

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Με θέμα:

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

- **ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΔΕΣΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ**
- **ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΛΑΒΑΤΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΩΤΗΡΙΟΣ Α. ΤΣΙΡΚΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα “Σύγχρονοι μέθοδοι συγκόλλησης. Συγκόλληση μέσω δέσμης ηλεκτρονίων & Συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης” εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών.

Το παρόν τεύχος αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των μεθόδων συγκόλλησης μέσω δέσμης ηλεκτρονίων και συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης, στις απαιτήσεις αυτών και στα προϊόντα που παράγουν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **Δρ. Τσίρκα Σωτήριο**, επιβλέποντα της εργασίας αυτής, για την πολύτιμη βοήθεια του στην ολοκλήρωση της και την προσφορά των ακαδημαϊκών του γνώσεων.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην **Σοφία Γκίνκο**, μεταπτυχιακή φοιτήτρια του Τμήματος Φιλολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών για την επιμέλεια της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την **οικογένεια μου** για την συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξε κατά τα χρόνια των σπουδών μου.

Λαβατσής Γεώργιος
Μάρτιος 2009

*Στην
Οικογένεια μου*

Περίληψη

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή στις σύγχρονες μεθόδους συγκόλλησης και συγκεκριμένα στις τεχνικές «συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης» (friction stir welding) & «συγκόλλησης με Laser» (Laser beam welding). Στο περιεχόμενο της εργασίας παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των κατεργασιών καθώς και οι θεωρητικές αρχές που τις διέπουν.

Σήμερα αυτές οι δύο τεχνικές θεωρούνται ως το μέλλον των συγκολλήσεων, όσον αφορά τις εφαρμογές τους στη βαριά βιομηχανία. Στη χώρα μας η παρουσία και η χρήση των δυο αυτών τεχνικών είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη. Στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο βιομηχανικά προηγμένο κόσμο θεωρείται η χρήση τους ως αιχμή του δόρατος για βαριές και συνάμα υψηλής ποιότητας κατασκευές. Αεροναυπηγικές, αεροδιαστημικές, ναυπηγικές βιομηχανίες και αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν εντάξει αυτές τις τεχνικές στις γραμμές παραγωγής τους, με θεαματική βελτίωση στην ποιότητα συγκολλήσεων των προϊόντων τους, σε σχέση με τις συνήθεις τακτικές που γνωρίζουμε και είναι ευρέως διαδεδομένες στη χώρα μας.

Η παρουσίαση των δύο εξεταζόμενων τεχνικών γίνεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη της συγκολλητικής διαδικασίας και αναφέρονται οι σημαντικότεροι σταθμοί στην πορεία της. Επίσης παρουσιάζεται και μία ταξινόμηση των διαδικασιών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνική συγκόλλησης μέσω δέσμης ηλεκτρονίων (LASER). Αναφέρεται η διαδικασία που ακολουθείται, γίνεται μια σύγκριση με άλλες τεχνικές συγκόλλησης και παρουσιάζονται συνοπτικά τα συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά την συγκόλληση.

Επίσης παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία, αναλύονται οι μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες των προϊόντων της διαδικασίας ενώ αναφέρονται και διάφορες τεχνικές ποιοτικής βελτίωσης αυτών.

Στον επίλογο του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές της διαδικασίας στην βιομηχανία .

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται η τελευταία λέξη της συγκολλητικής τεχνολογίας, η διαδικασία συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding).

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί την πρώτη συγγραφή σχετικά με αυτή τη διαδικασία στην Ελλάδα μιας και η έρευνα που διεξήχθει για την ανέρευση επιστημονικού υλικού περιλαμβάνει μόνο ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

Στην πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου γίνεται μια πρώτη γνωριμία με την διαδικασία στο σύνολο της., ενώ παρουσιάζονται και οι κυριότεροι παράμετροι που την επηρεάζουν.

Κατόπιν παρουσιάζεται μια μοντελοποίηση της διαδικασίας, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων της.

Ακολούθως επιγραμματικά αναφέρονται και οι δυνατότητες εφαρμογής της σε μέταλλα πέραν του αλουμινίου.

Το κεφάλαιο κλείνει δίνοντας το στίγμα που ακολουθεί διεθνώς η εξελικτική έρευνα της διαδικασίας και παρουσιάζοντας τις σημαντικότερες εφαρμογές της στην βιομηχανία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Περίληψη

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Η ιστορία των συγκολλήσεων.	1
1.2 Ταξινόμηση των συγκολλήσεων.	2
1.2.1 Άμεσες.	2
1.2.2 Αυτογενείς.	3
1.2.3 Ετερογενείς.	3
1.3 Συνήθειες τακτικές συγκόλλησης.	4
Κεφάλαιο 2: Συγκόλληση με την χρήση δέσμης ηλεκτρονίων Laser beam welding.	7
2.1 Εισαγωγή.	7
2.2 Συγκολλητική διαδικασία Laser.	8
2.2.1 Διαδικασία συγκόλλησης αγωγού.	10
2.2.2 Διαδικασία συγκόλλησης διεΐσδυσης (κλειδαρότρυπας) .	10
2.3 Σύγκριση με άλλες τεχνικές συγκόλλησης.	11
2.4 Συγκολλητικά συστήματα Laser.	14
2.4.1 Nd:YAG Lasers.	14
2.4.2 Laser CO ₂ (διοξειδίου του άνθρακα)	17
2.5 Σύγκριση του Nd:YAG Laser και του Laser CO ₂	18
2.6 Laser συγκόλληση μετάλλων.	19
2.6.1 Παράμετροι συγκόλλησης.	22
2.6.2 Ένταση του Laser.	22
2.6.3 Συγκέντρωση (Focussing)	23
2.6.4 Αέριο θωράκισης (Shield gas)	23
2.6.5 Δεδομένα συγκόλλησης Laser.	24
2.7 Χαρακτηριστικά ενώσεων.	25
2.7.1 Ειδικές εφαρμογές.	27
2.8 Μηχανικές ιδιότητες.	30
2.8.1 Στατική αντοχή.	30
2.8.2 Αντοχή σε κόπωση.	31
2.9 Συγκόλληση Laser με υλικό πλήρωσης.	33
2.10 Μεταλλουργικές ιδιότητες.	35
2.10.1 Θερμικός κύκλος συγκόλλησης.	35

2.10.2 Η περιοχή θερμικής επιρροής HAZ (Heat affected zone)	37
2.10.2.1 Χάλυβας.	37
2.10.2.2 Κράματα αλουμινίου.	40
2.10.3 Ζώνη τήξεως.	41
2.10.3.1 Γενικά.	41
2.10.3.2 Χάλυβας.	44
2.10.3.3 Κράματα αλουμινίου.	46
2.11 Τεχνικές ποιοτικής βελτίωσης συγκόλλησης.	47
2.11.1 Γενικά.	47
2.11.2 Τεχνικές αύξησης της απορροφητικότητας Α.	49
2.11.2.1 Απορροφητικές επιστρώσεις.	49
2.11.2.2 Επιφανειακή τράχυνση.	49
2.11.3 Συνδυασμός δεσμών.	50
2.11.4 Πρόωση δέσμης.	51
2.11.5 Συνδυασμός συγκόλλησης τόξου-Laser.	51
2.12 Εφαρμογές συγκόλλησης Laser.	53
2.12.1 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία.	53
2.12.2 Εφαρμογές στην βιομηχανία άμυνας.	53
2.12.3 Εφαρμογές στην βιομηχανία ηλεκτρονικών.	54
2.12.4 Εφαρμογές στην βιομηχανία ναυπήγησης.	54
2.12.5 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία.	54
2.12.6 Άλλες εφαρμογές.	55
2.12.7 Ειδικές εφαρμογές.	55
 Κεφάλαιο 3: Συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης	
Friction Stir welding-FSW.	58
3.1 Εισαγωγή.	58
3.2 Γνωριμία με την διαδικασία.	58
3.3 Παράμετροι διαδικασίας.	60
3.3.1 Γεωμετρία εργαλείου.	60
3.3.2 Παράμετροι συγκόλλησης.	64
3.3.3 Σχεδιασμός ενώσεων.	65
3.4 Μοντελοποίηση της διαδικασίας FSW.	65
3.4.1 Μεταλλική ροή.	65
3.4.2 Παρατηρήσεις στη μικροδομή του υλικού βάσης.	68

3.4.3	Μοντελοποίηση της Μεταλλικής ροής.	68
3.4.4	Κατανομή θερμοκρασίας.	71
3.4.5	Εξέλιξη της μικροδομής.	76
3.4.6	Ζώνη ανάδευσης.	76
3.4.6.1	Σχήμα της Ζώνης ανάδευσης.	77
3.4.6.2	Μέγεθος κόκκου.	78
3.4.6.3	Υφή Μικροδομής.	79
3.4.7	Ζώνη θερμομηχανικής επιρροής TMAZ (Thermo mechanically affected zone)	80
3.4.8	Ζώνη θερμικής επιρροής HAZ (Heat affected zone)	81
3.5	Μηχανικές Ιδιότητες.	81
3.5.1	Σκληρότητα.	81
3.5.2	Αντοχή και Ολκιμότητα.	83
3.5.3	Αντοχή σε Κόπωση.	87
3.5.4	Θραύση.	89
3.5.5	Διάβρωση.	92
3.6	Άλλα Μέταλλα.	95
3.6.1	Κράματα Χαλκού.	96
3.6.2	Κράματα Τιτανίου.	98
3.6.3	Χάλυβας.	99
3.6.4	Κράματα Μαγνησίου.	102
3.6.5	Συγκόλληση FSW ανόμοιων μετάλλων και κραμάτων. . .	104
3.7	Έρευνα	106
3.7.1	Ροή υλικού.	106
3.7.2	Υλικό και σχεδιασμός εργαλείου.	106
3.7.3	Σταθερότητα της Μικροδομής.	107
3.8	Επίλογος & Εξέλιξη.	108
3.9	Εφαρμογές της διαδικασίας.	110
3.9.1	Αεροδιαστημικές εφαρμογές.	110
3.9.2	Αυτοκινητοβιομηχανία.	114
3.9.3	Θωράκιση.	115
3.9.4	Ναυπήγηση.	115
	Βιβλιογραφία	116

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Η Ιστορία των συγκολλήσεων

Η συγκόλληση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις θερμικές κατεργασίες των μετάλλων. Αν και ο άνθρωπος εκμεταλλευόταν τις ιδιότητες που προσέφερε η θερμότητα στα μέταλλα για την σύνδεση τους από τα αρχαία χρόνια, μόλις τον 19^ο αιώνα κατάφερε να αναπτύξει την τεχνική συγκόλληση.

Οι κυριότεροι σταθμοί [1] στην ιστορία των τεχνικών συγκολλήσεων είναι οι παρακάτω:

- 1820 Καυστήρας υδρογόνου-οξυγόνου N.Broke.
- 1836 Ανακάλυψη ασετιλίνης και των ιδιοτήτων της από τον A.Davy.
- 1850 Καυστήρας φωταερίου του Sainte Claire Devuse.
- 1877 M. Tomson (Η.Π.Α.), Μέθοδοι και μηχανήματα για την συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση
- 1882 J. Bernados (Ρωσία) - S.Olszewski (Πολωνία). Χρησιμοποίηση της ενέργειας του ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίου από γραφίτη και βασικού υλικού, ως πηγή θερμότητας για την συγκόλληση.
- 1890 N.Σλοβιάνοφ (Ρωσία) Χρησιμοποίηση της ενέργειας του ηλεκτρικού τόξου μεταξύ μεταλλικού τηκόμενου ηλεκτροδίου και βασικού μετάλλου για την συγκόλληση.
- 1899.N.Goldschmidt (Αγγλία) Μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε η αντίδραση θερμίτη για την συγκόλληση
- 1901 N.Picard. (Γαλλία) Κατασκευή καυστήρα ασετιλίνης-οξυγόνου υψηλής πίεσης

- 1926 H.M.Hobert και P.K.Devers (ΗΠΑ).Μέθοδος συγκόλλησης TIG(GTA).
- 1926 Alexander (ΗΠΑ).Μέθοδος MIG(GMA).
- 1957 W.A.Stohr. Χρησιμοποίηση της δέσμης ηλεκτρονίων στις συγκολλήσεις
- 1958, 1961 C.H.Thones, L.Maiman και Ali Javan. Χρησιμοποίηση των στερεών και αερίων Laser στις συγκολλήσεις
- 1991 The Welding Institute, Cambridge Αγγλία. Εφεύρεση της διαδικασίας συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding)

1.2 Ταξινόμηση των συγκολλήσεων

Οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης μπορεί να προσφέρουν τα ίδια αποτελέσματα (την σύνδεση δυο μετάλλων) αλλά διαφέρουν αρκετά ως προς τις ιδιότητες, την ποιότητα και αντοχή του εκάστοτε αποτελέσματος.

Έτσι δημιουργήσαμε έναν τρόπο ταξινόμησης των συγκολλήσεων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αποτελέσματος τους αλλά και ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε μεθόδου.

Ανεξάρτητα από το ποια μέθοδο χρησιμοποιούμε οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε Άμεσες, Αυτογενείς και Ετερογενείς.

1.3.1 Άμεσες

Είναι οι συγκολλήσεις που επιτυγχάνονται με τη θέρμανση των προς συγκόλληση μετάλλων σε θερμοκρασία χαμηλότερη της τήξης τους,

έως ότου καταστεί εύπλαστο το μέταλλο. Η συγκόλληση αυτή επιτυγχάνονται με πίεση ή με σφυρηλασία, χωρίς την χρήση πρόσθετου υλικού.

1.3.2 Αυτογενείς

Είναι οι συγκολλήσεις που επιτυγχάνονται με την θέρμανση των μετάλλων προς συγκόλληση μέχρι την τήξη τους και με την προσθήκη ή μη προσθέτου αυτογενούς μετάλλου. Στην περίπτωση αυτή έχουμε σύντηξη του βασικού μετάλλου με το εναποτιθέμενο υλικό.

Εναποτιθέμενο υλικό ονομάζουμε αυτό το οποίο προέρχεται από το πρόσθετο υλικό (του ηλεκτροδίου) και σχηματίζεται η κόλληση της σύνδεσης.

1.3.3 Ετερογενείς

Είναι οι συγκολλήσεις που επιτυγχάνονται με την βοήθεια ευτηκτότερου υλικού άλλης χημικής σύστασης. Οι συγκολλήσεις αυτού του είδους δεν είναι τόσο ισχυρές όσο οι αυτογενείς. Οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές.

Στις μαλακές (κασσιτεροκολλήσεις) η θερμοκρασία θέρμανσης δεν υπερβαίνει τους 400- 500°C. Στις σκληρές (μπρουτζοκολλήσεις – ασημοκολλήσεις)

Πέρα από την συγκόλληση υπάρχουν και άλλες επεξεργασίες μετάλλων που χρησιμοποιούν την ίδια πηγή θερμότητας. Τέτοιες κατεργασίες είναι η αναγόμωση, η θερμική κοπή μετάλλων κ.α.

1.4 Συνήθειες τακτικές συγκόλλησης

Στην ελληνική βαριά βιομηχανία οι κυρίαρχες μέθοδοι συγκόλλησης είναι δυο: Η ηλεκτροσυγκόλληση με την χρήση ηλεκτροδίου και η συγκόλληση με την χρήση αερίων (οξυγόνου-ασετιλίνης).

Τα προφανή πλεονεκτήματα των τεχνικών αυτών είναι το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος χρήσης και συντήρησης του τεχνολογικού εξοπλισμού καθώς και η πληθώρα εξειδικευμένων εργατών επάνω σε αυτές τις κατασκευαστικές τεχνικές. Είναι απλές, είναι εύκολες και δεν απαιτούν ιδιαίτερες γνώσεις μεταλλοτεχνίας για την εφαρμογή τους.

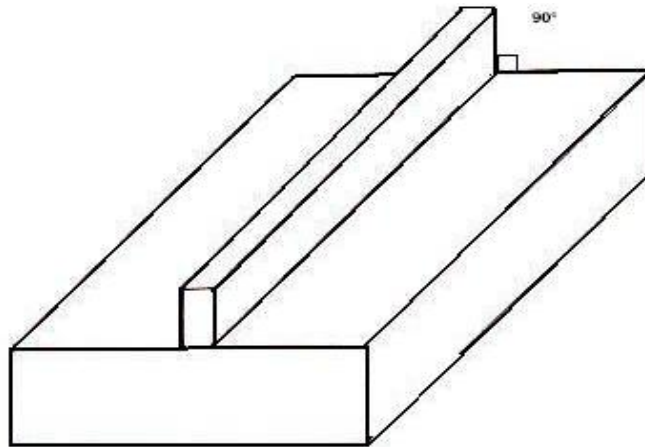
Από την άλλη όμως έχουν μερικά πολύ βασικά μειονεκτήματα τα οποία συνέβαλαν στην εξέλιξη. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Οι ιδιαίτερα επιβλαβείς τεχνικές για την υγεία του τεχνίτη -συγκολλητή λόγω των εξαιρετικά επικινδύνων αερίων και καπνών που δημιουργούνται κατά την διάρκεια εφαρμογής τους.
- Ο μεγάλος βαθμός επικινδυνότητας αφού υπάρχει ο κίνδυνος έκρηξης σε κάθε εφαρμογή τους.

Ιδιαίτερα η δεύτερη τεχνική που αναφέρθηκε παραπάνω, έχει ως αποτέλεσμα αναρίθμητα εργατικά ατυχήματα με ολέθριες πολλές φορές συνέπειες.

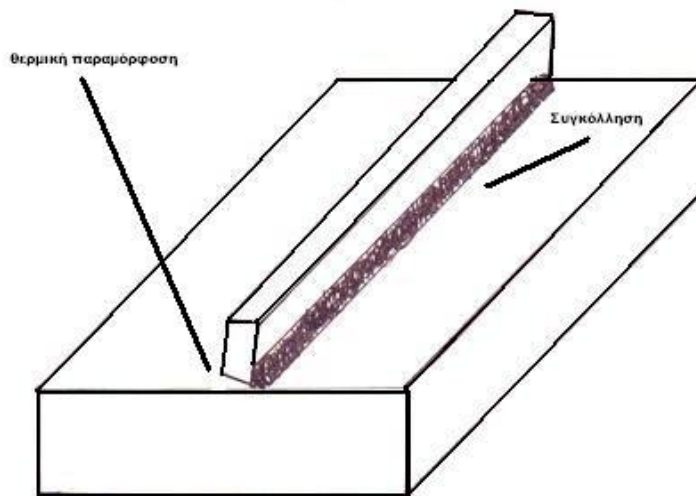
Εξετάζοντας όμως αυτές τις τεχνικές και από τεχνολογική σκοπιά παρατηρείται πως δεν καταφέρνουν να παράγουν προϊόντα υψηλής ποιότητας. Δημιουργούν στρεπτικές παραμορφώσεις αναγκάζοντας τις βιομηχανίες να καταναλώνουν ιδιαίτερα μεγάλο χρόνο στο να επαναφέρουν την συναρμογή στην επιθυμητή μορφή μετά την συγκόλληση.

Για παράδειγμα εάν συγκολλήσουμε δυο κάθετες μεταξύ τους πλάκες χάλυβα (σχήμα 1.1)



σχήμα 1.1

με τις παραδοσιακές τεχνικές παρατηρείται πως στο τέλος της διαδικασίας η επιθυμητή καθετότητα μεταξύ τους έχει χαθεί λόγω θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων (σχήμα 1.2).



σχήμα 1.2

Έτσι αναγκάζομαστε να δαπανήσουμε χρόνο στο να επαναφέρουμε τις πλάκες στην αρχική τους θέση, αυξάνοντας κατά συνέπεια το κόστος παραγωγής της εκάστοτε συναρμογής.

Τα προβλήματα αυτά στις κατασκευές ανάγκασαν την επιστήμη να ασχοληθεί διεξοδικά με την διαδικασία της συγκόλλησης δημιουργώντας τις ιδιαίτερα ανεπτυγμένες τεχνικές που θα εξεταστούν στη συνέχεια.

Η τεχνική της δέσμης ηλεκτρονίων (Laser) ήταν ήδη γνωστή από το 1964 [2], και στις μέρες μας έχει εξελιχθεί ραγδαία. Η τεχνική συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης (FSW) η οποία εφευρέθηκε στο συγκολλητικό ινστιτούτο της Αγγλίας (The Welding Institute TWI-Cambridge) είναι σχεδόν σύγχρονη (παρουσιάστηκε το 1991) και σε ένα μεγάλο μέρος της βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο [3].

Κεφάλαιο 2: Συγκόλληση με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων

Laser beam welding

2.1 Εισαγωγή

Η ονομασία LASER είναι το ακρωνύμιο περιγραφής στην αγγλική γλώσσα των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που σε ελληνική μετάφραση σημαίνουν ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας στην υπέρυθρη και υπεριώδη περιοχή.

Στην πραγματικότητα η ένωση δύο μετάλλων χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία Laser είναι μία πολύ σύνθετη διαδικασία και εμπεριέχει την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ενός πλήθους αλληλοσυγκρουόμενων φυσικών και μεταλλουργικών χαρακτηριστικών. Όταν αυτή η ισορροπία επιτευχθεί, το αποτέλεσμα είναι μία κόλληση υψηλής ποιότητας με εξαιρετικές μεταλλουργικές ιδιότητες.

Αυτά τα χαρακτηριστικά και η δυνατότητα της ακριβούς επαναλαμβανόμενης συγκολλητικής διαδικασίας, μέσω ελέγχου CNC, καθώς και το χαμηλό κόστος έκαναν την με χρήση Laser συγκόλλησης καθεστώς σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Η κύρια ιδιότητα της ακτινοβολίας Laser είναι η δυνατότητα παραγωγής δέσμης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία διακρίνονται από την μεγάλη παραλληλότητα της ροής, την πυκνότητα της ενέργειας και επίσης την μικρή σκέδαση που παρουσιάζουν.

Η χρήση των διάφορων τύπων Laser συγκόλλησης προκύπτει από τις παρακάτω κύριες ιδιότητες τους :

§ Η περιοχή δράσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μόνο στην επιφάνεια του αντικειμένου.

§ Η περιοχή ακτινοβολίας των ορατών κυμάτων χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη εισχώρηση για την θέρμανση των αντικειμένων

§ Η περιοχή ακτινοβολίας κοντά στην υπεριώδη περιοχή χαρακτηρίζεται με ακόμη μεγαλύτερη εισχώρηση για την θέρμανση των αντικειμένων σε σχέση με την ορατή ακτινοβολία.

2.2 Συγκολλητική διαδικασία Laser

Κατά την διαδικασία συγκόλλησης Laser παρατηρούμε μια λεπτή ισορροπία ανάμεσα στην θέρμανση και ψύξη μιας μικρής περιοχής των προς συγκόλληση κομματιών με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας "λίμνης" λιωμένου μετάλλου η οποία ιδανικά παραμένει σταθερή μέχρι την στερεοποίηση της με αποτέλεσμα μια υψηλής ποιότητας συγκόλληση.

Ατυχείς συγκολλήσεις παρατηρούνται εάν διαταραχθεί η λεπτή προαναφερθείσα θερμοκρασιακή ισορροπία. Για παράδειγμα εάν η λίμνη του τετηγμένου μετάλλου είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή, ή εάν παρουσιαστεί εξάτμιση του προς συγκόλληση μετάλλου. Η ποιότητα της κόλλησης μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την εξάτμιση κάποιων στοιχείων των κραμάτων. Επίσης κατά την διαδικασία παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές που έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών κατά την στερεοποίηση και προφανώς αποτυχημένων ενώσεων.

Η διατήρηση της ιδιαίτερα σημαντικής θερμοκρασιακής ισορροπίας κατά την διάρκεια της συγκόλλησης εξαρτάται από την

συνεχή απορρόφηση της Laser ακτινοβολίας. Εάν αυτή η ισορροπία παραμένει αδιατάραχτη κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, παράγονται υψηλής ποιότητας προϊόντα.

Το μονοπάτι που ακολουθείτε από την ακτινοβολία προς το κατεργαζόμενο κομμάτι διακόπτεται συχνά από τα καυτά αέρια που δημιουργούνται κατά την διαδικασία. Με αυτούς τους περιορισμούς είναι απορίας άξιο πως είναι εφικτή η κατασκευή υψηλής μεταλλουργικής ποιότητας προϊόντων.

Ένας πρωταρχικός στόχος της έρευνας στις κολλήσεις Laser είναι να αναγνωριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την σταθερότητα της κόλλησης. Οι δυνατότητες ελέγχου ακριβείας στην διαδικασία συγκόλλησης Laser που υπάρχουν είναι τεράστιες από την στιγμή που ελέγχονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την σταθερότητα της.

Η διακύμανση της αντίδρασης του κατεργαζόμενου κομματιού είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας αποσταθεροποίησης της διαδικασίας .

Το πλάτος της συχνότητας ακτινοβολίας στο φάσμα που σχετίζεται με τις διαδικασίες συγκόλλησης εκτείνεται τουλάχιστον στα 10MHz για τις διακυμάνσεις του πλάσματος. Οι μηχανικές κινήσεις, ειδικά αυτές που είναι σχετικές με τις ταλαντεύσεις της υγρής περιοχής του μετάλλου χαρακτηρίζονται από μικρότερο πλάτος συχνότητας, συνήθως μικρότερο από 10MHz. Παρατηρούμε επίσης πως κατά την διάρκεια της διαδικασίας υπάρχουν και ακουστικά ερεθίσματα τα οποία μας δίνουν στοιχεία για την πορεία της συγκόλλησης πέρα από τα οπτικά, δηλαδή την ακτινοβολία και τα καυσαέρια.

Παρατηρώντας την περιοχή κόλλησης που επηρεάζεται από την ακτινοβολία βλέπουμε δυο βασικές "τεχνικές" εξετάζοντας τον τρόπο που προσπίπτει η ακτινοβολία επάνω στο μέταλλο και το αποτέλεσμα που αυτή δημιουργεί. Αυτές είναι οι ακόλουθες διαδικασίες:

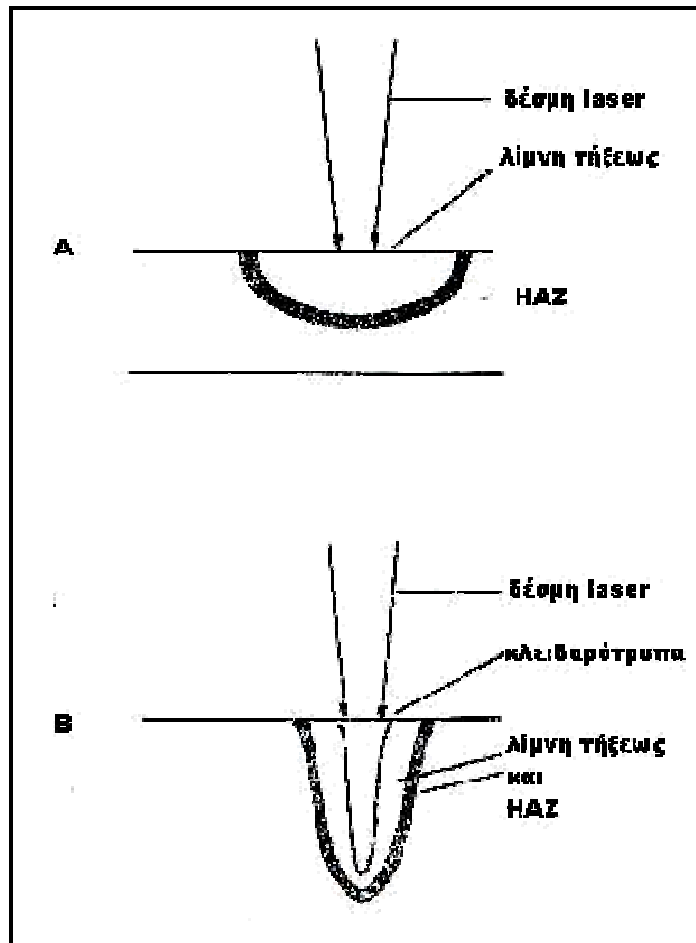
2.2.1 Διαδικασία συγκόλλησης αγωγού.

Η διαδικασία αυτή δίνει λιγότερη διείσδυση στο υλικό και το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι οι λιγότερες πιθανότητες που έχει να παγιδευτούν αέρια στην περιοχή συγκόλλησης ,αέρια που θα δημιουργούσαν μια χαμηλής ποιότητας κόλληση λόγω δημιουργίας πόρων στην επιφάνεια.

2.2.2 Διαδικασία συγκόλλησης διείσδυσης (κλειδαρότρυπας)

Κατά την διαδικασία αυτή η λίμνη τετηγμένου μετάλλου που έχει δημιουργηθεί λόγω ακτινοβολίας διασπάται από την ακτίνα, επιτρέποντας της να εισέλθει στην περιοχή συγκόλλησης .Κατά την διαδικασία αυτή οι πιθανότητες να εγκλωβιστεί αέρας μέσα στην κόλληση αυξάνονται.

Στο ακόλουθο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι δύο τεχνικές:



σχήμα 2.1: Σύγκριση συγκόλλησης αγωγού (A) και διείδυσης (B)[4]

2.3 Σύγκριση με άλλες τεχνικές συγκόλλησης

Η διαδικασία συγκόλλησης με Laser δεν είναι πανάκεια αλλά έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές διαδικασίες συγκόλλησης. Το πρωταρχικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα συγκέντρωσης της ακτινοβολίας σε μια ιδιαίτερα περιορισμένη περιοχή, δημιουργώντας μια πολύ έντονη πηγή θερμότητας, και στιγμιαία να μεταφέρει αυτή την πηγή κατά μήκος της περιοχής προς κόλληση. Από αυτή την άποψη η συγκόλληση με Laser μπορεί να συγκριθεί με την

ηλεκτροσυγκόλληση, παρουσιάζοντας όμως το πρόσθετο πλεονέκτημα του ότι μπορεί να γίνει σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και χωρίς την αναγκαία ύπαρξη επιπλέον υλικού (συνήθως).

Παρότι συνήθως η τεχνική υποδομή σε μηχανήματα που απαιτείται για την συγκόλληση με Laser είναι υψηλού κόστους, η παραγωγή ποιοτικών τεμαχίων με υψηλές μεταλλουργικές ιδιότητες κάνει την εφαρμογή της οικονομικά ανταγωνιστική. Έτσι στην σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία οι συγκολλήσεις ως επί το πλείστον πραγματοποιούνται με αυτή την διαδικασία.

Υψηλής ποιότητας κολλήσεις μπορούν να φτάσουν σε ταχύτητες έως και 10m/min όταν γίνονται σε μηχανήματα CNC. Επίσης τα μηχανήματα αυτά μας προσφέρουν μια σαφή εικόνα ανά πάσα στιγμή της παραγωγικής διαδικασίας για την ποιότητα της συγκόλλησης.

Η συγκόλληση με Laser επίσης μας προσφέρει νέες δυνατότητες στην συγκόλληση “δύσκολων” υλικών όπως τα κράματα αλουμινίου ή μαγνησίου. Για παράδειγμα κράματα αλουμινίου, όπως η σειρά A1 7000, ενώ είναι αδύνατον να συγκολληθούν με συμβατικές τεχνικές, συγκολλούνται αξιόπιστα με την τεχνική Laser προσφέροντας συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας και αντοχής.

Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα στην διαδικασία συγκόλλησης με Laser. Το κυριότερο είναι το υψηλό κόστος μιας εγκατάστασης. Επίσης το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης είναι μεγάλο, ειδικά για εφαρμογές όπου απαιτείται συνεχής ροή αερίων (όπως το ήλιο-He) κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Η συγκέντρωση σε μικρή περιοχή της ακτινοβολίας του Laser, παρότι αποτελεί πλεονέκτημα στην θέρμανση του κομματιού, δημιουργεί προβλήματα στην προετοιμασία αυτού, αφού έστω και μικρές αποκλίσεις από τις επιθυμητές διαστάσεις (< 0,1mm) μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη θερμική ικανότητα που συνεπάγεται συγκόλληση χαμηλής ποιότητας.

Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι πως σε ιδιαίτερα ανακλαστικά υλικά, όπως το αλουμίνιο ή ο χαλκός απαιτείται πολύ προσεκτικός υπολογισμός της ανάκλασης του Laser και η ελαχιστοποίηση της. Για την συγκόλληση όμως τέτοιων υλικών, απαιτείται ένα ιδιαίτερα δυνατό Laser λόγω των υψηλών θερμικών απαιτήσεων τους. Αυτές οι συνθήκες έχουν συχνά σαν αποτέλεσμα την ανάκλαση της δέσμης πίσω στην κεφαλή ακτινοβολίας με συνέπεια την καταστροφή της. Επίσης έστω και μικρή απόκλιση από τις προκαθορισμένες θέσεις των συσκευών που παίρνουν μέρος στην διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα επικίνδυνες ανακλάσεις της ακτίνας Laser. Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας 2.1 των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της συγκόλλησης με laser σε σχέση με άλλες τεχνικές συγκόλλησης.

Παράμετροι	LB	EB	Διεργασία		RW
			GTA	GMA	
Αποτέλεσμα κόλλησης	0	0	-	-	+
Υψηλός λόγος όψης	+	+	-	-	-
Μικρή HAZ	+	+	-	-	0
Υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας	+	+	-	+	-
Γεωμετρία κόλλησης	+	+	0	0	0
Συγκόλληση σε ατμ.πίεση	+	-	+	+	+
Συγκόλ. ανακλαστικών μετάλλων	-	+	+	+	+
Συνδιασμος με υλικό πλήρωσης	0	-	+	+	-
Αυτοματοποιημένη διαδικασία	+	-	+	0	+
Κόστος εγκατάστασης	-	-	+	+	+
Κόστος λειτουργίας	0	0	+	+	+
Αξιοπιστία	+	-	+	+	+
Προσάρτηση	+	-	-	-	-

+ πλεονεκτήμα - μειονεκτήμα 0 ουδέτερο ,LB δέσμη LASER,EB δέσμη ηλεκτροδίου,GTA τόξου αερίου-βολφραμίου,GMA τόξου αερίου-μετάλλου,RW συγκόλληση αντίστασης

πίνακας 2.1: Σύγκριση της συγκόλλησης LASER με άλλες τεχνικές συγκόλλησης

2.4 Συγκολλητικά συστήματα Laser

Η συγκόλληση μετάλλων σε εμπορική βάση απαιτεί εγκαταστάσεις υψηλής αξιοπιστίας, ευκολίας χειρισμού και χαμηλού κόστους. Επιπλέον, το σύστημα Laser πρέπει να προσφέρει μια ένταση ακτινοβολίας της τάξεως $1-5 \times 10^6 W/cm^2$ στην περιοχή κόλλησης του κατεργαζόμενου κομματιού. Ουσιαστικά όλα τα συγκολλητικά συστήματα εμπορικής εκμετάλλευσης διαχωρίζονται σε δυο μεγάλες υποκατηγορίες :

- **Nd: YAG Laser**
- **CO₂ Laser**

Παρακάτω ακολουθεί ανάλυση των δυο αυτών κατηγοριών και των διαφορών τους.

2.4.1 Nd: YAG Lasers

Εμπορικά Nd:YAG Lasers για συγκολλητικές εφαρμογές είναι διαθέσιμα από πολλούς προμηθευτές. Η μέση παρερχομένη ενέργεια είναι από 0,3 έως 3 kW αλλά τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με Laser μεγιστοποιούν αυτή τη δύναμη τουλάχιστον στα 4kW. Αυτά τα Laser μπορούν να λειτουργήσουν σε 3 διαφορετικές μορφές της ακτινοβολίας. Αυτές είναι:

- Λειτουργία συνεχούς ακτινοβολίας
- Διακοπτόμενη ακτινοβολία (παλμική λειτουργία)
- Στιγμιαία ακτινοβολία (Q-switched)

Τα χαρακτηριστικά της παραγομένης ακτινοβολίας Laser παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2.2:

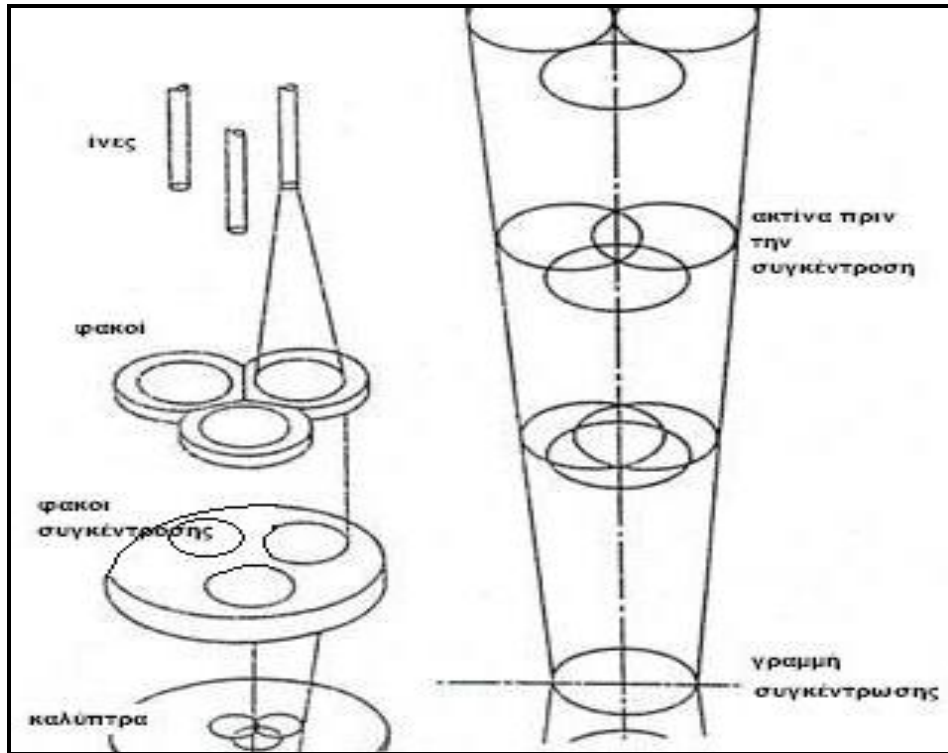
Μορφή Ακτινοβολίας	Μέση ισχύς (kW)	Μέγιστη ισχύς (kW)	διάρκεια παλμού	Συχνότητα	Ενέργεια/Παλμο (J)
Συνεχούς ακτ.	0.3-4	—	—	—	—
Παλμικής	έως 4	έως 50	0.2-20 msec	1-500 Hz	έως 100
Στιγμιαίας	έως 4	έως 100	<1 μsec	έως 100 kHz	10 ⁻³

πίνακας 2.2:Χαρακτηριστικά εξόδου Nd:YAG LASER για διαφορετικές μορφές ακτινοβολίας

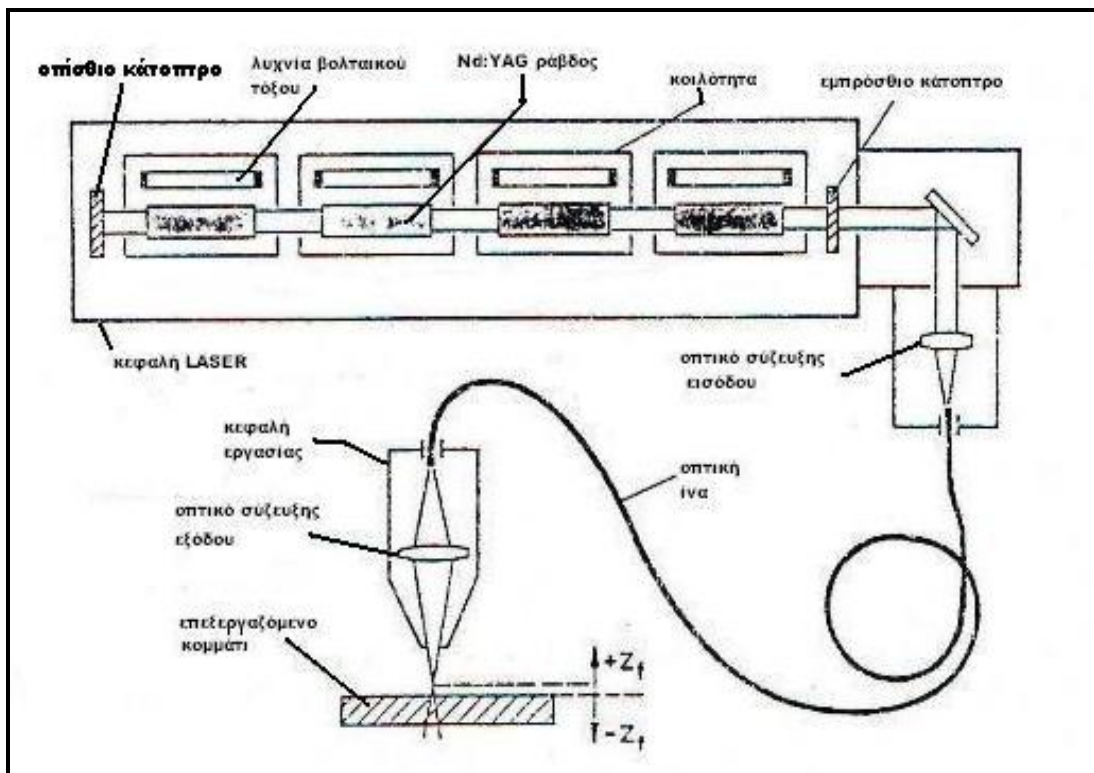
Στην παλμική λειτουργία δίνεται η δυνατότητα να τροποποιηθεί η μορφή (πλάτος, μήκος) του παλμού, βελτιστοποιώντας έτσι τις συνθήκες συγκόλλησης, ειδικά σε κάποια κράματα αλουμινίου. Η παλμική λειτουργία προσφέρει μια περιοχή παλμικών μηκών από 0.1 msec έως και λειτουργία συνεχούς ακτινοβολίας. Τα συνήθη μήκη παλμού για συγκολλητικές εφαρμογές κυμαίνονται από 1 έως 20 msec.

Κατά την λειτουργία στιγμιαίας ακτινοβολίας η παραγόμενη ακτινοβολία δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για διαδικασίες συγκόλλησης, λόγω του εξαιρετικά μικρού μήκους παλμού (<1μsec) παρότι μπορεί να δώσει ιδιαίτερα υψηλές συχνότητες (έως και 100 kHz). Η υψηλή στιγμιαία ενέργεια σε αυτούς τους παλμούς συμβάλλει στην δημιουργία πλάσματος και την διάσπαση των αερίων.

