

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Με θέμα:

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΣΑΒΒΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΩΤΗΡΙΟΣ Α. ΤΣΙΡΚΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «Μελέτη Συγκόλλησης Τριβής Κραμάτων Αλουμινίου Και Κατασκευή Εργαλείου Συγκόλλησης» εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μας στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών τ.ε του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στα χαρακτηριστικά της μεθόδου συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης, στις απαιτήσεις αυτής, στα προϊόντα που αυτή παράγει καθώς και στο σχεδιασμό του κοπτικού εργαλείου που είναι απαραίτητο για την εφαρμογή της.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον **Δρ. Τσίρκα Σωτήριο**, επιβλέποντα της εργασίας για την πολύτιμη βοήθεια του στην ολοκλήρωση της και τις κατευθυντήριες οδηγίες που μας έδωσε.

Ευάγγελος Καρακώστας
Σάββας Ιωαννίδης
Πάτρα 2017

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Καρακώστας Ευάγγελος

Ιωαννίδης Σάββας

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή σε μια σύγχρονη μέθοδο συγκόλλησης και πιο συγκεκριμένα στην τεχνική «συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης» (Friction Stir Welding-FSW). Στο περιεχόμενο της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται οι θεωρητικές αρχές που διέπουν την συγκεκριμένη μέθοδο, τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής καθώς και ο σχεδιασμός του κατάλληλου εργαλείου για την πραγματοποίηση αυτής.

Στις μέρες μας η μέθοδος που μελετάται θεωρείται το μέλλον των συγκολλήσεων, όσον αφορά τις εφαρμογές τους στη βαριά βιομηχανία, είναι μια από τις πιο αξιόπιστες και τεχνολογικά εξειδικευμένες στον τομέα των συγκολλήσεων. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τόσο βαριές όσο και υψηλής ποιότητας κατασκευές. Στην Ελλάδα η χρήση αυτής της τεχνικής είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Πιο συγκεκριμένα, την τεχνική την συναντάμε στους εξής τομείς της αεροναυπηγικής, αεροδιαστημικής, ναυπηγικής και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αποτέλεσμα της εφαρμογής της στους προαναφερθέντες τομείς είναι η αύξηση της ποιότητας των συγκολλήσεων των προϊόντων τους, σε σχέση με τις ευρέως διαδεδομένες τεχνικές συγκόλλησης.

Η παρουσίαση της εξεταζόμενης μεθόδου γίνεται σε τέσσερα κεφάλαια. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των συγκολλήσεων, τονίζονται οι σημαντικότεροι σταθμοί στην πορεία της εξέλιξης τους και απαριθμούνται οι διαδικασίες σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους.

Δευτερευόντως, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνική συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης, ευρέως γνωστή ως friction stir welding. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά που την διέπουν, η διαδικασία που ακολουθείται για την επίτευξη της καθώς και οι σημαντικότερες εφαρμογές της παραπάνω μεθόδου στη βιομηχανία.

Στο τρίτο κεφάλαιο υπάρχει εκτενής αναφορά για τον σχεδιασμό του κατάλληλου εργαλείου (ακίδα) για την επίτευξη αυτής.

Εν συνεχεία, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του κατάλληλου εργαλείου (ακίδας).

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, στον επίλογο θα αναφερθούν εν συντομία τα συμπεράσματα της σχετικά με την μέθοδο συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης και την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε πως η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί έρευνα που βασίστηκε μόνο σε ξενόγλωσση βιβλιογραφία, διότι η ελληνική βιβλιογραφία που σχετίζεται με το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι ελλιπής και περιορισμένη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος Περίληψη Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Η ιστορία των συγκολλήσεων.....	5
1.2 Ταξινόμηση συγκολλήσεων.....	5
1.3.1 Άμεσες συγκολλήσεις.....	6
1.3.2 Αυτογενείς συγκολλήσεις.....	6
1.3.3 Ετερογενείς συγκολλήσεις.....	6

Κεφάλαιο 2: Συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης

2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Ορισμός.....	7
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης.....	8
2.4 Παράμετροι συγκόλλησης	9
2.5 Μεταλλική ροή	9
2.6 Κατανομή θερμοκρασίας.....	12
2.7 Μικροδομή υλικού συγκόλλησης.....	16
2.7.1.1 Ζώνη Ανάδευσης.....	16
2.7.1.1α Σχήμα ζώνης ανάδευσης	17
2.7.1.1β Μέγεθος και σχήμα κόκκων.....	18
2.7.1.1γ Υφή Μικροδομής.....	20
2.7.1.2 Ζώνη Θερμομηχανικής Επιρροής (TMAZ-Thermo Mechanical Affect Zone).....	20
2.7.1.3 Ζώνη Θερμικής Επιρροής (HAS-Heat affected zone).....	21
2.7.2 Μηχανικές ιδιότητες.....	22
2.7.3 Αντοχή σε κόπωση.....	25
2.7.4 Θραύση.....	27
2.7.5 Διάβρωση.....	29
2.7.6 Εφαρμογές της FSW.....	32

Κεφάλαιο 3: Έρευνα πριν τον σχεδιασμό ακίδας εργαλείου

3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Τύποι εργαλείων.....	35
3.3 Σχήματα εργαλείων.....	36
3.3.1 Σχήματα Ωμων.....	36
3.3.2 Σχήματα Προεξοχής/Ακίδας.....	38
3.4 Διαστάσεις Εργαλείου.....	44
3.5 Υλικά εργαλείων.....	46
3.6 Φθορά του εργαλείου.....	50

Κεφάλαιο 4: Σχεδιασμός εργαλείου

4.1 Κράμα αλουμινίου AA2219.....	53
4.1.1 Σχεδιασμός πρώτου κοπτικού εργαλείου στο Solidworks.....	53
4.1.2 Σχέδιο δεύτερου κοπτικού εργαλείου.....	60
4.1.3 Σχέδιο τρίτου κοπτικού εργαλείου.....	60
4.1.4 Σχέδιο τέταρτου κοπτικού εργαλείου.....	62
4.2 Κράμα αλουμινίου AA2024-T351	66

Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα της ενασχόλησης με την μέθοδο συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης

Βιβλιογραφία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ιστορία των συγκολλήσεων

Η συγκόλληση συγκαταλέγεται ανάμεσα στις θερμικές διαδικασίες των μετάλλων. Από αρχαιοτάτων χρόνων παρατηρούμε την επαφή του ανθρώπου και την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της θερμότητας στα μέταλλα. Ωστόσο, από τον 19^ο αιώνα και μετά κατάφερε να αναπτύξει μεθόδους συγκόλλησης μετάλλων.

Παρακάτω αναφέρουμε έναν χρονολογικό κατάλογο των τεχνικών συγκολλήσεων από την αρχή του 19^{ου} αιώνα:

- Ø **1820**: Κατασκευή καυστήρα υδρογόνου-οξυγόνου από τον N.Broke.
- Ø **1836**: Ανακάλυψη ασετιλίνης, καθορισμός ιδιοτήτων της και εκμετάλλευση της από τον A.Davy.
- Ø **1850**: Ανακάλυψη καυστήρα φωταερίου από τον Sainte Claiive Devuse.
- Ø **1877**: Ανακάλυψη μεθόδου, κατασκευή μηχανημάτων για τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση από τον M.Tomson.
- Ø **1890**: Χρήση της ενέργειας του ηλεκτρικού τόξου μεταξύ τηκόμενου μεταλλικού ηλεκτροδίου και βασικού μετάλλου για τη συγκόλληση από τον N.Σλοβιάνοφ.
- Ø **1899**: Μελέτη και χρήση του θερμίτη στις συγκολλήσεις από τον N.Goldschmidt.
- Ø **1901**: Δημιουργία πρώτου καυστήρα ασετιλίνης-οξυγόνου από τον N.Picard.
- Ø **1926**: Δημιουργία μεθόδου συγκόλλησης TIG(GTA) από τους H.M.Hobert και P.K.Devers.
- Ø **1926**: Δημιουργία μεθόδου MIG(GMA) από τον Alexander.
- Ø **1957**: Ανάπτυξη και χρήση μεθόδου της δέσμης ηλεκτρονίων στις συγκολλήσεις από τον W.A.Stohr.
- Ø **1961**: Χρήση μεθόδου Laser στις συγκολλήσεις από τους C.H.Thones, L.Maiman και Ali Javan.
- Ø **1991**: Κατασκευή και επίτευξη μεθόδου συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης από το TWI Cambridge (Αγγλία).

1.2 Ταξινόμηση συγκολλήσεων

Κάθε μέθοδος συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα την σύνδεση δύο μετάλλων. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι συγκόλλησης οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις ιδιότητες, την ποιότητα και την αντοχή του κάθε αποτελέσματος.

Οι μέθοδοι συγκόλλησης διακρίνονται σε: άμεσες, αυτογενείς και ετερογενείς.

1.3.1 Άμεσες συγκολλήσεις

Ως άμεσες ορίζουμε τις συγκολλήσεις που γίνονται με τη θέρμανση των προς συγκόλληση μετάλλων σε θερμοκρασία χαμηλότερη της τήξης τους έως να καταστεί εύπλαστο το μέταλλο. Η μέθοδος αυτή συγκόλλησης απαιτεί πίεση ή σφυρηλασία για την ένωση των δυο υλικών.

1.3.2 Αυτογενείς συγκολλήσεις

Αυτογενείς ονομάζουμε τις συγκολλήσεις που επιτυγχάνονται με την θέρμανση των μετάλλων προς συγκόλληση μέχρι την τήξη τους και με την προσθήκη ή μη προσθέτου αυτογενούς μετάλλου. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε σύντηξη του βασικού μετάλλου με το εναποτιθέμενο υλικό. Ως εναποτιθέμενο υλικό ορίζουμε αυτό το οποίο προέρχεται από το πρόσθετο υλικό (του ηλεκτρόδιου) και σχηματίζει την κόλληση της σύνδεσης.

1.3.3 Ετερογενείς συγκολλήσεις

Ονομάζουμε τις συγκολλήσεις που γίνονται με τη βοήθεια ευτηκτότερου υλικού άλλης χημικής σύστασης. Οι συγκολλήσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως όχι τόσο ισχυρές συγκολλήσεις και διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές.

Στις μαλακές έχουμε χρήση κασσίτερου και η θερμοκρασία θέρμανσης δεν υπερβαίνει τους 400-500° C. Αντίθετα, στις σκληρές γίνεται χρήση μπρούτζου ή ασημιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ

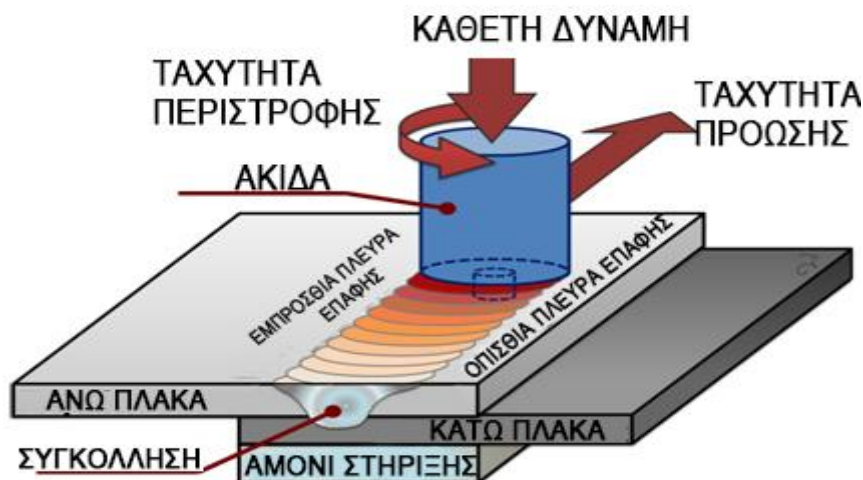
2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία θα εξετασθεί η γνώση η οποία έχει συγκεντρωθεί σχετικά με την συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης (FSW) σε κράματα αλουμινίου, από την επινόηση της το 1991[1,2] έως σήμερα. Επίσης θα αναλυθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία συγκόλλησης, την μικροδομή του υλικού πριν και μετά την συγκόλληση καθώς και την πιθανότητα η διαδικασία να δημιουργήσει ελαττώματα στην μικροδομή του υλικού. Έπειτα θα αναλυθούν εκτενώς οι παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν την συγκόλληση, η μεταλλική ροή γύρω από το εργαλείο της συγκόλλησης, η κατανομή θερμοκρασίας στο υλικό καθώς επίσης και η μεταβολή της μικροδομής κατά την διαδικασία για δύο κατηγορίες κράματος αλουμινίου (μη-θερμοκατεργάσιμο και θερμοκατεργασμένο)[3]. Τέλος, θα παρουσιαστεί το φάσμα των μηχανικών ιδιοτήτων που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της διαδικασίας αυτή και της εξέτασης του υπολείμματος της κατεργασίας (απόβλητο ή γρέζι), της κόπωσης και της διάβρωσης.

2.2 Ορισμός

Η βασική αρχή της διαδικασίας της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Welding) είναι ιδιαίτερα απλή, χρησιμοποιώντας ένα αναλώσιμο ειδικά διαμορφωμένο περιστρεφόμενο εργαλείο που εισέρχεται στις πλευρές των κομματιών που πρόκειται να συγκολληθούν. Ο σκοπός του εργαλείου αυτού είναι αρχικά να αυξήσει τη θερμοκρασία τοπικά στο κατεργασμένο κομμάτι και να μεταφέρει υλικό από την μία πλευρά στην άλλη δημιουργώντας μια συνεχή και ομοιόμορφη συγκόλληση.

Παρακάτω δίνεται το σχήμα (Σχήμα 2.1) που παρουσιάζει την κατεργασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης:



Σχήμα 2.1: Κατεργασία συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης

Πιο αναλυτικά, η τοπική θέρμανση επιτυγχάνεται από την τριβή που δημιουργεί το περιστρεφόμενο εργαλείο με την επιφάνεια του κατεργασμένου υλικού. Η θέρμανση αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία του μετάλλου κάνοντας το εύπλαστο και με την περιστροφή του ειδικού εργαλείου παρασύρεται υλικό από τη μία πλευρά της πλάκας (μπροστινή) στην άλλη (οπίσθια). Αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς κίνησης είναι η δημιουργία μίας συγκόλλησης «ενιαίου υλικού».[5-9]

Η κίνηση του εύπλαστου υλικού γύρω από το εργαλείο είναι σύνθετη, γι' αυτό είναι απαραίτητος ο κατάλληλος σχεδιασμός της γεωμετρίας του. Η παραπάνω διαδικασία επηρεάζει άμεσα την μικροδομή του υλικού. Παράλληλα, αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας είναι η έντονη πλαστική παραμόρφωση, κατά την διαδικασία της ανακρυσταλλοποίησης των κόκκων του υλικού. Παρόλη τη θερμική μεταβολή που υφίσταται το υλικό και τις έντονες τάσεις που δέχεται κατά τη διεργασία, η νέα ανακρυσταλλοποιημένη μορφή των κόκκων παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες.[10-29]

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης συνοψίζονται ως εξής. Αρχικά, η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος κραμάτων υλικών και ιδιαίτερα του αλουμινίου και να αποφεύγει προβλήματα όπως πυρόλυση, πορώτητα και απώλεια υλικού, τα οποία εμφανίζονται συχνά σε συγκολλήσεις αλουμινίου. Επίσης, είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και δεν εξαρτάται από εξειδικευμένες δεξιότητες συγκόλλησης, γιατί είναι σπάνια ως και αδύνατη η χειροκίνητη παρέμβαση. Παράλληλα, δεν θεωρείται απαραίτητη η παρουσία αερίου θωράκισης ή σύρμα πλήρωσης, τα οποία συναντώνται συχνά σε άλλης μορφής συγκολλήσεις αλουμινίου. Επιπροσθέτως, η απουσία τήξης αφαιρεί ένα μεγάλο μέρος θερμικής συστολής που σχετίζεται με την στερεοποίηση και την ψύξη οδηγώντας σε σημαντικές παραμορφώσεις.

Τα πλεονεκτήματα της FSW δεν περιορίζονται μόνο στα παραπάνω. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις, σε πολύ σύνθετες γεωμετρίες συγκόλλησης και μπορούν να συγκολληθούν υλικά σε οποιαδήποτε θέση και σχηματισμό. Επιπλέον, προσφέρει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες που ανταγωνίζονται τις συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται με άλλες μεθόδους. Παράλληλα, θεωρείται φιλική προς το χώρο εργασίας, διότι δεν παρατηρούνται κίνδυνοι σε έκθεση από υπεριώδη ή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η διαδικασία είναι σχετικά αθόρυβη εν συγκρίσει με άλλες ίδιες ισχύος και τέλος παράγει μηδενικές αναθυμιάσεις ή άλλους ρύπους. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνική αυτή από ενεργειακή άποψη κατατάσσεται ανάμεσα στη συγκόλληση με λείζερ, η οποία απαιτεί ελάχιστη ενέργεια και στη συγκόλληση με αδρανές αέριο (MIG), η οποία χαρακτηρίζεται ως υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης διαδικασία. Στην περίπτωση υλικών με μεγάλο πάχος η συγκόλληση FSW μπορεί να επιτευχθεί με ένα και μοναδικό πέρασμα, εν αντιθέσει με τις άλλες τεχνικές που απαιτούν πολλαπλά περάσματα και έχει ως αποτέλεσμα υψηλά ποσοστά πλήρωσης ακόμη και αν οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι μικρότερες. Τέλος, από οικονομικής άποψης η διαδικασία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον αφού μειώνει δραστικά το κόστος συγκόλλησης, καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί από έναν απλό χειριστή μηχανής και η αποδοτική κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από το μέγεθος της υποκειμενικής συγκόλλησης [80].

Ωστόσο, παρά την πληθώρα των θετικών πτυχών της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης υπάρχει και μια λίστα μειονεκτημάτων. Καταρχάς, η απουσία σύρματος

πληρώσεως σημαίνει ότι η διαδικασία δεν μπορεί με ευκολία να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή συγκολλήσεων φιλέτου. Επίσης, η πλήρως αυτοματοποιημένη φύση της διαδικασίας εμποδίζει την εφαρμογή της σε χώρους όπου η πρόσβαση σε πολύπλοκα συστήματα είναι περιορισμένη. Ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα θεωρείται η παρουσία οπής στο τέλος της συγκόλλησης μετά την έξοδο του κατάλληλου εργαλείου (ακίδας). Παρόλα αυτά, έχουν ανακαλυφθεί τρόποι για την εξάλειψη του προαναφερθέντος μειονεκτήματος [81].

Η παρουσία δυνάμεων κατά την κατεργασία καθώς και η έντονη αλλαγή διεύθυνσης αυτών, καθιστούν απαραίτητο τον καλό σχεδιασμό τρόπων πρόσδεσης των κομματιών που πρόκειται να συγκολληθούν.

2.4 Παράμετροι συγκόλλησης

Αρκετοί παράμετροι καθορίζουν τη διαδικασία της FSW και είναι οι εξής. Αρχικά, ο ρυθμός περιστροφής εργαλείου ω (rpm), η φορά περιστροφής αυτού και η ταχύτητα κίνησης v (mm/min) του στον διαμήκη άξονα [74,99-102]. Παράλληλα, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η γωνία εμπλοκής του εργαλείου με το κατεργαζόμενο κομμάτι [101-106]. Η σωστή εμπλοκή εξασφαλίζει την σωστή απομόνωση του ρευστοποιημένου υλικού κάτω από την πατούρα (κοιλότητα) του εργαλείου και την μετακίνηση του από το εμπρόσθιο μέρος της ακίδας στο οπίσθιο [107-109]. Το βάθος διείσδυσης της ακίδας είναι εξίσου σημαντικό και καθορίζεται από συγκεκριμένους κανόνες. Συγκεκριμένα, όταν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη από την απαιτούμενη η λειτουργία της πατούρας ακυρώνεται και έχει ως αποτέλεσμα την μη ισορροπημένη ανάμιξη υλικού εμπρός και πίσω της ακίδας. Αντίθετα, αν το βάθος είναι μεγαλύτερο παρουσιάζεται αυλάκωση στην επιφάνεια του υλικού κατεργασίας και δημιουργείται η πιθανότητα η ακίδα να ακουμπά στον πάτο συγκράτησης του υλικού [109].

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι υλικά με υψηλό σημείο τήξεως, όπως για παράδειγμα ασάλι και τιτάνιο, καθώς και υλικά με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χαλκός, απαιτούν προθέρμανση πριν τη συγκόλληση αφού υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η θερμότητα που παράγεται από την συγκόλληση να μην είναι επαρκής. Η προθέρμανση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την πιο εύκολη ροή υλικού γύρω από την ακίδα.

Αντίθετα, υλικά με χαμηλό σημείο τήξης (μαγνήσιο και αλουμίνιο) απαιτούν ψύξη για τον περιορισμό της ανακρυστάλλωσης καθώς και της ζώνης ανάδευσης.[110]

2.5 Μεταλλική ροή

Η ροή του υλικού (ρευστοποιημένο μέταλλο) κατά τη διάρκεια της FSW είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Θα μπορούσαμε όμως γενικά να πούμε ότι εξετάται α) από τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, β) τις παραμέτρους που επηρεάζουν την συγκόλληση και γ) το υλικό το οποίο θέλουμε να συγκολλήσουμε. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πως η ροή κάθε υλικού είναι χαρακτηριστικό του βέλτιστου σχεδιασμού κάθε εργαλείου και την παραγωγή υψηλής ποιότητας συγκολλήσεων. Εξαιτίας αυτών των απαιτήσεων οι ερευνητές επινόησαν διάφορες τεχνικές πειραματικής παρατήρησης και καταγραφής της μεταλλικής ροής κατά τη

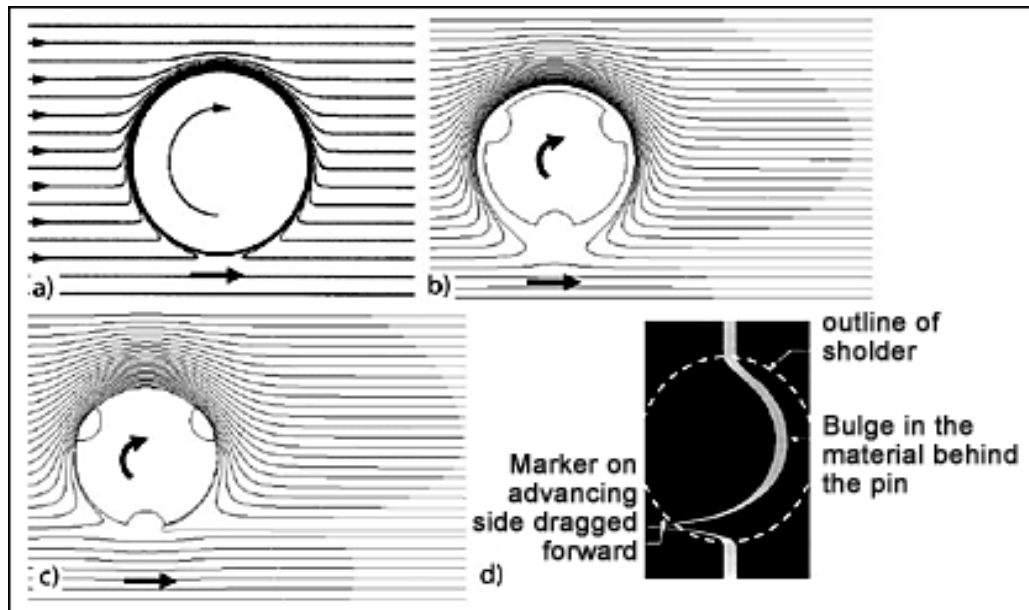
διάρκεια της FSW. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σε κάθε πρακτική εφαρμογή της προαναφερθείσας διαδικασίας με διαφορετικό τόσο υλικό όσο και εργαλείο, τα συμπεράσματα που προκύπτουν δεν μπορούν να γενικευτούν και να θεωρηθούν κανόνες που ισχύουν σε μελλοντικές εφαρμογές [111].

Η διαδικασία της ροής ακολουθεί διάφορα στάδια. Η μεταλλική ροή και η παραγωγή θερμότητας λόγω της τριβής κάνουν εύπλαστο το μέταλλο γύρω από την ακίδα του εργαλείου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται υλικό που αναδιανέμεται γύρω από την ακίδα του εργαλείου δημιουργώντας έτσι πεδία υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα η παραμόρφωση του υλικού αλλά και η θέρμανση δημιουργούν θερμοκρασιακά πεδία γύρω από την ακίδα του εργαλείου. Στην πραγματικότητα, ο έλεγχος της θερμότητας που παράγεται μεταξύ καθορισμένων ορίων θερμοκρασίας (όχι υψηλότερες από την θερμοκρασία τήξης του υλικού βάσης) αλλά και της παραμονής της θερμότητας στο κέντρο της συγκόλλησης αποτελούν τον πυρήνα της επιτυχίας της FSW. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την αποτροπή ελαττωμάτων είναι η βελτιστοποίηση των ταχυτήτων της διαδικασίας και της κάθετης δύναμης της μηχανής, την εξέλιξη της μικροδομής και τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων της συγκόλλησης.

