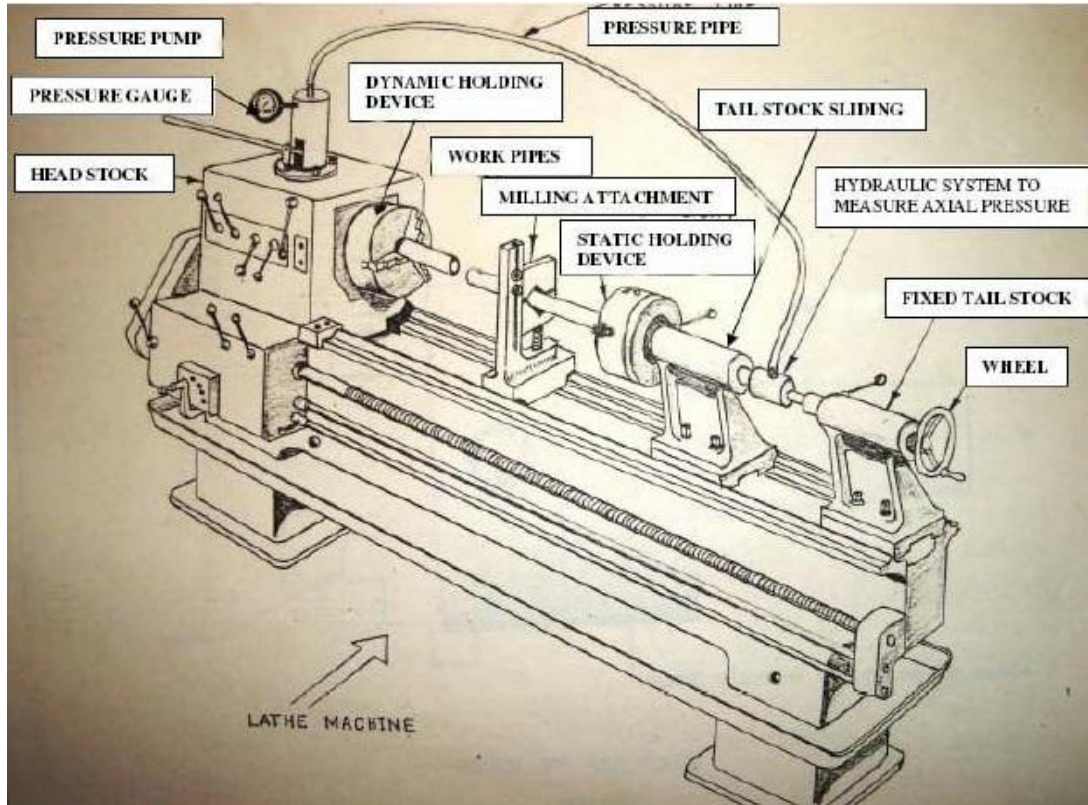
Στην **εικόνα 5.3** φαίνεται μία μηχανή συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).



Εικόνα 5.3: Μηχανή συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).

Στην **εικόνα 5.4** απεικονίζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα βασικά μέρη μίας μηχανής συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW) και τα οποία είναι τα εξής:

- Κεφαλή της μηχανής
- Μανόμετρο
- Αντλία πίεσης
- Μηχανισμός συγκράτησης τεμαχίου που περιστρέφεται
- Μηχανισμός συγκράτησης τεμαχίου που παραμένει σταθερό
- Εξάρτημα σύνδεσης
- Σωλήνας πίεσης
- Συρόμενη "ουρά"
- Υδραυλικό σύστημα το οποίο μετρά την αξονική πίεση
- Σταθερή "ουρά"
- Τροχός



Εικόνα 5.6: Σχεδιάγραμμα μηχανής συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW).

5.4 Παράμετροι συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

Στη μέθοδο συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή RFW οι παράμετροι είναι οι εξής:

- Ταχύτητα περιστροφής (n)
- Περιφερειακή πίεση (P)
- Χρονική διάρκεια της συγκόλλησης (t)

Οι τιμές των παραμέτρων και σε αυτό το είδος συγκόλλησης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ή όχι της διαδικασίας. Πρώτον η ταχύτητα περιστροφής (n) η οποία κυμαίνεται από 700 έως 2500 RPM ανάλογα με τις συνθήκες όπως είναι το μέγεθος και το υλικό των σωλήνων προς συγκόλληση. Παράλληλα η περιφερειακή πίεση (P) που ασκείται σε μεταξύ των δύο σωλήνων κατά τη συγκόλληση συμβάλει σημαντικά έτσι ώστε να μην υπάρχουν ατέλειες και σφάλματα στο σημείο διεπαφής της συγκόλλησης.

Τέλος η χρονική διάρκεια της συγκόλλησης (t) κυμαίνεται μεταξύ 12 έως 25 sec. Η συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή RFW είναι και αυτή (όπως και συγκόλληση τριβής με κίνηση σε τροχιά - (OFW) ένα σχετικά νέο είδος συγκόλλησης και γίνονται πολλά πειράματα και δοκιμές προκειμένου να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων έτσι ώστε να πραγματοποιούνται συγκολλήσεις με όσο γίνεται πιο δυνατόν καλά αποτελέσματα χωρίς σφάλματα πάνω στη συγκόλληση.

5.5 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

Η συγκόλληση τριβής με τοξοειδή περιστροφή εφαρμόζεται στους εξής τομείς:

- Στη ναυπηγική.
- Στην κατασκευή σωλήνων για οικιακή χρήση.
- Στην κατασκευή σωλήνων μεγάλων έργων και κατασκευών.

5.6 Πλεονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης με τοξοειδή περιστροφή RFW είναι τα εξής:

- Καταλληλότητα για υλικά που είναι δύσκολο ή δαπανηρά να συγκολληθούν με συμβατικά μέσα.
- Πολύ καλή ποιότητα συγκόλλησης μεταξύ των τεμαχίων (σωλήνων).
- Γρήγορος χρόνος συγκόλλησης.
- Υψηλά ποσοστά παραγωγής ανεξάρτητα από τον τύπο του υλικού και το μέγεθος του σωλήνων.
- Τα τεμάχια που συγκολλούνται δεν χρειάζονται ιδιαίτερη κατεργασία όπως λείανση μετά τη συγκόλληση.
- Δεν υπάρχει μεγάλος αριθμός αποβλήτων (γρέζι).

5.7 Μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής με τοξοειδή περιστροφή (RFW)

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος συγκόλλησης με τοξοειδή περιστροφή RFW είναι τα εξής:

- Η μέθοδος προς το παρόν χρησιμοποιείται μόνο για την συγκόλληση κυλινδρικών κοίλων τεμαχίων (σωλήνων).
- Υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης της μηχανής
- Για τη λειτουργία της μηχανής συγκόλλησης χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό.

Κεφάλαιο 6: Συγκόλληση τριβής με ανάδευση - (Friction Stir Welding)

6.1 Εισαγωγή

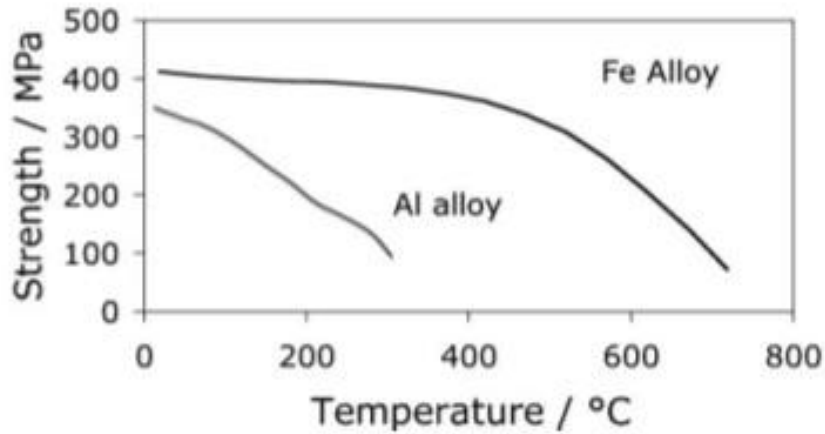
Με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις στο σχεδιασμό των κατασκευών λόγω της στροφής προς τις ολοκληρωμένες δομές, από τα τέλη της δεκαετίας του 80, οι ερευνητές στράφηκαν προς την αναζήτηση νέων μεθόδων συγκόλλησης. Οι νέες μέθοδοι συγκόλλησης απαιτείτο να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις νέες απαιτήσεις χωρίς όμως να επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Βασικό μέλημα των ερευνητών και των μηχανικών υπήρξε η ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου η οποία θα μπορούσε να επιφέρει τη σύνδεση των υλικών κρατώντας τη θερμοκρασία τους όσο το δυνατό σε χαμηλότερα επίπεδα. Έτσι, στις αρχές της δεκαετίας του 90, μια νέα μέθοδο συγκόλλησης με την ονομασία Συγκόλληση με τριβής με ανάδευση Friction Stir Welding ή (FSW) έκανε την εμφάνιση της.