Η υψηλή μέση ενέργεια στα συστήματα Nd:YAG Laser επιτυγχάνεται συνδυάζοντας διάφορες μεμονωμένες δέσμες Laser σε μια συγκεντρωτική δέσμη. Ένας τυπικός σχηματισμός Nd:YAG Laser παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3, ενώ στο ακόλουθο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία συγκέντρωσης της δέσμης του Nd:YAG Laser.



σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας συγκέντρωσης της δέσμης [5]



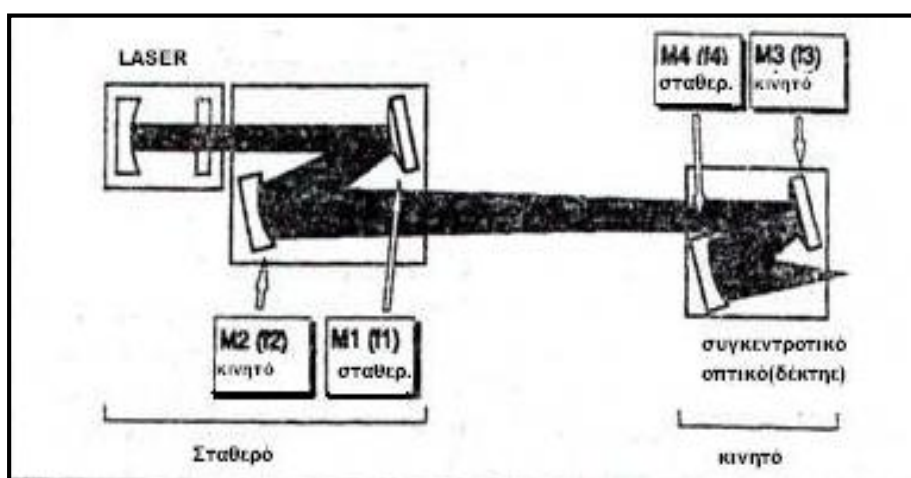
σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη LASER τύπου Nd:YAG [6]

2.4.2 Laser CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα)

Τα Laser CO₂ παραμένουν στην πρώτη γραμμή των βιομηχανικών συγκολλητικών Laser λόγω του ότι είναι απλά, αξιόπιστα μηχανήματα παραγομένης ενέργειας έως και 50kW. Η τάση που παρατηρείται στις συγκολλητικές εφαρμογές με Laser, να χρησιμοποιούνται υψηλότερης ενέργειας Laser έχουν κάνει την χρήση συνεχούς λειτουργίας Laser CO₂ (ενέργειας 5-10 kW) συνήθη εικόνα για την συγκόλληση διαφόρων εξαρτημάτων.

Το Laser CO₂ είναι μια αποτελεσματική συσκευή, συγκρινόμενη με άλλου τύπου laser όπως το Nd:YAG Laser. Το μίγμα αερίων που χρησιμοποιείται κατά την συγκόλληση περιέχει N₂ και αέριο He τα οποία κυκλοφορούν παράλληλα με το CO₂ μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα, ανακυκλώνοντας το μεγαλύτερο μέρος τους, μειώνοντας έτσι το κόστος λειτουργίας.

Η κατεύθυνση της ακτίνας Laser CO₂ από το Laser προς το επεξεργαζόμενο κομμάτι εμπλέκει μια ή περισσότερες ανακλάσεις, ακολουθούμενες από επανασυγκέντρωση της διασπαρμένης δέσμης. Στο ακόλουθο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη συστήματος Laser CO₂:



σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος συγκέντρωσης της δέσμης του LASER μέσω δύο ρυθμιζόμενων κατόπτρων [7].

2.5. Σύγκριση Nd: YAG Laser και Laser CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα)

Πολλές συζητήσεις γίνονται στην επιστημονική κοινότητα σχετικά με την υπεροχή του ενός ή του άλλου τύπου Laser. Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα του καθενός τύπου Laser είναι τα ακόλουθα:

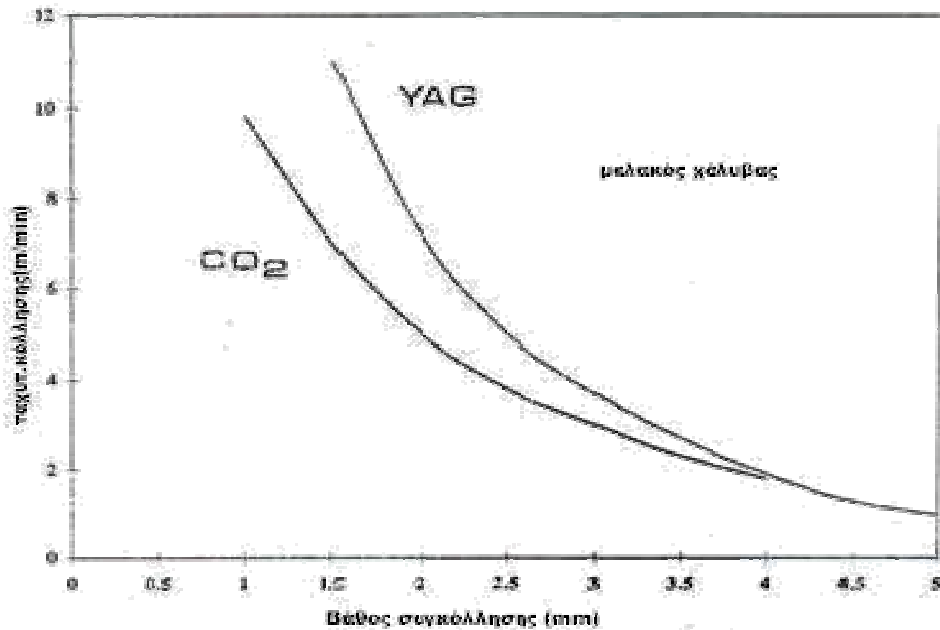
Τα πλεονεκτήματα του Nd:YAG Laser είναι:

- § Ανώτερη ποιότητα κόλλησης σε ανακλαστικά μέταλλα.
- § Μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με συστήματα CO₂ ίδιας ενέργειας
- § Δυνατότητα μεταφοράς της ακτίνας μέσω οπτικών ινών

Τα Laser CO₂ έχουν τα εξής πλεονεκτήματα :

- § Υψηλή ηλεκτρική αποτελεσματικότητα
- § Χαμηλό κόστος λειτουργίας
- § Ευκολία στην επίτευξη υψηλής ενέργειας ακτίνας (έως και 45kW)

Επίσης παρατηρούνται διαφορές στην ταχύτητα και το βάθος συγκόλλησης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 2.5:



σχήμα 2.5: Σύγκριση ταχύτητας κόλλησης-Βάθους συγκόλλησης των δύο τύπων LASER με την ίδια ισχύ (3kW)[8]

2.6 Laser συγκόλληση μετάλλων

Η συγκολλητική ικανότητα δύο μετάλλων έγκειται όχι μόνο στον τύπο του κράματος και τα συστατικά του αλλά και στην βιωσιμότητα της συγκόλλησης τέτοιων μετάλλων κάτω από τις απαιτούμενες για αυτή συνθήκες. Για παράδειγμα συγκόλληση κάποιων υλικών που μπορεί να πραγματοποιείται σε εργαστηριακές συνθήκες είναι πιθανόν να μην προσφέρεται για εμπορική εκμετάλλευση λόγω υψηλού κόστους, μεγάλων ποσών αποβαλλόμενης θερμότητας κτλ.

Για την παραγωγή προϊόντων υψηλών μεταλλουργικών ιδιοτήτων πρέπει να ελεγχθούν κάποιες μεταβλητές σχετικά με τις συνθήκες συγκόλλησης. Αυτές είναι:

- § Σωστός σχεδιασμός και προετοιμασία της συγκόλλησης
- § Θερμικός κύκλος της συγκόλλησης
- § Ροή των αερίων και η σύστασή τους

- § Προθέρμανση (εάν είναι απαραίτητη)
- § Είδος πλήρωσης αερίων και βαθμός τροφοδότησης τους
- § Αλλαγές στην σύσταση του κράματος
- § Συμπεριφορά της περιοχής θέρμανσης όταν υπόκειται σε μεταβολές θερμοκρασίας.

Στους ακόλουθους πίνακες 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι συγκολλητικές ικανότητες διαφορετικών μετάλλων .

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb	Sn
W																				
Ta																				
Mo																				
Cr																				
Co																				
Ti																				
Be																				
Fe																				
Pt																				
Ni																				
Pd																				
Cu																				
Au																				
Ag																				
Mg																				
Al																				
Zn																				
Cd																				
Pb																				
Sn																				

πίνακας2.3: Δυνατότητες συγκόλλησης με LASER ανόμοιων μετάλλων [9]

Πίνακας 2.4: Συγκολλητικές δυνατότητες διαφόρων Μετάλλων	
Χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα υψηλής αντοχής κράματα ατσαλιού	Καλές κολλήσεις και με τους δύο τύπους Laser CO ₂ & Nd:YAG, υψηλή μορφοποίηση
Μεσαίας και Υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ατσάλια	Αποδεκτές κολλήσεις αλλά επιρρεπείς σε θραύση, χαμηλή αγωγιμότητα
Κράματα Ατσαλιού (σωληνώσεις, κατασκευές πλοίων και κτηρίων)	Ικανοποιητική συγκ.ικανότητα αλλά πορώδη αποτελέσματα σε συγκ. μερικής διείδυσης
Γαλβανισμένο Ατσάλι	Καλές κολλήσεις και υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης
Ατσάλι ωστενιτικής μικροδομής	Πολύ καλές κολλήσεις χαμηλό επίπεδο πόρων και υψηλή αντοχή στη διάβρωση
Ατσάλι φερριτικής μικροδομής	Αποδεκτές κολλήσεις, μειωμένη σκληρότητα και αντίσταση στη διάβρωση ,HAZ μπορεί να έχει υψηλή σκληρότητα
Ατσάλι μαρτενσιτικής μικροδομής	Σκληρές κολλήσεις, απαιτεί σταδιακή θέρμανση και ψύχρανση
Κράματα υψηλής θερμικής αντίστασης	Εξετάζεται το κάθε κράμα ξεχωριστά πιθανή χρήση υλικού πληρώσεως
Τιτάνιο και κράματα αυτού	Καλές κολλήσεις ,απαιτεί την χρήση αερίου θωράκισης
Αλουμίνιο και κράματα αυτού	Καλές κολλήσεις σε ελεγχόμενες συνθήκες απώλεια πτητικών στοιχείων οδηγεί σε θραύση ιδιαίτερα σε κράματα της σειράς 6000
Μαγνήσιο	Καλές κολλήσεις με χρήση CO ₂ LASER
Χαλκός	Αποδεκτές κολλήσεις μόνο σε λεπτά φύλλα αυτού με Nd:YAG laser
Μπρούτζος	Δύσκολη λόγω απώλειας Zn και μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας

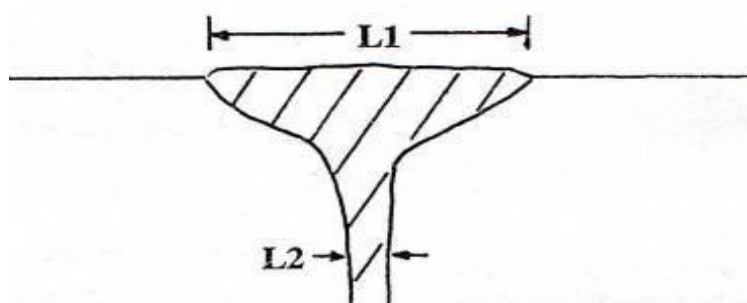
2.6.1 Παράμετροι Συγκόλλησης

Πέρα από τον τύπο του Laser, την ένταση του και την ταχύτητα συγκόλλησης που ορίζουν την προσφερόμενη ενέργεια στο επεξεργαζόμενο κομμάτι, μια επιτυχής συγκόλληση απαιτεί βελτιστοποίηση παραμέτρων, όπως το μέγεθος και η τοποθεσία του σημείου συγκέντρωσης της δέσμης, το μέγεθος της ροής του αερίου και η γεωμετρία της κεφαλής του Laser.

2.6.2 Ένταση του Laser

Το λειτουργικό εύρος ενός συγκολλητικού συστήματος Laser είναι η πρώτη παράμετρος που ορίζει τη σχέση ανάμεσα στην ένταση του Laser, την ταχύτητα συγκόλλησης και το βάθος διείσδυσης για ένα δεδομένο υλικό. Μία ομάδα αυτών των καμπύλων παράγεται εμπειρικά με τη βοήθεια οδηγιών από προηγούμενα πειραματικά δεδομένα.

Το πλάτος της φουσαλίδας μπορεί επίσης να μετρηθεί και να συσχετισθεί με την ταχύτητα συγκόλλησης. Το σχήμα ενός τυπικού προφίλ/ μοντέλου συγκόλλησης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 2.6:



σχήμα 2.6:Τυπικό μοντέλο προφίλ συγκόλλησης

Γενικά το πλάτος της φουσαλίδας είναι μεγαλύτερο στην επιφάνεια της συγκόλλησης και μικρότερο στο χαμηλότερο μέρος της συγκόλλησης

παρότι η διαφορά ανάμεσα στα πλάτη αυτά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα συγκόλλησης και την ένταση του Laser.

2.6.3 Συγκέντρωση (Focussing)

Ο παρατηρητής περιμένει πως η συγκέντρωση της δέσμης του Laser στην επιφάνεια του κομματιού να είναι αρκετή για την διασφάλιση ικανοποιητικών αποτελεσμάτων. Αυτό συχνά όμως δεν συμβαίνει. Το πρώτο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της ακριβής θέσεως της μέγιστης συγκέντρωσης. Συχνά παρουσιάζονται παρεμφερή αποτελέσματα σε περιοχές γύρω από την μέγιστη τιμή συγκέντρωσης.

Το πρόβλημα μεγιστοποιείται σε μεγάλα βάθη συγκόλλησης. Η χρήση ενός σφηνοειδούς ακρυλικού άκρου, το οποίο περνά μέσα από την Laser ακτίνα, είναι ένας τρόπος εντοπισμού της μέγιστης συγκέντρωσης. Μια άλλη μέθοδος είναι ο υπολογισμός της θέσης της μέγιστης συγκέντρωσης από το σχήμα της ακτίνας στις δύο πλευρές της συγκέντρωσης.

2.6.4 Αέριο θωράκισης (Shield Gas)

Ένα αέριο που ρέει ομοαξονικά με την ακτίνα Laser ή που προσπίπτει στην ακτίνα από τα πλαϊνά της υπηρετεί διάφορους σκοπούς και είναι κοινό χαρακτηριστικό στα συστήματα συγκόλλησης Laser.

Ο πρώτος σκοπός που υπηρετεί το αέριο είναι να προλαμβάνει την δημιουργία οξειδωσης στην περιοχή συγκόλλησης

Ο δεύτερος και σημαντικότερος σκοπός του αερίου είναι να δυσχεραίνει την δημιουργία πλάσματος στην περιοχή εξάτμισης πάνω

από την συγκόλληση. Επίσης απομακρύνει την όποια ποσότητα πλάσματος μπορεί να έχει δημιουργηθεί κατά την διαδικασία.

Ο τελευταίος σκοπός που το αέριο θωράκισης επιτελεί είναι το να "σιγουρεύει" πως η ακτίνα φτάνει στην περιοχή συγκόλλησης χωρίς την παραμικρή διακοπή, εξασφαλίζοντας έτσι προϊόντα υψηλής ποιότητας.

Αέρια που χρησιμοποιούνται σαν αέρια θωράκισης είναι το Ήλιο-He και το Νίτρο-N το οποίο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το Ήλιο αλλά είναι κατά πολύ οικονομικότερο.

Η συνήθης ροή του αερίου θωράκισης είναι της τάξεως 10-40lit/min με τις μεγαλύτερες τιμές να είναι αναγκαίες σε κολλήσεις υψηλής ταχύτητας (>10m/min).

2.6.5 Δεδομένα συγκόλλησης Laser

Αρκετά εμπειρικά δεδομένα υπάρχουν όσον αφορά τη σχέση ανάμεσα στην ένταση του Laser, την ταχύτητα συγκόλλησης, το βάθος διείσδυσης, το πλάτος της ακτίνας και τις συγκολλητικές ιδιότητες πολλών μετάλλων. Αυτά τα δεδομένα σε πολλές περιπτώσεις είναι συνιστάμενες μετρούμενων ποσοτήτων, όπως το βάθος διείσδυσης ή το πλάτος της ακτίνας σε σχέση με την ένταση του Laser και την ταχύτητα κόλλησης αλλά σε γενικές γραμμές αυτές οι συνιστάμενες έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης. Αυτά είναι :

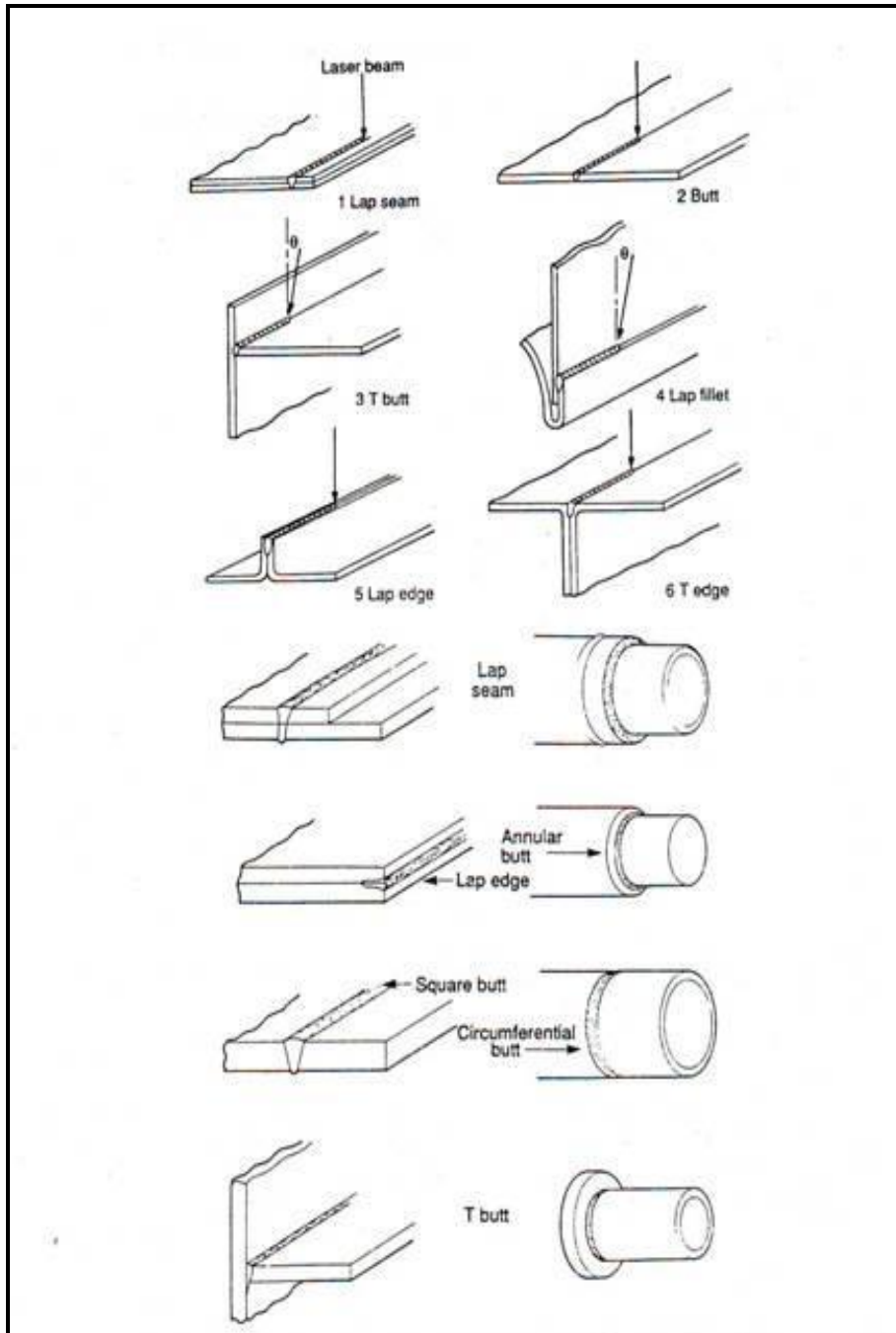
- Μια αύξηση στην ένταση του Laser σε συνάρτηση με μια σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης έχει σαν αποτέλεσμα μία αύξηση στο βάθος διείσδυσης
- Μία αύξηση στην ταχύτητα κόλλησης με σταθερή ένταση του Laser έχει σαν αποτέλεσμα μία μείωση στο βάθος διείσδυσης

- Για ένα δεδομένο βάθος διείσδυσης η ταχύτητα κόλλησης είναι ανάλογη της έντασης του Laser.

2.7 Χαρακτηριστικά ενώσεων

Η δυνατότητα να εφαρμόζεται σε ποικίλες και δύσκολες εφαρμογές είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με την μέθοδο του Laser. Έτσι έχουμε δυνατότητα συγκόλλησης διαφόρων γεωμετρικών ενώσεων. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν χρησιμοποιούμε πρόσθετο υλικό ,αλλά σε όλες τις περιπτώσεις η διαφορά ανάμεσα σε μία καλή κόλληση και μία απορριπτέα είναι η εφαρμογή στο σημείο κόλλησης. Αυτή η αναγκαιότητα για "συμπαγείς" εφαρμογές έχει σαν αποτέλεσμα τις μικρές ανοχές στην γεωμετρία των ενώσεων και (στις "ραφές" δηλαδή)και δείχνει την σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην συγκέντρωση (focus) του Laser και τον σεβασμό σε αυτή την ανάγκη.

Η συγκόλληση μέσω Laser μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν η θερμική επίδραση της ακτινοβολίας του Laser εξαπλώνεται ιδανικά στην προς κόλληση περιοχή. Αυτό οδηγεί σε ορισμένες εξιδανικευμένες αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στην ακτίνα του Laser και των προς κόλληση κομματιών. Κάποιες συνήθεις ενώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7 που ακολουθεί.

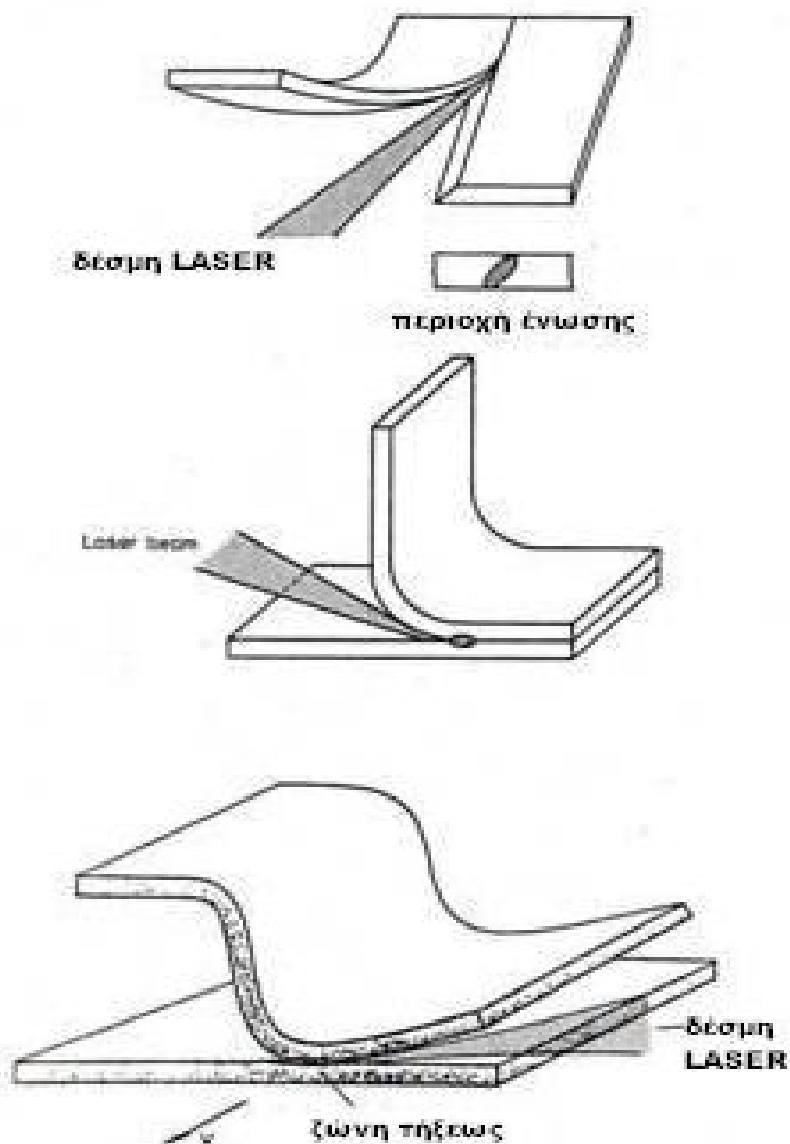


σχήμα 2.7: Βασικές διατάξεις συγκολλήσεων LASER για την συγκόλληση πλακών και σωλήνων [10]

2.7.1 Ειδικές εφαρμογές

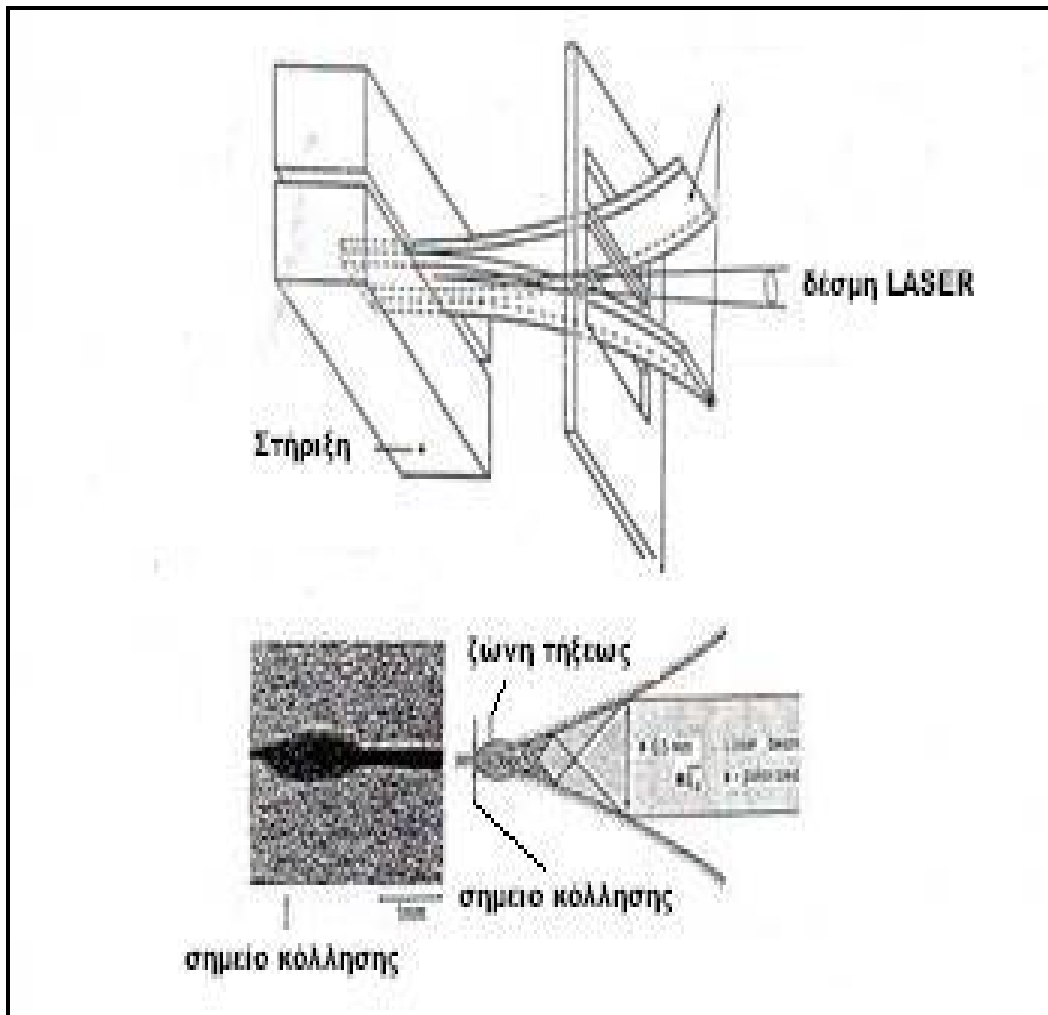
Η τεχνική της συγκόλλησης με Laser μας δίνει την δυνατότητα να την εφαρμόσουμε σε ενώσεις ιδιαίτερα δύσκολες έως τώρα .Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

1.Συγκόλληση σε παραβολή:



σχήμα 2.8: Διατάξεις συγκολλήσεων παραβολής [11]

2. Συγκόλληση ιδιαίτερα πλατιών επιφανειών:

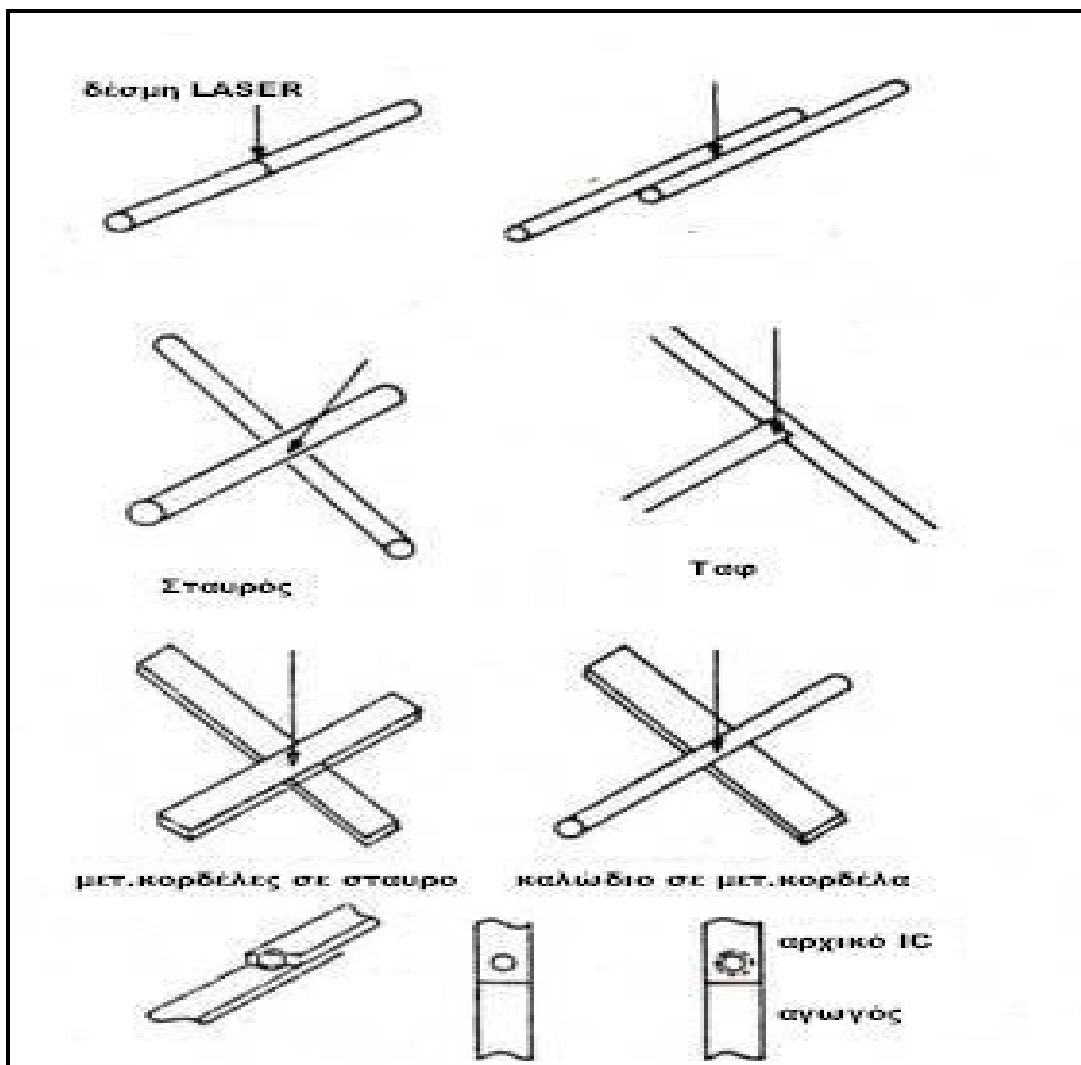


σχήμα 2.9: Τεχνική συγκόλλησης πλατιών επιφανειών [12]

Δημιουργούμε ένα σχετικά μικρό κενό ανάμεσα στις επιφάνειες τις οποίες θέλουμε να συγκολλήσουμε. Κατόπιν η ακτινοβολία που προσπίπτει στο κενό, διαθλάται δίνοντας μας έτσι μια κόλληση καθ' όλο το πλάτος της επιφάνειας [13].

3. Σημειακή συγκόλληση

4. Μίκρο-συγκολλήσεις



σχήμα 2.10::Διατάξεις μικροσυγκολλήσεων LASER

Η ακτινοβολία πρέπει να προσπίπτει και στα δύο στοιχεία για βέλτιστα αποτελέσματα αν και το ακριβές σημείο ,όπως επίσης και η ένταση διαφέρουν σε κάθε εφαρμογή [14].

2.8 Μηχανικές ιδιότητες

Η δημιουργία μιας κόλλησης αναπόφευκτα μετατρέπει διάφορες μηχανικές ιδιότητες όπως η σκληρότητα, η αντοχή σε εφελκυσμό, το όριο κόπωσης και κάποιες παραμέτρους μορφοποίησης. Η μεταλλουργική βάση γι' αυτές τις αλλαγές θα αναλυθεί παρακάτω. Προς το παρόν θα ασχοληθούμε με μερικά διαθέσιμα δεδομένα για την στατική και δυναμική συμπεριφορά των κολλήσεων Laser στα μέταλλα που αυτές εφαρμόζονται.

2.8.1 Στατική αντοχή

Εγκάρσιες και διαμήκεις εφελκυστικές δοκιμές χρησιμοποιούνται συχνά για να αξιολογήσουμε την αντοχή και την επιμήκυνση των κολλήσεων Laser στα μέταλλα. Οι περισσότερες δοκιμές έχουν επικεντρωθεί στα ατσάλια που χρησιμοποιούνται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες για την κατασκευή εξαρτημάτων για τα αμαξώματα [15].

Στις εγκάρσιες δοκιμές στο ατσάλι παρατηρείται θραύση λόγω εφελκυσμού στο μέταλλο βάσης και όχι στην κόλληση ή την περιοχή που επηρεάστηκε από την αύξηση της θερμοκρασίας. Θραύση στην κόλληση παρατηρείται στις διαμήκεις δοκιμές παρουσιάζοντας ρωγμές στην εγκάρσια διατομή της κόλλησης

Στα κράματα Αλουμινίου το όριο θραύσης εξαρτάται από τον τύπο του κράματος, της συνθήκης συγκόλλησης και από το εάν χρησιμοποιήθηκε ή όχι υλικό πληρώσεως. Σε εγκάρσιες δοκιμές εφελκυσμού παρατηρήθηκε πως το κράμα Al 7075-0 θραύεται στην περιοχή βάσης (αυτή που δεν επηρεάζεται από την συγκόλληση) ενώ το

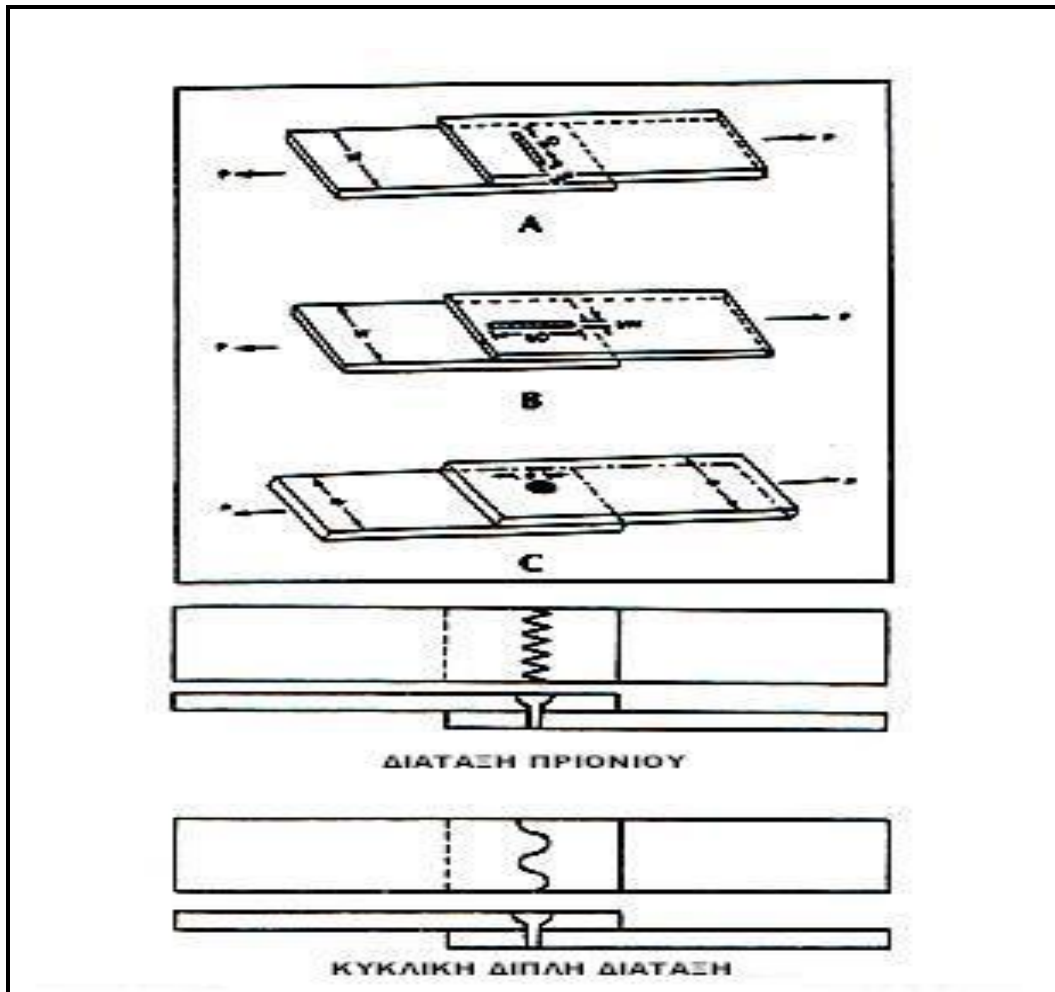
κράμα 6060, στις θερμοκρασίες T4 ή T6 θραύεται μέσα στην ζώνη τήξης. Η προσθήκη υλικού πληρώσεως μας έδειξε πως η θραύση μετακινείται από την περιοχή τήξης στην θερμικά επηρεασμένη περιοχή [16].

Στο ατσάλι χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που χρησιμοποιείτε από τις αυτοκινητοβιομηχανίες παρατηρήθηκε [17] πως οι ενώσεις με Laser έχουν περίπου ίδια αντοχή σε εφελκυσμό με το αρχικό υλικό και παρουσιάζουν επιμηκύνσεις όμοιες σε ποσοστό 90%.

Δεν υπάρχουν πολλά πειραματικά δεδομένα για κράματα αλουμινίου τα οποία έχουν ενωθεί με Laser. Σε ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης συγκεκριμένα κράματα παρουσιάζουν αντοχή σε εφελκυσμό και όριο διαρροής όμοιο με τα αρχικά μέταλλα [18].

2.8.2 Αντοχή σε κόπωση

Πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι η αντοχή σε κόπωση δοκιμίων σημειακής συγκόλλησης [19,20,21] με Laser και δοκιμίων συγκόλλησης ραφής Laser είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντοχή δοκιμίων που έχουν ενωθεί με συμβατικές μεθόδους. Στο σχήμα 2.11 φαίνονται διάφορα είδη συγκολλήσεων, από απλές διαμήκεις και εγκάρσιες συγκολλήσεις έως ημικυκλικές συγκολλήσεις και συγκολλήσεις "πριονωτής" μορφής.



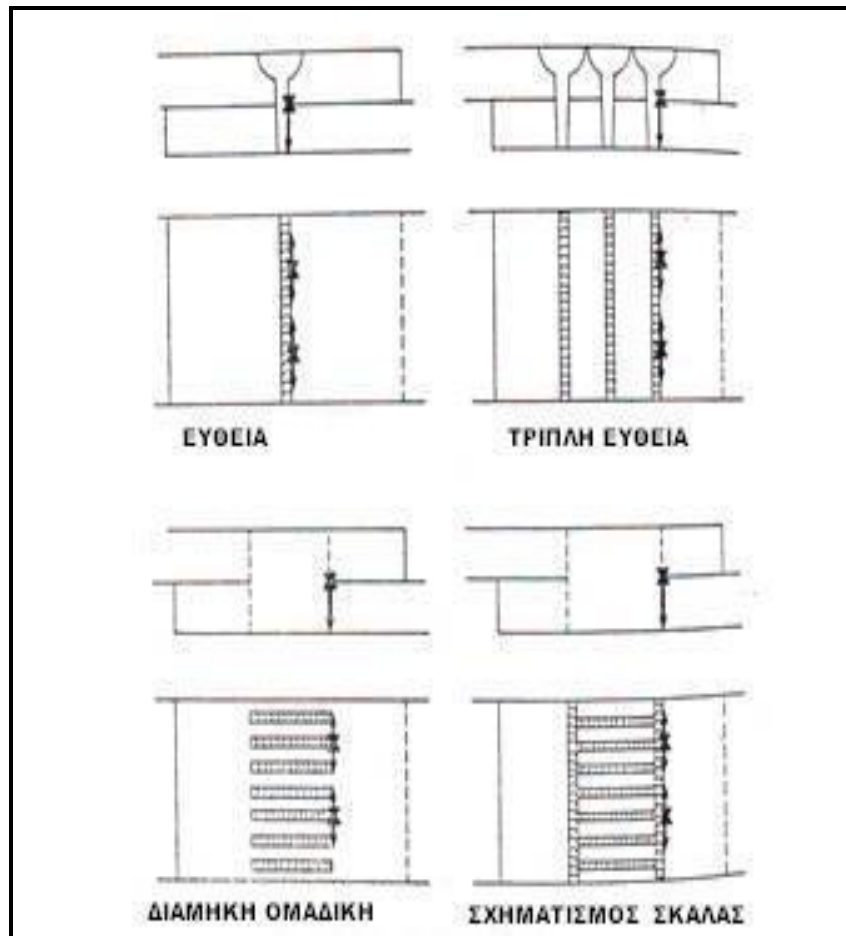
σχήμα 2.11:Είδη συνδέσεων για συγκολλήσεις επικάλυψης[22]

Έχουν παρατηρηθεί όμως και διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την αντοχή σε κόπωση ενός συγκολληθέντος δοκιμίου. Αυτοί οι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- Αυξημένο πλάτος παλμού
- Υποπλήρωση τετηγμένου μετάλλου
- Ημιτελής διείσδυση παλμού
- Αυξημένο ή αυξανόμενο πάχος δοκιμίου

Η θραύση ενός δοκιμίου που υπόκειται σε δοκιμή κόπωσης έχει παρατηρηθεί πως ξεκινάει από μικρορωγμές στην κορυφή της θερμικά επηρεαζόμενης περιοχής, ειδικά στις περιοχές που βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος της κόλλησης.

