

Ορισμός Θέματος Διπλωματικής Εργασίας

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

Συγκόλληση δια τριβής με εμβάπτιση σωλήνων αλουμινίου μικρής διαμέτρου

(Πρωτότυπος τίτλος: “Friction Stir Welding of Aluminium Pipes of small Diameters”)

Σημείωση του συγγραφέα σχετικά με τη δομή και την εκτέλεση της εργασίας:

Η παρούσα εργασία εκτελέσθηκε στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Εργαλειομηχανών & Οργάνωσης Παραγωγής (*iwb*) το οποίο αποτελεί τμήμα της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου του Μονάχου (TUM). Για τον ανώτερο λόγο η δομή της εργασίας είναι προκαθορισμένη σύμφωνα με τα πρότυπα του συγκεκριμένου τμήματος.

Το παρών αποτελεί μετάφραση του πρωτότυπου αγγλικού κειμένου, το οποίο και παρουσιάστηκε επιτυχώς στις 20.8.2008 στα πλαίσια εξέτασης των διπλωματικών εργασιών στην πολυτεχνική σχολή του Μονάχου. Οι πίνακες και τα σχήματα καθώς και τα αναφερόμενα σε αυτά κείμενα έχουν παραμείνει στην πρωτογενή μορφή της εργασίας για λόγους πληρότητας. Ακολουθούν τα στοιχεία της διπλωματικής εργασίας ,όπως αυτά προκύπτουν από την αρχειοθέτησή της στη βιβλιοθήκη του παραπάνω ιδρύματος.

Number:	22/08	Tutor:	Markus Ruhstorfer
Author:	Antonis Mitsakos	End:	30.09.2008
Start:	01.04.2008		

Αρχική κατάσταση:

Η συγκόλληση δια τριβής με εμβάπτιση (Friction Stir Welding- FSW) αποτελεί μία εξελιγμένη μέθοδο συγκόλλησης υλικών αλουμινίου, η οποία είναι ικανή α προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές “substance-to-substance” μεθόδους. Μετά από την ανάπτυξη της διαδικασίας στην αρχή της δεκαετίας του 90', η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε αρχικά στον τομέα της ναυπηγικής. Μετά την εφαρμογή της στη βιομηχανία των εναέριων μέσων μεταφοράς, η μέθοδος εφαρμόστηκε ευρέως και στον ευρύτερο

κατασκευαστικό τομέα. Η διαδικασία σύνδεσης σωληνώσεων δια της μεθόδου FSW οδηγεί σε δύο εγκεκριμένα εμπόδια:

- Η ύπαρξη κυκλικής διατομής εμποδίζει την πλήρη επαφή του εργαλείου- “shoulder”- με την επιφάνεια του προς συγκόλληση υλικού.
- Μετά το πέρας της διαδικασίας παραμένει μία τελική οπή εξόδου- “exit hole” στην επιφάνεια του υλικού, η οποία μειώνει τη στιβαρότητα των συγκολλούμενων τεμαχίων.

Στόχος:

Ένας στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διαδικασίας του FSW σε σωλήνες μικρών διαμέτρων. Η διαδικασία θα γίνει κατανοητή με τη βοήθεια πειραμάτων, χρησιμοποιώντας τα συμβατικά, διαθέσιμα εργαλεία του εργαστηρίου. Μετά την κατανόηση της διαδικασίας, στόχος είναι η ανάπτυξη και κατασκευή καινούργιων εργαλείων που θα βελτιώνουν τη διαδικασία συγκόλλησης των κυλινδρικών τεμαχίων. Εν συνεχεία θα διεξαχθούν πειράματα για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των νέων αυτών εργαλείων. Σε αυτό το σημείο θα συγκριθούν τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης που προκύπτουν με τη χρήση των νέων και των παλαιών-συμβατικών εργαλείων. Επιπλέον θα εξετασθεί η ατέλεια της “exit hole”. Αυτή η ατέλεια οδηγεί σε μείωση της ακαμψίας του παραγόμενου τεμαχίου. Για το λόγο αυτό, θεωρείται στόχος της παρούσης εργασίας η ανάπτυξη στρατηγικών για την αποφυγή της εμφάνισής της.

Σχέδιο δράσης και μεθοδολογία εργασίας:

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα τμήματα:

- Βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις δυνατότητες κατασκευής FSW-εργαλείων και ανάπτυξη στρατηγικών προς αποφυγή της “exit hole”
- Διεξαγωγή πειραμάτων με τα διαθέσιμα-συμβατικά FSW-εργαλεία για περαιτέρω κατανόηση της διαδικασίας όταν αυτή σε κυλινδρικά τεμάχια με μικρή διάμετρο
- Ανάπτυξη και κατασκευή καινούργιων εργαλείων, τα οποία βελτιώνουν ιδιαίτερα την εφαρμογή της μεθόδου σε τεμάχια με μικρή διάμετρο

- Ανάπτυξη μεθόδων και διεξαγωγή δοκιμών προς αποφυγή των τελικών κρατήρων
- Εκτέλεση πειραμάτων συγκόλλησης με τα καινούργια εργαλεία και ανάπτυξη σχετικών μεθόδων προς αποφυγή των τελικών κρατήρων
- Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων
- Περίληψη και τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων

Διακήρυξη:

Αυτή η εργασία είναι ιδιοκτησία του *iwb* (Ίδρυμα για τα εργαλεία μηχανών και τη βιομηχανική διαχείριση). Μια δημοσίευση της εργασίας ή διαβίβαση της προς τρίτο απαιτεί την άδεια από τον υπεύθυνο καθηγητή. Συμφωνώ με την αρχειοθέτηση της διατριβής στη βιβλιοθήκη του *iwb*, η οποία είναι προσβάσιμη μόνο σε επιστημονικούς συνεργάτες, αλλά και με την καταχώρηση αυτής στην ψηφιακή βάση δεδομένων του *iwb* ως pdf-dokument.

Garching, 20.08.2009

Dipl.-Ing. M. Ruhstorfer

Antonis Mitsakos

Prof. Dr.-Ing. M. F. Zäh

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
1 Εισαγωγή.....	3
1.1 Η σημασία, η ιστορική εξέλιξη και το μέλλον του τομέα των συγκολλήσεων	3
1.2 Η κατάσταση στην παραγωγή	6
1.3 Στόχος της εργασίας	8
2 Η μέθοδος συγκόλλησης <i>Friction Stir Welding</i>.....	9
2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου FSW.....	9
2.2 Υλικά και τύποι εργαλείων	16
2.3 Εφαρμογές της FSW.....	16
3 Πειραματικό δομικό στοιχείο	16
3.1 Γεωμετρία.....	16
3.2 Βασικό υλικό	16
4 Προετοιμασία πειράματος.....	16
4.1 Εκλογή παραμέτρων συγκόλλησης	16
4.1.1 Η σημασία των παραμέτρων συγκόλλησης	16
4.1.2 Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων εργαλείων	16
4.1.3 Εκλογή των παραμέτρων συγκόλλησης	16
4.2 Αξιολόγηση της συγκόλλησης.....	16
4.3 Προετοιμασία μηχανολογικού εξοπλισμού και τεμαχίου	16
4.4 Συσσκευή συγκράτησης τεμαχίων	16
4.4.1 Απαιτήσεις από τη συσκευή συγκράτησης τεμαχίων	16
4.4.2 Κατασκευή της συσκευής συγκράτησης τεμαχίων	16
5 1^ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων.....	16
5.1 Ολοκλήρωση των πειραμάτων	16

5.2	Αξιολόγηση των εργαλείων	16
5.3	Αξιολόγηση των παραμέτρων.....	16
6	2^ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων	16
6.1	Ολοκλήρωση των πειραμάτων	16
6.2	Τελική αξιολόγηση των παραμέτρων της διαδικασίας και των διαθέσιμων εργαλείων	16
7	Κατασκευή νέων εργαλείων	16
7.1	Σχεδιασμός νέων "pins"	16
7.2	Σχεδιασμός νέου "shoulder"	16
8	Τελική οπή - "Exit hole"	16
8.1	Το ελάττωμα της "exit hole"	16
8.2	Στρατηγικές για την αποφυγή σχηματισμού "exit hole".....	16
9	Τελικά συμπεράσματα και μελλοντική προοπτική της μεθόδου FSW	16
10	Ευχαριστίες.....	16
11	Κατάλογος σχημάτων	16
12	Κατάλογος πινάκων	16
13	Βιβλιογραφία	16
	Παράρτημα	16

1 Εισαγωγή

1.1 Η σημασία, η ιστορική εξέλιξη και το μέλλον του τομέα των συγκολλήσεων

Η συγκόλληση αποτελεί την πλέον κοινή μέθοδο σύνδεσης δύο ή περισσότερων μεταλλικών τεμαχίων με σκοπό να συμπεριφέρονται ως ένα σώμα. Επιτρέπει την παραγωγή ενιαίων κατασκευών, οι οποίες εμφανίζουν ενισχυμένη συμπεριφορά. Η συγκόλληση ανήκει στην κατηγορία των κατεργασιών σύνδεσης αλλά συνδέεται παράλληλα με πολλές ακόμα γνωστικές περιοχές και άλλες βιομηχανικές κατεργασίες.

Η διαδικασία της συγκόλλησης όπως τη γνωρίζουμε σήμερα εφευρέθηκε τον 19^ο αιώνα. Η παραγωγή ενός τόξου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων άνθρακα που τροφοδοτούνται από μπαταρία ανάγεται στον Sir Humphay Davy το 1800 ενώ ο Edmund Davy της Αγγλίας συνέβαλε με την ανακάλυψη της ασετυλίνης το 1836. Κατά τη διάρκεια των ετών έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει μέταλλα συγκολλούμενα με διάφορες μεθόδους, ενώ το σχήμα 1 παρουσιάζει ένα διάγραμμα των σημαντικότερων μεθόδων σύνδεσης και συγκόλλησης (Cary et al.2004, P.1-5).

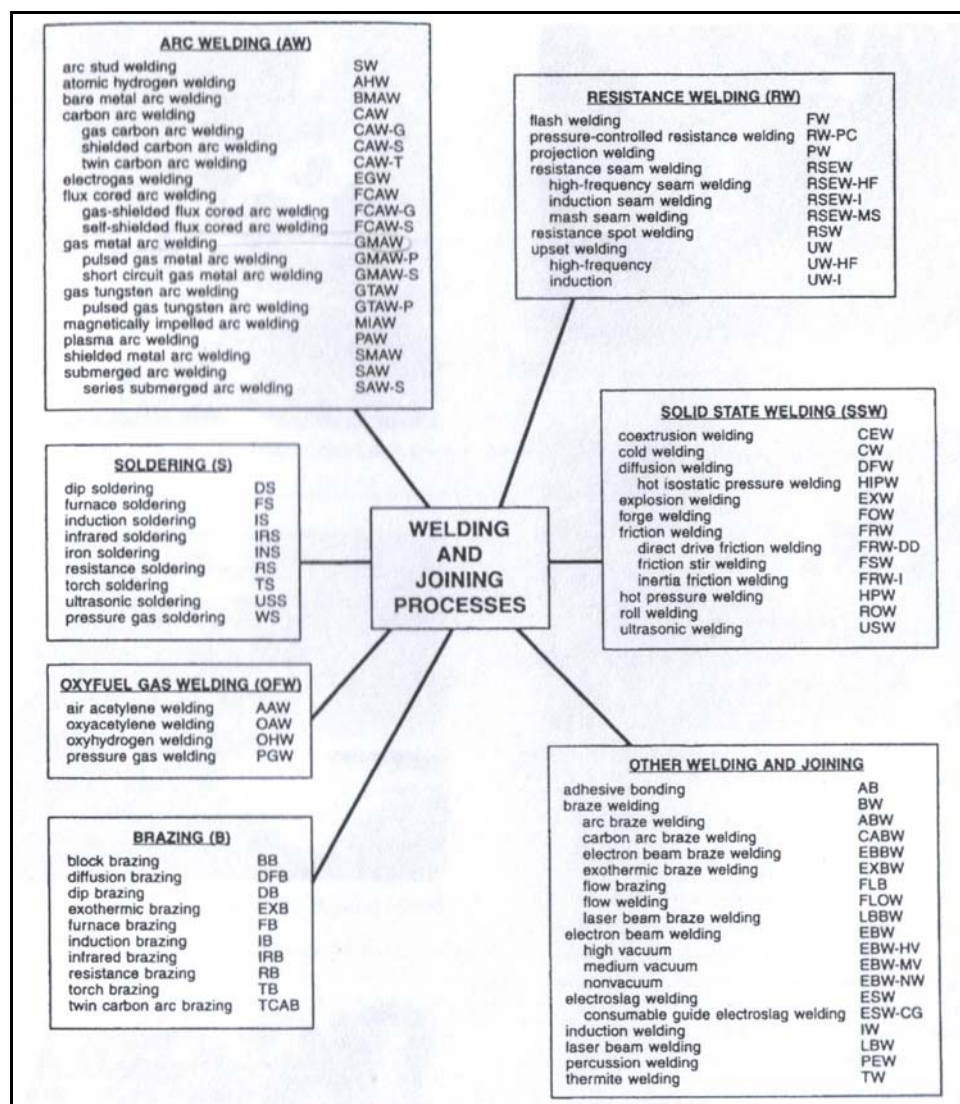
Base material welded	WELDING PROCESSES								
	Shield Metal Arc Welding	Gas Tungsten Arc Welding	Plasma Arc Welding	Submerged Arc Welding	Gas Metal Arc Welding	FCAW	ESW	BW	OFW
Aluminiums									
Copper-base alloys	C	A	A	No	A	No	Exp	B	B
Brasses	No	C	C	No	C	No	No	A	A
Bronzes	A	A	B	No	A	No	No	A	B
Copper	C	A	A	No	A	No	No	A	A
Copper nickel	B	A	A	No	A	No	No	A	A
Irons									
Cast, malleable, nodular iron	A	B	B	No	B	B	No	A	A
Wrought iron	A	B	B	A	A	A	No	A	A
Lead	No	B	B	No	No	No	No	No	A
Magnesium									
Nickel-base alloys	No	A	B	No	A	No	No	No	No
Inconel	A	A	A	No	A	No	No	A	B
Monel	A	A	A	C	A	No	No	A	A
Nickel	A	A	A	C	A	No	No	A	A
Nickel silver	No	C	C	No	C	No	No	A	B
Precious metals	No	A	A	No	Exp	No	No	A	B
Steels									

Metal or process rating: A, recommended or easily weldable- B, acceptable but not best selection or weldable with precautions- C, possibly usable but not popular or restricted use or difficult to weld- No, not recommended or not weldable- Exp, experimental or research

SMAW: Shielded Metal Arc Welding, GTAW: Gas Tungsten Arc Welding, PAW: Plasma Arc Welding, SAW: Submerged Arc Welding, GMAW: Gas Metal Arc Welding

Πίνακας 1 Metals welded by various processes

Πηγή: H. Cary 2005 (P.5)



Σχήμα 1 Master chart of welding and joining processes

Πηγή: H. Cary 2005 (P.21)

Αν και η βιομηχανία συγκόλλησης έχει παρουσιάσει θεαματική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, οι ειδικοί θεωρούν ότι η ανάπτυξή της αναμένεται να συνεχιστεί κυρίως λόγω του οικονομικού πλεονεκτήματος της κατεργασίας. Τα προϊόντα που προέρχονται από συγκόλληση επιμέρους τεμαχίων θα είναι πάντα πιο φτηνά από προϊόντα που παράγονται με άλλες μεθόδους, όπως η σφυρηλάτηση, η ήλωση ή η κοχλίωση. Η συγκόλληση αποτελεί επίσης την καλύτερη μέθοδο προστασίας και συντήρησης της επιφάνειας των μετάλλων με χρήση πρόσθετων μεταλλικών επικαλύψεων (H. Cary 2005, P.21).

Η κατεργασία της συγκόλλησης αναμένεται ότι θα συνεχίσει να κυριαρχεί μεταξύ των κατεργασιών σύνδεσης καθώς οι εφαρμογές και οι δυνατότητές της αυξάνονται ραγδαία. Αυτό οφείλεται κυρίως στα υψηλότερα ποσοστά απόθεσης των βελτιωμένων μετάλλων πλήρωσης και την αυξανόμενη χρήση υπολογιστικά ελεγχόμενου εξοπλισμού συγκόλλησης, ο οποίος μειώνει το κόστος παραγωγής. Παρόλα αυτά οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης θα πρέπει να εξετάζονται χωριστά, καθώς η κάθε μια έχει το δικό της τομέα εφαρμογής και το δικό της “μέλλον” στην παραγωγή. Οι μέθοδοι που αναμένεται να επικρατήσουν μελλοντικά στη βιομηχανία σύνδεσης είναι οι ακόλουθες: Η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου (Arc welding process), η ηλεκτροσυγκόλληση με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου-TIG (gas tungsten arc welding-TIG), η συγκόλληση με τόξο πλάσματος (plasma arc welding), η συγκόλληση με χρήση ακτίνων λέιζερ (laser beam welding), η ηλεκτροσυγκόλληση με χρήση ρομπότ (robot arc welding) και η συγκόλληση δια τριβής με εμβάπτυση (Friction Stir Welding-FSW) (X. Cary 2005, P.21). Η τελευταία μέθοδος και η εφαρμογή της σε κυλινδρικές διατομές μικρής ακτίνας αποτελεί το αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

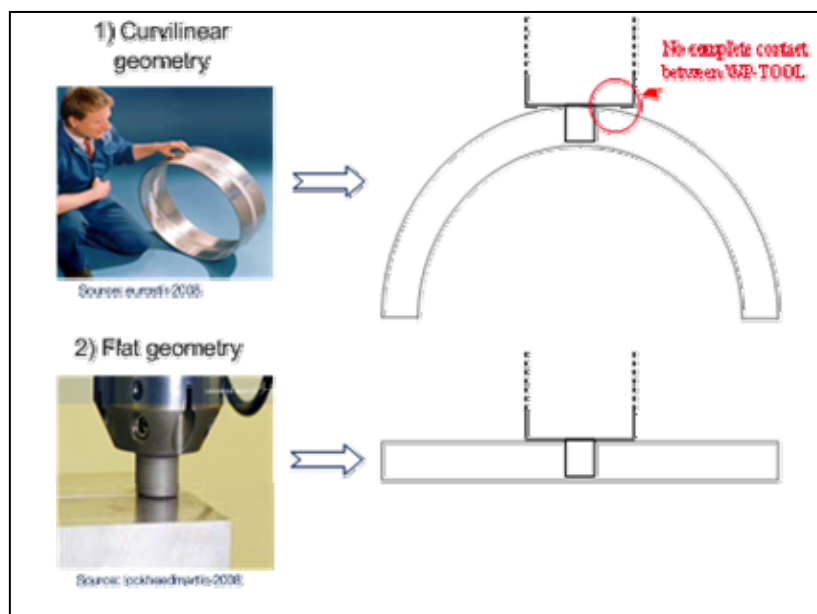
1.2 Η κατάσταση στην παραγωγή

Την ίδια στιγμή που η βιομηχανία συγκόλλησης συνεχίζει την άνθισή της, η παγκόσμια κατανάλωση αλουμινίου (Al) εμφανίζει αυξητική τάση. Οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητές και ειδικά η χαμηλή πυκνότητά του υλικού δίνουν την ευκαιρία για κατασκευή ελαφρότερων κατασκευών με καλύτερα χαρακτηριστικά. Το πλεονέκτημα της χαμηλής πυκνότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις μέρες μας που η πετρελαϊκή κρίση είναι παρούσα. Η διαστημική, αεροναυπηγική και η βιομηχανία αυτοκινήτου κάνουν πλέον εκτεταμένη χρήση του υλικού για να παράγουν ελαφρύτερες κατασκευές, ενώ η ναυσιπλοΐα και πολλοί άλλοι κλάδοι επωφελούνται από τα πλεονεκτήματα του αλουμινίου εδώ και καιρό.

Παρόλα τα πλεονεκτήματά τους, τα κράματα αργιλίου παρουσιάζουν δυσκολίες ως προς τη συγκολλησιμότητά τους κυρίως λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας του αργιλίου και του σχηματισμού ατελειών κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης συμπεριλαμβανομένων των ρωγμών, πορώδους και στερεοποίησης. Η πλειονότητα των βιομηχανιών που ασχολούνται με κατασκευές αλουμινίου, εκτελούν ένα μεγάλο μέρος των συγκολλήσεων

χειρωνακτικά χρησιμοποιώντας τη συγκόλληση με τόξο και προστασία αδρανούς αερίου (GMAW) η οποία είναι επίσης γνωστή και ως MIG. Η μέθοδος του FSW είναι μια σχετικά νέα μορφή σύνδεσης, η οποία έχει επιτυχώς εφαρμοστεί σε ποικιλία μεταλλικών υλικών όπως ο χάλυβας, το τιτάνιο, ο μολυβδος, ο χαλκός και το αργίλιο. Οι εξαιρετικές ιδιότητες των συγκολλήσεων που έχουν προέλθει από αυτή τη μέθοδο, καθιστούν δυνατές κατασκευές, οι οποίες χωρίς αυτή θα ήταν αδύνατες (H. Cary 2005, P.21).

Μέχρι τώρα η μέθοδος του FSW έχει επιτυχώς εφαρμοστεί κυρίως σε απλές γεωμετρίες, όπως οι επίπεδες μεταλλικές επιφάνειες και τα προϊόντα διέλασης (προφίλ αλουμινίου-“extruded sections”). Η εργασία αυτή εξετάζει την εφαρμογή της μεθόδου σε κυλινδρικά τμήματα με μικρή διάμετρο. Κατά τη σύνδεση τεμαχίων με πολύπλοκη κυλινδρική γεωμετρία, όπως στην περίπτωση των σωλήνων, η κυκλικότητα της διατομής εμποδίζει την πλήρη επαφή μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου και για αυτό τον λόγο καθίσταται προβληματικός ο έλεγχος της κίνησης του εργαλείου πάνω στην περίμετρο της σύνδεσης αλλά και το βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο στη ζώνη συγκόλλησης. Το σχήμα 2 παρουσιάζει τη διαφοροποίηση της επαφής εργαλείου-τεμαχίου όταν η διατομή είναι επίπεδη και όταν αυτή είναι κυκλική.



Σχήμα 2 Contact between material and tool in case of 1) curvilinear and 2) flat geometry

Πέρα από την προβληματική επαφή, κατά την ένωση κυλινδρικών τεμαχίων είναι επίσης απαραίτητη η ομοκεντρική ευθυγράμμιση των τεμαχίων, απαίτηση η οποία μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στο να δημιουργηθεί η απαραίτητη θέρμανση λόγω τριβής και να σχηματιστεί η περιοχή του πλαστικοποιημένου υλικού όταν ασκείται υψηλό φορτίο. Λόγω των ειδικών απαιτήσεων που προαναφέρθηκαν, αποτελεί επίσης στόχο της παρούσης εργασίας η κατασκευή ειδικών εργαλείων προσαρμοσμένων στις ειδικές γεωμετρικές απαιτήσεις των τεμαχίων. Τέλος, η ατέλεια της εναπομένουσας οπής-“exit hole” που σχηματίζεται μετά το πέρας της διαδικασίας αποτελεί μία περαιτέρω συνιστώσα της εργασίας, η οποία θα εξετασθεί με σκοπό την αποφυγή εμφάνισής της.