6.2 Περιγραφής της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Η FSW είναι μια διεργασία συγκόλλησης υλικών στερεάς κατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνδεσης η θερμοκρασία των προς συγκόλληση υλικών δεν ξεπερνά την θερμοκρασία τήξης και κατά συνέπεια δεν μεταβαίνουν στη ρευστή φάση. Αυτό προσθέτει στη συγκεκριμένη μεθοδολογία αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης, κατά τη διάρκεια των οποίων τα υλικά τοπικά ξεπερνούν τη θερμοκρασία τήξης, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού της, όπως έχει αποδειχθεί και μέσα από πληθώρα μελετών και πειραμάτων, η FSW είναι μια διαδικασία σύνδεσης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετά μεταλλικά υλικά, όπως κράματα χάλυβα, νικελίου, χαλκού, ακόμη και στα μέχρι πρότινος μη συγκολλησιμα κράματα αλουμινίου. Το συγκεκριμένο είδος συγκόλλησης επίσης εφαρμόζεται (σε πειραματικό ακόμη στάδιο) στη συγκόλληση διαφορετικών, μεταξύ τους, μεταλλικών κραμάτων, καθώς επίσης και στη

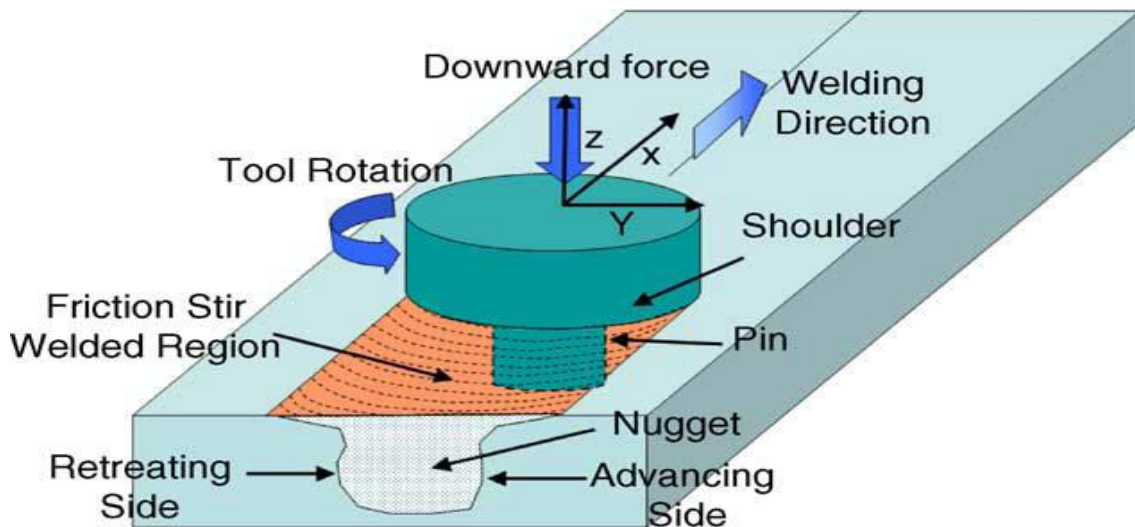
σύνδεση πολυμερών υλικών χωρίς ενίσχυση γιατί η ανάδευση προκαλεί, τοπικά, την πλήρη καταστροφή της.

Για την πραγματοποίηση της FSW απαιτείται ένα ειδικό μη αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο. Το εργαλείο αυτό χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, το κύριο βραχίονα (shoulder), ή αλλιώς κυλινδρικό τριβέα και την ακίδα ανάμιξης (pin), η οποία αποτελεί προεξοχή του τριβέα. Για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης οι πλάκες αρχικά έρχονται σε επαφή στην περιοχή που θα λάβει χώρα η σύνδεση και προσδένονται με τη βοήθεια ενός ισχυρού μέσου συγκράτησης πάνω σε μια στιβαρή τράπεζα στήριξης. Στη συνέχεια το εργαλείο τίθεται σε περιστροφή ενώ ταυτόχρονα αρχίζει να κινείται προς τις πλάκες που πρόκειται να συγκολληθούν. Η περιστρεφόμενη ακίδα ανάμιξης, η οποία εμφανίζει ειδική διαμόρφωση ανάλογα με την εφαρμογή, αρχίζει να διεισδύει μεταξύ των δύο πλακών μέσω μιας διαδικασίας παρόμοια με αυτήν της διάτρησης με δράπανο. Αφού η ακίδα εισχωρήσει πλήρως μεταξύ των δύο πλακών ο τριβέας έρχεται σε επαφή με τις άνω επιφάνειες τους και λόγω της τριβής που αναπτύσσεται, η θερμοκρασία του υλικού τοπικά στην περιοχή της συγκόλλησης αυξάνει, με αποτέλεσμα οι δεσμοί μεταξύ των μορίων του να χαλαρώνουν και να γίνεται πιο μαλακό. Στη συνέχεια και μέσω της άσκησης διατμητικών φορτίων, λόγω της επίδρασης του περιστρεφόμενου εργαλείου, το χαλαρωμένο πλέον υλικό παρασύρεται κυρίως από την ακίδα και εν μέρει και από τον τριβέα με αποτέλεσμα την τοπική ανάδευση του. Η κίνηση του υλικού λόγω της ανάδευσης ασκεί σημαντική μηχανική παραμόρφωση η οποία στο μεγαλύτερο ποσοστό της είναι πλαστική. Λόγω του ότι ένα ποσοστό του πλαστικού έργου παραμόρφωσης μετατρέπεται σε θερμότητα, η ανάδευση συνεισφέρει, τοπικά, στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας (**εικόνα 6.1**).



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα Θερμοκρασίας - Δύναμης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης τριβής (FSW) για αλουμίνιο (Al) και χάλυβα (Fe).

Το εργαλείο εκτός από την περιστροφή γύρω από τον άξονα του, τίθεται και σε ευθύγραμμη κίνηση κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Τόσο η διαδικασία διείσδυσης όσο και η μετακίνηση του εργαλείου κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης γίνονται υπό την επίδραση ενός κατακόρυφου φορτίου το οποίο ασκείται στο πάνω μέρος του τριβέα και εξασφαλίζει τη συνεχή επαφή των τριβόμενων επιφανειών καθώς και τη συνεχή ανάπτυξη θερμότητας εξαιτίας της τριβής (εικόνες 6.2 και 6.3).



Εικόνα 6.2: Διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) σε σχεδιάγραμμα.



Εικόνα 6.3: Διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) μεταξύ δύο τεμαχίων χάλυβα.

Μετά την απομάκρυνση του τριβέα η θερμοκρασία του αναμεμιγμένου πλέον υλικού αρχίζει να μειώνεται. Εξαιτίας της ψύξης αυτής οι δεσμοί μεταξύ των μορίων του υλικού γίνονται και πάλι ισχυροί με αποτέλεσμα την επαναστερεοποίηση του και τη μόνιμη σύνδεση των δύο πλακών.

Η διαδικασία αυτή, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε, αρχικά για ερευνητικούς λόγους, από το Ινστιτούτο Συγκολλήσεων της Αγγλίας (The Welding Institute - TWI). Αν και η FSW έχει καταχωρηθεί ως πατέντα του TWI από το 1991, πολύ καιρό πριν, τον Οκτώβριο του 1945, σε μια επιστημονική δημοσίευση της εποχής, γίνεται μια πρώτη αναφορά σε ένα νέο τύπο συγκόλλησης ο οποίος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση μεταλλικών ελασμάτων με τη βοήθεια θερμότητας η οποία θα παραγόταν από την τριβή μεταξύ ενός ειδικά διαμορφωμένου εργαλείου και των προς συγκόλληση στοιχείων.