Κάποια παραδείγματα που μας δείχνουν το μονοπάτι που ακολουθεί η θραύση παρουσιάζονται στο σχήμα 2.12:



σχήμα 2.12: Τυπικοί σχηματισμοί θραύσης για ευθύγραμμες και τμηματικές συγκολλήσεις
Το X καταδεικνύει την αρχή και το βέλος την κατεύθυνση [23]

Η τοποθέτηση και το σχήμα καθώς και η πορεία που θα ακολουθήσει το Laser κατά την διάρκεια της κόλλησης είναι σημαντικά για την μεγιστοποίηση της αντοχής σε κόπωση του συγκολληθέντος κομματιού [24].

2.9 Συγκόλληση Laser με υλικό πλήρωσης

Στις συγκολλήσεις τμημάτων με μεγάλο πάχος ή τμημάτων στα οποία υπάρχει κενό ανάμεσα, είναι απαραίτητη η χρήση καλωδίου ή

τετηγμένο υλικό κινείται στην επιφάνεια της ένωσης και εμποδίζει την ιδανική διείσδυση της ακτίνας στον πυθμένα της ένωσης. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν το καλώδιο πλήρωσης δεν προσφέρει το απαιτούμενο υλικό για την πλήρωση του κενού ανάμεσα στα δύο δοκίμια, η επιφάνεια συγκόλλησης δεν γίνεται επίπεδη.

Και τα δύο αυτά προβλήματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την χρήση ενός συστήματος οπτικοποίησης της συγκόλλησης το οποίο τροφοδοτεί με την απαραίτητη ποσότητα υλικού κάθε στιγμή τη συγκόλληση.

Χάρη στην χρήση υλικού πλήρωσης καταφέραμε να επεκτείνουμε την χρήση του Laser σε συγκολλήσεις δοκιμίων με μεγαλύτερα κενά ανάμεσα τους.

Όσον αφορά τα κράματα αλουμινίου ένας άλλος ρόλος του υλικού πλήρωσης είναι να αντικαθιστά πτητικά συστατικά του κράματος, όπως το Mg (Μαγνήσιο) και Si (Πυρίτιο) με σκοπό την ελαχιστοποίηση των πόρων και την ενίσχυση της κόλλησης [26].

2.10 Μεταλλουργικές ιδιότητες των συγκολλήσεων με Laser

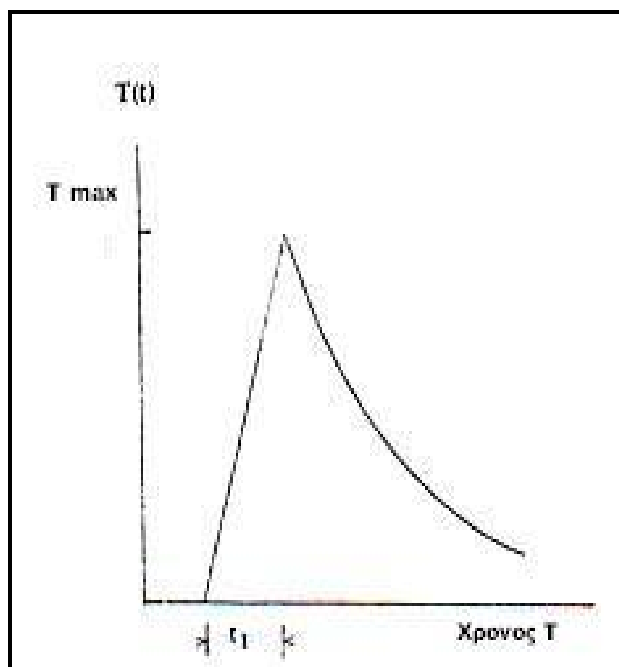
2.10.1 Θερμικός κύκλος συγκόλλησης

Η θερμοκρασία σε συνάρτηση με τον χρόνο σε μία συγκεκριμένη ένωση ενός μετάλλου, τόσο κατά την διάρκεια, όσο και μετά από αυτή είναι μία κρίσιμη παράμετρος όσον αφορά τον καθορισμό παραγόντων όπως είναι η μικροδομή της κόλλησης, η ζώνη θερμικής επιρροής (HAZ) καθώς και για την συμπεριφορά του συγκολληθέντος δοκιμίου κατά την θερμική του κατεργασία και την βαφή του. Ο θερμικός κύκλος μιας

κόλλησης μπορεί να υπολογιστεί από την μοντελοποίηση της συγκολλητικής διαδικασίας [27]. Από την μελέτη αυτών των μοντέλων, προέκυψε η γενική μορφή του θερμικού κύκλου, την οποία μας δείχνει ο ακόλουθος τύπος :

$$\tau_1 \sim \sqrt{2/\kappa}$$

Ο τύπος αυτός μας δείχνει πως μετά από κάθε απότομη άνοδο της θερμοκρασίας σε μία ακραία τιμή, ακολουθεί μία σχεδόν εκθετική πτώση αυτής. Ακολουθεί η γραφική αναπαράσταση αυτού του τύπου (σχήμα 2.14).



σχήμα 2.14: Διάγραμμα θερμοκρασίας/χρόνου κατά την συγκόλληση LASER

Μία αναλυτική έκφραση της θερμοκρασίας $T(t)$ για μία κινούμενη επιφανειακή πηγή θερμότητας μπορεί να δοθεί από τον ακόλουθο τύπο

Για ένα παχύ κομμάτι γίνεται

$$T(r, t) - T_0 = \frac{P}{4\rho v K t} \exp\left(-\frac{u^2}{4kt}\right)$$

Για ένα κομμάτι δεδομένου πάχους d ο τύπος γίνεται

$$T(r,t) - T_0 = \frac{P}{vd(4K_p ct)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right)$$

Η δύναμη του Laser είναι P , η ταχύτητα σάρωσης είναι v και T_0 είναι η θερμοκρασία προθέρμανσης. Για ένα χονδρό κομμάτι μετάλλου η μέγιστη θερμοκρασία T_{max} παρουσιάζεται μετά από μία περίοδο χρόνου

$$t_1 = \frac{r^2}{4k}$$

Και ο λόγος της μεταβολής της θερμοκρασίας dT/dt είναι:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{117}{t^{1/2}} \left[\frac{6.25 \times 10^{-3}}{t} - 1 \right] \exp\left[\frac{-6.25 \times 10^{-3}}{t} \right]$$

2.10.2 Η περιοχή θερμικής επιρροής HAZ (Heat Affected Zone) και οι ιδιότητες της.

2.10.2.1 Χάλυβας

Η περιοχή HAZ είναι παρακείμενη στην συγκόλληση και μας δείχνει την επίδραση του θερμικού κύκλου, έως μία κορυφαία θερμοκρασία T_{max} , η οποία είναι μικρότερη από την θερμοκρασία τήξης αλλά είναι αρκετή για να ξεκινήσουν άλλοι μετασχηματισμοί.

Ο ρυθμός με τον οποίο πέφτει η θερμοκρασία στην περιοχή HAZ μπορεί να πλησιάσει και τους $1000^\circ\text{C}/\text{sec}$ αλλά διαφέρει από σημείο σε σημείο όπως και η T_{max} . Για μία ευθεία συγκόλληση ενός λεπτού κομματιού μετάλλου το πλάτος της περιοχής HAZ είναι συγκρίσιμο με το

πλάτος της κόλλησης και είναι μία περιοχή μεταβλημένης σκληρότητας και μικροδομής (microstructure).

Για ένα λεπτό κομμάτι μετάλλου και μία απλοποιημένη πηγή θερμότητας η πλευρική διάσταση της περιοχής HAZ μπορεί να οριστεί σε σχέση με συγκεκριμένη μεταβολή της θερμοκρασίας T' [28].

$$r'-r_m = \frac{AP}{vd} \left[\frac{0.34}{pc} \left(\frac{1}{T'-T_0} - \frac{1}{(T_m - T_0)} \right) \right]$$

Όπου r' είναι η πλευρική απόσταση από την πηγή θερμότητας μέχρι το σημείο $T=T'$, r_m είναι η αντίστοιχη απόσταση έως την τετηγμένη περιοχή, A είναι η απορροφητικότητα και T_0 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Έχοντας $AP = 3kW$, $v = 5 \times 10^{-2} m/sec$, $pc = 5.3 \times 10 J/m^3 \cdot ^\circ C$

και $d=1$ mm τότε ο παραπάνω τύπος γίνεται

$$r'-r_m = 3.8 \left[\frac{1}{(T'-T_0)} - \frac{1}{(T_m - T_0)} \right]$$

Με την θερμοκρασία T' στην περιοχή των $800^\circ C$ για το χάλυβα και με την θερμοκρασία τήξης στους $T_m=1600^\circ C$ έχουμε το T_0 να γίνεται $20^\circ C$ και την απόσταση $r'-r_m \sim 2.5$ mm. Οι τιμές του πλάτους της περιοχής HAZ για διάφορους χάλυβες οι οποίοι έχουν συγκολληθεί με μια ποικιλία εντάσεων CO₂ Laser μαζί με άλλες παραμέτρους σχετικά με την περιοχή HAZ καθώς και με την συγκολλητική διαδικασία γενικά, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 2.5:

Πάχος χάλυβα	παράμετροι συγκόλλησης			πλάτος HAZ				σκληρότητα HAZ				απορροφητικότητα(%)			
	Ισχύς (kW)	Ταχύτητα (m/min)	Ενέργεια (J/mm ²)	Fe37B	Fe52D	HSD	HSE	Fe37B	Fe52D	HSD	HSE	Fe37B	Fe52D	HSD	HSE
4.0	2.5	0.6	63	1.36	1.60	1.45	1.75	234	248	363	339	60	72	62	76
		1.4	27	0.67	0.85	0.71	0.77	340	348	413	407	69	89	71	78
	3.8	2.1	27	0.55	0.80	0.55	0.64	328	368	378	413	57	84	55	65
		2.4	23	0.56	0.64	0.49	0.60	283	413	395	413	67	76	56	70
6.0	3.8	0.4	94	2.05	2.60	2.00	2.75	210	210	283	293	61	78	57	80
		0.6	63	1.96	1.75	1.40	1.60	222	245	339	334	87	78	60	70
	5.0	0.8	47	1.54	1.20	0.90	1.30	214	269	373	378	91	72	52	76
		1.1	47	1.12	0.95	0.90	1.15	212	286	363	358	66	57	52	67
8.0	5.0	1.4	36	1.00	0.80	0.90	1.07	242	325	368	413	78	63	68	82
		0.5	75	2.24	1.95	1.70	2.05	218	242	321	293	83	73	61	74
		0.6	63	1.75	1.73	0.95	1.55	215	237	325	321	78	77	41	68

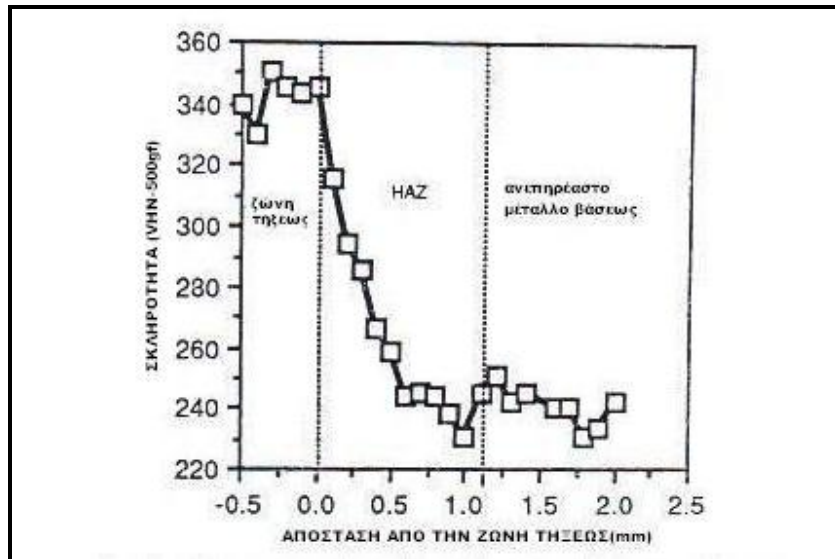
πίνακας 2.5: Ιδιότητες της HAZ διαφόρων ειδών χάλυβα μετά από συγκόλληση CO₂ LASER [29]

Οι μετρούμενες τιμές του πλάτους της περιοχής HAZ $r'-r_m$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραπάνω εξίσωση δίνοντας μια εκτίμηση της απορροφητικότητας A. Οι τιμές της A που μας δίνονται με αυτόν τον τρόπο κινούνται στην περιοχή από 0.4 έως 0.9 όπως φαίνεται στον πίνακα.

Η σκληρότητα (HV) στην περιοχή HAZ εξαρτάται από την απορροφημένη ενέργεια $q = AP/vd \left(\frac{J}{m^2} \right)$ και τείνει να μειωθεί όσο αυτή αυξάνεται.

Επειδή ο θερμικός κύκλος εξαρτάται από την απόσταση από την ζώνη τήξης (fusion zone) οι μηχανικές ιδιότητες, η μικροδομή και η σύνθεση διαφέρουν μέσα στην HAZ.

Ένα παράδειγμα της μεταβολής της σκληρότητας κατά μήκος της HAZ που παρατηρείτε σε συγκόλληση με CO₂ Laser υψηλής αντοχής ατσαλιού HSLA-80 παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα 2.15:



σχήμα 2.15: Προφίλ σκληρότητας εγκάρσια στη ζώνη τήξεως και την HAZ για συγκόλληση με δέσμη LASER κράματος HSLA-60[30]

και μας δείχνει την μετάβαση από την υψηλή σκληρότητα που συναντάμε στην ζώνη τήξης (fusion zone), στην τιμή σκληρότητας που γνωρίζουμε για το βασικό μέταλλο της συγκόλλησης. Αυτή η μετάβαση συνδέεται άρρηκτα με τις μεταβολές της μικροδομής του μετάλλου κατά μήκος της HAZ.

Σε μελέτες [31] συγκολλήσεων με CO₂ Laser ατσαλιού τύπου ASTM-36 βρέθηκε πως η μικροδομή στην HAZ είναι όμοια με αυτή ενός μείγματος φερίτη/περλίτη και επίσης παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση στην σκληρότητα με εξαίρεση μονάχα σημεία πολύ κοντά στην ζώνη τήξεως. Στην ζώνη τήξεως καθαυτή παρατηρήθηκε μία μικροδομή βαινίτη.

2.10.2.2 Κράματα Αλουμινίου

Η συγκόλληση με Laser κραμάτων αλουμινίου συχνά συνοδεύεται με μία απώλεια πτητικών στοιχείων από την περιοχή της κόλλησης.

Ειδικά για κράματα των σειρών 5000,6000 και 7000 παρατηρείτε για τα μεν κράματα των σειρών 5000 και 6000 απώλεια ενός σημαντικού παράγοντα του κράματος, του Mg, για τα δε κράματα της σειράς 7000 παρατηρείτε απώλεια του Zn.

Κράματα τα οποία δεν υπόκεινται σε θερμική επεξεργασία όπως το 5454 έχουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες από την ψυχρή επεξεργασία και είναι ευεπηρέαστα από την θερμότητα που παράγεται στην συγκόλληση με Laser.

Συγκεκριμένα κράματα των σειρών 5000 και 6000 υπόκεινται σε θραύση κατά την στερεοποίηση και παρατηρείτε μειωμένη αντοχή στην HAZ.

Σε θερμικά επεξεργαζόμενα κράματα, όπως το 7075 παρατηρήθηκε επίσης πως υπόκεινται αρκετά συχνά σε θερμική θραύση και θραύση κατά την στερεοποίηση, αλλά οι μηχανικές τους ιδιότητες μπορούν να αναγεννηθούν με θερμική επεξεργασία μετά την συγκόλληση. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι η ανόπτηση η οποία παρουσιάζεται σε ένα στενό τομέα της περιοχής HAZ παρακείμενο της κόλλησης.

Η επίδραση της συγκόλλησης με Laser σε κράματα αλουμινίου εξαρτάται, όπως και στα ατσάλια, από τον θερμικό κύκλο. Ο θερμικός κύκλος στην λίμνη συγκόλλησης (weld pool) καθορίζει την απώλεια μέσω εξαέρωσης στοιχείων όπως το Μαγνήσιο (Mg) έχοντας σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζεται στην περιοχή HAZ μια μείωση της σκληρότητας (HV) [32].

Η τάση που παρατηρείται στα κράματα αλουμινίου να εξαερώνουν συστατικά τους κατά την κόλληση οφείλεται κυρίως στην μεγαλύτερη ένταση του Laser που αυτά απαιτούν καθώς έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Το φαινόμενο της ανάκλασης μπορεί να μειωθεί με την χρήση Laser με μικρότερο μήκος κύματος (π.χ. Nd: YAG).

2.10.3 Ζώνη Τήξεως (Fusion Zone)

2.10.3.1 Γενικά

Επειδή η ζώνη τήξεως περιέχει την περιοχή στην οποία προσπίπτει η ακτινοβολία του Laser και απορροφάται από το μέταλλο, οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε αυτή είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που συναντάμε στην HAZ. Εάν παρατηρηθεί η δημιουργία "κλειδαρότρυπας" ή εάν η επιφανειακή θερμοκρασία σε μία συγκόλληση αγωγού φτάνει την θερμοκρασία εξαέρωσης ενός συστατικού του κράματος τότε μέσω της επιλεκτικής εξαέρωσης μπορούμε να αφαιρέσουμε δευτερεύοντα μη επιθυμητά συστατικά του μετάλλου.

Αυτό μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην σκληρότητα (HV) και στις μηχανικές ιδιότητες της κόλλησης.

Η απελευθέρωση πτητικών στοιχείων του κράματος, συμπεριλαμβανομένου και του υδρογόνου, κατά την διάρκεια της κόλλησης έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πόρων το μέγεθος των οποίων μπορεί να εκτείνεται από $\ll 1\mu\text{m}$ έως και μακροσκοπικές (ορατές διά γυμνού οφθαλμού) φυσαλίδες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου τύπου Al αφού η έκκληση

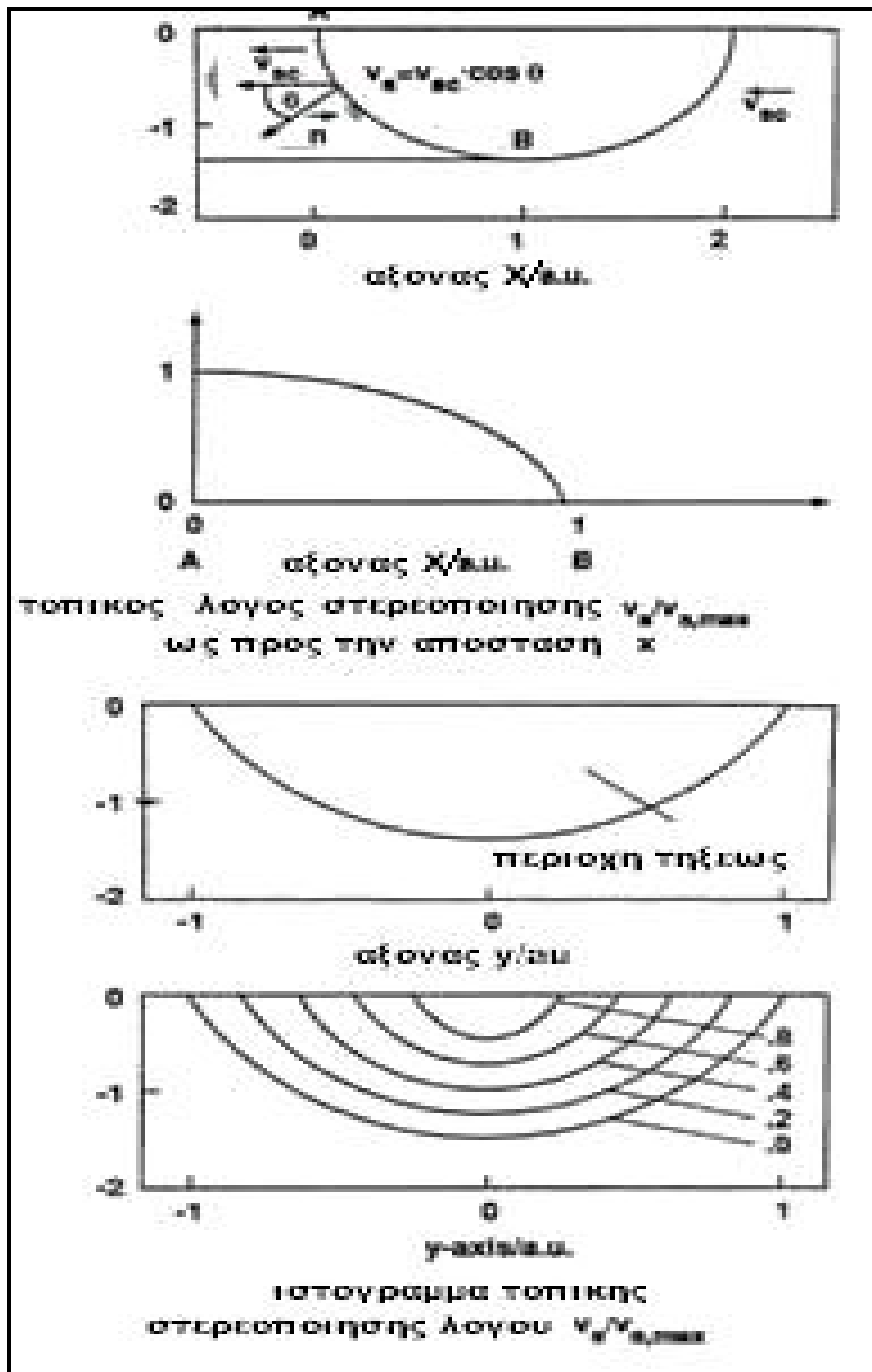
υδρογόνου και η περιορισμένη διαλυτότητα του κατά την τήξη συχνά μα δίνει μια πορώδη κόλληση.

Απότομοι ρυθμοί ψύξης, ο διαχωρισμός των στοιχείων κατά την τήξη καθώς και η παρουσία ξένων σωματιδίων και ακαθαρσιών οδηγούν σε αρκετές περιπτώσεις στην θραύση κατά την στερεοποίηση ευεπηρέαστων κραμάτων.

Εγκάρσια και διαμήκη φορτία που αναπτύσσονται στο κατεργαζόμενο κομμάτι κατά την διάρκεια της κόλλησης παίζουν μεγάλο ρόλο στην θραύση αυτού αλλά ελαχιστοποιούνται μέσω του ελέγχου της χρονικής διάρκειας της έντασης του Laser που προσπίπτει σε αυτό.

Παρότι η μορφολογία και η μακροδομή των κολλήσεων με Laser εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία της συγκόλλησης, καθώς επίσης και από το σχήμα της κλειδαρότρυπας και άλλους μεταβλητούς παράγοντες, η μικροδομή αυτών των κολλήσεων εξαρτάται από την διαδικασία στερεοποίησης και την εξέλιξη αυτής.

Μια απλοποιημένη αναπαράσταση του σχήματος της λίμνης συγκόλλησης παράλληλα και εγκάρσια φαίνεται στο σχήμα 2.16 που ακολουθεί.



σχήμα 2.16: Σχηματική εγκάρσια τομή περιοχής συγκόλλησης και ρυθμός στερεοποίησης [33]

Σε αυτό φαίνονται οι φάσεις την διαδικασίας στερεοποίησης. Ο ρυθμός v_s συνδέεται με την ταχύτητα συγκόλλησης v με τον ακόλουθο τύπο:

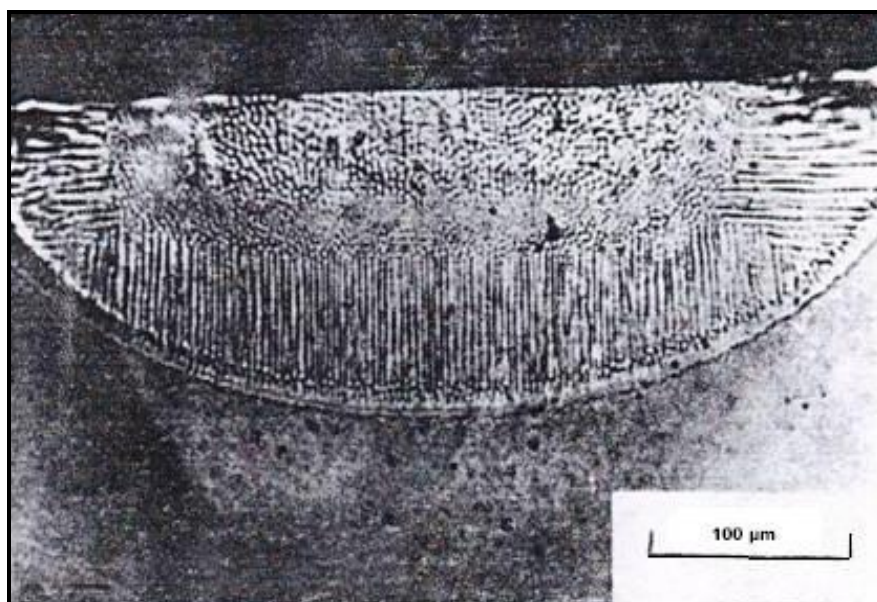
$$v_s = v \cos J$$

Όπου θ είναι η γωνία που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Ο τοπικός ρυθμός στερεοποίησης διαφέρει από επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης έως τον πυθμένα αυτής. Επειδή η μετάβαση από την υγρή στην στερεή κατάσταση γίνεται στην λίμνη της συγκόλλησης μπορεί να

παρουσιαστεί επιταξική ανάπτυξη με την ανάπτυξη κόκκων, προερχόμενων από την περιοχή HAZ που συνορεύει με την ζώνη εξάτμισης.

Μεμονωμένοι κόκκοι παρουσιάζουν μία υποδομή η οποία επηρεάζεται από τις μικροαπομονώσεις στοιχείων που πηγάζουν από τα διαλυτά συστατικά της λίμνης συγκόλλησης .

Μία χαρακτηριστική παράμετρος της στερεοποίησης είναι ο λόγος G/\sqrt{R} όπου G είναι η θερμική κατανομή προς την κατεύθυνση της στερεοποίησης και R είναι ο ρυθμός στερεοποίησης του προπορευμένου τετηγμένου τμήματος της διαδικασίας [34]. Η μικροδομή της συγκόλλησης γίνεται πιο τριχοειδής όσο ο παραπάνω λόγος μειώνεται όπως φαίνεται στην ακόλουθη μικροφωτογραφία 2.17:

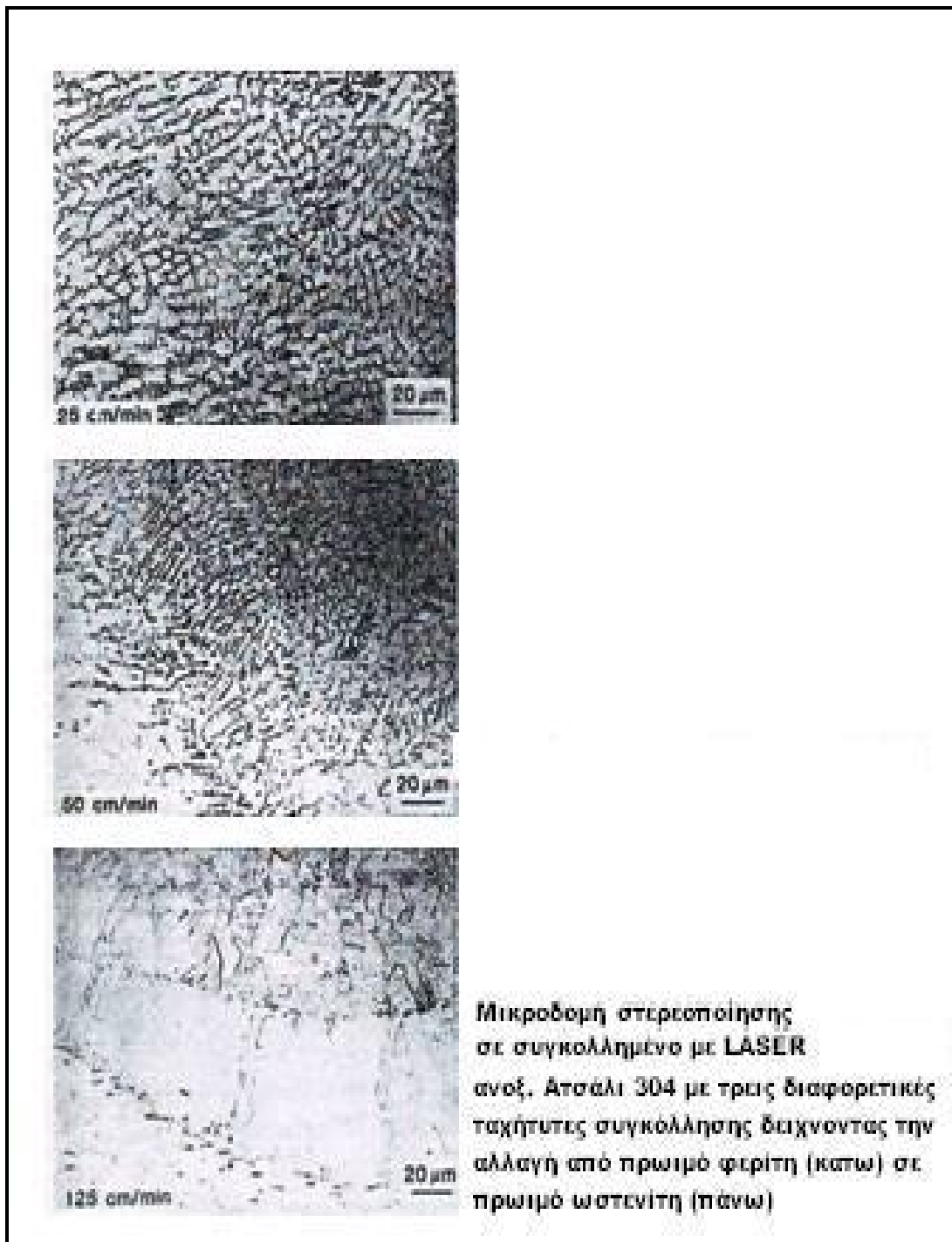


σχήμα 2.17:Εγκάρσιο τμήμα τετηγμένης περιοχής από LASER (τριχοειδής μικροδομή)

Η ανάπτυξη συγκεκριμένων κόκκων εμπλουτίζεται εάν η κατεύθυνση της θερμότητας είναι ίδια με την κατεύθυνση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού του μετάλλου [35].

2.10.3.2 Χάλυβας

Έχοντας υψηλούς ρυθμούς ψύξεως η στερεοποίηση καθώς και τα φαινόμενα που κατά αυτή παρουσιάζονται είναι ιδιαίτερα σημαντικά [36]. Στο ακόλουθο σχήμα 2.18 διακρίνονται οι διαφορές στην μικροδομή που παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης.



σχήμα 2.18[37]

Στην ταχύτητα $v=25\text{cm/min}$ η ζώνη συγκόλλησης ανοξείδωτου χάλυβα 304 μας δίνει μια μικροδομή συμβατή με μία πρώιμη φερίτική δομή. Σε ταχύτητα $v=125\text{cm/min}$ η μικροδομή γίνεται ουσιαστικά 100% ωστενιτική και παρουσιάζει μια αυξημένη τάση για θερμική θραύση [38].

Παρατηρήθηκε πως η απώλεια του Μαγγανίου Mn αυξάνεται όσο αυξάνεται η ένταση του Laser και η ταχύτητα κόλλησης .

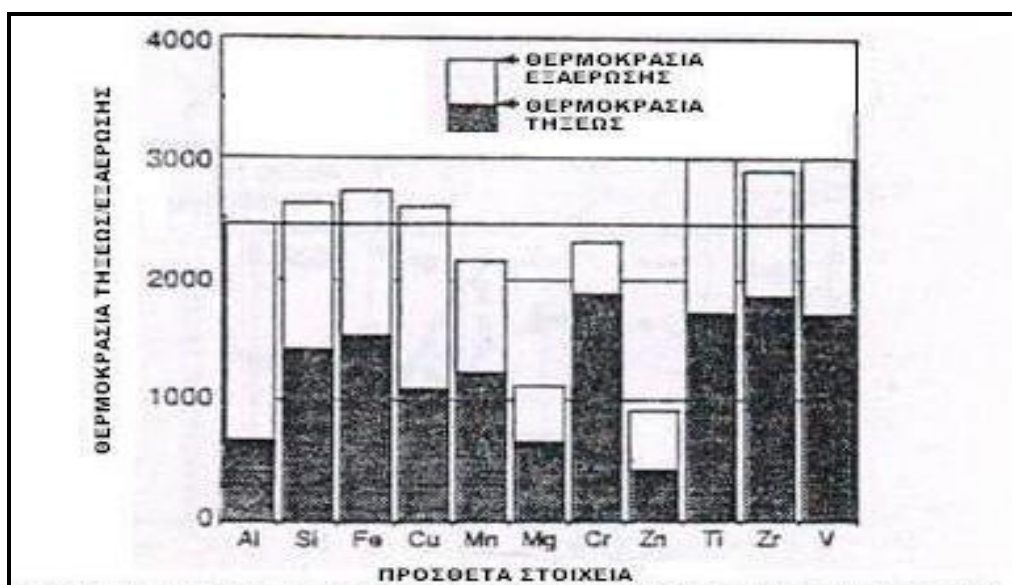
Η εξασθένηση των πηκτικών στοιχείων στην λίμνη συγκόλλησης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την μοντελοποίηση αυτών των ενεργειών.

Επίσης έχει αποδειχθεί πως ο τύπος του αερίου θωράκισης καθώς και ο ρυθμός ροής του είναι ιδιαίτερα σημαντικές μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν τον συνολικό ρυθμό εξαέρωσης της λίμνης συγκόλλησης.

Η μικροδομή της κόλλησης καθώς και η σκληρότητα (HV) στο χάλυβα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία που επικρατεί κατόπιν της κόλλησης. Απαιτείται η σταδιακή μείωση αυτής και όχι η απότομη ψύξη. Αυτή γίνεται δυνατή με την χρήση μιας δευτερευούσης δέσμης Laser, η οποία δεν είναι συγκεντρωμένη (defocused beam) η οποία έπεται της δέσμης που προκαλεί την κόλληση. Η θέρμανση ενός συγκολληθέντος κομματιού με Laser χάλυβα τύπου SAE4130 είχε σαν αποτέλεσμα την μαρτενσιτική μετατροπή της τραχείας, κοκκώδους δομής σε μία λεπτότερη, πιο λεία δομή με μικρά ποσά βαινίτη μέσα της [39]. Χρειάστηκαν βέβαια αρκετά περάσματα της δευτερευούσης δέσμης Laser για να εξαφανιστεί η τριχοειδής δομή στο συγκολληθέν υλικό και για να θερμανθεί η κόλληση σε όλο το βάθος της.

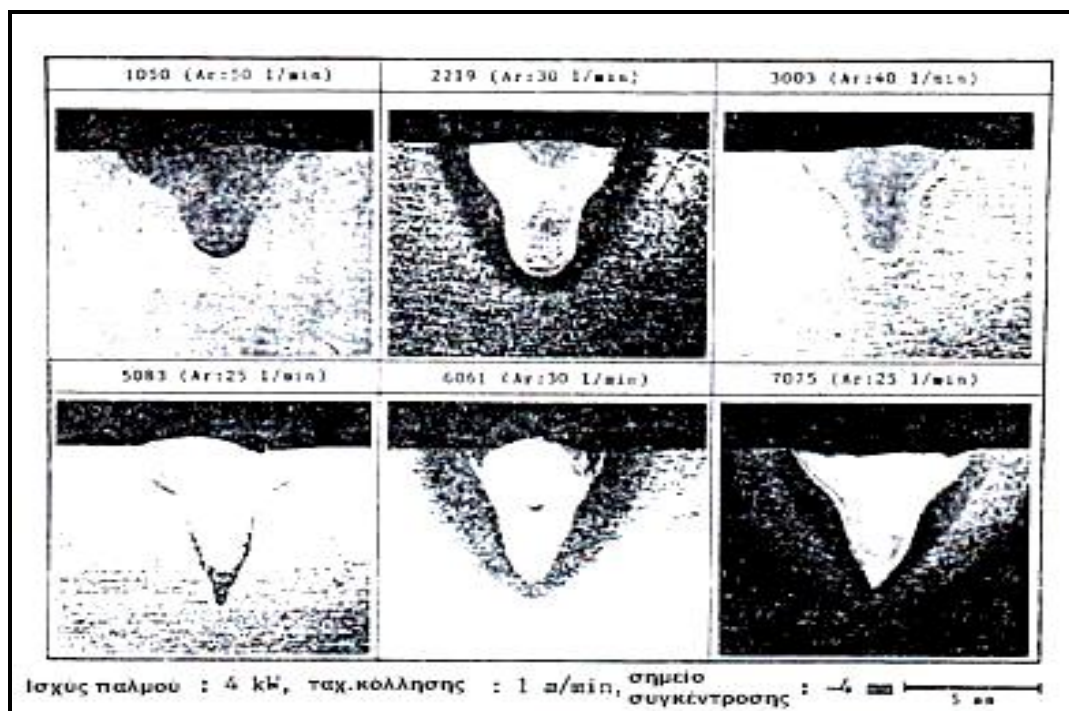
2.10.3.3 Κράματα Αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου ειδικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην απώλεια πρόσθετων στοιχείων και αυτό μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην αντοχή των συγκολλήσεων. Αυτές οι συνέπειες είναι μεγαλύτερες ειδικά για τα κράματα των σειρών 5000-7000. Στο ακόλουθο σχήμα 2.19 παρουσιάζονται κάποια από τα πρόσθετα στοιχεία που συναντάει κανείς στα κράματα αλουμινίου καθώς και η θερμοκρασία εξαέρωσης αυτών.



σχήμα 2.19:Θερμοκρασία τήξεως και εξαέρωσης πρόσθετων στοιχείων που συναντάμε στα κράματα αλουμινίου[40]

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα εγκάρσιων τομών συγκολλήσεων κραμάτων τύπου A1 παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 2.20:



σχήμα 2.20: Παραδείγματα γεωμετριών διείσδυσης σε διάφορα κράματα Al από LASER CO₂[41]

Να σημειωθεί πως οι τομές συγκολλήσεων στο ασάλι παρουσιάζουν παρόμοιο σχήμα με τις παραπάνω.

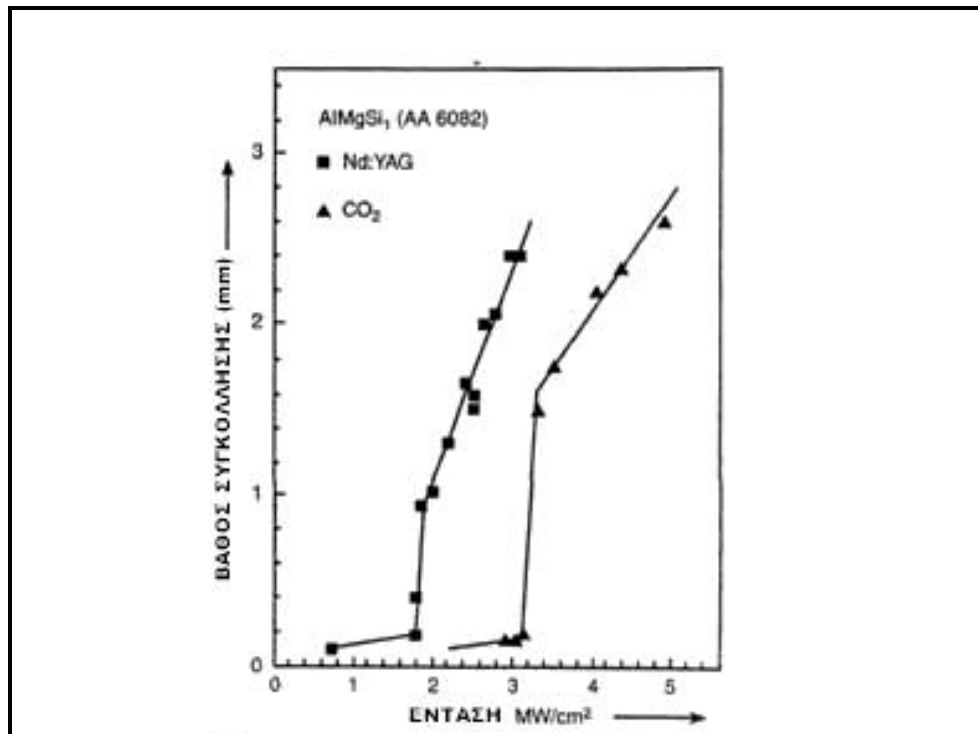
2.11 Τεχνικές ποιοτικής βελτίωσης συγκόλλησης

2.11.1 Γενικά

Μία καθαρή και χωρίς διαταραχές επιφάνεια μετάλλου παρουσιάζει μεγάλη ανακλαστικότητα με όποιο μήκος κύματος Laser και αν επιχειρούμε την συγκόλληση της (CO₂ και Nd:YAG), αλλά αυτή η ανακλαστικότητα μειώνεται με μία αύξηση της θερμοκρασίας. Πολλά μέταλλα επίσης οξειδώνονται πολύ γρήγορα όταν θερμανθούν κοντά στο σημείο τήξεωσ τους [42].