Όπως προαναφέρθηκε σχεδόν όλο το υλικό της συγκόλλησης εξωθείται μεταξύ της περιστρεφόμενης ακίδας στις πλευρές που πρόκειται να συγκολληθούν. Στην απλούστερη μορφή του, ο βασικός μηχανισμός ροής μπορεί να απεικονισθεί με δισδιάστατη προσομοίωση που απεικονίζει ροϊκές γραμμές γύρω από την περιστρεφόμενη ακίδα σε μια σταθερή ροή υλικού.

Παρακάτω παρατίθεται σχήμα που αναφέρει περιπτώσεις μεταλλικών ροών. Συγκεκριμένα στο σχήμα 3(a) παρουσιάζεται μια τυπική ροή μετάλλου γύρω από μια ακίδα, η οποία περιστρέφεται δεξιόστροφα και με διεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά. Μια διαμήκης ραφή συγκόλλησης σχηματίζεται πίσω από την προωθημένη άκρη του εργαλείου, όπου οι δύο ροές συγκλείνουν. Περαιτέρω μελέτες και πειράματα μοντελοποίησης έχουν διερευνήσει πώς οι δύο ροές επηρεάζονται από την προσθήκη χαρακτηριστικών στην ακίδα, όπως εγκοπές, αυλακώσεις και σπειρώματα καθώς και αλλαγές στις συνθήκες επαφής μεταξύ του εργαλείου και του κατεργασμένου υλικού από τριβή συγκόλλησης σε τριβή ολίσθησης σε χαμηλότερη διεπιφανειακή διατμητική τάση.

Οι προβλεπόμενες γραμμές ροής γύρω από ένα εργαλείο φαίνονται στο σχήμα 3(b) και (c) [112]. Η στενή επαφή μεταξύ της επιφάνειας του εργαλείου με την κίνηση του ρευστοποιημένου μετάλλου δημιουργεί μια νεκρή ζώνη μετάλλου γύρω από το εργαλείο, ενώ η ροή αλληλοεπιδρά στενά με τα χαρακτηριστικά του εργαλείου όταν η ολίσθηση λαμβάνει χώρα [113]. Ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της επίδρασης του εργαλείου είναι η αναλογία του όγκου εμβολισμού προς τον όγκο ακίδας [113-115]. Παρακάτω δίνεται δισδιάστατη απεικόνιση των ροών (Σχήμα 2.2):



Σχήμα 2.2: α) τυπική ροή γύρω από κυκλικής διατομής ακίδα περιστρεφόμενη δεξιόστροφα με διεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά απεικονισμένη σε CFD, β, γ) επιρροή από διεπιφανειακή οριακή κατάσταση (β κόλληση-γ ολίσθηση) σε προβλεπόμενη ροή γύρω από κυκλική διατομή με εγκοπές απεικονισμένη σε CFD δ) πείραμα μεταλλογραφικής σημείωσης με χρήση εγκάρσιου φύλλου χαλκού και παρουσιάζει την ροή που προκαλεί η ακίδα [113].

Για να μελετηθεί η ροή του υλικού χρησιμοποιείται η τεχνική παρακολούθησης της μεταλλικής ροής. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διαφορετικού υλικού (γνωστό και ως υλικό παρακολούθησης) από αυτό το οποίο συγκολλείται. Τέτοια υλικά παρακολούθησης είναι κάποια κράματα αλουμινίου, διαφορετικά σε κάθε περίπτωση από το μέταλλο βάσης, ένα φύλλο χαλκού καθώς και σφαιρίδια από αστάλι [111-115].

Από τον παραπάνω τρόπο παρατήρησης εξήχθησαν κάποια αξιοσημείωτα συμπεράσματα που θα αναφέρουμε εκτενώς παρακάτω. Αρχικά, παρατηρήθηκαν κοινά στοιχεία στη ροή κάθε υλικού. Η ροή δεν είναι συμμετρική με την κεντρική γραμμή της συγκόλλησης και ένας αξιόλογος όγκος υλικού παρακολούθησης μετακινείται πίσω από την αρχική του θέση και μια ελάχιστη ποσότητα όγκου μπροστά από την αρχική του θέση. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το μήκος της κίνησης του εκάστοτε υλικού προς τα πίσω ισούται με τη διάμετρο της ακίδας του εργαλείου. Παράλληλα, παρατηρήθηκε μια διεπίδραση μεταξύ των προπορευμένων και των υποχωρούντων πλευρών. Παρατηρώντας μικροσκοπικά τη διαδικασία διαπιστώθηκε πως το υλικό δεν αναδεύεται κατά μήκος της συγκόλλησης. Επίσης, παρατηρήθηκε πως υλικό πιεζόταν προς τα κάτω στην προπορευόμενη πλευρά και υψώνονταν έως την πατούρα στην οπίσθια πλευρά της ακίδας. Αυτή η διαδικασία μας δείχνει πως η «ανάδευση» του υλικού συμβαίνει μόνο στην αιχμή της συγκόλλησης. Δηλαδή στην προπορευόμενη πλευρά της ακίδας στο σημείο όπου το εργαλείο έθετε σε κίνηση το υλικό από τις πλευρές [115].

Εξίσου σημαντικό είναι ότι το σύνολο της εκτόπισης της πλευράς που υποχωρεί είναι αντιστρόφως ανάλογο με το βαθμό συγκόλλησης (δηλαδή ταχύτητα συγκόλλησης/ρυθμός περιστροφής=πρόωση εργαλείου ανά περιστροφή). Εν κατακλείδι, η μεταφορά υλικού κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης είναι ανάλογη με τη διάμετρο της ακίδας όταν παραμένουν σταθερά η ταχύτητα συγκόλλησης και ο αριθμός περιστροφής.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, μπορεί να αναπαρασταθεί η διαδικασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης σαν μια διαδικασία εξαγωγής όπου η πατούρα, η

ακίδα και το μέταλλο που περιβάλλει τη ζώνη συγκόλλησης δημιουργούν ένα θάλαμο «εξαγωγής» που κινείται με το κατεργαζόμενο κομμάτι. Επίσης, συμπεραίνουμε από αυτή τη μελέτη της ροής του υλικού ότι η εξαγωγή γύρω από την ακίδα, σε συνδυασμό με την εμπρόσθια ανάδευση δημιουργεί κάτω από την ακίδα του εργαλείου κόλληση ίσης διαμέτρου με αυτού, δηλαδή μια κυκλική κίνηση γύρω από τον άξονα της κόλλησης.

Μια άλλη μέθοδος μελέτης μεταλλικής ροής είναι η τεχνική «διακοπής δράσης». Στην αναφερθείσα τεχνική χρησιμοποιούνται ένθετα σφαιρίδια διαμέτρου 0,38 mm που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Μετά το πέρας της διαδικασίας η συγκόλληση εξετάζεται με τη μέθοδο της ραδιογράφησης με σκοπό να παρατηρηθεί η κατανομή του υλικού παρακολούθησης γύρω από την ακίδα.

Η συγκεκριμένη τεχνική ονόματι «διακοπή δράσης» περιλαμβάνει τον απότομο τερματισμό της συγκόλλησης, σταματώντας την εμπρόσθια κίνηση του εργαλείου και στιγμιαία αντιστρέφοντας τη φορά περιστροφής αφήνοντας ακέραιη τη διαμόρφωση του υλικού μέσα στις σπείρες του εργαλείου. Τμηματοποιώντας την οπή (εσοχή που δημιουργείται κατά την εξαγωγή της ακίδας από την συγκολλημένη επιφάνεια) η μορφή της ροής γίνεται παρατηρήσιμη.

Με βάση την παραπάνω διαδικασία εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια [115-118].

Αρχικά, η κατανομή των ατσάλινων σφαιρών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο πεδία: την άτακτη και την συνεχή κατανομή. Συγκεκριμένα, άτακτη κατανομή ονομάστηκε, διότι στις περιοχές κοντά στην επιφάνεια μεμονωμένα σφαιρίδια είχαν ακανόνιστα διασκορπιστεί σε μια μεγάλη επιφάνεια πίσω από την ακίδα του εργαλείου. Επιπρόσθετα, τα σφαιρίδια αυτής της κατανομής κινήθηκαν βαθύτερα από την αρχική τους θέση. Αντίθετα, συνεχής κατανομή ονομάστηκε, διότι σε διαφορετικές περιοχές η πρωταρχική αδιάκοπη γραμμή των σφαιριδίων μετατράπηκε σε μια αδιάκοπη γραμμή μετά το πέρασμα της ακίδας. Είναι παρόλα αυτά σημαντικό να αναφερθεί πως υπήρχε ισχυρή μετακίνηση σφαιριδίων προς την επιφάνεια.

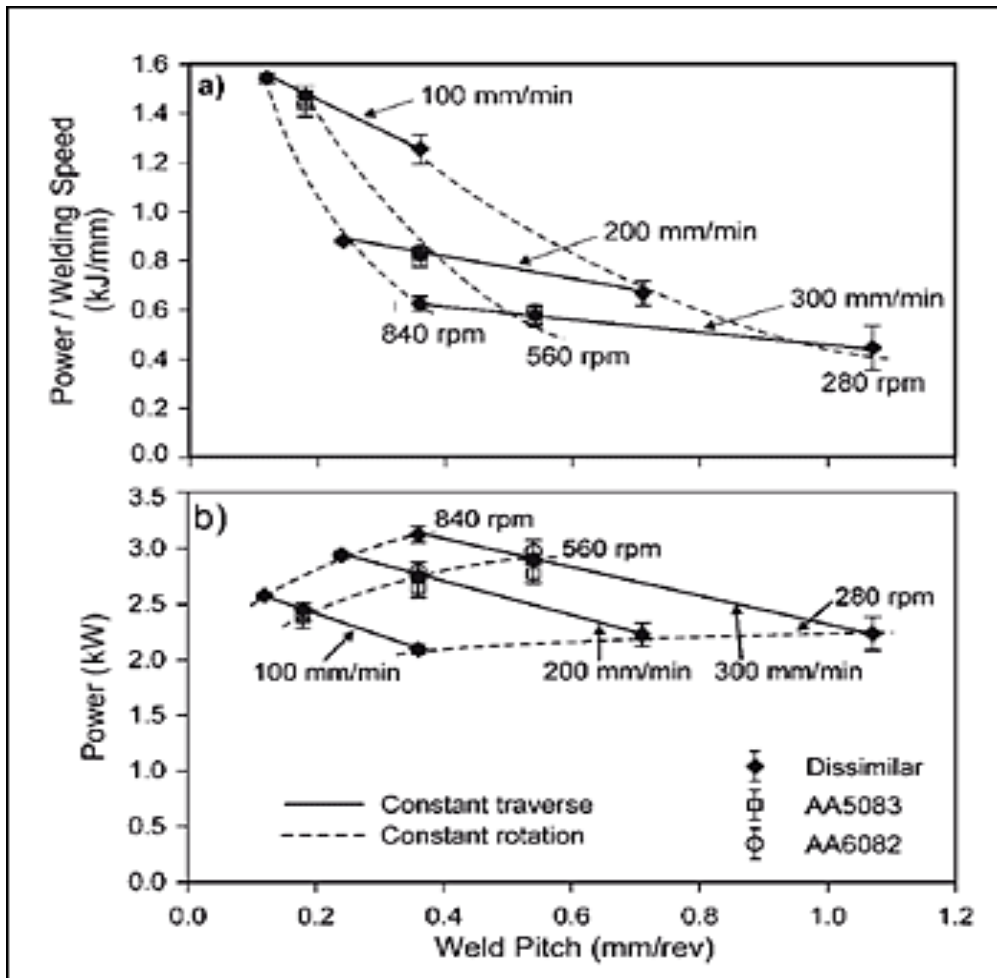
Η δεύτερη παρατήρηση είναι πως στην εμπρόσθια πλευρά της ακίδας δημιουργήθηκαν σπείρες από το μέταλλο της βάσης. Πιο συγκεκριμένα, η αδιάκοπη κίνηση προς τα πίσω των σπειρών μαζί με την μπροστινή πρόωση της ακίδας ανάγκασε το υλικό που βρισκόταν παγιδευμένο στις σπείρες του εργαλείου να οδηγηθεί στο πίσω μέρος της ακίδας.

Με βάση αυτές τις σημαντικές παρατηρήσεις οι ερευνητές κατέληξαν στο γεγονός ότι όλο το υλικό δεν αναδύεται και ένα μεγάλο ποσοστό του ωθείται από την περιστρεφόμενη ακίδα προς το πίσω μέρος. Επιλογικά, θα λέγαμε ότι αν το υλικό παρακολούθησης είχε διαφορετική τόσο αντοχή όσο και πυκνότητα θα ήταν δυνατό να καταλήξουμε σε πολύ διαφορετικά συμπεράσματα.

2.6 Κατανομή θερμοκρασίας

Η διαδικασία συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης διαφέρει από τις ανταγωνιστικές διαδικασίες, όπως τόξο και λείζερ συγκόλλησης, δεδομένου ότι οι προαναφερθείσες διαδικασίες χρησιμοποιούν μια εξωτερική πηγή θερμότητας για να φέρουν εις πέρας μια συγκόλληση. Σε αντίθεση με την συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης όπου η ίδια διαδικασία παράγει την απαραίτητη θερμότητα για τη συγκόλληση [53]. Η παραγωγή θερμότητας είναι ως εκ τούτου μια περίπλοκη συνάρτηση των μεταβλητών της διαδικασίας (πρόωση, ταχύτητα περιστροφής και κάθετη δύναμη) και είναι άμεσα εξαρτημένη από το

υλικό του κράματος που συγκολλάται καθώς και το σχεδιασμό της ακίδας του εργαλείου [77,78]. Η επίδραση της περιστροφής της ακίδας, της εγκάρσιας δύναμης, και της ταχύτητας πρόωσης σχετικά με την παραγωγή θερμότητας ανά δευτερόλεπτο και ανά χιλιοστό παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.3 α και β αντίστοιχα).

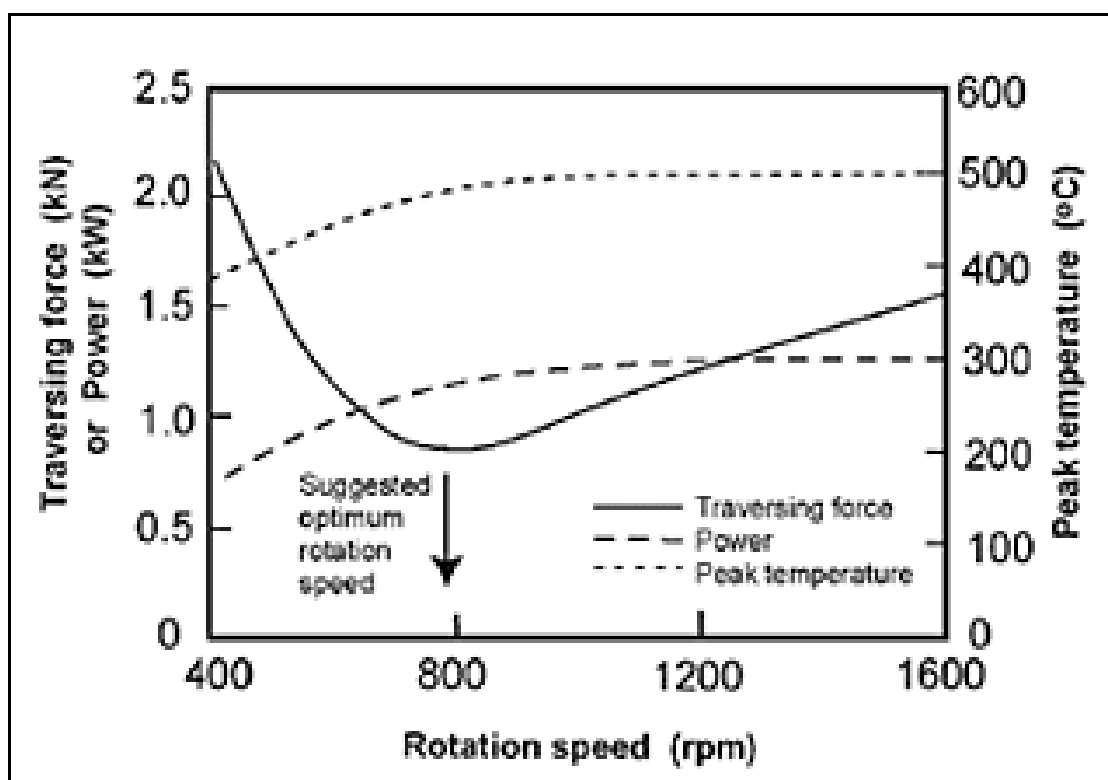


Σχήμα 2.3 α) Ρυθμός εισαγωγής ενέργειας (θερμότητα) ανά χιλιοστό και **β)** Ανά sec για κράματα AA5083/AA6082 [53]

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας που επικρατούν στη ζώνη τήξεως της συγκόλλησης είναι δύσκολες λόγω των συντελεσμένων έντονων πλαστικών παραμορφώσεων. Γι' αυτό το λόγο οι θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή αυτή έχουν εκτιμηθεί βάσει είτε της μικροδομής είτε της χρήσης θερμοζεύγους στις περιοχές αυτές [121-127].

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας σε μια συγκόλληση σύντηξης είναι ένας δείκτης μέτρησης της θερμοκρασίας του υλικού γύρω από την ακίδα της FSW, τουλάχιστον για την ένωση λεπτών φύλλων αλουμινίου. Πρέπει να τονίσουμε πως είναι πιθανό με την μείωση της ταχύτητας πρόωσης, πολλή από την επιπρόσθετη θερμότητα να καταλήξει στην πλάκα υποστήριξης και να μην γίνει αξιοποιήσιμη. Παράλληλα, η κάθετη δύναμη στην συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης παρέχει θερμική επαφή μεταξύ τεμαχίου και πλάκας στήριξης. Ωστόσο, η επαφή αυτή εξελίσσεται και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και γι' αυτό είναι δύσκολο και πολύπλοκο να προσδιοριστεί [127-129].

Η θερμότητα που παράγεται από το παχύρευστο υλικό λόγω της επαφής τεμαχίου με το εργαλείο έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών δυνάμεων [53]. Αναλόγως το εργαλείο που χρησιμοποιείται κάθε φορά προκύπτουν διατμητικές δυνάμεις οι οποίες δεν είναι πάντα ομοιόμορφες, με αποτέλεσμα το εύπλαστο υλικό να μπορεί είτε να κολλήσει είτε να γλιστρήσει, είτε να υπάρχει συνδυασμός των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Για την αποφυγή του φαινομένου ρευστοποίησης του εύπλαστου υλικού πρέπει να μην ξεπεραστούν οι συγκεκριμένες θερμοκρασίες που θα οδηγήσουν το υλικό σε ρευστό [78]. Αν το υλικό ρευστοποιηθεί μπορεί να υπάρξει μια ολισθητική συμπεριφορά μεταξύ ακίδας και τεμαχίου με αποτέλεσμα η διατμητική τάση να μειώνεται απότομα με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε στην απότομη πτώση της τοπικής θερμοκρασίας στο κέντρο της συγκόλλησης [130]. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει μοντελοποιηθεί σε CFD για την διερεύνηση της ευαισθησίας που εμφανίζει η διαδικασία στην παραγωγή θερμότητας, στις δυνάμεις του εργαλείου και στο μέγεθος της ζώνης παραμόρφωσης ως συνάρτηση στο σχεδιασμό του εργαλείου. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας, η μέγιστη θερμοκρασία και η προωθούσα δύναμη σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Σημειώνεται ότι η ισχύς και η μέγιστη θερμοκρασία φτάνουν σε σημείο κορεσμού, όταν η θερμοκρασία διεπαφής και η θερμότητα είναι περιορισμένες. Η θερμοκρασία διεπαφής και η θερμότητα περιορίζονται από την ταχεία αποσκλήρυνση του υλικού ενώ η ελάχιστη δύναμη που απαιτείται βρίσκεται σε μια ενδιάμεση ταχύτητα περιστροφής περίπου (800 RPM). [131,132]



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση των μεταβλητών που έχει προβλεφθεί από CFD, παραγωγής θερμότητας, μέγιστης θερμοκρασίας και δύναμης πρόωσης με περιστρεφόμενη ταχύτητα [78].

Από μια άλλη μελέτη [133] εξάγονται τρεις σημαντικές παρατηρήσεις. Αρχικά, η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στην περιοχή κοντά στη ζώνη ανάδευσης και έπεφτε καθώς απομακρυνόμασταν από αυτή. Δεύτερον, η θερμοκρασία στα όρια ζώνης ανάδευσης

αυξάνεται από την κάτω πλευρά της ακίδας προς τα επάνω. Θα μπορούσαμε να πούμε πως η θερμοκρασία αυτή ξεπερνά την θερμοκρασία διαλύσεως των σκληρυντικών συστατικών του κράματος. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία αυτή να μην είναι υψηλότερη της διάλυσης των σκληρυντικών συστατικών αλλά δε μικρότερη της θερμοκρασίας τήξεως του υλικού. Με βάση την παραπάνω διαπίστωση εξασφαλίζεται ότι το υλικό δεν θα ρευστοποιηθεί.

Εκτός από την παρακολούθηση της κατανομής της θερμοκρασίας με πειραματικές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί και πολλά μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της. Ένα αναλυτικό μοντέλο είναι αυτό που εξετάζει και λαμβάνει υπόψιν τον τρόπο επαφής του εργαλείου με το κατεργασμένο κομμάτι. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τρία είδη επαφής, τα οποία είναι τα εξής:

- Κολλοειδής επαφή
- Ολισθαίνουσα επαφή
- Ολική επαφή.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο είδος επαφής το εργαλείο παρασύρει υλικό από την επιφάνεια του κομματιού καθώς αυτό κινείται. Στο δεύτερο είδος επαφής το εργαλείο εμφανίζεται να ολισθαίνει στην επιφάνεια του κομματιού και στο τρίτο είδος επαφής υπολογίζεται η συνολική θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη διαδικασία.[133]

Οι τύποι που διέπουν το μοντέλο είναι οι εξής [420]:

$$Q_{ολ\ iko, kol} = \frac{2}{3} \rho \frac{s_{yield}}{\sqrt{3}} \omega ((R_{πατούρας}^3 a V - R_{πρόβολου}^3 \rho \theta)(1 + \epsilon_j p_a) + R_{πρόβολου}^3 \rho \theta + 3R_{πρόβολου}^2 \rho \theta H_{πρόβολου} \rho \theta)$$

$$Q_{ολ\ iko, ol\ isq} = \frac{2}{3} \rho \pi r \omega ((R_{πατούρας}^3 a V - R_{πρόβολου}^3 \rho \theta)(1 + \epsilon_j p_a) + R_{πρόβολου}^3 \rho \theta + 3R_{πρόβολου}^2 \rho \theta H_{πρόβολου} \rho \theta)$$

$$Q_{ολ\ iko} = \frac{2}{3} \rho (d \frac{s_{yield}}{\sqrt{3}} + (1 - d) \pi r p) \omega ((R_{πατούρας}^3 a V - R_{πρόβολου}^3 \rho \theta)(1 + \epsilon_j p_a) + R_{πρόβολου}^3 \rho \theta)$$

Στην παρακάτω παράγραφο αναλύονται τα σύμβολα, τα οποία εμφανίζονται στους τύπους. Αρχικά, 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), $R_{πρόβολου}$ η ακτίνα της ακίδας του εργαλείου (m), α η γωνία εμπλοκής πατούρας εργαλείου ($^\circ$), $H_{πρόβολου}$ το ύψος της ακίδας του εργαλείου, ρ η πίεση επαφής (Pa) και δ η μεταβλητή κατάσταση επαφής.

Ύστερα από εκτεταμένη μελέτη το μοντέλο αυτό φάνηκε να δίνει τα ίδια αποτελέσματα με παρόμοια πειράματα με ταχύτητες περιστροφής 400rpm και ταχύτητα πρόωση 150 mm/min.

Συμπερασματικά, βάσει του μαθηματικού μοντέλου και των εκτεταμένων πειραματικών μελετών οδηγηθήκαμε σε μια πληθώρα συμπερασμάτων, τα οποία είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα που εξήγαγαν τα CFD και είναι τα εξής:

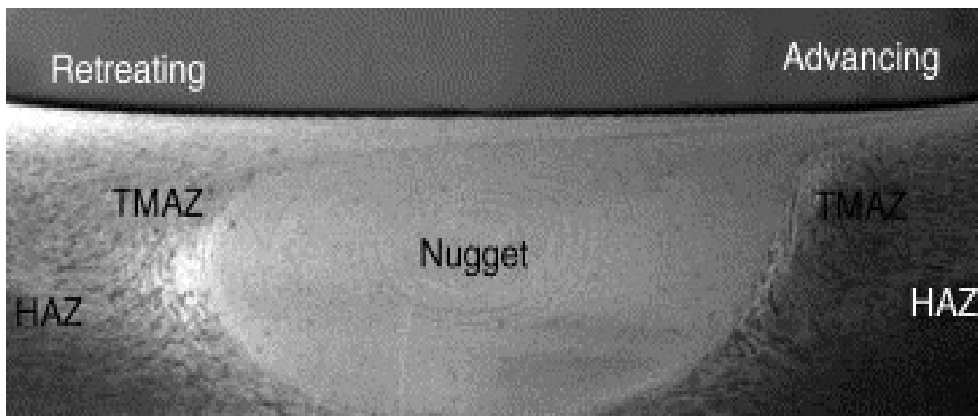
- Η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στη ζώνη ανάδευσης και είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξεως του αλουμινίου.
- Η πατούρα του εργαλείου είναι ο βασικός παράγοντας αύξησης θερμοκρασίας στη διαδικασία συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης.
- Η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αυξάνεται αν αυξηθεί η αναλογία περιστροφής του εργαλείου με σταθερή την ταχύτητα πρόωσης και αντίθετα μειώνεται αν αυξηθεί η ταχύτητα πρόωσης με σταθερή την αναλογία περιστροφής του εργαλείου.
- Η επιφάνεια της ζώνης ανάδευσης παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας.