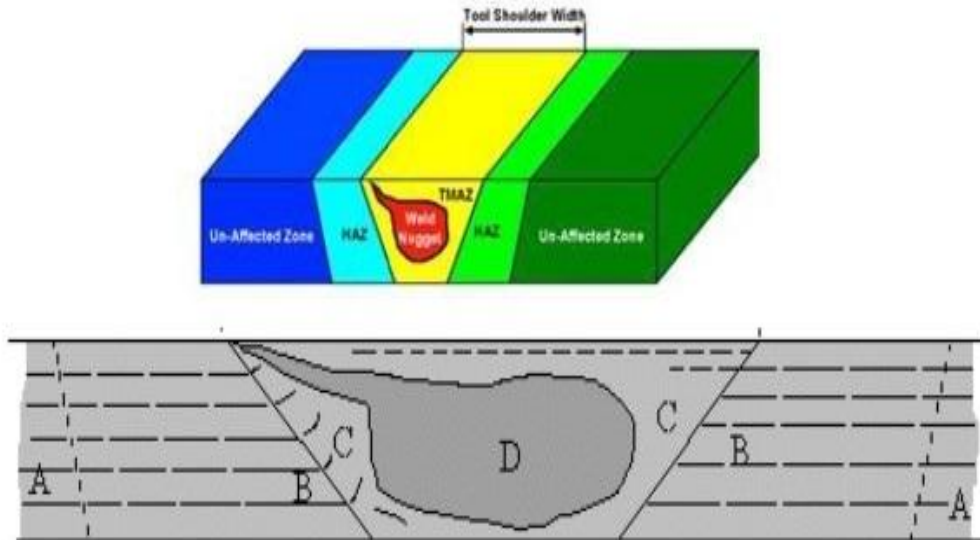
Αρχικά η FSW εφαρμόστηκε δοκιμαστικά σε υλικά με χαμηλό σημείο τήξης και μέτρο ελαστικότητας, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός, χρησιμοποιώντας εργαλείο από χάλυβα. Μετά από την επιτυχή εφαρμογή της σε αυτά, η διαδικασία εφαρμόστηκε και σε υλικά με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και αντοχή όπως ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα τιτανίου. Σε

τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται η χρήση εργαλείων από υλικά με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. βολφράμιο. Ανεξάρτητα από το υλικό, εκτενής έρευνες και πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με FSW εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, σε σύγκριση με αυτές που έχουν προέλθει από τις συμβατικές, π.χ. ηλεκτροσυγκόλληση, με αδρανές αέριο, με ηλεκτρόδιο Βολφραμίου κ.α. Για το λόγο αυτό, η FSW είναι μια μέθοδος συγκόλλησης η οποία χρησιμοποιείται αρκετά όχι μόνο στη ναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και στην αεροναυπηγική, όπου η παραγωγή ποιοτικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης είναι πολύ σημαντική για την αύξηση της ασφάλειας σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη μείωση του κόστους.

Βασικός λόγος για τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες είναι η χαμηλή, σχετικά, αναπτυσσόμενη θερμοκρασία του υλικού στην οποία πραγματοποιείται η συγκόλληση. Η απαιτούμενη θερμοκρασία στις περισσότερες περιπτώσεις φθάνει συνήθως περίπου στο 80% της θερμοκρασίας τήξης του. Οι βασικές παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία και κατά επέκταση τις ιδιότητες και την ποιότητα της συγκόλλησης είναι, μεταξύ άλλων, η γεωμετρία και η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, τα συνεργαζόμενα υλικά (συντελεστής τριβής μεταξύ πλάκας και εργαλείου), το κατακόρυφο φορτίο πίεσης του τριβέα καθώς και η ταχύτητα συγκόλλησης.

Στην **εικόνα 6.4** μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης διακρίνονται οι βασικές περιοχές υλικού με διαφορετικές ιδιότητες κάθε μία και είναι οι εξής:

- (A) Η Μη Επηρεαζόμενη Ζώνη (MEZ) - Un-Affected Zone.
- (B) Η Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ) - Heat Affected Zone (HAZ).
- (C) Η Θερμομηχανικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΜΕΖ) - Thermomechanically Affected Zone (TMAZ).
- (D) Η Ζώνη Ανάμειξης (ΖΑ) - Weld Nugget.



Εικόνα 6.4: Μικροδομές σε μία τομή μετά την διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

6.3 Ζώνες συγκόλλησης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι ζώνες συγκόλλησης που δημιουργούνται στο συγκολλημένο υλικό είναι οι εξής:

➤ **Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone)**

Στη ζώνη αυτή λαμβάνουν χώρα θερμοκοί κύκλοι χωρίς όμως να οδηγούν σε ανακρυστάλλωση των κόκκων και σε παραμόρφωση του υλικού. Μελέτες που έγιναν σε κράματα αλουμινίου, έδειξαν ότι η διαδικασία FSW έχει μικρή επίδραση στο μέγεθος των κόκκων στην περιοχή αυτή.

➤ **Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη (Thermomechanical Affected Zone)**

Η Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη Είναι αποτέλεσμα τόσο της θερμότητας που αναπτύσσεται όσο και της παραμόρφωσης την οποία υφίσταται το υλικό. Παρόλο που στην περιοχή αυτή παρατηρείται έντονη πλαστική παραμόρφωση, η μικροδομή της ωστόσο δεν υφίσταται δυναμική ανακρυστάλλωση.

➤ **Ζώνη Ανάδευσης (Stir Zone)**

Στην περιοχή της ζώνης ανάδευσης η πλαστική παραμόρφωση και η θερμότητα που αναπτύσσεται, έχει σαν αποτέλεσμα τη δυναμική ανακρυστάλλωση των κόκκων. Η ανακρυστάλλωση που συντελείται κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FSW στη ζώνη ανάδευσης δημιουργεί λεπτόκοκκη μικροδομή. Παράμετροι όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η χημική σύσταση του δοκιμίου, η θερμοκρασία του, η αξονική δύναμη που ασκεί το εργαλείο κατά τη διείσδυση και το πόσο γρήγορα το δοκίμιο θα ψυχθεί, επηρεάζουν άμεσα τη μικροδομή που θα έχει το υλικό μετά τη συγκόλληση.

6.4 Εργαλειομηχανή CNC συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Στην **εικόνα 6.5** φαίνεται μια εργαλειομηχανή CNC με προδιαγραφές κατάλληλες για συγκόλληση τριβής.

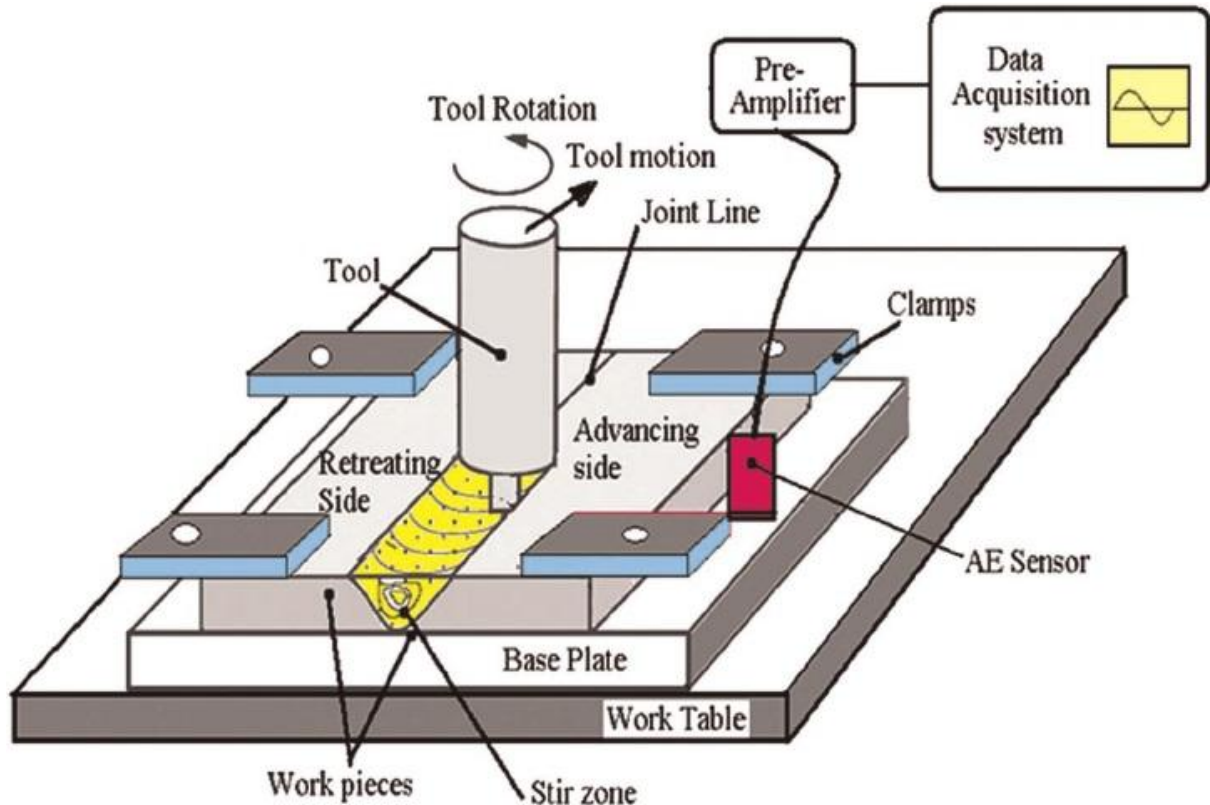


Εικόνα 6.5: Εργαλειομηχανή CNC κατάλληλη για συγκόλληση τριβής με ανάδευση (FSW).