Το αποτέλεσμα είναι μια αύξηση της απορρόφησης του Laser η οποία εξαρτάται από το γινόμενο It όπου I είναι η στιγμιαία ένταση του Laser σε ένα συγκεκριμένο σημείο της συγκόλλησης, παράμετρος η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί και t είναι ο χρόνος κατά τον οποίο προσπίπτει η ακτίνα του laser στο συγκεκριμένο σημείο.

Η απότομη πτώση της θερμοκρασίας σε μεγάλες τιμές του I_t οδηγεί σε εξαέρωση, επιφανειακή διάσπαση και στην εδραίωση της κλειδαρότρυπας. Ένα παράδειγμα αυτής της επίδρασης φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα 2.21:



σχήμα 2.21: Βάθος συγκόλλησης προς την ένταση του LASER για Nd:YAG και CO₂ ακτινοβολίες [43]

Ο ρόλος του μήκους κύματος του Laser φαίνεται καθαρά στην χαμηλή αρχική ένταση της συγκόλλησης με ακτινοβολία τύπου Nd:YAG.

Η αποδοτικότητα του Laser ορίζεται ως η ισχύς (ή ενέργεια) h όπου

$$\eta = \frac{\text{απορροφημένη ισχύς του laser από το κομμάτι}}{\text{στιγμιαία ένταση του laser}}$$

είναι μικρότερη, λίγο κάτω από την αρχική αποδοτικότητα της κλειδαρότρυπας, αλλά πλησιάζει την μονάδα από τη στιγμή που θα δημιουργηθεί η κλειδαρότρυπα.

Ο ρυθμός τήξεως (melting ratio) ϵ όπου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon = \frac{v d W \Delta H_m}{P}$$

συνδέει το ρυθμό τήξεως με την στιγμιαία ένταση του Laser P , όπου v είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, d είναι το πάχος του κομματιού, W είναι το πλάτος της δέσμης του Laser και ΔH_m το θερμικό περιεχόμενο του

μετάλλου στην θερμοκρασία τήξης. Η μέγιστη τιμή του ϵ είναι 0.48 για συγκολλήσεις διείσδυσης και 0.37 για συγκολλήσεις αγωγού. Είναι προφανές πως ο ϵ ποτέ δεν γίνεται μονάδα, ακόμα και εάν ο λόγος $\eta=1$.

Όταν ο η και ϵ είναι κάτω από την τιμή του σχηματισμού κλειδαρότρυπας μπορούν να ανυψωθούν εάν η απορροφητικότητα A αυξηθεί [44]. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αρκετούς τρόπους, οι βασικότεροι εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω.

2.11.2 Τεχνικές αύξησης της απορροφητικότητας A

2.11.2.1 Απορροφητικές επιστρώσεις [45]

Τα χαρακτηριστικά αυτών των επιστρώσεων είναι:

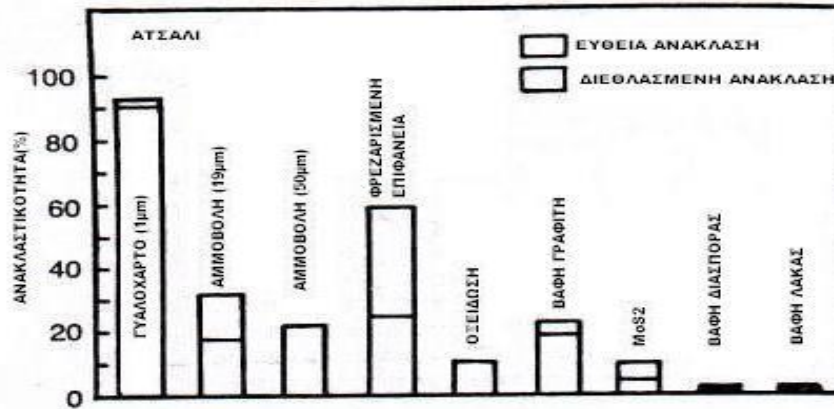
1. ευκολία στην εφαρμογή
2. προσκόλληση στην μεταλλική επιφάνεια
3. καλή θερμική αγωγιμότητα προς την μεταλλική επιφάνεια
4. χημική σταθερότητα
5. δεν περιπλέκονται με την μεταλλουργία της συγκόλλησης

Η μαύρη βαφή ικανοποιεί αρκετά από αυτά τα κριτήρια αλλά μπορεί να χαθεί κατά την κόλληση λόγω των πτητικών συστατικών του σκληριντή της βαφής. Ο κολλοειδής γραφίτης είναι πιο σταθερός αλλά μία συνήθης παρενέργεια είναι η πρόσμιξη του άνθρακα στο κράμα.

2.11.2.2 Επιφανειακή τράχυνση

Εφαρμόζοντας αμμοβολή ή τρίψιμο με γυαλόχαρτο παρατηρούμε μια αύξηση στην επιφανειακή τραχύτητα με τον βαθμό αυτής να εξαρτάται από το μέγεθος της άμμου, μηχανική πίεση, την ροή του αερίου κ.α.

Στο ακόλουθο σχήμα 2.22 παρουσιάζονται δείχνει την επίδραση των διαφορετικών τεχνικών και συγκρίνει την ανακλαστικότητα που αυτές παράγουν [46]. Η μεγαλύτερη μείωση της ανακλαστικότητας παρατηρείται μετά την αμμοβολή με άμμο ιδίου μεγέθους με το μήκος κύματος του Laser (10.6 μ m)



σχήμα 2.22:Ανακλαστικότητα επιφανειών μετά από μηχανικές κατεργασίες[47]

2.11.3 Συνδυασμός δεσμών

Με αυτή την μέθοδο οι δέσμες από δύο ξεχωριστές πηγές Laser ενώνονται στην επιφάνεια του κομματιού με ανεξάρτητο έλεγχο της καθεμιάς [48].

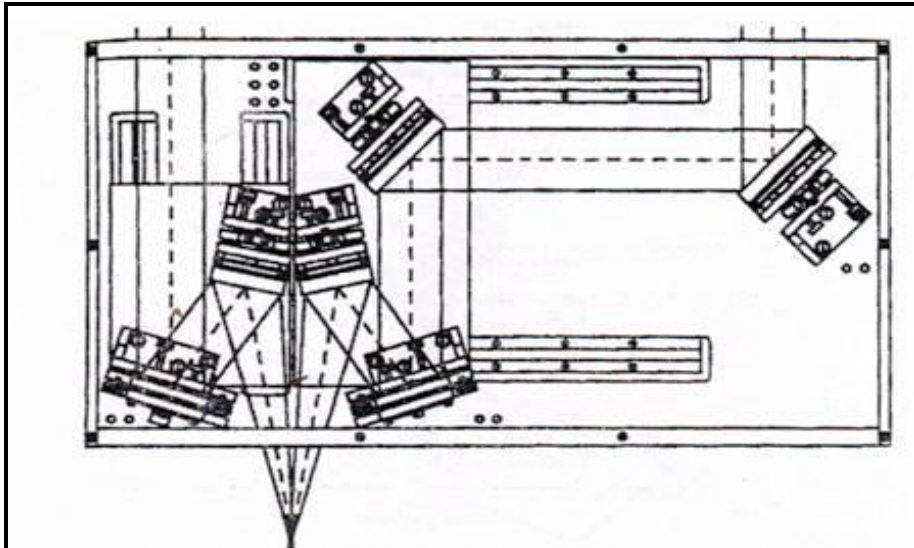
Αυτό προσφέρει αρκετή ευελιξία, θέτοντας όμως προϋποθέσεις πάνω στον έλεγχο των ρυθμών θέρμανσης και ψύξης, στην μορφολογία της κλειδαρότρυπας καθώς και στη δυναμική της λίμνης τήξεως .

Μια δέσμη επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του κομματιού πριν ή μετά την κόλληση .

Κάποια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι τα ακόλουθα:

- Περαιτέρω σταθεροποίηση της συγκολλητικής διαδικασίας.
- Έλεγχος της δημιουργίας πόρων καθώς και των μειονεκτημάτων της συγκόλλησης.
- Βελτιωμένη συμπεριφορά της κόλλησης σε κόπωση .

Αυτά τα πλεονεκτήματα αντισταθμίζονται από το αυξημένο κόστος και τις επιπλέον περιπλοκές στην συγκέντρωση των δεσμών. Στο ακόλουθο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη συγκέντρωσης δεσμών.



σχήμα 2.23:Σχηματισμός οπτικών για την συγκέντρωση και τον συνδυασμό δύο δεσμών LASER[49]

2.11.4 Πρόωση δέσμης

Αυτή η τεχνική βασίζεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της κόλλησης και παρουσιάζει μία χρονική καθυστέρηση ανάμεσα στην απαρχή του σχηματισμού κλειδαρότρυπας και της δημιουργίας πλάσματος στο οποίο η δέσμη του Laser εξατμίζει την ιδανική ποσότητα επιπλέον υλικού αφήνοντας μόνο το απαραίτητο [50].

Η διαδικασία πολλές φορές διακόπτεται από την δημιουργία πλεονάζουσας ποσότητας πλάσματος, μειώνοντας έτσι τον ρυθμό παραγωγής.

Το φαινόμενο ελαχιστοποιείτε με την περιοδική διακοπή της δέσμης του Laser ,δημιουργώντας ένα νέο σημείο συγκέντρωσης μπροστά από την αρχική θέση της κλειδαρότρυπας.

Αυτή η απλή τεχνική συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης συνεχούς παλμού (CW) και της συγκόλλησης διακοπτόμενης ακτινοβολίας και έχει σαν αποτέλεσμα την βελτιωμένη διεύθυνση της ακτινοβολίας στο επεξεργαζόμενο κομμάτι.

2.11.5 Συνδυασμός συγκόλλησης τόξου-Laser

Σε αυτή τη διαδικασία ένα τόξο από ένα λύχνο TIG τοποθετείται κοντά στην περιοχή συγκέντρωσης της δέσμης του Laser [51].

Αφού η δέσμη του Laser σχηματίσει την κλειδαρότρυπα, το τόξο εισέρχεται σε αυτή, ή στην περίπτωση συγκόλλησης αγωγού, στην περιοχή υψηλής θερμοκρασίας.

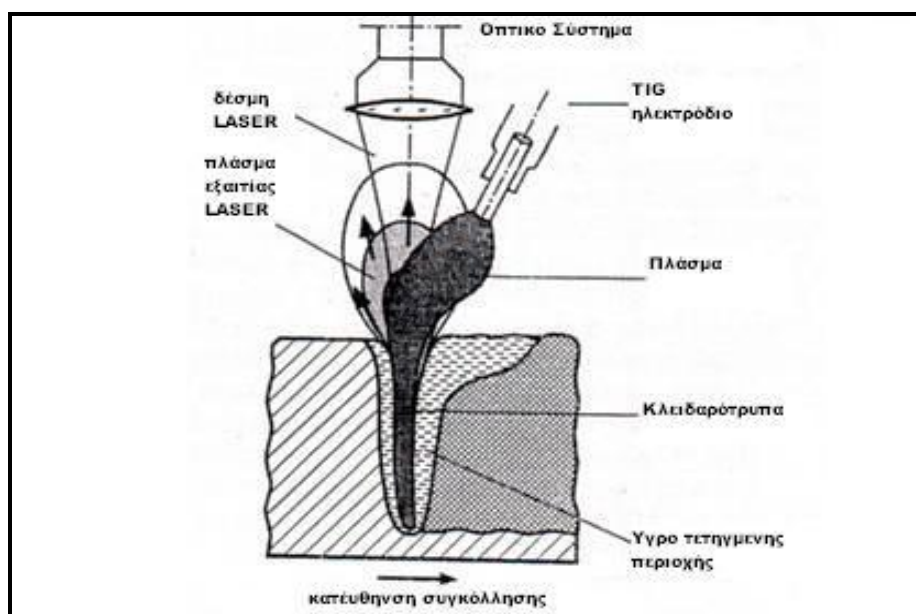
Πρακτικά η παραπάνω τεχνική φαίνεται να είναι πιο χρήσιμη στην συγκόλληση διείδυσης(κλειδαρότρυπα) παρουσιάζοντας τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Εναπόθεση επιπλέον ισχύος στην κλειδαρότρυπα, παρουσιάζοντας αποτελέσματα που θα μπορούσαν να προέλθουν μόνο με την χρήση Laser μεγαλύτερης ισχύος.
- Υψηλότερη συγκολλητική ικανότητα με μικρό κόστος εγκατάστασης.
- Επιπλέον ευελιξία στον έλεγχο του πλάτους των ραφών και δυνατότητα συγκόλλησης κομματιών με μεγαλύτερα κενά ανάμεσα τους.
- Αύξηση του όγκου του τετηγμένου μετάλλου ,μειώνοντας έτσι τους περιορισμούς της συγκόλλησης (εξάτμιση ,απώλεια πτητικών στοιχείων κ.α.)
- Συμβατότητα και με τους δύο τύπους Laser CO₂ και Nd:YAG

Η πρόσπτωση του τόξου στην κλειδαρότρυπα που δημιουργήσε το Laser αυξάνει την διασπορά της ισχύος μέσα σε αυτή.

Μετά από την βελτιστοποίηση της συγκέντρωσης του Laser παρατηρείτε μια αύξηση στο βάθος διείδυσης .

Στο ακόλουθο σχήμα 2.24 παρουσιάζεται μία διάταξη αυτού του συνδυασμού:



σχήμα2.24:Σχηματική αναπαράσταση του συνδυασμού συγκόλλησης LASER και TIG[52]

2.12 Εφαρμογές συγκόλλησης Laser

Η ευκολία στον έλεγχο εφαρμογής της διαδικασίας Laser μέσω CNC, καθώς και τα υψηλής ποιότητας συγκολλητικά προϊόντα που παράγει, έχει οδηγήσει την διαδικασία να είναι η κύρια τεχνική συγκόλλησης σε διάφορες γραμμές της βιομηχανίας. Επίσης η δυνατότητα να εφαρμοστεί η διαδικασία ακόμα και σε εφαρμογές μικρού εμβαδού, έχει κάνει την διαδικασία συγκόλλησης Laser να βρίσκει εφαρμογή ακόμα και σε πολύ ειδικές και ιδιαίτερες κατασκευές.

Κάποια τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της συγκολλητικής διαδικασίας Laser ακολουθούν παρακάτω.

2.12.1 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Η διαδικασία Laser είναι έως σήμερα η κύρια τεχνική συγκόλλησης μέρους της ατράκτου και της εσωτερικής δομής του σκάφους καθώς και σε κάποια δοχεία και δεξαμενές που χρησιμοποιούνται στις διαστημικές αποστολές.



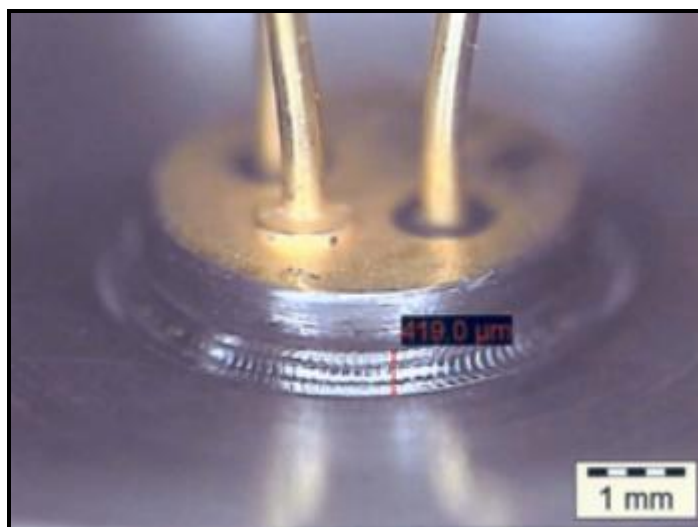
Δοχείο καυσίμων συγκολληθέν με διαδικασία Laser [53]

2.12.2 Εφαρμογές στην βιομηχανία άμυνας

Η διαδικασία χρησιμοποιείται συχνά για την συγκόλληση της θωράκισης αρμάτων.

2.12.3 Εφαρμογές στην βιομηχανία ηλεκτρονικών

Η δυνατότητα συγκόλλησης σε εξαιρετικά μικρά εμβαδά, οδήγησε την διαδικασία να χρησιμοποιείται κατά κόρων στην συγκόλληση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως σε μητρικές κάρτες, χάραξη ηλεκτρονικών εγκεφάλων κ.α.



Σημειακή συγκόλληση Laser για ηλεκτρονικές εφαρμογές

2.12.4 Εφαρμογές στην βιομηχανία ναυπήγησης.

Ναυπηγικές βιομηχανίες χρησιμοποιούν την διαδικασία για την συγκόλληση μεγάλων επιφανειών, κυρίως σε ταχύπλοα σκάφη τύπου γιότ (Yacht) .

2.12.5 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Η διαδικασία συγκόλλησης Laser αποτελεί την βασική τεχνική για την συγκόλληση του μεγαλύτερου μέρους της δομής ενός αυτοκινήτου. Χρησιμοποιείται στην συγκόλληση του σασί, καθώς και στην συγκόλληση άλλων δομικών στοιχείων, όπως οι πόρτες και το κουβούκλιο του οχήματος.



Εγκατάσταση συγκόλλησης Laser αυτοκινητοβιομηχανίας [54]

2.12.6 Άλλες εφαρμογές

- Καταναλωτικά αγαθά
- Κύλινδροι, σωλήνες
- Λάμπες
- Λάμες πριονιών
- Συσκευασία προϊόντων

2.12.7 Ειδικές εφαρμογές

Η συγκόλληση με Laser χρησιμοποιείται και για την κατασκευή αντικειμένων πέρα από τα όρια της βιομηχανικής παραγωγής [55].



Καρέκλα η οποία έχει συγκολληθεί με Laser



...μεγάλου μεγέθους.



Έργο τέχνης για την κατασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκε η τεχνική συγκόλλησης Laser για την συγκόλληση της βάσης του και η τεχνική κοπής με Laser για την φιγούρα που απεικονίζει[56].

Κεφάλαιο 3: Συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης Friction Stir Welding-FSW

3.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding-FSW) είναι μια σχετικά σύγχρονη ολοκληρωμένη διαδικασία συγκόλλησης. Αυτή η τεχνική είναι φιλική προς το περιβάλλον, δεν έχει μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας.

Συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση υψηλής αντοχής αεροδιαστημικών κραμάτων αλουμινίου, αλλά και για άλλα μεταλλικά κράματα που θεωρούνται ασυγκόλλητα με τις συμβατικές τεχνικές συγκόλλησης τήξεως. Η τεχνική FSW θεωρείται ως η πλέον ουσιαστική εξέλιξη στην συγκόλληση μετάλλων την τελευταία δεκαετία.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε η μέθοδος “Επεξεργασία συγκόλλησης μέσω ανάδευσης-Friction Stir Processing-FSP” [57] για την μετατροπή στη μικροδομή μεταλλικών υλικών και την παραγωγή καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων σε αυτά κατόπιν της συγκόλλησης FSW.

Παρότι η πλειονότητα των στοιχείων που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν κράματα αλουμινίου, σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για άλλα μέταλλα.

3.2 Γνωριμία με την διαδικασία

Η δυσκολία στην κατασκευή υψηλής αντοχής και υψηλής αντίστασης σε κόπωση και θραύση μέσω συγκολλήσεων τήξεως αεροδιαστημικών κραμάτων αλουμινίου όπως είναι τα κράματα των σειρών 2000 & 7000 ήταν για καιρό μεγάλο πρόβλημα για την βιομηχανία.

Αυτά τα κράματα αλουμινίου έχουν χαρακτηριστεί γενικά ως μη-συγκολλητά λόγω της μικροδομής που παρουσίαζαν κατά την στερεοποίηση και του μεγάλου ποσοστού πόρων που παρουσίαζαν στην ζώνη τήξεως. Επίσης η απώλεια κάποιων χρήσιμων μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το αρχικό κράμα είναι ιδιαίτερα σημαντική.

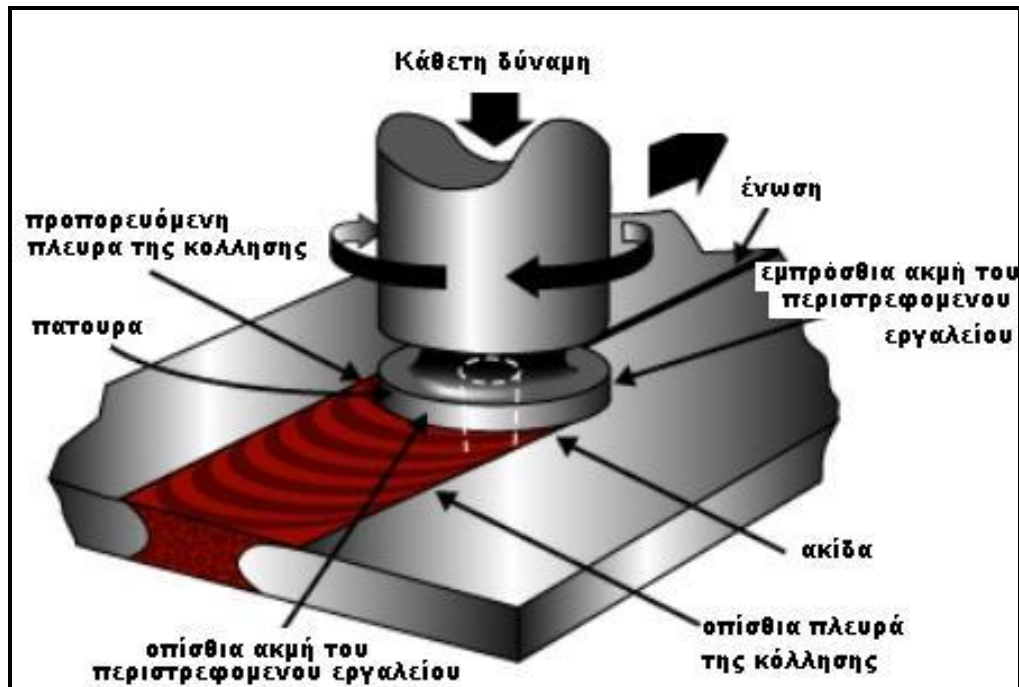
Κάποια κράματα αλουμινίου μπορούν να συγκολληθούν με συμβατικές συγκολλήσεις αντιστάσεως αλλά η προετοιμασία της επιφανείας και η έντονη οξειδωση που παρουσιάζουν είναι μεγάλο πρόβλημα.

Η βασική ιδέα της διαδικασίας FSW είναι ιδιαίτερα απλή:
Ένα μη αναλώσιμο ειδικά διαμορφωμένο περιστρεφόμενο εργαλείο, εισέρχεται στις γειτονικές πλευρές των κομματιών προς συγκόλληση.

Το εργαλείο εξυπηρετεί δύο πρωταρχικούς σκοπούς:

- Θερμαίνει το κατεργαζόμενο κομμάτι
- Μεταφέρει υλικό από την μία πλευρά στην απέναντι δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο την συγκόλληση

Στο ακόλουθο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία FSW:



σχήμα 3.1: Συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης-FSW

Η θέρμανση επιτυγχάνεται μέσω τριβής μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου κομματιού. Η τοπική θέρμανση κάνει τις πλευρές που βρίσκονται σε επαφή με το εργαλείο εύπλαστες και η περιστροφή του εργαλείου οδηγεί σε μετακίνηση υλικού από το εμπρός άκρο του εργαλείου στο πίσω άκρο. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την δημιουργία μίας συγκόλλησης “ενιαίου υλικού”

Λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας του εργαλείου η κίνηση του υλικού γύρω από την ακίδα του είναι αρκετά περίπλοκη [58]. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας FSW το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την δημιουργία ανακρυστάλλωσης των κόκκων που επηρεάζονται. Η νέα μικροδομή έχει ιδιαίτερα καλές μηχανικές ιδιότητες.

Η διαδικασία FSW θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον επειδή καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από τις συμβατικές τεχνικές, δεν απαιτεί την παρουσία κάποιου αερίου θωράκισης και επίσης δεν παράγει επιβλαβή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον αέρια. Η συγκόλληση δεν

απαιτεί την χρήση κάποιου υλικού πληρώσεως και μας δίνει την δυνατότητα να συγκολλήσουμε οποιοδήποτε κράμα αλουμινίου , χωρίς ανησυχία για την συμβατότητα ή μη των συστατικών, θέμα που δημιουργεί περιορισμούς στις συνήθεις συγκολλήσεις. Όταν το απαιτεί η παραγωγή, η διαδικασία FSW δίνει την δυνατότητα συγκόλλησης διαφορετικής σύστασης κραμάτων αλουμινίου. Σε αντίθεση με την συμβατική μέθοδο συγκόλλησης τριβής η οποία είναι εφαρμόσιμη μόνο σε μικρά ομοαξονικά τεμάχια τα οποία μπορούν να περιστράφουν και να πιεστούν το ένα προς το μέρος του άλλου για να σχηματιστεί η κόλληση [59], η διαδικασία FSW βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τύπους ενώσεων όπως συνδέσεις επικάλυψης συνδέσεις άκρων και δικτυωτές συνδέσεις [60]. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα 3.1:

Μεταλλουργία	Περιβάλλον	Ενέργεια
<ul style="list-style-type: none"> Ολοκληρωμένη διαδικασία Χαμηλή παραμόρφωση Μεγάλη επαναληπτικότητα Διατήρηση στοιχείων κράματος Άψογες μεταλλικές ιδιότητες στην κόλληση Ποιοτική μικροδομή Απουσία θραύσεων Αντικαθιστά πολλές συναρμογές 	<ul style="list-style-type: none"> Δεν απαιτεί αέριο θωράκισης Δεν απαιτεί προεπ. επιφάνειας Ελάχιστα απόβλητα Ελάχιστα διαλυτικά για καθαρισμό Οικονομία αναλωσίμων 	<ul style="list-style-type: none"> Χρήση βελτιωμένων υλικών επιτρέπει την μείωση βάρους Καταναλώνει το 2.5% της ενέργειας μιας συγκ. LASER Προσφέρει μειωμένη κατανάλωση σε αεροσκάφη, πλοία, αυτοκίνητα

πίνακας 3.1:Κύρια πλεονεκτήματα της διαδικασίας FSW

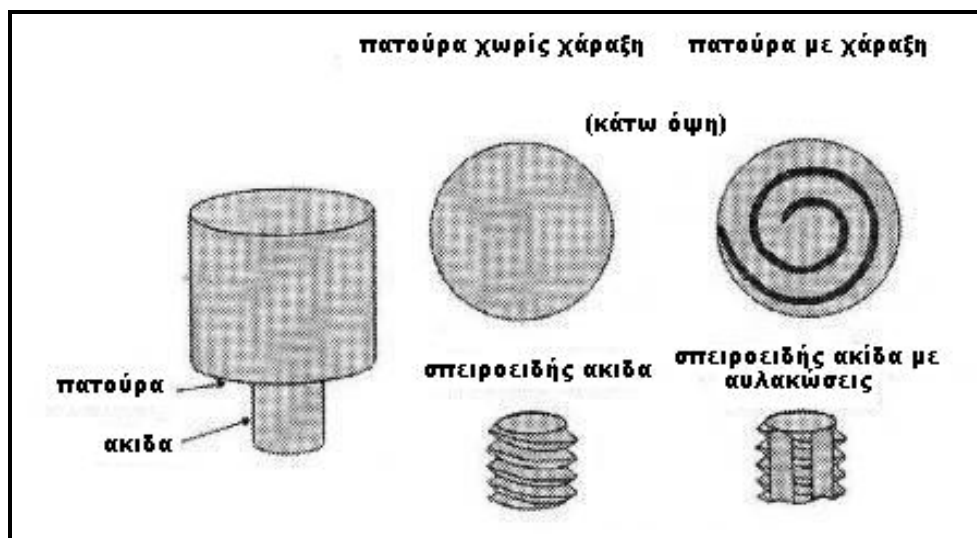
Πρόσφατα αναπτύχθηκε η επεξεργασία συγκόλλησης μέσω ανάδευσης (FSP) [61,62] σαν ένα εργαλείο μεταβολής της μικροδομής κάθε υλικού σύμφωνα με τις αρχές και τις απαιτήσεις της διαδικασίας FSW.

3.3 Παράμετροι Διαδικασίας

3.3.1 Γεωμετρία εργαλείου

Η γεωμετρία του περιστρεφόμενου εργαλείου είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία. Παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην ροή υλικού και κατά συνέπεια στην εφαρμογή ή όχι της διαδικασίας σε κάθε περίπτωση.

Ένα εργαλείο FSW αποτελείται από δύο ευδιάκριτα τμήματα, όπως παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 3.2:



σχήμα3.2:Σχηματική αναπαράσταση ενός εργαλείου FSW

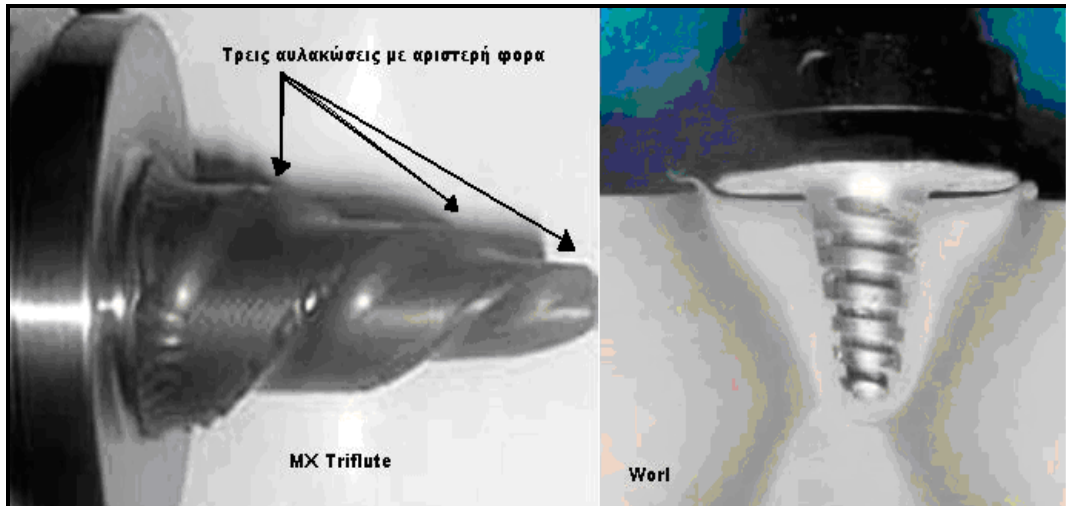
Διακρίνεται καθαρά η πατούρα και η ακίδα του εργαλείου.

Στο αρχικό στάδιο της εμπλοκής του εργαλείου με το υλικό, η θέρμανση επιτυγχάνεται αρχικά με την τριβή της ακίδας και του υλικού. Κάποια επιπλέον θερμότητα προκύπτει από την παραμόρφωση του υλικού. Το εργαλείο εμπλέκεται ολοένα και βαθύτερα έως ότου η πατούρα έρθει σε επαφή με το κομμάτι. Η τριβή της πατούρας με το κομμάτι επιφέρει την μεγαλύτερη αύξηση στη θερμοκρασία. Από την πλευρά της θερμότητας που απαιτείται για την διαδικασία, το σχετικό μέγεθος της πατούρας και της ακίδας του εργαλείου είναι ιδιαίτερα σημαντικά, αλλά όχι και τα υπόλοιπα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εργαλείου.

Ο δεύτερος σκοπός που εξυπηρετεί το εργαλείο είναι ότι “αναδεύει” και “μετακινεί” το υλικό.

Καθώς η εμπειρία και η κατανόηση της διαδικασίας ροής υλικού αυξάνεται η γεωμετρία των εργαλείων έχει εξελιχθεί αρκετά. Σύνθετοι σχηματισμοί έχουν εξελιχθεί με σκοπό να μεταβάλλουν την ροή υλικού και να μειώσουν τα φορτία που δημιουργούνται κατά την διαδικασία.

Τα εργαλεία *Whorl™* και *MX Triflute™* τα οποία αναπτύχθηκαν από το TWI φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα 3.3.

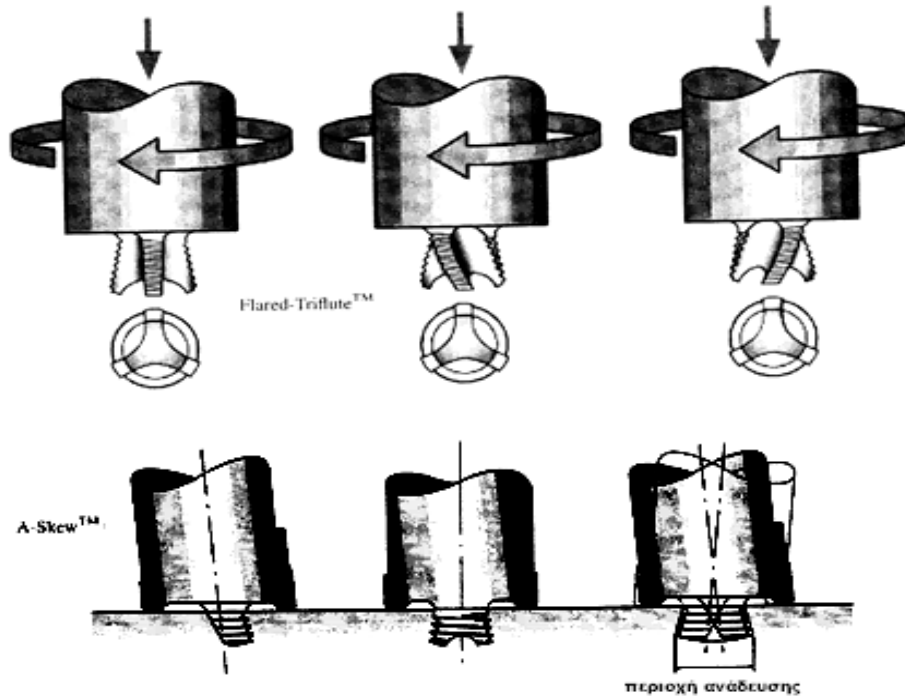


σχήμα 3.3: Γεωμετρίες εργαλείων και *Whorl™* και *MX Triflute™*

Παρατηρήθηκε πως η γεωμετρία του *Whorl™* μειώνει τον όγκο του μετακινούμενου υλικού κατά 60% και του *MX Triflute™* κατά 70%. Οι δύο αυτές γεωμετρίες εργαλείων παρατηρήθηκε πως [63]:

- α) μειώνουν τις δυνάμεις συγκόλλησης
- β) παράγουν πιο εύκολα την απαιτούμενη ροή υλικού
- γ) διαχειρίζονται καλύτερα τις κάθετες συνιστώσες των φορτίων που παράγονται
- δ) αυξάνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της ακίδας και του πλαστικοποιημένου υλικού με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής θερμότητας.

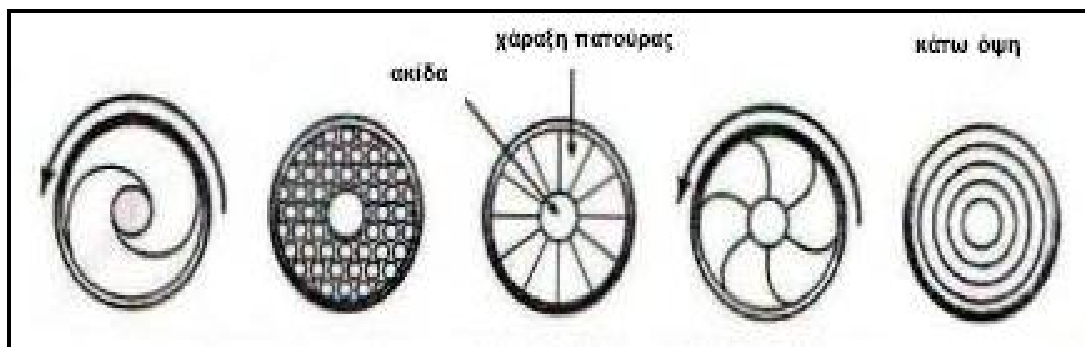
Για συγκολλήσεις επικάλυψης οι συμβατικοί κύλινδροι ακίδος αποδείχθηκε πως λέπτυναν σε μεγάλο βαθμό το επιφανειακό στρώμα του μετάλλου με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των δυνατοτήτων του μετάλλου για να καμφθεί [64]. Για να αντιμετωπιστούν αυτοί οι περιορισμοί αναπτύχθηκαν οι γεωμετρίες *Flared-Triflute™* και *A-skew™* όπου η ακίδα είναι ελαφρά κεκλιμένη ως προς τον άξονα του εργαλείου, από το TWI. Οι δύο αυτοί σχεδιασμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4:



σχήμα3.4:Γεωμετρίες *Flared – Triflute™* και *A – skew™* [65]

Οι δύο αυτές γεωμετρίες προσφέρουν πάνω από 100% βελτίωση στην ταχύτητα συγκόλλησης, περίπου 20% μείωση των αξονικών δυνάμεων, πλάτυνση της συγκόλλησης έως και 190% και μείωση του βάθους στόχευσης.

Επίσης από το TWI σχεδιαστήκαν διάφορες πατούρες, η κάθε μια από τις οποίες συμβαδίζει με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του κάθε υλικού.



σχήμα3.5:Γεωμετρίες πατούρας εργαλείων FSW (Copyright 2001TWI) [66]

Λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη επίδραση της γεωμετρίας του εργαλείου στη ροή του υλικού βασικές διαφορές στην μικροδομή που παράγεται και στην ροή του υλικού παρατηρούνται με την χρήση διαφορετικών εργαλείων.

3.3.2. Παράμετροι συγκόλλησης

Για την διαδικασία FSW δύο παράμετροι είναι πολύ σημαντικοί: Ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου (ω ,rpm) καθώς επίσης και η φορά περιστροφής αυτού και η ταχύτητα κίνησης (v ,mm/min) του στον διαμήκη άξονα της συγκόλλησης.

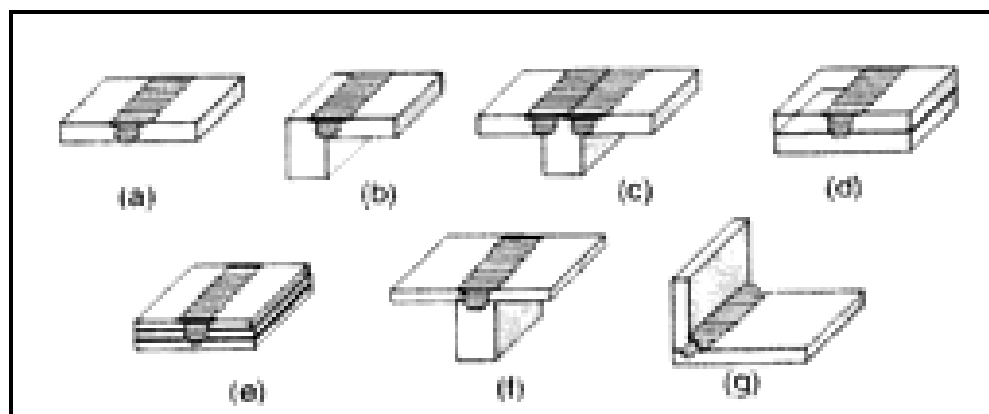
Επιπλέον ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συγκόλληση είναι η γωνία με την οποία εμπλέκεται το εργαλείο με το κατεργαζόμενο κομμάτι. Μια σωστή εμπλοκή του εργαλείου εξασφαλίζει την ιδανική συγκράτηση από την πατούρα του ρευστοποιημένου υλικού και την μετακίνηση του από το εμπρός μέρος της ακίδας στο πίσω με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση της κόλλησης. Το βάθος διείσδυσης της ακίδας στο κομμάτι (το αποκαλούμενο και βάθος στόχευσης) είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Το βάθος στόχευσης σχετίζεται άμεσα με το ύψος της ακίδας. Όταν αυτό είναι μικρότερο από το πρόβον, η πατούρα του εργαλείου δεν εμπλέκεται με την επιφάνεια του υλικού με αποτέλεσμα να μην μπορεί η πατούρα να κινήσει ικανοποιητικά το υλικό από το εμπρός στο πίσω μέρος της ακίδας και να παρουσιάζεται πλεονάζον υλικό στην επιφάνεια του κομματιού. Εάν αντίθετα το βάθος στόχευσης είναι μεγάλο, η πατούρα δημιουργεί αυλακώσεις στην επιφάνεια και επιφέρει λέπτυνση των συγκολληθέντων κομματιών.

Η προθέρμανση ή η ψύξη του κατεργαζόμενου κομματιού είναι επίσης σημαντική για κάποιες συγκεκριμένες συγκολλήσεις FSW. Όταν το υλικό έχει υψηλό σημείο τήξεως όπως το ατσάλι και το τιτάνιο ή όταν το υλικό έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χαλκός, η θερμότητα που παράγεται από την τριβή και την ανάδευση μπορεί να μην επαρκεί για την θέρμανση και τη ικανοποιητική ροή υλικού γύρω από την ακίδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η προθέρμανση ή η χρήση μιας εξωτερικής πηγής θερμότητας μπορεί να βοηθήσει την ροή υλικού και να δώσει την δυνατότητα στην διαδικασία FSW να εφαρμοστεί και σε άλλα υλικά.

Από την άλλη πλευρά σε υλικά με χαμηλό σημείο τήξεως όπως το μαγνήσιο και το αλουμίνιο το υλικό μπορεί να ψυχθεί με σκοπό την μείωση της ανακρυστάλλωσης και τον περιορισμό της ζώνης ανάδευσης.

3.3.3. Σχεδιασμός ενώσεων

Οι πλέον εύχρηστες διατάξεις ενώσεων είναι οι ενώσεις άκρων και οι ενώσεις επικάλυψης όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 3.6:



σχήμα3.6:Συνηθεις διατάξεις συγκολλήσεων FSW[67]

Πέρα από τις παραπάνω διατάξεις, πολλές ακόμα μπορούν να προκύψουν από τον συνδυασμό των παραπάνω. Επίσης γωνιακές κολλήσεις μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με τις ανάγκες της παραγωγής.

Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η διαδικασία FSW δεν απαιτεί καμία ειδική προετοιμασία για συγκολλήσεις άκρων και επικάλυψης.