2.7 Μικροδομή υλικού συγκόλλησης

Η ανακρυστάλλωση σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μεταλλικού ιστού εντός της ζώνης ανάδευσης έχουν σαν αίτια την ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών καθώς και τις υψηλές πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίζονται στη διαδικασία συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης [134-136].

Στηριζόμενοι στα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει η μικροδομή των κόκκων και των συστατικών μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις ζώνες σε τρεις διαφορετικές:

1. Ζώνη Ανάδευσης(Nugget)
2. Ζώνη Θερμομηχανικής Επιρροής (Thermo-mechanical Affected Zone-TMAZ)
3. Ζώνη Θερμικής Επιρροής (Heat Affected Zone-HAZ)



Σχήμα 2.5: Κατηγοριοποίηση ζωνών μικροδομής των κόκκων και των συστατικών

Αρκετές μελέτες έχουν αντικείμενο μελέτης την εξέλιξη της μικροδομής. Οι αλλαγές που παρουσιάζονται στη μικροδομή του υλικού καθώς και σε διαφορετικές ζώνες από τις παραπάνω επιδρούν σημαντικά στις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.

2.7.1.1 Ζώνη Ανάδευσης

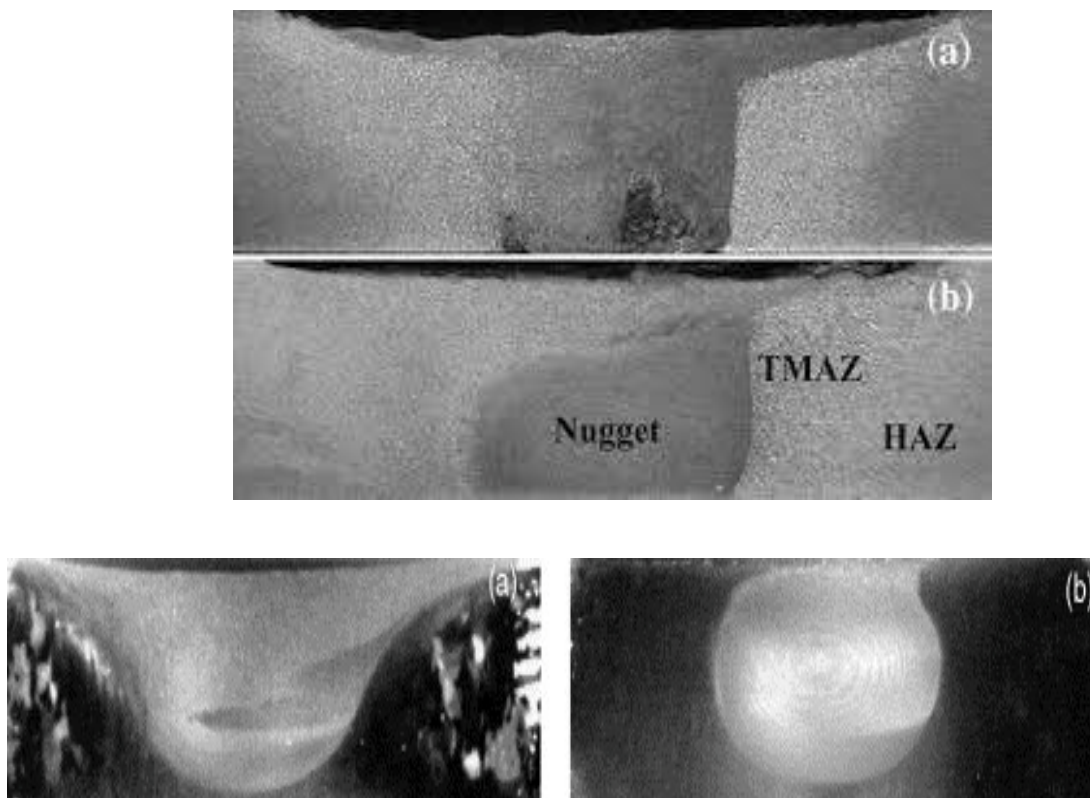
Η θερμότητα που παράγεται μέσω της τριβής κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και η ισχυρή πλαστική παραμόρφωση οδηγούν σε ανακρυσταλλοποιημένη μικροδομή μικρών κόκκων [424,425]. Η περιοχή ανάδευσης σε πολλές βιβλιογραφικές αναφορές συναντάται τόσο ως ζώνη ψήγματος κόλλησης (weld nugget/nugget zone) όσο και δυναμική ανακρυστάλλωση (dynamically recrystallized zone). Ερευνητές παρατήρησαν ότι στη ζώνη ανάδευσης και συγκεκριμένα στην περιοχή ανακρυσταλλοποιημένων κόκκων υπάρχει σαφής διαχωρισμός ορίων και κόκκων [481]. Η αλληλεπίδραση των ανακρυσταλλοποιημένων κόκκων και του μετάλλου γύρω από την περιοχή ανάδευσης περιορίζεται στο πίσω μέρος του εργαλείου [495]. Ωστόσο, έχουν παρατηρηθεί και κάποιες σπάνιες περιπτώσεις κυρίως στο τέλος της γραμμής κόλλησης, όπου υπάρχει αλληλεπίδραση και με το μπροστινό [513].

2.7.1.1α Σχήμα ζώνης ανάδευσης

Έχουν παρατηρηθεί διαφορετικά σχήματα της ζώνης ανάδευσης, τα οποία εξαρτώνται άμεσα από τη γεωμετρία του εργαλείου, τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού που κατεργαζόμαστε και γενικά από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους της διαδικασίας της συγκόλλησης [481]. Ο διαχωρισμός της ζώνης ανάδευσης γίνεται σε δύο κατηγορίες:

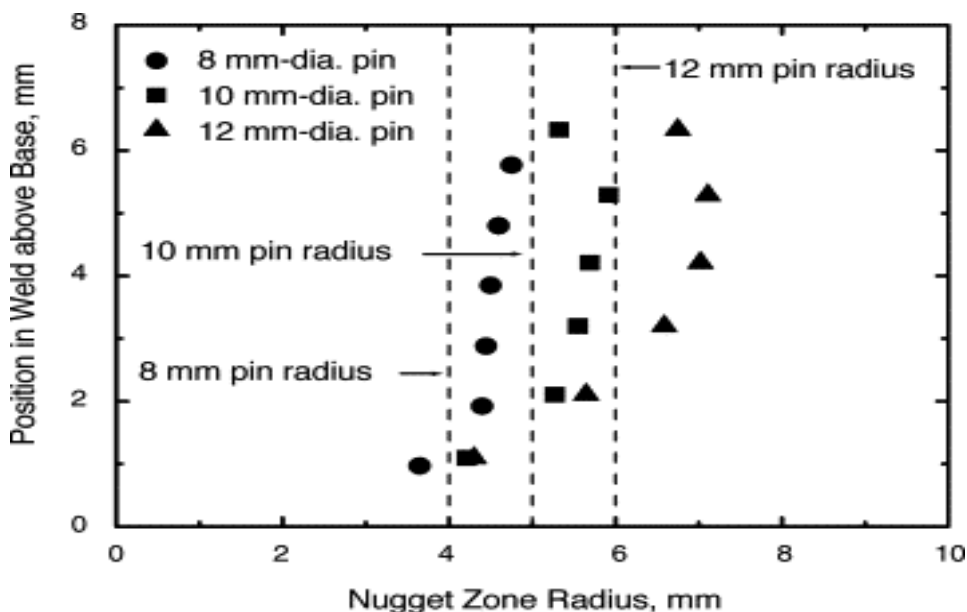
- Ζώνη με σχήμα λεκάνης, η οποία καθώς πλησιάζουμε την επάνω επιφάνεια της κόλλησης ανοίγει [404]
- Ζώνη ελλειπτικού σχήματος [461]

Τα παραπάνω σχήματα επηρεάζονται έμμεσα από τις παραμέτρους της διαδικασίας και άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής της ακίδας. Πιο συγκεκριμένα, για ταχύτητες της τάξεως 200-500 rpm, οι οποίες θεωρούνται χαμηλής ταχύτητας περιστροφές, παρουσιάζεται το σχήμα λεκάνης. Ενώ για υψηλότερου ρυθμού περιστροφών (700 και άνω) παρουσιάζεται ελλειπτικό σχήμα στη ζώνη ανάδευσης [504]. Αξίζει να αναφέρουμε σ' αυτό το σημείο ότι αν διατηρήσουμε το ίδιο σχήμα εργαλείου τροποποιώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία παράγουμε διαφορετικά σχήματα στην ζώνη ανάδευσης.



Σχήμα 2.6: Παρατήρηση σχημάτων στην ζώνη ανάδευσης [504]

Πιο αναλυτικά στο σχήμα 2.6, στις περιπτώσεις (a) παρατηρείται ο σχηματισμός λεκάνης στη ζώνη τήξεως με ταχύτητα περιστροφής 300 rpm και πρόωση 51 mm/min, ενώ στις περιπτώσεις (b) έχουμε ελλειπτικό σχήμα στη ζώνη τήξεως με ταχύτητα περιστροφής 900 rpm και πρόωση 203 mm/min. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της διαμέτρου της ακίδας δημιουργείται πιο σφαιρικό σχήμα και στο κάτω μέρος της κόλλησης παρουσιάζεται ημισφαιρικό σχήμα [449]. Παρακάτω δίνεται σχήμα (Σχήμα 2.7) που δείχνει λεπτομερώς την επιρροή της διαμέτρου της ακίδας στο σχήμα της ζώνης ανάδευσης.



Σχήμα 2.7: Επιρροή της διαμέτρου της ακίδας στο σχήμα της ζώνης ανάδευσης[449]

2.7.1.1β Μέγεθος και σχήμα κόκκων

Στην διαδικασία της FSW η ανακρυστάλλωση, η οποία λαμβάνει χώρα αποτελείται από μικρούς και ομοαξονικούς κόκκους [427,428,430,461]. Οι παράμετροι της διαδικασίας, οι οποίοι έχουν εκτενώς αναλυθεί παραπάνω, καθώς και η μέθοδος ψύξης διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στο μέγεθος των ανακρυσταλλοποιημένων κόκκων [482,483,495-501]. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το μέγεθος κόκκων υπό διαφορετικές συνθήκες FSW για διάφορα κράματα αλουμινίου:

Πίνακας 2.1: Μέγεθος κόκκων υπό διαφορετικές συνθήκες FSW για διαφορετικά κράματα αλουμινίου

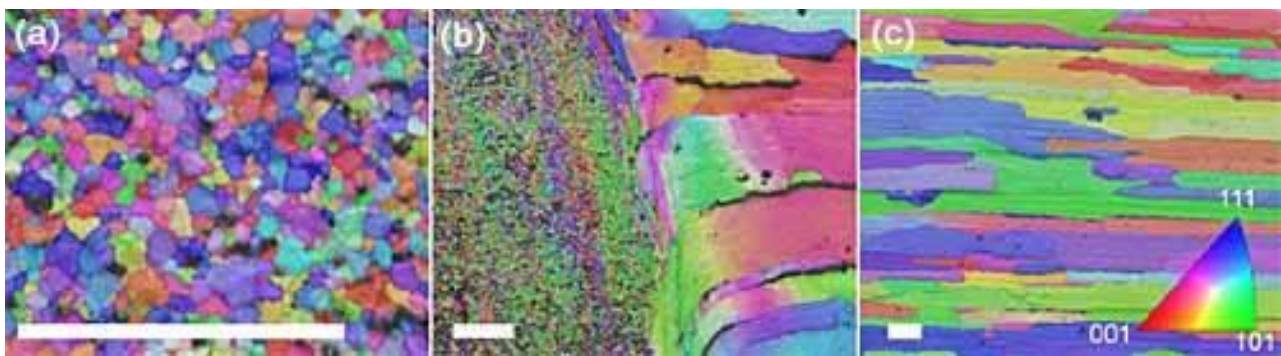
Υλικό κατεργασίας	Πάχος πλάκας (mm)	Γεωμετρία εργαλείου	Ρυθμός περιστροφής (rpm)	Πρόωση (mm/min)	Μέγεθος κόκκου (μm)
7075Al-T6 [424]	6.35	–	–	127	2–4
6061Al-T6 [425]	6.3	Κυλινδρικό	300–1000	90–150	10

Al-Li-Cu [426]	7.6	-	-	-	9
7075Al-T651 [435]	6.35	Κυλινδρικό με σπείρωμα	350, 400	102, 152	3.8, 7.5
6063Al- T4,T5 [487]	4.0	-	360	800-2450	5.9-17.8
6013Al-T4, T6 [495]	4.0	-	1400	400-450	10-15
1100Al[496]	6.0	Κυλινδρικό	400	60	4
5054Al[497]	6.0	-	-	-	6
1080Al-O [498]	4.0	-	-	-	20
5083Al-O [498]	6.0	-	-	-	4
2017Al-T6 [499]	3	Κυλινδρικό με σπείρωμα	1250	60	9-10
2095Al [500]	1.6	-	1000	126-252	1.6
Al-Cu-Mg- Ag-T6 [501]	4.0	-	850	75	5
2024Al-T351 [502]	6.0	-	-	80	2-3
7010Al- T7651 [503]	6.35	-	180, 450	95	1.7, 6
7050Al-T651 [504]	6.35	-	350	15	1-4
Al-4Mg-1Zr [505]	10	Κυλινδρικό με σπείρωμα	350	102	1.5
2024Al [506]	6.35	Κυλινδρικό με σπείρωμα	200-300	25.4	2.0-3.9
7475Al [507]	6.35	-	-	-	2.2
5083Al [508]	6.35	Κυλινδρικό με σπείρωμα	400	25.4	6.0
2519Al-T87 [509]	25.4	-	275	101.6	2-12
2024Al-T4 [427]	6.5	Κυλινδρικό με σπείρωμα	650	60	0.5-0.8
1050Al [483]	5.0	Κωνικό χωρίς σπείρωμα	560	155	0.5
7075Al [515]	2	-	1000	120	0.1
Al-Zn-Mg- Sc	6.7	Κυλινδρικό με σπείρωμα	400	25.4	0.68

2.7.1.1γ Υφή Μικροδομής

Η μικροδομή επηρεάζει ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων όπως: ελατότητα, κατεργασιμότητα, αντοχή και αντοχή διάβρωσης.

Κατά τη διαδικασία FSW στην περιοχή της συγκόλλησης μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις ζώνες διαφορετικής μικροδομής: Ζώνη Ανάδευσης, Ζώνη Θερμομηχανικής Επιρροής, Ζώνη Θερμικής Επιρροής και το υλικό βάσης. Έχει παρατηρηθεί ότι καθεμιά από τις εκάστοτε περιοχές παρουσιάζει διαφορετικές θερμομηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, η πατούρα παραμορφώνει το πάνω μέρος του υλικού, το οποίο έχει ήδη παραμορφωθεί από την ακίδα του εργαλείου μας [437-440]. Επίσης, ο ρυθμός περιστροφής καθώς και η πρόωση του εργαλείου μας μπορούν να δημιουργήσουν στην επιφάνεια του υλικού μας μοτίβα όπως διαδοχικούς κύκλους ή παρόμοιες δομές (Σχήμα 2.7):



Σχήμα 2.7: Μικροδομή κράματος κατά την συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης εμφανιζόμενο με αντίστροφου πόλου χαρτογράφηση, ο οποίος προκύπτει από EBSD. α)Ζώνη Ανάδευσης, β)Ζώνη Ανάδευσης διακριτό όριο με TMAZ , γ)HAZ [με μπάρα κλίμακας 50mm που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση].[117]

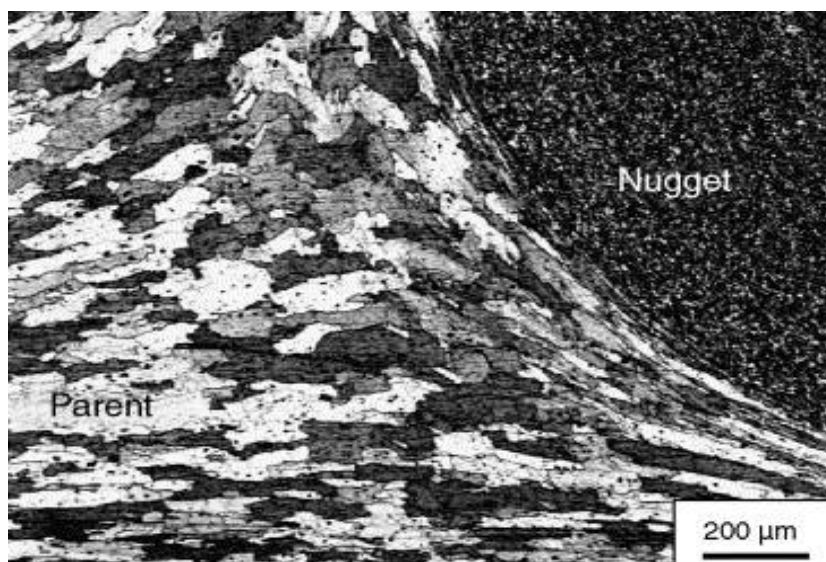
2.7.1.2 Ζώνη Θερμομηχανικής Επιρροής (TMAZ-Thermo Mechanically Affected Zone)

Η ζώνη θερμομηχανικής επιρροής είναι η ζώνη στην οποία το υλικό έχει υποστεί τόσο παραμόρφωση όσο και θέρμανση κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης [404,435,461]. Αποτελεί μια μεταβατική ζώνη μεταξύ του ανεπηρέαστου υλικού και της ζώνης ανάδευσης. Παρακάτω δίνεται σχήμα (Σχήμα 2.8) όπου παρουσιάζεται η τυπική αναπαράσταση των ζωνών που γίνονται ευδιάκριτες μετά την συγκόλληση [481,504].



Σχήμα 2.8: Τυπική μακρογραφική αναπαράσταση των ζωνών (απλό σχήμα ακίδα 400rpm και 51mm/min)

Η ζώνη TMAZ έχει υποστεί υψηλή παραμόρφωση πράγμα το οποίο αποδεικνύεται από τη δομή της. Κόκκοι του αρχικού μετάλλου έχουν παραμορφωθεί υφιστάμενοι επιμήκυνση λόγω της κίνησης της ακίδας και έχουν παρασυρθεί προς τα επάνω. Παρά την έντονη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή TMAZ δεν παρατηρείται ανακρυστάλλωση. Παράλληλα, στο σχήμα (Σχήμα 2.9) που παρουσιάζεται μας δίνεται η μικροδομή της TMAZ.



Σχήμα 2.9: Μικροδομή της TMAZ[435]

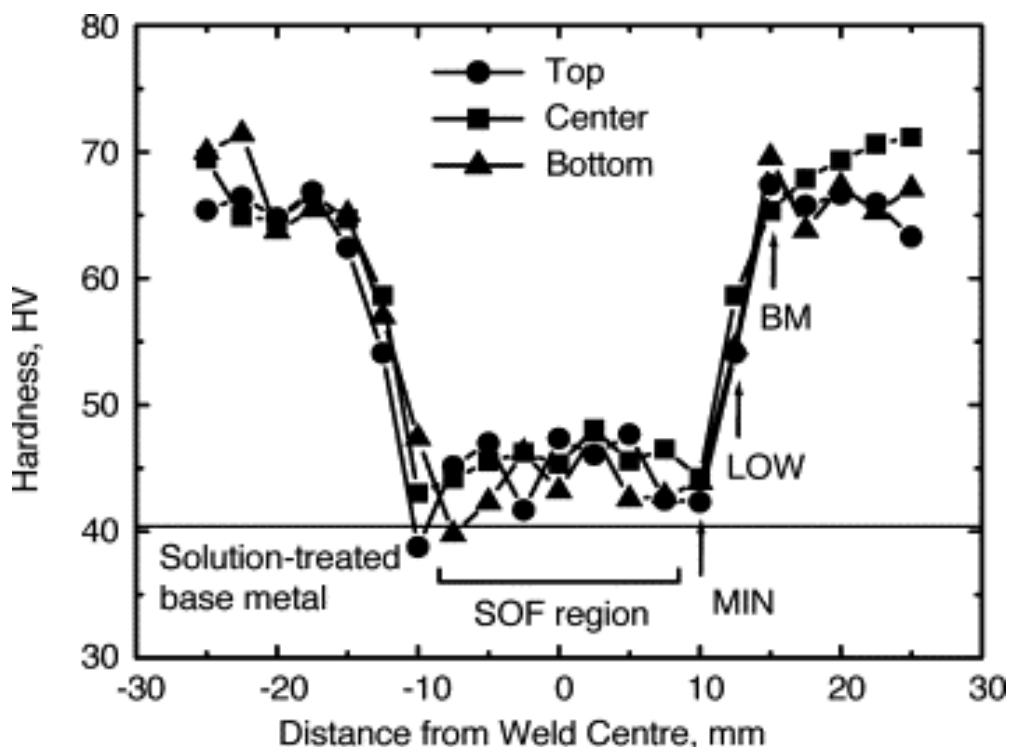
2.7.1.3 Ζώνη Θερμικής Επιρροής (HAZ-Heat affected zone)

Ύστερα από τη ζώνη TMAZ ακολουθεί η ζώνη HAZ. Αν και η HAZ ακολουθεί έναν θερμικό κύκλο, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού που επεξεργαζόμαστε δεν υφίσταται καμία πλαστική παραμόρφωση [481]. Για κράματα αλουμινίου μελέτες έχουν υποδείξει ότι η ζώνη HAZ επιδέχεται θερμοκρασίες της τάξεως των 250°C και άνω [512]. Οι μελετητές αναφέρουν ότι λόγω της θερμοκρασίας παρουσιάζεται εκφυλισμός ορισμένων σκληρυντικών στοιχείων, παρόλα αυτά διατηρείται η ίδια δομή των κόκκων [504,495].

2.7.2 Μηχανικές ιδιότητες

Η διαδικασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης δημιουργεί εξέλιξη στη μικροδομή τόσο εντός όσο και γύρω από τη ζώνη ανάδευσης, της TMAZ και της HAZ. Μετά τη συγκόλληση το νέο κράμα που δημιουργήθηκε παρουσιάζει μεγάλες διαφορές από την αρχική κατάσταση του. Παρακάτω θα αναλυθούν οι αλλαγές που επιφέρει η διαδικασία FSW στην μικροδομή των κραμάτων:

· **Σκληρότητα:** τα κράματα αλουμινίου μπορούν να διαχωριστούν σε θερμικά κατεργασμένα και μη θερμικά κατεργασμένα. Πειράματα έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η διαδικασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης συμπεριφέρεται διαφορετικά ως προς το θέμα σκληρότητας στα θερμικά κατεργασμένα και αλλιώς στα μη θερμικά κατεργασμένα [513]. Αρχικά, για θερμικά κατεργασμένα παρατηρείται η δημιουργία μιας χαμηλής σκληρότητας περιοχή γύρω από το κέντρο της συγκόλλησης, η οποία οφείλεται στη διάλυση σκληρυντικών στοιχείων του κράματος στην διάρκεια του θερμικού κύκλου της FSW [542]. Πειράματα έδειξαν ότι η σκληρότητα των υλικών επηρεάζεται περισσότερο από την κατανομή σκληρυντικών στοιχείων στο κράμα παρά από το μέγεθος των κόκκων. Πιο κάτω παρατίθεται σχήμα (Σχήμα 2.10) με την τυπική καμπύλη σκληρότητας κατά μήκος της συγκόλλησης συγκεκριμένου κράματος κατά τη διάρκεια FSW.



Σχήμα 2.10: Τυπική καμπύλη σκληρότητας κατά μήκος συγκόλλησης κράματος 6063Al-T5 στη διαδικασία FSW

· **Αντοχή και ολκιμότητα:** για διάφορα κράμα αλουμινίου έχουν διεξαχθεί πειράματα εφελκυσμού σε θερμοκρασίες δωματίου. Σε όλα τα αποτελέσματα των πειραμάτων που

διεξήχθησαν από μελετητές παρατηρήθηκε αποκοπή των κραμάτων στην περιοχή ανάδευσης σε δύο κατευθύνσεις. Τα δείγματα που αποκόπηκαν κατά μήκος της κόλλησης περιείχαν τμήματα μόνο από την πλήρη ανακρυσταλλοποιημένη ζώνη ανάδευσης, ενώ τα δείγματα που είχαν αποκοπεί εγκάρσια περιείχαν μικροδομές από όλες τις ζώνες [461].