Στην **εικόνα 6.6** υπάρχει ένα σχεδιάγραμμα με τα βασικά μέρη μίας εργαλειομηχανής CNC κατά τη διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση τα οποία είναι τα εξής:

- Τράπεζα κατεργασίας
- Βάση
- Αισθητήρας

- Σφιγκτήρες
- Εργαλείο συγκόλλησης FSW
- Προενισχυτής
- Σύστημα συλλογής δεδομένων
- Τεμάχια εργασίας συγκόλλησης



Εικόνα 6.6: Σχεδιάγραμμα μηχανής συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

6.5 Παράμετροι της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Οι βασικές παράμετροι της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα συγκόλλησης (ή ταχύτητα πρόωσης) και η γεωμετρία του εργαλείου:

➤ Ταχύτητα περιστροφής (n) - Ταχύτητα πρόωσης (s)

Κατά την τεχνική της F.S.W. το εργαλείο συγκόλλησης εκτελεί δύο κινήσεις. Περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο

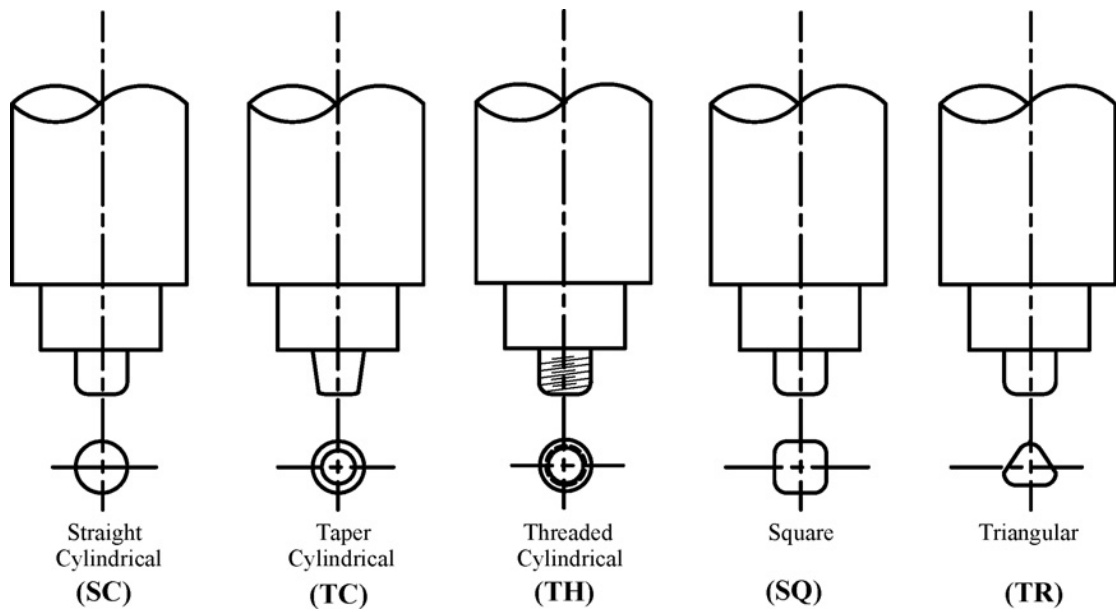
συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα κινείται κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης. Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου προκαλεί την ανάδευση και ανάμιξη των προς συγκόλληση υλικών γύρω από τον πείρο που περιστρέφεται. Η ευθύγραμμη κίνηση του εργαλείου προωθεί το πλαστικοποιημένο υλικό από μπροστά προς τα πίσω σε σχέση με τον πείρο, ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της συγκόλλησης. Μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα σε συνδυασμό με χαμηλότερη ταχύτητα πρόωσης ταχύτητα συγκόλλησης (s), προκαλεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών λόγω τριβής που με τη σειρά της οδηγεί σε καλύτερη ανάδευση των υλικών.

➤ Γεωμετρία του εργαλείου

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η καλή ποιότητα της συγκόλλησης, όσο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Το εργαλείο της FSW αποτελείται από το περιαιχένιο και τον πείρο συγκόλλησης. Όπως προαναφέρθηκε το εργαλείο εκτελεί δυο βασικές διεργασίες, πρώτον αναπτύσσει τη θερμότητα λόγω τριβής και αναδεύει τα υλικά.

Αρχικά το εργαλείο εισχωρεί στο σημείο που εφάπτονται οι ακμές των δύο πλακών και επομένως αναπτύσσεται θερμότητα λόγω της τριβής μεταξύ του περιαιχενίου και των προς συγκόλληση δοκιμίων. Το εργαλείο εισχωρεί μέχρι το περιαιχένιο να εφάπτεται με τις πλάκες. Η δεύτερη διεργασία που πραγματοποιείται είναι εξίσου σημαντική καθώς αναμιγνύει τα υλικά προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο τη συγκόλλησή τους. Οι ιδιότητες που αποκτούν τα υλικά μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη γεωμετρία των εργαλείων αυτών. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται επίπεδο περιαιχένιο με κοχλιωτό πείρο (**εικόνες 6.7 και 6.8**).

Η Τεχνολογία της Συγκόλλησης με Τριβή



Εικόνα 6.7: Σχέδια διάφορων τύπων εργαλείων συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

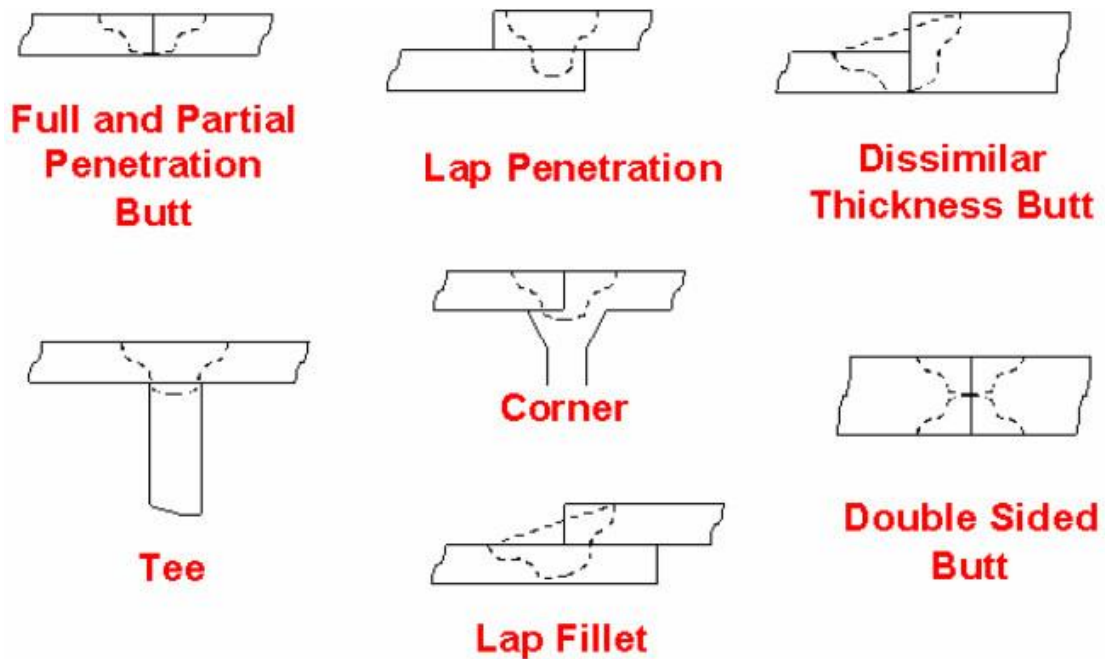


Εικόνα 6.8: Διάφοροι τύποι εργαλείων για συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

6.6 Γεωμετρία συγκόλλησης

Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι γεωμετρίας συγκόλλησης (εικόνα 6.9):

- Μετωπική
- Γωνιακή σύνδεση, στην οποία η συγκόλληση μεταξύ των τεμαχίων πραγματοποιείται έτσι ώστε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90°.
- Σύνδεση T, στην οποία τα προς συγκόλληση τεμάχια είναι σχεδόν κάθετα μεταξύ τους.
- Σύνδεση με επικάλυψη, στην οποία τα δύο μέλη επικαλύπτουν το ένα το άλλο.
- Σύνδεση κατά ακμή, στην οποία η σύνδεση γίνεται μεταξύ των ακμών δύο ή περισσότερων παράλληλων μελών.