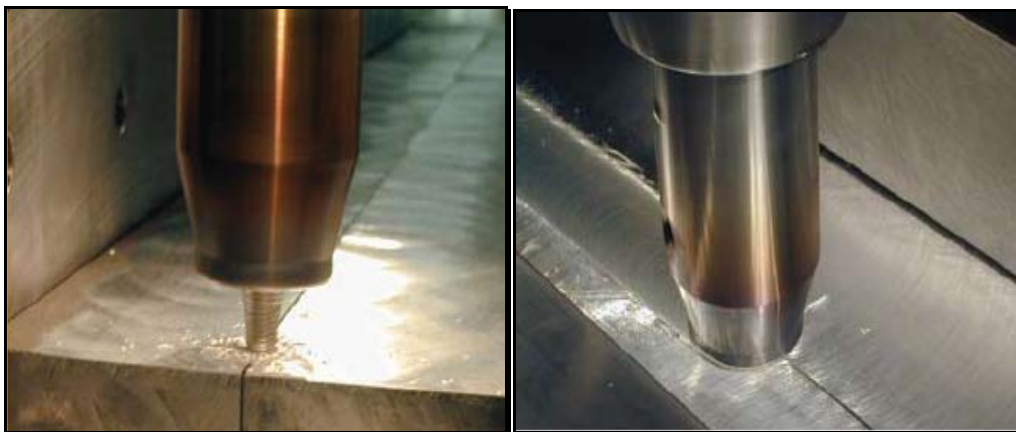
1.3 Στόχος της εργασίας

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να μελετηθεί η εφαρμογή της μεθόδου FSW σε κυλινδρικά τεμάχια και η ανεύρεση τρόπων βελτίωσής της. Αρχικά, πειράματα με τα προς διάθεση-συμβατικά εργαλεία θα εκτελεσθούν προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία της μεθόδου, να βρεθούν τα αδύνατα σημεία της και να αναπτυχθούν τρόποι βελτίωσής της. Αποτελεί επίσης στόχο της εργασίας η ανάπτυξη και κατασκευή νέων εργαλείων με σκοπό τη βελτίωση της μεθόδου. Μετά την κατασκευή των νέων εργαλείων, θα διεξαχθούν επιπρόσθετα πειράματα με στόχο την πιστοποίηση της καλής λειτουργίας των εργαλείων και τη σύγκριση αυτών με τα προϋπάρχοντα. Τέλος, θα αναπτυχθούν στρατηγικές αποφυγής της τελικής οπής. Η τελική οπή δημιουργείται κατά την έξοδο του εργαλείου από το υλικό, μετά το πέρας της διαδικασίας και θεωρείται ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα του Friction Stir Welding.

2 Η μέθοδος συγκόλλησης Friction Stir Welding

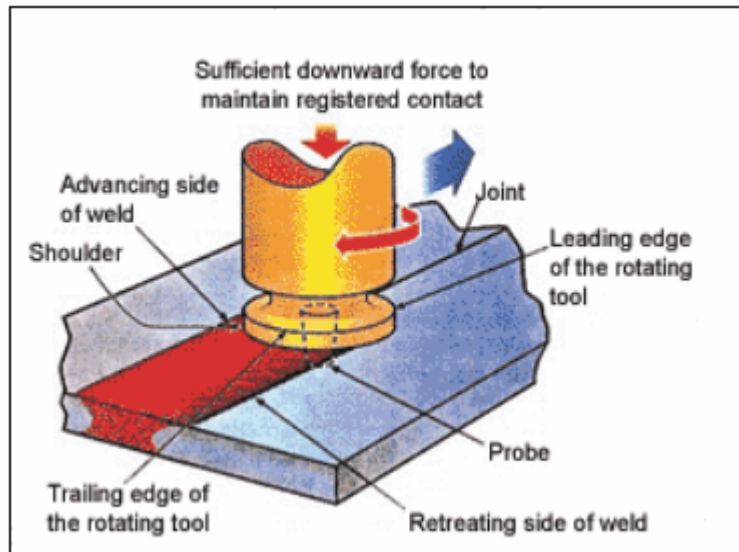
2.1 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου FSW

Η μέθοδος συγκόλλησης Friction Stir Welding αποτελεί συγκόλληση στερεάς κατάστασης, κατά την οποία το συγκολλούμενο υλικό δε λιώνει και ανασχηματίζεται. Η διαδικασία αναπτύχθηκε το Δεκεμβρίου του 1991 στο Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκόλλησης (TWI) και υιοθετήθηκε αρχικά στην βιομηχανία εναέριων επίγειων και θαλάσσιων μέσων μεταφοράς προς σύνδεση κραμάτων αργιλίου, μαγνησίου, ψευδάργυρου και χαλκού (*Balasubramanian et al. 2008, P.397*). Οι αρχές λειτουργίας της μεθόδου βασίζονται στις αρχές της κλασσικής συγκόλλησης δια τριβής. Η βασική ιδέα είναι ιδιαίτερα απλή. Ένα μη καταναλισκόμενο-“non-consumable” περιστρεφόμενο εργαλείο, τα βασικά τμήματα του οποίου ονομάζονται “pin-probe” και “shoulder”, εισέρχεται στο υλικό (Σχήμα 3) και εν συνεχεία κινείται κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης (Σχήμα 4). Το Σχήμα 5 απεικονίζει τη διεθνή ονοματολογία των βασικότερων στοιχείων του τεμαχίου και του εργαλείου που συμμετέχουν στη διαδικασία.



Σχήμα 3 Welding tool plunge Σχήμα 4 Welding tool traverse

Πηγή: K. Colligan (P.1)



Σχήμα 5 Definitions of FSW process

Πηγή: FPE & Gatwick Fusion Ltd 2008

Το εργαλείο εξυπηρετεί τρεις βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι διεργασίες αυτές είναι η θέρμανση (*heating*) του τεμαχίου, η ροή του υλικού (*material flow*) ώστε να παραχθεί η σύνδεση και τέλος, η συγκράτηση (*containment*) του θερμού υλικού κάτω από το εργαλείο. Είναι φανερό ότι η σωστή εκλογή του εργαλείου αλλά και των παραμέτρων της κατεργασίας μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την επιτυχία της συγκόλλησης, καθώς επηρεάζουν τα παραπάνω αναφερθέντα φαινόμενα της διαδικασίας FSW. Ο σχεδιασμός του εργαλείου (*shoulder-pin system*) είναι μία από τις βασικές προκλήσεις ώστε να εξασφαλισθεί καλή ποιότητα συγκόλλησης και να μειωθούν τα αναπτυσσόμενα κατά τη διαδικασία φορτία.

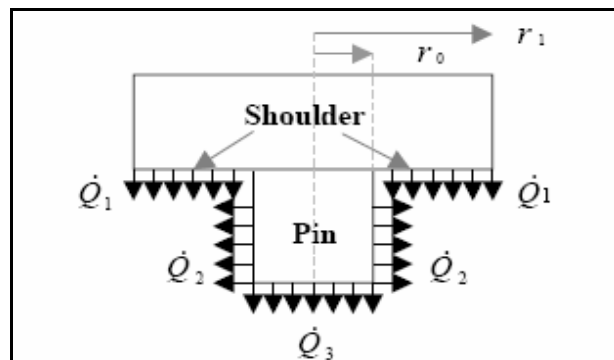
Η θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω της τριβής μεταξύ εργαλείου και υλικού προκαλεί μία πλαστική εξασθένιση (*softening*) του υλικού βάσης (*base material*) χωρίς όμως να παρατηρείται τήξη αυτού. Το πλεονέκτημα της συγκόλλησης στερεάς κατάστασης είναι η πλήρως κρυσταλλοποιημένη λεπτόκοκκη μικροδομή. Η θερμοκρασία στην περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου σε κράματα αλουμινίου φτάνει τους 500-550 °C (*Dubourg et al. 2006, P.2*).

Σε αυτό σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι για να παραχθεί μία καλής ποιότητας συγκόλληση (*sound weld*), η θερμοκρασία του υλικού πρέπει να ακολουθεί

δύο γενικά, εμπειρικά κριτήρια σύμφωνα με τη μελέτη των *St-Georges et al.* (2006, p.6):

1. Η θερμοκρασία του υλικού δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.8 της θερμοκρασίας τήξης του υλικού (T_{liquidus}), ώστε να αποφεύγεται η τήξη του υλικού.
2. Η θερμοκρασία κάτω από την επιφάνεια του shoulder, στο όριο της επιφάνειας του εργαλείου πρέπει να είναι ικανοποιητική. Τυπικά, η θερμοκρασία πρέπει να φτάνει το $0.7 \cdot T_{\text{liquidus}}$.

Το φαινόμενο θέρμανσης του υλικού, λόγω της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ εργαλείου και υλικού, μπορεί να αναλυθεί σε τρεις επιμέρους επιφάνειες θέρμανσης στο εργαλείο, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 6, όπου Q_1 το ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας στο "shoulder", Q_2 αυτό στην κάθετη ακμή του pin και Q_3 αυτό στη βάση του "pin" (*St-Georges et al. 2006, P.2*).



Σχήμα 6 Heat transfer on the surfaces of the tool

Πηγή: *Dubourg et al. 2006, P.5*

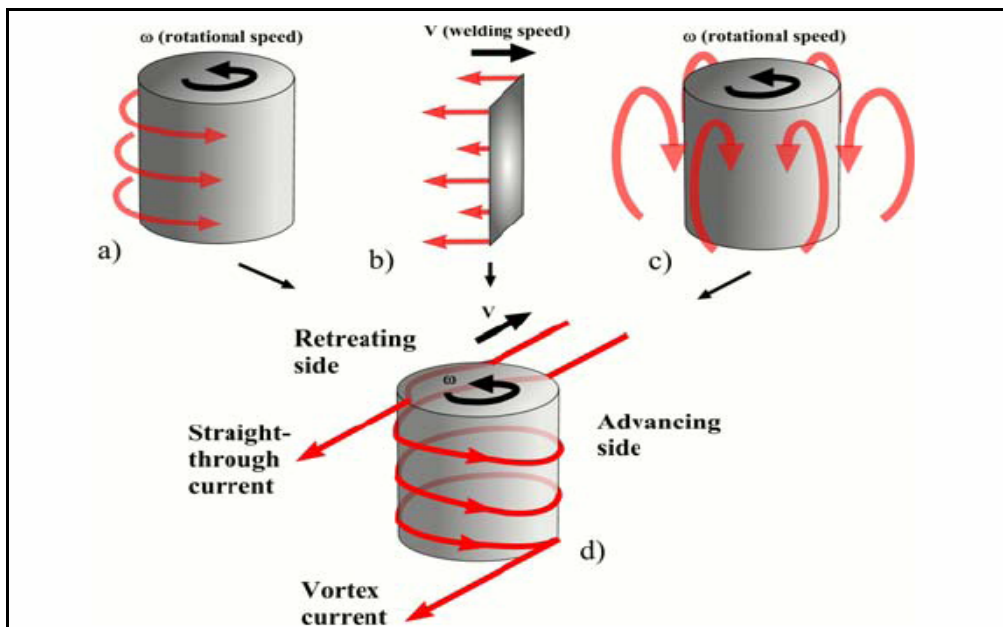
Η θερμότητα παράγεται κατά κύριο ποσοστό από το τμήμα εκείνο του εργαλείου που αποκαλείται "shoulder", ενώ το ποσοστό συμμετοχής του τμήματος "pin" στην παραγωγή θερμότητας είναι συνήθως μικρότερο από 5% αν και οι τιμές αυτές ποικίλουν. Η πρόσδοση θερμότητας λόγω τριβής από το "shoulder" υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση που απεικονίζεται στο σχήμα 7. (*Dubourg et al. 2006, P.3*). Όπως προκύπτει και από την ακόλουθη εξίσωση, η προσδιδόμενη θερμότητα q_0 αυξάνεται με αύξηση του συντελεστή

τριβής (μ), της ασκούμενης δύναμης (P) (αξονικό φορτίο ασκούμενο από το εργαλείο), την ταχύτητα περιστροφής (N) και τη διάμετρο του (R).

$$q_0 = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3$$

Σχήμα 7 Equation for the heat input by the shoulder friction

Η ροή του υλικού (*material flow*) τείνει μεταφέρει το πλαστικοποιημένο υλικό προς τα πάνω και πίσω με τη βοήθεια του εργαλείου. Καθώς το υλικό δεν μπορεί να μετακινηθεί ούτε προς τα πάνω (λόγω "shoulder") ούτε προς τα κάτω (λόγω της συσκευής συγκράτησης των τεμαχίων- "clamping"), επιτυγχάνεται ένωση του υλικού κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Η ροή υλικού γύρω από το FSW εργαλείο μπορεί να αναλυθεί σε τρεις απλούστερες μορφές ροής, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 8. Ο συνδυασμός αυτών των τριών ροών καταλήγει στο σχηματισμό ροών κατά περιοχή. (*Dubourg et al. 2006, p.4*).

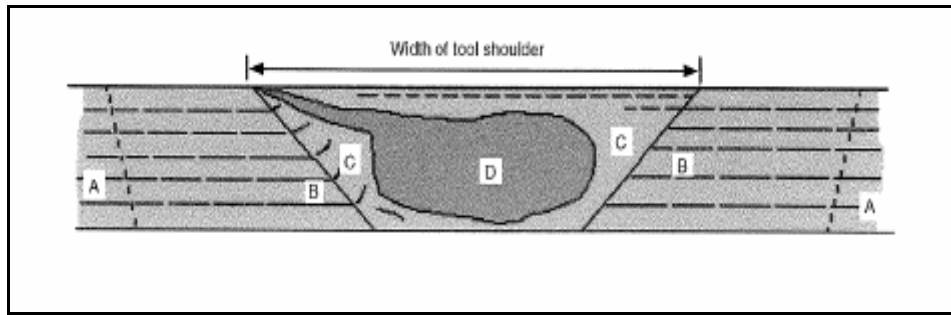


Σχήμα 8 The three incompressible flow fields: a) rigid body rotation, b) uniform translation, c) ring vortex, d) combination of the three flow fields

Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.5

Πέρα από την υψηλότερη αντοχή του υλικού λόγω της στερεάς φύσης της διαδικασίας, υπάρχει και οικονομικό πλεονέκτημα από αυτή. Καθώς δεν παρουσιάζεται τήξη μετάλλου, δε χρησιμοποιούνται προστατευτικά αέρια- "shielding gases" εκτός από τις περιπτώσεις χρήσης κραμάτων με υψηλό σημείο τήξης χρησιμοποιείται συχνά αργό- "argon gas", κυρίως για την προστασία των κεραμικών και πυρίμαχων τμημάτων του εργαλείου από οξείδωση. Οι ερευνητές και παραγωγοί της μεθόδου FSW υπολογίζουν ότι αν μόνο 10% της αμερικάνικης δραστηριότητας στον τομέα των συγκολλήσεων αντικατασταθεί από τη μέθοδο FSW, τότε θα προέκυπταν ενεργειακά οφέλη της τάξης των $1,28 \cdot 10^{13}$ Btu/year, τα οποία αντιστοιχούν σε μείωση των αερίων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα κατά 500 million lb/year. Η σχετικά απλή αρχή λειτουργίας, η υψηλότερη ανθεκτικότητα των κατασκευών, η αυξημένη αξιοπιστία και οι μειωμένοι ρύποι που προκύπτουν με χρήση της μεθόδου FSW, υπολογίζεται ότι μπορούν να αποφέρουν ετήσια κέρδη άνω των \$ 4.9 δις στην αμερικανική βιομηχανία (*Advanced Joining Technologies Inc.*).

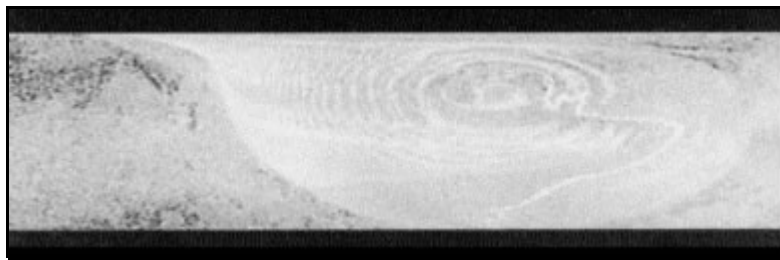
Όπως συμβαίνει σε όλες τις νέες τεχνολογίες, απαιτείται μία νέα ορολογία για την περιγραφή της διαδικασίας, έτσι ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί άρτια και ακριβής περιγραφή των παρατηρούμενων φαινομένων. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στη χώρα μας όπου η νέα μέθοδος είναι σε εμβρυακό επίπεδο, τόσο σε επιστημονικό όσο κυρίως σε βιομηχανικό επίπεδο. Το σχήμα 9 απεικονίζει τις μικροδομές που εμφανίζονται σε μία τομή ύστερα από εφαρμογή της μεθόδου FSW, ενώ το σχήμα 10 αποτυπώνει τη ροή υλικού για την ίδια τομή.



Various microstructural regions in the transverse cross section of a friction stir welded material. A: unaffected material or parent material, B: heat-affected zone (HAZ), C: thermomechanically affected zone, D: weld nugget

Σχήμα 9 Microstructure in the joint cross section

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.2



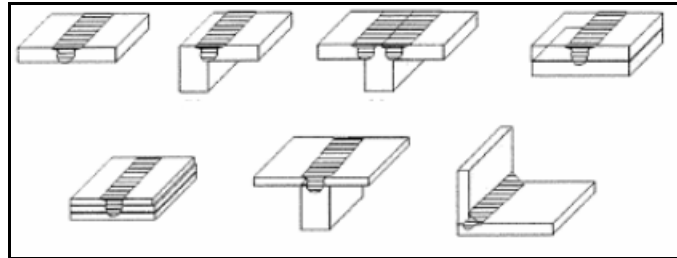
Σχήμα 10 Flow pattern in the joint cross section

Πηγή: aluMATTER 2008

Σε αντίθεση με την παραδοσιακή μέθοδο της συγκόλλησης δια τριβής, η οποία περιορίζεται σε σχετικά μικρών διαστάσεων συμμετρικά τεμάχια, η FSW μπορεί να εφαρμοσθεί στις περισσότερες γεωμετρικές κατασκευές αν και οι πλέον ενδεδειγμένες μορφές (butt and lap joints) είναι οι εικονιζόμενες στα σχήματα 11 και 12.

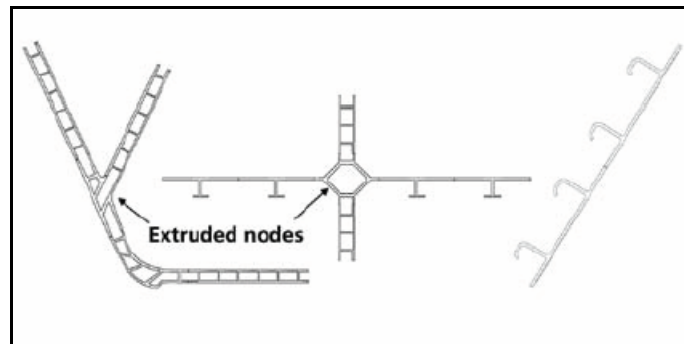
Συμπερασματικά, τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους GTAW και GMAW, η υψηλή επαναληψιμότητα, η απουσία αερίων, προστατευτικών αερίων, υλικών πληρώσεως, προετοιμασίας της κατεργασίας και υπερϊώδους ακτινοβολίας, οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες των συγκολλούμενων τεμαχίων, τα χαμηλά επίπεδα καταπόνησης και παραμόρφωσης, η δυνατότητα συγκόλλησης κραμάτων που δεν μπορούν να συνδεθούν με συγκολλήσεις

που περιλαμβάνουν τήξη του υλικού, όπως οι σειρές αλουμινίου 2xxx και 7xxx, καθώς και η δυνατότητα συγκόλλησης ανόμοιων υλικών όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας (Dubourg et al. 2006, p.1).



Σχήμα 11 Configurations for FSW

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.3



Σχήμα 12 Examples of construction using stir welded extrusions

Πηγή: Colligan 2004, P.5

Παρά το γεγονός ότι το FSW είναι μια πολύ ελπιδοφόρος σχετικά νέα τεχνική συγκόλλησης, υπάρχουν ακόμα πολλά στοιχεία που χρήζουν βελτίωσης. Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η τελική οπή- “exit hole” (end crater or rip hole) που σχηματίζεται κατά την έξοδο του εργαλείου. Η ανεύρεση τρόπων βελτίωσης αυτού του χαρακτηριστικού, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την αντοχή της σύνδεσης, αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της παρούσης εργασίας. Επιπλέον, υπάρχουν μερικά άλλα μειονεκτήματα, όπως οι υψηλές αξονικές δυνάμεις που απαιτούνται και καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συσκευής στήριξης των τεμαχίων, καθώς και το γεγονός ότι η

διαδικασία είναι λιγότερο ευέλικτη συγκρινόμενη με την κοινή ηλεκτροσυγκόλληση τόξου, μειονέκτημα που προκαλεί προβλήματα όταν πρόκειται για μη γραμμικές γραμμές συγκόλλησης ή στις περιπτώσεις που έχουμε διαφοροποίηση του πάχους. Επιπλέον, όσον αφορά στις μακροσκοπικές ατέλειες, η μέθοδος FSW συνήθως δεν συνοδεύεται από προβλήματα όπως η εμφάνιση πόρων, σκουριάς, ρωγμές στερεοποίησης κ.λπ. δεδομένου ότι δεν πραγματοποιείται τήξη κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Από την άλλη πλευρά τα προαναφερθέντα ελαττώματα αποτελούν σύνηθες φαινόμενο σε συγκολλήσεις κραμάτων αργιλίου με μεθόδους που περιλαμβάνουν τήξη του υλικού. Εντούτοις, οι ενώσεις FSW είναι επιρρεπείς σε άλλες ατέλειες οι οποίες είναι γνωστές στην αγγλική βιβλιογραφία ως pin hole, tunnel defect, kissing bond, cracks etc. λόγω λανθασμένης ροής υλικού και ελλιπούς στερεοποίησης του μετάλλου στη ζώνη συγκόλλησης (*Elangovan et al. 2008, p.165-166*).

2.2 Υλικά και τύποι εργαλείων

Η σημασία του εργαλείου στη μέθοδο FSW αποτυπώνεται στο γεγονός ότι η διαδικασία είναι αδύνατη χωρίς την χρήση του μη καταναλισκόμενου εργαλείου. Το εργαλείο εξασφαλίζει τη θερμομηχανική παραμόρφωση και τη θερμότητα λόγω τριβής που απαιτούνται για τη συγκόλληση των τεμαχίων. Ένα εργαλείο της μεθόδου FSW αποτελείται όπως έχει ήδη αναφερθεί από δύο τμήματα, τα “pin” και “shoulder”, τα οποία είναι κυλινδρικά τμήματα μικρότερης και μεγαλύτερης διαμέτρου αντίστοιχα. Για λόγους δυσκολίας απόδοσης, τα δύο αυτά στοιχεία αναφέρονται με την αγγλική τους ονομασία στο κείμενο, καθώς δεν υπάρχει αντίστοιχη ονομασία στην ελληνική.

Στις αρχικές έρευνες στο TWI χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό pin με σπείρωμα και κοίλο shoulder από ανοξείδωτο χάλυβα. Από τότε τα εργαλεία έχουν εξελιχθεί και σήμερα πλέον υπάρχουν πολλά με πολύπλοκες γεωμετρίες και κατασκευασμένα από εξωτικά υλικά. Καθώς το FSW είναι μία θερμοδυναμική διαδικασία παραμόρφωσης όπου η θερμοκρασία του εργαλείου πλησιάζει τη θερμοκρασία τήξης του εργαλείου, η παραγωγή ποιοτικών συγκολλήσεων απαιτεί την ενδεδειγμένη εκλογή υλικού εργαλείου σε κάθε περίπτωση. Η εκλογή του σωστού υλικού κατασκευής του εργαλείου προαπαιτεί τη γνώση των χαρακτηριστικών του υλικού που απαιτούνται σε κάθε εφαρμογή. Ο

πίνακας 2 περιλαμβάνει τα πιο συνήθη υλικά κατασκευής εργαλείων FSW.

Alloy	Thickness		Tool material
	mm	In.	
Aluminum alloys	<12	<0.5	Tool steel, WC-Co
	<26	<1.02	MP159
Magnesium alloys	<6	<0.24	Tool steel, WC
Copper and copper alloys	<50	<2.0	Nickel alloys, PCBN(a), tungsten alloys
	<11	<0.4	Tool steel
Titanium alloys	<6	<0.24	Tungsten alloys
Stainless steels	<6	<0.24	PCBN, tungsten alloys
Low-alloy steel	<10	<0.4	WC, PCBN
Nickel alloys	<6	<0.24	PCBN
(a) PCBN: Polycrystalline Cubic Boron Nitride			
(b) WC: Tungsten Carbide			

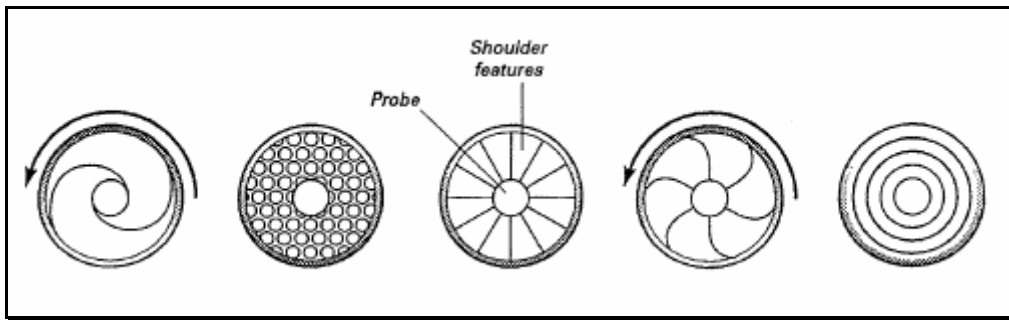
Πίνακας 2 Summary of current friction stir welding tool materials

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.9

Σχετικά με το σχεδιασμό των FSW εργαλείων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κάθε ένα από τα τμήματά του, “pin” και “shoulder” έχει διαφορετική λειτουργία και για αυτό το λόγο το ιδανικό εργαλείο για κάθε εφαρμογή μπορεί να αποτελείται από διαφορετικού υλικού τμήματα.