Πίνακας 2.2: Εφελκυστικές ιδιότητες δοκιμών της ζώνης ανάδευσης που εξήχθησαν κατά μήκος της συγκόλλησης [461]

Κατάσταση	UTS (MPa)	YS (MPa)	Επιμήκυνση (%)
Υλικό βάσης T651	622	571	14,5
Μετά την FSW	525	365	15
Κατόπιν επεξεργασίας	496	455	3,5

Πίνακας 2.3: Εφελκυστικές ιδιότητες δοκιμών της ζώνης ανάδευσης που εξήχθησαν εγκάρσια της συγκόλλησης [461]

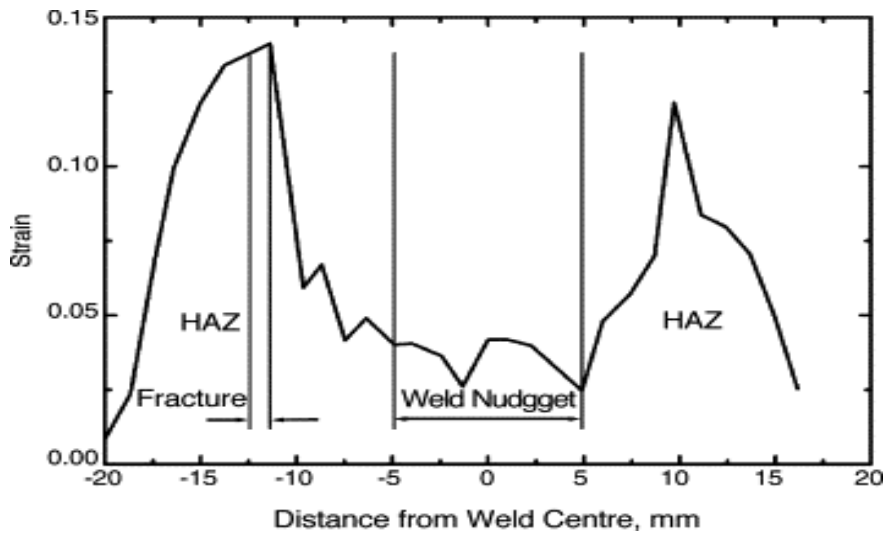
UTS: ολική αντοχή σε εφελκυσμό

YS: κρίσιμο σημείο εφελκυσμού

Κατάσταση	UTS (MPa)	YS (MPa)	Επιμήκυνση (%)
Υλικό βάσης T651	622	571	14,5
Μετά την FSW	468	312	7,5
Κατόπιν επεξεργασίας	447	312	3,5

Στους παραπάνω πίνακες δίνονται σημαντικές τιμές για την σύγκριση των δύο περιπτώσεων. Αρχικά, τα διαμήκη τμήματα (πίνακας 2.2) παρουσιάζουν μείωση στην ελαστικότητα και στην αντοχή στη ζώνη ανάδευσης με ανεπηρέαστη την επιμήκυνση τους. Αίτιο αυτού μπορεί να θεωρηθεί ύστερα από παρατήρηση ο εκμηδενισμός κάποιων σκληρυντικών στοιχείων μετά το πέρας της διαδικασίας [498]. Η θερμική κατεργασία συνέβαλε ώστε το δείγμα να ανακτήσει μεγάλο μέρος της ελαστικότητας γύρω από τη ζώνη ανάδευσης, αλλά με μειονεκτήματα την μειωμένη αντοχή του υλικού και την έντονη μείωση της ολκιμότητας του. Η αύξηση της ελαστικότητας σε δείγματα που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία μετά την κόλληση οφείλεται στην διόγκωση των σκληρυντικών συστατικών, η οποία είναι υπεύθυνη για την μείωση στην ολκιμότητα του υλικού. Η μειωμένη ολκιμότητα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ζωνών, όπου τα σκληρυντικά συστατικά του κράματος έχουν εξαλειφθεί εντελώς. Τέτοιες ζώνες παρουσιάζονται στα όρια των κόκκων.

Για τα δείγματα της εγκάρσιας τομής παρατηρείται σημαντική μείωση στην αντοχή. Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές για την αντοχή και την ολκιμότητα σε δείγματα εγκάρσιας τομής είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες που παρατηρούνται σε δείγματα διαμήκους τομής. Μετά την θερμική κατεργασία παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής στα δείγματα αλλά και απώλεια ενός μεγάλου ποσοστού στη δυνατότητα επιμήκυνσης τους. Άξια αναφοράς θεωρείται η παρατήρηση ότι σε όλα τα δείγματα προκλήθηκε θραύση στη ζώνη HAZ. Η μικρότερη αντοχή που σημειώθηκε στη ζώνη HAZ ήταν αποτέλεσμα τόσο του εκφυλισμού των σκληρυντικών συστατικών όσο και της μη επιτυχούς ανακρυσταλλοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται σχήμα (Σχήμα 2.11) όπου διαφαίνεται η κατανομή εφελκυστικής καταπόνησης στη ζώνη HAZ για συγκεκριμένο κράμα.



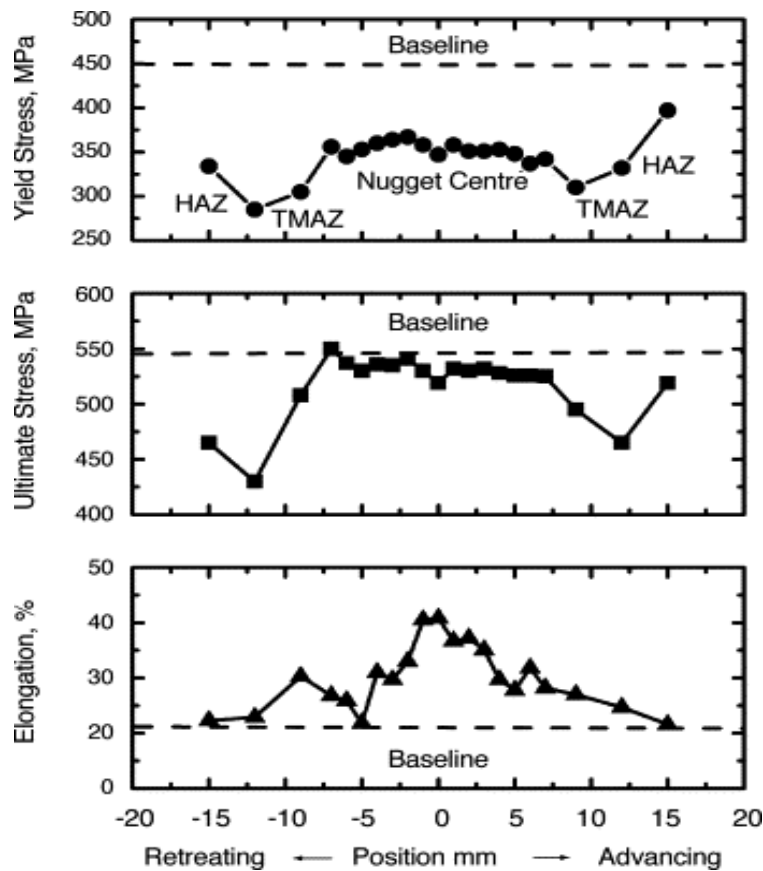
Σχήμα 2.11: Κατανομή εφελκυστικής καταπόνησης στη ζώνη ανάδευσης αλλά και στην HAZ για το κράμα 7075Al-TA651[461]

Παρατηρείται ότι στη ζώνη HAZ έχουμε χαμηλή αντοχή και τοπικά επιμηκύνεται έως και 14% κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων από τους ερευνητές. Εν αντιθέσει, στη ζώνη ανάδευσης για ακριβώς ίδια καταπόνηση παρατηρείται 5% επιμήκυνση έχοντας ως αποτέλεσμα τη θραύση του δοκιμίου.

Πίνακας 2.4: Σύνοψη αντοχών εφελκυσμού και αποτελέσματα συγκολλήσεων[460]

Κράμα	Μέταλλο βάσης <i>UTS</i>	FSW <i>UTS</i>	Απόδοση %
AFC458-T8 [551]	544.7	362.0	66
2014-T651(6 mm)[551,554]	479–483	326–338	68–70
2024-T351(5 mm)[551,555]	483–493	410–434	83–90
2219-T87[551]	475.8	310.3	65
2195-T8[551]	593.0	406.8	69
5083-O (6–15 mm)[432,551-554]	285–298	271–344	95–119
6061-T6 (5 mm)[551,555]	319–324	217–252	67–79
7050-T7451 (6.4 mm)[521]	545–558	427–441	77–81
7075-T7351[551]	472.3	455.1	96
7075-T651 (6.4 mm)[461]	622	468	75
6056-T78 (6 mm)[553]	332	247	74
5005-H14 (3 mm)[555]	158	118	75
7020-T6 (5 mm)[555]	385	325	84
6063-T5 (4 mm)[498]	216	155	72
2024-T3 (4 mm)[556]	478	425–441	89–90
7475-T76[556]		465	92
6013-T6 (4 mm)[495]	394–398	295–322	75–81
6013-T4 (4 mm)[495]	320	323	94
2519-T87 (25.4 mm)[509]	480	379	79

Ο παραπάνω πίνακας (Πίνακας 2.4) συνοψίζει τις αντοχές εφελκισμού σε κράματα αλουμινίου πριν και μετά το πέρας μιας συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης και παρουσιάζει το ποσοστό απόδοσης της συγκόλλησης βάση των αρχικών αντοχών των κραμάτων. Μέσος όρος αποτελεσματικότητας σε συγκόλληση υπολογίστηκε 25%-90% για θερμικά κατεργασμένα και 95%-119% για μη θερμικά κατεργασμένα [555,559]. Σημαντικό είναι να υπογραμμιστεί ότι οι δοκιμές εφελκισμού δείχνουν την αδύναμη περιοχή του δοκιμίου, ενώ η επιμήκυνση είναι ο μέσος όρος των δυνατοτήτων επιμήκυνσης κάθε ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω παρατίθεται σχήμα (Σχήμα 2.12) όπου μας δείχνει την μεταβολή των εφελκυστικών ιδιοτήτων σε σχέση με την θέση κατά το μήκος μιας κόλλησης [498].

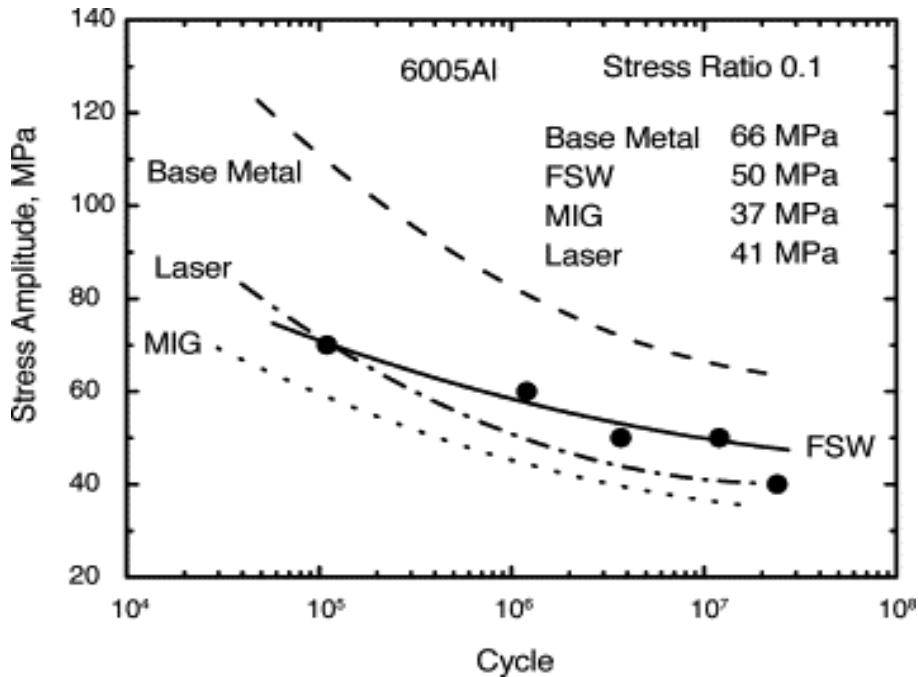


Σχήμα 2.12: Μεταβολή των εφελκυστικών ιδιοτήτων σε σχέση με την θέση κατά μήκος της κόλλησης [559]

2.7.3 Αντοχή σε κόπωση

Έρευνες που έχουν γίνει σχετικά με την αντοχή σε κόπωση, αφού διεξήχθη FSW καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα:

· Η αντοχή σε κόπωση της FSW ήταν πιο χαμηλή από την αντοχή του μετάλλου βάσης και αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι κολλήσεις FSW ίσως να είναι υπεύθυνες για την θραύση λόγω της κόπωσης του κομματιού [565]. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια εγκάρσιας τομής έχουν χαμηλότερη αντοχή σε κόπωση εν συγκρίσει με εκείνα που είχαν κοπεί κατά τον διαμήκη άξονα της συγκόλλησης [509]. Ωστόσο, και τα δύο είδη δοκιμίων έχουν περισσότερη αντοχή σε κόπωση σε σχέση με τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με Laser ή με συγκόλληση MIG (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα καμπυλών αντοχής σε κόπωση για διαδικασίες συγκολλήσεων FSW, LASER και MIG[560]

· Η ποιότητα στην επιφάνεια της συγκόλλησης FSW διαδραματίζει καίριο ρόλο στην αντοχή σε κόπωση του κομματιού. Με βάση πρόσφατες έρευνες η αντοχή σε κόπωση του δοκιμίου μειώθηκε με την αύξηση του λόγου ταχύτητας/περιστροφή (v/ω) εξαιτίας της προοδευτικής αύξησης του μη-αναδευθέντος υλικού από την ακίδα του εργαλείου. Όταν παρουσιάζεται απόβλητο (γρέζι) στην επιφάνεια του υλικού εξαιτίας της μη σωστής ανάμειξης του υλικού αφαιρείται με μηχανική διαδικασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η περιοχή συγκόλλησης να είναι ανεξάρτητη από το λόγο v/ω . Παράλληλα, αν αφαιρεθεί ένα στρώμα πάχους 0,15 mm τόσο από την επάνω όσο και από την κάτω πλευρά του δοκιμίου αποκτάται αντοχή σε κόπωση όμοια με το μέταλλο βάσης.

· Με την αύξηση της ταχύτητας της κόλλησης αλλά διατηρώντας σταθερό το λόγο v/ω παρατηρήθηκε πως η αντοχή σε κόπωση του δοκιμίου παρέμεινε ανεπηρέαστη. Η παραπάνω παρατήρηση μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας FSW στην αντοχή σε κόπωση των προϊόντων είναι περίπλοκη και δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο κανόνων.

· Ενώ η αντοχή σε κόπωση για δοκίμια που υποβλήθηκαν στην διαδικασία συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης είναι κατώτερη από την αντίστοιχη του μετάλλου βάσης σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον με ελεγχόμενες συνθήκες,

παρατηρήθηκε πως το δοκίμιο βυθισμένο σε διάλυμα 3,5% NaCl παρουσιάζει παρόμοια αντοχή σε κόπωση με το μέταλλο βάσης.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η επιφανειακή διάβρωση σε συνδυασμό με την υφή της επιφάνειας του δοκιμίου επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα τα οποία ήρθαν ως επακόλουθα της διαδικασίας FSW είναι πολύ ενθαρρυντικά, γεγονός που θέτει τη διαδικασία ως πλήρως αξιόπιστη [558].

2.7.4 Θραύση

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι όλα τα προϊόντα που προήλθαν από συγκόλληση FSW παρουσιάζουν ελαττώματα, τα οποία ποικίλουν. Για παράδειγμα, κοινά ελαττώματα μπορούν να θεωρηθούν τα εξής: παρουσία ρωγμών εντός της συγκόλλησης αλλά και στην επιφάνεια της, ύπαρξη πόρων και μη απόλυτη κρυσταλλοποίηση. Κάθε κόλληση εξετάζεται ξεχωριστά αν ανταποκρίνεται στα πρότυπα αντοχής που υπάρχουν. Τα προϊόντα που δεν συμβαδίζουν με τα πρότυπα επιστρέφουν για επισκευή πριν αυτά προχωρήσουν στην παραγωγή. Οι συμβατικές μέθοδοι συγκόλλησης είναι οι κύριες πηγές επιρροής για τα πρότυπα αντοχής. Η διαδικασία FSW παράγει προϊόντα, τα οποία ανταποκρίνονται σε πολύ υψηλό βαθμό στα πρότυπα των υπόλοιπων τεχνικών συγκόλλησης. Ωστόσο, είναι λογικό λόγω των υψηλών απαιτήσεων των εφαρμογών στις οποίες απευθύνονται τα συγκεκριμένα προϊόντα (για παράδειγμα, στην αεροναυπηγική και στην αεροδιαστημική) να θεσπίζονται αυστηρότερα πρότυπα γι' αυτά [568].

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

Κατά το παρελθόν διεξήχθησαν πολλές έρευνες με αντικείμενο την επίδραση που έχει η διαδικασία FSW στο όριο θραύσης του υλικού. Από τις έρευνες σε κράματα 5005Al-H14, 6061Al-T6 και 7002Al-T6 παρατηρήθηκε ότι το όριο διαρροής είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο όριο του μετάλλου βάσης. Αντίθετα, σε πειράματα που διεξήχθησαν σε κράματα αλουμινίου 2024Al-T6 εξήχθη το αποτέλεσμα ότι το συγκολληθέν μέταλλο έχει χαμηλότερο όριο θραύσης.[460,554,555,569-572] Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα απεικονίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.5):

Πίνακας 2.5: Όριο θραύσης συγκολλήσεων FSW και μετάλλου βάσης[554]

Υλικό	Πάχος Πλάκας (mm)	Μέταλλο Βάσης	Ζώνη Ανάδευσης	TMAZ/HAZ
5005Al-H14	3	0,35	1,57	1,4
2024Al-T351	5	0,30	0,22	0,20
6061Al-T6	5	0,28	0,96	0,63
7002Al-T6	5	0,40	0,48	-

Παράλληλα, στον πίνακα διαφαίνεται ότι η ζώνη ανάδευσης παρουσιάζει μεγαλύτερο όριο διαρροής εν συγκρίσεις με τις ζώνες TMAZ και HAZ της συγκόλλησης.

Είναι άξιο αναφοράς ότι δεν υπάρχει καμιά λεπτομερής αναφορά σε οποιαδήποτε βιβλιογραφία σχετικά με το όριο θραύσης κάθε μικροδομής που παράγεται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης. Με δεδομένο ότι η μικροδομή της κάθε περιοχής επηρεάζεται ιδιαίτερα κατά τη διαδικασία FSW, είναι αναγκαίο να αντιληφθούμε το ρόλο που διαδραματίζουν τα χαρακτηριστικά κάθε μικροδομής στο όριο θραύσης μιας συγκόλλησης που έχει δημιουργηθεί με FSW. Αναφορικά με τα κράματα υψηλής αντοχής που συναντιούνται στο εμπόριο κατηγοριοποιούνται τρία είδη μορίων με σκληρυντικές ιδιότητες: μεγάλα σκληρυντικά μόρια της τάξης των 5-30μm, σκληρυντικά συστατικά διεσπαρμένα μόρια της τάξεως των 0,2-0,5μm και συστατικά σκλήρυνσης νανομετρικού μεγέθους (nm).[573]

Κατά τη συγκόλληση FSW παρουσιάζεται έλλειψη των δύο πρώτων, 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 του αναδευόμενου μετάλλου. Οι μελετητές ύστερα από αρκετά πειράματα ανέπτυξαν μια εξίσωση, η οποία προσδιορίζει το όριο διαρροής σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση καταπόνησης. [574]

$$K_{ic} = [\frac{1}{2} E_s \sigma_y W (\frac{D}{S_{SB}}) \epsilon_{SB}^c]^{1/2}$$

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

Άλλες έρευνες πρότειναν την ακόλουθη σχέση για κράματα που υπόκεινται σε ψευδο-ενδοκρυσταλλική θραύση:[575]

$$K_{ic} = [\frac{E \sigma_{PFZ} \epsilon_f d_{PFZ}}{C S_{SB}}]^{1/2}$$

Όπου d_{PFZ} είναι το πλάτος της ζώνης μηδενικών σκληρυντικών συστατικών (PFZ), ϵ_f είναι το όριο θραύσης, σ_{PFZ} είναι το κρίσιμο σημείο ελαστικότητας στη ζώνη PFZ και το c είναι μια σταθερά [576].

Αποτελέσματα που εξήχθησαν από έρευνες μας οδήγησαν στο συμπέρασμα πως το χαμηλό όριο θραύσης οφείλεται στην παρουσία μιας στενής και μαλακής ζώνης στην οποία δεν συναντάμε σκληρυντικά συστατικά μεγάλου μεγέθους κόκκων. Μια άλλη ενδιαφέρουσα πρόταση υποστηρίζει πως το κρίσιμο στάδιο για τον έλεγχο του ορίου θραύσης είναι ο έλεγχος για την παρουσία κενών εντός της περιοχής συγκόλλησης. Είναι αποδεκτό ότι τα μόρια του κράματος παρουσιάζουν μια αλληλεπίδραση μεταξύ τους, η οποία με κατάλληλο τρόπο διευκολύνει την δημιουργία κενών περιοχών ανάμεσα τους. Το όριο θραύσης σ για τα μόρια του κράματος σχετίζεται με το μέγεθος d και την ενέργεια επιφάνειας g, το οποίο αναπαρίσταται στον εξής τύπο:

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

Όπου q ορίζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης έντασης σε κάθε μόριο του κράματος. Συνεπώς, είναι ευκόλως αντιληπτό ότι η αύξηση της δύναμης των δεσμών μεταξύ των μορίων και η μείωση του μεγέθους των κόκκων αυξάνει το όριο θραύσης της συγκόλλησης.[577]

Περαιτέρω ανάλυση στη μικροδομή μας καταδεικνύει ότι το όριο θραύσης του αλουμινίου μπορεί να αναλυθεί ορθολογιστικά. Η διαδικασία FSW παράγει μια 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 μεταξύ των κόκκων

Η δομή μικρών κόκκων τείνει να αυξάνει το όριο θραύσης του κράματος, ενώ τα μεγάλα κενά ανάμεσα τους καθώς και το χαμηλό σημείο ελαστικότητας οδηγούν στην μείωση του. Η συνολική επίδραση όλων των προαναφερθέντων παραγόντων είναι το όριο θραύσης της ζώνης ανάδευσης και είναι ίσο ή υψηλότερο από αυτό του μετάλλου βάσεως ανάλογα με τη σύσταση του κράματος και τις παραμέτρους της διαδικασίας FSW. Χαμηλό όριο θραύσης παρουσιάζουν οι περιοχές HAZ αλλά και TMAZ και οφείλεται στην παρουσία πεπλατυσμένων ζωνών PFZ σε αυτές [495,504,518].