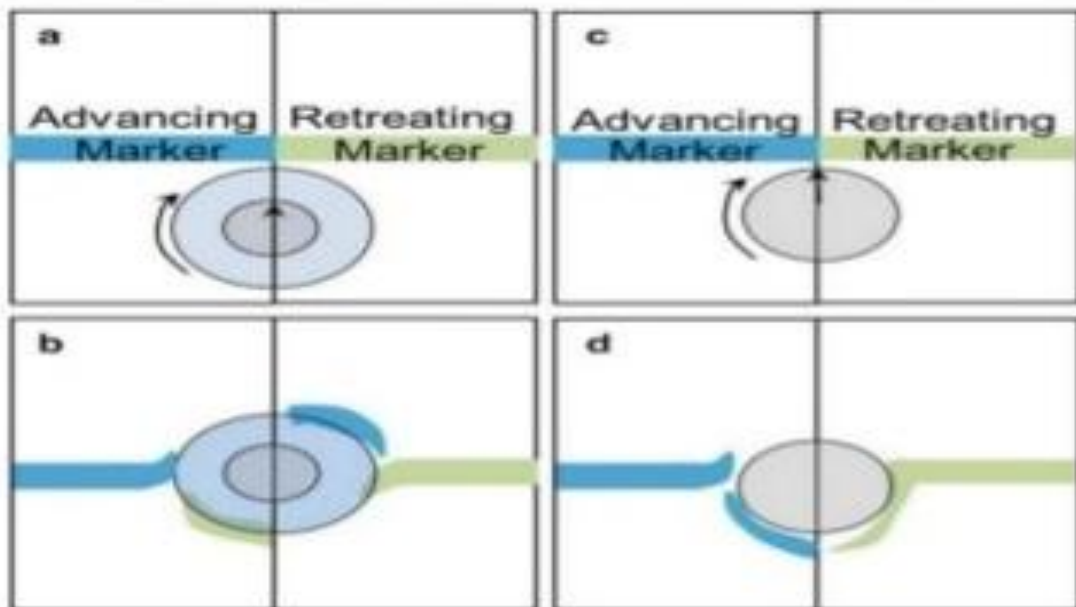
Εικόνα 6.9: Γεωμετρία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

6.7 Ροή Υλικού

Κατά την FSW δημιουργούνται δύο πλευρές. Συγκεκριμένα, ως προωθούμενη πλευρά αναφέρεται η πλευρά στην οποία η περιστροφική ταχύτητα του πείρου και η ταχύτητα της συγκόλλησης έχουν την ίδια φορά, ενώ ως «υποχωρούσα πλευρά» όταν περιστροφική και ταχύτητα συγκόλλησης έχουν αντίθετη φορά.

Με αυτό τον τρόπο, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση, ένα μέρος του υλικού αναδύεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ενώ ένα άλλο απλώς εξωθείται. Το αναδευόμενο υλικό σχηματίζει τη ζώνη ανάδευσης ενώ το εξωθούμενο υλικό εναποτίθεται γύρω από την υποχωρούσα πλευρά.

Στην προωθούμενη πλευρά, το υλικό, ακολουθώντας την κίνηση του πείρου, στροβιλίζεται και προωθείται προς ανώτερη επιφάνεια. Στην υποχωρούσα πλευρά, το υλικό παρασύρεται καθώς το εργαλείο συγκόλλησης κινείται ευθύγραμμα και γεμίζει με υλικό τις περιοχές που έχουν κενά λόγω της περιστροφής του πείρου (εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Η ροή του υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

6.8 Συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων

Η μέθοδος δια τριβής με ανάδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στη συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων. Αρκετοί ερευνητές επιχείρησαν συγκολλήσεις μεταξύ ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, ή και του αλουμινίου με άλλα μέταλλα. Παρατηρήθηκε ότι στη ζώνη συγκόλλησης δύο ανόμοιων μετάλλων υπήρχε διαφορετική συμπεριφορά στην κίνηση των υλικών κατά την ανάδευσή τους και άρα στις μετέπειτα ιδιότητές τους. Για παράδειγμα, θα πρέπει μέταλλα με χαμηλή αντοχή να τοποθετούνται στην προωθούμενη πλευρά αν πρόκειται να συγκολληθούν με μέταλλα υψηλής αντοχής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ανακρυστάλλωση που υφίστανται τα υλικά μετά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FSW προσδίδει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

6.9 Τομείς εφαρμογής συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση εφαρμόζεται στους εξής τομείς:

- Ναυπηγική
- Αεροναυπηγική
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Διαστημική βιομηχανία

6.10 Πλεονεκτήματα Συγκόλλησης Τριβής με Ανάδευση (FSW)

Η FSW έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την συγκόλληση.
- Ο μικρός θερμικός κύκλος.
- Τα συγκολλημένα τεμάχια έχουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη και κόπωση.

- Δεν υπάρχουν στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις.
- Αντοχή στη διάβρωση.
- Βελτιωμένη εμφάνιση ραφής.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Δεν χρειάζεται μηχανουργική κατεργασία για τις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.
- Δεν χρησιμοποιεί αέρα προστασίας για κράματα όπως του αλουμινίου και του χαλκού.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μετωπικές συγκολλήσεις ανόμοιων μετάλλων.
- Λόγω της ακίδας ανάμιξης της οποίας το μήκος καλύπτει σχεδόν όλο το πάχος του υλικού, η σύνδεση των επί μέρους εξαρτημάτων μπορεί να επιτευχθεί με ένα μόνο πέρασμα.

6.11 Μειονεκτήματα Συγκόλλησης Τριβής με Ανάδευση (FSW)

Παρά τα αρκετά πλεονεκτήματα που έχει η **FSW** παρουσιάζονται και κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Στις πλάκες στις οποίες πραγματοποιείται η συγκόλληση πρέπει να υπάρχει ισχυρή συγκράτηση κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο.
- Αρκετά υψηλό κόστος του ως τώρα υπάρχοντος εξοπλισμού αν και με την πάροδο του χρόνου μειώνεται.
- Σε πολλές περιπτώσεις, λόγω της τριβής μεταξύ τριβέα και υλικού προκαλούνται κάποιες επιφανειακές ανωμαλίες σε όλο το μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Εξαιτίας των ατελειών αυτών περαιτέρω επιφανειακή κατεργασία όπως για παράδειγμα η λείανση, είναι απαραίτητη για την τελειοποίηση του τελικού προϊόντος.

Κεφάλαιο 7: Πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) στο Εργαστήριο Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης Μηχανικής του ΤΕΙ Κρήτης

7.1 Εισαγωγή

Στο χώρο του εργαστηρίου Εργαστηρίου Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης Μηχανικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης στο Ηράκλειο πραγματοποιήθηκαν ως project σε πρακτική άσκηση πειράματα και δοκιμές πάνω στη διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση σε λεπτά ελάσματα από αλουμίνιο. Ο σκοπός του συγκεκριμένου project ήταν το κατά πόσο είναι δυνατό μία εργαλειομηχανή CNC (φρέζα) μπορεί να πραγματοποιήσει μία συγκόλληση τριβής με ανάδευση όπως τα εξειδικευμένα μηχανήματα συγκόλλησης της FSW. Για την αποφυγή τυχόν ανθρώπινων αλλά και τεχνικών ατυχημάτων έγινε μία αρκετά χρονοβόρα και προσεκτική έρευνα πάνω στις παραμέτρους της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση.

7.2 Έρευνα παραμέτρων της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

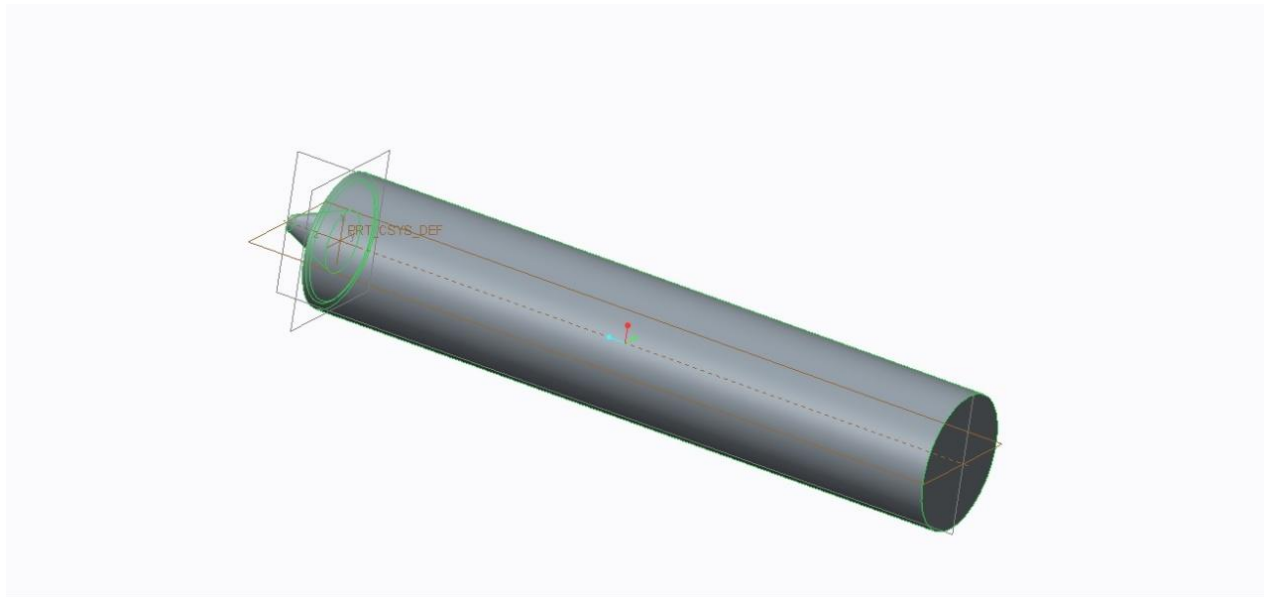
Σε πρώτη φάση ξεκίνησε η έρευνα των κατάλληλων παραμέτρων για τη διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW), Την ταχύτητα περιστροφής (n), την ταχύτητα πρόωσης και τη γεωμετρία του εργαλείου που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί. Αρχικά έγινε έρευνα για το εργαλείο συγκόλλησης που χρειάζεται για να επιτευχθεί συγκόλληση τριβής σε λεπτά ελάσματα από αλουμίνιο (**AI >99,00%**) πάχους 2mm. Μετά από αρκετή έρευνα και κοιτάζοντας τα διάφορα είδη εργαλείων συγκόλλησης που υπάρχουν πάρθηκε η απόφαση να κατασκευαστεί στο χώρο του εργαστηρίου ένα εργαλείο με διάμετρο 18mm με απλό κώνο.