Το τμήμα “shoulder” είναι σχεδιασμένο για να παράγει θερμότητα στις επιφανειακές και στις υπό την επιφάνεια περιοχές του τεμαχίου αλλά και να περιορίζει την περιοχή της παραμόρφωσης . Το “pin” είναι το τμήμα εκείνο που παράγει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας σε λεπτά τεμάχια καθώς επίσης

και την αξονική δύναμη που είναι απαραίτητη για τη συγκράτηση της ραφής. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες τύπων “pin” και “shoulder”, η κάθε μία από τις οποίες έχει τις δικές της υποκατηγορίες. Οι τρεις βασικοί τύποι είναι (a) κυρτό-“concave” shoulder, (b) επίπεδο-“flat” shoulder και (c) κοίλο-“convex” shoulder. Το FSW εργαλείο μπορεί να περιλαμβάνει επίσης επί πλέον χαρακτηριστικά για να αυξάνει την παραγόμενη ποσότητα παραμορφώσιμου υλικού από το “shoulder”, κάτι το οποίο οδηγεί σε αυξημένη ανάμειξη του υλικού του τεμαχίου αλλά και σε υψηλότερης ποιότητας συγκολλήσεις. Το σχήμα 13 απεικονίζει τα πλέον συνήθη από αυτά τα χαρακτηριστικά. Επί πλέον, τα χαρακτηριστικά αυτά αυξάνουν το λόγο δυναμικού/στατικού όγκου, ο οποίος αποτελεί σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό εργαλείων της οποίας η επιρροή στη διαδικασία εξετάζεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.1.



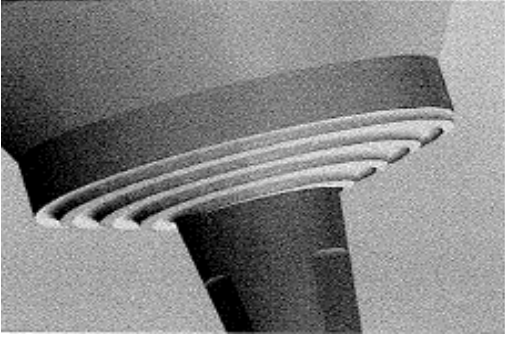





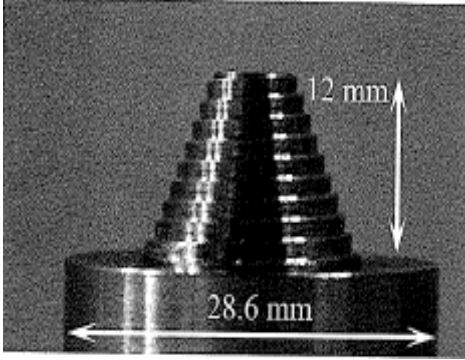
Σχήμα 13 Different shoulder features

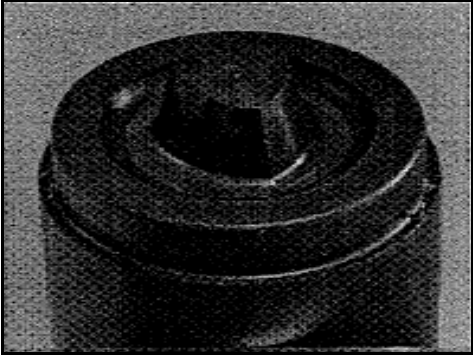
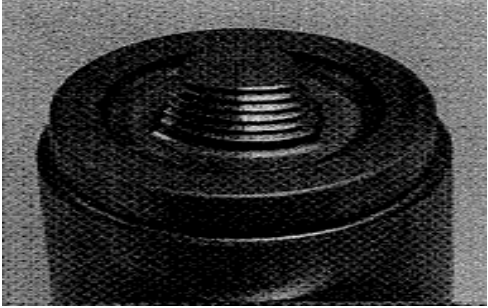


Πηγή: Mishra et al. 2007, P.14



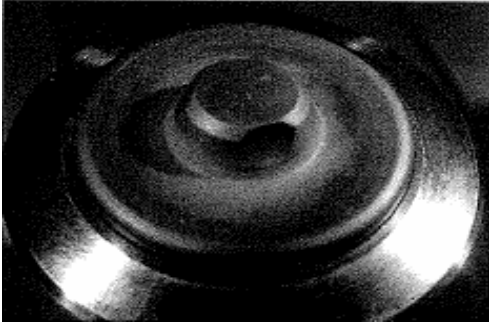
Το τμήμα “pin” παράγει μέρος της παραγόμενης θερμότητας λόγω παραμόρφωσης και τριβής στην περιοχή της σύνδεσης των προς συγκόλληση τεμαχίων, ανάλογα με την γεωμετρία του εργαλείου. Επιπλέον, το βάθος της παραμόρφωσης και η διαμήκης ταχύτητα του εργαλείου ορίζονται από το τύπο του “pin”. Αντίθετα με ότι συμβαίνει σε λεπτά ελάσματα, το “pin” παράγει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας σε τεμάχια μεγάλου πάχους. Σε σύγκριση με τους διαθέσιμους τύπους “shoulder”, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν περισσότερες παραλλαγές τύπου “pin”. Οι πλέον συνήθεις τύποι είναι οι ακόλουθοι: (a) κυλινδρικό σφαιρικού άκρου (round bottom cylindrical) pin, (b) κυλινδρικό επιπέδου άκρου (flat bottom cylindrical) pin, (c) κόλινος κωνικός (truncated cone) pin, (d) σπειροειδής (whorl) pin, (e) εξαγωνικό (trivex) pin. Ο

πίνακας 3 περιλαμβάνει τους πλέον συνήθεις τύπους εργαλείων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.15</p>	<p><i>Scrolled shoulder tool with truncated cone pin containing three flats</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Channels to eliminate the need for tilting• Reduced tool lift-increased welding speed
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.15</p>	<p><i>Convex shoulder with curved geometries</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Mainly used for thick materials• Usually with addition of scrolls
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.15</p>	<p><i>Convex shoulder with tapered geometries</i></p> <ul style="list-style-type: none">• Typical tapered shoulder tool• Can make sound welds with depth variation

 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.16</p>	<p><i>Concave shoulder with round-bottom pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduced tool wear upon plunging
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.16</p>	<p><i>Concave shoulder with flat-bottom pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • The most used • Easier to machine than round-bottom • increased applied force from the pin due to higher surface velocity
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.17</p>	<p><i>Convex shoulder with truncated cone pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • For thick materials at fast travel speeds • Lower transverse loads
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.18</p>	<p><i>Stepped spiral pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Developed for high temperature materials

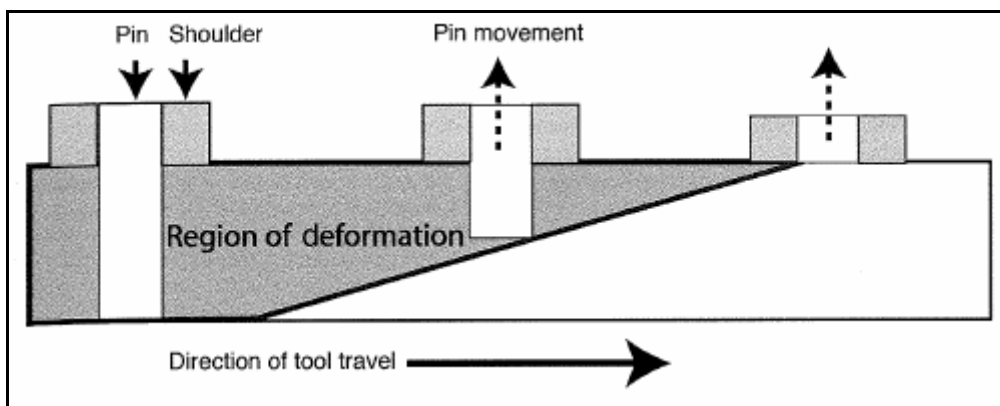
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.19</p>	<p><i>Trivex™ pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimized axial force due to convex design • Lower traversing force than MX Trivex™ • Most used for FSW in thin materials • Easy to machine
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.9</p>	<p><i>MX Trivex™ pin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Increased traversing force compared to Trivex™ due to threads
 <p>Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.12</p>	<p><i>Cylindrical partially threaded pin tool</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Most used for FSW in thin materials • Classic FSW tool
 <p>Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.12</p>	<p><i>Triflute™ pin tool</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduces/eliminates the voids • Reduced required torque and travel force • Displaces less volume than the cylindrical tool

 <p>Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.12</p>	<p><i>WhorlTM pin tool</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Same design as the triflute pin apart from the flutes • Both used for welding thick (>12mm) sheets
 <p>Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.14</p>	<p><i>Flare trifluteTM pin tool</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Only part of the face involved in material work • Basically used for lap joints
 <p>Πηγή: Mishra et al. 2007, P.20</p>	<p><i>Threadless pin tool with three flats at pin tip</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Use for FSW of stainless steel • Polycrystalline cubic boron nitride pin (PCBN)

Πίνακας 3 Summary of most common tool designs

Υπάρχει μία σημαντική κατηγορία εργαλείων, τα οποία αποτελούνται από ένα κινητό “pin” που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός περιστρεφόμενου “shoulder” και μπορεί με την κίνηση του να προσαρμόζει το μήκος του κατά τη διεργασία. Με αυτό τον τρόπο καθίστανται δυνατές εφαρμογές που έχουν μεταβλητό πάχος συγκόλλησης. Αυτού του είδους τα “pins” ονομάζονται “retractable pins” και το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπουν το “κλείσιμο” της τελικής οπής, το οποίο όπως έχει προαναφερθεί είναι ένα από τα “αδύνατα” σημεία της κατεργασίας. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος τύπος εργαλείου μειώνει την υπερθέρμανση, βελτιώνει την ποιότητα τα συγκόλλησης μειώνοντας τα

εσωτερικά κενά και καθιστά δυνατές συγκολλήσεις μεταβλητού βάθους. Το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελείται από τρία βασικά τμήματα. Το κυρίως τμήμα (body portion), την κεφαλή (head portion) και το ακραίο τμήμα (tip section)(United States Patent 7404510, 07/29/2008, Trapp et al.) Παρόλα τα πλεονεκτήματα, ο συγκεκριμένος τύπος εργαλείου έχει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους και για το λόγο αυτόν δε χρησιμοποιούνται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το σχήμα 14 αποτυπώνει τον τρόπο λειτουργίας του “retractable pin tool”.



Σχήμα 14 Working apparatus of retractable pin tool

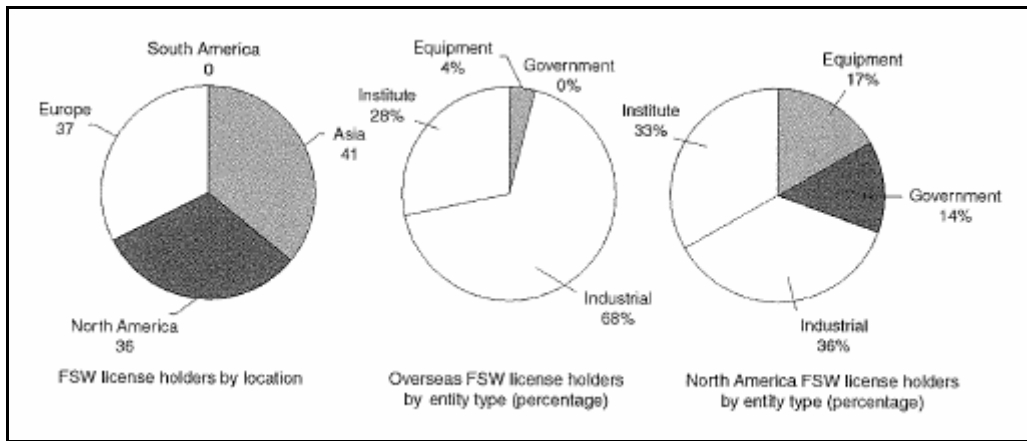
Πηγή: Mishra et al. 2007, P.21

2.3 Εφαρμογές της FSW

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές της μεθόδου FSW. Μια από τις πρώτες εφαρμογές της στην παραγωγή ήταν η σύνδεση προβολικών τμημάτων με μεγάλα πλεονεκτήματα κυρίως στον κλάδο της ναυπηγικής. Σήμερα αυτή η τεχνική παραγωγής εφαρμόζεται εκτός από τον κλάδο της ναυπηγικής και στη βιομηχανία γεφυρών και αυτοκινήτων. Υπολογίζεται ότι έως το 2000 είχαν ολοκληρωθεί περισσότερα από 60000m συγκολλήσεων τεμαχίων σύνθετης γεωμετρίας με τη μέθοδο FSW (Schofer 1999, P.695). Η διαδικασία κατοχυρώνεται με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας χορηγούμενο από τον οργανισμό TWI στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες και σήμερα υπολογίζεται πως υπάρχουν περισσότεροι από 183 χρήστες συμπεριλαμβανομένων των κολοσσών Space Shuttle external tank, Boeing Delta II and Delta IV Expendable Launch Vehicles and the SpaceX Falcon 1 rocket, Eclipse

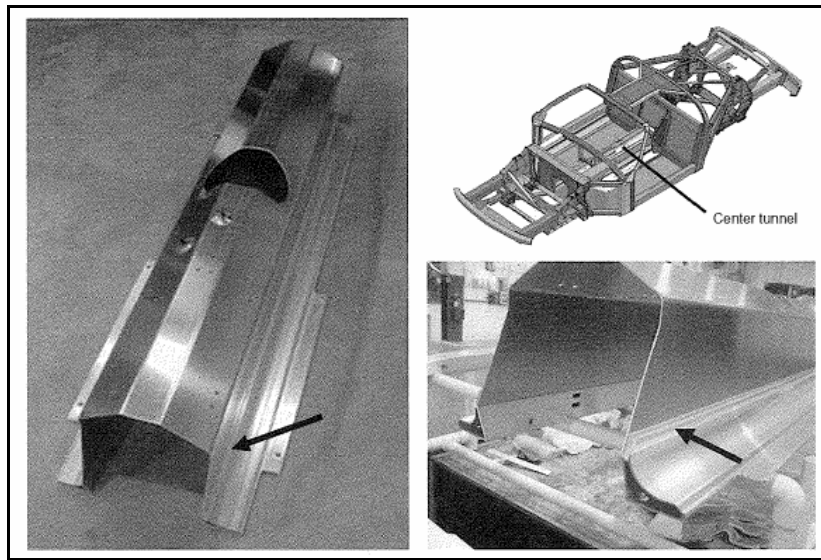
Aviation etc. (www.wikipedia.de). Στις αρχές του 2005, οι άδειες FSW που χορηγήθηκαν από το TWI ήταν σχεδόν εξίσου κατανομημένες μεταξύ Βόρειας Αμερικής (36), Ευρώπης (37) και Ασίας (41). Η πλειοψηφία των αδειών στη Β. Αμερική έχουν χορηγηθεί σε κρατικά εργαστήρια, κατασκευαστές εξοπλισμού και επιστημονικά εργαστήρια, ενώ στον υπόλοιπο κόσμο οι περισσότερες άδειες κατέχονται από μεγάλες βιομηχανίες.

Το σχήμα 15 αποτυπώνει την κατανομή των FSW διπλωμάτων μέχρι τον Ιανουάριο του 2005 και τα σχήματα 16-18 εμφανίζουν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου FSW στη βιομηχανία.



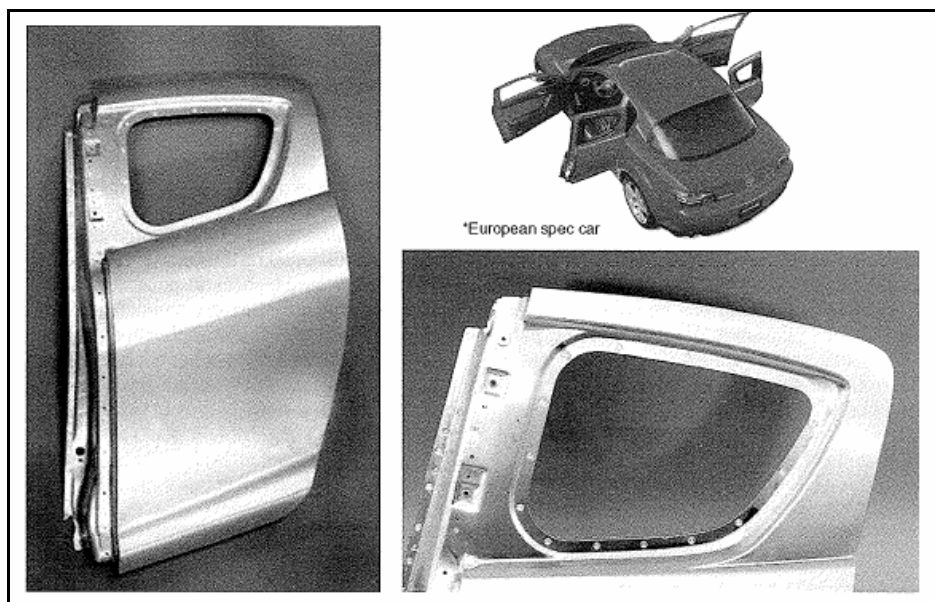
Σχήμα 15 Demographics of the FSW licenses as of January 2005

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.275



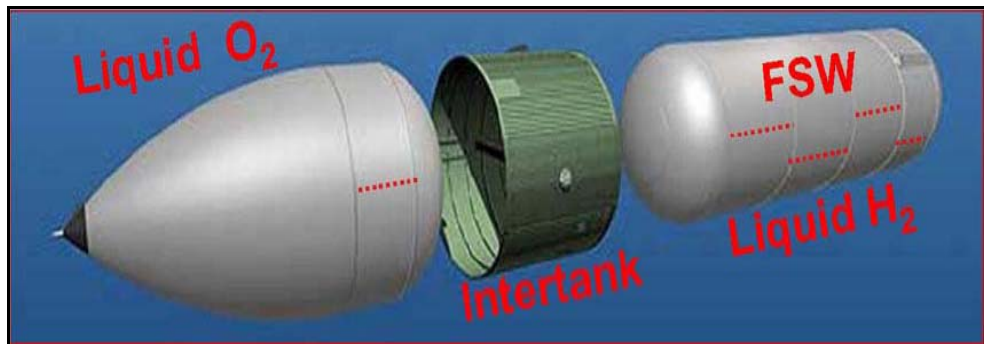
Σχήμα 16 The central tunnel assembly of the Ford GT is a friction stir welded assembly of Aluminum stampings and extrusions

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.301



Σχήμα 17 Mazda RX-8 rear door structure welded with the process of plunge spot welding which is relevant to FSW

Πηγή: Mishra et al. 2007, P.301



Σχήμα 18 Changing from conventional TIG to FSW for the welding of rocket fuel tanks has lead to a 99% cost reduction

Πηγή: Rowe et al. 2008, P.3

Η FSW τεχνολογία απαιτεί πλήρη κατανόηση της διαδικασίας και την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν για να μπορεί να εφαρμοσθεί με ασφάλεια και επιτυχία στην παραγωγή. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγαλύτερη έρευνα και εμπειρία (*Cavaliere et al. 2008, P.364*). Υπάρχουν ήδη πολλά τμήματα έρευνας και ανάπτυξης (R&D departments) σε μεγάλες βιομηχανίες, τα οποία προσπαθούν να βελτιώσουν τη διαδικασία FSW αλλά και να εξετάσουν πλήρως τον τρόπο λειτουργίας της και τις δυνατότατες που μπορεί να προσφέρει. Θα ήταν πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα για την αεροδιαστημική αλλά και όλη τη βιομηχανία των μεταφορών αν τα κράματα υψηλής απόδοσης (high-performance alloys), τα οποία σήμερα θεωρούνται ως μη συνιστώμενα προς συγκόλληση, μπορούσαν να συγκολληθούν μέσω της μεθόδου FSW. Σύμφωνα με μελέτη των Mishra et al. (2007, P.274), υπάρχουν αρκετά θέματα που θεωρούνται εμπόδιο σε μία πιο εκτεταμένη χρήση της μεθόδου, όπως:

- Έλλειψη βιομηχανικών κανόνων και προδιαγραφών
- Έλλειψη ευρέως αποδεκτών σχεδιαστικών κανόνων
- Υψηλό κόστος αρχικού εξοπλισμού

3 Πειραματικό δομικό στοιχείο

3.1 Γεωμετρία

Η διεργασία FSW εξετάζεται σε κυλινδρικά στοιχεία με διαφορετική γεωμετρία. Θα ακολουθηθεί διαδικασία “single pass welding procedure” για να κατασκευαστούν οι επιθυμητές συνδέσεις. Όλα τα στοιχεία αποτελούνται από το ίδιο υλικό: αλουμίνιο EN AW-6060T6 (DIN EN 573-3), με χημικό συμβολισμό: EN AW-AlMgSi, και προμηθεύτηκαν από την εταιρία “Max Cochius GmbH”. Η εξωτερική διάμετρος των πέντε διαφορετικών κυλινδρικών στοιχείων ήταν 40, 60, 80, 120 και 160mm αντίστοιχα. Η παρούσα εργασία εξετάζει αποκλειστικά την εφαρμογή της μεθόδου στα στοιχεία με διάμετρο 60mm. Λόγω παρόμοιας γεωμετρικής μορφής και των υπολοίπων στοιχείων, μπορούμε αν υποθέσουμε ότι τα συμπεράσματα που θα προκύψουν μπορούν να υιοθετηθούν και για τα προκείμενα.

3.2 Βασικό υλικό

Το βασικό υλικό κατασκευής των σωλήνων ανήκει στην κατηγορία 6xxx, η οποία ανήκει στα κράματα γήρανσης- “precipitation-hardening alloys”, όπως και τα κράματα των ομάδων 2xxx και 7xxx. Σύμφωνα με τον οργανισμό Aluminum Association (A. A), η ονομασία των κραμάτων αργιλίου αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο μέρος από τέσσερεις αριθμούς ανάλογα με τα αν πρόκειται για “casting ή wrought” κράματα. Το προς εξέταση υλικό ανήκει στη δεύτερη κατηγορία. Έτσι ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στο βασικό στοιχείο πλήρωσης, ο δεύτερος είναι ενδεικτικός του ποσοστού καθαρότητας και οι δύο τελευταίοι, στην περίπτωση της κατηγορίας 6xxx, αναφέρονται την υποομάδα της συγκεκριμένης κατηγορίας στην οποία ανήκει το υλικό. Το εξεταζόμενο υλικό λοιπόν με δείκτη 6060 ανήκει στην 60¹ ομάδα της οικογένειας κραμάτων 6xxx-MgSi. Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας είναι ο δείκτης T6 ο οποίος είναι θερμοκρασιακός δείκτης και μας πληροφορεί ότι το πρώτο βήμα στη διαμόρφωση της δομής του είναι Solution Heat Treatment (SHT) και πως ύστερα από τοποθέτησή του σε θερμοκρασία δωματίου ακολουθεί τεχνητή γήρανση – “artificial aging decomposition”, έτσι ώστε το υλικό να αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή του (*Xrysoulakis et al, 2003, P.562*).