2.7.5 Διάβρωση

Σε προηγούμενο μέρος της παρούσας εργασίας επισημάνθηκε ότι κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης παρατηρείται η δημιουργία τριών ζωνών διαφορετικής μικροδομής: τη ζώνη ανάδευσης, την HAZ και την TMAZ, πέρα από τη μικροδομή του μετάλλου βάσεως. Εξαιτίας της διαφορετικής μικροδομής που παρατηρείται οι ζώνες παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στο φαινόμενο της διάβρωσης. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά απέναντι στη διάβρωση των κολλήσεων τριβής μέσω ανάδευσης. Οι ερευνητές ασχολήθηκαν εξονυχιστικά με τη συμπεριφορά σε διάβρωση των συγκολληθέντων κραμάτων με συγκόλληση τριβής και την συνέκριναν με την αντίστοιχη συμπεριφορά κραμάτων που συγκολλήθηκαν με την μέθοδο GTAW (συγκόλληση τόξου αερίου/βολφραμίου). Από αυτή τη σύγκριση εξήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα[460,497,579-587]:

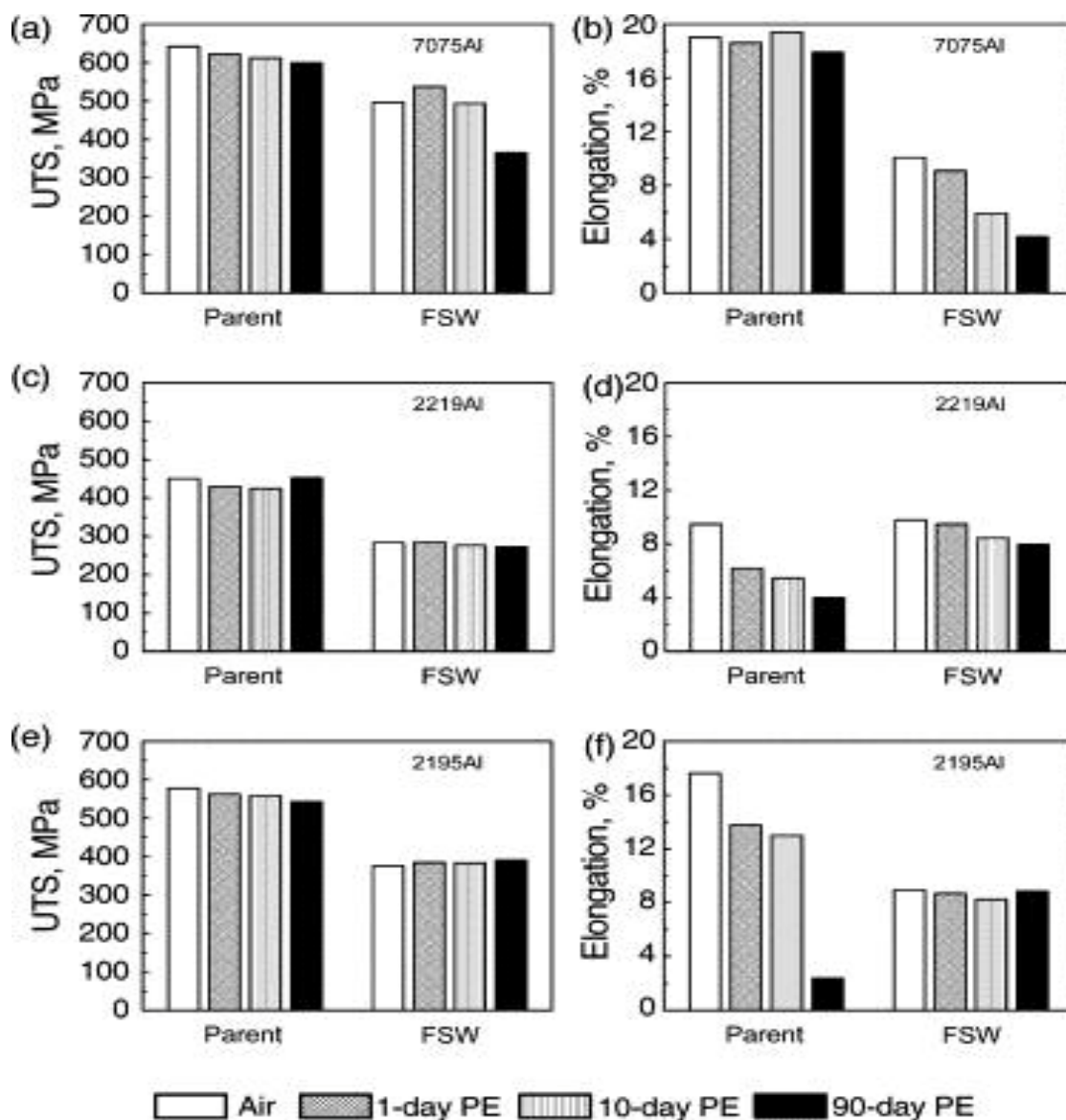
1. Η διάβρωση στα δείγματα που είχαν υποστεί συγκόλληση τριβής παρουσιάζεται στις περιοχές HAZ, ενώ στα δείγματα GTAW η διάβρωση παρουσιάζεται σε μια μεγάλη περιοχή στη ζώνη τήξεως σε δένδροειδή μορφή.
2. Οι συγκολλήσεις τριβής μέσω ανάδευσης δείχνουν μεγαλύτερη αντίσταση απέναντι στη διάβρωση από ότι το μέταλλο βάσης και τα δείγματα GTAW. Αν και οι διαφορές στην διαβρωτική συμπεριφορά δεν είναι μεγάλες διαπιστώθηκε η τάση διάβρωσης των δειγμάτων FSW να είναι μεγαλύτερη στην πάροδο του χρόνου.
3. Στη δοκιμή αντοχής απέναντι στη θραύση από διάβρωση (stress corrosion cracing) τα δείγματα συγκόλλησης τριβής καθώς και το μέταλλο βάσης δεν έδειξαν να υποκύπτουν σε SCC μετά την παραμονή τους για 20 μέρες σε διάλυμα NaCl ακόμη και όταν πολώθηκαν στα +60mV. Αντίθετα, στις δοθείσες συνθήκες τα κράματα GTAW έσπαγαν.
4. Δοκιμές αργής αναλογίας καταπόνησης (slow strain rate test) έδειξαν ότι και τα τρία είδη δειγμάτων τα οποία είχαν πολωθεί παρουσίασαν μια μείωση στην ολκιμότητα τους. Με αυτό τον τρόπο καταδεικνύεται ότι είναι δυνατή η SCC. Η μείωση στην

ολκιμότητα των δειγμάτων συγκολλησης τριβής ήταν χαμηλότερη από την αντίστοιχη στα δείγματα GTAW.

Σε έρευνα που έγινε από Έλληνες ερευνητές πραγματοποιήσαν τα εξής πειράματα:

1. Λυγισμός τεσσάρων σημείων με διαφορετικές δυνάμεις φορτίων υπό συνθήκες Al-alternate immersion εντός διαλύματος 3,5% NaCl για 90 μέρες
2. Πειράματα αργής αναλογίας καταπόνησης (SSRT) διεξήχθησαν σε δείγματα τα οποία είχαν εκτεθεί προ των δοκιμών σε συνθήκες AI εντός διαλύματος 3,5% NaCl. Το πρώτο είδος δοκιμών δεν παρουσίασε δημιουργία ρωγμών λόγω διάβρωσης στα δείγματα και γι' αυτό μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι δεν υπόκεινται σε SCC.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.14) παρουσιάζεται το είδος των δευτέρων δοκιμών.

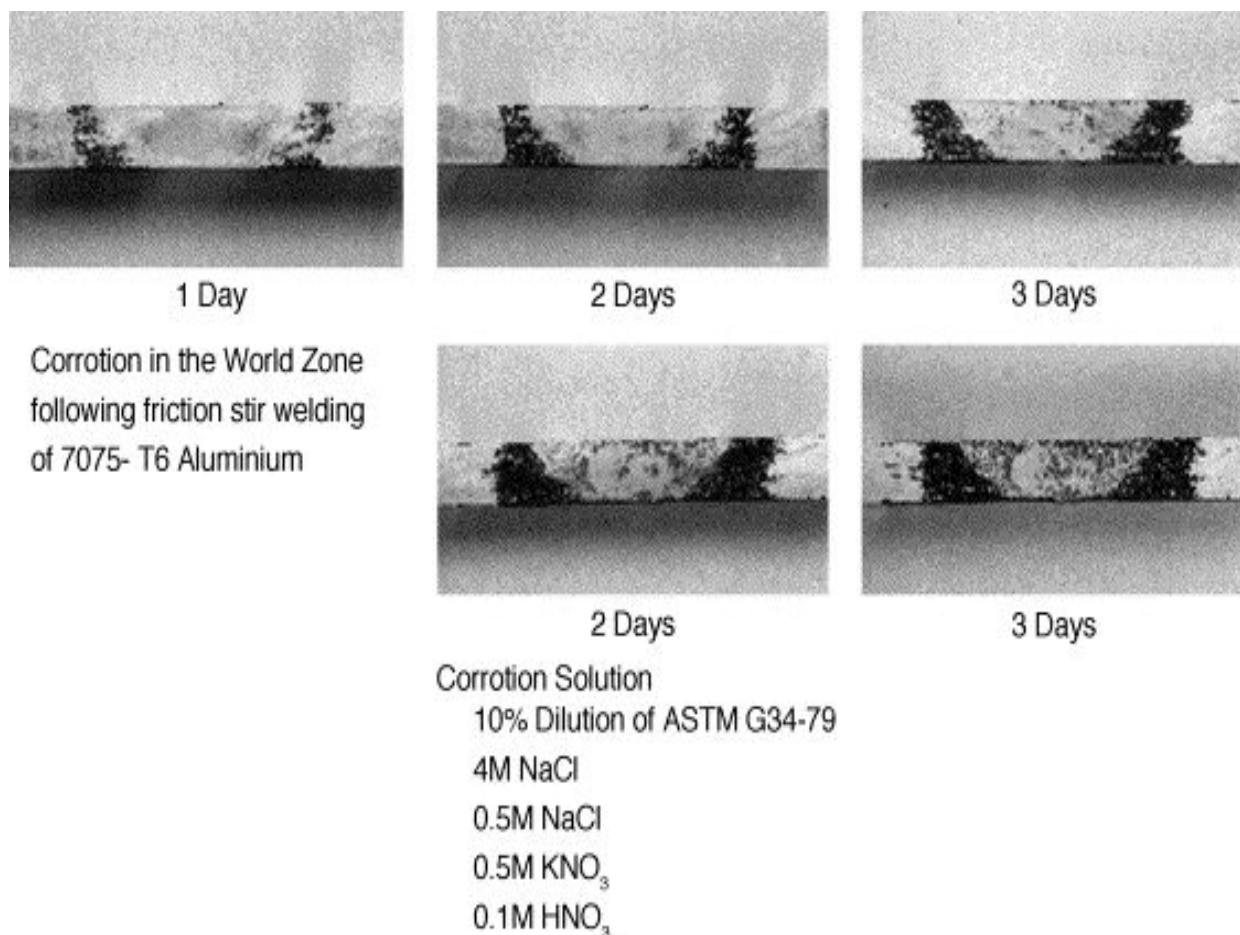


Σχήμα 2.14: Διάγραμμα αντοχής σε εφελκυσμό και ποσοστό ολκιμότητας δοκιμών SSRTFSW με μέταλλα βάσης (a,b) 7075Al (c,d) 2219Al και (e,f) 2195^A [481]

Με βάση τον παραπάνω σχήμα οι ερευνητές οδηγήθηκαν στα εξής συμπεράσματα:

Κάτω από σκληρές δοκιμές SSRT τα κράματα FSW 2219Al και 2195Al εξακολουθούν να μην δείχνουν ότι ενδίδουν σε SCC, ενώ αντίθετα τα κράματα FSW 7077Al παρουσίασαν μειωμένη ολκιμότητα καθώς αυξανόταν ο χρόνος PE.

Οι έρευνες αυτές παρουσίασαν ότι οι συγκολλήσεις κραμάτων 7075Al, 7010Al, 2024Al και 7050Al είναι πιθανότερο να υποστούν ενδοκοκκώδη προσβολή από το μέταλλο βάσης.[588,589] Η τυπική προσβολή από διάβρωση κράματος 7075Al-T651 με τη βοήθεια διαβρωτικού διαλύματος απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.15)



Σχήμα 2.15: Προβολή της διάβρωσης κράματος 7075Al-T651[582]

Έπειτα από έκθεση 24 ωρών του δοκιμίου στο διαβρωτικό διάλυμα η διάβρωση εμφανίστηκε συγκεντρωμένη στην περιοχή HAZ και στα εξωτερικά όρια της TMAZ. Ανεπηρέαστη παρουσιάζεται η ζώνη ανάδευσης καθώς και το μέταλλο βάσης. Αφήνοντας το δοκίμιο εκτεθειμένο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα η διάβρωση έγινε πιο έντονη στην αρχικά προσβεβλημένη περιοχή με αισθητή προσβολή αυτή τη φορά στην περιοχή TMAZ. Εν τέλει, η διάβρωση έφτασε και στη ζώνη ανάδευσης μετά από το πέρας τριών εικοσιτετράωρων συνεχούς έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα [460,579,583].

Από τις προαναφερθείσες έρευνες καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η περιοχή στην ζώνη HAZ ήταν πιο αδύναμη απέναντι σε διάβρωση. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι εκτός από τη χημική σύσταση του κράματος καίριο ρόλο παίζει και η μικροδομή των περιοχών στη συμπεριφορά των κραμάτων FSW απέναντι στη διάβρωση.

2.7.6 Εφαρμογές της FSW

Οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές έχουν αναφερθεί από πολλές βιομηχανίες και μερικά επιλεγμένα παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω δείχνοντας την ευρεία γκάμα της εφαρμογής της διαδικασίας. Ο παρακάτω κατάλογος είναι αντιπροσωπευτικός αλλά όχι εξαντλητικός και θα πρέπει να τονιστεί ότι νέες εφαρμογές παρουσιάζονται συνεχώς. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης δεν περιορίζει το εύρος θερμοκρασίας για κράματα αλουμινίου. Οι εφαρμογές της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης κυμαίνονται από κρουγονικές θερμοκρασίες (π.χ. υγρό οξυγόνο και δεξαμενές υγρών καυσίμων για πυραύλους) ως ήπια αυξημένες θερμοκρασίες (π.χ. εναλλάκτης θερμότητας σε συστήματα θέρμανσης).

1. Θαλάσσιες εφαρμογές:

Θεωρείται πως η πρώτη εμπορική εφαρμογή της η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης ήταν η συγκόλληση αλουμινίου σειράς 6xxx για την χρήση σε εγκαταστάσεις κατάψυξης ψαριών για αλιευτικά σκάφη [83]. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών συγκόλλησης αλουμινίου σειράς 6xxx σε ταχύπλοα καθώς και σε κρουαζιερόπλοια, τα οποία με το πέρασ του χρόνου γίνονται συνεχώς ελαφρότερα χάρη στη χρήση υπερκατασκευών αλουμινίου.[84] Σε τέτοιες εφαρμογές τα πάνελ που προκύπτουν από τη συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης είναι πολύ επίπεδα λόγω της χαμηλής παραμόρφωσης αλλά και κόβονται και συγκολλούνται σε μεγαλύτερες δομές χρησιμοποιώντας και συγκολλήσεις MIG. Εκτενώς χρησιμοποιείται η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης στον τομέα των κρουαζιερόπλοιων καθώς μεγάλα μέρη τους αποτελούνται από υπερδομές αλουμινίου, όπως για παράδειγμα στο πλοίο με τίτλο «Seven Seas Navigator» το οποίο περιέχει πολλά χιλιόμετρα συγκολλήσεων. Το σημαντικότερο παράδειγμα είναι το ιαπωνικό «Fast Ferry Ogasawara», το οποίο παραδόθηκε στο κοινό για πρώτη φορά το 2004 και στο οποίο έγινε εκτενής χρήση της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης στην υπερκατασκευή του[85].

2. Αεροδιαστημική:

Η πρώτη σημαντική εφαρμογή ήταν η χρήση της διαδικασίας για την αντικατάσταση συγκόλλησης με τήξη σε δεξαμενές καυσίμου για μη επανδρωμένα Delta II για πυραύλους Delta IV. [86-88] Ο κατασκευαστής (Boeing) έχει αναφέρει ότι η συγκεκριμένη διαδικασία παρουσιάζει μηδενικής επίπτωσης ελαττώματα καθώς και σημαντική εξοικονόμηση κόστους έναντι οποιασδήποτε άλλης συγκόλλησης. Παράλληλα, η διαδικασία έχει υιοθετηθεί για μεγάλες δεξαμενές καυσίμου στα διαστημικά λεωφορεία.[89-91] Επίσης, οι μεγάλοι κατασκευαστές ατράκτων διερευνούν την χρήση της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης για την αντικατάσταση πολλών πριτσινιών στις υπάρχουσες κατασκευές. Το πρώτο αεροσκάφος στο οποίο έγινε εκτενής χρήση της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης στην άτρακτο του ήταν το «Eclipse 500 Business Jet» που πρόσφατα πιστοποιήθηκε ολοκληρωτικά και τώρα βρίσκεται στο στάδιο της παραγωγής. Στο συγκεκριμένο αεροσκάφος πάνω από 7.300 συνδέσεις (περίπου το 60% του συνόλου) έχουν αντικατασταθεί από 263 FSW κολλήσεις.[92]

3. Βιομηχανία τρένων:

Τα τρένα υψηλής ταχύτητας, όπως η ιαπωνική «Shinkansen», τα οποία είναι κατασκευασμένα από σύνθετο διπλής επιφάνειας κράματος 6xxx αλουμινίου δεδομένου ότι οι συγκολλήσεις που τα ενώνουν είναι πολύ μεγάλες σε μήκος (έως 25 μέτρα) και ευθύγραμμες, γι' αυτό το λόγο η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης κρίνεται ως η ιδανική

διαδικασία καθώς παρουσιάζει χαμηλή παραμόρφωση στα προϊόντα συγκόλλησης της. [93,94,95]

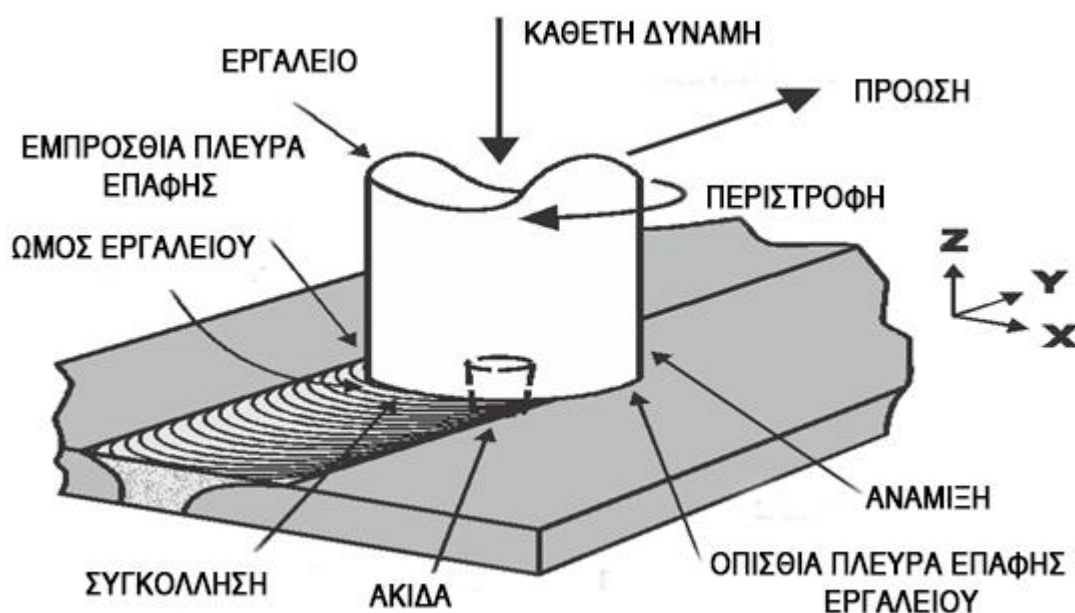
4. Αυτοκινητοβιομηχανία:

Υπάρχουν μερικές μεγάλες ευθείς συγκολλήσεις στα οδικά οχήματα και έτσι η υιοθέτηση της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης κρίθηκε μοναδική λύση για εξαρτήματα όπως μέρη ανάρτησης, τροχοί, καθίσματα, αερόσακοι κλπ.[96] Οι ανάγκες για μεγάλη παραγωγή και υψηλή ακρίβεια συγκολλήσεων έχουν οδηγήσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες στην υιοθέτηση ρομποτικών συγκολλήσεων τριβής μέσω ανάδευσης. Αποτέλεσμα αυτών ήταν η μείωση του κόστους παραγωγής και η αντιμετώπιση δύσκολων συγκολλήσεων σε πολύπλοκα σχήματα/όγκους. Μια από τις μεγαλύτερες αυτοκινητοβιομηχανίες που υιοθέτησαν τη συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης ήταν η Mazda, η οποία ήταν και πρωτοπόρος στις συγκολλήσεις τριβής στα σασί των αυτοκινήτων της. Επίσης, η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη συγκολλήσεων ελαφρών αρμάτων μάχης όπου το πάχος των υλικών ήταν 25-45 mm.[97,98]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΕΡΕΥΝΑ ΠΡΙΝ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΑΚΙΔΑΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

3.1. Εισαγωγή

Η τριβή συγκόλλησης είναι μία τεχνική που εφευρέθηκε το 1991. Η βασική ιδέα της τριβής συγκόλλησης είναι απλή. Ένα περιστρεφόμενο εργαλείο με μια ειδικά σχεδιασμένη προεξοχή (ακίδα/ αναδευτήρα) και έναν ώμο τα οποία εισάγονται στα επαπτόμενα άκρα των πλακών ή φύλλων που επιθυμούμε να συγκολλήσουμε [701-103]. Η ακίδα ταξιδεύει κατά μήκος αυτής της γραμμής ένωσης, όπως αναπαριστώνται στο Σχήμα 3.1. Τα υλικά μαλακώνουν από την θερμότητα που δημιουργείται λόγω της τριβής και η ασκούμενη πίεση από τον ώμο συνενώνει το υλικό που βρίσκεται πίσω από το εργαλείο. [703-705] Η διαδικασία τριβής συγκόλλησης μέσω περιστροφής εμπεριέχει τη μετατόπιση ενός ειδικού εργαλείου μέσα στο υλικό κατά μήκος της ένωσης των δυο υλικών. Αυτό το είδος συγκόλλησης θεωρείται η πιο σημαντική εξέλιξη στην ένωση μετάλλων τις τελευταίες δεκαετίες. Είναι μία αναδυόμενη πράσινη τεχνολογία λόγω της ενεργειακής αποδοτικότητας (χαμηλή θερμική ισχύς), την αειφόρο χρήση των φυσικών πόρων (λιγότερα απόβλητα υλικού, μείωση του χρόνου, υψηλή ποιότητα συγκόλλησης, υψηλή απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής), τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (δεν απαιτούνται προστατευτικά αέρια), δεν έχουμε χρήση καυσίμων/αερίων/ή αναθυμιάσεων και οι απαιτήσεις καθαρισμού μειώνονται λόγω της ευελιξία της διαδικασίας (προσαρμοστικοί προσανατολισμοί συγκόλλησης και διαφορετικά πάχη, μικροδομές και συνθέσεις). [705-708] Η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης σαν διαδικασία πραγματοποιείται υπό θερμοκρασίες τήξεως του υλικού αποφεύγοντας έτσι κάποια τυπικά ελαττώματα που συναντώνται σε συγκολλήσεις (σύντηξης) όπως το ράγισμα, δημιουργία πόρων και απώλεια στοιχείων κράματος. Παρακάτω δίνεται σχήμα (Σχήμα 3.1) όπου απεικονίζει τη συγκεκριμένη διαδικασία.



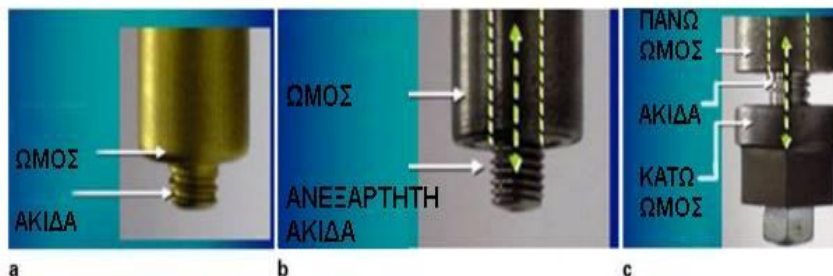
Σχήμα 3.1: Διαδικασία συγκόλλησης μέσω τριβής [701-703]

Στις μέρες μας, η συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης έχει γίνει μια πρακτική τεχνική ένωσης για κράματα αλουμινίου και άλλα χαμηλής αντοχής κράματα. Ωστόσο, για κράματα υψηλής αντοχής όπως τιτάνιο, νικέλιο, και ασάλι η οικονομικά αποδοτική συγκόλληση και η μεγάλη διάρκεια ζωής του εργαλείου παραμένει ως υποκείμενο για την έρευνα και την ανάπτυξη της διαδικασίας για την τεχνολογική βελτιστοποίηση της.