3.4 Μοντελοποίηση της διαδικασίας FSW

Η διαδικασία FSW/FSP προκαλεί μια έντονη πλαστική παραμόρφωση του υλικού και μια αύξηση της θερμοκρασίας γύρω από την ζώνη ανάδευσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της μικροδομής του υλικού, αλλαγή στο μέγεθος των κρυστάλλων του και άλλες μεταβολές. Η κατανόηση αυτών των αλλαγών προκύπτει από την κατανόηση των μηχανικών και θερμικών διεργασιών που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα έως τώρα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την μελέτη αυτών των διεργασιών .

3.4.1 Μεταλλική ροή

Η ροή υλικού κατά την διάρκεια της FSW είναι αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από την γεωμετρία του εργαλείου, τις παραμέτρους που επηρεάζουν την συγκόλληση και από το ίδιο το υλικό. Είναι μεγάλης

σημασίας η κατανόηση των χαρακτηριστικών ροής κάθε υλικού για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κάθε εργαλείου και για την παραγωγή και διατήρηση υψηλής ποιότητας κολλήσεων.

Αυτή η ανάγκη έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην επινόηση διαφόρων τεχνικών πειραματικής παρατήρησης, οπτικοποίησης και καταγραφής της μεταλλικής ροής κατά την διάρκεια της FSW [68]. Οι κυριότερες παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω. Πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι λόγω των μεγάλων διαφορών που παρατηρούνται σε κάθε εφαρμογή της διαδικασίας με διαφορετικό υλικό και εργαλείο τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές παρατηρήσεις σε καμία περίπτωση δεν γενικεύονται και δεν αποτελούν κανόνες που ισχύουν σε κάθε εφαρμογή. Κάποια γενικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από την συγκριτική μελέτη διαφόρων διαδικασιών FSW θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα της εργασίας.

Για την μελέτη της ροής του υλικού χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τεχνικές.

Τεχνική παρακολούθησης της μεταλλικής ροής με την χρήση σαν υλικό παρακολούθησης ενός διαφορετικού υλικού από αυτό το οποίο συγκολλείτε [69]. Τέτοια υλικά παρακολούθησης είναι κάποια κράματα αλουμινίου, διαφορετικά σε κάθε περίπτωση από το μέταλλο βάσης, ένα φύλλο χαλκού, μικρά κομμάτια από ατσάλι, καθώς και καλώδια βολφραμίου.

Από αυτό τον τρόπο παρατήρησης έχουν εξαχθεί κάποια ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα:

Πρώτον έχουν παρατηρηθεί κάποια κοινά στοιχεία στην ροή κάθε υλικού. Η ροή δεν είναι συμμετρική σε σχέση με την κεντρική γραμμή της κόλλησης. Ένας σημαντικός όγκος του υλικού παρακολούθησης κινήθηκε σε μία τελική θέση, πίσω από την αρχική του θέση και μόνο μία μικρή ποσότητα του υλικού παρακολούθησης κινήθηκε σε τελική θέση μπροστά από την αρχική του. Το μήκος της κίνησης του υλικού προς τα πίσω ήταν ακριβώς όσο και η διάμετρος της ακίδας του εργαλείου.

Δεύτερον παρατηρήθηκε μια ευκρινής αλληλεπίδραση μεταξύ των προπορευμένων και των υποχωρούντων πλευρών και το υλικό ουσιαστικά δεν αναδευόταν κατά μήκος της αλληλεπίδρασης, τουλάχιστον όχι παρατηρώντας την διαδικασία μακροσκοπικά.

Τρίτον υλικό παρατηρήθηκε πως πιεζόταν προς τα κάτω στην προπορευμένη πλευρά της ακίδας και ανέβαινε έως την πατούρα στην οπίσθια πλευρά. Αυτό δείχνει ότι η “ανάδευση” του υλικού συμβαίνει μόνο στην αιχμή της συγκόλλησης δηλαδή στην προπορευμένη πλευρά της ακίδας εκεί όπου η περιστρεφόμενη πατούρα του εργαλείου έθετε σε κίνηση το υλικό από τις πλευρές προς το προπορευμένο άκρο.

Τέταρτον, το σύνολο της κάθετης εκτόπισης της πλευράς που υποχωρεί είναι αντιστρόφως ανάλογο με το βαθμό συγκόλλησης(ταχύτητα συγκόλλησης/ρυθμός περιστροφής= πρόωση του εργαλείου ανά περιστροφή)

Πέμπτον, η μεταφορά υλικού κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου της ακίδας όταν η ταχύτητα κόλλησης και ο ρυθμός περιστροφής παραμένει σταθερός.

Βασιζόμενοι σε αυτές τις παρατηρήσεις μπορούμε να περιγράψουμε την διαδικασία FSW σαν μια διαδικασία εξόρυξης όπου η πατούρα, η ακίδα και το ψυχρό μέταλλο που περιβάλλει την ζώνη συγκόλλησης δημιουργούν ένα "θάλαμο εξόρυξης" ο οποίος κινείται με το κατεργαζόμενο κομμάτι [70].

Συμπερασματικά, από την μελέτη της ροής υλικού με αυτή την τεχνική μπορούμε να αναφέρουμε πως η εξόρυξη γύρω από την ακίδα, σε συνδυασμό με την ανάδευση που συντελείται στο εμπρόσθιο άκρο της κόλλησης δημιουργεί κάτω από την ακίδα του εργαλείου και σε ίση διάμετρο με αυτού, μια κυκλική κάθετη κίνηση γύρω από τον διαμήκη άξονα της κόλλησης.

Σε μια άλλη μελέτη της μεταλλικής ροής συναντάμε τη χρήση ατσάλινων σφαιριδίων σαν υλικό παρακολούθησης και της τεχνικής "διακοπής δράσης". Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν ένθετα σφαιρίδια διαμέτρου 0.38mm, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης σε διαφορετικά σημεία αυτής. Μετά από κάθε κόλληση, η ραφή εξεταζόταν με την μέθοδο της ραδιογράφισης για να αποκαλυφθεί η κατανομή του υλικού παρακολούθησης γύρω και πίσω από την ακίδα.

Η τεχνική "διακοπής δράσης" περιέχει τον τερματισμό της συγκόλλησης ξαφνικά, σταματώντας την προς τα εμπρός κίνηση του και στιγμιαία απομπλέκοντας το γυρνώντας το αντίστροφα με έναν ρυθμό που το "ξεβιδώνει" αφήνοντας ακέραιη τη διαμόρφωση του υλικού μέσα στις σπείρες του [71,72]. Τμηματοποιώντας την κλειδαρότρυπα (την εσοχή δηλαδή που φάνηκε από την απομάκρυνση του εργαλείου) το μοντέλο ροής στην περιοχή αποκαλύπτεται. Με αυτή την διαδικασία καταλήξαμε σε κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις οι οποίες είναι

Εν πρώτοις η κατανομή των ατσάλινων σφαιριδίων μπορεί να διαιρεθεί σε δύο γενικές κατηγορίες. Στην χαοτική κατανομή και στην συνεχή κατανομή. Στις περιοχές κοντά στην επιφάνεια μεμονωμένα σφαιρίδια είχαν διασκορπιστεί με έναν ακανόνιστο τρόπο σε μια σχετικά μεγάλη επιφάνεια πίσω από την ακίδα του εργαλείου και για αυτό η κατανομή αυτή ονομάστηκε χαοτική. Επίσης τα σφαιρίδια αυτής της κατανομής βρέθηκαν να έχουν μετακινηθεί βαθύτερα από την αρχική τους θέση.

Σε άλλες περιοχές η αρχική συνεχής γραμμή των σφαιριδίων μετατράπηκε σε μια σχεδόν συνεχή γραμμή μετά το πέρασμα της ακίδας, εξ' ου και η ονομασία αυτής της κατανομής σαν συνεχή. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί πως παρατηρήθηκε μια μικρή μετακίνηση των σφαιριδίων προς την επιφάνεια στην συνεχή κατανομή.

Μια δεύτερη παρατήρηση είναι πως στην εμπρόσθια πλευρά της ακίδας βρέθηκαν να έχουν δημιουργηθεί σπείρες μόνο από το μέταλλο βάσεως. Η συνεχής προς τα κάτω κίνηση των σπειρών σε συνδυασμό με την πρόωση προς τα εμπρός της ακίδας, ανάγκασε το υλικό το οποίο βρισκόταν παγιδευμένο στις σπείρες του εργαλείου να καταλήξει στο πίσω μέρος της ακίδας.

Βασιζόμενοι σε αυτές τις παρατηρήσεις οι ερευνητές κατέληξαν ότι δεν αναδύεται όλο το υλικό και ένα ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό αυτού απλά εξωθείται από την περιστρεφόμενη ακίδα του εργαλείου και καταλήγει πίσω. Πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι εάν το υλικό παρακολούθησης είχε διαφορετική αντοχή και πυκνότητα θα μπορούσαμε να καταλήξουμε σε διαφορετικά συμπεράσματα.

3.4.2 Παρατηρήσεις στην Μικροδομή του υλικού βάσης

Η ιδέα ότι η διαδικασία FSW είναι παρόμοια με μια διαδικασία εξώθησης υποστηρίζεται από το γεγονός ότι παρατηρείτε η δημιουργία κυκλικών δαχτυλιδιών κατά την εφαρμογή της σε διάφορα κράματα αλουμινίου [73]. Αυτά τα δαχτυλίδια βρίσκονται στην ζώνη συγκόλλησης αποτελούν ένα σαφές στοιχείο ότι κατά την διαδικασία FSW συντελούνται γνωστά φαινόμενα που συναντούμε σε διαδικασίες μεταφοράς υλικού. Προτάθηκε επίσης ότι η διαδικασία FSW μπορεί να περιγραφεί απλά σαν η έλαση ενός ημικυλινδρικού στρώματος υλικού από την ακίδα του εργαλείου με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας εγκάρσιας τομής, η οποία ακολουθείται από την αντίστοιχη οπίσθια τομή του εργαλείου δημιουργώντας έτσι τα κυκλικά δαχτυλίδια [74].

3.4.3. Μοντελοποίηση της Μεταλλικής ροής

Πέρα από τις πειραματικές προσεγγίσεις στην μελέτη της μεταλλικής ροής ένας αριθμός από μελέτες έχει καταφέρει να μοντελοποιήσει τη ροή υλικού χρησιμοποιώντας διάφορες υπολογιστικές τεχνικές όπως μαθηματικά μοντέλα, απλά γεωμετρικά μοντέλα [75,76] και μοντέλα μεταλλουργίας [77]. Αυτές οι προσπάθειες έχουν στόχο την κατανόηση των βασικών φυσικών αρχών που διέπουν την ροή υλικού κατά την διαδικασία FSW.

Μια τέτοια προσέγγιση είναι η ανάπτυξη δύο μοντέλων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, του μοντέλου ολίσθησης και του μοντέλου τριβής για την προσομοίωση της διαδικασίας [78]. Τα αποτελέσματα που εξαχθήκαν από τη μελέτη αυτών των μοντέλων είναι παρόμοια με αυτά που εξάγονται από την μελέτη της ροής υλικού με την τεχνική των ένθετων σφαιριδίων παρακολούθησης που αναφέρθηκε προωύτερα.

Ένα δυσδιάστατο μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής χρησιμοποιήθηκε επίσης για την περιγραφή της ροής και μας έδωσε κάποια ιδιαίτερα σημαντικά αποτελέσματα [49]. Παρατηρήθηκε ότι η περιοχή παραμόρφωσης στο μοντέλο ολίσθησης είναι πολύ μικρότερη στο προπορευμένο άκρο της ακίδας από ότι είναι σε αυτό που έπεται.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι το υλικό που συναντάει η ακίδα στη πορεία της συσσωρεύεται γύρο από το οπίσθιο άκρο της ακίδας.

Εκτός τούτου, οι υδροδυναμικές γραμμές παρουσιάζουν μια διόγκωση πίσω από το εργαλείο, αναγκάζοντας υλικό να προωθηθεί από το πίσω μέρος της ακίδας προς το εμπρός άκρο αυτής. Αυτή η παρατήρηση συνάδει με προηγούμενα συμπεράσματα που εξήχθησαν με την τεχνική παρακολούθησης ροής μέσω ένθετων υλικών [80].

Σε ένα θερμομηχανικό μοντέλο το οποίο λάμβανε υπόψη του την γεωμετρία του εργαλείου, τον τύπο του κράματος προς κόλληση, την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου καθώς και την θέση του σαν δεδομένα και προέβλεπε τα φορτία που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία, το προφίλ της ροής του υλικού και το θερμικό προφίλ της κόλλησης φάνηκε πως υπάρχουν τρία είδη διακριτών μεταξύ τους ροών κάτω από την πατούρα του εργαλείου [81].

1) Μια περιοχή ροής ακριβώς κάτω από την πατούρα, η οποία κινείται προς την κατεύθυνση περιστροφής του εργαλείου.

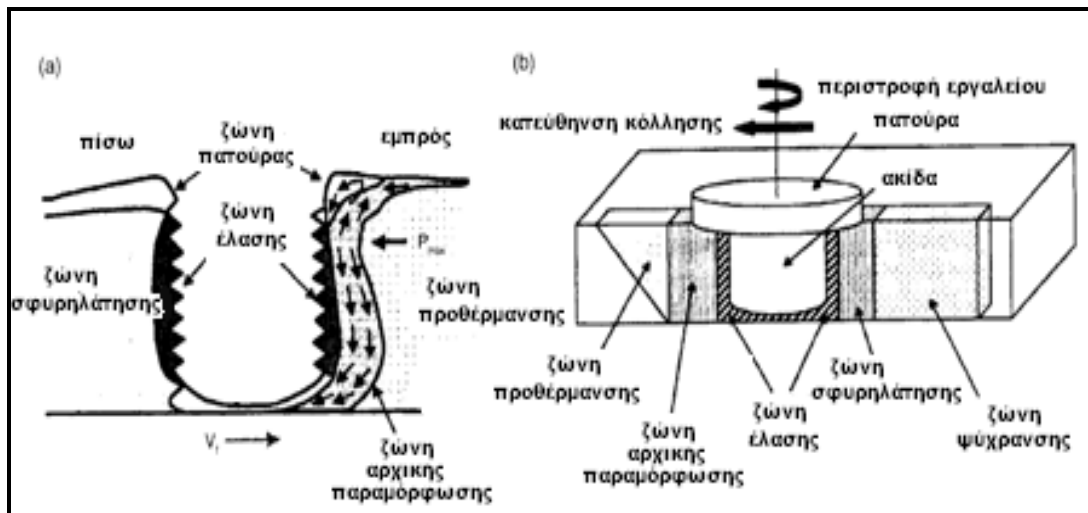
2) Μια περιοχή ροής όπου το υλικό εξωθείται πέρα από το περιστρεφόμενο εργαλείο και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση του προς το άκρο της ακίδας και

3) Μια περιοχή μετάβασης από την περιοχή 1 στην περιοχή 2 όπου η ροή παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά.

Πρόσφατα προτάθηκε πως η μικροδομή που προκύπτει και τα χαρακτηριστικά της μεταλλικής ροής κατά την διαδικασία FSW έχουν πολλές ομοιότητες με την μικροδομή που προκύπτει από την κλασσική έλαση και σφυρηλάτηση του αλουμινίου και για αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια μεταλλουργική διαδικασία, δηλαδή με την μελέτη των πέντε χαρακτηριστικών περιοχών που συναντάμε σε κάθε συμβατική μεταλλουργική διαδικασία [82].

- 1) Ζώνη προθέρμανσης
- 2) Αρχική παραμόρφωση
- 3) Έλαση
- 4) Σφυρηλάτηση
- 5) Ζώνη ψύξεως

Οι παραπάνω περιοχές φαίνονται στο σχήμα 3.7 που ακολουθεί



σχήμα 3.7

Σχηματική αναπαράσταση της μεταλλικής ροής(α) Μεταλλουργικές ζώνες κατά την FSW(b)

Στην ζώνη προθέρμανσης η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της τριβής ανάμεσα στο περιστρεφόμενο εργαλείο και της επιφάνειας, καθώς και λόγω της αδιαβατικής θέρμανσης που προκύπτει από την παραμόρφωση του υλικού. Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού και η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου ορίζουν την έκταση και τον ρυθμό θέρμανσης της περιοχής. Καθώς το εργαλείο προχωράει εμπρός σχηματίζεται μια ζώνη αρχικής παραμόρφωσης όταν το υλικό θερμαίνεται πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία και το μέγεθος της έντασης ξεπεράσει το όριο διαρροής του υλικού επιτρέποντας να ξεκινήσει έτσι η ροή υλικού. Το υλικό σε αυτή τη περιοχή πιέζεται ταυτόχρονα προς τα επάνω, στην ζώνη ροής της πατούρας του εργαλείου και προς τα κάτω, στην ζώνη έλασης όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Μια μικρή ποσότητα υλικού παγιδεύεται στην δίνη που σχηματίζεται στο κάτω μέρος της ακίδας.

Στην ζώνη έλασης και για ένα πεπερασμένο πλάτος αυτής παρατηρείτε πως το υλικό ρέει ομαλά από το εμπρός μέρος της ακίδας προς το πίσω. Ένα κρίσιμο ισοδύναμο θερμότητας σε κάθε πλευρά του εργαλείου ορίζει το πλάτος της ζώνης παραμόρφωσης όπου το μέγεθος της έντασης και η θερμοκρασία είναι ανεπαρκής για να υπάρξει ροή του υλικού.

Πέρα από την ζώνη έλασης έγκειται η ζώνη σφυρηλάτησης όπου το υλικό που βρίσκεται στο εμπρός μέρος του εργαλείου πιέζεται να εισέλθει στην κοιλότητα που δημιουργεί η ακίδα κινούμενη προς τα εμπρός. Το υλικό εισέρχεται σε αυτή κάτω από συνθήκες υδροστατικής πίεσης. Η πατούρα του εργαλείου βοηθά στον περιορισμό του ρευστού υλικού εντός της κοιλότητας και παράλληλα ασκεί μια κάθετη δύναμη σε αυτό.

Πίσω από την ζώνη σφυρηλάτησης συναντάμε την ζώνη ψύξεως στην οποία το υλικό αφήνεται να κρυώνει, είτε μόνο του, είτε με εξωτερική ψυκτική πηγή.

Εν κατακλείδι η ροή υλικού κατά την διαδικασία FSW είναι ένα σύνθετο φαινόμενο και ο βαθμός γνώσης των συνθηκών και των κανόνων που ισχύουν κατά την παραμόρφωση του υλικού είναι ακόμα και σήμερα 18 χρόνια μετά την εφεύρεση της τεχνικής περιορισμένος. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να τονίσουμε πως υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την ροή υλικού (σχεδιασμός ακίδας και πατούρας εργαλείου, σχετικές διαστάσεις ακίδας και πατούρας, ρυθμός και κατεύθυνση περιστροφής εργαλείου, ταχύτητα πρόωσης, γωνία εμπλοκής, γωνία ατράκτου εργαλείου, είδος υλικού, θερμοκρασία κατεργαζόμενου κομματιού κτλ) . Είναι πολύ πιθανό ότι η ροή υλικού που συναντάμε στην διαδικασία FSW αποτελείται από αρκετές ανεξάρτητες διαδικασίες παραμόρφωσης.

3.4.4 Κατανομή θερμοκρασίας

Η διαδικασία FSW έχει σαν αποτέλεσμα την έντονη πλαστική παραμόρφωση του υλικού γύρω από την περιστρεφόμενη ακίδα του υλικού και την έντονη τριβή ανάμεσα στο εργαλείο και το κατεργαζόμενο κομμάτι. Και οι δύο αυτοί παράγοντες συμβάλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας μέσα και γύρω από την ζώνη ανάδευσης. Δεδομένου ότι η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα και γύρω από την ζώνη ανάδευσης ευθέως επηρεάζει την μικροδομή των κολλήσεων, δηλαδή το μέγεθος των κόκκων, τα όρια τους και κατ' επέκταση τις μηχανικές ιδιότητες των κολλήσεων είναι σημαντικό να ανακτήσουμε πληροφορίες σχετικά με αυτή. Παρόλα αυτά όμως η μέτρηση των θερμοκρασιών που επικρατούν στη ζώνη τήξεως είναι δύσκολη λόγω των έντονων πλαστικών παραμορφώσεων που συντελούνται εκεί, για αυτό οι θερμοκρασίες που επικρατούν εκεί έχουν είτε εκτιμηθεί από την μικροδομή που παρουσιάζει η κόλληση [83], είτε έχουν υπολογιστεί από την ένθεση θερμοζεύγους στις περιοχές που συνορεύουν [84] .

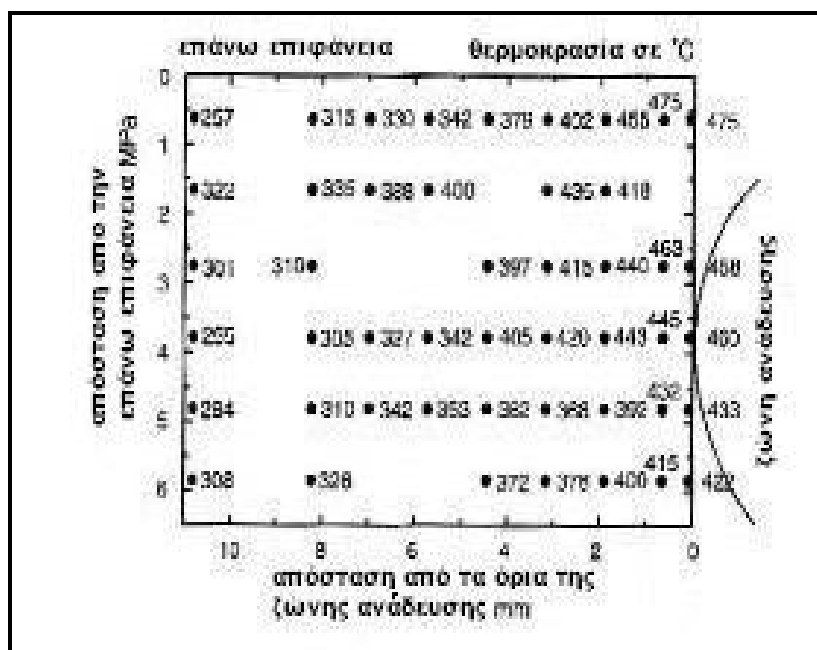
Μια έρευνα [85] στην εξέλιξη της μικροδομής του κράματος 7075Al-T651 έδειξε την διάλυση κάποιων μεγάλων χαρακτηριστικών

δομών του μετάλλου και κατόπιν την ανάπλαση τους στο κέντρο της συγκόλλησης. Εξ αυτού οι ερευνητές συμπέραναν ότι οι μέγιστες θερμοκρασίες κατά την συγκόλληση κυμαίνονται ανάμεσα στους 400 έως 480°C. Μια άλλη έρευνα πάνω στο κράμα μετάλλου 6061Al έδειξε ότι κάποια από τα συστατικά δεν διαλύονται κατά την ανάδευση και έτσι έφτασε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην ζώνη ανάδευσης δεν ξεπερνάει τους 400°C .

Πρόσφατα μελέτη [86] της εξέλιξης της μικροδομής του κράματος 6063Al κατά την διαδικασία FSW χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίου (TEM) και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρατήρησης με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση των θερμικών κύκλων συγκόλλησης ανέφερε τα εξής συμπεράσματα.

Τα συστατικά που βρίσκονται μέσα στην περιοχή συγκόλλησης (0 έως 8,5mm από την γραμμή συγκόλλησης) έλιωσαν τελείως και μετατράπηκαν σε μια μήτρα αλουμινίου. Συγκρίνοντας τις μικροδομές που προέκυπταν από την προσομοίωση των θερμικών κύκλων με διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες κατέληξαν ότι οι περιοχές 0-8.5,10,12.5 και 15mm μακριά από την ζώνη ανάδευσης θερμάνθηκαν σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 402,353,302°C και χαμηλότερα από τους 201°C αντίστοιχα.

Σε μια άλλη μελέτη [87] μελετώντας την συμπεριφορά ενός συγκολληθέντος κομματιού πάχους 6.35mm 7075Al-T651 μετρήθηκε η κατανομή της θερμοκρασίας και προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα 3.8:



σχήμα 3.8:Κατανομή μέγιστης θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση από τα όρια της ζώνης ανάδευσης[87]

Το παραπάνω διάγραμμα αποκαλύπτει τρεις σημαντικές παρατηρήσεις.

Πρώτον, η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στην περιοχή κοντά στη ζώνη ανάδευσης και η θερμοκρασία έπεφτε καθώς απομακρυνόμαστε από αυτή.

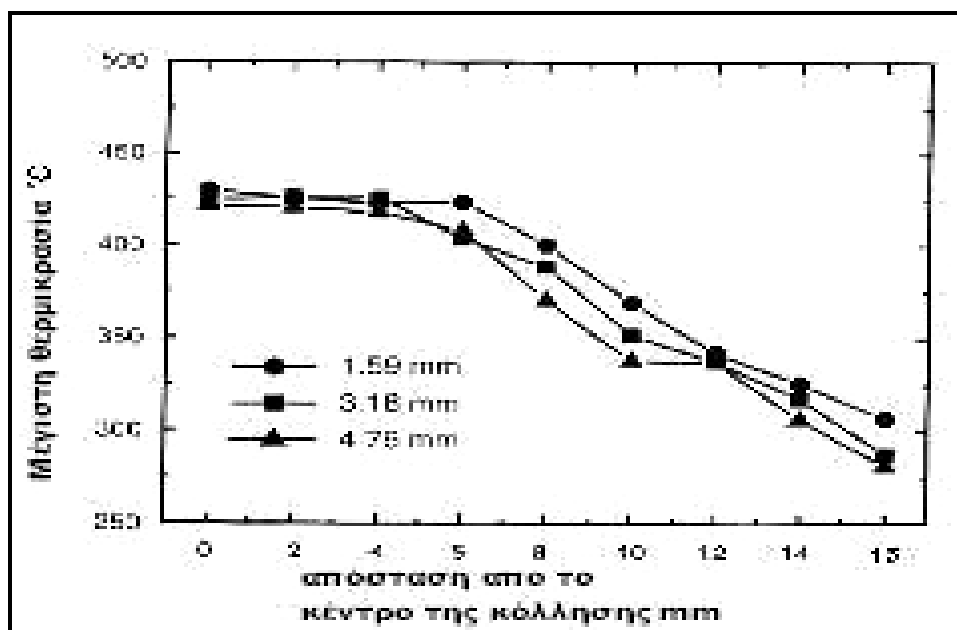
Δεύτερον η θερμοκρασία στα όρια της ζώνη ανάδευσης αυξάνεται όσο προχωράμε από την κάτω πλευρά του επεξεργαζόμενου κομματιού προς την επάνω.

Τρίτον μια μέγιστη θερμοκρασία της τάξεως των 475°C καταγράφηκε στην γωνία μεταξύ της άκρης της ζώνης ανάδευσης και της επάνω επιφάνειας του κομματιού. Αυτή η θερμοκρασία πιστεύεται πως ξεπερνάει την θερμοκρασία διαλύσεως των σκληρυντικών συστατικών του κράματος 7075Al-T651 και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία στην ζώνη ανάδευσης είναι μεγαλύτερη μεν των 475°C, μικρότερη δε από την θερμοκρασία τήξεως του υλικού μιας και δεν παρατηρήθηκε κάποιο στοιχείο που να μαρτυρά την τήξη του υλικού.

Μια άλλη προσπάθεια [88] μέτρησης των θερμοκρασιών που επικρατούν στην ζώνη ανάδευσης ενός κομματιού κράματος αλουμινίου 6061Al πάχους 6.4mm χρησιμοποίησε την τεχνική της ένθεσης ενός θερμοζεύγους στην περιοχή προς κόλληση. Τα θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν σε τρύπες διαμέτρου 0.92mm που είχαν γίνει στο πίσω μέρος του κατεργαζόμενου κομματιού και σε διάφορα σημεία της ραφής.

Οι τρύπες έγιναν σε βάθη 1.59, 3.18 και 4.76mm για να μετρηθεί η θερμοκρασία στον $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ και $\frac{3}{4}$ του πάχους του κατεργαζόμενου κομματιού.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ανέφεραν πως το θερμοζεύγος που είχε τοποθετηθεί στο κέντρο κόλλησης δεν καταστράφηκε από την ακίδα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Απλά μετακινήθηκε ελαφρά παρασυρμένο από την ροή του υλικού μπροστά από την ακίδα. Το διάγραμμα θερμοκρασίας-απόστασης από το κέντρο κόλλησης ακολουθεί. Στο διάγραμμα 3.9 φαίνεται και η χρήση τριών διαφορετικής διαμέτρου, ακίδων.

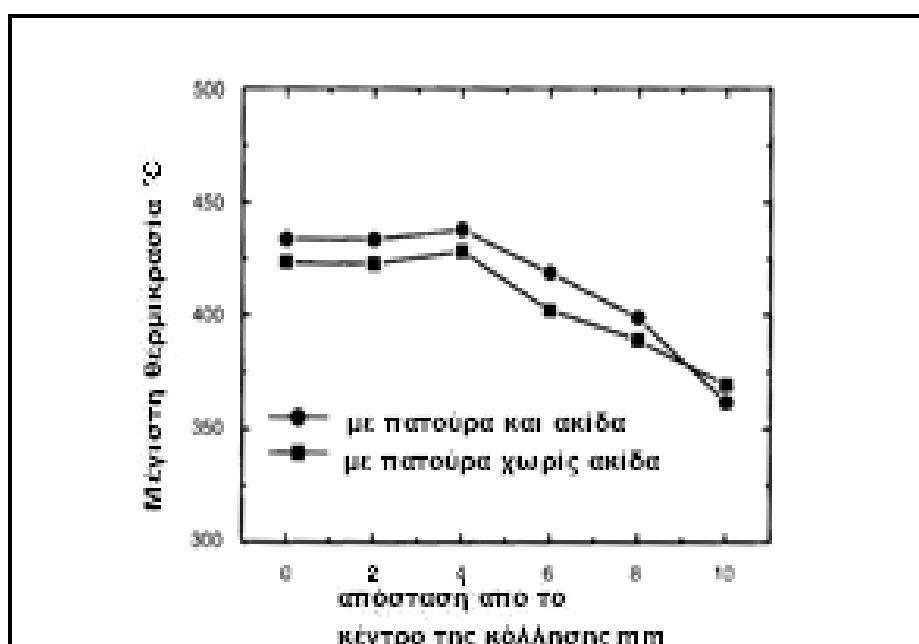


σχήμα 3.9: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόστασης[88]

Η μελέτη, πέραν του ότι επιβεβαίωσε τα συμπεράσματα προηγούμενων μελετών, ανέφερε ότι η θερμοκρασία εντός της ζώνης ανάδευσης είναι σχεδόν ίδια για κάθε σημείο της.

Περαιτέρω έρευνα έδειξε την επίδραση της πίεσης του εργαλείου και του ρυθμού περιστροφής του εργαλείου έχει σαν αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας.

Η επίδραση της πατούρας του εργαλείου μελετήθηκε επίσης και στο ακόλουθο διάγραμμα 3.10 παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή κόλλησης με τη χρήση εργαλείου με και χωρίς ακίδα .



σχήμα 3.10: Μεταβολή της μέγιστης θερμοκρασίας σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο της κόλλησης και σε σχέση με την ύπαρξη ή όχι ακίδας

Πέρα από την παρακολούθηση της κατανομής θερμοκρασίας με πειραματικές διαδικασίες, έχουν αναπτυχθεί και αρκετά μοντέλα αυτής.

Ένα αναλυτικό μοντέλο [89] που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτό που εξετάζει και λαμβάνει υπόψη τον τρόπο επαφής του εργαλείου με το κατεργαζόμενο κομμάτι, ορίζοντας τα τρία είδη επαφής

- 1) Κολλοειδής επαφή
- 2) Ολισθαίνουσα επαφή
- 3) Ολική επαφή

Στο πρώτο είδος επαφής λαμβάνεται σαν δεδομένο ότι το εργαλείο “παρασύρει” υλικό από την επιφάνεια του κομματιού κατά την κίνηση του, στο δεύτερο είδος επαφής το εργαλείο εμφανίζεται να ολισθαίνει στην επιφάνεια και στο τρίτο είδος επαφής υπολογίζεται η συνολική θερμοκρασία που γεννάτε κατά την διαδικασία. Οι τύποι που διέπουν το μοντέλο αυτό παρουσιάζονται παρακάτω.

$$Q_{ολικο,κολ1} = \frac{2}{3} p \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} w ((R_{patouraV}^3 - R_{προβολου}^3)(1 + efpa) + R_{προβολου}^3 + 3R_{προβολου}^2 H_{προβολου})$$

$$Q_{ολικο,ολισq} = \frac{2}{3} pmrw ((R_{patouraV}^3 - R_{προβολου}^3)(1 + ef.a) + R_{προβολου}^3 + 3R_{προβολου}^2 H_{προβολου})$$

$$Q_{ολικο} = \frac{2}{3} p (d \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} + (1-d)m \cdot p) w ((R_{patoura}^3 - R_{προβολου}^3)(1 + ef.a) + R_{προβολου}^3)$$

Όπου Q είναι η ολική θερμότητα (W), σ_{yield} το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας (Pa), ω ο λόγος γωνιακής περιστροφής του εργαλείου (rad/s), $R_{πατούρας}$ η ακτίνα της πατούρας του εργαλείου (m), $R_{προβόλου}$ η ακτίνα της ακίδας του εργαλείου (m), α η γωνία εμπλοκής της πατούρας του εργαλείου ($^{\circ}$), $H_{προβόλου}$ το ύψος της ακίδας του εργαλείου, p η πίεση επαφής (Pa) και δ η μεταβλητή κατάσταση επαφής.

Μετά από μελέτη το μοντέλο αυτό φάνηκε να αποδίδει παρόμοια αποτελέσματα με τις μελέτες πειραμάτων που διεξήχθησαν με ρυθμούς περιστροφής 400rpm και ταχύτητα κόλλησης 120mm/min.

Από τις πολλές μελέτες που διεξήχθησαν σχετικά με την κατανομή της θερμοκρασίας οι ερευνητές κατέληξαν στα ακόλουθα συμπεράσματα, που αφορούν γενικά σε αυτή.

1) Η μέγιστη θερμοκρασία που παρουσιάζεται στην ζώνη ανάδευσης είναι μικρότερη από την θερμοκρασία τήξεως του αλουμινίου

2) Η πατούρα του εργαλείου ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της θερμοκρασίας στην διαδικασία FSW

3) Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την διαδικασία αυξάνεται εάν αυξηθεί η αναλογία περιστροφής του εργαλείου με

σταθερή την ταχύτητα κόλλησης και μειώνεται εάν αυξηθεί η ταχύτητα κόλλησης με σταθερή την αναλογία περιστροφής του εργαλείου. Επιπλέον η μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του λόγου περιστροφής/ταχύτητα κόλλησης.

4) Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στην επάνω επιφάνεια της ζώνης συγκόλλησης.

3.4.5 Εξέλιξη της μικροδομής

Η υψηλή πλαστική παραμόρφωση και η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες στην ζώνη ανάδευσης κατά την διαδικασία FSW/FSP έχει σαν αποτέλεσμα την ανακρυστάλλωση και την ανάπτυξη μεταλλικού ιστού εντός της ζώνης ανάδευσης [90, 91, 92] .

Βασιζόμενοι στα χαρακτηριστικά της μικροδομής των κόκκων και των συστατικών μπορούμε να διακρίνουμε τρεις ξεχωριστές ζώνες

A) Ζώνη ανάδευσης

B) Ζώνη θερμομηχανικής επιρροής (thermo-mechanically affected zone-TMAZ)

Γ) Ζώνη θερμικής επιρροής (Heat affected zone-HAZ)

Οι αλλαγές στην μικροδομή του υλικού σε διάφορες ζώνες έχουν σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες μετά την συγκόλληση. Για αυτό η εξέλιξη της μικροδομής είναι αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνών.

3.4.6 Ζώνη ανάδευσης (τήξεως)

Η έντονη πλαστική παραμόρφωση και η θερμότητα που παράγεται δια της τριβής κατά την διάρκεια της διαδικασίας FSW/FSP έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ανακρυσταλλομένης μικρόδομης μικρών κόκκων. Η περιοχή ανάδευσης επίσης αναφέρεται και σαν ζώνη ή ψήγμα κόλλησης (weld nugget, nugget zone) και σαν ζώνη δυναμικής ανακρυστάλλωσης (dynamically recrystallized zone-DXZ). Στο εσωτερικό των ανακρυσταλλομένων κόκκων ερευνητές ανέφεραν ότι οι μικροί κόκκοι της ζώνης ανάδευσης διαχωρίζονται ακόμα από την παρουσία υποοριών [93] και υποκόκκων [94] . Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανακρυσταλλομένων κόκκων της ζώνης ανάδευσης και του μετάλλου γύρω από αυτή περιορίζεται μόνο στην οπίσθια πλευρά του εργαλείου, αλλά κάποιες φορές, κυρίως στο τέλος της γραμμής κόλλησης, αλληλεπιδρά και το εμπρός [95] .

3.4.6.1 Σχήμα της Ζώνης ανάδευσης

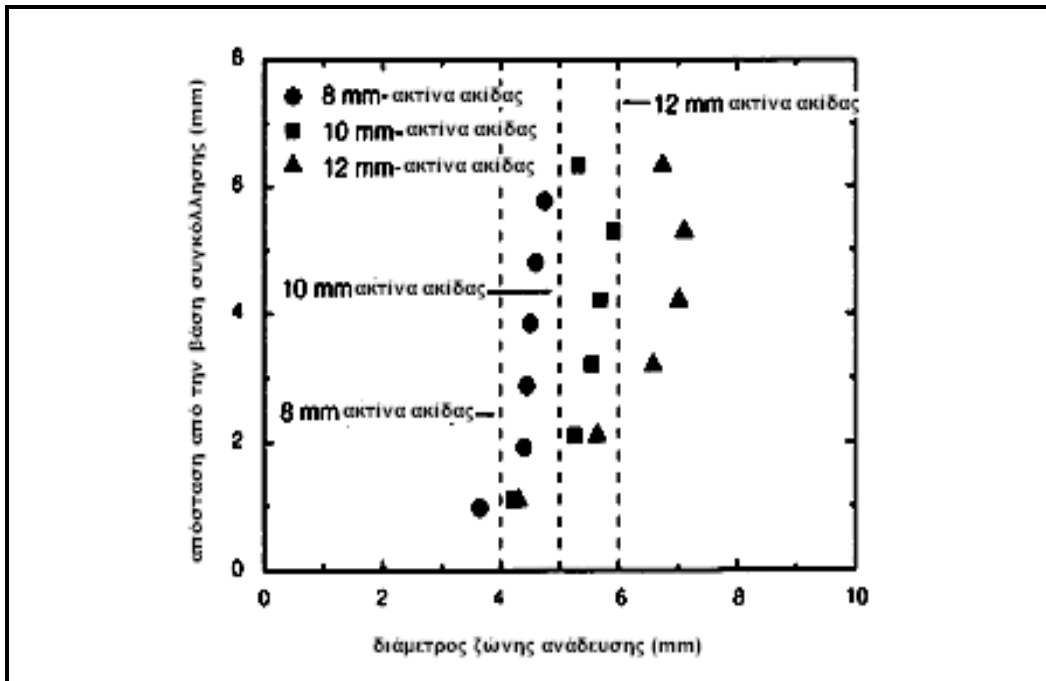
Ανάλογα με τις παραμέτρους της διαδικασίας, την γεωμετρία του εργαλείου, την θερμοκρασία του κατεργαζόμενου κομματιού και την θερμική αγωγιμότητα του υλικού έχουν παρατηρηθεί διάφορα σχήματα της ζώνης ανάδευσης. Βασικά η ζώνη ανάδευσης μπορεί να διαχωριστεί ως προς το σχήμα της σε δύο κυρίες κατηγορίες, την ζώνη σχήματος λεκάνης η οποία ανοίγει πλησιάζοντας την επάνω επιφάνεια της κόλλησης (την κάτω πλευρά της ακίδας) και την ζώνη ελλειπτικού σχήματος

Έρευνες έδειξαν ότι χαμηλοί ρυθμοί περιστροφής, της τάξεως των 300-500rpm είχαν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ζώνης ανάδευσης σχήματος λεκάνης, ενώ ζώνη ανάδευσης ελλειπτικού σχήματος παρουσιάζεται σε υψηλότερους των 700rpm ρυθμούς περιστροφής. Αυτό δείχνει πως με το ίδιο εργαλείο, αλλάζοντας τις παραμέτρους συγκόλλησης μπορούσαμε να παράγουμε ζώνες τήξεως διαφορετικού σχήματος. Στις ακόλουθες μικρογραφίες 3.11 φαίνονται τα δύο είδη σχημάτων της ζώνης τήξεως.



σχήμα 3.11:Σχηματισμοί ζώνης τήξεως (a) σχήματος λεκάνης (b) ελλειπτικού σχήματος

Έρευνες ανέφεραν την σχέση ανάμεσα στο μέγεθος της ζώνης ανάδευσης και του μεγέθους της ακίδας του εργαλείου [96] . Διαπιστώθει ότι η ζώνη ανάδευσης έχει ελαφρώς μεγαλύτερη διάμετρο από την ακίδα του εργαλείου, εκτός από το κάτω μέρος της κόλλησης όπου η ζώνη παρουσιάζει ένα ημισφαιρικό τελείωμα.