Οι πίνακες 4 and 5 εμφανίζουν τις μηχανικές ιδιότητες και τη χημική σύνθεση του βασικού μετάλλου EN AW-6060T6 σύμφωνα με την προμηθεύτρια εταιρία “Max Cochius GmbH” και τον κανονισμό DIN EN 755-2. Ο πίνακας 4 περιέχει επίσης και τις ιδιότητες του στοιχείου EN AW-6061T6 ,το οποίο είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο κράμα από την κατηγορία 6xxx και έχει ενδελεχώς εξετασθεί ως προς τη συμπεριφορά του σε FSW εφαρμογές. Οι ιδιότητες αυτού του υλικού αποτέλεσαν σημαντική βοήθεια στο σχεδιασμό των πρώτων πειραμάτων, καθώς δεν υπάρχουν πολλές αναφορές στη βιβλιογραφία για τη χρήση του EN AW-6060T6 σε FSW εφαρμογές.

Note: Ο ακόλουθος πίνακας περιλαμβάνει τις ελάχιστες τιμές των αναφερόμενων ιδιοτήτων.

Mechanical property	Index	AW-6060-T6	AW-6061-T6
<i>Ultimate tensile strength</i>	R _m [N/mm ²]	190	260
<i>Yield strength</i>	R _{p0,2} [N/mm ²]	150	240
<i>Hardness</i>	HBW	85	95
<i>Elongation</i>	[%]	8-16	2-16

Πίνακας 4 Mechanical properties of AW-6060T6 and AW-6061T6 materials

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
<i>Upper limit</i>	0.60	0.30	0.10	0.10	0.60	0.05	0.15	0.10
<i>Lower limit</i>	0.30	0.10	0.10	0.10	0.35	0.05	0.15	0.10

Πίνακας 5 Chemical composition (wt%) of base material AW-6060-T6

4 Προετοιμασία πειράματος

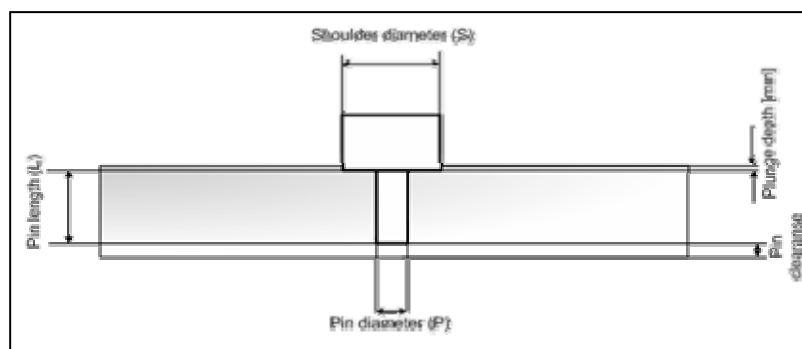
4.1 Εκλογή παραμέτρων συγκόλλησης

4.1.1 Η σημασία των παραμέτρων συγκόλλησης

Η ποιότητα μίας συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW εξαρτάται από τις παραμέτρους συγκόλλησης. Η βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων αποτελεί εξαιρετικής σημασίας ζήτημα για να επιτευχθεί σύνδεση χωρίς ελαττώματα. Ο σχηματισμός ελαττωμάτων και ασυνεχειών στη ζώνη συγκόλλησης οφείλεται κυρίως στις παραμέτρους συγκόλλησης.

Το πρώτο βήμα στην προετοιμασία των πειραμάτων είναι η σωστή εκλογή των παραμέτρων συγκόλλησης. Οι παράμετροι μπορούν να διαιρεθούν σε αυτές που αφορούν το εργαλείο και ονομάζονται παράμετροι εργαλείου- “tool parameters” και σε αυτές που αφορούν τη διαδικασία και ονομάζονται παράμετροι διαδικασίας- “process parameters”. Η σωστή εκλογή έχει εξαιρετική επιρροή στην επιτυχή ή μη συγκόλληση. Οι παράμετροι εργαλείου για ένα συγκεκριμένο τύπο εργαλείου FSW είναι οι ακόλουθοι:

1. διάμετρος pin (P) [mm]
2. μήκος pin (L) [mm]
3. διάμετρος diameter (S) [mm]



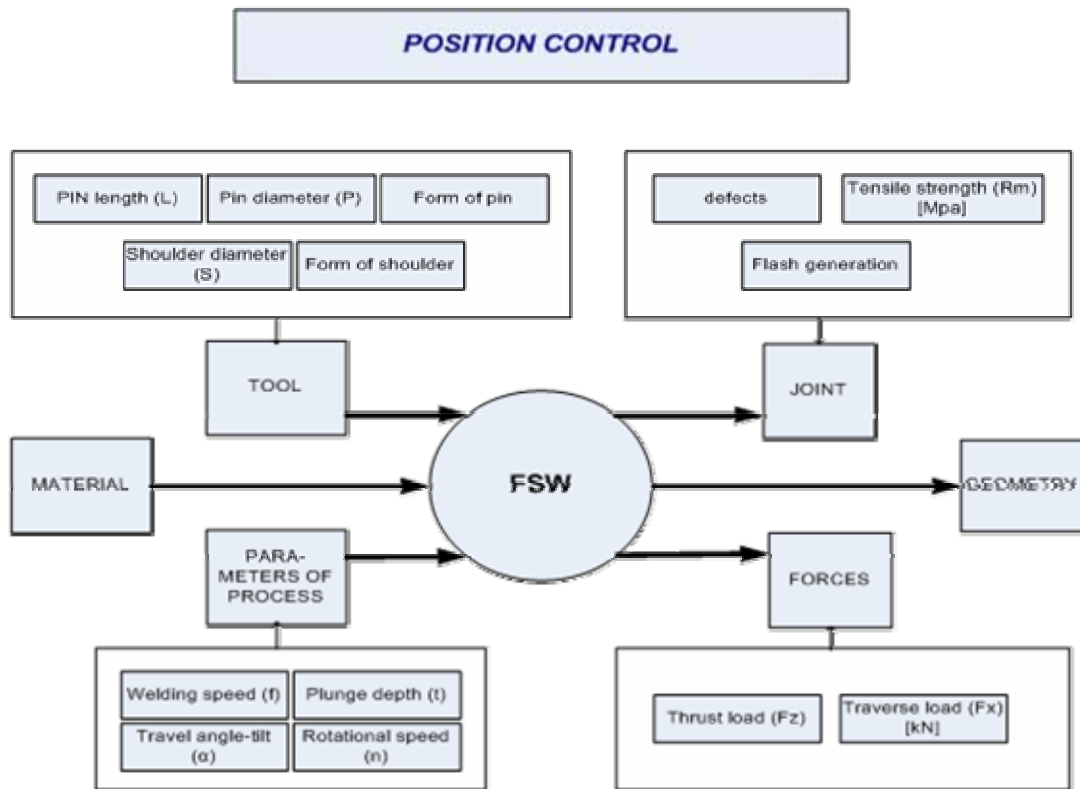
Σχήμα 19 Scheme of tool parameters

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι σε όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν ανεξάρτητα με τον τύπο του εργαλείου που χρησιμοποιείται κάθε φορά, το μήκος του κυμαινόταν από 4.5 έως 4.7 mm με σκοπό να προστατευθεί η ιδιοκατασκευή συγκράτηση των τεμαχίων από πιθανή υπερβολική βύθιση του εργαλείου στο υλικό. Οι παράμετροι της διαδικασίας είναι οι ακόλουθες:

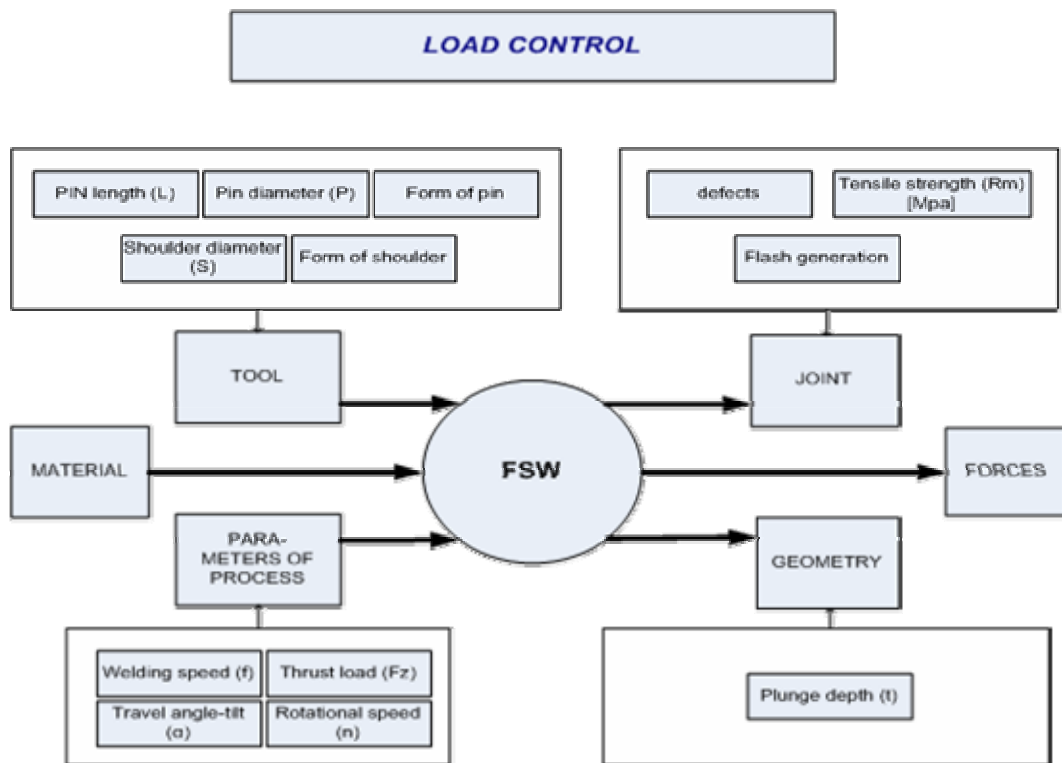
1. περιστροφική ταχύτητα εργαλείου (*tool rotation*) (n) [rpm]
2. (διαμήκης) ταχύτητα συγκόλλησης (*traverse-welding speed*) (f) [mm/min]
3. γωνία κλίσης εργαλείου (*tilt-travel angle*) (α) [°]
4. βάθος εισχώρησης (*plunge depth*) (t) [mm]
5. αξονικό φορτίο (*thrust load*) (F_z) [N]

Μερικές μηχανές FSW, συμπεριλαμβανομένης και εκείνης στην οποία θα εκτελέσουμε τα πειράματα, μπορούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας να εφαρμόσουν δύο είδη ελέγχου: έλεγχος θέσης και έλεγχο φορτίου. Αν εφαρμόσουμε έλεγχο θέσης, τότε η κάθετη θέση του εργαλείου είναι καθορισμένη και το ασκούμενο φορτίο μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ενώ στην περίπτωση ελέγχου φορτίου, η αξονική δύναμη από εργαλείο στο υλικό παραμένει ανεπηρέαστη. Κατά τη διεξαγωγή του πρώτου κύκλου πειραμάτων με τα διαθέσιμα εργαλεία, η μηχανή λειτούργησε υπό έλεγχο θέσης και το βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο υλικό παρέμεινε σταθερό σε όλα τα πειράματα (t) = 0.2 mm.

Τα σχήματα 20 και 21 δείχνουν τα διαγράμματα ροής κατά τη διάρκεια της μεθόδου ανάλογα με το είδος ελέγχου που εφαρμόζεται. Η μέθοδος ελέγχου που θα εφαρμοστεί επηρεάζει τα κριτήρια αξιολόγησης της διαδικασίας. Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι στην περίπτωση ελέγχου θέσης, η βύθιση (t) του pin είναι προκαθορισμένη πριν την εκτέλεση της διαδικασίας και παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια αυτής, έτσι ώστε το ασκούμενο φορτίο να πρέπει να μεταβάλλεται για να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της διαδικασίας. Στην περίπτωση ελέγχου φορτίου, η αξονική δύναμη που ασκείται στο τεμάχιο παραμένει σταθερή ενώ η βύθιση μεταβάλλεται ανάλογα με την αντίσταση που δέχεται το εργαλείο από το τεμάχιο.

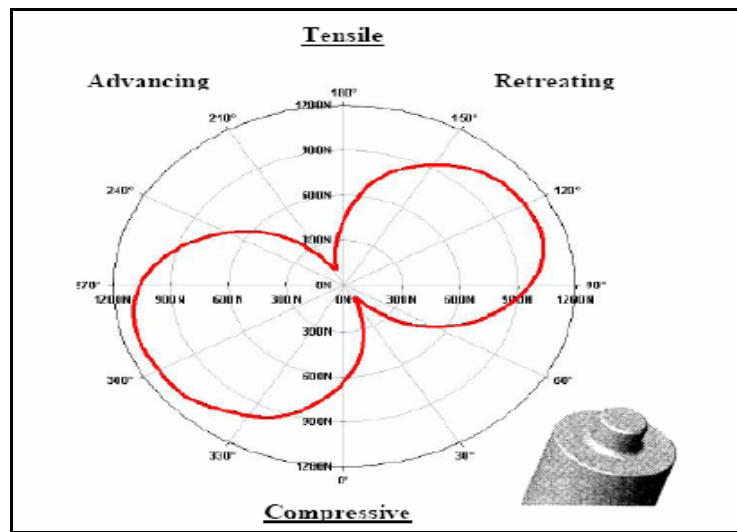


Σχήμα 20 Flow chart of FSW in position control



Σχήμα 21 Flow chart of FSW in position control operation

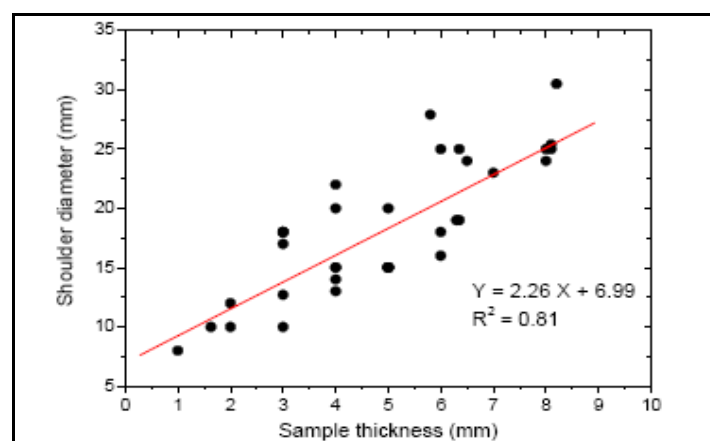
Έχει ήδη αναφερθεί ότι εκτός από τις παραμέτρους εργαλείου και ο ίδιος ο σχεδιασμός του εργαλείου είναι επίσης σημαντικό ζήτημα. Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό εργαλείων FSW είναι ο λόγος δυναμικού όγκου (όγκος υλικού που αποβάλλεται από το pin κατά τη διάρκεια της περιστροφής του) προς στατικό όγκο (όγκος pin). Η αύξηση αυτού του λόγου οδηγεί σε μείωση σχηματισμού κενών στις συγκολλήσεις. Στα συμβατικά εργαλεία, ο λόγος μπορεί να αυξηθεί μέσω χρήσης των διαφόρων χαρακτηριστικών “shoulder” (βλ. κεφάλαιο 2.2). Η σημασία του λόγου καταδεικνύεται μέσω μίας τεχνικής που αποκαλείται “footprint”, στην οποία αποτυπώνεται το διάνυσμα της ασκούμενης δύναμης από το εργαλείο ανά περιστροφή (Dubourg και λοιποί. 2006, P.9). Το σχήμα 22 απεικονίζει τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε πολικές συντεταγμένες για ένα τυπικό εργαλείο. Όταν χρησιμοποιούμε ένα συμβατικό εργαλείο χωρίς προφίλ (typical non-profile tool) με λόγο ίσο με τη μονάδα, οι δυνάμεις είναι σχετικές υψηλές και το προφίλ τους συμμετρικό. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι επιθυμητό δεδομένου ότι θέλουμε να έχουμε σχετικά χαμηλές δυνάμεις στην κατεύθυνση F_y της συγκόλλησης και υψηλότερες αξονικές δυνάμεις προκειμένου να επιτευχθεί ανάδευση (stirring) και όχι συμπίεση (forging) στο υλικό του τεμαχίου. Επιπλέον, όσο εντονότερο είναι το φαινόμενο της ανάδευσης, τόσο χαμηλότερη είναι η αξονική δύναμη. Επομένως χρησιμοποιούμε συνήθως εργαλεία με προφίλ με σκοπό να μειωθούν οι δυνάμεις και η φθορά του εργαλείου καθώς επίσης και οι απαιτήσεις για συσκευές της συγκράτησης των τεμαχίων. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε διαφορετικά χαρακτηριστικά προκειμένου να “παγιδέψουμε” το υλικό και να το απελευθερώσουμε πίσω από το εργαλείο ώστε να προωθηθεί η πλήρης ανάμιξη του υλικού. Αυτή η δράση είναι ιδιαίτερης σημασίας κυρίως για την προωθημένη-μπροστινή πλευρά του εργαλείου (advanced side) όπου παρατηρείται διάτμηση του παγιδευμένου υλικού που κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση με τη ροή. Από την άλλη, η ποσότητα του υλικού που παγιδεύεται στα χαρακτηριστικά δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη για να μην αυξηθεί υπέρμετρα η αξονική δύναμη. Είναι σαφές ότι ο σχεδιασμός του κατάλληλου εργαλείου δεν αποτελεί μία απλή διαδικασία και στηρίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε εφαρμογής και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί τόσοι πολλοί τύποι εργαλείων, οι οποίοι δεν επιφέρουν τα ίδια αποτελέσματα σε κάθε εφαρμογή τους.



Σχήμα 22 Polar force plot for $n=300\text{rpm}$, $f=120\text{mm/min}$

Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.9

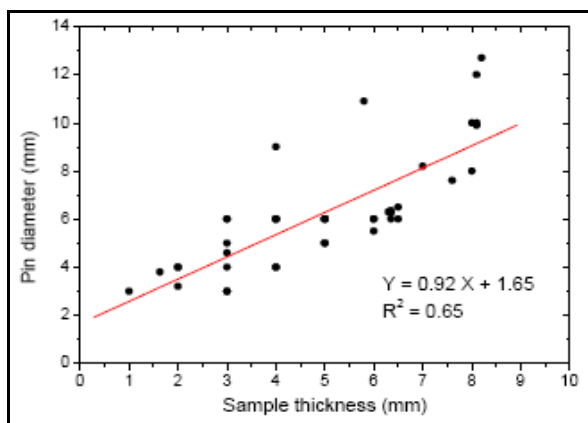
Αναφορικά με τις παραμέτρους του εργαλείου, παλαιότερα πειράματα έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η διάμετρος του “shoulder” (S) πρέπει για την περίπτωση πάχους υλικού 5mm να κυμαίνεται μεταξύ 15-20mm. Το σχήμα 23 δείχνει διάφορες τιμές της διαμέτρου συναρτήσει του πάχους τεμαχίου για 30 διαφορετικές περιπτώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 23 Shoulder diameter as function of sample thickness

Πηγή: Dubourg et al. 2006, P.7

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο λόγος διαμέτρου “shoulder” (S) προς διάμετρο “pin” (P) βρίσκεται μεταξύ 2.5 έως 3. Επιπλέον το τμήμα pin έχει συνήθως μικρότερο μήκος από το πάχος του τεμαχίου, ενώ η διάμετρος του είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτό, χωρίς όμως η τιμή της να γίνεται μικρότερη των 3 mm (*Dubourg et al. 2006, p.8*). Το σχήμα 24 δείχνει τη διάμετρο του pin συναρτήσει του πάχους του υλικού για 28 διαφορετικές περιπτώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Στην περίπτωση μας το πάχος του τεμαχίου είναι 5mm και έτσι σύμφωνα με τα σχήματα 23 και 24, οι διαμέτροι “shoulder” και “pin” πρέπει να είναι κοντά στις τιμές 18 και 6mm αντίστοιχα. Οι τιμές της διαμέτρου που αναφέρθηκαν αποτελούν συνιστώμενες τιμές που έχουν προκύψει πειραματικά και δεν αποτελούν σε καμία περίπτωση δέσμευση. Οι ιδανικές τιμές θα προκύψουν από συνδυασμό των ήδη υπάρχουσών βιβλιογραφικών αναφορών και της εμπειρίας που θα προκύψει από τα πειράματα που θα εκτελεστούν.



Σχήμα 24 Pin diameter as function of sample thickness

Πηγή: *Dubourg et al. 2006, P.8*

Σχετικά με τις παραμέτρους της διαδικασίας, επιτυχείς εφαρμογές της μεθόδου FSW έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι συνθήκες συγκόλλησης και οι παράμετροι στηρίζονται στις μηχανικές ιδιότητες του βασικού μετάλλου (*Balasubramanian et al. 2007, P.400*). Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη διαδικασία είναι η τάση διαρροής (yield strength), η ολκιμότητα (ductility) και η σκληρότητα (hardness) του βασικού μετάλλου.

Πειράματα έχουν αναδείξει τη σχέση μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων και των παραμέτρων τις διαδικασίας.

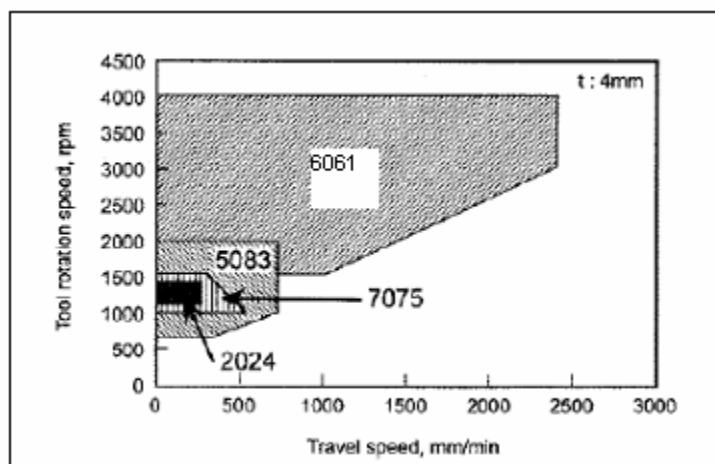
- Το όριο διαρροής των κραμάτων αργιλίου έχει ευθέως ανάλογη σχέση με την περιστροφική ταχύτητα και αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα συγκόλλησης.
- Η ολκιμότητα των κραμάτων αργιλίου είναι αντιστρόφως ανάλογη με την περιστροφική ταχύτητα και ευθέως ανάλογη με την ταχύτητα συγκόλλησης.
- Η σκληρότητα των κραμάτων αργιλίου έχει ευθέως ανάλογη σχέση με την περιστροφική ταχύτητα και αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα συγκόλλησης.

Όλες οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω προκύπτουν από τη διεξαγωγή πειραμάτων με διαφορετικά κράματα αργιλίου, συμπεριλαμβανομένου και του EN AW-6061T6, το οποίο ανήκει στην 6xxx κατηγορία και έχει παρόμοιες ιδιότητες με το εξεταζόμενο EN AW-6060T6 alloy. (*Balasubramanian et al. 2007, P.400-402*).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θερμότητα και η ροή του υλικού αποτελούν τα δύο βασικά φαινόμενα που εμφανίζονται στη διαδικασία FSW. Το σημείο τήξης του υλικού επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας. Αν εμφανισθεί τήξη του υλικού λόγω υπερβολικής του θέρμανσης, μειώνεται η αναπτυσσόμενη τριβή και κατά την πτώση της θερμοκρασίας το υλικό στερεοποιείται και αντίστροφα. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει τη χρήση πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής και συνεπώς και συγκόλλησης (*Dubourg et al. 2006, p.3*). Επιπλέον η θερμοκρασία στερεοποίησης (*solidus temperature*) του βασικού μετάλλου επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και συνεπώς και τις παραμέτρους διαδικασίας κάτω από τις οποίες εκτελείται η διαδικασία. Ο πίνακας 6 περιλαμβάνει τα σημεία τήξης πέντε διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου και το σχήμα 25 αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι τιμές επηρεάζουν τις παραμέτρους της διαδικασίας που πρέπει να εφαρμοσθούν, ώστε να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα.