Έπειτα ξεκίνησε η έρευνα για την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής και σε ποιες τιμές θα κυμαινόταν. Μέσα από την παρατήρηση που έγινε σε διάφορες μελέτες και επιστημονικά άρθρα πάρθηκε η απόφαση τα πειράματα να πραγματοποιηθούν με ταχύτητα περιστροφής μεταξύ 900 και 1000 RPM.

Παράλληλα ξεκίνησε έρευνα για την κατάλληλη ταχύτητα πρόωσης (s) προκειμένου να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα στη συγκόλληση αλλά και για την προστασία της εργαλειομηχανής CNC για την αποφυγή ατυχήματος. Έτσι ως αποτέλεσμα οι τιμές της ταχύτητας πρόωσης που θα χρησιμοποιούνταν ήταν μεταξύ 140 και 200 mm/min.

7.3 Σχεδιασμός και κατασκευή εργαλείου συγκόλλησης (FSW)

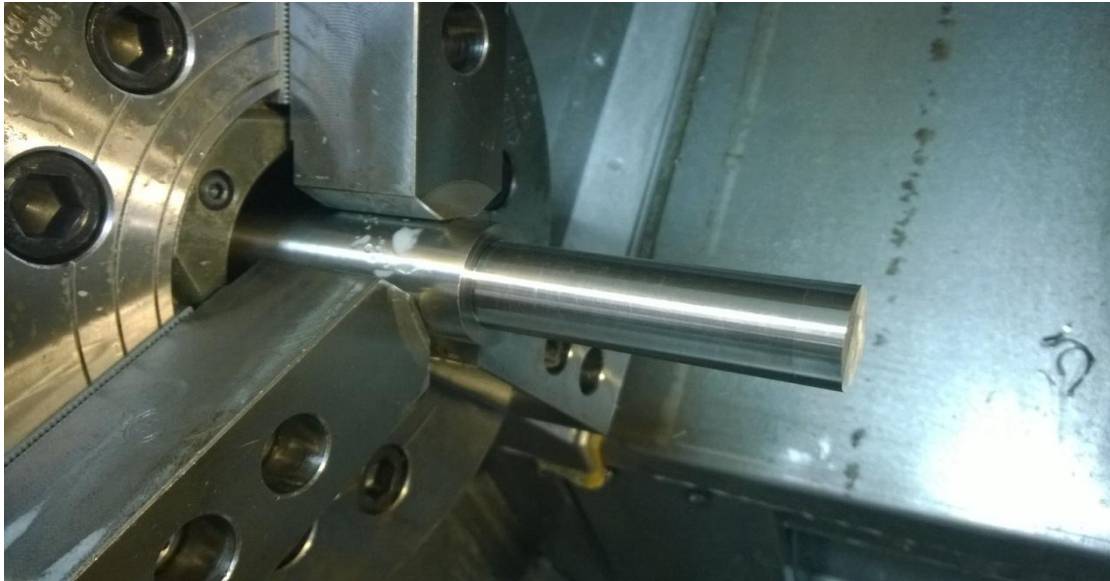
Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία της έρευνας των κατάλληλων παραμέτρων για τη συγκόλληση τριβής με ανάδευση, ακολούθησε ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκόλλησης. Το εργαλείο σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Creo Parametric με 2 μήκος 100 mm, περίμετρο (shoulder) στα 18 mm και μήκος του κώνου με 2 mm (εικόνα 7.1).



Εικόνα 7.1: Σχέδιο εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

Μετά τον σχεδιασμό του εργαλείου πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της κατασκευής του. Το υλικό το οποίο επιλέχθηκε να γίνει η κατασκευή του ήταν ανοξείδωτος χάλυβας τύπου (**AISI 430**). Με τη βοήθεια ενός τόρνου CNC διαθέτει ο χώρος του εργαστηρίου ξεκίνησε η κατεργασία μέχρι το εργαλείο συγκόλλησης να πάρει την τελική του μορφή έτσι ώστε να μπορεί να

ενσωματωθεί στην κεφαλή της εργαλειομηχανής CNC. (εικόνες 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 και 7.6). Για την κατεργασία του εργαλείου στον τόρνο χρησιμοποιήθηκε μανέλα και κοπτικό εργαλείο από καρβίδιο. Οι συνθήκες κοπής της κατεργασίας έγιναν με ταχύτητα περιστροφής (n) στα 500 RPM, βάθος κοπής στα 0,5 mm, και ταχύτητα κοπής (v) στα 39,25 m/min. Η κατεργασία που πραγματοποιήθηκε έγινε πάνω σε κυλινδρικό τεμάχιο πάχους (D) στα 25 mm.



Εικόνα 7.2: Αρχική φάση κατασκευής του εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) .



Εικόνα 7.3: Διαδικασία κατασκευή του κώνου του εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) .



Εικόνα 7.4: Δημιουργία κώνου του εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.5: Τελική μορφή του εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) .



Εικόνα 7.6: Τελική μορφή του εργαλείου συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.4 Κατασκευή βάσης κατεργασίας

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του εργαλείου συγκόλλησης ακολούθησε η κατασκευή της βάσης στην οποία θα τοποθετούνταν τα λεπτά ελάσματα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Για αυτό το λόγο έγινε ειδική κατεργασία μέσω της εργαλειομηχανής CNC σε ένα ορθογώνιο τεμάχιο από χάλυβα έτσι ώστε να έχει μία λεία και επίπεδη επιφάνεια. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν 4 σφιγκτήρες για την συγκράτηση των ελασμάτων κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης (**εικόνες 7.7 και 7.8**).



Εικόνα 7.7: Βάση για την τοποθέτηση των ελασμάτων για τη διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.8: Βάση για την τοποθέτηση των ελασμάτων για τη διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5 Διαδικασία πειραμάτων συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Αφού ολοκληρώθηκε και η κατασκευή της βάσης στην οποία θα τοποθετούνταν τα ελάσματα ακολούθησε η προετοιμασία και η διαδικασία των πειραμάτων συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW). Εφόσον ελέγχθηκε η ποιότητα των ελασμάτων αλουμινίου Επίσης σε όλα τα πειράματα το βάθος εισχώρησης του εργαλείου ήταν στα 2 mm ενώ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ταχύτητα περιστροφής (n) που εφαρμόστηκε κυμαινόταν από 900 έως 1000 RPM και η ταχύτητα πρόωσης κυμαινόταν από 140 έως 200 mm/min. Στον **πίνακα 7.1** παρουσιάζονται οι παράμετροι και οι τιμές τους που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διαδικασίες.

Πειραματικές Διαδικασίες	Βάθος Εισχώρησης (mm)	Ταχύτητα Περιστροφής (RPM)	Ταχύτητα Πρόωσης (mm/min)
Πείραμα 1	2	1000	200
Πείραμα 2	2	900	180
Πείραμα 3	2	900	140
Πείραμα 4	2	900	160
Πείραμα 5	2	900	150

Πίνακας 7.1: Παράμετροι και τιμές των πειραματικών διαδικασιών.

Στην **εικόνα 7.9** φαίνεται η εργαλειομηχανή CNC (φρέζα) στην οποία πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση.



Εικόνα 7.9: Η εργαλειομηχανή CNC (φρέζα) που χρησιμοποιήθηκε στον χώρο του εργασηρίου για την πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5.1 Πρώτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Στο πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε τοποθετήθηκαν τα δύο ελάσματα αλουμινίου πάχους 2 mm πάνω στη βάση με τη βοήθεια των τεσσάρων σφιγκτήρων. Μετά έγινε ο σωστός μηδενισμός της εργαλειομηχανής και του εργαλείου συγκόλλησης με τη βοήθεια ενός Taster (εικόνες 7.10, 7.11 και 7.12), και έπειτα έγινε η σωστή ρύθμιση των σωστών παραμέτρων της συγκόλλησης. Στο πρώτο πείραμα (εικόνα 7.13) εφαρμόστηκε ταχύτητα περιστροφής (n) 1000 RPM και ταχύτητα πρόωση (s) στα 200 mm/min. Μετά την ολοκλήρωση του πρώτου πειράματος παρατηρήθηκαν κάποιες ατέλειες πάνω στη ραφή συγκόλλησης κυρίως στην πάνω επιφάνεια όπου έγινε η συγκόλληση (εικόνες 7.14 και 7.15).