σχήμα 3.12: Επιρροή της διαμέτρου της ακίδας (pin) στην διάμετρο της ζώνης ανάδευσης

3.4.6.2 Μέγεθος κόκκου

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η δυναμική ανακρυστάλλωση κατά την διάρκεια της διαδικασίας FSW/FSP έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μικρών και ομοαξονικών κόκκων στη ζώνη ανάδευσης [97, 98, 99]. Οι παράμετροι της διαδικασίας που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και η κάθετη πίεση (P_a) και η παθητική ή δυναμική μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται παίζουν ιδιαίτερο ρόλο στο μέγεθος των ανακρυσταλλομένων κόκκων κατά την διαδικασία FSW/FSP. Ο παρακάτω πίνακας 3.2 μας δίνει μια εικόνα για το μέγεθος των κόκκων διαφόρων κραμάτων αλουμινίου κάτω από διαφορετικές συνθήκες FSW

Υλικό	πάχος (mm)	γεωμετρία εργαλείου	ρυθμός περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα περιστροφής (mm/min)	μέγεθος κόκκου (μm)
7075Al-T6	6.35	-	-	127	2-4
6061Al-T6	6.3	κυλινδρικό	300-1000	90-150	10
Al-Li-Cu	7.6	-	-	-	9
7075Al-T651	6.35	κυλινδρικό με κωνικά άκρα	350, 400	102, 152	3.8, 7.5
6063Al-T4, T5	4.0	-	360	800-2450	5.9-17.8
6013Al-T4, T6	4.0	-	1400	400-450	10-15
1100Al	6.0	κυλινδρικό	400	60	4
5054Al	6.0	-	-	-	6
1080Al-O	4.0	-	-	-	20
5083Al-O	6.0	-	-	-	4
2017Al-T6	3	κυλινδρικό με κωνικά άκρα	1250	60	9-10
2095Al	1.6	-	1000	126-252	1.6
Al-Cu-Mg-Ag-T6	4.0	-	850	75	5
2024Al-T351	6.0	-	-	80	2-3
7010Al-T7651	6.35	-	180, 450	95	1.7, 6
7050Al-T651	6.35	-	350	15	1-4
Al-4Mg-1Zr	10	κυλινδρικό με κωνικά άκρα	350	102	1.5
2024Al	6.35	κυλινδρικό με κωνικά άκρα	200-300	25.4	2.0-3.9
7475Al	6.35	-	-	-	2.2
5083Al	6.35	κυλινδρικό με κωνικά άκρα	400	25.4	6.0
2519Al-T87	25.4	-	275	101.6	2-12

πίνακας 3.2: Μέγεθος κόκκου διαφόρων κραμάτων FSW[100]

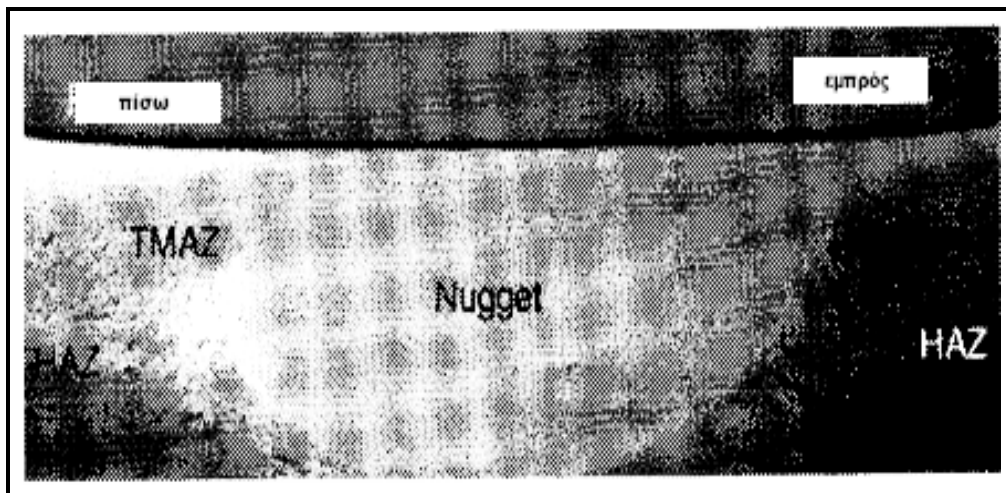
3.4.6.3 Υφή Μικροδομής

Η υφή της μικροδομής επηρεάζει έναν αριθμό ιδιοτήτων, όπως η αντοχή, η ελατότητα, η μορφοποίηση και η αντοχή στη διάβρωση.

Όπως πρωτίτερα αναφέρθηκε το υλικό που αποτελεί την περιοχή όπου διεξάγεται η διαδικασία FSW εμπεριέχει διακριτές ζώνες διαφορετικής μικροδομής, την ζώνη ανάδευσης, TMAZ, HAZ και το μέταλλο βάσεως. Κάθε ζώνη έχει διαφορετική θερμομηχανική ιστορία παραμορφώσεων. Αυτό που κάνει ακόμα πιο περίπλοκη τη διαδικασία είναι ότι η ζώνη ανάδευσης αποτελείται από υπό-δομές. Για παράδειγμα το πάνω στρώμα της ζώνης ανάδευσης υποβάλετε σε παραμόρφωση από την πατούρα του εργαλείου αφού έχει ήδη παραμορφωθεί από την ακίδα του εργαλείου. Επιπλέον ανάλογα με τον ρυθμό περιστροφής και την ταχύτητα της συγκόλλησης η ζώνη ανάδευσης μπορεί να περιέχει μια διαμόρφωση δαχτυλιδιών ή άλλες παραλλαγές στη μικροδομή [101].

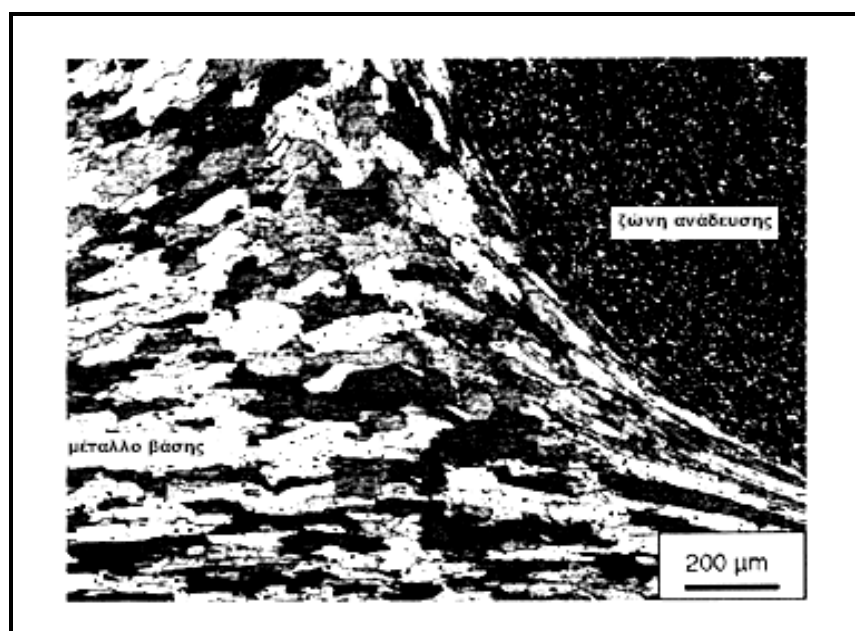
3.4.7 Ζώνη θερμομηχανικής επιρροής TMAZ (Thermo mechanically affected zone)

Μοναδική είναι η δημιουργία μιας μεταβατικής ζώνης στην διαδικασία FSW/FSP ανάμεσα στο ανετηρέαστο υλικό και την ζώνη ανάδευσης (nugget zone) όπως φαίνεται στην ακόλουθη μικροφωτογραφία 3.13:



σχήμα3.13:Μικροφωτογραφία της ζώνης ανάδευσης. Διακρίνεται η ζώνη TMAZ

Η ζώνη TMAZ υπόκειται και σε θέρμανση αλλά και σε παραμόρφωση κατά την διαδικασία. Μια τυπική μικροδομή της ζώνης TMAZ παρουσιάζεται εδώ:



σχήμα3.14:Μικροδομή της ζώνης TMAZ[92]

Η ζώνη TMAZ χαρακτηρίζεται από έντονα παραμορφωμένη δομή. Οι κόκκοι από το αρχικό μέταλλο επιμηκύνθηκαν σχηματίζοντας μια

εικόνα ροής προς τα επάνω, γύρω από την ζώνη ανάδευσης. Παρότι η ζώνη TMAZ υπέστη έντονη πλαστική παραμόρφωση, δεν επήλθε ανακρυστάλλωση σε αυτή.

3.4.8 Ζώνη θερμικής επιρροής HAZ (Heat affected zone)

Πέρα από την ζώνη TMAZ υφίσταται η ζώνη HAZ [93]. Αυτή η ζώνη υπόκειται ένα θερμικό κύκλο αλλά δεν υφίσταται καμία πλαστική παραμόρφωση. Έρευνες έδειξαν πως η ζώνη HAZ υπόκειται σε θερμοκρασίες ανώτερες από 250°C κατά την κατεργασία θερμικά επεξεργασμένων κραμάτων αλουμινίου. Η ζώνη HAZ διατηρεί την ίδια δομή κόκκων με το μέταλλο βάσης. Οι θερμοκρασίες όμως που αναπτύσσονται σε αυτή μπορούν να προκαλέσουν εκφυλισμό κάποιων σκληρυντικών συστατικών του κράματος.

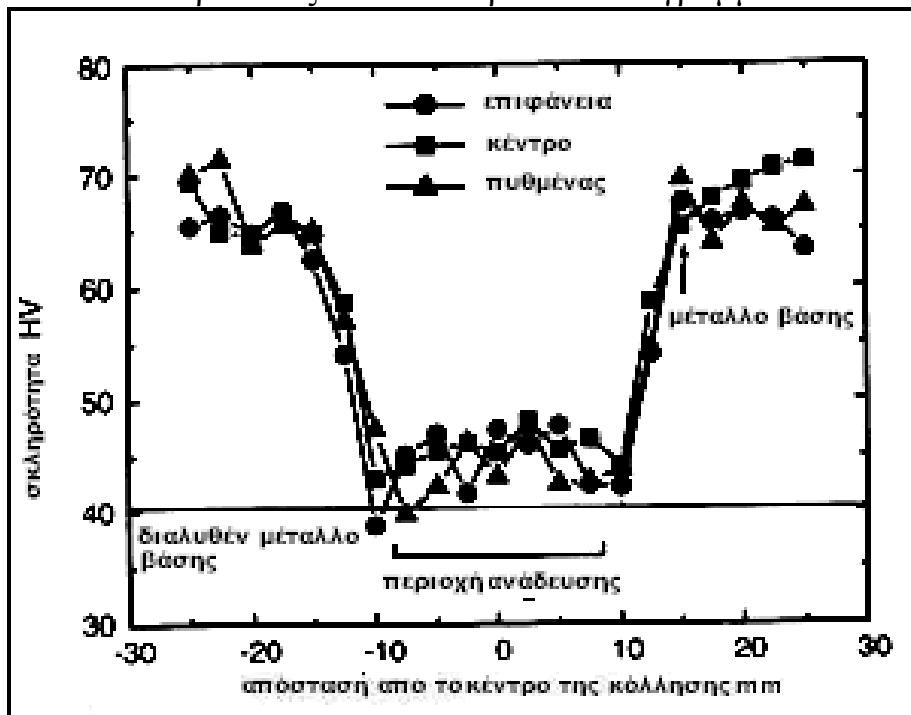
3.5 Μηχανικές Ιδιότητες

Η διαδικασία FSW/FSP προκαλεί σημαντική εξέλιξη στη μικροδομή εντός και γύρω από τη ζώνη ανάδευσης, τη ζώνη TMAZ και την ζώνη HAZ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος μετά την συγκόλληση. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι αλλαγές που επιφέρει η διαδικασία στις βασικές μηχανικές ιδιότητες, όπως είναι η σκληρότητα ενός υλικού, η αντοχή, η ολκιμότητα, η αντοχή σε κόπωση, αντοχή σε θραύση και η συμπεριφορά ενός υλικού κατά την διάβρωση.

3.5.1 Σκληρότητα

Τα κράματα αλουμινίου είναι διαχωρισμένα σε θερμικά κατεργασμένα και σε μη-θερμικά κατεργασμένα. Έρευνες έδειξαν ότι η αλλαγή της σκληρότητας κατά την διαδικασία FSW είναι διαφορετική στα θερμικά κατεργασμένα κράματα και τα μη. Η διαδικασία FSW δημιουργεί μια μαλακή περιοχή γύρω από το κέντρο της συγκόλλησης σε διάφορα είδη θερμικά κατεργασμένων κραμάτων [102]. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στην διάλυση κάποιων σκληρυντικών συστατικών του κράματος κατά τον θερμικό κύκλο της διαδικασίας FSW. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η σκληρότητα του υλικού επηρεάζεται περισσότερο από την κατανομή των σκληρυντικών συστατικών του κράματος, παρά από το μέγεθος των κόκκων. Μια χαρακτηριστική καμπύλη σκληρότητας κατά

μήκος της κόλλησης ενός κράματος 6063Al-T5 συγκολλημένου με την διαδικασία FSW παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα 3.15:



σχήμα 3.15: Διάγραμμα σκληρότητας κράματος 6063Al-T5 [86]

Στην ακόλουθη μικρογραφία 3.16 φαίνονται τα είδη των συστατικών και η μικροδομή των περιοχών που υπάρχουν σε ένα κράμα συγκολληθέν με τη διαδικασία FSW.



σχήμα 3.16: Μικρογραφίες περιοχών διαφορετικής σκληρότητας κράματος FSW. Διακρίνονται τα βελονοειδή σκληρονοτικά συστατικά [86].

Στις περιοχές που διακρίνονται στην παραπάνω μικρογραφία παρατηρούμε το βελονοειδές σχήμα των σκληρυντικών συστατικών μήκους 200nm, τα οποία έχουν λίγη ή και καθόλου συνοχή με το μέταλλο καθώς και σκληρυντικά συστατικά μήκους 40nm τα οποία έχουν πλήρη συνοχή με το μέταλλο και είναι κανονικά κατανεμημένα σε αυτό [103].

Όσον αφορά τα μη θερμικά κατεργασμένα κράματα αλουμινίου παρατηρήθηκε πως η διαδικασία FSW δεν επιφέρει ιδιαίτερη μεταβολή στην σκληρότητα και πως η περιοχή κόλλησης διατηρεί την ίδια σχεδόν σκληρότητα με το μέταλλο βάσης [104].

3.5.2 Αντοχή και Ολκιμότητα

Σε κράμα αλουμινίου 7075Al-T651 έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε θερμοκρασία δωματίου [87]. Τα δείγματα αποκόπηκαν από την περιοχή ανάδευσης σε δύο κατευθύνσεις, κατά μήκος της συγκόλλησης και σε εγκάρσια τομή με αυτή. Τα δείγματα που είχαν αποκοπεί κατά μήκος της κόλλησης περιείχαν τμήματα μόνο από την πλήρως ανακρυσταλλομένη ζώνη ανάδευσης, ενώ τα δείγματα που είχαν αποκοπεί εγκάρσια περιείχαν μικροδομές και από τις τέσσερις ζώνες(μέταλλο βάσης, HAZ, TMAZ, ζώνη ανάδευσης).

Στους παρακάτω πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται πειραματικές τιμές για την αντοχή σε εφελκυσμό και των δυο ειδών δειγμάτων καθώς και για δείγματα τα οποία έχουν υποστεί επεξεργασία μετά την συγκόλληση (ψήσιμο στους 121°C για 24h).

Εφελκυστικές ιδιότητες ζώνης ανάδευσης δοκιμίων διαμήκους εκτομής			
Κατάσταση	UTS (MPa)	YS (MPa)	Επιμήκυνση%
μέταλλο βάσης T651	622	571	14.5
FSW-αμέσως μετά	525	365	15
κατόπιν επεξεργασίας	496	455	3.5
UTS ολική αντοχή σε εφελκυσμό, YS κρίσιμο σημείο εφελκυσμού			

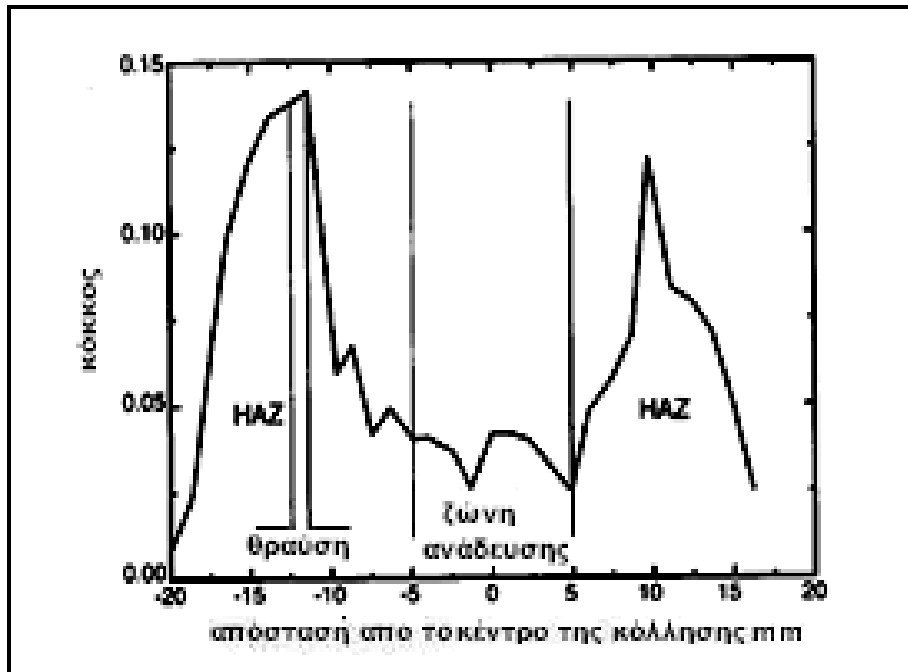
πίνακας 3.3 [87]

Εφελκυστικές ιδιότητες ζώνης ανάδευσης δοκιμίων εγκάρσιας εκτομής			
Κατάσταση	UTS (MPa)	YS (MPa)	Επιμήκυνση%
μέταλλο βάσης T651	622	571	14.5
FSW-αμέσως μετά	468	312	7.5
κατόπιν επεξεργασίας	447	312	3.5
UTS ολική αντοχή σε εφελκυσμό, YS κρίσιμο σημείο εφελκυσμού			

πίνακας 3.4 [87]

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες τα διαμήκη δείγματα που είχαν συγκολληθεί με την διαδικασία FSW παρουσιάζουν μία μείωση στην ελαστικότητα και στην αντοχή στην ζώνη ανάδευσης, ενώ η επιμήκυνση παρέμεινε ανεπηρέαστη. Η μειωμένη αντοχή των δειγμάτων οφείλεται κατά τους ερευνητές στην εξάλειψη κάποιων σκληρυντικών συστατικών κατά την διαδικασία. Η θερμική κατεργασία μετά την συγκόλληση βοήθησε το δείγμα να ανακτήσει μεγάλο μέρος της ελαστικότητας του στην ζώνη ανάδευσης, αλλά με το κόστος της μείωσης της αντοχής του και με μεγάλη μείωση στην ολκιμότητα του. Η αύξηση του ορίου ελαστικότητας σε δείγματα που υπέστησαν θερμική κατεργασία κατόπιν της κόλλησης οφείλεται στην αύξηση του όγκου των σκληρυντικών συστατικών του κράματος, αύξηση η οποία επίσης ευθύνεται και για την μείωση της ολκιμότητας του υλικού. Επίσης για την μειωμένη ολκιμότητα του υλικού ευθύνεται και η δημιουργία ζωνών όπου τα σκληρυντικά συστατικά του κράματος απουσιάζουν τελείως. Τέτοιες ζώνες δημιουργούνται στα όρια των κόκκων του κράματος.

Δείγματα εγκάρσιας τομής συγκρινόμενα με το αρχικό μέταλλο, επίσης δείχνουν μια σημαντική μείωση στην αντοχή. Επιπλέον οι τιμές για την αντοχή και την ολκιμότητα που καταγράφηκαν σε δείγματα εγκάρσιας τομής είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν σε δείγματα διαμήκους τομής. Τα δείγματα που υπέστησαν θερμική κατεργασία μετά την κόλληση δεν ανέκτησαν την αντοχή τους και έχασαν ακόμα περισσότερο ποσοστό από την δυνατότητα επιμήκυνσης τους. Οι θραύσεις όλων των δειγμάτων επήλθαν στην ζώνη HAZ. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα εγκάρσιας τομής δείγματα περιέχουν τέσσερις διαφορετικές μικροδομές. Η ολκιμότητα που παρατηρείται είναι η μέση καταπόνηση σε μια περιοχή πολλών μικροδομών. Η μικρότερη αντοχή της ζώνης HAZ οφείλεται στο γεγονός ότι τα σκληρυντικά συστατικά εκφυλίστηκαν κατά την διαδικασία και δεν κατάφεραν να ανακρυσταλλωθούν. Στο παρακάτω διάγραμμα 3.16 φαίνεται ότι η ζώνη χαμηλής αντοχής HAZ τοπικά επιμηκύνεται έως και 14% κατά την διάρκεια του πειράματος, ενώ η αντίστοιχη επιμήκυνση της ζώνης ανάδευσης για την ίδια καταπόνηση είναι μόλις 5% έχοντας σαν αποτέλεσμα την θραύση του δοκιμίου.



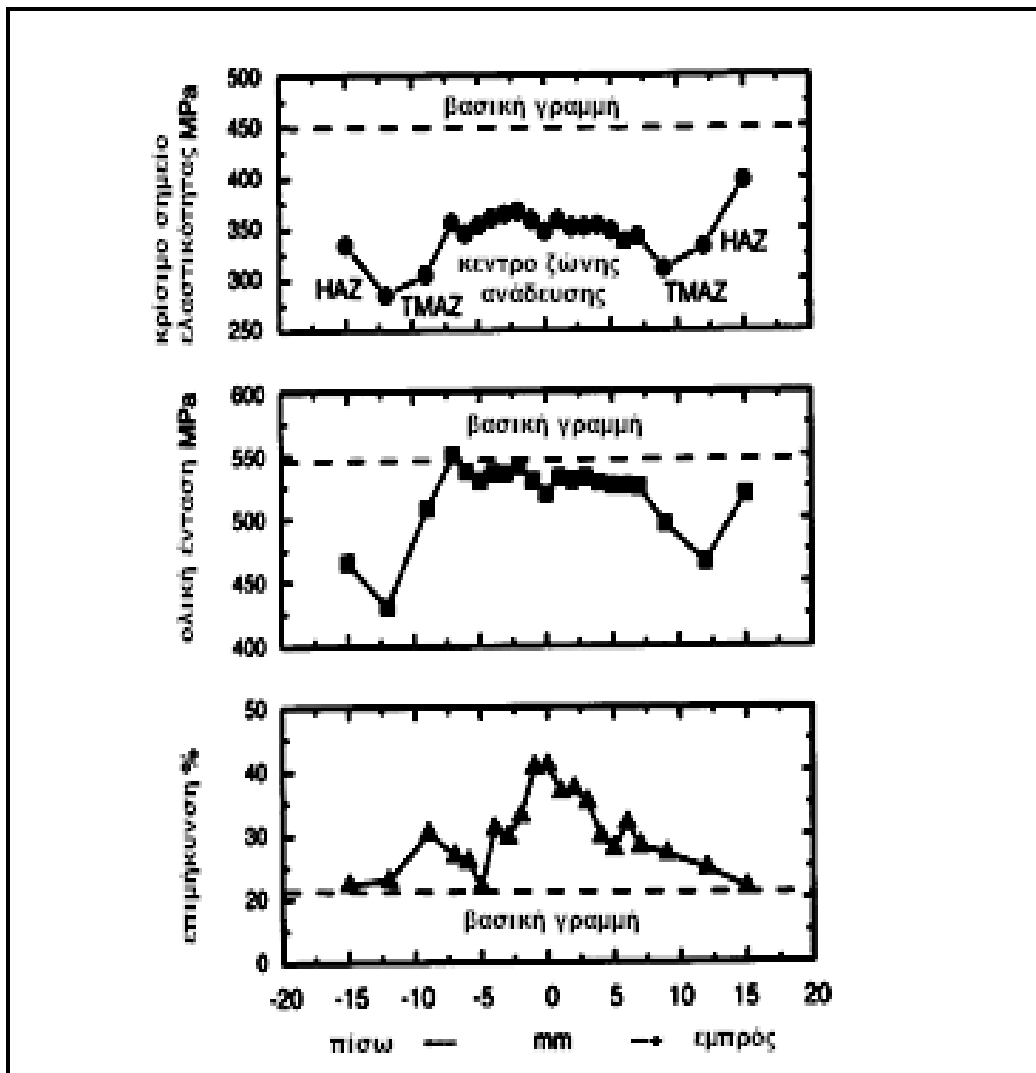
σχήμα 3.16: Κατανομή εφελκυστικής καταπόνησης στην HAZ και στην ζώνη ανάδευσης κράματος FSW 7075Al-T651[87]

Στον πίνακα 3.5 που ακολουθεί συνοψίζονται οι αντοχές σε εφελκυσμό καθώς και η αποτελεσματικότητα των συγκολλήσεων (αν είναι συγκολλησίμα και σε τι ποσοστό της αντοχής σε εφελκυσμό του αρχικού μετάλλου αντέχει η κόλληση) διαφόρων κραμάτων αλουμινίου. Η αποτελεσματικότητα των συγκολλήσεων κυμαίνεται από 65% έως 90% για θερμικά κατεργασμένα κράματα και από 95% έως 119% για μη-θερμικά κατεργασμένα κράματα. Πρέπει να τονιστεί ότι οι αντοχές που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές εφελκυσμού αντανακλούν την πλέον αδύναμη περιοχή του δοκιμίου και η επιμήκυνση που παρατηρείτε είναι μια μέση εικόνα για τις δυνατότητες επιμήκυνσης κάθε μικροδομικής ζώνης.

Αποδοση FSW διαφόρων κραμάτων αλουμινίου			
Κράμα	Μέταλλο βάσης UTS	FSW UTS	απόδοση %
AFC458-T8	544.7	362.0	66
2014-T651 (6 mm)	479-483	326-338	68-70
2024-T351 (5 mm)	483-493	410-434	83-90
2219-T87	475.8	310.3	65
2195-T8	593.0	406.8	69
5083-O (6-15 mm)	285-298	271-344	93-119
6061-T6 (5 mm)	319-324	217-252	67-79
7050-T7451 (6.4 mm)	545-558	427-441	77-81
7075-T7351	472.3	455.1	96
7075-T651 (6.4 mm)	622	468	75
6056-T78 (6 mm)	332	247	74
5005-H14 (3 mm)	158	118	75
7020-T6 (5 mm)	385	325	84
6063-T5 (4 mm)	216	155	72
2024-T3 (4 mm)	478	425-441	89-90
7475-T76		465	92
6013-T6 (4 mm)	394-398	295-322	75-81
6013-T4 (4 mm)	320	323	94
2519-T87 (25.4 mm)	480	379	79
UTS ολική αντοχή σε εφελκυσμό			

πίνακας 3.5[105,106,107,108]

Η ανάγκη για καθορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό κάθε περιοχής με διαφορετική μικροδομή είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη τεχνικών δοκιμών εφελκυσμού με τη χρήση μίνι-δοκιμίων μας έδωσε τα παρακάτω διαγράμματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.17 για το κράμα 7075Al.



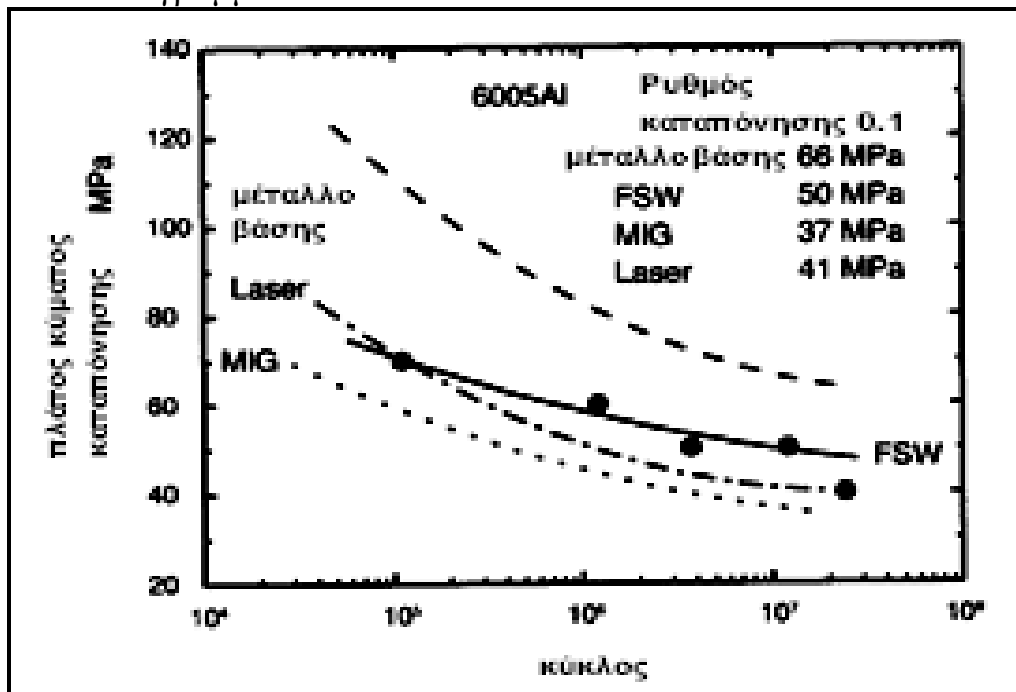
σχήμα 3.17:Μεταβολή των εφελκυστικών ιδιοτήτων σε σχέση με την θέση κατά μήκος της κόλλησης [109]

3.5.3 Αντοχή σε Κόπωση

Έρευνες που διενεργήθηκαν σχετικά με την αντοχή σε κόπωση καρμάτων 6006Al-T5, 2024Al-T351, 2024-T3, 6013Al-T6, 7475Al-T76, 2219Al-T8751 και 2519Al-T87 συγκολληθέντων με την διαδικασία FSW κατέληξαν στις ακόλουθες τέσσερις σημαντικές παρατηρήσεις [100,110,111].

1) Η αντοχή σε κόπωση της κόλλησης FSW ήταν χαμηλότερη από την αντοχή του μετάλλου βάσης και επομένως οι κολλήσεις FSW είναι πιθανόν να ευθύνονται για την θραύση λόγω κοπώσεως του κομματιού. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια εγκάρσιας τομής είχαν χαμηλότερη αντοχή σε κόπωση από αυτά τα οποία είχαν κοπεί κατά τον διαμήκη άξονα. Παρόλα αυτά και τα δύο είδη δοκιμίων παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε κόπωση σε σχέση με δοκίμια που είχαν

συγκολληθεί με LASER η με συγκόλληση MIG όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα 3.18:



σχήμα 3.18:Διάγραμμα καμπύλων αντοχής σε κόπωση συγκολλήσεων FSW,LASER,MIG[112]

2) Η ποιότητα επιφάνειας της συγκόλλησης FSW παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή σε κόπωση του κομματιού. Έρευνες έδειξαν ότι η αντοχή σε κόπωση του δοκιμίου μειώθηκε με την αύξηση του λόγου ταχύτητας/περιστροφή (v/ω) λόγω της αύξησης του μη-αναδευθέντος υλικού που δεν εμπλέκεται σε ικανοποιητικό βαθμό με την ακίδα του εργαλείου. Όταν όμως, το στρώμα του υλικού το οποίο δεν εμπλέκεται με το υλικό αφαιρέθηκε με μηχανουργική διαδικασία, η περιοχή συγκόλλησης δεν επηρεάστηκε από την αλλαγή του λόγου v/ω . Επιπλέον εάν αφαιρεθεί ένα στρώμα πάχους 0.15mm από την επάνω και κάτω επιφάνεια το δοκίμιο αποκτά αντοχή σε κόπωση όμοια με το μέταλλο βάσης [113].

3) Η επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας FSW στην αντοχή σε κόπωση των προϊόντων είναι περίπλοκη και δεν υπόκειται σε γενικές αρχές. Αυξάνοντας την ταχύτητα της κόλλησης, αλλά διατηρώντας σταθερό το v/ω διαπιστώθηκε πως η αντοχή σε κόπωση του δοκιμίου παρέμεινε ανεπηρέαστη.

4) Ενώ η αντοχή σε κόπωση δοκιμίων της διαδικασίας FSW είναι κατώτερη από την αντίστοιχη του μετάλλου βάσης στις δοκιμές που γίνονται σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον, διαπιστώθηκε πως εάν το δοκίμιο βυθιστεί σε διάλυμα 3.5% NaCl παρουσιάζει παρόμοια αντοχή σε κόπωση με το μέταλλο βάσης [100].

Και πάλι πρέπει να επισημανθεί ότι η επιφανειακή διάβρωση και η υφή της επιφάνειας του δοκιμίου επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση αυτού.

Τα αποτελέσματα όμως που παρουσιάζουν οι δοκιμές σε κόπωση προϊόντων της διαδικασίας FSW είναι άκρως ενθαρρυντικά.

3.5.4 Θραύση

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι προϊόντα συγκόλλησης καταλήγουν στην παραγωγή με ελαττώματα που ποικίλουν, όπως η ύπαρξη πόρων, περιέχοντας μη μεταλλικές προσμίξεις ή παρουσιάζοντας ρωγμές εντός της κόλλησης. Η κάθε κόλληση εξετάζεται εάν ανταποκρίνεται στα πρότυπα αντοχής που υπάρχουν. Εάν το προϊόν δεν ανταποκρίνεται πρέπει να επισκευασθεί πριν τεθεί στην υπηρεσία της παραγωγής. Τα πιο πολλά πρότυπα αντοχής αφορούν συγκολλήσεις συμβατικών μεθόδων. Η διαδικασία FSW παράγει προϊόντα που ανταποκρίνονται και με το παραπάνω στα πρότυπα των υπολοίπων τεχνικών συγκόλλησης. Λόγω όμως των εφαρμογών στις οποίες καταλήγουν τα προϊόντα της διαδικασίας FSW (αεροναυπηγική, αεροδιαστημική κ.α.) είναι αναγκαίο να θεσπιστούν ανάλογα και αυστηρότερα πρότυπα για αυτά.

Οι πιο συνηθισμένες παράμετροι για την αξιολόγηση των προϊόντων της συγκόλλησης είναι ο συντελεστής διάδοσης ρωγμής (K) για την ελαστική γραμμική φόρτιση και ο συντελεστής J εσωτερικό, ο οποίος ορίζεται σαν το όριο θραύσης για την πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

Αρκετές έρευνες διεξήχθησαν για την αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η διαδικασία FSW στο όριο θραύσης του υλικού [111,108,114]. Έρευνες σε κράματα 5005Al-H14, 6061Al-T6 και 7002Al-T6 έδειξαν ότι το όριο διαρροής είναι πολύ υψηλότερο από το αντίστοιχο του μετάλλου βάσεως, ενώ σε πειράματα που διεξήχθησαν σε κράμα αλουμινίου 2024Al-T6 το συγκολληθέν μέταλλο έδειξε χαμηλότερο όριο θραύσης σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 3.5:

Όριο θραύσης συγκολλήσεων FSW και μετάλλου βάσης				
Υλικό	πάχος πλάκας (mm)	μέταλλο βάσης	FSW	
			ζώνη ανάδευσης	TMAZ/HAZ
5005Al-H14	3	0.35	1.57	1.40
2024Al-T351	5	0.30	0.22	0.20
6061Al-T6	5	0.20	0.96	0.63
7002Al-T6	5	0.40	0.40	—

πίνακας 3.5

Επιπλέον στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η ζώνη ανάδευσης παρουσιάζει μεγαλύτερο όριο διαρροής από τις ζώνες TMAZ και HAZ της συγκόλλησης.

Σε άλλες δοκιμές μέτρησης του ορίου θραύσης κραμάτων αλουμινίου FSW 2014Al-T651, 7075Al-RRA και 5083Al-O [115,116,117] σύμφωνα με την μέθοδο δοκιμής ASTM E 399-90 οι τιμές που προέκυψαν για το όριο θραύσης είναι επίσης αρκετά υψηλότερες στα κράματα FSW από ότι στα μέταλλα βάσεως.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει κάποια λεπτομερής αναφορά σχετικά με το όριο θραύσης κάθε μικροδομής που συναντάμε στα προϊόντα της διαδικασίας FSW. Αφού η μικροδομή της κάθε περιοχής αλλάζει σημαντικά κατά την διαδικασία FSW είναι σημαντικό να καταλάβουμε την επιρροή των χαρακτηριστικών κάθε μικροδομής στο όριο θραύσης των προϊόντων της διαδικασίας FSW. Όσον αφορά τα κράματα υψηλής αντοχής που κυκλοφορούν ευρέως στο εμπόριο, [118] συναντάμε τρία είδη μορίων με σκληρυντικές ιδιότητες:

- 1) Μεγάλα σκληρυντικά μόρια της τάξης των 5-30 μm .
- 2) Σκληρυντικά συστατικά διεσπαρμένα εντός του μετάλλου της τάξης 0.2-0.5 μm .
- 3) Συστατικά σκλήρυνσης νανομετρικού (nm) μεγέθους.

Κατά την συγκόλληση παρουσιάζεται η έλλειψη μεγάλων σκληρυντικών μορίων και διεσπαρμένων ελεύθερων σκληρυντικών συστατικών με αποτέλεσμα η συμπεριφορά κατά την παραμόρφωση του υλικού να επηρεάζεται άμεσα από την διάτμηση των συστατικών που συναντάμε στην νανομετρική τάξη μεγέθους, συγκεντρώνοντας έτσι την καταπόνηση στην μήτρα αναδευμένου μετάλλου της συγκόλλησης. Οι ερευνητές [119] ανέπτυξαν μία εξίσωση η οποία προσδίδει το όριο διαρροής (K_{Ic}) σε συνάρτηση με την συγκέντρωση της καταπόνησης

$$K_{Ic} = \left[8hmaEs_y W \left(\frac{D}{S_{SB}} \right) e_{SB}^c \right]^{1/2}$$

Όπου a είναι η μέση γωνία μεταξύ του μικροσκοπικού μονοπατιού που ακολουθεί η ρωγμή όταν προεκτείνουμε την ακμή της και της κατεύθυνσης της κόλλησης, E είναι η σταθερά του Young, σ_y το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας, W το πλάτος της περιοχής συγκόλλησης S_{SB} η απόσταση από τα όρια του μετάλλου βάσεως και e_{SB}^c το όριο θραύσης.

Άλλες έρευνες πρότειναν την ακόλουθη σχέση για το κράμα 7075Al το οποίο υπόκειται σε ψευδό-ενδοκρυσταλλική θραύση:

$$K_{Ic} = \left[\frac{Es_{PFZ}e_f d_{PFZ}}{CS_{SB}} \right]^{1/2}$$

όπου d_{PFZ} είναι το πλάτος της ζώνης μηδενικών σκληρυντικών συστατικών (PFZ), e_f είναι το όριο θραύσης, s_{PFZ} είναι το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας στην ζώνη PFZ και το C είναι μια σταθερά.

Από τις παραπάνω έρευνες διαπιστώθηκε πως το χαμηλό όριο θραύσης οφείλετε στην παρουσία μιας στενής και μαλακής ζώνης στην οποία δεν συναντάμε σκληρυντικά συστατικά και στο μεγάλο μέγεθος των κόκκων.

Μια άλλη πρόταση υποστηρίζει πως το πλέον κρίσιμο στάδιο για τον έλεγχο του ορίου θραύσης είναι ο έλεγχος της παρουσίας κενών εντός της περιοχής συγκόλλησης. Πιστεύετε ότι τα μόρια του κράματος αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο που διευκολύνουν την ύπαρξη κενών περιοχών ανάμεσα τους. Το όριο θραύσης s για τα μόρια του κράματος σχετίζεται με το μέγεθος τους d και την ενέργεια επιφανείας γ με τον ακόλουθο τύπο [120]:

$$s = \left(\frac{6gE}{q^2 d} \right)^{1/2}$$

όπου q ορίζεται ως ο συντελεστής συγκέντρωσης της έντασης σε κάθε μόριο του κράματος. Όπως είναι προφανές η αύξηση της δύναμης των δεσμών μεταξύ των μορίων του κράματος και η μείωση του μεγέθους των κόκκων μπορεί να αυξήσει το όριο θραύσης της συγκόλλησης.

Πέρα από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω έρευνες έδειξαν ότι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά σε θραύση του υλικού είναι και το είδος των ορίων ανάμεσα στους κόκκους.

Βασιζόμενοι στην παραπάνω μικροδομική ανάλυση το όριο θραύσης του αλουμινίου FSW μπορεί να αναλυθεί ορθολογιστικά. Η διαδικασία FSW παράγει μία ζώνη ανάδευσης η οποία χαρακτηρίζεται από :

- 1) Πολύ μικρό μέγεθος κόκκων.
- 2) Νανομετρικά συστατικά και συστατικά μορίων.
- 3) Χαμηλό κρίσιμο σημείο ελαστικότητας.
- 4) Μεγάλα κενά ανάμεσα στους κόκκους του κράματος.

Η δομή μικρών κόκκων τείνει να αυξάνει το όριο θραύσης του κράματος ενώ τα μεγάλα κενά ανάμεσα τους, καθώς και το χαμηλό κρίσιμο σημείο ελαστικότητας, τείνουν να το μειώσουν. Η συνολική επίδραση όλων των παραπάνω παραγόντων είναι ότι το όριο θραύσης της ζώνης ανάδευσης είναι ίσο ή υψηλότερο με αυτό του μετάλλου βάσεως ,ανάλογα με την σύσταση του κράματος και της παραμέτρους της διαδικασίας FSW. Το χαμηλότερο όριο θραύσης που παρουσιάζουν οι περιοχές HAZ/TMAZ οφείλεται στην παρουσία πλατιών ζωνών PFZ σε αυτές.

3.5.5 Διάβρωση

Σε προηγούμενα μέρη της εργασίας επισημάνθηκε ότι κατά την διαδικασία FSW παρατηρείται η δημιουργία τριών ζωνών με διαφορετική μεταξύ τους μικροδομή, την ζώνη ανάδευσης, την HAZ και την ζώνη TMAZ, πέρα από την μικροδομή του μετάλλου βάσεως. Εξαιτίας της διαφορετικής μικροδομής που παρατηρείται οι ζώνες επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση. Για ειδικές εφαρμογές είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε την συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση των κολλήσεων FSW και να διευκρινιστούν οι μηχανισμοί που την ελέγχουν αυτή στις διάφορες ζώνες του κράματος.

Οι ερευνητές [121] ασχολήθηκαν διεξοδικά με την συμπεριφορά σε διάβρωση κραμάτων συγκόλληθεντων με FSW και την συνέκριναν με την αντίστοιχη συμπεριφορά κραμάτων συγκολληθέντων με την μέθοδο GTAW(συγκόλληση τόξου αερίου-βολφραμίου). Η μελέτη συγκεκριμένα της συμπεριφοράς σε διάβρωση του κράματος 5454Al οδήγησε τους ερευνητές στις ακόλουθες σημαντικές παρατηρήσεις.