Base material	Solidus temperature (°C)
AA2024	502
AA7075	477
AA5083	574
AA6061	562
AW6060	585

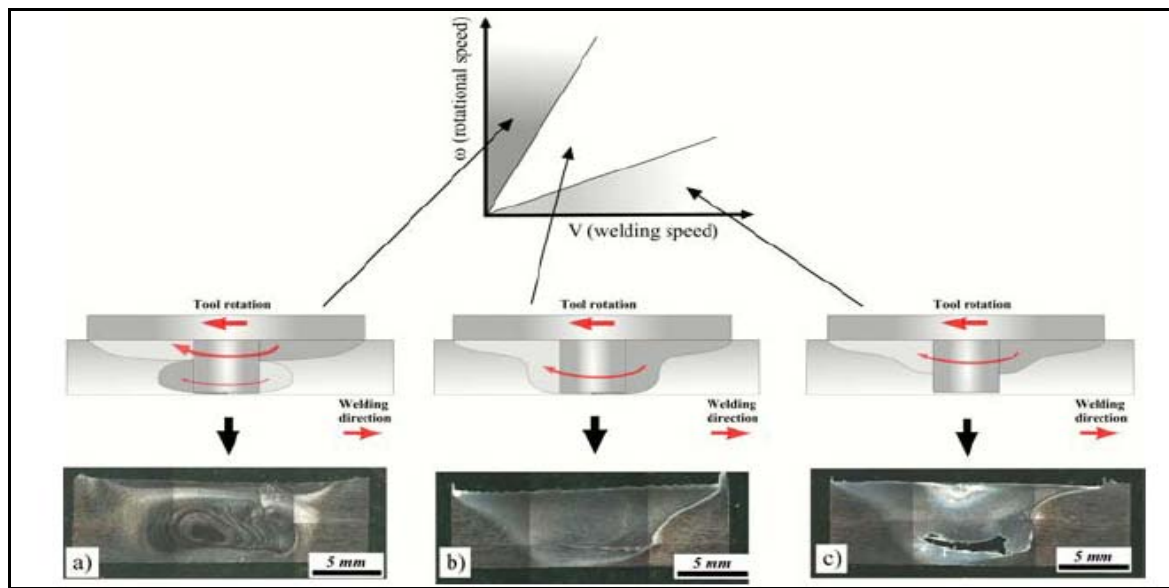
Πίνακας 6 Solidus temperature of several aluminum alloys



Σχήμα 25 Process window for the aluminum alloys listed in Πίνακας 6

Πηγή: (Dubourg et al. 2006, P.4)

Η ροή υλικού που αποτελεί το δεύτερο βασικό φαινόμενο στη διαδικασία FSW μετά τη μεταφορά θερμότητας επηρεάζεται κυρίως από το λόγο των ταχυτήτων συγκόλλησης και περιστροφής του εργαλείου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 26, ένα εύρος αποδεκτών τιμών του λόγου μπορεί να προκύψει είτε πειραματικά είτε αριθμητικά, ώστε να αποκτηθεί αποδεχτή ποιότητα συγκόλλησης υπό δεδομένες κάθε φορά συνθήκες (τύπος υλικού, πάχος υλικού, μορφή εργαλείου) (Dubourg et al. 2006, p.6).



Σχήμα 26 Weld quality as function of feed ratio n/f

Πηγή: (Dubourg et al. 2006, P.6)

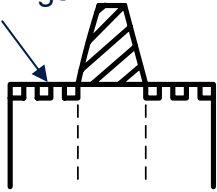
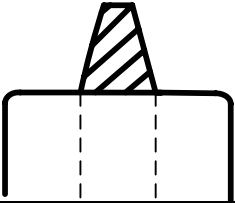
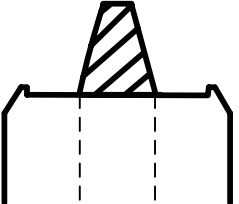
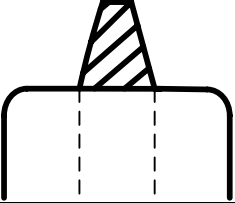
Στην πρώτη περίπτωση η υψηλή περιστροφική ταχύτητα οδηγεί στην εισαγωγή υπερβολικής θερμότητας και πιθανά σε μεγάλη μάζα υλικού προεξοχής (flash), ενώ η χαμηλότερη περιστροφική και υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης στην τρίτη περίπτωση οδηγούν σε ανεπαρκή εισαγωγή θερμότητας και δημιουργία κοιλοτήτων όπως αποκαλύπτει η μικροδομή των συγκολλημένων τμημάτων. Για την επίτευξη καλής ποιότητας ραφών, ο λόγος των ταχυτήτων πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των δύο ακραίων τιμών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όσον αφορά στην ροή υλικού, είναι σαφές ότι όταν η τιμή του λόγου είναι υψηλή, υπάρχει έλλειψη τροφοδοσίας των κατώτερων σημείων της συγκόλλησης με υλικό ιδιαίτερα αν δεν έχει προλάβει να δημιουργηθεί το ελάχιστο απαιτούμενο επιφανειακό “όριο συμπαγούς υλικού”. Επίσης στις περιπτώσεις που η τιμή του λόγου είναι χαμηλή μπορεί το υλικό να έχει αναμειχθεί υπερβολικά (overstirred situation). Αυτές οι παρατηρήσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την αξιολόγηση της ποιότητας συγκόλλησης μετά από την ολοκλήρωση των πειραμάτων.

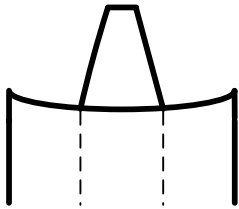
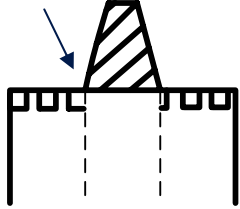
Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι οι αωτέρω οδηγίες σχετικά με την κατάλληλη εκλογή παραμέτρων δεν ακολουθήθηκαν αυστηρά στο πρώτο πειραματικό μέρος δεδομένου ότι στόχος σε αυτό ήταν η καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και όχι η παραγωγή “άριστων” συγκολλήσεων. Επιπλέον, η πλειονότητα των οδηγιών προέρχεται από προηγούμενα πειράματα σε επίπεδα φύλλα αλουμινίου και επομένως δεν θα μπορούσαν να υιοθετηθούν

στην περίπτωση μας προτού πρώτα να εξεταστούν. Τέλος, όλες οι αναφερθείσες τιμές αποτελούν γενικές οδηγίες και δεν αποκλείουν την ύπαρξη παραλλαγών.

4.1.2 Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων εργαλείων

Τα πρώτα συμπεράσματα για την εφαρμογή της μεθόδου στα στοιχεία σωλήνων με μικρή ακτίνα θα προκύψουν με χρήση των συμβατικών διαθέσιμων εργαλείων. Ο πίνακας 7 περιλαμβάνει και τα 32 εργαλεία που ήταν διαθέσιμα στο εργαστήριο του *lnb* κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Τα εργαλεία έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με το σχεδιασμό τους σε επτά ομάδες. Όλα τα εργαλεία είναι κατασκευασμένα από τον ίδιο τύπο χάλυβα (αριθμός υλικού: 1.2344, DIN 17350, $E=210 \cdot 10^3$ MPa, $R_m=1130-2060$ MPa).

Shoulder diameter [mm]	Pin diameter [mm]	Tool design
8-16 16 12	3-6 6 4	'groovings' 
11-18 13	4-8 5	
16	5	
12	6	

13	5	
11-17 15	4-5 5	<p>“spirals”</p> 

Πίνακας 7 List of all 32 customary tools

Οι διαστάσεις εργαλείων που είναι έντονα τυπωμένες στον πίνακα 7 είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα. Έχουν επιλεγθεί επτά εργαλεία από όλες τις διαθέσιμες κατηγορίες προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή του κάθε τύπου εργαλείου στη διαδικασία.

4.1.3 Εκλογή των παραμέτρων συγκόλλησης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σε όλα τα πειράματα με τα συνήθη εργαλεία έχει χρησιμοποιηθεί έλεγχος θέσης. Το βάθος βύθισης του εργαλείου ήταν σταθερό στα 0.2 mm. Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι η ταχύτητα περιστροφής n , η ταχύτητα συγκόλλησης f , η γωνία κλίσης α του εργαλείου και φυσικά ο τύπος του εργαλείου. Οι παράμετροι έχουν εκλεγεί σύμφωνα με τη θεωρία του κεφαλαίου 4.1.1 και προηγούμενα πειράματα που έχουν εκτελεσθεί με το ίδιο ή παρόμοιο υλικό. Σε αυτό το μέρος, προσπαθήσαμε να ολοκληρώσουμε τα πειράματα χρησιμοποιώντας ένα σχετικό ευρύ φάσμα παραμέτρων προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου και ο βαθμός επιρροής των παραμέτρων στην ποιότητα συγκόλλησης.

4.2 Αξιολόγηση της συγκόλλησης

Ύστερα από τη ολοκλήρωση των πειραμάτων με τα διαθέσιμα συμβατικά εργαλεία, θα ακολουθήσει η αξιολόγηση της ποιότητας συγκόλλησης. Η διαδικασία αυτή θα λάβει υπόψη κυρίως τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

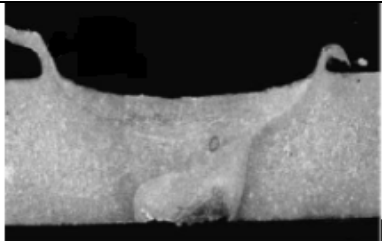
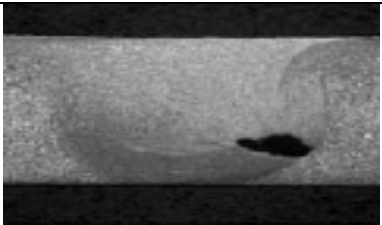
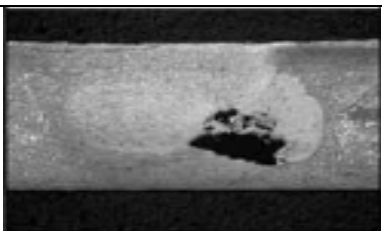
- Ανοιχτή ή κλειστή σύνδεση (open or closed joint)
- Δημιουργία προεξοχής (flash formation)
- Ομοιόμορφη επιφάνεια συγκόλλησης (uniform onion rings formation)
- Ρωγμές στη μικροδομή (cracks in the microstructure)
- Ύπαρξη πόρων (existence of pores)

Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι για να εξεταστεί η ποιότητα της συγκόλλησης. Στην εργασία του W. Bowyer (2000, P.10) αναφέρονται οι πλέον συνηθισμένες:

- οπτική εξέταση
- ραδιογραφία ή χρήσης υπερήχων (radiographic or ultrasonic)
- δοκιμή διεισδυτικών υγρών (penetrant test)
- εξέταση μακροδομής (macro-examination)
- εξέταση μικροδομής (micro examination)
- δοκιμή εφελκυσμού (transverse tensile tests)
- δοκιμή κάμψης (bend tests) και
- έλεγχος σκληρότητας κατά μήκος της συγκόλλησης (hardness profile across the weld)

Δεδομένου ότι θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο να εκτελεσθούν όλες οι προαναφερθείσες δοκιμές, η διαδικασία αξιολόγησης στην περίπτωση μας θα απλοποιηθεί ως εξής. Το πρώτο μέρος αξιολόγησης περιλαμβάνει την οπτική επιθεώρηση των ενώσεων FSW. Οι συγκολλήσεις καλής ποιότητας θα εξεταστούν περαιτέρω και οι διατομές τους θα υποβληθούν σε ανάλυση της μακροδομής τους χρησιμοποιώντας οπτικό μικροσκόπιο με ενσωματωμένο λογισμικό ανάλυσης της προσλαμβάνουσας εικόνας.

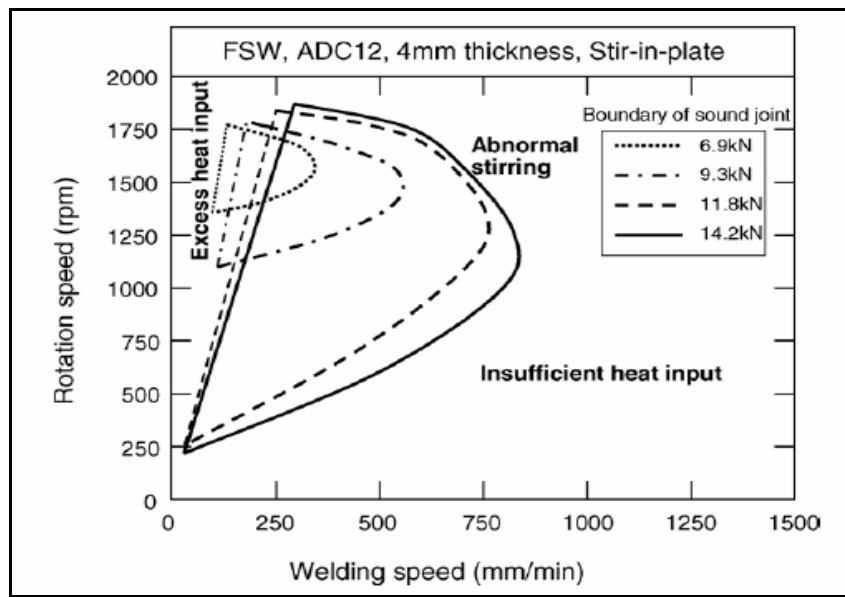
Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθούν τα τρία βασικά ελαττώματα που συναντώνται στη διαδικασία FSW. Ο πίνακας 8 περιλαμβάνει τα πλέον ουσιώδη ελαττώματα και το συσχετισμό τους με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες εκτελείται η διαδικασία.

Defect type	Origin	Cause	Example photo
Large mass of flash	Excess heat input	Higher rotational speed and lower welding speed	
Cavity or groove like defects	Insufficient heat input	Lower rotational speed and higher welding speed	
Cavity	Abnormal stirring	Higher rotational speed and higher welding speed	

Πίνακας 8 Major defect types and their origins

Πηγή: Kim et al. 2005, P.3

Το Σχήμα 27 απεικονίζει έναν σαφή συσχετισμό μεταξύ των παραμέτρων διαδικασίας και των σημαντικότερων ατελειών στη διαδικασία FSW. Το Σχήμα προέρχεται από τις εφαρμογές FSW στο κράμα (aluminum die casting alloy) LM 2, AlSi10Cu (MPA Rm= 150-300, R_{po, 2}= 90-130 MPa, αντοχή κόπωσης 71 MPa, επιμήκυνση 1-3%) (Brock Metal Company Limited 2008). Αν και οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του διαφέρουν πολύ από εκείνες του υλικού βάσης, το σχήμα δίνει σαφή εικόνα της περιοχής των παραμέτρων, όπου αναμένονται να προκύψουν τα σοβαρά προβλήματα.



Σχήμα 27 Connection of parameter values and effects development

Πηγή: Kim et al. 2005, P.2

4.3 Προετοιμασία μηχανολογικού εξοπλισμού και τεμαχίου

Μετά την επιλογή των εργαλείων και των παραμέτρων, είμαστε έτοιμη να προχωρήσουμε στην πειραματική φάση. Για να εξασφαλίσουμε καλή ποιότητα συγκόλλησης, υπάρχουν ορισμένα βασικά βήματα που πρέπει να προηγηθούν της εκτέλεσης των πειραμάτων. Οι εργασίες που είναι απαραίτητες για την προετοιμασία των πειραμάτων είναι οι ακόλουθες:

1. κοπή των κυλινδρικών στοιχείων με μήκος 30 cm από το υλικό βάσης σε απλό ηλεκτρικό πριόνι
2. καθαρισμός των στοιχείων με κάποιο υλικό, ώστε να απομακρυνθούν οι ακαθαρσίες
3. χρήση λαδιού μεταξύ των επιφανειών των τεμαχίων και τα συσκευής συγκράτησής τους, με σκοπό να διευκολυνθεί η απομάκρυνσή τους μετά το πέρας της διαδικασίας
4. τοποθέτηση των κυλινδρικών στοιχείων στη συσκευή συγκράτησης
5. ακριβής μέτρηση του μήκους του pin των εργαλείων με σκοπό να μεταφερθούν όλες οι παράμετροι στο λογισμικό της μηχανής CNC.

6. φόρτωση των εργαλείων στην εργαλειομηχανή
7. εκτέλεση πειράματος
8. απομάκρυνση των συγκολλημένων στοιχείων από τη συσκευή συγκράτησης

Όλα τα προαναφερθέντα βήματα επαναλαμβάνονται πριν από κάθε νέο πείραμα εκτός από το 5ο βήμα που εκτελείται μόνο κάθε φορά που αλλάζει το εργαλείο.

4.4 Συσκευή συγκράτησης τεμαχίων

4.4.1 Απαιτήσεις από τη συσκευή συγκράτησης τεμαχίων

Η ανάγκη για μια συσκευή συγκράτησης των τεμαχίων ανήκει στις αρχές λειτουργίας της μεθόδου FSW. Η ύπαρξη μιας τέτοιας κατασκευής είναι απαραίτητη προκειμένου να μένουν σε επαφή καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας τα τεμάχια που θα ενωθούν. Η κατασκευή μίας μπάρας συγκράτησης των τεμαχίων, η οποία εμποδίζει την καταστροφή των συγκολλούμενων τεμαχίων λόγω υψηλών δυνάμεων, είναι αυτή που συναντάμε όταν πρόκειται για εφαρμογή της μεθόδου σε ευθύγραμμες γραμμές συγκόλλησης. όμως στην περίπτωση καμπύλων τμημάτων, γίνεται πιο πολύπλοκη καθώς η κατασκευή πρέπει εκτός των άλλων να διασφαλίζει και την ομοκεντρικότητα των προς συγκόλληση κυλινδρικών τεμαχίων. Η κατασκευή της συσκευής συγκράτησης, η οποία πληρεί όλα τα παραπάνω αναφερθέντα χαρακτηριστικά, εκτελέσθηκε στα πλαίσια εξαμηνιαίας εργασίας στο εργαστήριο του *iwb*.

4.4.2 Κατασκευή της συσκευής συγκράτησης τεμαχίων

Η ακόλουθη εικόνα απεικονίζει τη συσκευή συγκράτησης τεμαχίων που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση των κυλινδρικών τεμαχίων με εξωτερική διάμετρο 60mm. Το κάτω μέρος της συσκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για συγκόλληση τεμαχίων διαμέτρου 80mm.



Σχήμα 28 Full clamping construction with the jaws and its base plates for FSW tubes with outer diameter 60 and 80 mm

Το πρόβλημα που προέκυψε με την ανωτέρω κατασκευή ήταν ότι η παραμόρφωση στην πίσω πλευρά του των τεμαχίων, που ήταν σε επαφή με τη συσκευή στήριξης, ήταν τέτοια που κατέστησε την αφαίρεση των συγκολλημένων τεμαχίων ανέφικτη. Αυτό το πρόβλημα μας ανάγκασε να χρησιμοποιήσουμε φρέζα κόβοντας κάθετα προς την κατεύθυνση συγκόλλησης. Επιπλέον, η συσκευή δεν ήταν ομόκεντρη με τη βάση της και για το λόγο αυτό το βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο υλικό καθώς επίσης και το ασκούμενο φορτίο μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια της μεθόδου, όπου το εργαλείο κινούνταν περιφερειακά των τεμαχίων.

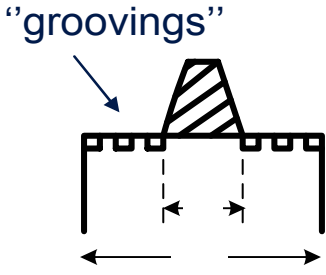
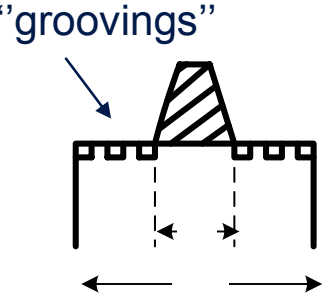
Αυτά τα δύο βασικά προβλήματα μας ανάγκασαν για να κατασκευάσουμε εκ νέου τη συσκευή στερέωσης, αλλά λόγω των χρονικών περιορισμών τα πρώτα πειράματα με τα συνήθη εργαλεία εκτελέστηκαν στην πρώτη έκκεντρη συσκευή. Το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε φρέζα προκειμένου να αφαιρεθούν τα στοιχεία, δεν επηρεάζει την ποιότητα στη ζώνης συγκόλλησης ούτε την

αξιολόγηση της συγκόλλησης. Από την άλλη πλευρά όμως η εκκεντρότητα της συσκευής έχει επιπτώσεις στα αποτελέσματα και επομένως στη φάση αξιολόγησης πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι υπήρξε μεταβολή της βύθισης του εργαλείου στο υλικό αλλά και του ασκούμενου από αυτό φορτίου σε όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης.

5 1^ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

5.1 Ολοκλήρωση των πειραμάτων

Στο πρώτο πειραματικό μέρος η διαδικασία εξετάστηκε αποκλειστικά σε κυλινδρικά τεμάχια με εξωτερική διάμετρο $D_{out}=60$ mm. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να εφαρμοσθούν και στα υπόλοιπα κυλινδρικά τεμάχια, καθώς η διαδικασία είναι παρόμοια. Σε αυτό το μέρος εκτελέσθηκαν 17 πειράματα. Ο πίνακας 9 περιλαμβάνει όλα τα πειράματα που εκτελέσθηκαν. Με έντονα γράμματα εμφανίζονται εκείνα τα πειράματα από τα οποία προέκυψε καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης.

# experiment	rotational speed [rpm]	welding speed [mm/min]	tilting angle [°]	Tool design
1	1500	300	0	
2	1000	200	0	
3	1000	200	6,5	
4	1000	100	20	
5	750	200	6,5	
6	750	200	10	
7	750	200	5	
8	750	200	6	

1ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

9	1000	200	5	
10	1000	200	5	
11	1500	300	3	
12	750	150	5	
13	1000	200	5	
14	1000	200	5	
15	1000	200	5	
16	1000	200	5	
17	750	200	3	

Πίνακας 9 Experiments accomplished with the customary tools

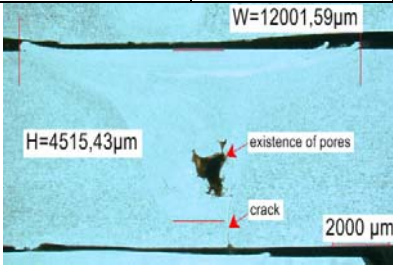
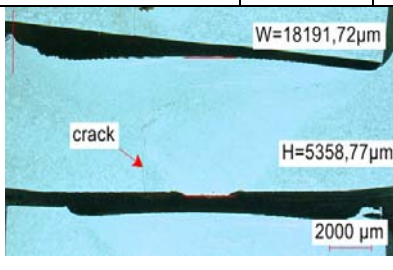
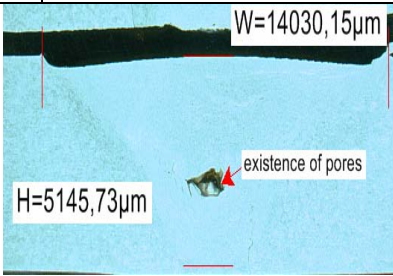
Μετά από οπτική παρατήρηση των συγκολλημένων στοιχείων τα δείγματα που προέκυψαν διαιρέθηκαν σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με την ποιότητα συγκόλλησης τους (πολύ καλή, καλή, μέση, κακή). Από την παρατήρηση, διαπιστώθηκε ότι ο σχηματισμός ενώσεων χωρίς ελαττώματα είναι μια των παραμέτρων διαδικασίας και εργαλείου. Από τα δείγματα που εμφάνισαν την καλύτερη ποιότητα, προέκυψαν διατομές που στάλθηκαν για περαιτέρω μεταλλογραφική εξέταση της ζώνης συγκόλλησής τους.