Η Τεχνολογία της Συγκόλλησης με Τριβή



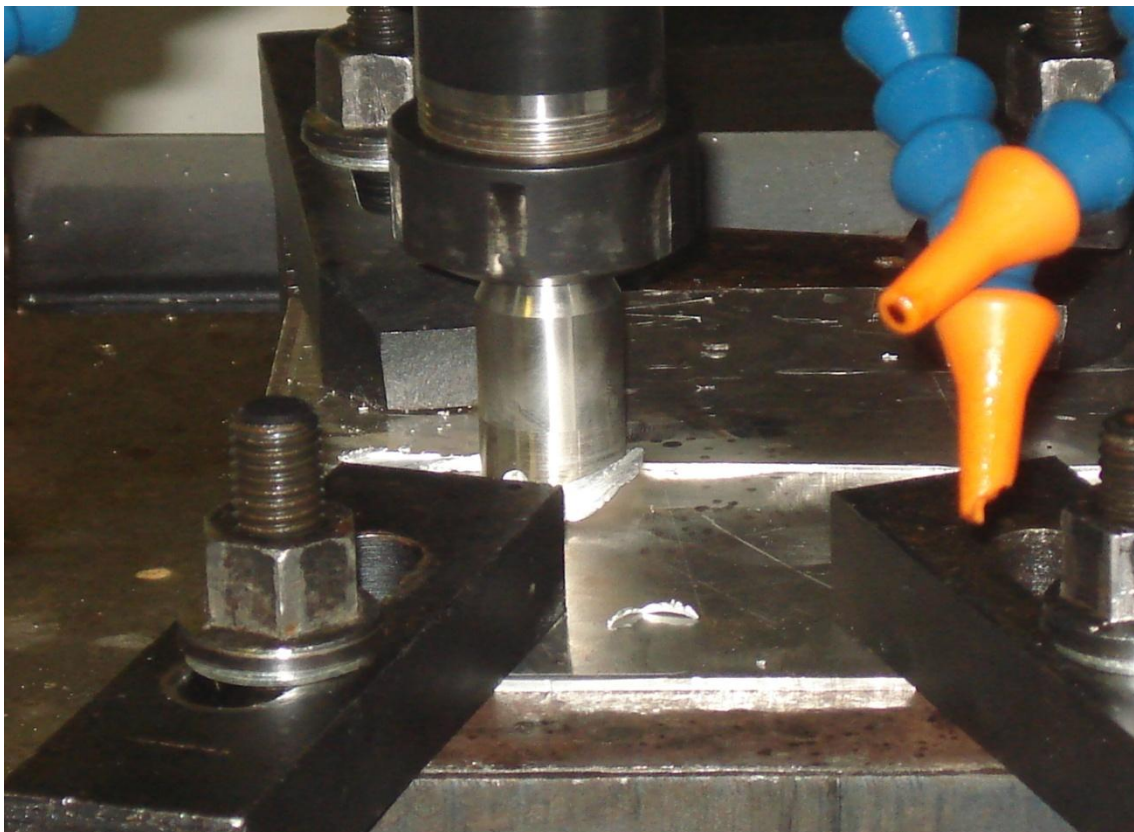
Εικόνα 7.10: Μηδενισμός εργαλειομηχανής CNC με τη βοήθεια Taster.



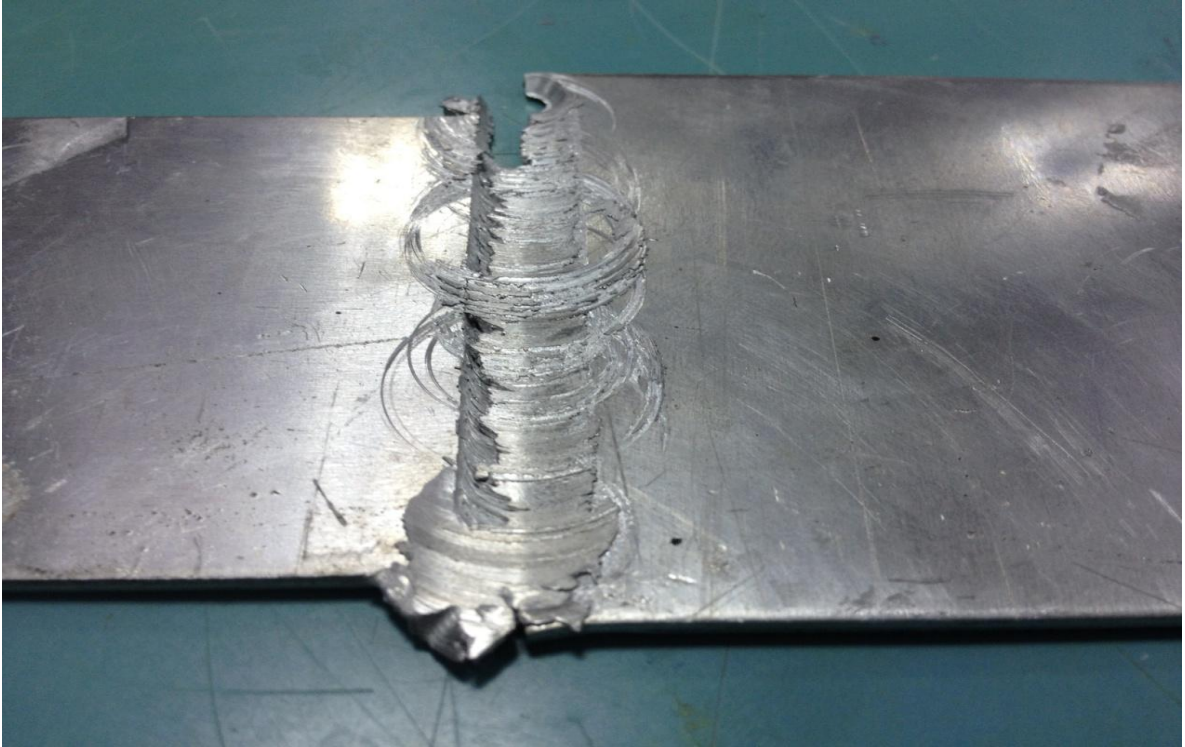
Εικόνα 7.11: Μηδενισμός πάνω στην επιφάνεια κατεργασίας με Taster.



Εικόνα 7.12: Μηδενισμός του εργαλείου συγκόλλησης FSW με Taster.



Εικόνα 7.13: Διαδικασία πρώτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.14: Τελικό αποτέλεσμα πρώτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.15: Τελικό αποτέλεσμα πρώτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5.2 Δεύτερη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Μετά την ολοκλήρωση του πρώτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) και παρατηρώντας τις ατέλειες που υπήρχαν, στο δεύτερο πείραμα έγινε μείωση της ταχύτητας περιστροφής (n) στα 900 RPM και με ταχύτητα πρόωσης (s) αυτή τη φορά στα 180 mm/min. Εφόσον επαναλήφθηκαν οι προηγούμενες διεργασίες όπως η σωστή τοποθέτηση των ελασμάτων αλουμινίου και τον μηδενισμό της εργαλειομηχανής της βάσης και του εργαλείου συγκόλλησης με Taster, πραγματοποιήθηκε το δεύτερο πείραμα. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρατηρήθηκε καλύτερη ποιότητα ραφής της συγκόλλησης σε σχέση με το πρώτο πείραμα (εικόνες 7.16 και 7.17).



Εικόνα 7.16: Τελικό αποτέλεσμα δεύτερου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.17: Τελικό αποτέλεσμα δεύτερου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5.3 Τρίτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Μετά την ολοκλήρωσή και του δεύτερου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) και παρατηρώντας ότι υπήρχαν καλύτερα αποτελέσματα πάνω στη ραφή συγκόλλησης προχώρησε η διαδικασία στο τρίτο πείραμα. Εδώ ταχύτητα περιστροφής (n) παρέμεινε στα 900 RPM και με ταχύτητα πρόωσης (s) αυτή τη φορά στα 140 mm/min. Και σε αυτή την περίπτωση ακολουθήθηκαν οι προηγούμενες διεργασίες όπως η σωστή τοποθέτηση των ελασμάτων αλουμινίου και τον μηδενισμό της εργαλειομηχανής της βάσης και του εργαλείου συγκόλλησης με Taster, πραγματοποιήθηκε το τρίτο πείραμα. Σε αυτό το πείραμα μετά το τέλος της διαδικασίας παρατηρήθηκαν κάποιες ατέλειες στη ραφή συγκόλλησης και συγκεκριμένα υπήρχε ένα κενό πάνω στη ραφή της συγκόλλησης λίγο μετά την έναρξη της διαδικασίας (εικόνες 7.18 και 7.19).