Οι κύριοι στόχοι των εργαλείων συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης είναι η θέρμανση του υλικού που θέλουμε να κατεργαστούμε, η τοπική ρευστοποίηση του υλικού, η ροή του και η παραμονή του κάτω από τον ώμο του εργαλείου. Η θερμότητα δημιουργείται από την τριβή του περιστρεφόμενου εργαλείου που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια που θέλουμε να συγκολλήσουμε. Η τοπική θέρμανση μαλακώνει το υλικό γύρω από την προεξοχή/ ακίδα. Η περιστροφή και η πρόωση του εργαλείου προκαλούν την μετακίνηση του υλικού γύρω από την ακίδα. Λόγω των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εργαλείων, η κίνηση του υλικού γύρω από την ακίδα μπορεί να γίνει πολύ σύνθετη και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της ακίδας.[708]

3.2 Τύποι εργαλείων

Υπάρχουν τρία είδη εργαλείων συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης: σταθερά, ρυθμιζόμενα και αυτόνομα, όπως αναπαριστώνται στο σχήμα 3.2. Η σταθερή ακίδα αντιστοιχεί σε ένα ενιαίο κομμάτι που περιλαμβάνει και τον ώμο και την ακίδα. (Σχήμα 3.2).[709-711] Αυτό το εργαλείο μπορεί να συγκολλήσει μόνο ένα κατεργαζόμενο τεμάχιο με ένα σταθερό πάχος λόγω του σταθερού μήκους της ακίδας.



a Σταθερή, b Μεταβλητή, c Με μπομπίνα

Σχήμα 3.2: Είδη εργαλείων [705]

Εάν η ακίδα φθαρεί σημαντικά ή σπάσει πρέπει να αντικατασταθεί όλο το εργαλείο. Σαν ένα ακραίο παράδειγμα του σταθερού εργαλείου για το friction stir spot welding (FSSW) είναι ένα εργαλείο FSSW το οποίο αποτελείται από ένα μόνο ώμο χωρίς ακίδα.[709-711]

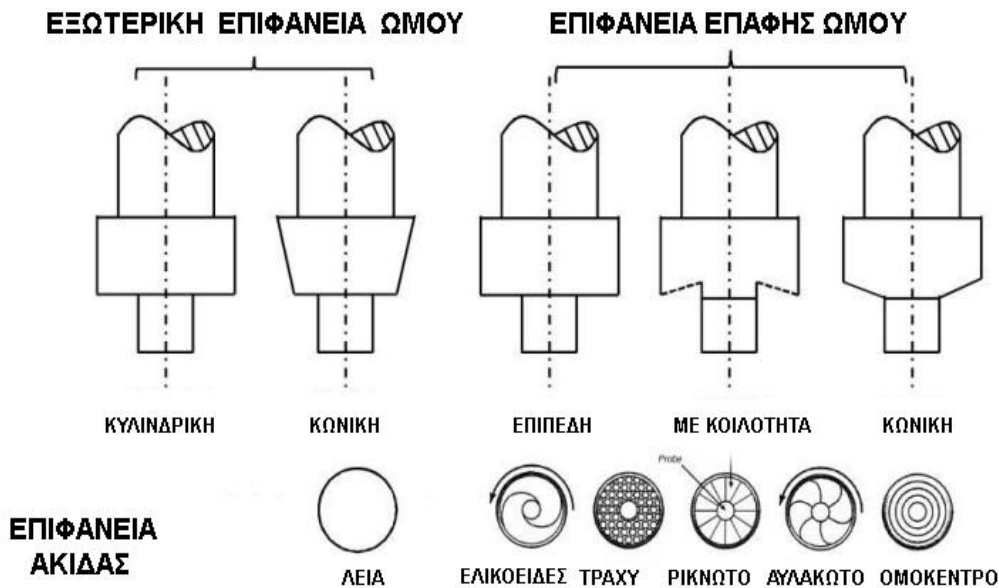
Το μεταβλητό εργαλείο αποτελείται από δυο ξεχωριστά κομμάτια, δηλαδή ξεχωριστό ώμο και ακίδα, για να επιτρέπει τη ρύθμιση του μήκους της ακίδας κατά τη διάρκεια FSW (Σχήμα 3.2b). Σε αυτό το σχέδιο, ο ώμος και η ακίδα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά έτσι ώστε η ακίδα να μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί όταν φθαρεί ή καταστραφεί.[712,713] Επιπλέον, το ρυθμιζόμενο μήκος μπορεί να επιτρέψει τη συγκόλληση διαφορετικών ή ακόμη και πολλαπλών παχών επιφανειών και την εφαρμογή μεθόδων για το γέμισμα του κενού της τρύπας εξόδου του εργαλείου που μένει στο τέλος

της συγκόλλησης.[714,715] Τόσο το σταθερό όσο και το ρυθμιζόμενο εργαλείο συχνά απαιτούν να υπάρχει αμόνι στήριξης (γνωστή και ως τράπεζα στήριξης μηχανής). Το εργαλείο τύπου μπομπίνα (Σχήμα 3.2c) αποτελείται από τρία μέρη: τον πάνω ώμο, την ακίδα και τον κάτω ώμο. Αυτό το εργαλείο μπορεί να φιλοξενήσει αρθρώσεις διαφορετικού πάχους ένωσης μεταξύ του άνω και κάτω ώμου.[716] Δεν απαιτείται υποστηρικτικό αμόνι αλλά ο τύπος εργαλείου μπομπίνα μπορεί να δουλέψει αποκλειστικά κάθετα στην επιφάνεια εργασίας. Σε αντίθεση, τα σταθερά και τα μεταβλητά εργαλεία μπορούν να γέρουν κατά μήκος και πλαγίως.[716-717]

3.3 Σχήματα εργαλείων

3.3.1 Σχήματα Ωμων

Οι ώμοι είναι σχεδιασμένοι να θερμαίνουν μέσω της τριβής τις περιοχές της επιφάνειας εργασίας, να παράγουν την κάθετη ασκούμενη δύναμη που είναι απαραίτητη για την σταθεροποίηση της συγκόλλησης και να περιορίζουν το πλαστικοποιημένο μέταλλο κάτω από την επιφάνεια του ώμου(πατούρα). Το Σχήμα 3.2 συνοψίζει την τυπική εξωτερική επιφάνεια των ώμων, τις επιφάνειες των κάτω άκρων και τα τελικά χαρακτηριστικά. Η εξωτερική επιφάνεια του ώμου συχνά έχει κυλινδρικό σχήμα, αλλά περιστασιακά, χρησιμοποιείται και κωνικό σχήμα. Γενικά, αναμένεται ότι το σχήμα της εξωτερικής επιφάνειας του ώμου (κυλινδρικό ή κωνικό) έχει μια ασήμαντη επιρροή στην ποιότητα γιατί το βάθος εισχώρησης είναι σχετικά μικρό (1-5% του πάχους της συγκόλλησης).[424] Είναι άξιο αναφοράς πως έχει δημοσιευθεί πρόσφατα μια ερευνα σχετικά με τη συγκόλληση ήχου[710], η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο με ώμο αλλά χωρίς ακίδα στο οποίο η κάτω επιφάνεια του ώμου σύρεται στην επιφάνεια του υλικού δημιουργώντας έτσι συχνότητες οι οποίες προκαλούν συγκόλληση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3 χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις τύποι επιφανειών στο άκρο του ώμου. Από αυτούς, η επίπεδη επιφάνεια στην άκρη του ώμου είναι το πιο απλό σχέδιο. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι ότι η επίπεδη αυτή επιφάνεια στην άκρη του ώμου δεν είναι αποτελεσματική στο να παγιδεύει το ρευστό μεταλλικό υλικό κάτω από τον πάτο του ώμου οδηγώντας έτσι στην παραγωγή λάμψης στο περιττό υλικό. Για αυτό το σκοπό, ένα κοίλο άκρο ώμου έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για τον περιορισμό του προεξέχοντος υλικού (γρέζι) πλευρικά από τον ώμο.[718-720] Το κοίλο άκρο του ώμου έχει κλήση μόνο μια μικρή γωνία (6-10°) από την επίπεδη επιφάνεια στο τέλος του ώμου. Όταν το εργαλείο βυθίζεται, το υλικό που εκτοπίζεται από την προεξοχή/ακίδα μεταφέρεται στην κοιλότητα του ώμου. Έτσι, η κοίλη επιφάνεια χρησιμεύει ως ένας χώρος διαφυγής του προεξέχοντος υλικού (γρέζι) από την προεξοχή/ακίδα. Ασκώντας κάθετη πίεση στο εργαλείο, το εκτοπισμένο υλικό που εγκλωβίζεται στο κοίλο άκρο του ώμου, δημιουργεί μια σφυριλατική δράση πίσω από το εργαλείο.[723-727] Τότε η κίνηση πρόωσης του εργαλείου εξαναγκάζει το πλαστικοποιημένο υλικό να περιστρέφεται μέσα στην κοιλότητα του ώμου και πιέζει το υλικό αυτό στο πίσω μέρος της προεξοχής/ακίδας. Παρακάτω παρατίθεται σχήμα (Σχήμα 3.3) όπου διακρίνονται τα σχήματα ώμων αλλά και τα χαρακτηριστικά τους με λεπτομέρεια.[728]



3

Σχήμα 3.3: Σχήματα ώμων και χαρακτηριστικά [703]

Η σωστή λειτουργία αυτού του ώμου απαιτεί την κλίση του εργαλείου $1-3^\circ$ από την κανονική τοποθέτηση του κομματιού κατεργασίας κατά τη διεύθυνση της πρόωσης. Αυτό είναι απαραίτητο για να περιορίσει το πλαστικοποιημένο υλικό που περιορίζεται στην κοιλότητα του ώμου και να δημιουργήσει μια δύναμη σφυρηλάτησης πάνω στην επιφάνεια που συγκολλείται.[721-723] Ως αποτέλεσμα αυτού δημιουργείται μεγαλύτερη δύναμη σφυρηλάτησης και υδροστατικών πιέσεων, τα οποία βελτιώνουν την ανάδευση του υλικού και την ακεραιότητα του όγκου.

Ένα άλλο πιθανό σχήμα ώμου είναι ο κυρτός.[724,725] Πρόσφατες προσπάθειες στο TWI για την κυρτή επιφάνεια στο άκρο του ώμου ήταν ανεπιτυχείς επειδή το κυρτό προφίλ εξανάγκαζε το υλικό να απομακρύνεται από την ακίδα δημιουργώντας μεγάλες ποσότητες αποβλήτου (γρέζι). Παρόλα αυτά, έχει αναφερθεί ότι η λεία κυρτότητα στην επιφάνεια του άκρου του ώμου με 5 mm διάμετρο ήταν επιτυχής στη συγκόλληση φύλλων κράματος AZ31 Mg πάχους 4mm.[726]

Αν και το κύριο πλεονέκτημα του κυρτού προφίλ ώμου είναι ότι μπορεί να επιτύχει επαφή με το κομμάτι εργασίας σε οποιαδήποτε θέση κατά μήκος της κυρτής επιφάνειας του άκρου και ως εκ τούτου να παρουσιάσει διαφορές στην τραχύτητα ή στο πάχος μεταξύ των δυο υλικών που θέλουμε να συγκολλήσουμε, η ανικανότητα της λείας επιφάνειας του άκρου να αποτρέψει την απομάκρυνση του υλικού από την ακίδα προκαλεί προβλήματα ακεραιότητας στη συγκόλληση.[727]

Η επιφάνεια του ώμου μπορεί επίσης να περιέχει κάποια χαρακτηριστικά για την αύξηση της τριβής του υλικού, της διαμηκτικής παραμόρφωσης και υψηλότερη ποιότητα συγκόλλησης.

Τα τυπικά στυλ άκρων των ώμων περιλαμβάνουν: επίπεδο (λείο ή χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά), σχήμα κυλινδρικό, με κορυφή, αυλακώσεις και ομόκεντρους κύκλους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να εφαρμοστούν σε κοίλη, επίπεδη ή κυρτή επιφάνεια άκρου ώμου. Το κυλινδρικό σχήμα (σαν πάπυρος) είναι το πιο

συχνά χρησιμοποιούμενο χαρακτηριστικό ώμου. Αποτελείται από άκρο με επίπεδη επιφάνεια και ένα σπειροειδές κανάλι από την άκρη προς το κέντρο . Τα κανάλια βοηθούν να κυλίσει το υλικό από το άκρο του ώμου μέχρι την προεξοχή/ακίδα εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για την κλίση του εργαλείου. Το κοίλο άκρο του ώμου τείνει να ανυψώνεται από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης μέσω τριβής και ανάδευσης με μεγάλη ταχύτητα επειδή το υλικό που αναδύεται παγιδεύεται συνεχώς στην κοιλότητα κάτω από τον ώμο , όπως έχει ήδη περιγραφεί. Ωστόσο, ο κοίλος ώμος σε συνδυασμό με ένα κυλινδρικό χαρακτηριστικό μπορούν να μειώσουν την ανύψωση του εργαλείου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης μεγάλης ταχύτητας.[726] Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του κοίλου ώμου είναι η εξάλειψη του ελαττωμάτων όπως η χάραξη της επιφάνειας του κατεργαζόμενου υλικού που παράγεται από το κοίλο εργαλείο και η μείωση του φαινόμενο λάμψης στην επιφάνεια της συγκόλλησης.

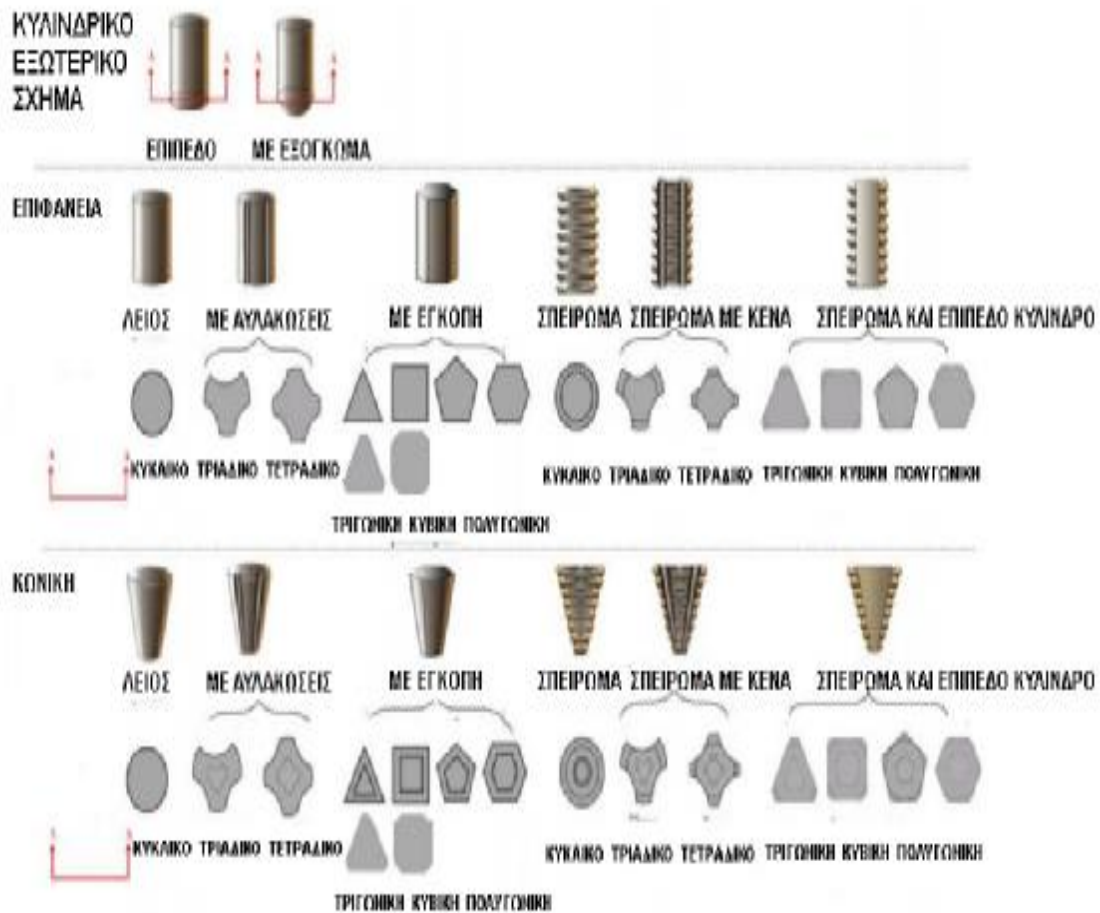
Το υλικό μέσα στα κανάλια (επανεισαγόμενα χαρακτηριστικά) είναι επίσης συνεχώς κινούμενο από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου κομματιού αυξάνοντας έτσι την παραμόρφωση και την θερμότητα τριβής στην επιφάνεια. Επιπλέον, ο συνδυασμός του κοίλου άκρου επιφάνειας με το σχέδιο του κυρτού ώμου αποτρέπει την μετακίνηση του υλικού μακριά από την προεξοχή/ακίδα και εκμεταλλεύεται την μεγαλύτερη ελαστικότητα στην περιοχή επαφής μεταξύ του ώμου και του κομματιού εργασίας, το οποίο στη συνέχεια βελτιώνει την αντοχή της ένωσης, αυξάνει την ευκολία ένωσης διαφορετικών παχών και προωθεί την ικανότητα συγκόλλησης πολύπλοκων επιφανειών.[705,731,732]

3.3B Σχήματα Προεξοχής/Ακίδας

Η ακίδα ανάδευσης τριβής μπορεί να παράγει θερμότητα τριβής με επακόλουθο και την παραμόρφωση. Κάθε εργαλείο σχεδιάζεται με στόχο την ανάδευση του ρευστοποιημένου μέταλλου από την θερμότητα τριβής καθώς επίσης και την ομοιόμορφη διανομή του στο οπίσθιο άκρο της ακίδας. Το βάθος της δεισδύσης η παραμόρφωση και η ταχύτητα κίνησης του εργαλείου εξαρτώνται από τον σχεδιασμό της ακίδας.[701]

Το σχήμα 3.4 συνοψίζει τα σχήματα ακίδων και τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Το σχήμα του ώμου της ακίδας είναι είτε επίπεδο είτε θολωτό. Το σχέδιο ακίδας με επίπεδη άκρη που δίνει έμφαση στην ευκολία κατασκευής είναι σήμερα η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη φόρμα.[733,734] Το κύριο μειονέκτημα της επίπεδης ακίδας είναι η υψηλή δύναμη σφυρηλάτησης που απαιτείται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Αντίθετα, ένα στρογγυλό ή θολωτό άκρο ακίδας μπορεί να μειώσει τη δύναμη σφυρηλάτησης και τη φθορά του εργαλείου κατά τη βύθιση, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του εργαλείου και εξαλείφοντας την τοπική συγκέντρωση τάσης αλλά και βελτιστοποιεί την ποιότητα της συγκόλλησης καθ' όλο το πάχος της.[735] Αυτά τα οφέλη μεγιστοποιούνται όταν η ακτίνα του θόλου είναι το 75% της διαμέτρου της ακίδας. Καθώς η ακτίνα του θόλου μειώνεται, η ποιότητα της συγκόλλησης συχνά συρρικνώνεται.[735] Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί με βάση την επιφανειακή ταχύτητα της περιστρεφόμενης κυλινδρικής ακίδας η οποία αυξάνεται από μηδέν στο κέντρο σε μια μέγιστη τιμή στην άκρη του εργαλείου. Η τοπική επιφανειακή ταχύτητα σε συνδυασμό με τον συντελεστή τριβής επιφάνειας μεταξύ της ακίδας και του μετάλλου καθορίζει την παραμόρφωση κατά τη διάρκεια τριβής ανάδευσης. Η υψηλότερη επιφανειακή ταχύτητα στο άκρο της ακίδας μπορεί να αυξήσει την δύναμη ανάδευσης της και ως εκ τούτου να προωθήσει την ροή του μετάλλου κάτω από την ακίδα. Το κατώτερο σημείο του στρογγυλού πυθμένα της ακίδας έχει την ελάχιστη ταχύτητα και την ελάχιστη

δράση ανάδευσης. Πιο κάτω δίνεται σχήμα (Σχήμα 3.4) όπου παρουσιάζονται σχήματα ακίδων για FSW .[737]



4

Σχήμα 3.4: Σχήματα ακίδων FSW [704]

Οι ακίδες συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης συνήθως έχουν κυλινδρική εξωτερική επιφάνεια, αλλά ένα κωνικό εξωτερικό σχήμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.[738] Ειδικότερα, οι κυλινδρικές ακίδες έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί για την ένωση πλακών έως 12 χιλιοστών, αλλά και για παχύτερες πλάκες το εύρος δράσης της διαδικασίας γίνεται περιορισμένο για την διατήρηση της ακεραιότητας της συγκόλλησης (χαμηλή ταχύτητα πρόωσης, υψηλή ταχύτητα περιστροφής). Με την κωνική ακίδα, η υψηλότερη θερμοκρασία τριβής προκαλεί αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης εξαιτίας της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής της ακίδας με το τεμάχιο μας.[739] Η κωνική ακίδα επίσης εξασφαλίζει την υψηλή υδροστατική πίεση στη ζώνη της συγκόλλησης, που είναι εξαιρετικά σημαντική για την ενίσχυση της ανάδευσης του υλικού και την ακεραιότητα της συγκόλλησης.[740] Παρόλα αυτά, η υψηλή θερμοκρασία και η υδροστατική πίεση μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρή φθορά του εργαλείου. Οι εξωτερικές επιφάνειες της ακίδας μπορούν επίσης να έχουν διαφορετικά σχήματα και χαρακτηριστικά όπως σπείρωμα, επίπεδο ή αυλακωτά. Οι ακίδες χωρίς σπείρες επιλέγονται για υψηλή αντοχή ή λειαντικά

κράματα καθώς τα σπειρωτά παρουσιάζουν εύκολα φθορά. Οι σπειρωτές ακίδες έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ροής του υλικού ως σημείο αναφοράς. Παρόλα αυτά , οι ακίδες με σπείρα χρησιμοποιούνται κυρίως για συγκολλήσεις τριβής μέσω ανάδευσης. Ειδικότερα, μια αριστερόστροφα σπειρωτή ακίδα με φορά δεξιόστροφη περιστροφής , παρασύρει το υλικό και το οδηγεί προς τον πάτο. Το υλικό μπορεί να κυκλοφορεί πολλές φορές γύρω από το εργαλείο πριν να τοποθετηθεί πίσω του. Αυτό το φαινόμενο διευκολύνει την ανάδευση του υλικού και διαβεβαιώνει την εξάλειψη δημιουργίας οξειδίων στο κέντρο της συγκόλλησης . Η προσθήκη επίπεδων εγκοπών στην επιφάνεια της ακίδας μπορεί να αλλάξει την κίνηση του υλικού γύρω από την ακίδα. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη τοπική παραμόρφωση και στην τριβώδη ροή του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από την ακίδα αλλά και στις εσοχές των εγκοπών της επιφανείας της ακίδας οι οποίες λειτουργούν ως προωθητήρες-μετατοπιστές.[730,739]

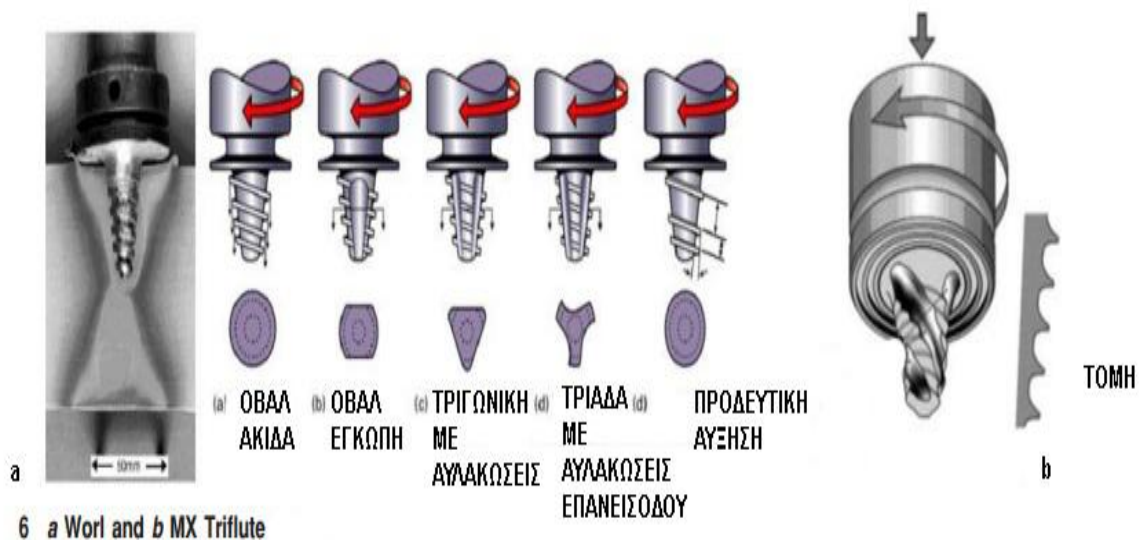
Έχει αποδειχθεί ότι η μείωση της εγκάρσιας δύναμης και της ροπής του εργαλείου είναι ανάλογη του αριθμού των επίπεδων εγκοπών οι οποίες είναι τοποθετημένες στον κωνικό ώμο.[730] Τα σχήματα της κωνικής ακίδας είναι τα εξής: Μη-σπειρωτή, σπειρωτή και σπειρωτή με εγκοπες. Διαπιστώθηκε ότι η μη σπειρωτή δημιουργούσε κενά στη συγκόλληση ενώ οι δυο άλλες δημιουργούσαν μια πλήρως ενοποιημένη συγκόλληση. Επίπεδες εγκοπές λειτουργούν ως αναδευτήρες οι οποίοι μετακινούν μεγαλύτερο όγκο υλικού.[740] Το υλικό παγιδεύεται ανάμεσα από αυτά τα τμήματα και ύστερα από περίπου μισή περιστροφή απελευθερώνεται πίσω από το εργαλείο , αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της ανάμειξης. Η προσθήκη των επίπεδων τμημάτων έδειξε επίσης να αυξάνει την θερμότητα. Οι ακίδες με σπείρωμα λειτουργούν παρόμοια για να παγιδεύουν το υλικό στις αυλακώσεις προωθώντας το προς τα κάτω και δημιουργώντας αναπόσπαστη συγκόλληση. Λόγω της προόδου στην κατανόηση της ροής του υλικού , η γεωμετρία του εργαλείου έχει εξελιχθεί σημαντικά.[741-743] Η συμβατικά κυλινδρική σπειρωτή ακίδα έχει χρησιμοποιηθεί για συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου έως 12 χιλιοστών. Για παχύτερες πλάκες, έχουν προστεθεί πιο πολύπλοκα χαρακτηριστικά στην ακίδα για να ευνοηθεί η ροή του υλικού και η ανάμειξη του μειώνοντας τις δυνάμεις κατεργασίας. Για παράδειγμα , το «Whorl and MX Triflute» εργαλείο έχει αναπτυχθεί από TW14 [744–746] και μπορεί να συγκολλήσει κράματα αλουμινίου έως 50-60 χιλιοστά σε πάχος (Σχήμα 3.5) Αυτά τα τυπικά χαρακτηριστικά του εργαλείου φαίνονται στο Σχήμα 3.6.