Οι συγκολλήσεις που προέκυψαν αναλύονται περαιτέρω με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου για να αξιολογηθεί η ποιότητά τους. Πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι καμία ειδική διαδικασία δεν πραγματοποιήθηκε ούτε προ συγκόλλησης ούτε προ διεξαγωγής των τεστ αξιολόγησης, εκτός από χρήση απλών γυαλόχαρτων για την αποβολή των ακαθαρσιών από τα τεμάχια. Ο πίνακας 10 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα ύστερα από οπτική εξέταση και των 17 συνδέσεων που προέκυψαν και ο πίνακας 11 απεικονίζει τη μακροσκοπική δομή των επιλεγμένων διατομών. Με τη βοήθεια λογισμικού, η μηχανή μπορούσε να μας δίνει τις δυνάμεις που εφαρμόζονταν από το εργαλείο στο τεμάχιο και στις τρεις διεύθυνσης υπολογίζοντάς αυτές μέσω των αναπτυσσόμενων ρευμάτων. Η δύναμη κατά μήκος του άξονα του εργαλείου συμβολίζεται ως F_z , κατά μήκος της διεύθυνσης συγκόλλησης ως F_x και η κάθετη σε αυτή δύναμη ως F_y . Οι τιμές των δυνάμεων μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργία της μεθόδου. Ο ακόλουθος πίνακας περιλαμβάνει μόνο τη δύναμη F_z (μέση τιμή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και μέγιστη για τη χρονική στιγμή εισαγωγής του εργαλείου στο τεμάχιο) καθώς είναι η πλέον σημαντική για τη μέθοδο..

RESULTS				
Experiment	F_{zmax} [kN]	F_z [kN]	Visual quality	Section cut
1	≈5.2	<2	Average	No
2	≈7.5	<2	Average	No
3	≈5.5	≈2	Good	Yes
4	≈3.2	<2	Bad	No
5	≈7.6	>2	Good	Yes
6	≈6.2	≈2	Good	Yes
7	No data available		Good	No
8	≈4.5	≈2	Average	No
9	≈4.0	>2	Average	No
10	≈7.0	>2	Good	Yes
11	≈5.6	≈2	Good	Yes
12	≈8.0	≈3	Bad	No
13	≈4.7	<2	Bad	No
14	≈5.6	<2	Bad	No
15	≈7.7	>2	Bad	No
16	≈6.7	≈3	Average	No
17	No data available		Average	No

Πίνακας 10 Evaluation of the experiments

1ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

Experiment	Rotational speed	Welding speed	Macrostructure		Size of weld	Name of the defect and location	Probable reasons *
			RS	AS	W / H		
5	750	200			12.0/4.5	Big cavity in the weld nugget	Insufficient heat input due to low r
3	1000	200	12.1/5.1			Crack on the RS of the TMAZ	Flash generation due to high
6	750	200			12.0/4.9	Big cavity in the weld nugget	Insufficient heat input due to low
10	750	150				Crack on the RS of the TMAZ	See note
11	1000	200			14.0/5.1	Cavity in the weld nugget	Abnormal stirring due to likely short pin length

Πίνακας 11 Macrostructure of joints welded in the 1st experimental part

- ✚ Σημείωση: Όλες οι διατομές αποκάλυψαν μια ρωγμή στη ζώνη συγκόλλησης, γεγονός το οποίο μπορεί να αποδοθεί σε πολλούς λόγους οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:
- ✚
 - η χρήση ελαίου του μεταξύ της συσκευής συγκράτησης και της επιφάνειας των τεμαχίων
 - λεπτό φιλμ οξέων στην επιφάνεια του υλικού
 - μικρό μήκος pin
 - μεγάλο κενό μεταξύ των δύο προς συγκόλληση στοιχείων σύμφωνα με κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης

Καμία από τις μακροδομές που εμφανίζονται στον πίνακα 11 δεν είναι απαλλαγμένα από ελαττώματα. Μπορούμε όμως να οδηγηθούμε σε ένα σημαντικό συμπέρασμα για το μέγεθος και την ποιότητα της συγκόλλησης. Στα πειράματα 5 και 6, όπου το ύψος της ζώνης συγκόλλησης είναι σχετικά χαμηλό, το εργαλείο δεν έχει εισχωρήσει πλήρως στο υλικό και για αυτό το κάτω μέρος δεν έχει συγκολληθεί κατάλληλα. Για το λόγο αυτό προέκυψαν πόροι στο κάτω μέρος της διατομής και η ποιότητα συγκόλλησης ήταν κακή.

Από την άλλη, στα πειράματα 3 και 10 όπου η ζώνη συγκόλλησης αναπτύχθηκε πλήρως, η ποιότητα ήταν πολύ καλύτερη. Σε αυτά τα δύο πειράματα μπορούμε να δούμε τις ρωγμές στη ζώνη αλλά δεν μπορούμε να τα αποδώσουμε με βεβαιότητα σε κακή επιλογή παραμέτρων, δεδομένου ότι μπορούν επίσης να αποδοθούν στη χρήση του ελαίου. Τελικά, τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται στο 10^ο πείραμα και αυτό οφείλεται επίσης στις διαστάσεις των εργαλείων. Στα υπόλοιπα πειράματα τα εργαλεία ήταν σχετικά μικρά (διάμετρος “shoulder” 12-13mm.) για συγκόλληση υλικού πάχους 5mm. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται στο 10^ο πείραμα (S16, P5) φαίνεται να έχει τις βέλτιστες διαστάσεις που απαιτούνται στην εφαρμογή μας. Αυτή η υπόθεση θα εξεταστεί περαιτέρω στο δεύτερο πειραματικό μέρος.

5.2 Αξιολόγηση των εργαλείων

Προκειμένου να διαμορφωθούν τα πρώτα συμπεράσματα για τα χρησιμοποιηθέντα εργαλεία, πρέπει να λάβουμε υπόψη την εκκεντρότητα της στερέωσης. Εντούτοις, μπορούμε να διαμορφώσουμε το συμπέρασμα ότι οι

τύποι των ήδη υπαρχόντων εργαλείων, οι οποίοι είναι πρωτίστως κατασκευασμένοι για επίπεδες επιφάνειες συγκόλλησης, θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις καμπυλόγραμμων τεμαχίων. Επιπλέον, ο λόγος διαμέτρου "shoulder" (S) προς διάμετρο "pin" (P) πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2.5 και 3.2 όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Οι συγκολλήσεις που παρήχθησαν από εργαλεία με επίπεδη και σπειροειδή επιφάνεια shoulder εμφάνισαν σχετικά καλή ποιότητα αν και δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι εάν τα ελαττώματα στη μικροδομή οφείλονται σε κακή εκλογή παραμέτρων ή στο πρόβλημα εκκεντρότητας. Επομένως, τα πειράματα του πρώτου πειραματικού μέρους, στα οποία προέκυψε σχετικά καλή ποιότητα συγκόλλησης, πρέπει να επαναληφθούν και με τη νέα ομόκεντρη συσκευή συγκράτησης. Επιπλέον, τα κοίλα και σπειροειδή εργαλεία πρέπει να εξεταστούν ξανά δεδομένου ότι το πρώτο πειραματικό μέρος δεν μπορεί να οδηγήσει σε κατάλληλη αξιολόγηση τους (βλ. σημειώσεις της παραγράφου 5.1).

5.3 Αξιολόγηση των παραμέτρων

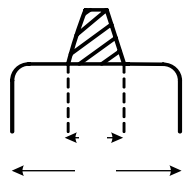


Μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι προκειμένου να επιτευχθεί μια ικανοποιητική ποιότητα συγκόλλησης, η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου πρέπει να είναι περίπου 1000 rpm και η ταχύτητα συγκόλλησης γύρω στα 200 mm/min. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, η γωνία κλίσης του εργαλείου πρέπει να είναι $\alpha \neq 0^\circ$ ακόμα κι αν χρησιμοποιούμε σπειροειδές εργαλείο, το οποίο θεωρητικά είναι σε θέση να επιτύχει καλή ποιότητα επιφανείας όταν εφαρμόζεται στις επίπεδες επιφάνειες έχοντας μηδενική γωνία κλίσης. Στην περίπτωση των καμπύλων επιφανειών δεν ισχύει το ίδιο, καθώς σε όλα τα πειράματα που προέκυψε σχετικά καλή ποιότητα συγκόλλησης, η γωνία κλίσης υπήρχε και ήταν από 5° έως 10° . Σχετικά με το αξονικά ασκούμενο φορτίο του εργαλείου, μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι προκειμένου να παραχθεί μια συγκόλληση καλής ποιότητας, η μέση τιμή του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πρέπει να είναι περίπου στα 2.5kN και σε καμία περίπτωση χαμηλότερη από το 2kN. Μετά από επεξεργασία των διαγραμμάτων των δυνάμεων που προέκυψαν από τα πειράματα 3, 5, 6, 10 και 11, τα οποία είχαν παρουσιάσει τα καλύτερα αποτελέσματα, μπορούμε να διαμορφώσουμε το συμπέρασμα ότι η μέση τιμή του αξονικού φορτίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2kN και 3kN, καθώς σε

διαφορετική περίπτωση τα φορτία που αναπτύσσονται είναι είτε πάρα πολύ χαμηλά είτε πάρα πολύ υψηλά και αυτό οδηγεί σε υπερβολική και ελλιπή πρόσδοση θερμότητας και αντίστοιχα σε μη ομαλή διαδικασία ανάδευσης και συνεπώς κακή ποιότητα συγκόλλησης και στις δύο περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό να αξιολογηθούν τα διαγράμματα φορτίων μετά από την ολοκλήρωση κάθε πειράματος καθώς όπως μπορούν να οδηγήσουν σε πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της διαδικασίας.

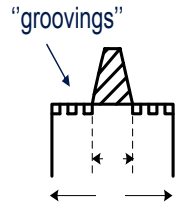

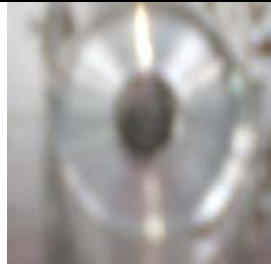
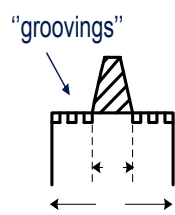


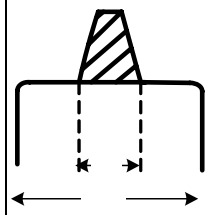


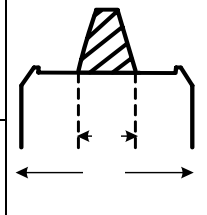


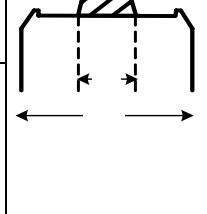


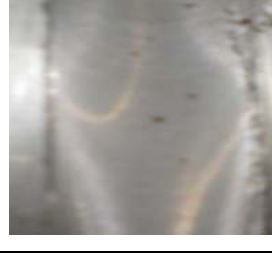

6 2^ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

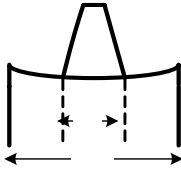


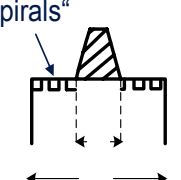


6.1 Ολοκλήρωση των πειραμάτων

Ο κύριος στόχος του δεύτερου πειραματικού μέρους είναι να εξαχθεί συμπέρασμα για τις βέλτιστες τιμές παραμέτρων και τους πλέον κατάλληλους τύπους και διαστάσεις των διαθέσιμων εργαλείων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, διεξήχθησαν έντεκα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι διαφορετικοί τύποι διαθέσιμων εργαλείων. Όλα τα πειράματα εκτελέσθηκαν στην ομόκεντρη βελτιωμένη συσκευή στερέωσης των τεμαχίων. Το πρόβλημα της αφαίρεσης των συγκολλημένων τεμαχίων που κατέστησε τη χρήση της φρέζας στο πρώτο πειραματικό μέρος αναγκαία λύθηκε στο δεύτερο μέρος με την χρήση ενός χαλύβδινου δακτυλίου τοποθετήθηκε μεταξύ των σωλήνων και της στερέωσης. Ο Πίνακας 12 συνοψίζει τα πειράματα που εκτελέσθηκαν. Όλα τα πειράματα που περιέχονται σε αυτόν εκτελέσθηκαν με γωνία κλίσης 5^ο στο εργαλείο. Οι δύο τελευταίες στήλες στα δεξιά του πίνακα απεικονίζουν την επιφάνεια συγκόλλησης και την “exit hole” που παράγονται μετά από την ολοκλήρωση κάθε πειράματος.

#experiment	Rotational speed [rpm]	Welding speed [mm/min]	Tool	Welded surface A / R	Exit hole
1	1000	200			

2ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

2	1000	200			
3	1000	120			
4	1000	200			
5	1000	200			
6	750	150			
7	750	150			

8	1000	200			
9	1000	200			

Πίνακας 12 Experiments accomplished with the customary tools on the concentric clamping device


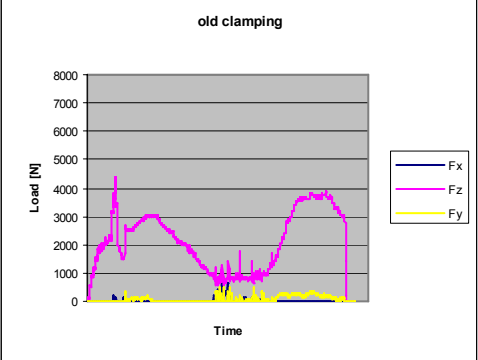
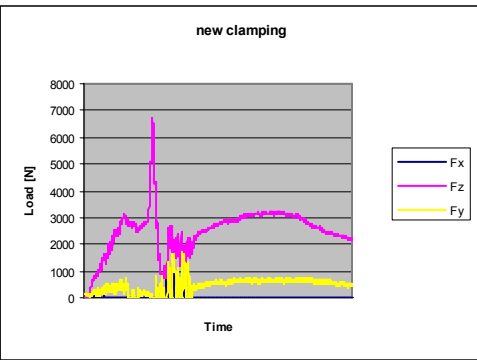
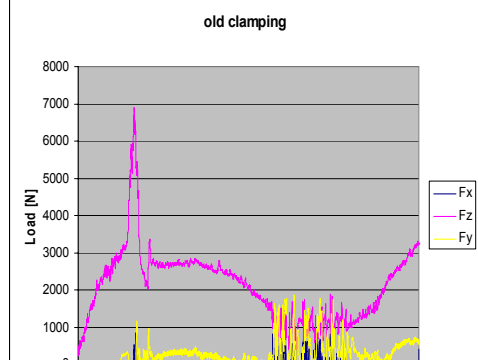
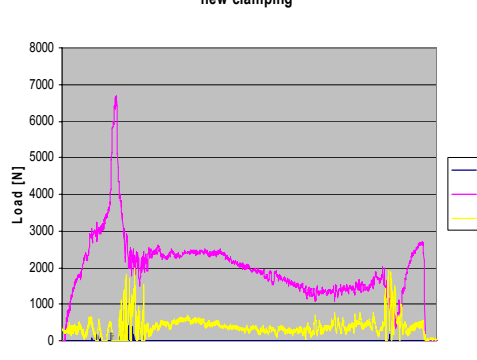
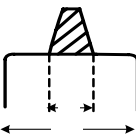
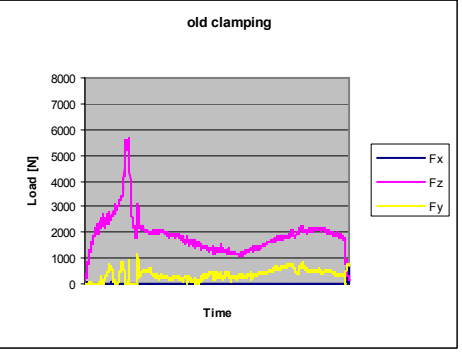
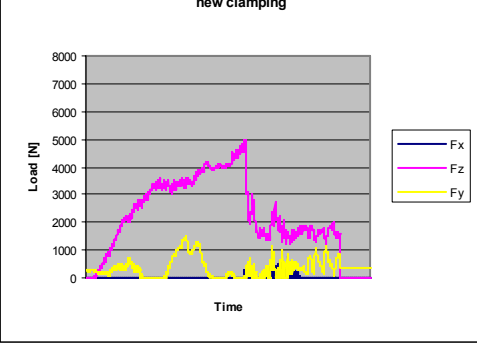
6.2 Τελική αξιολόγηση των παραμέτρων της διαδικασίας και των διαθέσιμων εργαλείων

Ο πίνακας 12 απεικονίζει την “exit hole” που παράγεται μετά την έξοδο του “rin” σε κάθε πείραμα. Η οπτική εξέταση της οπής παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της συγκόλλησης. Με μια καλή συγκόλληση ο παραμορφωμένος κύκλος γύρω από την οπή είναι πλήρης. Όταν αυτός ο κύκλος είναι διαμορφωμένος σε ποσοστό λιγότερο του 75%, τότε η ποιότητα συγκόλλησης θα είναι χαμηλή (W. Bowyer 2000, p.10). Είναι σαφές από τον παραπάνω πίνακα ότι σε όλες τις περιπτώσεις η “exit hole” είναι πλήρης κύκλος. Επιπλέον, ο ομαλός σχηματισμός των “onion rings”, η χαμηλή παραγωγή προεξοχής- “flash” αποδεικνύουν ότι η ποιότητα συγκόλλησης στην πλειονότητα των πειραμάτων είναι σχετικά υψηλή.

Είναι επίσης σαφές από τις φωτογραφίες των συγκολλημένων διατομών ότι υπάρχει βελτίωση της ποιότητας συγκόλλησης συγκριτικά με το 1^ο πειραματικό μέρος. Τα θετικά αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν πέρα από την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων και στη νέα ομόκεντρη συσκευή στερέωσης. Ο πίνακας 13 παρουσιάζει τα διαγράμματα φορτίων από τρία πειράματα που εκτελέστηκαν κάτω από τις ίδιες παραμέτρους διαδικασίας, με τα ίδια εργαλεία στο πρώτο και στο δεύτερο πειραματικό μέρος. Η επίδραση

2ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

της μη-ομόκεντρης συσκευής στερέωσης είναι σαφής και στις δύο περιπτώσεις.

Tool design	Rotational speed	Welding speed	1 st experimental part	2 nd experimental part
	1000	200		
	750	150		
	1000	200		

Πίνακας 13 Comparison of thrust load diagrams of the 1st and 2nd experimental part (in all cases the tilting angle is 5°)


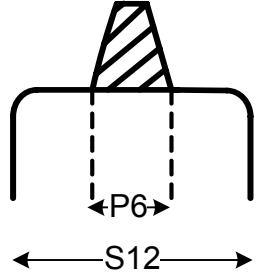

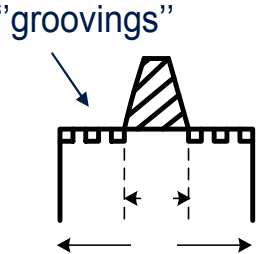
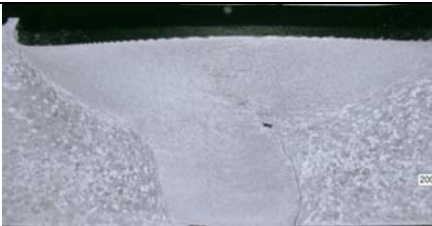
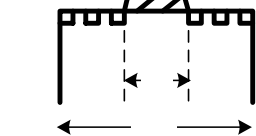
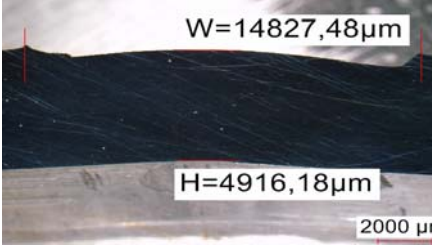
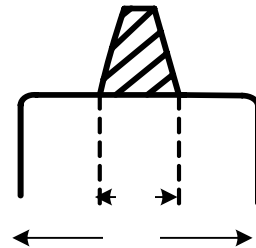
Στα πρώτα δύο διαγράμματα μπορούμε σαφώς να εντοπίσουμε την επιρροή της μη-ομόκεντρης στερέωσης στην τιμή των αναπτυσσόμενων φορτίων. Μετά από τη βύθιση του εργαλείου στο υλικό, το φορτίο μειούται και στα δύο διαγράμματα. Η κύρια διαφορά ωστόσο είναι η υπερβολική πτώση της τιμής στο πρώτο πειραματικό μέρος. Ενώ το φορτίο στο δεύτερο μέρος είναι σχετικά σταθερό με μια μικρή τάση να αυξηθεί, το φορτίο στο δεύτερο μέρος πέφτει κάτω από τα 2kN στη μέση της διαδικασίας, ενώ συγχρόνως οι δυνάμεις στην κατεύθυνση συγκόλλησης (πράσινη γραμμή) αυξάνονται και φθάνουν σχεδόν τη δύναμη που εφαρμόζεται στην z-κατεύθυνση. Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί στο να επικρατεί το φαινόμενο συμπίεσης παρά το επιθυμητό φαινόμενο της ανάδευσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και έτσι προκύπτει μια κακή ποιότητα συγκόλλησης. Η πτώση του αξονικού φορτίου είναι ακόμα πιο έντονη στα επόμενα δύο πειράματα όπου η συνιστώσα F_y υπερβαίνει το αξονικό φορτίο που εφαρμόζεται από το εργαλείο ενώ επίσης και η συνιστώσα του φορτίου στη x-κατεύθυνση είναι επίσης σημαντικά υψηλή. Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι δυνάμεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας είναι πιο σταθερές στο δεύτερο πειραματικό μέρος και το ίδιο ισχύει και για την παραγόμενη ποιότητα συγκόλλησης. Δεδομένου ότι το ασκούμενο φορτίο παραμένει σχετικά σταθερό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, το βάθος βύθισης του εργαλείου παραμένει επίσης σταθερό και το αποτέλεσμα είναι μια σχετικά «ομαλή» επιφάνεια συγκόλλησης χωρίς μεγάλες αποκλίσεις από περιοχή σε περιοχή. Στο πρώτο πειραματικό μέρος, δεδομένου ότι το φορτίο που εφαρμόστηκε από το εργαλείο δεν παρέμενε σταθερό λόγω της εκκεντρότητας της συσκευής στερέωσης, το εργαλείο βυθιζόταν περισσότερο σε μερικές θέσεις των τεμαχίων και το φαινόμενο αυτό οδήγησε σε μεγάλες αποκλίσεις στην ποιότητα συγκόλλησης.

Επιπλέον, από τα διαγράμματα των φορτίων του δευτέρου πειραματικού μέρους, μπορεί να διαπιστωθεί συσχέτιση μεταξύ ποιότητας συγκόλλησης και αξονικού φορτίου (βλ. κεφάλαιο 5.3). Σε όλα τα πειράματα, στα οποία προέκυψε καλή ποιότητα, η μέση τιμή του φορτίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κυμαινόταν μεταξύ 2 kN και 3 kN.

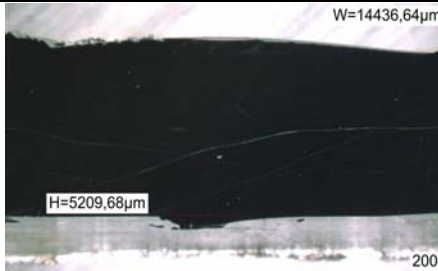
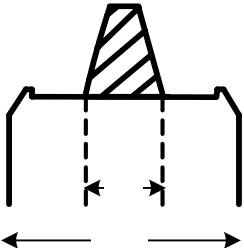
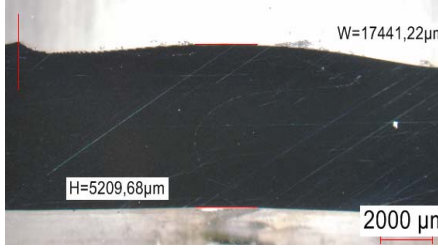
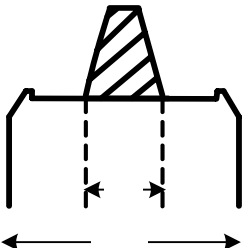
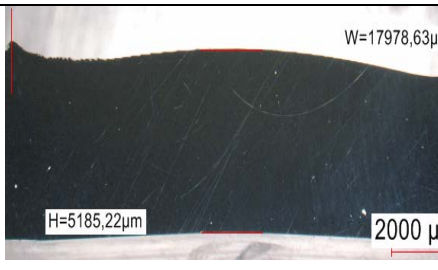
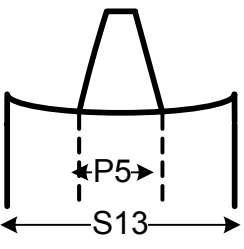

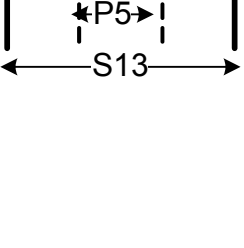
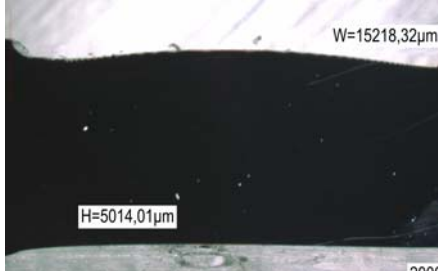
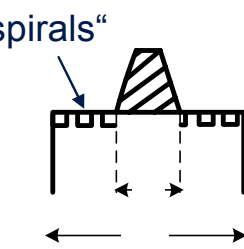
Αν και από τα ήδη διεξαχθέντα βήματα μπορούν να διατυπωθούν συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο παραγωγής συγκολλήσεων καλής ποιότητας, οι κατεργασμένες τομές πρέπει να εξετασθούν περαιτέρω με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και να διεξαχθεί μακροσκοπική ανάλυση, ώστε να επιβεβαιωθούν οι αρχικοί ισχυρισμοί. Στον πίνακα 14

2ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

παρουσιάζεται η μακροδομή των διατομών των συγκολλημένων τεμαχίων του 2^{ου} πειραματικού μέρους.