Πρώτον η διάβρωση στα δείγματα FSW παρουσιάζεται στις περιοχές HAZ ενώ στα δείγματα GTAW η διάβρωση παρουσιάζοταν σε μια μεγάλη περιοχή εντός της ζώνης τήξεως και σε δενδροειδή μορφή.

Δεύτερον οι συγκολλήσεις FSW δείχνουν μεγαλύτερη αντίσταση απέναντι στη διάβρωση από ότι το μέταλλο βάσεως και τα δείγματα GTAW. Παρόλο που οι διαφορές στην διαβρωτική συμπεριφορά δεν

είναι πολύ μεγάλες, διαπιστώθηκε η τάση που έχουν τα δείγματα FSW να διαβρώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό κατά την πάροδο του χρόνου

Τρίτον στην δοκιμή αντοχής [122] απέναντι στην θραύση από διάβρωση (stress corrosion cracking-SCC) τα δείγματα συγκολλήσεων FSW, καθώς και το μέταλλο βάσης δεν έδειξαν να υποκύπτουν σε SCC μετά από παραμονή τους για 20 ημέρες σε διάλυμα 0.5 M NaCl, ακόμα και όταν πολώθηκαν στα +60mV. Στις ίδιες συνθήκες τα δείγματα GTAW έσπασαν.

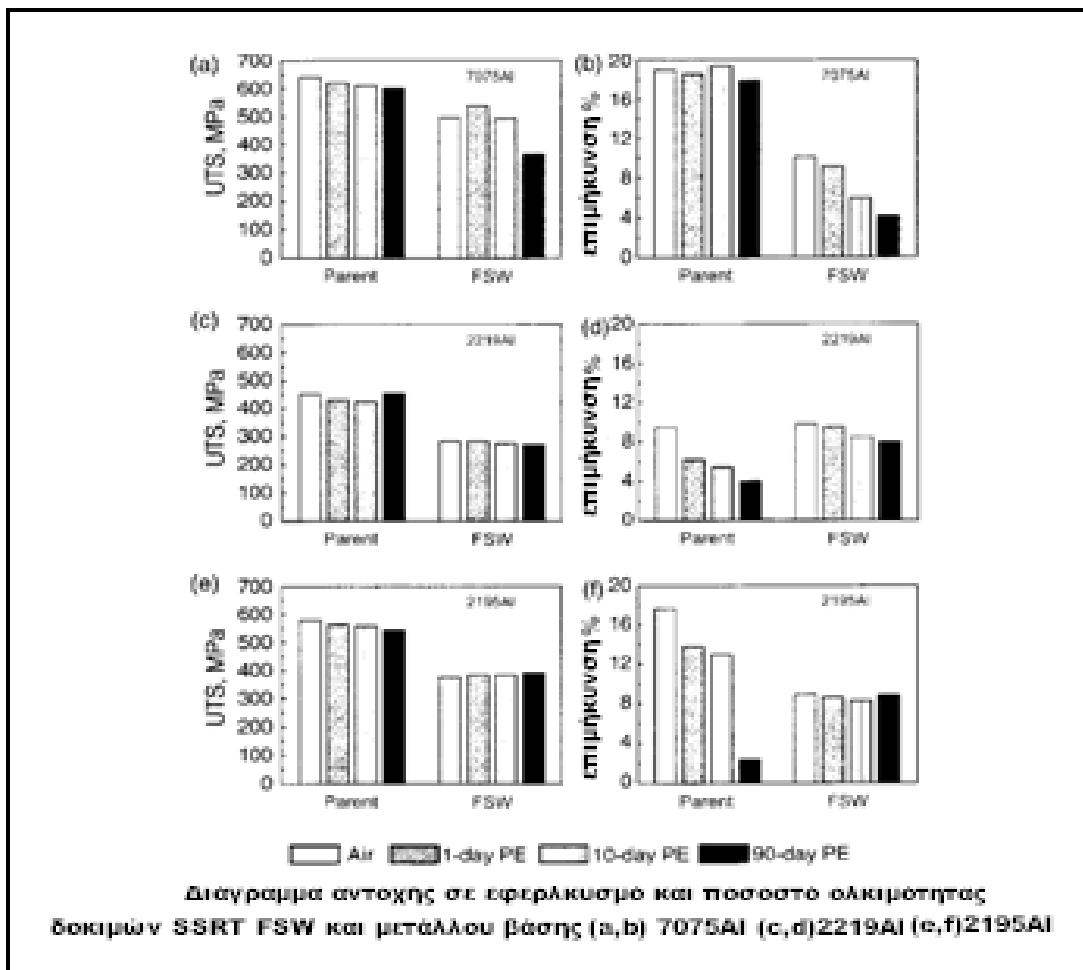
Τέταρτον δοκιμές αργής αναλογίας καταπόνησης [123] (slow strain rate tests-SSRT) έδειξαν ότι και τα τρία είδη δειγμάτων, μέταλλο βάσεως, FSW, GTAW τα οποία είχαν πολωθεί ανοδικά παρουσίασαν μια μείωση στην ολκιμότητα τους ,δείχνοντας με αυτό τον τρόπο ότι είναι πιθανή η SCC. Η μείωση στην ολκιμότητα των δειγμάτων FSW ήταν χαμηλότερη από την αντίστοιχη των δειγμάτων GTAW.

Μια άλλη έρευνα που διενεργήθει από έναν Έλληνα ερευνητή [124] διεξήγαγε δύο είδη δοκιμών

1) Λυγισμός τεσσάρων σημείων με διαφορετικές δυνάμεις φορτίων υπό συνθήκες AI-alternate immersion εντός διαλύματος 3.5%NaCl για 90 ημέρες.

2) Δοκιμές αργής αναλογίας καταπόνησης (SSRT) σε δείγματα τα οποία είχαν εκτεθεί προ των δοκιμών (PE) σε συνθήκες AI εντός διαλύματος 3.5%NaCl. Το πρώτο είδος δοκιμών δεν έδειξε την δημιουργία ρωγμών λόγω διάβρωσης στα δείγματα και για αυτό συμπεράθηκε ότι δεν υπόκεινται σε SCC.

Το δεύτερο είδος δοκιμών, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα 3.19:

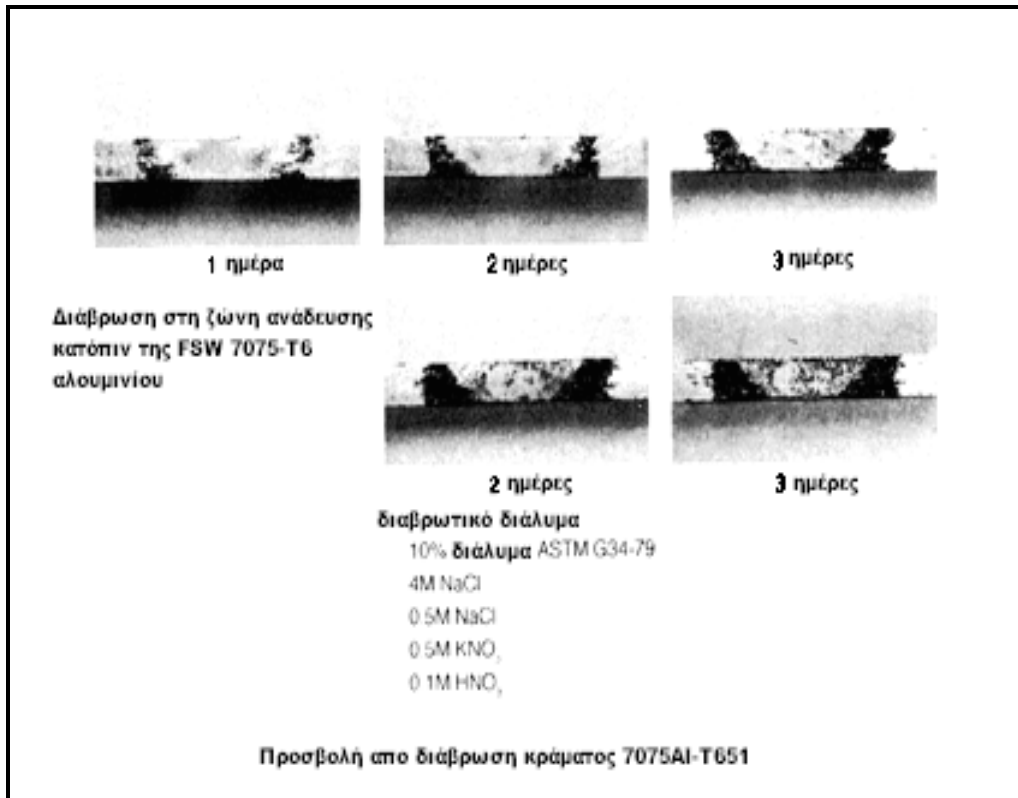


σχήμα 3.19 [124]

βοήθησε του ερευνητές να καταλήξουν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

Κάτω από σκληρότερες δοκιμές SSRT τα κράματα FSW 2219Al και 2195Al εξακολουθούν να μην δείχνουν πως θα υποκύψουν σε SCC, ενώ το κράμα FSW 7077Al έδειξε μειωμένη ολκιμότητα καθώς αυξάνεται ο χρόνος PE.

Άλλες έρευνες έδειξαν [125,126] ότι FSW συγκολλήσεις κραμάτων 7075Al, 7010Al, 2024Al και 7050Al είναι πιθανότερο να υποστούν ενδοκοκκώδη προσβολή από το μέταλλο βάσεως. Στην φωτογραφία 3.20 φαίνεται μια τυπική προσβολή από διάβρωση κράματος 7075Al-T651 με την χρήση διαβρωτικού διαλύματος.



σχήμα 3.20[125]

Μετά από 24 ώρες έκθεσης του δοκιμίου στο διαβρωτικό διάλυμα, η διάβρωση ήταν συγκεντρωμένη στην HAZ και στα εξωτερικά όρια της TMAZ, αφήνοντας ανεπηρέαστες την ζώνη ανάδευσης και το μέταλλο βάσεως. Αφήνοντας το δοκίμιο εκτεθειμένο για περισσότερο χρόνο, η ενδοκοκκώδης προσβολή έγινε πιο έντονη στην αρχικά προσβεβλημένη περιοχή και απλώθηκε στην TMAZ. Τέλος, η ενδοκοκκώδης προσβολή έφτασε και στην ζώνη ανάδευσης μετά από τρεις ημέρες.

Από τις έρευνες μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι οι θερμότερες περιοχές στην HAZ ήταν οι πιο αδύναμες απέναντι σε ενδοκοκκώδη προσβολή.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι πέρα από την χημική σύσταση του κράματος και η μικροδομή των περιοχών παίζει σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά των κραμάτων FSW απέναντι στη διάβρωση.

3.6 Άλλα Μέταλλα

Η ραγδαία ανάπτυξη της διαδικασίας FSW στα κράματα αλουμινίου και τα υψηλής ποιότητας, χαμηλού κόστους προϊόντα της, έδωσε κίνητρα για την εφαρμογή της και σε άλλα υλικά, όπως τα Mg, Cu, Ti, καθώς και τα παράγωγα τους και το ατσάλι.

Ένας περιορισμός στην εφαρμογή της διαδικασίας FSW στην παραγωγή προϊόντων από υλικά υψηλής θερμοπερατότητας, όπως το

ατσάλι και το τιτάνιο έγκειται στην αναγνώριση και τη ανάπτυξη ιδανικών εργαλείων για το κάθε υλικό καθώς και στην επίτευξη κάποιων αντικειμενικά καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται προς το παρόν. Αντίθετα με τα υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου, τα οποία είναι ουσιαστικά ασυγκόλλητα με τις περισσότερες συνήθεις τεχνικές συγκόλλησης τήξεως, τα κράματα του ατσαλιού και του τιτανίου μπορούν να συγκολληθούν ιδιαίτερα ικανοποιητικά με αρκετές από τις συμβατικές τεχνικές. Για αυτό είναι σημαντικό, να φανεί όχι μόνο αν τα κράματα των παραπάνω υλικών μπορούν να συγκολληθούν με την διαδικασία FSW, αλλά και να σκιαγραφήσουμε τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας FSW απέναντι στις άλλες τεχνικές συγκόλλησης.

3.6.1. Κράματα Χαλκού

Η συγκόλληση του χαλκού είναι συνήθως δύσκολη με τις συμβατικές τεχνικές συγκόλλησης τήξεως λόγω της υψηλής θερμικής διάχυσης του υλικού, η οποία είναι από 10 έως 100 φορές υψηλότερη από του ατσαλιού ή των κραμάτων νικελίου (Ni). Για αυτό, η θερμότητα που απαιτείται για την συγκόλληση είναι πολύ μεγαλύτερη και κατ'επέκταση οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι κατά πολύ χαμηλότερες.

Πρόσφατα, αρκετές προσπάθειες έγιναν για την συγκόλληση καθαρού χαλκού και μπρούτζου 60/40 με την διαδικασία FSW [127,128]. Από αυτές τις μελέτες εξήχθησαν κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις.

Πρώτα από όλα διαπιστώθηκε ότι το υλικό και η γεωμετρία του εργαλείου έχουν σημαντική επίδραση στην μελέτη σκοπιμότητας της συγκόλλησης FSW σε χονδρές πλάκες χαλκού. Οι ερευνητές έδειξαν ότι μία ακίδα φτιαγμένη από θερμικά επεξεργασμένο ατσάλι με σχεδίαση παράλληλου προφίλ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση FSW πλακών χαλκού πάχους 3mm, αλλά όχι και για πλάκες 10mm, λόγω του ότι το ατσάλι του εργαλείου άρχισε να παραμορφώνεται έντονα στις θερμοκρασίες πάνω από 540°C που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία.

Ένα εργαλείο φτιαγμένο από τετηγμένο κράμα βολφραμίου, με βελτιωμένη γεωμετρία φάνηκε πού πιο αποτελεσματικό στην συγκόλληση FSW πλακών χαλκού πάχους 10-25mm. Επιπλέον οι ερευνητές δοκίμασαν και έναν διαφορετικό σχεδιασμό για την ακίδα και κάποια άλλα θερμικά κατεργασμένα υλικά για την κατασκευή του εργαλείου και κατάφεραν να συγκολλήσουν πλάκες χαλκού πάχους πάνω από 30mm. Δυστυχώς λεπτομέρειες για το υλικό ή τη σχεδίαση του εργαλείου δεν ανακοινώθηκαν.

Άλλες έρευνες ανέφεραν [129] που ασχολήθηκαν με το θέμα ανέφεραν σαν κατάλληλα υλικά για το εργαλείο συγκόλλησης FSW

χαλκού το ατσάλι QR090 και κάποια κράματα Inconel. Επίσης από τους ίδιους ερευνητές δοκιμάστηκε και το τετηγμένο καρβίδιο (K40UF) σαν υλικό κατασκευής εργαλείου, αλλά διαπιστώθηκε πως ήταν πολύ εύθραυστο για την FSW συγκόλληση χαλκού.

Δεύτερον οι παράμετροι της συγκόλλησης έχουν σημαντική επιρροή στην ποιότητα συγκόλλησης FSW του χαλκού. Ερευνητές ανέφεραν ότι παρότι συγκόλληση FSW 60/40 στο μπρούτζο μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα σχετικά μεγάλο εύρος των επιλογών που προσφέρουν οι παράμετροι της συγκόλλησης, προκύπτει ένα σημαντικό ελάττωμα από αυτή. Το ελάττωμα αυτό είναι πως η συχνότητα που δημιουργεί η διαδικασία FSW στο μέταλλο ευνοεί την δημιουργία κενών στην κόλληση, κενά τα οποία αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης για έναν σταθερό ρυθμό περιστροφής ή με την μείωση του ρυθμού περιστροφής κατά το ήμισυ (από 500 σε 250rpm).

Τρίτον οι παρατηρήσεις για την μικροδομή που παράγει η διαδικασία διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη. Μια πρώτη μελέτη αναφέρει την ύπαρξη τριών ζωνών διαφορετικής μικροδομής στις συγκολλήσεις καθαρού χαλκού. Την ζώνη ανάδευσης με πλήρως ανακρυσταλλομένους κόκκους, την ζώνη TMAZ στην οποία παρατηρείτε η ύπαρξη διαμορφωμένων μεγάλων κόκκων και την ζώνη HAZ με ομοαξονικούς κόκκους μεγαλύτερους από αυτούς που παρατηρούνται στο μέταλλο βάσεως. Άλλες μελέτες αντικρούουν τα προαναφερθέντα συμπεράσματα, υποστηρίζοντας η πρώτη ότι δεν παρατηρήθηκε η ύπαρξη μιας ξεκάθαρης ζώνης TMAZ, ενώ η δεύτερη υποστηρίζει ότι δεν παρατηρήθηκε ζώνη HAZ στην μικροδομή της περιοχής.

Τέταρτον, FSW κράματα χαλκού παρουσίασαν αντοχή σε εφελκυσμό παρόμοια με την αντοχή του μετάλλου βάσεως. Για τον καθαρό χαλκό που είχε συγκολληθεί με την διαδικασία FSW αναφέρθηκε ότι οι δοκιμές σε κομμάτια εγκάρσιας τομής παρουσίασαν ελαφρά χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό από ότι το μέταλλο βάσεως. Παρόλα αυτά οι συγκολλήσεις FSW καθαρού χαλκού έδειξαν ελαφρά υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό από ότι οι συγκολλήσεις EBM [130]. Επιπλέον η αντοχή του χαλκού FSW αυξήθηκε με την μείωση της διαμέτρου της πατούρας του εργαλείου και του ρυθμού περιστροφής ή αυξάνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης. Για τον μπρούτζο 60/40 FSW έρευνες ανέφεραν μια αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με το μέταλλο βάσεως. Με την άνοδο της ταχύτητας συγκόλλησης αυξήθηκε η αντοχή του δοκιμίου σε εφελκυσμό, με ταυτόχρονη μείωση του ποσοστού επιμήκυνσης αυτού.

Πέμπτον, κάποιες ιδιότητες που είχαν επιτευχθεί με τις τεχνικές FSW και GTAW είναι παρόμοιες. Για παράδειγμα η ποσότητα των εκλυόμενων αερίων (O_2 και H_2) είναι παρόμοιες και στις δύο τεχνικές παρότι η συγκόλληση GTAW διεξήχθει με την χρήση αερίου θωράκισης

(ήλιο-He) ενώ στην συγκόλληση FSW δεν χρησιμοποιήθει αέριο θωράκισης . Επίσης και οι δύο τεχνικές μείωσαν την αγωγιμότητα του υλικού περίπου 5%

Από τις έως τώρα έρευνες φάνηκε πως η διαδικασία FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση χαλκού.

3.6.2 Κράματα Τιτανίου

Παρότι πολλά κράματα τιτανίου είναι ήδη συγκολλησιμα με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης τήξεως όπως η συγκόλληση GTAW, είναι πολύ πιθανό να χρειαστούν θερμική κατεργασία κατόπιν της συγκόλλησης. Αυτό το επιπλέον βήμα στην παραγωγική διαδικασία αυξάνει το κόστος παραγωγής.

Η διαδικασία FSW όντας μια κατεργασία που δεν προξενεί την τήξη του μετάλλου, θεωρείτε πως θα εξαλείψει την ανάγκη της θερμικής κατεργασίας κατόπιν της κόλλησης. Δυστυχώς οι έρευνες επί του παρόντος σχετικά με την συγκόλληση FSW σε κράματα τιτανίου είναι περιορισμένες.

Πρώτες έρευνες [131,132] ασχολήθηκαν με την επίδραση της διαδικασίας FSW στην μικροδομική εξέλιξη και τις ιδιότητες του κράματος Ti-6Al-4V. Οι ερευνητές επέβλεψαν συγκολλήσεις FSW στο κράμα Ti-6Al-4V που διεξήχθησαν από το Ινστιτούτο συγκολλήσεων Edison (EWI) και από το TWI και ανέφεραν κάποια αποτελέσματα, χωρίς όμως να αναφέρουν λεπτομέρειες σχετικά με το υλικό και την γεωμετρία του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε η της συνθήκες που επικρατούσαν κατά την συγκόλληση. Αυτές οι έρευνες αποκάλυψαν τις ακόλουθες σημαντικές παρατηρήσεις .

Πρώτον παρατηρήθηκε η παραγωγή υψηλής ποιότητας συγκολλήσεων.

Δεύτερον, είναι γενικά παραδεκτό πως απουσιάζει μια διακριτή ζώνη TMAZ στις FSW συγκολλήσεις τιτανίου. Κάποιοι άλλοι ερευνητές ανέφεραν την ύπαρξη μιας ιδιαίτερα μικρής ζώνης TMAZ της τάξεως των ~30μm.

Τρίτον, θερμοζεύγη προσαρμοσμένα στην περιφέρεια του εργαλείου και σε απόσταση 3.2mm από την πατούρα κατέγραψαν μέγιστη θερμοκρασία στους 999°C. Αυτή η μέτρηση οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία στην ζώνη ανάδευσης μπορεί να είναι πάνω από τους 1000°C, θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία μετάβασης μικροδομής του συγκεκριμένου κράματος τιτανίου σε μικροδομή β-φάσης(β-transus), που είναι οι 995°C. Τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της ζώνης ανάδευσης, επίσης καταδείκνυαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία που είχε επιτευχθεί υπερέβαινε την

θερμοκρασία β -transus. Στην HAZ από την άλλη, πιστεύετε πως η μέγιστη θερμοκρασία κατά την διαδικασία FSW ήταν χαμηλότερη από την β -transus.

Τέταρτον θεωρείται ότι οι αλλότροπης φάσης μετατροπές και η παραμόρφωση της μικροδομής κατά την ψύξη, ευθύνονται για τις ιδιαίτερα σύνθετες μικροδομές που παρατηρούνται στο τιτάνιο σε σχέση με τις αντίστοιχες μικροδομές που παρατηρούνται κατόπιν της εφαρμογής της διαδικασίας FSW σε κράματα αλουμινίου.

Πέμπτη και τελευταία παρατήρηση των ερευνητών είναι πως στο συγκεκριμένο κράμα τιτανίου δεν παρατηρήθηκε η ύπαρξη περιοχών μετάπτωσης σκληρότητας. Οι περιοχές μετάπτωσης σκληρότητας είναι περιοχές μειωμένης σκληρότητας που παρατηρούνται στην HAZ κατόπιν συγκολλήσεων FSW ή τήξεως και η δημιουργία τους οφείλεται στην τοπική ανάπτυξη των κόκκων β σε αυτές.

Έκτον παρατηρήθηκε φθορά και παραμόρφωση στο εργαλείο, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας επήλθε κατά την αρχική του βύθιση στο υλικό.

Ενώ οι πρώιμες έρευνες δείχνουν πως η διαδικασία FSW είναι μια αποτελεσματική μέθοδος συγκόλλησης για το τιτάνιο και τα κράματα αυτού, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα για την κατανόηση της μικροδομικής εξέλιξης των κραμάτων τιτανίου κατά την διαδικασία.

3.6.3 Χάλυβας

Παρότι η πλειονότητα των ερευνών σχετικά με την διαδικασία FSW έχουν επικεντρωθεί στα κράματα αλουμινίου, υπάρχει αρκετό ενδιαφέρον για τις δυνατότητες εφαρμογής της στο χάλυβα. Η χαμηλότερη θερμότητα που απαιτείτε για την διαδικασία FSW σε σχέση με τις συγκολλήσεις τήξεως πιστεύετε πως θα παράγει μικρότερες μεταλλουργικές αλλαγές στην ζώνη HAZ και πως θα ελαχιστοποιήσει την διαστρέβλωση καθώς και τις εναπομένουσες εντάσεις στο χάλυβα, παράγοντες εξαιρετικά σημαντικοί στην συγκόλληση χονδρών πλακών χάλυβα, υλικού που χρησιμοποιείται από την ναυπηγική βιομηχανία. Επιπλέον τα προβλήματα που παρατηρούνται από την θραύση λόγω υδρογόνου στις συμβατικές διαδικασίες, εξαλείφονται με την διαδικασία FSW αφού δεν επέρχεται τήξη του υλικού. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της διαδικασίας FSW είναι πως εξαλείφει την παραγωγή των ιδιαίτερα τοξικών αερίων, ειδικά αυτών που περιέχουν εξασθενές Cr συμβαδίζοντας έτσι με τα πρότυπα OSHA[133,134]. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι πιθανόν να κάνουν την διαδικασία FSW ελκυστική για την συγκόλληση του χάλυβα σε πολλές εφαρμογές.

Κάποιες μελέτες FSW διεξήχθησαν πρόσφατα σε κράματα low carbon 12% χρωμιούχου χάλυβα, μαλακού χάλυβα AISI 1010, ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα 304L και 316L, υπερωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα Al 6 XN, HSLA-65(ASTM A945), DH-36, και C-Mn.

Αυτές οι μελέτες κατέληξαν στις παρακάτω σημαντικές παρατηρήσεις.

Πρώτον, γενικά σαν αέριο θωράκισης χρησιμοποιήθηκε το αργόν (argon) για να προστατεύσει τόσο το εργαλείο όσο και την περιοχή συγκόλλησης από την οξείδωση. Παρόλα αυτά κάποιες έρευνες δεν αποκάλυψαν εάν χρησιμοποιήθηκε αέριο θωράκισης. Επιπλέον, καμία μελέτη δεν αναφέρθηκε στην επίδραση του αερίου θωράκισης στην ποιότητα της συγκόλλησης.

Δεύτερον ερευνητές [135] ανέφεραν ότι η θερμοκρασία της πατούρας του εργαλείου ήταν πάνω από 1000°C και η θερμοκρασία που επικρατούσε στην περιοχή αμέσως μετά το πέρασμα του περιστρεφόμενου εργαλείου ήταν της τάξεως των 900-1000°C. Παρομοίως θερμοκρασία της τάξεως των 1000°C παρατηρήθηκε από άλλους ερευνητές σε ελάχιστη απόσταση πάνω από την πατούρα του εργαλείου με την χρήση θερμοζεύγους και υπέρυθρης κάμερας. Οι ερευνητές βασιζόμενοι στην παρέκταση της μετρούμενης θερμοκρασίας και σε στοιχεία από την μικροδομή πιστεύουν πως η μέγιστη θερμοκρασία εντός της ζώνης ανάδευσης υπερβαίνει τους 1100°C και πιθανόν και τους 1200°C

Τρίτον ενώ τα περισσότερα κομμάτια πλακών από 3.2 έως 6.4mm μπορούν να συγκολληθούν επιτυχώς με ένα μοναχά πέρασμα του εργαλείου[136,134,137] οι κολλήσεις σε πλάκες πάχους πάνω από 6.4mm απαιτούσαν συνήθως δύο αντίθετα περάσματα λόγω του ότι το εργαλείο δεν επηρεάζει τόσο πολύ το χάλυβα και δεν κατορθώνει την συγκόλληση του με ένα μοναχά πέρασμα. Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι ερευνητές [138]κατάφεραν να συγκολλήσουν πλάκες χάλυβα HSLA-65 με ένα πέρασμα αφού πρώτα είχαν προθερμάνει τόσο τις πλάκες, όσο και το εργαλείο περίπου στους 300°C

Τέταρτον, γενικά δεν παρατηρείτε η ύπαρξη ζώνης TMAZ στις συγκολλήσεις FSW χάλυβα. Κάποιοι ερευνητές[139] όμως ανέφεραν την ύπαρξη της αφού παρατήρησαν την μερική ανακρυστάλλωση σε περιοχή που συμπίπτει θεωρητικά με την θέση της. Αυτή η παρατήρηση συνέβη σε κράματα 304L και 316L.

Πέμπτη παρατήρηση των ερευνών σχετικά με την FSW συγκόλληση κραμάτων χάλυβα είναι ότι η μικροδομική εξέλιξη του είναι αρκετά πιο περιπλοκή σε σύγκριση με αυτή του αλουμινίου λόγω της περιστασιακής ανακρυστάλλωσης καθώς και της ανάπτυξης κόκκων στις υψηλές θερμοκρασίες (>1000°C)που παρατηρούνται. Το μέγεθος των

αλλαγών στην μικροδομή του κράματος κατά την διαδικασία FSW εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την χημική σύσταση του. Για τον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, αναφέρθηκε ότι αναπτύχθηκε δομή ομοαξονικών κόκκων εντός της ζώνης ανάδευσης. Για το μαλακό χάλυβα, τον χρωμιούχο χάλυβα 12% και τον χάλυβα HSLA-65, ανάλογα με την θερμοκρασία κατά την διαδικασία FSW και την σύσταση του κράματος, παρατηρήθηκαν διαφορετικές μικροδομές στις συγκολλήσεις. Παραδείγματος χάρη ερευνητές ανέφεραν ότι η διαδικασία FSW είχε σαν αποτέλεσμα μια αλλαγή στη μικροδομή, από δομή ομαλού ομοαξονικού φερίτη με ένα μικρό ποσό περλίτη στη βάση του κράματος, σε μια δομή ακατέργαστου φερίτη, φερίτη Widmanstätten και θυλάκων φερίτη/καρβιδίων στο σύνολο της ζώνης ανάδευσης. Επιπλέον δομή κόκκων ομαλών ομοαξονικών φεριτών, με διασκορπισμένους ομαλούς θύλακες περλίτη αποκαλύφθηκε στην HAZ [140].

Άλλοι ερευνητές [141] ανέφεραν ότι στον χάλυβα DH-36 μετά την διαδικασία FSW παρατηρήθηκε στην ζώνη ανάδευσης δομή από βαινίτη και μαρτενσίτη. Η εσωτερική HAZ που συνορεύει με την ζώνη ανάδευσης βρέθηκε να έχει μια δομή καθαρού φερίτη με ένα μικρό ποσοστό φερίτη και μαρτενσίτη. Η εξωτερική HAZ, μεταξύ δηλαδή της εσωτερικής HAZ και του μετάλλου βάσεως βρέθηκε να έχει μια ομοαξονική δομή στους κόκκους της, οι οποίοι όμως είναι αρκετά μεγαλύτεροι από αυτούς της εσωτερικής HAZ και ελαφρά μεγαλύτεροι από αυτούς του μετάλλου βάσεως.

Εκτων οι συγκολλήσεις FSW επέδειξαν ικανοποιητικές ιδιότητες και αντοχές σε δοκιμές σκληρότητας, εφελκυσμού δοκιμίων εγκάρσιας τομής και λυγισμού. Οι δοκιμές σε εφελκυσμό δοκιμίων εγκάρσιας τομής έδειξαν ότι το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας καθώς και η αντοχή σε εφελκυσμό των συγκολλήσεων είναι κατά κανόνα υψηλότερα από τις αντίστοιχες του μετάλλου βάσεως [142]. Η σκληρότητα επίσης που παρουσιάζει η περιοχή συγκόλλησης είναι κατά πολύ υψηλότερη από αυτή του μετάλλου βάσεως. Επιπλέον διαπιστώθηκε πως η δυνατότητα για εγκάρσιο στην κόλληση λυγισμό 180°, γεγονός που φανερώνει τις καλές ιδιότητες λυγισμού που προσφέρει η διαδικασία.

Οι πρώτες μελέτες σκοπιμότητα σχετικά με την FSW συγκόλληση του χάλυβα έδειξαν ότι υπάρχουν δυνατότητες για την εφαρμογή της διαδικασίας σε διάφορους τύπους χάλυβα. Επιπλέον οι συνεχείς προσπάθειες για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας και για την κατανόηση της εξέλιξης στη μικροδομή του χάλυβα, αναδεικνύουν την μεγάλη σημασία που έχει η σωστή επιλογή για το υλικό κατασκευής του εργαλείου. Λόγω της υψηλής σκληρότητας του χάλυβα και των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται για την κατεργασία του είναι σημαντικό να επιλεγούν υλικά κατασκευής εργαλείων με μεγάλη αντίσταση στη φθορά και υψηλή σκληρότητα

καθώς και την δυνατότητα να διατηρούν αυτές τις ιδιότητες τους σε θερμοκρασίες πάνω από τους 1000°C. Κάποιοι ερευνητές επέλεξαν να μην αποκαλύψουν τα υλικά και τη γεωμετρία των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. Άλλοι [137,140,143]έδωσαν στην δημοσιότητα τα υλικά που χρησιμοποίησαν. Αυτά είναι :

- Κράματα βολφραμίου
- Κράματα μολυβδαινίου
- Πολυκρυσταλλικά νιτρίδια βορίου (PCBN)

Οι ερευνητές επίσης ανέφεραν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό φθοράς του εργαλείου προέκυψε κατά την αρχική βύθιση του στην αρχή κάθε συγκόλλησης. Το κάθε εργαλείο έχρηζε αντικατάστασης μετά από 1.5-2.0m συγκόλλησης.

Οι ανάγκες της βιομηχανίας καταδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την συγκόλληση FSW του χάλυβα.

3.6.4 Κράματα Μαγνησίου

Καθώς τα κράματα του μαγνησίου παρουσιάζουν γενικά απεριόριστες δυνατότητες μορφοποίησης, τα φύλλα μαγνησίου παράγονται κυρίως με χύτευση ή χύτευση σε καλούπια, πλην κάποιων κατεργασμένων κραμάτων όπως το AZ31. Συνήθως είναι αρκετά δύσκολη η συγκόλληση τους λόγω των πόρων που σχηματίζονται στην κόλληση[144]. Επιπλέον παρατηρείτε μεγάλη παραμόρφωση του υλικού λόγω της κόλλησης.

Για αυτούς τους λόγους μια διαδικασία στερεάς κατάστασης όπως είναι η FSW φαντάζει σαν την ιδανική επιλογή για την συγκόλληση του μαγνησίου.

Πρόσφατα αρκετές έρευνες [145, 146, 147] παρουσιάστηκαν για διάφορα κράματα μαγνησίου όπως τα AM50, AM60, AZ91 και AZ31. Τα συμπεράσματα αυτών των ερευνών παρουσιάζονται παρακάτω.

Πρώτη παρατήρηση των ερευνητών είναι ότι η ποιότητα της συγκόλλησης FSW κραμάτων μαγνησίου είναι πολύ ευαίσθητη απέναντι σε αλλαγές του ρυθμού περιστροφής και της ταχύτητας συγκόλλησης. Υψηλότερες ταχύτητες και χαμηλότεροι ρυθμοί περιστροφής από αυτούς που κατέληξαν οι έρευνες σαν ιδανικούς είχε σαν αποτέλεσμα είτε την δημιουργία εσωτερικών κενών στο κράμα, είτε η διαδικασία δεν κατάφερε να συγκολλήσει το κράμα, γεγονός που κατά τους ερευνητές οφείλεται στο πλήθος των μεσομεταλλικών στοιχείων που συναντάει κανείς στα όρια των κόκκων του κράματος.

Δεύτερον και πλην μερικών εξαιρέσεων λόγω ραγδαίας αλλαγής των παραμέτρων της συγκόλλησης, η διαδικασία FSW δεν δημιουργεί

υγρή φάση στο κράμα μιας και οι μέγιστες θερμοκρασίες που ανέφεραν οι ερευνητές κυμαίνονται από 370 έως 500°C

Τρίτον οι ερευνητές διαπιστώσαν και εδώ όπως και στα κράματα FSW αλουμινίου την ύπαρξη τεσσάρων ζωνών διαφορετικής μικροδομής.

Η ζώνη ανάδευσης, η οποία παρουσιάζει σχήμα ελλειψοειδές σχήμα σε κάποιες περιπτώσεις, ενώ σε κάποιες σχήμα λεκάνης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πλήρως ανακρυσταλλομένων ομαλών κόκκων. Ερευνητές ανέφεραν όμως την ύπαρξη δύο υπό-ζωνών εντός της ζώνης ανάδευσης, την ζώνη SZ I (stirred zone I) και την ζώνη SZ II (stirred zone II) στο κράμα μαγνησίου FSW AZ31B-H24. Η ζώνη SZ I βρίσκεται στο κέντρο και προς τα επάνω της ζώνης ανάδευσης και χαρακτηρίζεται από την μερική δυναμική ανακρυστάλλωση ενώ η ζώνη SZ II καταλαμβάνει τον υπόλοιπο χώρο της ζώνης ανάδευσης και χαρακτηρίζεται από την δυναμική ανακρυστάλλωση του συνόλου των κόκκων της καθώς και από την ανάπτυξη τους.

Τέταρτον, η διαδικασία FSW γενικά επέφερε την δημιουργία ομαλών ανακρυσταλλομένων κόκκων στην ζώνη ανάδευσης. Σε χυτευμένο κράμα μαγνησίου, τα ακατέργαστα στοιχεία α-φάσης καθώς και τα μεσομεταλλικά στοιχεία $Al_{12}Mg_{17}$ εξαφανίστηκαν κατόπιν της εφαρμογής διαδικασίας FSW σε αυτό. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι το μέγεθος των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης μεγάλωσε με την αύξηση του ρυθμού περιστροφής του εργαλείου και με την μείωση της ταχύτητας της κόλλησης λόγω της μεγαλύτερης θερμότητας, η οποία βοήθησε στην ανάπτυξη ανακρυσταλλομένων κόκκων. Αυτή η παρατήρηση συνάδει με τα αποτελέσματα που έχουν προέλθει από αντίστοιχες έρευνες σε κράματα FSW αλουμινίου.

Πέμπτον η σκληρότερα που παρατηρήθηκε στην ζώνη ανάδευσης είναι γενικά υψηλότερη από αυτή του μετάλλου βάσεως λόγω της ανακρυσταλλομένης μικροδομής της.

Έκτον, η διαδικασία FSW οδήγησε σε μια βελτίωση των εφελκυστικών ιδιοτήτων των χυτευμένων κραμάτων, όπως του AZ91. παρατηρήθηκε όμως μια μείωση των εφελκυστικών δυνατοτήτων των ακατέργαστων κραμάτων μαγνησίου AZ31B-H24 και AZ61 που εξετάστηκαν.

Στις δοκιμές εφελκυσμού σε κράμα AZ91D οι ερευνητές[148] κατέληξαν πως όλα τα δοκίμια εγκάρσιας τομής, έσπασαν στο μέταλλο βάσης, καταδεικνύοντας έτσι την ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό της περιοχής συγκόλλησης.

Δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια διαμήκους τομής[149] έδειξαν ότι η αντοχή και η ολκιμότητα που παρουσιάζει η κόλληση είναι κατά πολύ ανώτερες από τις αντίστοιχες του μετάλλου βάσεως. Από την άλλη, διαφορετικά κράματα μαγνησίου, όπως το AZ61 παρουσίασαν ελαφρώς

μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, καθώς και αρκετά χαμηλότερο κρίσιμο σημείο ελαστικότητας σε σχέση με το μέταλλο βάσεως. Το παρόν θέμα καθώς και οι παράγοντες που μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητες εφελκυσμού των κολλήσεων FSW κραμάτων μαγνησίου βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έρευνας .

3.6.5 Συγκόλληση FSW ανόμοιων μετάλλων και κραμάτων

Η διαδικασία FSW αναγνωρίζεται από την επιστημονική κοινότητα σαν μια καινούργια τεχνολογία που μπορεί να συγκολλήσει ανόμοια μέταλλα και κράματα. Λίγες όμως έρευνες[150,151,152] έχουν διεξαχθεί σχετικά με αυτή τη δυνατότητα της διαδικασίας FSW. Σε αυτές τις έρευνες εξετάστηκε η δυνατότητα συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου ή χαλκού με άλλα μέταλλα. Στον παρακάτω πίνακα 3.6 συνοψίζονται οι συνδυασμοί με τους οποίους ασχολήθηκαν οι ερευνητές καθώς και οι παράμετροι της διαδικασίας.

Συγκολλήσεις FSW ανόμοιων μετάλλων			
Υλικό	πάχος πλάκας(mm)	περιστροφή (rpm)	ταχύτητα (mm/min)
2024Al με 6061Al	6.0	400–1200	60
6061Al με 2024Al	12.7	637	133
2024Al με 1100Al	0.65	650	60
5052Al με 2017Al	~5.3, 3	1000, 1250	60
7075Al με 2017Al	~5.3, 3	1000, 1250	60
7x1xAl (Sc) με 7x5xAl (Sc)	~5.3	1000	60
7075Al με 2017Al	3	1250	60
7075Al με 1100Al	3	1250	60
5083Al με 6082Al	5.0	–	170–500
2024Al με D357	–	–	–
6061Al με A356	4.0	1600	87–267
2024Al με 7075Al	25.4	150–200	76.2–127
20 vol.% Al ₂ O ₃ /6061Al με 10 vol.% SiC/A339	6.5	800	60
20 vol.% Al ₂ O ₃ /2014Al με 2024Al	4	1120	120
6061Al με χαλκό	6.0	400–1200	60–180
2024Al με χαλκό	6.5	650	60
2024Al με ασημί	6.0	650	60
χαλκό με ορείχαλκο	6.2	1000	60
1050Al με AZ31	6	2450	75
6061Al με AZ31B		800	75
6061Al με AZ91D		800	75
AZ91D με AM60B		2000	75
5083 Al με μαλακό χάλυβα	2	100–1250	25
6061Al με AISI 1018	6	914	140

πίνακας 3.6

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες επικεντρώθηκαν στην οπτικοποίηση της ροής υλικού κατά την διαδικασία FSW και όχι στον ορισμό των βέλτιστων παραμέτρων ή στην

ιδανική γεωμετρία του εργαλείου για κάθε κόλληση. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών συνήθως κατέληγαν στην παρουσίαση ασυγκόλλητων περιοχών, στην ύπαρξη μεγάλων κενών περιοχών καθώς και στην δημιουργία εγκλεισμένων οξειδίων στο κάτω μέρος των πλακών. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση στην αποτελεσματικότητα της κόλλησης εάν οι ερευνητές επιχειρούσαν την συγκόλληση ενός πολύ σκληρού κράματος αλουμινίου με ένα πολύ μαλακό κράμα αλουμινίου.

Επιπλέον οι ερευνητές ανέφεραν ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του αποτελέσματος ο τρόπος με τον οποίο έχουν τοποθετηθεί τα δύο κράματα ή μέταλλα κατά την συγκόλληση. Για παράδειγμα δοκιμές συγκόλλησης FSW κράματος αλουμινίου 5083Al[150] με κράμα 6061Al, καθώς και χαλκού (Cu)[153] με κράμα αλουμινίου 6061Al έδειξαν ότι το υψηλής αντοχής υλικό θα πρέπει να τοποθετείτε στην προπορευόμενη πλευρά του εργαλείου, αυτή δηλαδή που συναντάει πρώτα το εργαλείο στην αρχή καθεμιάς περιστροφής του.