ΤΥΠΟΙ ΑΚΙΔΑΣ

ΠΑΧΟΣ mm	ΧΑΜΗΛΟΣ ΟΓΚΟΣ ΣΑΡΩΣΗΣ			ΥΨΗΛΟΣ ΟΓΚΟΣ ΣΑΡΩΣΗΣ	
	Cylindrical	Whorl™	MX Triflute™	Flared-Triflute™	Flared-Triflute™
6	Threaded for but joints			Whisk tip for lap joints	Asymmetrical probe for butt and lap joints
12					
50		Taper frustum auger for but joints	Helical flutes for but joints		
70					

5

Σχήμα 3.5: Τύποι ακιδών που έχουν αναπτυχθεί για διαφορετικό πάχος υλικών και τύπου ενώσεων από το TWI[706]









Σχήμα 3.6: Τύποι ακίδας «Worl» και «MX Triflute [706]

Επιπλέον, αυτά τα εργαλεία μπορούν να συγκολλήσουν σε πολύ υψηλές ταχύτητες, ενώ επιτυγχάνουν παράλληλα συγκολλήσεις με πολύ καλή ποιότητα της επιφάνειας της συγκολλησης. Τόσο η Whorl όσο και η MX Triflute ακίδα με κάθετους εγκοπες-μετατοπιστές μπορούν να μειώσουν τον όγκο της ακίδας και να επιτύχουν υψηλό βαθμό σάρωσης. Ως

κρίσιμη παράμετρος στο σχέδιο του εργαλείου συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης, ο βαθμός σάρωσης ορίζεται ως ο λόγος της δυναμικής του όγκου (όγκος σάρωσης από την ακίδα κατά τη διάρκεια της περιστροφής) ως προς τον στατικό όγκο (όγκος της ακίδας). Ο σχεδιασμός ενός εργαλείου με υψηλό βαθμό σάρωσης έχει παρατηρηθεί ότι μειώνει τα κενά και επιτρέπει στα οξειδία να διαταράσσονται και να διασπείρονται μέσα στο ψήγμα εξαιτίας της υψηλής ανάμειξης της ροής του υλικού. Συμβατικά στη FSW/P, ο δυναμικός όγκος προς τον στατικό όγκο, μπορεί να αυξηθεί μέσω της προσθήκης σπειρώσεων με αυλακώσεις στην ακίδα. Τυπικά, οι Worl και MX Triflute ακίδες μπορούν να μειώσουν τον εκτοπισμένο όγκο περίπου κατά 60-70%, όπως μπορούμε να δούμε στον πίνακα 3.1. Οι βαθμοί σάρωσης για συγκόλληση πλάκων πάχους 25 χιλιοστών είναι 1 προς 1 για συμβατική κυλινδρική ακίδα με σπείρα, 1 προς 8 για την Worl και 2 προς 6 για την MX Triflute ακίδα. Αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδίων για την Worl και MX Triflute ακίδα έχουν αναφερθεί για την μείωση των δυνάμεων συγκόλλησης, επιτρέπουν την καλύτερη ροή του πλαστικοποιημένου υλικού, προωθούν προς τα κάτω πλαστικοποιημένο υλικό και αυξάνουν την επιφάνεια διασύνδεσης μεταξύ ακίδας και πλαστικοποιημένου υλικού προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγή θερμότητας. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας (Πίνακας 3.1) όπου δίνονται με λεπτομέρειες σχεδιασμένα εργαλεία από TWI.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟ TWI

ΕΡΓΑΛΕΙΟ	Cylindrical	Worl	MX Triflute	Flared-Triflute	A-skew	Re-stir
						
ΕΣΗΜΑ ΑΚΙΔΑΣ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΜΕ ΣΠΕΙΡΩΜΑ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΜΕ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ	ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΜΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΤΕΣ & ΣΠΕΙΡΩΜΑ	ΜΕ ΚΑΒΕΤΟ ΑΥΛΑΚΗ ΣΠΕΙΡΩΜΑ & ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΤΕΣ	ΠΛΑΓΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	ΜΕ ΣΩΣΗΝΩΜΑ ΚΑΙ ΑΥΛΑΚΩΣΕΙΣ
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΑΚΙΔΑΣ	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
ΟΓΚΟΣ ΣΑΡΩΣΗΣ	1:1	1:8	2:6	2:6	Up to probe angle	1:8
ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ	No	No	No	No	No	Yes

** Η ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΚΙΔΑΣ ΕΙΝΑΙ Ο ΛΟΓΟΣ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΤΗΣ ΑΚΙΔΑΣ ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ (ΑΥΛΑΚΗ, ΣΠΕΙΡΩΜΑ, ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΤΕΣ) ΟΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΟΓΚΟ ΤΗΣ ΑΚΙΔΑΣ ΧΩΡΙΣ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΑ **

Πίνακας 3.1: Σχεδιασμένα εργαλεία από το TWI [424]

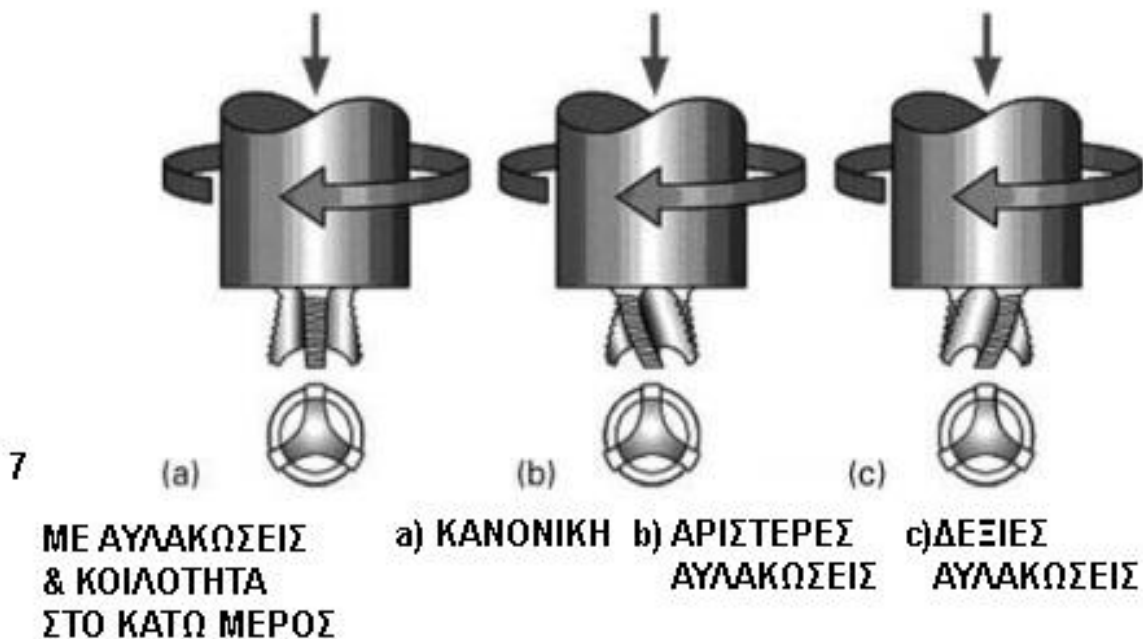
Έχει αναφερθεί ότι πλάκες αλουμινίου 6082-T6 πάχους 75 χιλιοστών μπορούν να συγκολληθούν επιτυχώς χρησιμοποιώντας το εργαλείο Worl σε δύο πέρασματα, δηλαδή ένα πέρασμα για την άνω επιφάνεια και το άλλο πέρασμα για την κάτω επιφάνεια, με την κάθε πλευρά να μας δίνει 38 χιλιοστά σε βάθος διείσδυσης. Επίσης, πάχος έως 50 χιλιοστά, έχει επιτυχώς συγκολληθεί με τριβή με ένα μόνο πέρασμα χρησιμοποιώντας εργαλεία Worl και MX Triflute.

Η περιστροφική συγκόλληση είναι περισσότερο δύσκολη σε σχέση με την συγκόλληση τόξου, επειδή [745-747]:

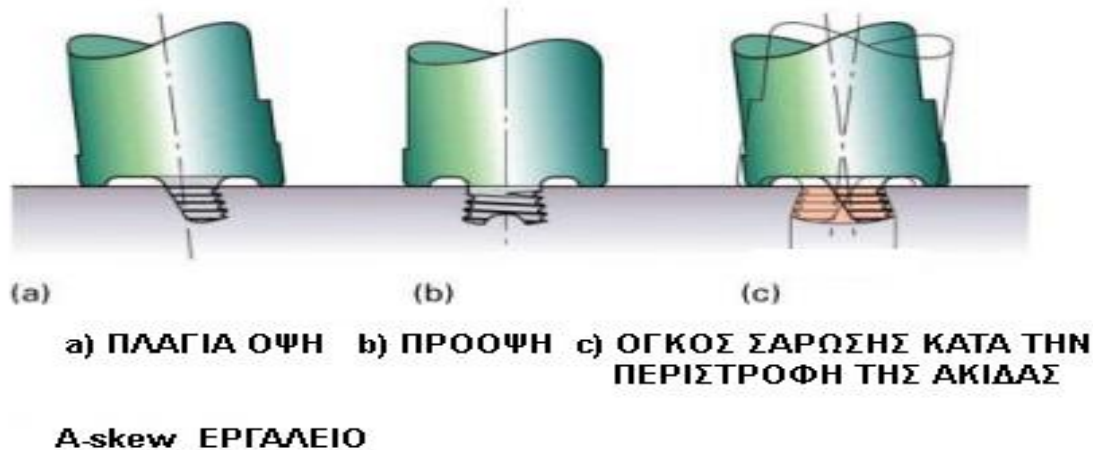
- 1) Μεγαλύτερες συγκολλήσεις είναι απαραίτητο να μεταφέρουν το φορτίο σωστά στην επιφάνεια του κομματιού.
- 2) Το ελάττωμα της αγκίστρωσης πρέπει να αποφεύγεται ή να επαναπροσανατολίζεται για την εξασφάλιση της μέγιστης αντοχής (ιδιαίτερα αντοχή κόπωσης). Αυτό το ελάττωμα αναφέρεται στην παραμόρφωση που παρεκκλίνει από την αρχική ευθεία και επίπεδη διεπαφή μεταξύ των άνω και κάτω φύλλων.[740,749]
- 3) Τα οξειδία στο φύλλο διεπαφής είναι πιο δύσκολο να διαταράξουν τη διαμόρφωση της συγκόλλησης. [749]

Για την συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης, μία συμβατική κυλινδρική σπειρωτή ακίδα οδήγησε σε υπερβολική λέπτυνση του άνω φύλλου προκαλώντας σημαντικά μειωμένες ιδιότητες λύγισης.

Πρόσφατα, για καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης, δύο νέες γεωμετρίες ακίδας αναπτύχθηκαν, η Flared-Triflute με κάθετες αυλακώσεις και κοιλότητα στην αιχμή της (Σχήμα 3.7) και η A-skew με τον άξονα της να είναι ελαφρώς κεκλιμένος σε σχέση με τον άξονα του μηχανήματος (Σχήμα 3.8).[703,747]



Σχήμα 3.7: Εργαλείο «Flared-Triflute»[707]



Σχήμα 3.8: Εργαλείο «A-skew» [747]

Οι Flared-Triflute και A-skew ακίδες έχει παρατηρηθεί ότι [747]:

- 1) Αυξάνουν τα ποσοστά σάρωσης (2 προς 6 για Flared-Triflute όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1) και της μεταλλικής ροής γύρω και κάτω από την ακίδα
- 2) Διευρύνουν την περιοχή συγκόλλησης λόγω των κάθετων αυλακώσεων και της κοιλότητας στην αιχμή της στο Flared-Triflute και της λοξής δράσης του A-skew
- 3) Βελτιώνουν τη δράση ανάμειξης και ευνοούν τον κατακερματισμό του οξειδίου καθώς και την διασπορά του στον πλαστικοποιημένο όγκο συγκόλλησης.
- 4) Παρέχουν μια κυκλοειδή σφυριλάτηση στο κέντρο της συγκόλλησης εξαιτίας της λοξής δράσης και ως εκ τούτου βελτιώνεται η ποιότητα συγκόλλησης σε αυτή την περιοχή.

Συγκριτικά με τα συμβατικά σπειρωτά εργαλεία, οι Flared-Triflute και A-skew ακίδες οδήγησαν σε διπλασιασμό ταχύτητας συγκόλλησης, περίπου 20% μείωση στην αξονική σφυριλατική δύναμη και διευρύνουν αισθητά την περιοχή συγκόλλησης. (>150% της διαμέτρου της ακίδας συγκριτικά με το 110% για την συμβατική σπειρωτή ακίδα). Ως αποτέλεσμα, τόσο η Flared-Triflute όσο και η A-skew ακίδες είναι κατάλληλες για συγκολλήσεις όπου η περιοχή που θέλουμε να ενώσουμε είναι παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής.[750] Μια εναλλακτική προσέγγιση για τη διατήρηση της ευκολίας στο σχεδιασμό και την κατασκευή του εργαλείου, ήταν να εφαρμοστεί συμβατό προφίλ ακίδας/ώμου και να διεξαχθεί ένα διπλό πέρασμα συγκόλλησης για να συγκολληθούν δύο επιφάνειες χωρίς ελαττώματα.[744,745]

3.4 Διαστάσεις Εργαλείου

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση, η είσοδος ενέργειας (σε μορφή θερμότητας) είναι μία συνάρτηση της ακτίνας του ώμου υψωμένο στην τρίτη δύναμη, αλλά εξαρτάται μόνο γραμμικά από την εφαρμοζόμενη δύναμη και την ταχύτητα περιστροφής. Ως εκ τούτου, η ενέργεια στην συγκόλληση τριβής μέσω ανάδευσης είναι σημαντικά εξαρτώμενη από το

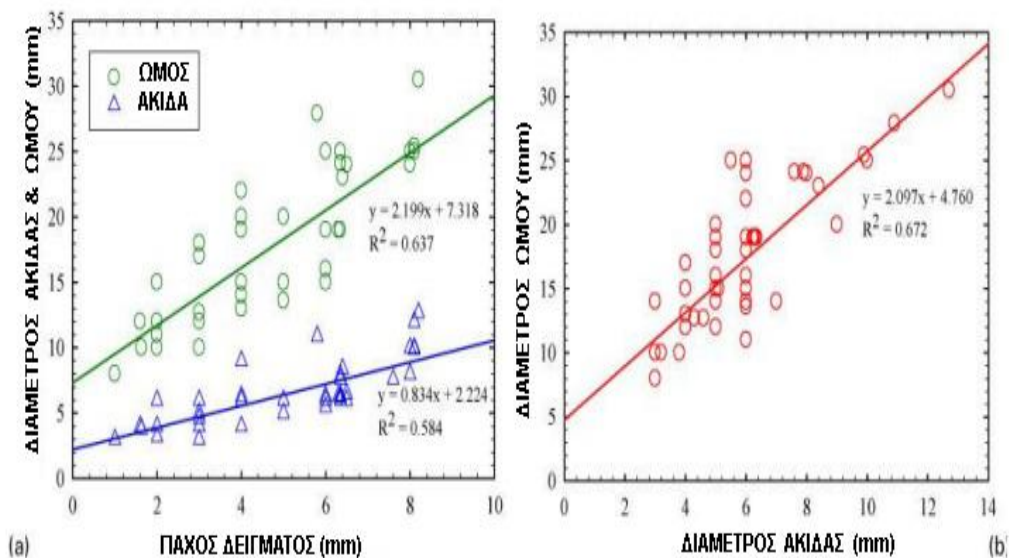
μέγεθος του ώμου[704,705]. Επιπλέον, η πίεση στον άξονα Z είναι επίσης συνάρτηση της ακτίνας του ώμου.[706,748]

$$q_o = \frac{4}{3} \rho^2 m P \omega R^3$$

Όπου q_o είναι η δύναμη (W), μ είναι ο συντελεστής αποτελεσματικής τριβής μεταξύ του τεμαχίου, P είναι η πίεση (MPa), ω είναι η ταχύτητα περιστροφής (rev min^{-1}) και R είναι η ακτίνα του ώμου (mm).[489]

Το σχήμα 3.9a συνοψίζει τις διαμέτρους των ώμων ως συνάρτηση του πάχους του φύλλου για 53 διατάξεις πλάκας όπως το Αλουμίνιο, το Μαγνήσιο, ο Χαλκός, το Τιτάνιο, το Νικέλιο και το ασάλι.[703,706,716-745]

Μια σαφής τάση παρατηρείται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων: η διάμετρος του ώμου είναι περίπου 2 φορές το πάχος του τεμαχίου εργασίας συν μια σταθερά 7 χιλιοστών.[752] Αυτή η σχέση είναι λογική εάν θεωρηθεί ότι με το αυξανόμενο πάχος απαιτείται περισσότερη είσοδος ενέργειας και ως εκ τούτου χρειάζεται μεγαλύτερη διάμετρος ώμου για να παραχθεί θερμότητα. Παρομοίως, μια γενική τάση μεταξύ της διαμέτρου ακίδας και του πάχους του δείγματος φαίνεται στο σχήμα 3.9a. Η διάμετρος της ακίδας είναι 0,8 φορές το πάχος του δείγματος συν την σταθερά 2 χιλιοστά. Οι Reynolds και Tang 52 χρησιμοποίησαν ακίδες 8-12 χιλιοστών και βρήκαν ότι η διάμετρος της ακίδας δεν φαίνεται να επηρεάζει την απαιτούμενη δύναμη X άξονα και την συγκεκριμένη ενέργεια συγκόλλησης. Το ζεύγος διαμέτρου ώμου και ακίδας συνοψίζεται στο σχήμα 3.9b. Η διάμετρος του ώμου είναι 2*1 φορές η διάμετρος της ακίδας συν 4*8 χιλιοστά. Ωστόσο, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αναλογία διαμέτρου ώμου προς διάμετρο ακίδας είναι 3.[753,754]



a) ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ , b) ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Σχήμα 3.9a: Διαστάσεις εργαλείου έναντι πάχους κομματιού κατεργασίας και **Σχήμα 3.9b** σχέση μεταξύ των διαστάσεων εργαλείου[703,706,732747]-

3.5 Υλικά εργαλείων

Τα χαρακτηριστικά των υλικών των εργαλείων μπορεί να είναι κρίσιμα για την FSW. Το υλικό του εργαλείου εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου εργασίας και την επιθυμητή διάρκεια ζωής του εργαλείου καθώς και από τις εμπειρίες του χρήστη και τις προτιμήσεις. Ιδανικά, το υλικό του εργαλείου θα έπρεπε να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- 1) Μεγαλύτερη απόδοση και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες από τις αναμενόμενες σφυρηλατικές δυνάμεις στο εργαλείο.
- 2) Καλή αντοχή, σταθερότητα διαστάσεων και αντίσταση κίνησης.
- 3) Καλή θερμική αντοχή κόπωσης για να αντιστέκεται στην επαναλαμβανόμενη θέρμανση και ψύξη.
- 4) Να μην έχει επιβλαβή αντίδραση με το υλικό του τεμαχίου εργασίας.
- 5) Σκληρότητα για να αντιστέκεται σε ρωγμές.
- 6) Χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ των υλικών ακίδας και ώμου για την μείωση θερμικής τάσης (π.χ. χρήση θερμικών ορίων με επίστρωση για PCBN εργαλεία για την πρόληψη της θερμότητας από την κίνηση μέσα στο βολφραμιοκαρβιδικό στέλεχος)[718].
- 7) Καλή μηχανική επεξεργασία για να διευκολύνει την κατασκευή πολύπλοκων χαρακτηριστικών στον ώμο και την ακίδα.
- 8) Χαμηλό/προσιτό κόστος.

Τα υλικά εργαλείων που χρησιμοποιούνται για FSW/P συνοψίζονται στους πίνακες 3.2 και 3.3.[755,756] Το εργαλείο από ατσάλι είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό εργαλείου για τα κράματα αλουμινίου. Μέσα στα εργαλεία από ατσάλι, AISI H13, μολύβδινο-χρωμίου θερμικά επεξεργασμένο που έχει επιδεχτεί σκλήρυνση με αέρα.

Πίνακας 3.2: Υλικά εργαλείου FSW που χρησιμοποιήθηκαν σε συγκολλήσεις[705]					
Υλικά εργαλείου/mm					
Υλικά κομματιού κατεργασίας	Εργαλείο ατσαλιού	Υπερκράμα βασισμένο σε Ni και Co	Πυρίμαχα υλικά	Καρβίδια και μεταλλική μήτρα από σύνθετο υλικό (MMCs)	PCBN
Κράματα Αλουμινίου (Al)	≤12	≤16	...	≤12	≤50
Κράματα Μαγνησίου (Mg)	≤6	...	...	≤6	...

Κράματα Χαλκού (Cu)	≤11	≤50	≤50	...	≤50
Κράματα Τιτανίου (Ti)	...	...	≤6*35	≤2	≤6*35
Κράματα Νικέλιου (Ni)	...	...	≤6*35	...	≤6*25
Κράματα Ανοξειδωτου Χάλυβα	...	...	≤6*35	...	≤6
Χαμηλής τιμής Χάλυβες	...	...	≤12	≤10	≤20
Al-MMC	≤8	≤6	...	...	≤10
Mg-MMC	≤4	...	...	...	...

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά των υλικών των εργαλείων FSW[705,743-762]

Υλικά εργαλείου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Σχόλια
· Ατσάλι	Χαμηλό κόστος	Ορατή φθορά μετά από συγκολλήσεις	Επιφανειακή σκλήρυνση επικάλυψης για να αυξήσουν την αντίσταση στη φθορά
· AISI H13 · AISI 4340 · O1 ατσάλι	Εύκολη κατεργασία Υψηλή αντίσταση σε θερμική καταπόνηση	Σοβαρή φθορά για υλικά υψηλής αντοχής	Βελτιστοποίηση σχήματος ακίδας Χρησιμοποιείται ευρέως για το Al, Mg, Cu, Al- / Mg-MMC
· SKD61	Υψηλή αντοχή σε φθορά		

<ul style="list-style-type: none"> · ατσάλι · Χάλυβας με αντίσταση στη φθορά · Κράματα βασισμένα σε Ni/Co 	<p>Υψηλή αντίσταση σε θερμική καταπόνηση</p> <p>Υψηλή αντοχή, ολκιμότητα και αντοχή σε διάβρωση</p>	<p>Διατήρηση θερμοκρασίας κάτω από (600-800°C) για την πρόληψη διάλυσης</p>	<p>Κυρίως χρησιμοποιούνται για το Al, κράματα Cu και Al-MMC</p>
<ul style="list-style-type: none"> · MP159 · Inconel 718, 738LC, 939, 100 · Waspalloy · PM3030, Nimonic 90, Nimonic 105 · Πυρίμαχα υλικά 	<p>Υψηλή αντοχή σε φθορά</p> <p>Υψηλό σημείο τήξης</p>	<p>Δυσκολία στην κατεργασία</p> <p>Ta και Nb με υψηλή διαλυτότητα O₂ σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε υποβαθμισμένη ολκιμότητα</p>	<p>Κυρίως χρησιμοποιούνται για υψηλό σημείο τήξης υλικά όπως Cu, Ti, Ni κράματα χάλυβα</p>
<ul style="list-style-type: none"> · W, W-3Re, W-25Re, W-1LaO₂ · Densiment (90W-10Fe-Ni) · Υλικά βασισμένα σε Μολυβδαίνιο: Mo-W alloys · Nb 	<p>Υψηλή αντοχή που διατηρείται σε σχεδόν θερμοκρασία σημείου τήξης</p> <p>Μη θερμική κατεργασία</p> <p>Υψηλή αντοχή θραύσης σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος</p>	<p>Περιορισμένη διαθεσιμότητα υλικού</p> <p>Υψηλό κόστος και δυσκολία στην κατεργασία</p> <p>Υπέρμετρη φθορά εξαιτίας της χαμηλής αντοχής</p> <p>Όχι κατάλληλα για κράματα που</p>	

<ul style="list-style-type: none"> · Ta · Καρβίδια και MMCs 		περιέχουν χαλκό	
<ul style="list-style-type: none"> · Κράματα βασισμένα σε WC · Κράματα βασισμένα σε WC-Co · TiC, TiC-Ni-W · Ti-Ni-Mo · PCBN 	<p>Ανώτερη αντοχή σε φθορά</p> <p>Superabrasive συνθετικό, δεύτερο σε σκληρότητα μετά το διαμάντι</p> <p>Χημική σταθερότητα</p> <p>Εξαιρετική αντίσταση σε φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες</p>	<p>Περιορισμένο βάθος συγκόλλησης μικρότερο των 12 mm</p> <p>Δύσκολο στην κατεργασία</p>	<p>Κυρίως χρησιμοποιούνται για το Al, Mg και κράματα Ti, και χάλυβα</p> <p>Κυρίως χρησιμοποιούνται για υψηλή αντοχή και ανθεκτικά στη φθορά υλικά, όπως Cu, Ti και Ni κράματα χάλυβα και Al-MMC</p>