Rotational speed	Welding speed	Macrostructure		Name of the defect and location	Tool
		RS	AS		
rpm	mm/min	Size of weld			
1000	200			Crack on the AS	
1000	120			Cracks in the middle & in the AS	
1000	200			Crack & pore in the AS	
1000	200			Defect-free	

2ο πειραματικό μέρος-χρήση των διαθέσιμων εργαλείων

1000	200		Defect-free	
750	150		Defect-free	
750	150		Defect-free	
1000	200		Defect-free	
1000	200		Defect-free	

Πίνακας 14 Macrostructure of joints welded in the 2nd experimental part

Οι μακροδομή των επιλεγμένων συγκολλημένων διατομών αποκαλύπτουν μια πολύ καλή ποιότητα και επιβεβαιώνουν τις υποθέσεις που είχαμε κάνει ήδη μετά από την οπτική εξέταση των συγκολλημένων στοιχείων. Μπορούμε τώρα να διαμορφώσουμε το συμπέρασμα ότι οι «βέλτιστες» παράμετροι για FSW συγκόλληση κυλινδρικών τεμαχίων EN AW-6060T6 με εξωτερική διάμετρο 60mm. είναι:

- ταχύτητα περιστροφής 1000rpm
- γραμμική ταχύτητα συγκόλλησης 200mm/min
- κλίση εργαλείου 5°
- βύθισμα εργαλείου 0,2mm.

Οι τιμές που αναφέρονται παραπάνω αποτελούν ενδεικτικές τιμές και δεν υποδεικνύουν ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί καλή ποιότητα συγκόλλησης αποκλίνοντας από αυτές. Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές προέκυψαν από πειράματα με διαφορετικούς τύπους εργαλείων, χαρακτηριστικό το οποίο υποστηρίζει την ισχύ τους. Οι "βέλτιστες" πειραματικές τιμές έρχονται επίσης σε συμφωνία με τις θεωρητικά υπολογισμένες στην εργασία του V.Balasubramanian (2007, p.3-5). Σύμφωνα με αυτή, η σχέση μεταξύ της αντοχής (base metal yield strength) του βασικού υλικού και της περιστροφικής ταχύτητας (rotational speed) είναι:

$$\text{Rotational speed (n)} = 204 \cdot (\text{Yield strength})^{0.31}$$

Σχήμα 29 Correlation between rotational speed and yield strength of the base metal

Η θεωρητικά βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής είναι 964 rpm, τιμή η οποία βρίσκεται αρκετά κοντά στην πειραματική των 1000 rpm, Σύμφωνα με την ίδια εργασία, η γραμμική ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed) μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$\text{Welding speed (f)} = 19363 \cdot (\text{Yield strength})^{-1.02}$$

Σχήμα 30 Correlation between welding speed and yield strength of the base metal

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η θεωρητική βέλτιστη τιμή της ταχύτητας συγκόλλησης είναι 117 mm/min, τιμή η οποία είναι αρκετά

χαμηλότερη από την πειραματικά υπολογισμένη στο δεύτερο πειραματικό μέρος. Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη γεωμετρία των εργαλείων. Η διάμετρος των "shoulder" και "pin" σε πολλά από τα διαθέσιμα εργαλεία ήταν αρκετά χαμηλή (δείτε κεφάλαιο 4.1) και για αυτό το λόγο τα πειράματα εκτελέσθηκαν σε υψηλότερες ταχύτητες για να αντισταθμίσουν τα μικρά αξονικά φορτία που προέρχονται από μικρής διαμέτρου εργαλεία.

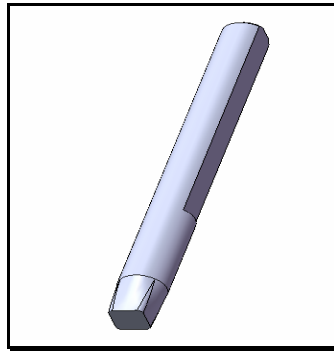
Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και το φαινόμενο της "διόγκωσης" - "augmentation" που παρατηρείται στις περισσότερες συγκολλημένες διατομές που απεικονίζονται στον πίνακα 14. Το ελάττωμα αυτό θα γίνει προσπάθεια να καλυφθεί από το σχεδιασμό νέων πιο κατάλληλων εργαλείων στο κεφάλαιο 7.

7 Κατασκευή νέων εργαλείων

Μετά από την ολοκλήρωση των πειραμάτων με όλα τα διαθέσιμα εργαλεία, είναι σαφές ότι τα ήδη υπάρχοντα εργαλεία μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς και σε τεμάχια κυλινδρικής γεωμετρίας, όπως αυτά που συγκολλήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης εργασίας. Εντούτοις, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, αποτελεί στόχο της εργασίας η ανάπτυξη και κατασκευή νέων εργαλείων, τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη βελτίωση της μεθόδου και στην ανάπτυξη ακόμα καλύτερης ποιότητας συγκόλλησης. Υπάρχουν τρεις προτάσεις για κατασκευή καινούργιων εργαλείων. Οι δύο προτάσεις αναφέρονται στην ανάπτυξη νέου τύπου "pin" και η τρίτη πρόταση αναφέρεται στην κατασκευή ενός νέου τύπου "shoulder". Η διάμετρος "shoulder" τέθηκε στα 15mm. και η διάμετρος "pin" στα 5 mm. σε όλες τις περιπτώσεις. Έγινε σαφές και από τα δύο πειραματικά μέρη ότι αυτές οι διαστάσεις είναι κατάλληλες για την παραγωγή καλής ποιότητας.

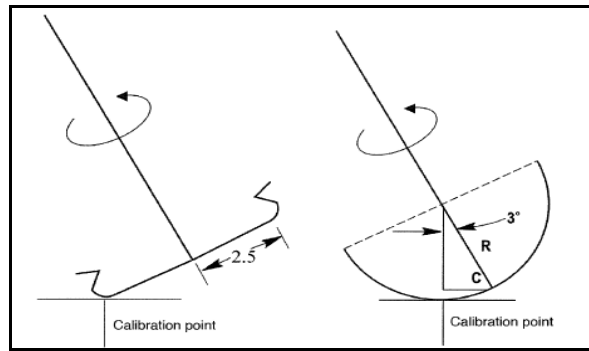
7.1 Σχεδιασμός νέων "pins"

Η πρώτη πρόταση αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός "pin" τετραγωνικού προφίλ. Σύμφωνα με έρευνα του Balasubramanian (2008, P.163-175), αυτό το προφίλ παράγει συγκολλήσεις με μηχανική και μεταλλουργική άρτια συμπεριφορά. Αποτελεί στόχο της εργασίας να ερευνηθεί εάν αυτό το συμπέρασμα και σε περίπτωση τεμαχίων κυκλικής γεωμετρίας. Το σχήμα 31 απεικονίζει ένα τρισδιάστατο-σχέδιο του "pin" τετραγωνικού προφίλ. Η διάμετρος "pin" είναι 5mm. και το μήκος της πλευράς του εγγραμμένου τετραγώνου είναι 3.54mm. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι το γεγονός ότι λόγω της απλότητάς του έχει πολύ μικρό κόστος κατασκευής.



Σχήμα 31 Square profiled pin, Ø5 mm

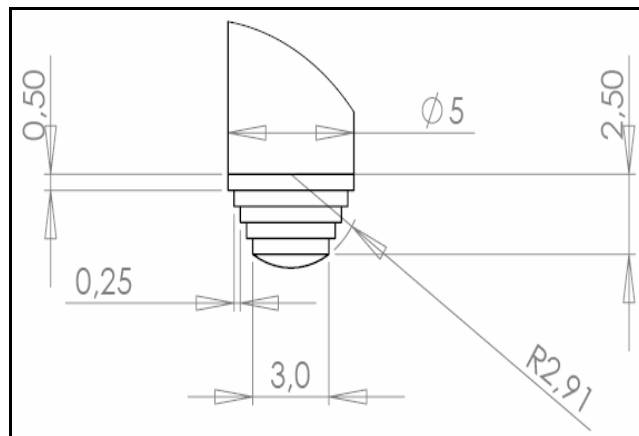
Η δεύτερη πρόταση αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός βηματικά σπειροειδούς κωνικού "stepped spiral cone pin" με το κυκλική απόληξη. Σύμφωνα με τους Mishra et al. (2007, P.15-16) ένα στρογγυλό θολωτό άκρο pin μειώνει τη φθορά των εργαλείων κατά τη βύθιση και βελτιώνει την ποιότητα στη ρίζα της συγκόλλησης κάτω από το κατώτατο σημείο του "pin". Η βέλτιστη ακτίνα θόλου θεωρείται το 75% της τιμής της διαμέτρου του "pin". Ο προτεινόμενος τύπος "pin" έχει αντίστοιχη ακτίνα θόλου-"round bottom" 2.9mm., η οποία είναι σχεδόν το 60% της διαμέτρου "pin". Χρησιμοποιήσαμε μικρότερη ακτίνα προκειμένου να αυξηθεί η διαφορά ταχύτητας μεταξύ επίπεδης και θολωτής-round-bottom "pin". Η επιφανειακή ταχύτητα ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου, όπως το "pin", μεταβάλλεται από μηδενική τιμή στο κέντρο σε μέγιστη στην άκρη του κυλίνδρου, σημείο το οποίο ονομάζεται "calibration point". Η διαφορά ταχύτητας στις δύο διαφορετικούς τύπους γεωμετρίας "pin" βρίσκεται στο γεγονός ότι η άκρη του σε περίπτωση round-bottom "pin" είναι πιο κοντά στο κέντρο του κυλίνδρου και επομένως η γραμμική ταχύτητα επιφάνειας στο ακραίο σημείο της περιφέρειας αλλά και οι εφαρμοζόμενες σε αυτό δυνάμεις είναι πολύ χαμηλότερες. Το σχήμα 32 απεικονίζει τις γεωμετρικές διαφορές στο κάτω μέρος των δύο τύπων "pin". Το Σχήμα 33 απεικονίζει το "stepped spiral cone pin" εργαλείο και το σχήμα 34 απεικονίζει τη λεπτομέρεια στο κάτω μέρος του εργαλείου έρχεται σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο.



Σχήμα 32 Calibration point of flat- and round-bottom pins



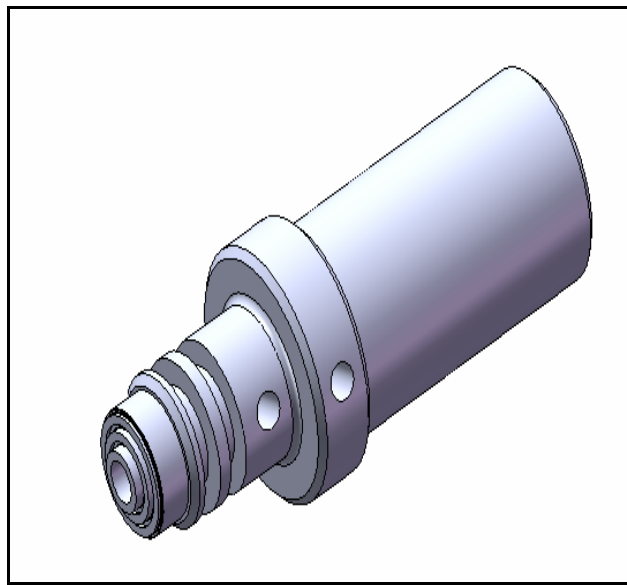
Σχήμα 33 Stepped spiral cone pin with round bottom, Ø5



Σχήμα 34 Detailed view of the pins down end with round bottom, Ø5 mm

7.2 Σχεδιασμός νέου "shoulder"

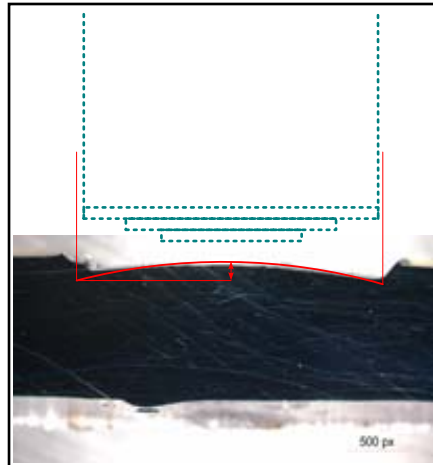
Η τρίτη πρόταση αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός κυρτού τύπου "shoulder" με την γεωμετρία τραπεζίου - "convex shoulder with tapered geometries". Ο τύπος αυτός αποτελείται από ένα "shoulder" με ομόκεντρους κύκλους χαραγμένους στην επιφάνεια του, οι οποίοι ξεκινούν από τη βάση του και "κινούνται" προς τα έξω και σχηματίζουν έτσι μία κυρτή-τραπεζοειδή γεωμετρία, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 35.



Σχήμα 35 Tapered shoulder, $\varnothing 15$ mm

Αυτό το εργαλείο λειτουργεί με βάση την αρχή ότι είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί συγκόλληση με το "shoulder" μερικώς και όχι πλήρως βυθισμένο στο τεμάχιο, αν το προφίλ του είναι τραπεζοειδές και έχει ομόκεντρους κύκλους για να συγκρατούν το υλικό στη θέση της συγκόλλησης.

Αυτή η γεωμετρία οδηγεί στην αποφυγή της διόγκωσης- "augmentation" της συγκολλημένης διατομής, η οποία ήταν ένα μειονέκτημα σχεδόν σε όλα τα πειράματα που εκτελέστηκαν (κεφάλαιο 6.2). Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει το χαρακτηριστικό φαινόμενο της διόγκωσης και πως αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί με χρήση εργαλείου τραπεζοειδούς διατομής.



Σχήμα 36 Use of shoulder with tapered profile in order to avoid joint augmentation

Αυτό το εργαλείο μπορεί επίσης να επιτύχει καλής ποιότητας συγκολλήσεις με μεταβλητό βύθισμα εργαλείου στο τεμάχιο, χαρακτηριστικό το οποίο επιτρέπει εφαρμογή της μεθόδου σε τεμάχιο μεταβλητού πάχους. Πάραυτα, αυτός ο τύπος δημιουργεί υποκοπή στην προωθημένη πλευρά του "shoulder", η οποία όμως είναι μικρότερη από αυτή που εμφανίζεται σε περίπτωση υπερβολικής βύθισης επίπεδου ή κοίλου εργαλείου (Jata και λοιποί. 2005, P.161-164).

8 Τελική οπή - "Exit hole"

8.1 Το ελάττωμα της "exit hole"

Ο σχηματισμός "exit hole" κατά την έξοδο του "pin" στο τέλος της συγκόλλησης είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της μεθόδου FSW και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματά της. Η παρουσία της οπής ασκεί αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της ένωσης και έχει επίσης επιπτώσεις στην εμφάνιση του συγκολλημένου τεμαχίου, κάτι το οποίο μπορεί μερικές φορές να είναι κρίσιμο εάν η συγκολλημένη επιφάνεια έρχεται σε οπτική επαφή με το περιβάλλον. Η "exit hole" μπορεί να ανιχνευθεί εύκολα οπτικά και είναι μια ανωμαλία του FSW που πρέπει να διορθωθεί δεδομένου ότι η επιρροή της είναι παρόμοια με αυτή μιας ρωγμής και μπορεί να αποβεί μοιραία για την αντοχή της συγκόλλησης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ολοκλήρωση ή όχι της περιφέρειας του κύκλου δίνει μια σαφή εικόνα της ποιότητας της συγκόλλησης (βλ. κεφάλαιο 6.2 και πίνακα 12).

Από την ανάπτυξη της μεθόδου το 1991 έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι προκειμένου να αποφευχθεί το μειονέκτημα του σχηματισμού της "exit hole". Οι διαδικασίες που έχουν ήδη αναπτυχθεί μπορούν να διαιρεθούν σε δύο ομάδες σύμφωνα με το εάν ο σχηματισμός "exit hole" αποφεύγεται ή αν ακολουθεί μετά το τέλος της διαδικασίας του FSW περαιτέρω διεργασία για την απομάκρυνσή της. Υπάρχουν τρόποι αποφυγής του σχηματισμού με χρήση διαδικασιών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χωρίς να απαιτείται περαιτέρω διεργασία. Τα πιο διαδεδομένα παραδείγματα είναι η χρήση του "retractable pin tool" (βλ. κεφάλαιο 2.2) και η βαθμιαία αφαίρεση του "pin" από το υλικό στο τέλος της συγκόλλησης, αν και η τελευταία μέθοδος δεν συστήνεται δεδομένου με αυτό τον τρόπο προκύπτει περιοχή του υλικού η οποία δεν έχει πλήρως συγκολληθεί.

Το "retractable pin tool" του σχήματος 38 οδηγεί σε αποφυγή σχηματισμού "exit hole", καθώς το "pin" αφαιρείται αυτόματα στο τέλος της συγκόλλησης. Το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι εντούτοις το σχετικά υψηλό κόστος του συγκεκριμένου εργαλείου συγκριτικά με αυτό των συμβατικών εργαλείων FSW.

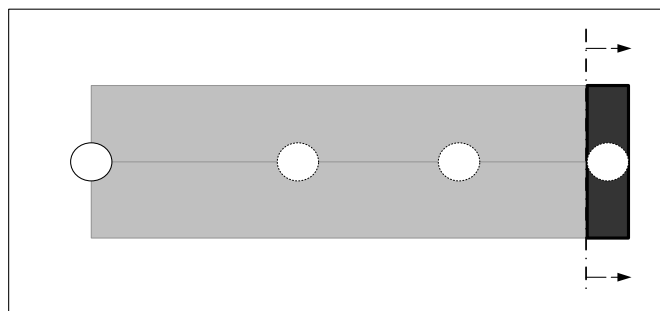


Σχήμα 37 Retractable Pin Tool

(Courtesy of NASA Marshall Space Flight Center)

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει από τις μεθόδους που χρησιμοποιούν πρόσθετο εξοπλισμό. Οι σημαντικότερες μέθοδοι είναι η χρήση "run-off tabs" και κεκλιμένων επίπεδων ευθύγραμμων τμημάτων εξόδου του εργαλείου από το τεμάχιο (ramps).

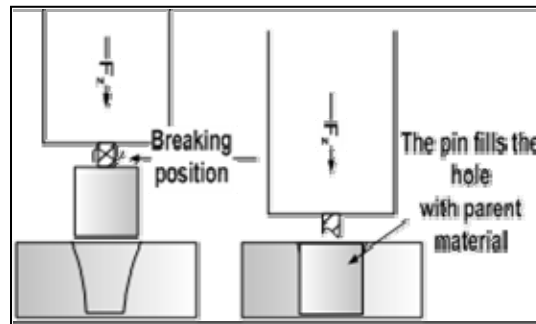
Ο τρόπος λειτουργίας της πρώτης μεθόδου απεικονίζεται στο σχήμα 39. Το εργαλείο εισέρχεται στο σκούρο τμήμα μετά τη πλήρη συγκόλληση του τεμαχίου. Το τμήμα αυτό, καλείται "tab" και βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τη γραμμή συγκόλλησης, έτσι ώστε η "exit hole" να σχηματίζεται ουσιαστικά εντός αυτού και να είναι εύκολο στη συνέχεια να αφαιρεθεί αφήνοντας ουσιαστικά τη συγκόλληση χωρίς "exit hole".



Σχήμα 38 Run-off tab- mechanism

Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε κυκλικά τμήματα λόγω των περιορισμών γεωμετρίας, καθώς το αρχικό και το τελικό σημείο ενός σωλήνα είναι ταυτόσημα.

Τέλος, λόγω χρονικών περιορισμών δεν μπόρεσε να εφαρμοσθεί η ελπιδοφόρος και ενδιαφέρουσα μέθοδος για αποφυγή "exit hole" με χρήση ενός ειδικού τύπου εργαλείου που ονομάστηκε "self-breaking pin". Σε αυτό το εργαλείο μετά το πέρας της διαδικασίας μπορεί να αποσπαστεί το τμήμα "pin", καλύπτοντας ουσιαστικά την οπή με υλικό. Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου.



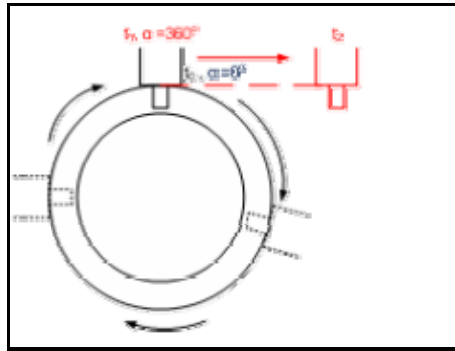
Σχήμα 39 Apparatus of self-breaking pin

Όλοι οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν επέβαλαν την ανάπτυξη στρατηγικών χαμηλού κόστους και απλού τρόπου λειτουργίας. Οι στρατηγικές που αναπτύχθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο ακόλουθο κεφάλαιο.

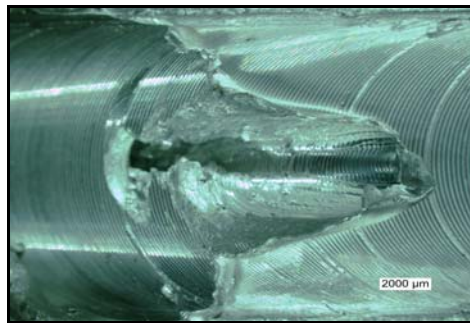
8.2 Στρατηγικές για την αποφυγή σχηματισμού "exit hole"

1. Αφαίρεση του εργαλείου επαπτομενικά μετά από 360° συγκόλλησης

Σε αυτήν την μέθοδο το εργαλείο αφαιρέθηκε μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης επαπτομενικά στη γραμμή συγκόλλησης (σχήμα 40). Η μέθοδος δεν παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται καθαρά στο σχήμα 41. Το "pin" σχίζει την επιφάνεια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και ενώ δε δημιουργείται βέβαια "exit hole", εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερης σπουδαιότητας ελάττωμα.



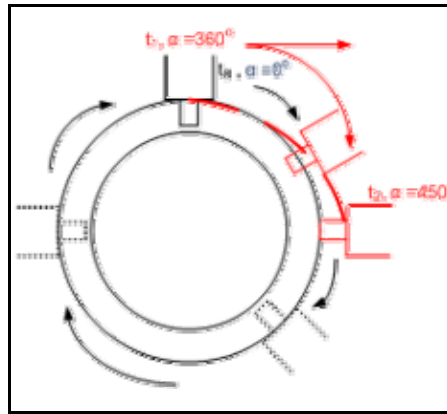
Σχήμα 40 Apparatus of the method



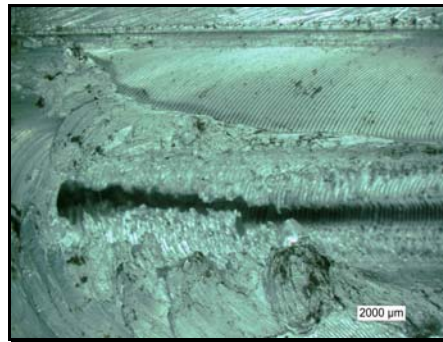
Σχήμα 41 Welded surface after tangential removal of the tool

2. Σταδιακή αφαίρεση του "rin" στο τέλος της συγκόλλησης

Σε αυτήν τη μέθοδο το εργαλείο αφαιρέθηκε βαθμιαία από το υλικό με τη βοήθεια ελέγχου θέσης. Μετά τη συγκόλληση των σωλήνων για 360°, το "rin" αφαιρέθηκε πλήρως από το τεμάχιο εντός τόξου 90°. Όπως αναμενόταν, αυτή η μέθοδος δεν πρόσφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα δεδομένου ότι η έλλειψη πλήρους διείσδυσης του "rin" στο υλικό δημιούργησε σοβαρότερα του "exit hole" ελαττώματα στη συγκολλημένη επιφάνεια. Τα ακόλουθα σχήματα απεικονίζουν τον τρόπο λειτουργίας και τα αποτελέσματα χρήσης της μεθόδου.