Το μεγαλύτερο μέρος των περιορισμών και ελαττωμάτων κατά την συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων δεν έχει ακόμα λυθεί και πολλές ενστάσεις υπάρχουν από ερευνητές σχετικά με τους τρόπους προσέγγισης και λύσης αυτών.

Πρόσφατες έρευνες[154] κατάφεραν να παρουσιάσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην συγκόλληση αλουμινίου και χάλυβα, καθώς και αλουμινίου και μαγνησίου. Οι ερευνητές κατόπιν δοκιμών συγκόλλησης FSW κράματος αλουμινίου 6061 Al με μαλακό χάλυβα, με το αλουμίνιο στην οπίσθια πλευρά του εργαλείου και το εργαλείο να περιστρέφεται κατά την φορά του ρολογιού κατέληξαν στον ιδανικό ρυθμό περιστροφής του, στις 250rpm. Επίσης αναφέρεται ότι σε περιστροφές εργαλείου κάτω ιδανικό ρυθμό περιστροφής των 250rpm παρουσιάζεται σημαντική μείωση στην αντοχή σε εφελκυσμό. Στην ιδανική περιστροφή των 250rpm αναφέρεται ότι η θέση της ακίδας σε σχέση με τα άκρα των δύο πλακών παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της κόλλησης. τοποθετώντας την ακίδα στην ένωση των δύο πλακών ακριβώς δεν απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τοποθετώντας σταδιακά όμως την ακίδα του εργαλείου προς την πλευρά του αλουμινίου, η αντοχή σε εφελκυσμό των κολλήσεων αυξήθηκε σταδιακά και αυτή. Όταν οι ερευνητές τοποθέτησαν το 90% της διαμέτρου της ακίδας στην πλευρά του αλουμινίου η συγκόλληση απέφερε την μέγιστη αντοχή της σε εφελκυσμό, της τάξεως των ~240MPa, τιμή ίση με το 86% της αντοχής του κράματος αλουμινίου βάσεως.

Οι ερευνητές συνεχίζουν τις δοκιμές στην συγκόλληση FSW ανόμοιων μετάλλων και κραμάτων προσπαθώντας να ανταποκριθούν στα ερωτήματα που θέτει συνεχώς η βιομηχανία σε σχέση με τέτοιου είδους εφαρμογές.

3.7 Έρευνα

Όντας μια σχετικά σύγχρονη τεχνική συγκόλλησης η διαδικασία FSW βρίσκεται ακόμα σε μεγάλο ποσοστό της στο στάδιο της έρευνας. Πολλές παράμετροι που την επηρεάζουν δεν έχουν βελτιστοποιηθεί ακόμα και υπάρχουν πολλά ερωτήματα σχετικά με αυτές. Η επιστημονική μηχανολογική κοινότητα έχει διαχωρίσει την έρευνα της σε τρεις διαφορετικές ενότητες, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω αναλυτικής προσέγγισης. Αυτές οι ενότητες είναι οι ακόλουθες.

3.7.1 Ροή υλικού

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.4.1 αυτής της εργασίας, η ροή υλικού κατά την διαδικασία FSW είναι αρκετά πολύπλοκη και ακόμη η επιστημονική κοινότητα δεν έχει καταφέρει να την κατανοήσει πλήρως. Είναι προφανές ότι η πλήρης κατανόηση της διαδικασίας μεταφοράς υλικού κατά την συγκόλληση γύρω από το περιστρεφόμενο εργαλείο θα οδηγήσει στην βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας FSW και στην σχεδίαση του ιδανικού για κάθε εφαρμογή, εργαλείου. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας FSW και ο ιδανικός σχεδιασμός του εργαλείου θα συμβάλλουν τα μέγιστα στην αύξηση της ποιότητας των συγκολλήσεων, καθώς και στην αύξηση της παραγωγικότητας. Θεσπίζονται νέες θεωρητικές και πειραματικές διαδικασίες με σκοπό την πλήρη κατανόηση της ροής υλικού κατά την διαδικασία FSW.

3.7.2 Υλικό και σχεδιασμός εργαλείου

Η φθορά του εργαλείου κατά την διαδικασία FSW δεν θεωρείται γενικά σαν ένας σημαντικός παράγοντας στην συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Όταν όμως η διαδικασία FSW καλείται να συγκολλήσει υλικά με υψηλό σημείο τήξεως (χάλυβας και αλουμίνιο) καθώς και ιδιαίτερα μαλακά υλικά, η φθορά του εργαλείου διαπιστώθηκε πως είναι ένα σοβαρό πρόβλημα. Επί του παρόντος η έρευνα δεν έχει να δείξει κάποια ιδιαίτερα αποτελέσματα σε αυτό το περιορισμό. Η πλειονότητα των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών λύσεων, βασίζεται στην διαίσθηση κυριολεκτικά κάποιων διορατικών ερευνητών, οι οποίοι προτείνουν ένα σχέδιο εργαλείου το οποίο ανταπεξέρχεται στις ανάγκες της παραγωγής και δεν μπορούν να δικαιολογήσουν με επιστημονικά κριτήρια την λύση τους. Η παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης μεθόδου

σχεδιασμού εργαλείων ανάλογα με τις ανάγκες του προς συγκόλλησης υλικού και της παραγωγής είναι απαραίτητη.

Όσον αφορά το υλικό κατασκευής του εργαλείου, παρότι θεωρείτε σημαντικός παράγοντας για την ποιοτική συγκόλληση του χάλυβα, του τιτανίου κ.α., δεν έχουν διεξαχθεί συστηματικές μελέτες έως τις μέρες μας. Είναι πολύ πιθανόν ότι η ελαχιστοποίηση της φθοράς του εργαλείου, καθώς και η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του να σχετίζονται με το υλικό κατασκευής του.

Είναι φανερό η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

3.7.3 Σταθερότητα της Μικροδομής

Η διαδικασία συγκόλλησης FSW παράγει συνήθως προϊόντα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά την συγκόλληση για τις ανάγκες της βιομηχανίας, χωρίς να απαιτούν κάποια πρόσθετη κατεργασία εάν το υλικό έχει σκληρυνθεί προ της εφαρμογής (σκληρότητα T6 και T4). Υπάρχουν όμως κάποια πλεονεκτήματα στην εφαρμογή της διαδικασίας FSW στο μέταλλο βάσης, το οποίο δεν έχει υποστεί ακόμη βαφή. Για παράδειγμα παρατηρήθηκε ότι η απαιτούμενη δύναμη για την συγκόλληση είναι χαμηλότερη όταν το υλικό βρίσκεται σε μαλακή κατάσταση “O” (κατάσταση ανόπτισης) σε σχέση με την δύναμη συγκόλλησης που απαιτεί υλικό κατάστασης T6[155]. Επιπλέον, εάν η συγκόλληση διεξαχθεί με το υλικό σε κατάσταση “O” η διαδικασία μορφοποίησης κατόπιν της FSW μπορεί να εφαρμοστεί πολύ ευκολότερα, απαιτείτε όμως θερμική κατεργασία του υλικού μετά την κόλληση για την ενδυνάμωση του. Για αυτό είναι επιτακτικό να κατανοήσουμε την επίδραση των θερμικών κατεργασιών στην μικροδομή και στις ιδιότητες των κολλήσεων FSW. Από τις λιγοστές έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε αυτόν τον τομέα φάνηκε πως οι θερμικές κατεργασίες κατόπιν της κόλλησης (επεξεργασία διάλυσης + γήρανσης) είχαν σαν αποτέλεσμα την ακανόνιστη ανάπτυξη των κόκκων, και λόγω αυτής της ανάπτυξης επήλθε μείωση στις ιδιότητες της κόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσεως.

Σε πρόσφατη μελέτη σχετικά με το θέμα αναφέρθηκε ότι δεν παρατηρήθηκε ακανόνιστη ανάπτυξη στους κόκκους της κόλλησης κατόπιν της θερμικής κατεργασίας της κόλλησης.

Είναι απαραίτητη για αυτό η επιπλέον διερεύνηση της χημικής σύστασης του κάθε κράματος και του πως αυτή επηρεάζει τις παραμέτρους της συγκόλλησης FSW, με σκοπό την παραγωγή μιας μικροδομής ομαλών κόκκων και κατ’ επέκταση με καλές μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου FSW.

3.8 Επίλογος & Εξέλιξη

Σε αυτό το κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας παρουσιάστηκε επιγραμματικά μια νέα τεχνική συγκόλλησης, η λειτουργία της καθώς και οι αρχές που την διέπουν. Παρουσιάστηκε μέρος των υλικών στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί, η διαδικασία μοντελοποίησης της, η μικροδομή που παράγει στο υλικό και οι ιδιότητες που προσδίδει σε αυτό.

Κλείνοντας θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα για την διαδικασία και τους παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχή εφαρμογή της.

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την παραγωγή ανθεκτικών κολλήσεων. Σήμερα η πλειονότητα των σχεδιασμών εργαλείων είναι ιδιοκτησία ανεξάρτητων ερευνητών και δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για αυτούς . Εμείς μπορούμε να αναφέρουμε ότι γενικά σαν εργαλείο συγκόλλησης χρησιμοποιείται ευρέως μια διάταξη αποτελούμενη από μια κυλινδρική ακίδα στο κάτω μέρος της και μια κοίλη πατούρα στο επάνω της. Επίσης έχουν αναπτυχθεί και δοθεί στη δημοσιότητα οι σχεδιασμοί *WhorlTM* και *MX TrifluteTM*

Οι παράμετροι της διαδικασίας, όπως ο ρυθμός περιστροφής του εργαλείου, η ταχύτητα της κόλλησης, η γωνία εμπλοκής του εργαλείου καθώς και το βάθος στόχευσης, είναι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την δημιουργία ανθεκτικών ενώσεων.

Όπως και στις παραδοσιακές τεχνικές συγκολλήσεων τήξης, οι πλέον κοινές διατάξεις συγκόλλησης, είναι οι ενώσεις άκρων και οι ενώσεις επικάλυψης. Σε αντίθεση όμως με τις παραδοσιακές τεχνικές, η διαδικασία FSW δεν απαιτεί ιδιαίτερη προετοιμασία των κομματιών για την συγκόλληση τέτοιων διατάξεων . Δύο καθαρές μεταλλικές πλάκες μπορούν εύκολα να συγκολληθούν, χωρίς να χρειάζονται επιφανειακή επεξεργασία, όπως στις κλασσικές τεχνικές συγκόλλησης τήξεως.

Είναι κοινό αποδεκτό ότι το φαινόμενο της ροής υλικού κατά την διαδικασία FSW είναι πολύ περίπλοκο και ακόμα δεν έχει κατανοηθεί πλήρως. Κάποιοι ερευνητές έχουν προτείνει ότι η διαδικασία FSW μπορεί να περιγραφεί σαν μια στοχευμένη μεταλλουργική κατεργασία μιας και η ανάδευση και μείξη του υλικού συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του υλικού και στην περιοχή που είναι παρακείμενη στο περιστρεφόμενο εργαλείο.

Η διαδικασία FSW επιφέρει την μεγάλη άνοδο της θερμοκρασίας εντός, αλλά και στην περιοχή γύρω από την κόλληση. Οι ερευνητές έχουν αναφέρει ότι προκύπτει μια αύξηση της τάξεως των 400-500°C εντός της ζώνης ανάδευσης, κατά την συγκόλληση. Αυτή η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας κατά την διαδικασία, καθώς και η έντονη

πλαστική παραμόρφωση του υλικού, έχει σαν αποτέλεσμα την μεγάλη αλλαγή της μικροδομής του κράματος .

Μετά το πέρας της διαδικασίας διακρίνονται τρεις διακριτές μεταξύ τους ζώνες, διαφορετικής μικροδομής η καθεμία, στην περιοχή της κόλλησης. Η ζώνη ανάδευσης, που χαρακτηρίζεται από την έντονη πλαστική παραμόρφωση που λαβαίνει χώρα σε αυτή και υπόκειται στην μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας και καταλήγει να έχει μια μικροδομή ομοαξονικών και πλήρως ανακρυσταλλομένων κόκκων. Ακολουθεί η ζώνη TMAZ, η οποία υπόκειται σε μία μέση θερμοκρασιακή αύξηση και παραμόρφωση και εντός της οποίας παρατηρούνται παραμορφωμένοι αλλά μη-ανακρυσταλλομένη μικροδομή κόκκων, και τέλος η ζώνη HAZ στην οποία απλά προκύπτει μια αύξηση της θερμοκρασίας και η απώλεια μερικών σκληρυντικών συστατικών από την δομή των κόκκων της.

Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές συγκολλήσεων τήξης, η διαδικασία FSW παράγει κολλήσεις ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων, μεγαλύτερης αντοχής, ολκιμότητας, σκληρότητας καθώς και ανώτερου ορίου θραύσης και κόπωσης. Περισσότερο από 80% του κρίσιμου σημείου ελαστικότητας του μετάλλου βάσεως επιτυγχάνεται από την περιοχή συγκόλλησης FSW. Συνήθως η θραύση του δοκιμίου προέκυπτε στην περιοχή HAZ του κράματος αλουμινίου. Στις συγκολλήσεις χάλυβα η θραύση προέκυπτε συνήθως στο μέταλλο βάσης, ενώ η περιοχή συγκόλλησης υπερτερούσε απέναντί στο μέταλλο βάσης. Η αντοχή σε κόπωση που παρουσιάζει η περιοχή συγκόλλησης είναι χαμηλότερη από αυτή του μετάλλου βάσης, αλλά μεγαλύτερη από αυτή που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές τεχνικές συγκολλήσεων τήξης, όπως η τεχνική MIG και η τεχνική LASER. Αφού εξαλειφθούν όμως οι επιφανειακές ανωμαλίες από την συγκόλληση, το δοκίμιο παρουσιάζει βελτιωμένα επίπεδα αντοχής σε κόπωση, παρόμοια με αυτά του μετάλλου βάσεως.

Όσον αφορά την αντίσταση των κολλήσεων απέναντι στη διάβρωση, οι ερευνητές επί του παρόντος καταλήγουν σε αντικρουόμενα αποτελέσματα.

Πέρα από τα κράματα αλουμινίου, η διαδικασία FSW έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την συγκόλληση διαφορετικών υλικών, όπως ο χαλκός, το τιτάνιο, ο χάλυβας και το μαγνήσιο. Λόγω του υψηλού σημείου τήξεως αυτών των υλικών, το εύρος των παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιορίζεται αισθητά. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η προθέρμανση εργαλείου και υλικού έχει ωφέλιμα αποτελέσματα για την ποιότητα της κόλλησης.

Στηριζόμενη στις βασικές αρχές που διέπουν την διαδικασία συγκόλλησης FSW εξελίχθηκε η διαδικασία FSP για την μικροδομική μετατροπή των κολλήσεων FSW. Η διαδικασία FSP έχει πολλές εφαρμογές στην μετατροπή της μικροδομής μεταλλικών υλικών, ακόμα και στην μικροδομική ανανέωση για υπερπλαστικά υλικά τα οποία

καταπονούνται σε υψηλούς ρυθμούς, έχει βοηθήσει στην σύνθεση επιφανειακών στρωμάτων, ειδικών για την συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και έχει συμβάλει αρκετά στην ομογενοποίηση κραμάτων αλουμινίου, καθώς και κραμάτων χυτευμένου Al-Si στο νανοφασικό επίπεδο μεγέθους της μικροδομής τους.

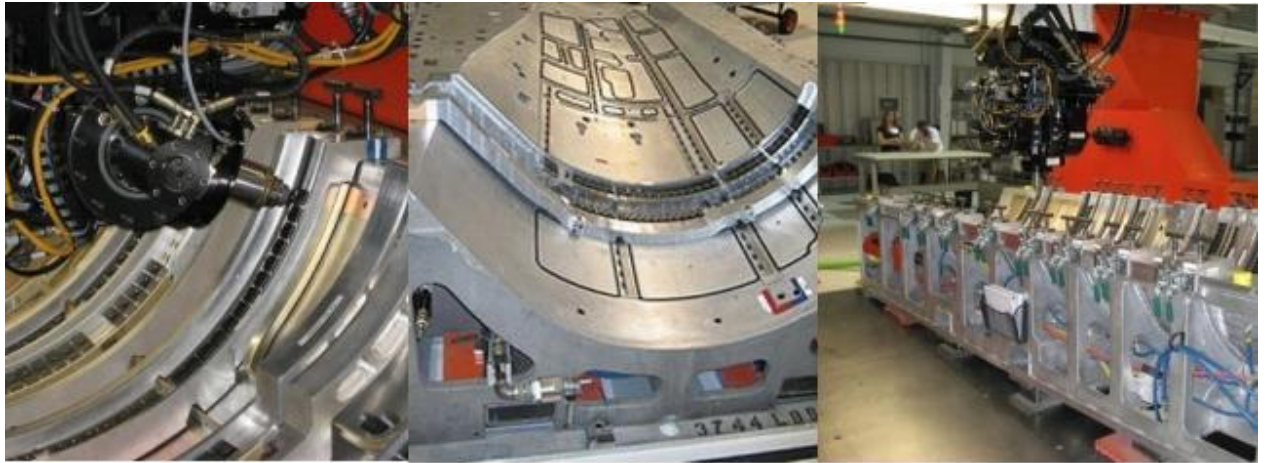
Πέρα από το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την διαδικασία FSW από την εφεύρεση της έως σήμερα, υπάρχουν ακόμα ελλείψεις στην κατανόηση της. Κάποιες πλευρές της διαδικασίας, όπως η ροή υλικού, η γεωμετρία του εργαλείου και η φθορά του, η μικροδομική σταθερότητα των προϊόντων, καθώς και η συγκόλληση διαφορετικών μετάλλων και υλικών, απαιτούν περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση τους.

Όπως δήλωσε ο Καθηγητής Thomas W. Eagar του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης "Μια νέα συγκολλητική τεχνολογία, συχνά εμπορευματοποιείται, πριν αναπτυχθεί η αρχική έμφαση στους νόμους της φυσικής που την διέπουν". Αυτό ισχύει για την διαδικασία FSW. Αν και έχουν περάσει μόλις 18 χρόνια από την εφεύρεση της στο Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (TWI), υπάρχουν ήδη πολλές επιτυχημένες εφαρμογές της στην βιομηχανία.

3.9 Εφαρμογές της διαδικασίας

3.9.1 Αεροδιαστημικές εφαρμογές

Είναι γνωστό ότι υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου, όπως τα κράματα των σειρών 2XXX και 7XXX χρησιμοποιούνται ευρέως στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, σε τομείς όπως τα πτερύγια και οι άτρακτοι. Δυστυχώς τέτοια υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου είναι δύσκολο να ενωθούν με τις συνήθεις τεχνικές συγκόλλησης τήξης, λόγω του φαινομένου της θερμής θραύσης κατά την συγκόλληση. Έτσι οι κατασκευαστές είναι αναγκασμένοι να κατασκευάζουν το μεγαλύτερο μέρος των αεροδιαστημικών δομών με την χρήση κοχλιών και πριτσινιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους της κατασκευής, και καθιστά την κατασκευή αρκετά πιο περίπλοκη. Η έλευση της διαδικασίας FSW δίνει την δυνατότητα στην αεροδιαστημική βιομηχανία να αλλάξει την παραδοσιακή προσέγγιση για την κατασκευή ελαφρών συναρμογών και να περιορίσει αρκετά το κόστος κατασκευής και σχεδιασμού. Η βιομηχανία αεροσκαφών Eclipse έφερε την επανάσταση στην αεροβιομηχανία, υιοθετώντας και εφαρμόζοντας την διαδικασία FSW για την κατασκευή συναρμογών στην άτρακτο και τον σκελετό του αεροσκάφους της Eclipse 500.



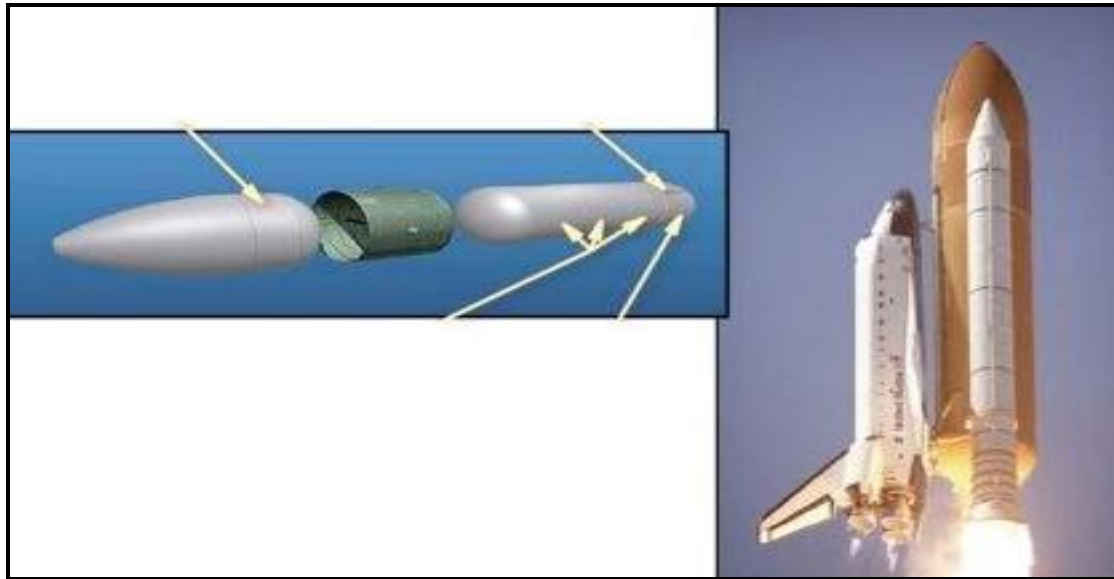
Μηχανή συγκόλλησης FSW της βιομηχανίας αεροσκαφών Eclipse [156]

Άλλες αξιοσημείωτες εφαρμογές της διαδικασίας FSW είναι η εφαρμογή της από την εταιρία Boeing για την κατασκευή των πυραυλικών δοχείων καυσίμων Delta, καθώς και για τις εσωτερικές συναρμογές του αεροσκάφους C17. Οι συνδυασμένες προσπάθειες των αεροδιαστημικών βιομηχανιών έχουν παράγει χιλιόμετρα συγκολλήσεων FSW για εμπορικούς σκοπούς, χωρίς προβλήματα έως και σήμερα.

Μια ακόμη εφαρμογή της διαδικασίας FSW που μαρτυρά την κατασκευαστική και ποιοτική ανωτερότητα των προϊόντων της είναι η εφαρμογή της από την NASA για την κατασκευή κάποιων ιδιαίτερα σημαντικών δομών των διαστημοπλοίων της, όπως τα εξωτερικά δοχεία καυσίμων και οι προωθητικοί πύραυλοι που έχουμε δει στο κάτω μέρος του διαστημικού λεωφορείου κατά την απογείωση του.

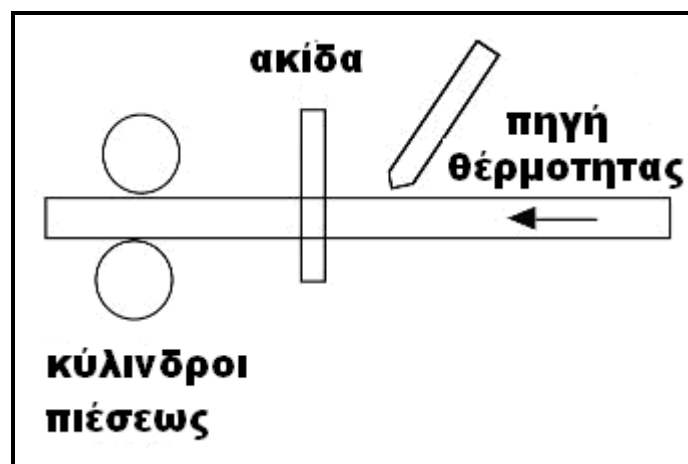


**Το δοχείο καυσίμων πυραύλου Falcon 9.
Διακρίνονται καθαρά οι ραφές της FSW [157]**



Εφαρμογή της διαδικασίας FSW σε δοχεία καυσίμων πυραύλων [157]

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί και η συμβολή της NASA στην περαιτέρω ανάπτυξη της διαδικασίας, αφού συνέβαλε σε αυτή με την ανακάλυψη μιας εξελιγμένης διαδικασίας FSW, την διαδικασία Thermal stir welding (TSW), η βασική διάταξη της οποίας φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



σχηματισμός της TSW [157]

Στην NASA είναι εγκατεστημένη και η μεγαλύτερη μηχανή συγκόλλησης FSW:



Η μηχανή βρίσκεται στο κέντρο διαστημικών πτήσεων Marshall[157]

3.9.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η διαδικασία FSW έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υψηλής αντοχής σασί αυτοκινήτων και χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή τροχών για αυτοκίνητα και όχι μόνο.



Αυτοκίνητο Ford GT 40. Για την κατασκευή του σασί του χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία FSW [158]



Μηχανή συγκόλλησης FSW τροχών αυτοκινήτου και



τα αποτελέσματα της [159]

3.9.3 Θωράκιση

Στις Η.Π.Α. το κράμα αλουμινίου 2519-T87 χρησιμοποιείται σαν το κύριο δομικό στοιχείο για την κατασκευή του κράματος θωράκισης 5083A1-H131 του άρματος AAVV λόγω της ανώτερης βαλλιστικής προστασίας που προσφέρει και της μεγάλης αντοχής του απέναντι στη διάβρωση.



Άρμα μάχης AAVV του αμερικανικού στρατού. Η θωράκιση του έχει συγκολληθεί με την μέθοδο FSW[160]

3.9.4 Ναυπήγηση

Οι δυνατότητες που προσφέρει η διαδικασία FSW για την παραγωγή μεγάλων συγκολληθέντων φύλλων μετάλλου, έδωσε στην βιομηχανία ναυπήγησης νέους ορίζοντες για την κατασκευή οικονομικότερων, γρηγορότερων και ποιοτικώς ανώτερων σκαφών.



Η καθέλκυση του αμερικανικού πολεμικού πλοίου Littoral Σεπτέμβριος 2006. Το κήτος του σκάφους έχει συγκολληθεί με την μέθοδο FSW[161]

Βιβλιογραφία

- [1] Θ.Α. Διαμαντούδης, Συγκολλήσεις μετάλλων Θεσσαλονίκη 2000,σελ.17
- [2] Τσίρκας Σωτήριος, Ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου υπολογισμού των στρεβλώσεων κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης που συγκολλούνται με Laser-Πάτρα Απρίλιος 2003,σελ.9
- [3] W.M. Thomaw, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent application No.9125978.8(December 1991),p54
- [4,8] W.W. Duley Laser Welding Interscience 1999,p211,148
- [5] Norris L.,Hoult T.,Peters C. et al 1992 Proceedings LAMP.p117
- [6] Tönshoff H.,K.Meyer,Kobbe C.,Beske E.1993 Proceedings ISATA'93,p162
- [7] Bea M.,Giesen A.,Hugel H.,1993 Prodeedings ISATA'93,p361
- [9] Steen W.M. 1991 Laser material processing Springer-Verlug New York ,p144
- [10] Dawes C.,1992 Laser welding, Mc Graw-Hill, New York,p246
- [11,13] Behler K.,Beyer E.,Schafer R. 1988 Proceedings ICALEO'88,p98,p201
- [12] Schulz W.,Behler K. 1989 Proceedings SPIE 1132 p166
- [14] Gagliano F.P.,Zaleckas V.J. 1972 Lasers in industry New Jersey,p139
- [15] Kitany Y.,Yasuda K.,Katakoo Y., 1995 Proceedings ICALEO'95,p514
- [16] Starzer M.,Ebner R.,Glatz W.,et al 1993 Proceedings ISATA'93,p131
- [17] Fukui K.,Uchihara M.,Takahashi M.,1996 Materials and body testing,p100
- [18,44] Duley W.W. 1994 Automotive body materials,p50,121
- [19] Albright C.E.,Hsu C.,Lund R.O.,1990 Proceedings ICALEO'90,p357
- [20] Wang P.C., Davidson S.,1992 Weld J.,p209
- [21] Wang P.C.,Ewing K.M.,1994 Weld J.,p176
- [22] Albright C.E.,Chiang S.,1988J.Laser Applcations,p18
- [23] Albright C.E.,Hsu C.,Lund R.O.,1990 Proceedings ICALEO'90,p145
- [24] Wang P.C.,Ewing K.M.,1994 Weld J.,p223
- [25] Carlson R.W.,Gregson V.G.,1986 Proceedings

- ICALEO'86,p211
- [26] Starzer M.,Ebner R.,Glatz W.,et al 1993 Proceedings ISATA'93,p212
- [27] Mazumder J.,Steen W.M.,1980 Metallic constructions;80,p423
- [28] Ion J.C.,Salminen A.,Sun Z., 1996 Weld,p225
- [29] Ion J.C.,Easterlink K.E.,Ashby M.F.,1984 Act.Metallic,p32
- [30] Martukanitz R.P.,Smtih D.J.,Armao F.G. 1994 SAE Tech Paper 940158
- [31] Metzbowyer E.A.Moon D.W. 1981 Proceedings LIM,p255
- [32] Grong O., Metallurgical modeling of Welding, Institute of metals, London
- [33] Kreytz E.W.,Ollier B.,Pirch N.,1992 Proceedings LAMP,Osaka,p353
- [34] Gilath I.,Signamargheix J.M.,Bensussan P.,1994 J.Atl.Sci,p358
- [35] Bobadilla M.,Lacaze J.,Lesoult G.,1988 Cryst Growth,p531
- [36,37,38] Vitek J.M.,David S.A. 1994 Proceedings Laser matl.,p153,187,112
- [39] Aoh J.N.,Kuo F.H.,Li Y.M. 1992 International trends in welding science'92,p649
- [40] Sakamoto H.,Shibata K.,Dausinger F. 1992 Proceedings ICALEO'92
- [41] Matsunawa A.,1992 Proceedings ICALEO;92,p719
- [42] Kinsman G.,Duley W.W.,1993 Proceedings ICALEO'93
- [43] Dausinger F.,Rapp J.,Beck M.,et al 1996 Laser applications,p285
- [45] Steen W.M. 1991 Laser material processing Springer-Verlug New York ,p313
- [46] Weiting T.J.,de Rosa J.L. 1979 Applications Physics,p1071
- [47] Steen W.M. 1991 Laser material processing Springer-Verlug New York ,p271
- [48] WillmottN.F.F.,Hibard R.,Steen W.M. 1988 Proceedings ICALEO'88,p109
- [49] Gluman C.,Rapp J.,Bea M.,et al 1993 Proceedings ISATA'93,p239
- [50] Arata Y. 1987 Proceedings LAMP'87,p3
- [51] Steen W.M.,Eboo M.,1979 Metallic construction'79,p332
- [52] Beyer E.,Dilthey U.,Imhoff R.,et al 1994 Proceedings ICALEO'94,p183
- [53] <http://www.nasa.gov/appl/lbw.html>
- [54] <http://www.mhi.co.jp/en/news/story/090202.html>
- [55] <http://www.flickr.com/photos/optilevers/113173768>

- [56] <http://www.flickr.com/photos/optilevers/113173769>
- [57] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, *Scripta Mater.* 36 (1997) 69.
- [58] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron, in: *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, 27–28 September, 2001.
- [59] H.B. Cary, *Modern Welding Technology*, Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
- [60] C.J. Dawes, W.M. Thomas, *Weld. J.* 75 (1996) 41.
- [61] R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, A.K. Mukherjee, *Scripta Mater.* 42 (2000) 163.
- [62] R.S. Mishra, M.W. Mahoney, *Mater. Sci. Forum* 357–359 (2001) 507.
- [63,66] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith, in: S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert (Eds.), *Aluminum 2001- Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions*, TMS, 2001, p. 213,327
- [64] W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner, *Adv. Eng. Mater.* 5 (2003) 485.
- [65] W.M. Thomas, R.E. Dolby, in: S.A. David, T. DebRoy, J.C. Lippold, H.B. Smartt, J.M. Vitek (Eds.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003, pp. 203–211.
- [67] *Materials Science and Engineering R* 50 (2005) 1–78
Friction stir welding and processing R.S. Mishra*, Z.Y. Maba
- [68] A.P. Reynolds, T.U. Seidel, M. Simonsen, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999.
- [69] T.U. Seidel, A.P. Reynolds, *Metall. Mater. Trans. A* 32 (2001) 2879.
- [70] A.P. Reynolds, *Sci. Technol. Weld. Joining* 5 (2000) 120.
- [71] K. Colligan, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999.
- [72] K. Colligan, *Weld. J.* 78 (1999) 229S–237S
- [73] K.N. Krishnan, *Mater. Sci. Eng. A* 327 (2002) 246
- [74] G. Biallas, R. Braun, C.D. Donne, G. Staniek, W.A. Kaysser, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999

- [75] L. Ke, L. Xing, J.E. Indacochea, *Joining of Advanced and Specialty Materials IV*, ASM International, Materials Park, USA, 2002, pp. 125–134
- [76] M.B. Stewart, G.P. Adamas, A.C. Nunes Jr., P. Romine, *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, Florida Atlantic University, USA, 1998, pp. 472–484
- [77] W.J. Arbegast, in: Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), *Hot Deformation of Aluminum Alloys III*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 313
- [78] S. Xu, X. Deng, A.P. Reynolds, T.U. Seidel, *Sci. Technol. Weld. Joining* 6 (2001) 191
- [79] P. Colegrove, H. Shercliff, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 13
- [80] M. Guerra, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Filed
- [81] C.B. Smith, G.B. Bendzsak, T.H. North, J.F. Hinrichs, J.S. Noruk, R.J. Heideman, *Ninth International Conference on Computer Technology in Welding*, Detroit, Michigan, USA, 28–30 September 1999, 2000, p. 475
- [82] W.J. Arbegast, in: Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), *Hot Deformation of Aluminum Alloys III*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 313
- [83] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure, *J. Mater. Sci.* 33 (1998) 1243
- [84] Y.J. Kwon, N. Saito, I. Shigematsu, *J. Mater. Sci. Lett.* 21 (2002) 1473
- [85] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, *Scripta Mater.* 36 (1997)p69
- [86] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan, *Metall. Mater. Trans. A* 30 (1999) 2429
- [87] M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel, *Metall. Mater. Trans. A* 29 (1998) 1955
- [88] W. Tang, X. Guo, J.C. McClure, L.E. Murr, *J. Mater. Process. Manufact. Sci.* 7 (1998) 163
- [89] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 12 (2004) 143
- [90] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, *Scripta Mater.* 41 (1999) 809
- [91] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, *Mater. Sci. Eng. A* 271 (1999) 213
- [92] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, *Acta Mater.* 50

- (2002) 4419
- [93] Y.J. Kwon, N. Saito, I. Shigematsu, *J. Mater. Sci. Lett.* 21 (2002) 1473
- [94] B. Heinz, B. Skrotzki, *Metall. Mater. Trans. B* 33 (6) (2002) 489
- [95] M. James, M. Mahoney, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999.
- [96] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, 2003, pp. 221–230.
- [97] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, *Mater. Res. Innovat.* 2 (1998) 150
- [98] B. Heinz, B. Skrotzki, *Metall. Mater. Trans. B* 33 (6) (2002) 489
- [99] Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, *Scripta Mater.* 49 (2003) 785
- [100] P.S. Pao, E. Lee, C.R. Feng, H.N. Jones, D.W. Moon, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 113.
- [101] Y. Hovanski, T.W. Nelson, D.P. Field, in: *Proceedings from Joining of Advanced and Specialty Materials*, St. Louis, MO, October 9–11, ASM International, 2000, p. 167.
- [102] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan, T. Hashimoto, *Metall. Mater. Trans. A* 30 (1999) 3125.
- [103] D.L. Zhang, L. Zheng, *Metall. Mater. Trans. A* 27 (1996) 3983
- [104] L.E. Svesson, L. Karlsson, H. Larsson, B. Karlsson, M. Fazzini, J. Karlsson, *Sci. Technol. Weld. Joining* 5 (2000) 285.
- [105] B.J. Dracup, W.J. Arbegast, in: *Proceedings of the 1999 SAE Aerospace Automated Fastening Conference & Exposition*, Memphis, TN, October 5–7, 1999.
- [106] M.G. Dawes, S.A. Karger, T.L. Dickerson, J. Przydatek, in: *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000
- [107] A. von Strombeck, J.F. dos Santos, F. Torster, P. Laureano, M. Kocak, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999

- [108] P.S. Pao, S.J. Gill, C.R. Feng, K.K. Sankaran, *Scripta Mater.* 45 (2001) 605
- [109] R.S. Mishra, S.R. Sharma, N.A. Mara, M.W. Mahoney, in: *Proceedings of the International Conference on Joining of Advanced and Specialty Materials III*, ASM International, 2000, p. 157
- [110] K.V. Jata, K.K. Sankaran, J.J. Ruschau, *Metall. Mater. Trans. A* 31 (2000) 2181
- [111] C.D. Donne, G. Biallas, T. Ghidini, G. Raimbeaux, in: *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000
- [112] H. Hori, S. Makita, H. Hino, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999
- [113] L. Magnusson, L. Kallman, in: *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000
- [114] R. Braun, G. Biallas, C.D. Donne, G. Staniek, in: P.J. Winkler (Ed.), *Materials for Transportation Technology EUROMAT'99*, vol. 1, Wiley/VCH, 1999, pp. 150–155
- [115] A. Denquin, D. Allehaux, M.H. Campagnac, G. Lapasset, *Mater. Sci. Forum* 3 (402) (2002) 1199.
- [116] M. Kumagai, S. Tanaka, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999. R.S. Mishra, Z.Y. Ma / *Materials Science and Engineering R* 50 (2005) 1–78
- [117] G. Bussu, P.E. Irving, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999
- [118] E. Hornborg, E.A. Starke Jr., *Acta Metall. Mater.* 41 (1993)
- [119] K.V. Jata, E.A. Starke Jr., *Metall. Trans. A* 17 (1986) 1011
- [120] J. Gurland, *Plateau, Trans. ASM* 56 (1963) 442
- [121] G.S. Frankel, Z. Xia, *Corrosion* 55 (1999) 139
- [122] J. Corral, E.A. Trillo, Y. Li, L.E. Murr, *J. Mater. Sci. Lett.* 19 (2000) 2117
- [123] Y.S. Sato, S.H.C. Park, H. Kokawa, *Metall. Mater. Trans. A* 32 (2001) 3023
- [124] E.I. Meletis, P. Gupta, F. Nave, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 107.
- [125] J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, G. Pollock, C.G. Rhodes,

- Corrosion 55 (1999) 1127
- [126] J. Lumsden, G. Pollock, M. Mahoney, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), Friction Stir Welding and Processing II, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 99.
- [127] C.G. Andersson, R.E. Andrews, in: Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June, 1999.
- [128] H.S. Park, T.K. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata, M. Ushio, Microstructure and mechanical properties of Friction stir welds of 60%Cu–40%Zn copper alloy, Mater. Sci. Eng. A 371 (2004) 160–169
- [129] C.G. Andersson, R.E. Andrews, B.G.I. Dance, M.J. Russell, E.J. Olden, R.M. Sanderson, in: Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 2000.
- [130] K. Okamoto, M. Doi, S. Hirano, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono, T.C. Ping, in: Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, September 27–28, 2001
- [131] W.A. Baeslack, D.W. Becker, F.H. Froes, J. Met. 5 (1984) 46
- [132] M.C. Juhas, G.B. Viswanathan, H.L. Fraser, in: Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 2000
- [133] Occupational Safety and Health Administration, Occupational Exposure to Hexavalent Chromium, OSHA RIN: 1218AB45, 2001
- [134] W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas, Sci. Tech. Weld. Joining 4 (1999) 365
- [135] T.J. Lienert, W.L. Stellwag Jr., B.B. Grimmett, R.M. Warke, Weld. J. 82 (1) (2003) 1s
- [136] R.H. Bricknell, J.W. Edington, Acta Metall. A 22 (1991)2809
- [137] ASM Handbook, vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, USA, 1995, p. 1097
- [138] M. Posada, J. Deloach, A.P. Reynolds, J.P. Halpin, in: S.A. David, T. DebRoy, J.C. Lippold, H.B. Smartt, J.M. Vitek (Eds.), Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003, pp. 307–312
- [139] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki, Scripta Mater. 49 (2003) 1175
- [140] P.J. Konkol, J.A. Mathers, R. Johnson, J.R. Pickens, in: Proceedings of the Third International Symposium on Friction

- Stir Welding, Kobe, Japan, September 2001
- [141] A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada, J. Deloach, *Sci. Technol. Weld. Joining* 8 (6) (2003) 455
- [142] C.J. Sterling, T.W. Nelson, C.D. Sorensen, R.J. Steel, S.M. Packer, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS, 2003, pp. 165–171
- [143] T.J. Lienert, J.E. Gould, in: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 1999
- [144] *ASM Special Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International, 1999, pp. 106–118
- [145] R. Johnson, *Mater. Sci. Forum* 419–422 (2003) 365
- [146] K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano, T. Hashimoto, S. Johgan, M. Ushio, in: *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, September 27–28, 2001
- [147] W.B. Lee, J.W. Kim, Y.M. Yeon, S.B. Jung, *Mater. Trans.* 44 (2003) 917
- [148] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, in: S.A. David, T. DebRoy, J.C. Lippold, H.B. Smartt, J.M. Vitek (Eds.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003, p. 267.
- [149] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, *Scripta Mater.* 49 (2003) 161
- [150] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, J.C. McClure, *Mater. Res. Innovat.* 2 (1998) 150
- [151] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, J.C. McClure, *Mater. Res. Innovat.* 2 (1998) 150
- [152] R.J. Lederich, J.A. Baumann, P.A. Oelgoetz, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Field (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p. 71
- [153] H. Larsson, L. Karlsson, S. Stoltz, E.L. Bergqvist, in: *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000
- [154] J.A. Wert, *Scripta Mater.* 49 (2003) 607
- [155] K.N. Krishnan, in: *Proceedings of the International Conference on Welding*, New Delhi, India, February 15–17, 2001
- [156] www.eclipseaviation.com/#/eclipse500/

- [157] Image credit: NASA/MSFC/E. Given
- [158] <http://www.nlresearch.com/>
- [159] http://www.nasa.gov/topics/nasalife/friction_stir.html
- [160] G. Campbell, T. Stotler, Weld. J. 78 (1999) 45
- [161] Chris Smith, Friction Stir Link, Inc. September 2006