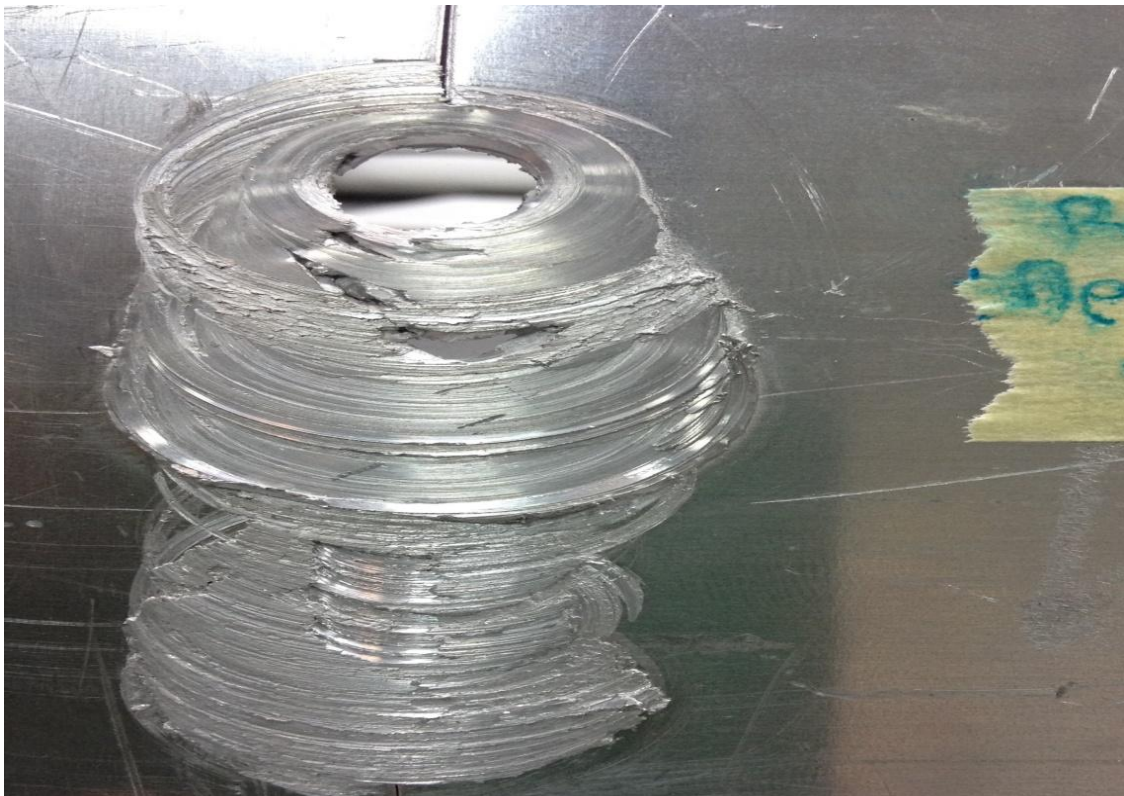
Εικόνα 7.18: Τελικό αποτέλεσμα τρίτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.19: Τελικό αποτέλεσμα τρίτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5.4 Τέταρτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Μετά την ολοκλήρωση και του τρίτου πειράματος και την αστοχία που παρουσιάστηκε πάνω στη ραφή της συγκόλλησης, στο τέταρτο πείραμα η ταχύτητα περιστροφής παρέμεινε στα 900 RPM και με πρόωση (s) αυτή τη φορά στα 160 mm/min. Με την ολοκλήρωση των ίδιων διεργασιών όπως η σωστή τοποθέτηση των ελασμάτων αλουμινίου και τον μηδενισμό της εργαλειομηχανής της βάσης και του εργαλείου συγκόλλησης με Taster, πραγματοποιήθηκε το τέταρτο πείραμα. Και εδώ παρατηρήθηκε ότι σε αυτές τις συνθήκες η ραφή της συγκόλλησης είχε και αυτό αστοχίες πάνω ραφή της συγκόλλησης και είχε δημιουργηθεί ένα κενό που αυτή τη φορά εμφανίστηκε λίγο πριν το τέλος της συγκόλλησης (εικόνες 7.20 και 7.21).



Εικόνα 7.20: Τελικό αποτέλεσμα τέταρτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).



Εικόνα 7.21: Τελικό αποτέλεσμα τέταρτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

7.5.5 Πέμπτη πειραματική διαδικασία της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW)

Με την ολοκλήρωση και του τέταρτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW) και παρατηρώντας τα σφάλματα που υπήρχαν πάνω στη ραφή συγκόλλησης προχώρησε η διαδικασία στο πέμπτο και τελευταίο πείραμα . Και σε αυτή την διαδικασία η ταχύτητα περιστροφής (n) παρέμεινε και πάλι στα 900 RPM και με ταχύτητα πρόωσης (s) αυτή τη φορά στα 150 mm/min. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση ακολουθήθηκαν οι ίδιες διεργασίες με τα προηγούμενα πειράματα όπως η σωστή τοποθέτηση των ελασμάτων αλουμινίου και τον μηδενισμό της εργαλειομηχανής της βάσης και του εργαλείου συγκόλλησης με Taster, πραγματοποιήθηκε και το πέμπτο πείραμα. Και σε αυτή την πειραματική διαδικασία συγκόλλησης παρατηρήθηκε ότι υπήρχαν αστοχίες στην επιφάνεια της ραφή της συγκόλλησης με την ύπαρξη δύο κενών που δημιουργήθηκαν λίγο πριν το τέλος της συγκόλλησης (**εικόνα 7.22**).



Εικόνα 7.22: Τελικό αποτέλεσμα πέμπτου πειράματος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (FSW).

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Με βάση τις 5 πειραματικές διαδικασίες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη εφαρμογή της FSW διαπιστώθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Καλύτερο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε στο δεύτερο πείραμα όπου εφαρμόστηκε ταχύτητα περιστροφής (n) 900 RPM και ταχύτητα πρόωσης (s) στα 180 mm/min παρουσιάζοντας καλύτερη επιφάνεια ραφής της συγκόλλησης σε σχέση με τα υπόλοιπα πειράματα.
- Αποδείχθηκε ότι με μία απλή εργαλειομηχανή CNC (φρέζα) μπορεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία συγκόλλησης τριβής με ανάδευση, χωρίς στη χρήση εξειδικευμένων μηχανών συγκόλλησης για FSW.
- Οι παραπάνω πειραματικές διαδικασίες θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και σε ελάσματα άλλων μετάλλων όπως χάλυβα κ.α..
- Η συγκράτηση (στήριξη) των ελασμάτων είναι απαιτητική αλλά παράλληλα και δύσκολη γιατί με τη μη σωστή τοποθέτηση τους μπορεί να προκληθούν αστοχίες στη συγκόλληση με κίνδυνο να προκληθεί μέχρι και ατύχημα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Βιβλιογραφία

1. Γ. Παρίκος, Τεχνολογία & Εργαστήρια, ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΡΙΟΥ & ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ, Εκδοτικός Όμιλος "ΙΩΝ", 2003.
2. <https://www.twi-global.com>
3. <https://www.millerwelds.com>
4. A.Vairis, M.Frost, High frequency linear friction welding of a titanium alloy, Mechanical Engineering Department, University of Bristol, 1998.
5. <https://www.schweissen-schneiden.com>
6. O.J.Bakker, C.Gibson, P.Wilson, N.Lohsea, A.A.Popov, Linear friction weld process monitoring of fixture cassette deformations using empirical mode decomposition, University of Nottingham, 2015.
7. D. Schmicker, K. Naumenko and J. Strackeljan, A holistic Approach on the Simulation of Rotary-Friction-Welding, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
8. <https://www.mtiwelding.com>
9. <https://www.kuka.com>
10. <https://www.thompson-friction-welding.com>
11. Dipl.-Ing. Franz Zech, Dr.-Ing. Heidi Cramer, Dipl.-Ing. Ludwig Appel and Michael Serve, Orbital friction welding of metallic materials and dissimilar material joints on non-rotationally symmetrical joining cross-sections, SLV München, NL der GSI mbh.
12. U.Raab, S. Levin, L. Wagner, C.Heinze, Orbital friction welding as an alternative process for blisk manufacturing, Institute of Materials Science and Engineering, TU Clausthal, 2015.
13. C.A.Della Rovere, J.M.Aquino, C.R.Ribeiro, R.Silva, N.G.Alcântara, S.E.Kuri, Corrosion behavior of radial friction welded supermartensitic stainless steel pipes, Department of Materials Engineering, Federal University of São Carlos, 2015.
14. <https://www.indiamart.com>
15. JianLuo, Junfeng Xiang, Dejjia Liu, Fei Li, Keliang Xue, Radial friction welding interface between brass and high carbon steel, Chongqing University, 2011.

16. <https://www.esabna.com>
17. <http://www.welding-technology-machines.info>
18. W.M Thomas, E.D Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, 1997.
19. R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Department of Materials Science and Engineering, Pennsylvania State University, 2008.
20. H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy, Science and Technology of Welding and Joining, Critical assessment: friction stir welding of steels, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, 2009.
21. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Materials Science and Engineering, University of Missouri, 2005.
22. <https://www.thefabricator.com>
23. Umen Sabu, A presentation of Friction Stir Welding Process for aluminium, University Of Hyderabad.
24. <http://www.fsw-china.com>
25. Institution of Mechanical Engineers (Great Britain), SAGE Publications, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013.
26. <http://www.fswelding.com>
27. <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk>
28. Madan Patnamsetty, Khashayar Khanlari, Friction Stir Welding, 2015.