Σχήμα 42 Apparatus of the method



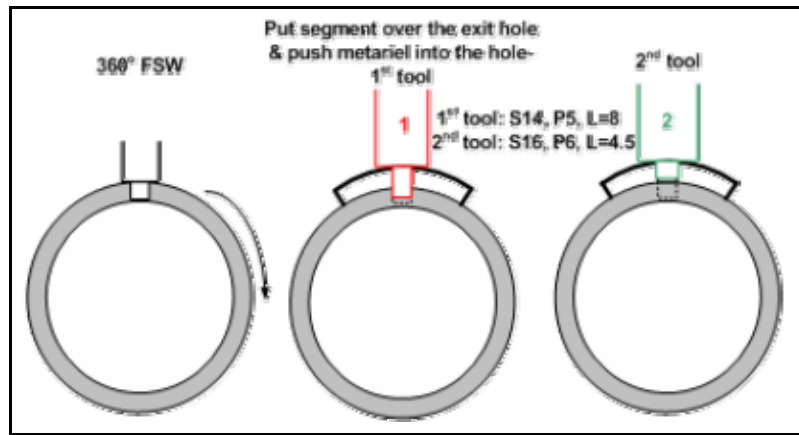
Σχήμα 43 Welded surface after gradual removal of the probe

3. Πλήρωση της οπής με υλικό

Προκειμένου να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήσαμε τμήματα από σωλήνες του ίδιου υλικό με αυτό των συγκολλούμενων τεμαχίων. Αυτά τα τμήματα χρησιμοποιήθηκαν ως μέταλλο πλήρωσεως προκειμένου να καλυφθεί η οπή. Μετά τη συγκόλληση των τεμαχίων, αφαιρέθηκε ένα τόξο 120° από τους σωλήνες των 80mm και το προσαρμόστηκε με τη βοήθεια των ασφαλειών πάνω από τα ήδη συγκολλημένα τεμάχια.

Η βύθιση του υλικού πλήρωσεως εντός της "exit hole" ολοκληρώθηκε σε δύο φάσεις. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένα εργαλείο με τη διάμετρο "exit hole" 16mm και διάμετρο "pin" 6 mm. Το μήκος του "pin" ήταν 4.5 mm. Στη δεύτερη φάση η διείδυση του εργαλείου ήταν βαθύτερη, 8mm., και το εργαλείο είχε διάμετρο "shoulder" και "pin" 5mm και 14mm αντίστοιχα. Και στις δύο φάσεις η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου ήταν 1500rpm και η γωνία κλίσης του 0° . Το σχήμα 44 απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου και το σχήμα

45 την απομένουσα "exit hole" στο υλικό πληρώσεως μετά από τη βύθιση αυτού στην αρχική οπή.

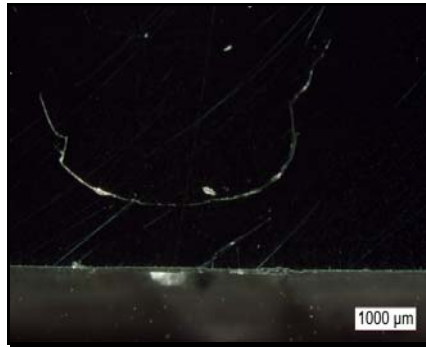


Σχήμα 44 The apparatus of the method in three steps



Σχήμα 45 Exit hole on the filler metal after plugging it into the initial keyhole

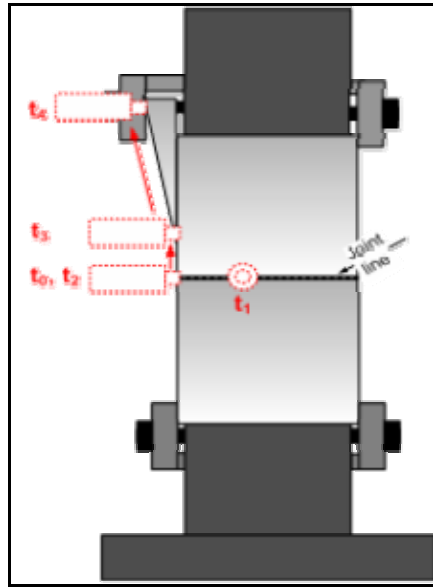
Το σχήμα 46 απεικονίζει λεπτομέρεια της κάτω περιοχής του υλικού μετά από την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Η περιοχή, στην οποία είχε σχηματιστεί η "exit hole" είναι πλέον πλήρης με υλικό αλλά παρατηρείται έλλειψη πλήρους διείσδυσης του "pin" και η οποία οδηγεί στην εμφάνιση του ελαττώματος που απεικονίζεται στο σχήμα 46. Η μέθοδος της εξάλειψης της "exit hole" με χρήση υλικού προς πλήρωση της οπής ίδιου με το αυτό του συγκολλούμενου τεμαχίου, αποδεικνύεται ενδιαφέρουσα και χρήζει περαιτέρω εξέτασης.



Σχήμα 46 Detailed view at the bottom of the material-lack of penetration

4. Χρήση ράμπας κάθετα στην κατεύθυνση της συγκόλλησης

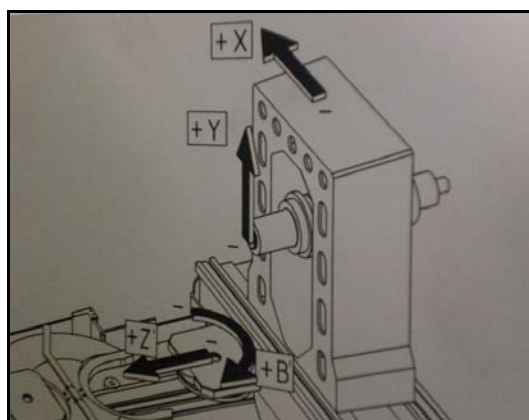
Το πείραμα για την εξέταση της μεθόδου ολοκληρώθηκε σε τέσσερα βήματα. Στο πρώτο, το εργαλείο κινήθηκε κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης για 300° έχοντας τις ακόλουθες παραμέτρους: $n= 1000 \text{ rpm}$, $f=200\text{mm/min}$, $\alpha=5^\circ$, $t=0,2\text{mm}$. Στη δεύτερη φάση το εργαλείο κινήθηκε κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης για τόξο 60° , έτσι ώστε η γωνία κλίσης να μηδενιστεί. Μετά από αυτό το εργαλείο κινήθηκε κάθετα προς τη γραμμή συγκόλλησης έως ότου συνάντησε την κεκλιμένη ράμπα. Στο τελευταίο βήμα, το εργαλείο κινήθηκε στην άνω κατεργασμένη πλευρά της κεκλιμένης ράμπας, έτσι ώστε στο τέλος της διαδικασίας (t_4) δεν υπήρχε επαφή μεταξύ εργαλείου και ράμπας. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου παρίσταται γραφικά στο σχήμα 47. Το σχήμα 48 απεικονίζει το αποτέλεσμα του πειράματος μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου. Η επιφάνεια των τεμαχίων παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη και δεν παρατηρείται "exit hole" στην επιφάνειά τους. Παρόλα αυτά, η μέθοδος πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω. Το σημαντικότερο μειονέκτημα βρίσκεται στο γεγονός ότι δεν μπορούμε να κινηθούμε στην κεκλιμένη ράμπα με μη μηδενική γωνία κλίσης ($\alpha \neq 0^\circ$), καθώς οι κινούμενοι άξονες της μηχανής είναι τέσσερεις και έτσι δεν επιτρέπεται μετακίνηση προς τη ζητούμενη κατεύθυνση (βλ. σχήμα 49) Για το λόγο αυτό χρειαζόμαστε μια μηχανή πέντε βαθμών ελευθερίας, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς η μέθοδος.



Σχήμα 47 Apparatus of the method using ramp to avoid the exit hole formation



Σχήμα 48 Surface of the material after accomplishment of the method



Σχήμα 49 The 4-axis machine used in all experiments. Need for a rotating axis in +X-direction

9 Τελικά συμπεράσματα και μελλοντική προοπτική της μεθόδου FSW

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η εξέταση της μεθόδου FSW όταν αυτή εφαρμόζεται σε κυλινδρικά στοιχεία μικρής ακτίνας και η ανάπτυξη στρατηγιών με σκοπό τη βελτίωσή της. Συμπερασματικά, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διαδικασία δε διαφέρει σημαντικά από την εφαρμογή της μεθόδου σε τεμάχια με επίπεδη γεωμετρία. Εντούτοις, υπάρχουν ορισμένες βασικές διαφορές, οι βασικότερες εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω:

- πιο απαιτητική και πιο σύνθετη κατασκευή στήριξης τεμαχίων
- πιο δύσκολη ανάπτυξη μεθόδων προς αποφυγή της "exit hole" λόγω γεωμετρικών περιορισμών
- το εργαλείο πρέπει να έχει κλίση όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε σωλήνες

Από την άλλη, οι ιδανικές παράμετροι δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτές όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε μεταλλικά επίπεδα φύλλα. Οι τιμές που ακολουθούν αποτελούν συνιστώμενες τιμές για την παραγωγή συγκολλήσεων καλής ποιότητας. Φυσικά, δεν μπορούν να προταθούν συγκεκριμένες ιδανικές τιμές αλλά περιοχή τιμών, στην οποία είναι πιο πιθανή η παραγωγή καλής ποιότητας συγκολλήσεων.

- περιστροφική ταχύτητα $n=700-1200$ rpm
- γραμμική ταχύτητα συγκόλλησης $f=150-250$ mm/min
- γωνία κλίσης εργαλείου $\alpha \approx 5^\circ$
- βύθιση εργαλείου στο υλικό $t=0.15-0.25$ mm
- διάμετρος Shoulder $S=15-18$ mm
- διάμετρος Pin $P=5-6$ mm

Τέλος, μπορεί επίσης να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου FSW σε κυλινδρικά τεμάχια δεν προϋποθέτει την κατασκευή ειδικών εργαλείων αν και θεωρείται ότι υπάρχουν τύποι πιο κατάλληλοι για εφαρμογή της μεθόδου στη συγκεκριμένη γεωμετρία. Για το λόγο αυτό, έγιναν κάποιες προτάσεις για ανάπτυξη νέων τύπων με στόχο την καλύτερη απόδοση της μεθόδου στα συγκεκριμένης γεωμετρίας τεμάχια (βλ. κεφάλαιο 8).

Αυτή η εργασία αναπτύχθηκε εντός χρονικού διαστήματος μικρότερου των έξι μηνών και συνεπώς είναι προφανές ότι πολλές πτυχές της μεθόδου δεν εξετάστηκαν ενδελεχώς. Για την πλήρη διερεύνηση της λειτουργίας της μεθόδου FSW σε κυλινδρικά τεμάχια, πρέπει να γίνουν επιπλέον οι ακόλουθες ενέργειες:

- Διερεύνηση αν οι συνιστώμενες τιμές που προέκυψαν από την παρούσα εργασία παράγουν καλής ποιότητας συγκολλήσεις και σε κυλινδρικά τεμάχια με διαφορετική ακτίνα
- Εκτέλεση πειραμάτων με τα νέα εργαλεία υπό τις ίδιες παραμέτρους και σύγκριση των αποτελεσμάτων
- Ανάπτυξη και κατασκευή περισσότερων τύπων εργαλείων με περισσότερα χαρακτηριστικά και ποικιλία διαστάσεων
- Κατασκευή διαγραμμάτων δυνάμεων σε πολικές συντεταγμένες (polar force plots) για τα διαθέσιμα εργαλεία
- Εκτέλεση περισσότερων δοκιμών αξιολόγησης (δοκιμές κάμψης και εφελκυσμού)

Εκτός από τα βήματα που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν επίσης διάφορα εμπόδια που πρέπει να υπερνικηθούν έτσι ώστε η διαδικασία FSW να κερδίσει ακόμα πιο ευρύτερη αποδοχή. Αρχικά, υπάρχουν διάφορα επιστημονικά κενά που πρέπει να καλυφθούν προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία και να βρεθούν τρόποι βελτίωσής της. Τα δύο πλέον θεμελιώδη φαινόμενα του FSW, η πρόσδοση θερμότητας μέσω τριβής και παραμόρφωσης και η ροή υλικού και η στερεοποίηση, δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητά ως προς το μηχανισμό τους. Τα δύο αυτά φαινόμενα είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς χωρίς την κατανόησή τους είναι αδύνατη η πρόβλεψη της επακόλουθης μικροδομής της συγκολλημένης διατομής για δεδομένα σύνολο παραμέτρων σύμφωνα με τους Mishra et al (2007, P.351). Επιπλέον, η ύπαρξη προδιαγραφών και προτύπων είναι απαραίτητη για την αποδοχή και χρήση της μεθόδου στη βιομηχανία. Μόνο μερικές επιστημονικές κοινότητες είναι επιφορτισμένες με το έργο της ανάπτυξης προδιαγραφών για τη διαδικασία FSW και αυτή η έλλειψη είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για την εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο. Ευρύτερη αποδοχή του FSW θα είναι εφικτή μόνο αν οι προδιαγραφές της μεθόδου γνωστοποιηθούν καθώς αυτό θα ωθήσει δυνητικούς νέους χρήστες να ασχοληθούν με τη μέθοδο. Επιπλέον, αυτή τη στιγμή υπάρχει επίσης έλλειψη διαθέσιμων πληροφοριών στη διεθνή

βιβλιογραφία και η πρόσβαση των ενδιαφερομένων στις πληροφορίες δεν είναι εύκολη. Τέλος, για πιο διαδεδομένη χρήση της FSW είναι επιτακτικό να αναπτυχθούν χαμηλότερου κόστους μηχανές.

10 Ευχαριστίες

Ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει το επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό του Ινστιτούτου *iwb* για την υποστήριξη και για την καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται προς τον επόπτη της εργασίας Mech. Eng. M. Ruhstorfer, καθώς και στον υπεύθυνο καθηγητή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου κ. Δ. Μανωλάκο.

11 Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1 Master chart of welding and joining processes	5
Σχήμα 2 Contact between material and tool in case of 1) curvilinear and 2) flat geometry.....	7
Σχήμα 3 Welding tool plunge Σχήμα 4 Welding tool traverse.....	9
Σχήμα 5 Definitions of FSW process	10
Σχήμα 6 Heat transfer on the surfaces of the tool	11
Σχήμα 7 Equation for the heat input by the shoulder friction.....	12
Σχήμα 8 The three incompressible flow fields: a) rigid body rotation, b) uniform translation, c) ring vortex, d) combination of the three flow fields	12
Σχήμα 9 Microstructure in the joint cross section	14
Σχήμα 10 Flow pattern in the joint cross section	14
Σχήμα 11 Configurations for FSW	15
Σχήμα 12 Examples of construction using stir welded extrusions.....	15
Σχήμα 13 Different shoulder features	16
Σχήμα 14 Working apparatus of retractable pin tool	16
Σχήμα 15 Demographics of the FSW licenses as of January 2005	16
Σχήμα 16 The central tunnel assembly of the Ford GT is a friction stir welded assembly of Aluminum stampings and extrusions	16
Σχήμα 17 Mazda RX-8 rear door structure welded with the process of plunge spot welding which is relevant to FSW.....	16
Σχήμα 18 Changing from conventional TIG to FSW for the welding of rocket fuel tanks has lead to a 99% cost reduction.....	16
Σχήμα 19 Scheme of tool parameters	16
Σχήμα 20 Flow chart of FSW in position control.....	16
Σχήμα 21 Flow chart of FSW in position control operation.....	16
Σχήμα 22 Polar force plot for $n=300\text{rpm}$, $f=120\text{mm/min}$	16
Σχήμα 23 Shoulder diameter as function of sample thickness.....	16

Σχήμα 24 Pin diameter as function of sample thickness	16
Σχήμα 25 Process window for the aluminum alloys listed in Πίνακας 6	16
Σχήμα 26 Weld quality as function of feed ratio n/f	16
Σχήμα 27 Connection of parameter values and effects development	16
Σχήμα 28 Full clamping construction with the jaws and its base plates for FSW tubes with outer diameter 60 and 80 mm	16
Σχήμα 29 Correlation between rotational speed and yield strength of the base metal	16
Σχήμα 30 Correlation between welding speed and yield strength of the base metal	16
Σχήμα 31 Square profiled pin, Ø5 mm	16
Σχήμα 32 Calibration point of flat- and round-bottom pins	16
Σχήμα 33 Stepped spiral cone pin with round bottom, Ø5	16
Σχήμα 34 Detailed view of the pins down end with round bottom, Ø5 mm	16
Σχήμα 35 Tapered shoulder, Ø15 mm	16
Σχήμα 36 Use of shoulder with tapered profile in order to avoid joint augmentation	16
Σχήμα 37 Retractable Pin Tool (<i>Courtesy of NASA Marshall Space Flight Center</i>)	16
Σχήμα 38 Run-off tab- mechanism	16
Σχήμα 39 Apparatus of self-breaking pin	16
Σχήμα 40 Apparatus of the method	16
Σχήμα 41 Welded surface after tangential removal of the tool	16
Σχήμα 42 Apparatus of the method	16
Σχήμα 43 Welded surface after gradual removal of the probe	16
Σχήμα 44 The apparatus of the method in three steps	16
Σχήμα 45 Exit hole on the filler metal after plugging it into the initial keyhole .	16
Σχήμα 46 Detailed view at the bottom of the material-lack of penetration	16

Σχήμα 47 Apparatus of the method using ramp to avoid the exit hole formation.....	16
Σχήμα 48 Surface of the material after accomplishment of the method.....	16
Σχήμα 49 The 4-axis machine used in all experiments. Need for a rotating axis in +X-direction	16

12 Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Metals welded by various processes	4
Πίνακας 2 Summary of current friction stir welding tool materials	17
Πίνακας 3 Summary of most common tool designs	22
Πίνακας 4 Mechanical properties of AW-6060T6 and AW-6061T6 materials .	28
Πίνακας 5 Chemical composition (wt%) of base material AW-6060-T6	28
Πίνακας 6 Solidus temperature of several aluminum alloys	36
Πίνακας 7 List of all 32 customary tools	39
Πίνακας 8 Major defect types and their origins.....	41
Πίνακας 9 Experiments accomplished with the customary tools	47
Πίνακας 10 Evaluation of the experiments	49
Πίνακας 11 Macrostructure of joints welded in the 1 st experimental part	50
Πίνακας 12 Experiments accomplished with the customary tools on the concentric clamping device	56
Πίνακας 13 Comparison of thrust load diagrams of the 1 st and 2 nd experimental part (in all cases the tilting angle is 5°).....	57
Πίνακας 14 Macrostructure of joints welded in the 2 nd experimental part.....	60

13 Βιβλιογραφία

ΔΙΕΘΝΗΣ

ADVANCED JOINING TECHNOLOGIES

Advanced joining technologies Inc: <<http://www.ajt-inc.com>> (5.6.2008)

aluMATTER 2008

European Aluminium Association (EAA) and MATTER at the University of Liverpool: < <http://aluminium.matter.org.uk>> (5.4.2008)

BOWYER 2000

Bowyer,W.H.: A Review of Literature from the First International Conference on Friction Stir Welding

SKI Project Number 99191, England, June 2000

BROCK METAL 2008

Brock Metal Company Limited:< <http://www.brockmetal.co.uk>> (1.8.2008)

CARY ET AL. 2004

Cary,H.;Helzer,S.: Modern Welding Technology.

New Jersey: Prentice-Hall 2004

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE 1999

Schofer,P.:Rührreibschweißen-Wärmearmes Verbinden von Aluminiumlegierungen

Material Wissenschaft und Werkstofftechnik 30/11,1999, P.693-696

COLLIGAN 2004

Colligan,K.J.:Friction Stir Welding for Ship Construction
Navy Metalworking Center: Harrisburg (USA) 2004

COCHIUS

Max Cochius GmbH: < <http://www.cochius.de>> (15.4.2008)

DIN EN 573, TEIL 3

DIN EN 573, Teil 3: Aluminium und Aluminiumlegierungen- Chemische
Zusammensetzung und Erzeugnisformen.

Berlin: Beuth 2007

DIN EN ISO 25239

DIN EN ISO 25239: Rührreibschweissen-Aluminium.

Berlin: Beuth 2007

DUBOURG ET AL. 2006

Doubourg,L.;Dachaux,P.: Design and properties of FSW tools: A literature
review

6th Friction Stir Welding Symposium, Saint-Sauveur (Kanada) 2006

ESRF 2007

European Synchrotron Radiation Facility: < <http://www.esrf.eu>> (16.02.2007)

Eurostir® - TWI 2008

Eurostir: <http://www.eurostir.co.uk> (15.8.2008)

FPE & Gatwick Fusion Ltd 2008

FPE & Gatwick Fusion Ltd: <http://www.fpe.co.uk> (25.7.2008)

JATA ET AL. 2005

Jata,K.;Mahoney,M.;Mishra,R.;Lienert,T.: Friction Stir Welding and Processing III.

San Fransisco: TMS 2005

Lockheed Martin Cooperation 2008

Lockheed Martin: <http://www.lockheedmartin.uk> (15.8.2008)

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2008

Balasubramanian,V.: Relationship between base metal properties and friction stir welding parameters

Materials Science and Engineering A 480, 2008, P.397-403

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2006

Kim,Y.G.;Fujii,H;Tsumura,T.;Komazaki,T.;Nakata,K.: Three defect types in friction stir welding of aluminium die casting alloy

Materials Science and Engineering A 415, 2006, P.250-254

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2008

Elangovan,K.;Balasubramanian,V.: Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy

Materials Science and Engineering 200, 2008, P.163-175

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2008

Cavaliere,P.;Squillace,A.;Panella,F.: Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding

Materials Science and Engineering 200, 2008, P.364-372

MISHRA ET AL. 2007

Mishra,R.;Mahney,M.: Friction Stir Welding and Processing.

Ohio: ASM International 2007

RUHSTORFER 2007

Ruhstorfer,M.:Bewertung des robotergestützten Röhreobschweissens anhand eines PKW-Stukturelements aus Al-Guss

München:TU,iwb,2007

ROWE ET AL 2008

Rowe,C.E.D et al:Advances in tooling materials for friction stir welding

TWI & Cedar Metals Ltd, 2008

Rosen et al. 1999

Patent Number 5,971,252 United States Patent (10.26.1999)

Rosen,C.D;Litwinski,E.;Valdez,J.M.: Friction Stir Welding Process to repair voids in aluminium alloys

ST-GEORGES ET AL. 2006

St-Georges,L.;DasyIva-Raymond,P.;Kiss,L.I.;Perron,A.L.: Prediction of optimal parameters of friction stir welding

6th Friction Stir Welding Symposium, Saint-Sauveur (Kanada) 2006

TWI 2008

The Engineering Institution for Welding and Joining Professionals (TWI)
Connect, no.152, January/February 2008, P.1

UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA 2008

University of South Carolina, College of Engineering and Computing:
<http://www.me.sc.edu/Research/cmmnde/friction/papers/perf/mix_mode.htm>
(5.4.2008)

WIKIPEDIA 2008

Wikimedia foundation Inc.: <http://www.wikipedia.de> (20.03.2008)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗΣ ΚΑΙ ΛΟΙΠΟΙ 2003

Χρυσουλάκης, Γ.; Παντελής,: Επιστήμη και τεχνολογία των μετάλλων
Αθήνα: Παπασωτηρίου 2003

Παράρτημα

A Technical drawing for construction of new tools

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Garching, den 20.08.2008

Mitsakos Antonios