Υπερκράματα με βάση νικέλιο και κοβάλτιο, σχεδιάστηκαν αρχικά για εξαρτήματα κινητήρων αεροσκαφών που προσφέρουν υψηλή αντοχή, ολκιμότητα και αντίσταση στη διάβρωση. Ωστόσο, η μεγαλύτερη δυσκολία στην κατεργασία των υπερκράματων είναι ότι εμποδίζει την κατασκευή πολύπλοκων χαρακτηριστικών όπως αυλακώσεις και επίπεδες επιφάνειες στο προφίλ του εργαλείου. Πυρίμαχα μέταλλα, όπως το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο χρησιμοποιούνται ως υλικά εργαλείων λόγω της υψηλής αντοχής σε θερμότητα. Πολλά από αυτά τα κράματα παράγονται ως υλικά μιας φάσης, η οποία επιτρέπει οι μηχανικές ιδιότητες να διατηρούνται μέχρι 1000-1500 °C (βαθμούς Κελσίου). Ωστόσο, η επεξεργασία σκόνης είναι η κύρια μέθοδος παραγωγής για τα πυρίμαχα κράματα και, ως εκ τούτου, τα κόστη υλικών είναι σχετικά υψηλά. Υλικά από Καρβίδιο που χρησιμοποιούνται συνήθως ως εργαλεία κατεργασίας προσφέρουν αντοχή σε θραύσεις ως υλικά ακίδας/ώμου για FSW σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κεραμικά σύνθετα ενισχυμένα σωματίδια μεταλλικής μήτρας έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ως υλικά εργαλείου, αλλά η εύθραυστη φύση τους μπορεί να οδηγήσει σε θραύση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βύθισης του εργαλείου. Πολυκρυσταλλικό κυβικό νιτρίδιο του βορίου, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά για τη μετατροπή και επεξεργασία των εργαλείων χάλυβα, χυτοσίδηρος και υπερκράματα είναι σήμερα το ευρέως αποδεκτό υλικό εργαλείου τριβής ανάδευσης λόγω της υψηλής μηχανικής και θερμικής απόδοσής του. Ωστόσο, τα σχετικά υψηλά κόστη που συνδέονται με την κατασκευή του PCBN καθώς και ο περιορισμός μεγέθους, η κακή μηχανική επεξεργασία και

η χαμηλή αντοχή σε θραύση, θέτουν προκλήσεις για την ευρεία εφαρμογή του υλικού αυτού σε εργαλεία συγκολλήσεων τριβής μέσω ανάδευσης (ειδικά για πολύπλοκες γεωμετρίες).[705,718]

Το σχήμα 3.10 παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά του σχήματος ενός εργαλείου PCBN. Ένα ειδικό υλικό που λειτουργεί ως θερμικό φράγμα μεταξύ της ακίδας PCBN και του στελέχους καρβιδίου βολφραμίου, χρησιμοποιείται για να μειώσει τη μεταφορά της θερμότητας τριβής στο κύριο σώμα του εργαλείου.[757]



Σχήμα 3.10: PCBN εργαλείο[705,754]

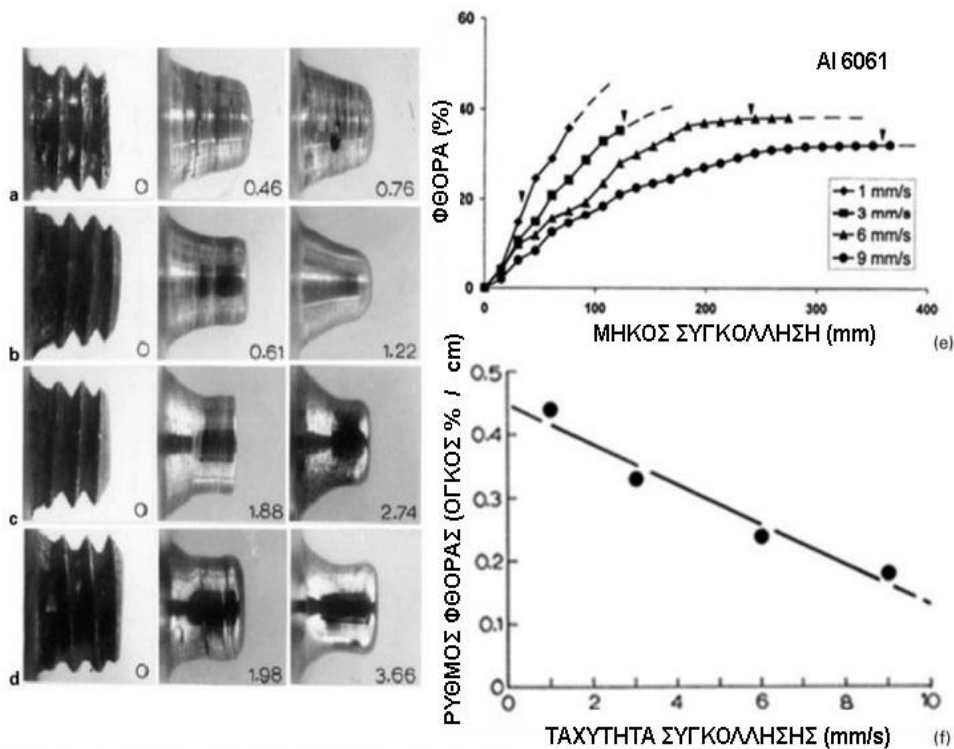
3.6 Φθορά του εργαλείου

Η υπερβολική φθορά του εργαλείου αλλάζει το σχήμα του αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα παραγωγής ελαττωμάτων συνεπώς υποβαθμίζει την ποιότητα των συγκολλήσεων.

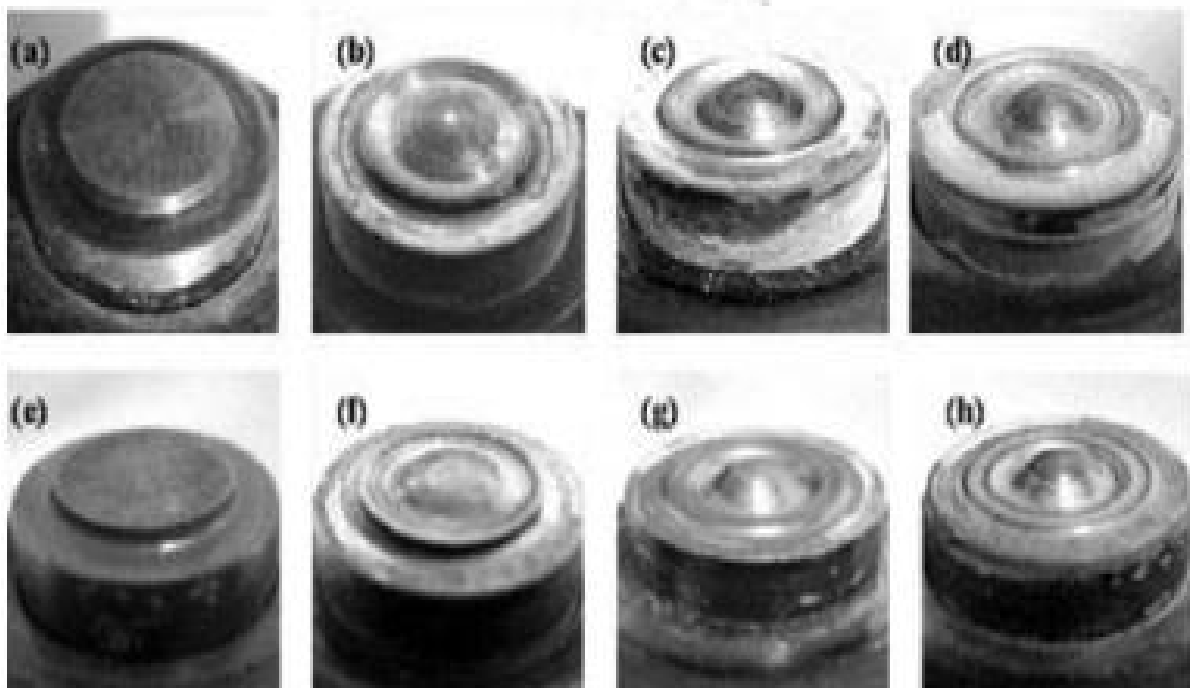
Ο ακριβής μηχανισμός φθοράς εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του τεμαχίου εργασίας και το υλικό του εργαλείου, την επιλεγμένη γεωμετρία του εργαλείου και τις παραμέτρους συγκόλλησης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση PCBN εργαλείων, η φθορά σε περιστροφή χαμηλής ταχύτητας προκαλείται κυρίως από γδάρισμα, ενώ η φθορά στην περιστροφή υψηλής ταχύτητας οφείλεται στην αποξεστική φθορά.[705,757] Εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ασάλι που είχε σκληρυνθεί με AISI λάδι και είχε ακίδα με σπείρωμα δεξιόστροφου χαρακτήρα. Λόγω λειαντικών σωματιδίων στα Al-MMCs τα σπειρώματα της ακίδας φθάρθηκαν οδηγώντας σε μια ελαφρώς καμπύλο σχήμα ακίδας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11[758,759]. Εκπληκτικά, το αυτό-βελτιστοποιημένο σχήμα (φθαρμένο εργαλείο) χωρίς σπειρώματα θα μπορούσε να οδηγήσει σε ομοιογενή και αναπόσπαστη συγκόλληση χωρίς περαιτέρω ορατές φθορές. Αυτές οι παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι η κατανάλωση του εργαλείου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό ακόμα και για MMCs όταν χρησιμοποιείται το βελτιστοποιημένο σχήμα του εργαλείου. Ως εκ τούτου, τόσο για την μείωση της φθοράς του εργαλείου όσο και για την επέκταση της ζωής του η κατανόηση και ο έλεγχος της ροής του υλικού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και συνδέονται άμεσα με το προφίλ ακίδας στη. Είναι αξιοσημείωτο ότι το αυτό-

βελτιστοποιημένο σχήμα μεταβάλλεται κάπως με την αύξηση ταχύτητας συγκόλλησης λόγω αύξησης της φθοράς του εργαλείου.

Για την FSW, σοβαρή φθορά του εργαλείου έχει αναφερθεί μετά την παραγωγή εκατοντάδων συγκολλήσεων. Για ελαφρά μέταλλα όπως τα κράματα Αλουμίνιο και Μαγνήσιο, το εργαλείο συγκόλλησης είναι κοινώς φτιαγμένο από ατσάλι το οποίο έχει μικρή φθορά. Έχει παρατηρηθεί ότι δε βρέθηκαν σημαντικές φθορές σε εργαλείο ατσαλιού ακόμα και μετά από εκατοντάδες χιλιάδες τοπικές συγκολλήσεις για Αλουμίνιο. Ωστόσο, τα εργαλεία από ατσάλι δεν είναι κατάλληλα για υλικά με υψηλό σημείο τήξης, όπως το Τιτάνιο, το Νικέλιο, κτλ. Για αυτά τα υλικά υψηλής αντοχής τα εργαλεία συγκόλλησης συνήθως φτιάχνονται από σκληρά μέταλλα, καρβίδια και υλικά μεταλλικής μήτρας με ανώτερη θερμική αντίσταση στη φθορά και σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 1000 βαθμούς Κελσίου, όπως WC-Co, TiC και PCBN. Το σχήμα 3.12 δείχνει το προφίλ του εργαλείου WC-Co μετά από μερικές συγκολλήσεις. Αποκαλύπτει σαφώς ότι η υπερβολική φθορά για αυτό το εργαλείο προκαλείται κυρίως μεταξύ του κέντρου της ακίδας και της εξωτερικής άκρης.



Σχήμα 3.11: Φθορά χαρακτηριστικών για ακίδα Al-MMC για $1.000 \text{ rev min}^{-1}$ και για ταχύτητα συγκόλλησης a) 1 mm s^{-1} , b) 3 mm s^{-1} , c) 6 mm s^{-1} και d) 9 mm s^{-1} , όπου e η φθορά % ανά μονάδα μήκους και f ο ρυθμός φθοράς ανά ταχύτητα συγκόλλησης [759]



Σχήμα 3.12: Εξωτερικό σχήμα εργαλείου WC-Co[761]

(a), (e) προ συγκόλλησης, (b) και (f) μετά από 100 συγκολλήσεις, (c) και (g) μετά από 300 και (d) και (h) μετά από 500

Εν κατακλείδι, τα τελευταία 20 χρόνια, έγιναν σημαντικές βελτιώσεις στην συγκόλληση τριβής και ανάδευσης. Διάφορα εργαλεία συγκόλλησης έχουν ήδη σχεδιαστεί καθόλη την εξέλιξη της διαδικασίας. Μέχρι σήμερα, το χαμηλό κόστος και η απαίτηση για μακράς διάρκειας ζωής εργαλεία οδήγησαν στην ανάπτυξη ειδικών ακίδων για υλικά χαμηλής αντοχής όπως για κράματα Αλουμινίου και Μαγνησίου. Ωστόσο, εργαλεία μακράς διάρκειας ζωής και προσιτά κόστη δεν είναι ακόμα διαθέσιμα για λειαντικά υλικά και υλικά υψηλής αντοχής.

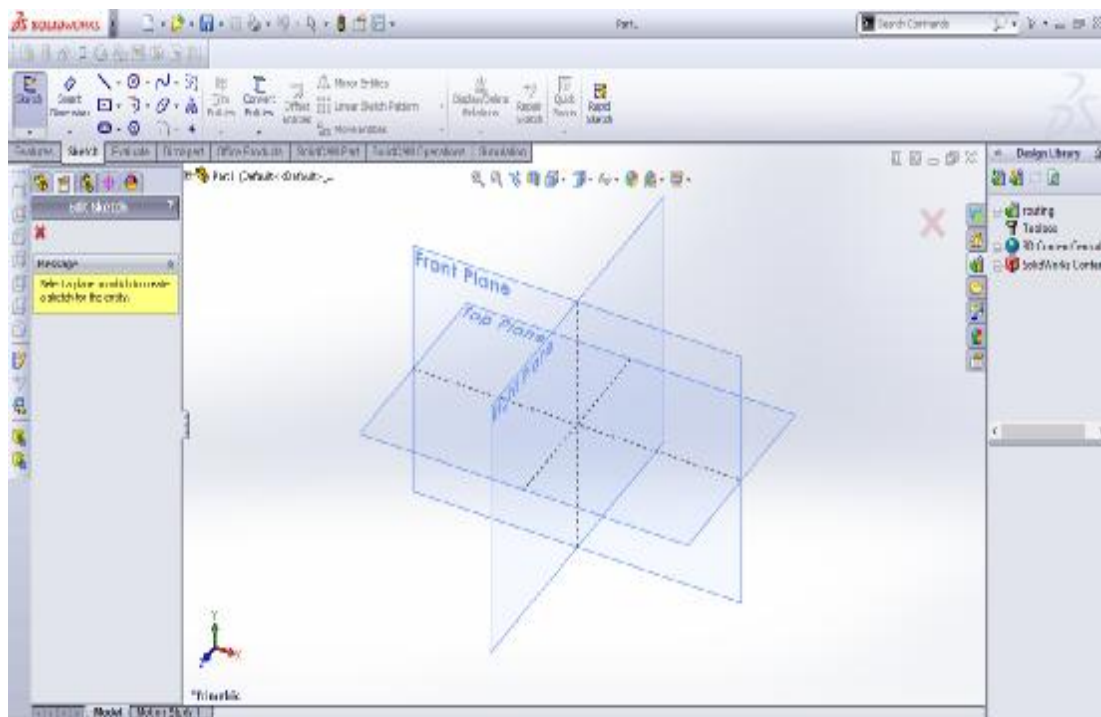
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε το σχεδιασμό κατάλληλου εργαλείου για FSW σε σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS. Παρακάτω θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός για διαφορετικούς τύπους εργαλείων με σκοπό την συγκόλληση συγκεκριμένων κραμάτων αλουμινίου.

4.1 Κράμα αλουμινίου AA2219

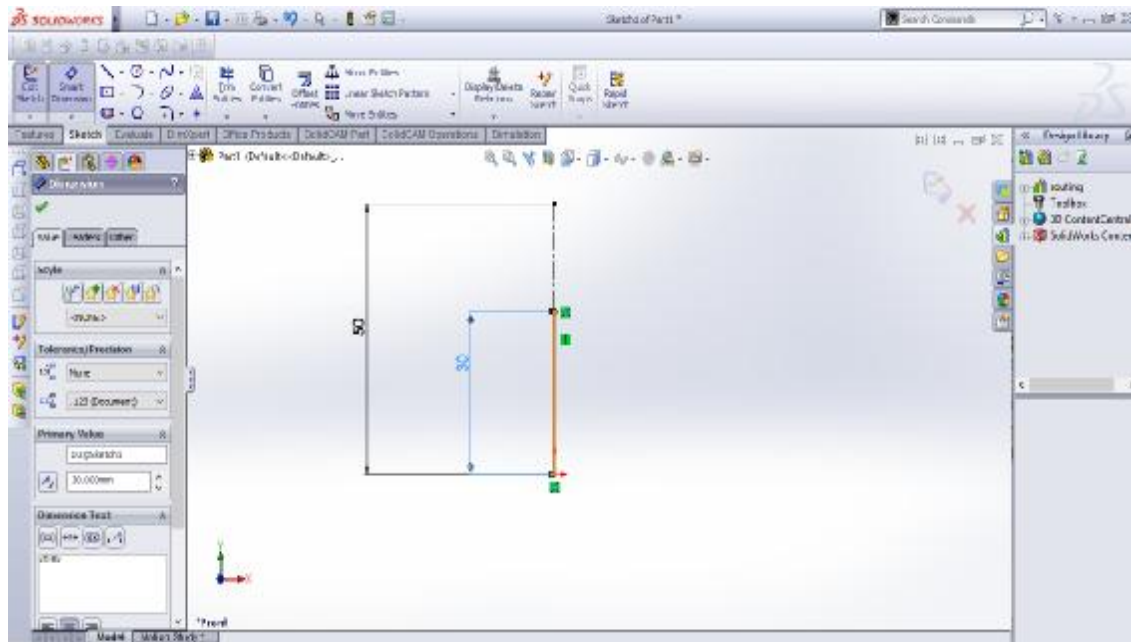
4.1.1 Σχεδιασμός πρώτου κοπτικού εργαλείου στο Solidworks

Βήμα 1^ο: Πρώτο μέλημα μας είναι η κατάλληλη επιλογή όψης σχεδίασης, το οποίο θα μας βοηθήσει να σχεδιάσουμε σωστά το εργαλείο. Στη δική μας περίπτωση επιλέξαμε την πρόοψη.



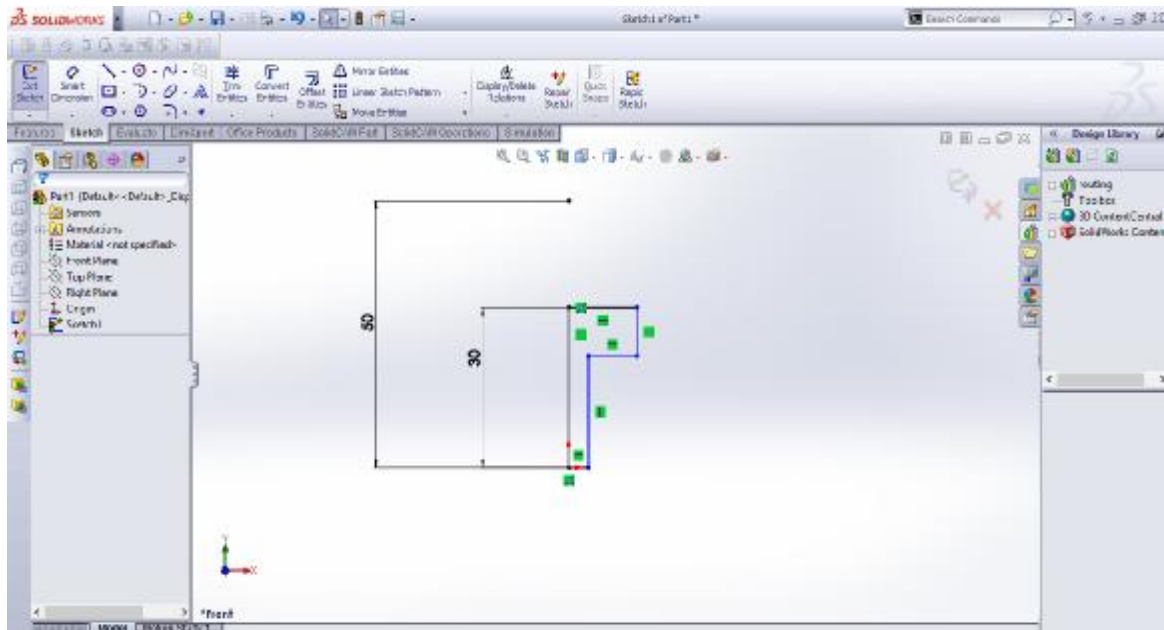
Σχήμα 4.1: Επιλογή πρόοψης για σωστό σχεδιασμό εργαλείου

Βήμα 2^ο: Σχεδιάζουμε δύο γραμμές. Η πρώτη γραμμή είναι η γραμμή συμμετρίας και είναι με διακεκομμένη, ενώ η δεύτερη είναι το συνολικό μήκος του εργαλείου το οποίο μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την πρέσα στην οποία θα τοποθετηθεί.



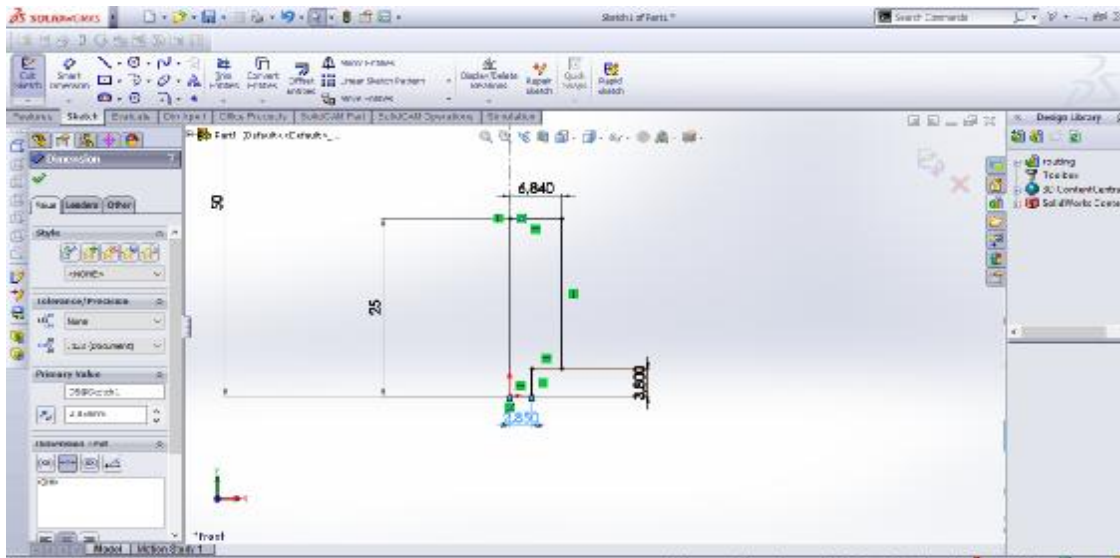
Σχήμα 4.2: Σχεδιασμός δύο γραμμών που με βάση αυτές θα σχεδιάσουμε το εργαλείο

Βήμα 3^ο: Στο συγκεκριμένο βήμα κάνουμε ένα ελεύθερο σχεδιασμό του προφίλ του εργαλείου μας.



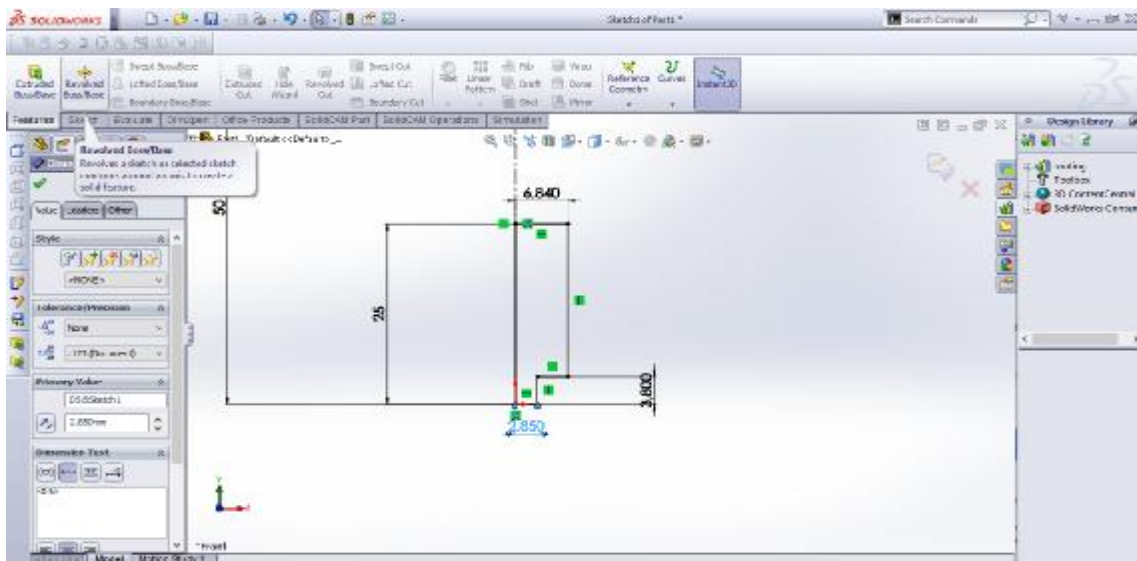
Σχήμα 4.3: Ελεύθερος σχεδιασμός προφίλ εργαλείου

Βήμα 4^ο: Σε αυτό το σημείο δώσαμε συγκεκριμένες διαστάσεις σε συγκεκριμένες πλευρές του εργαλείου με την επιλογή της Smart Dimension.



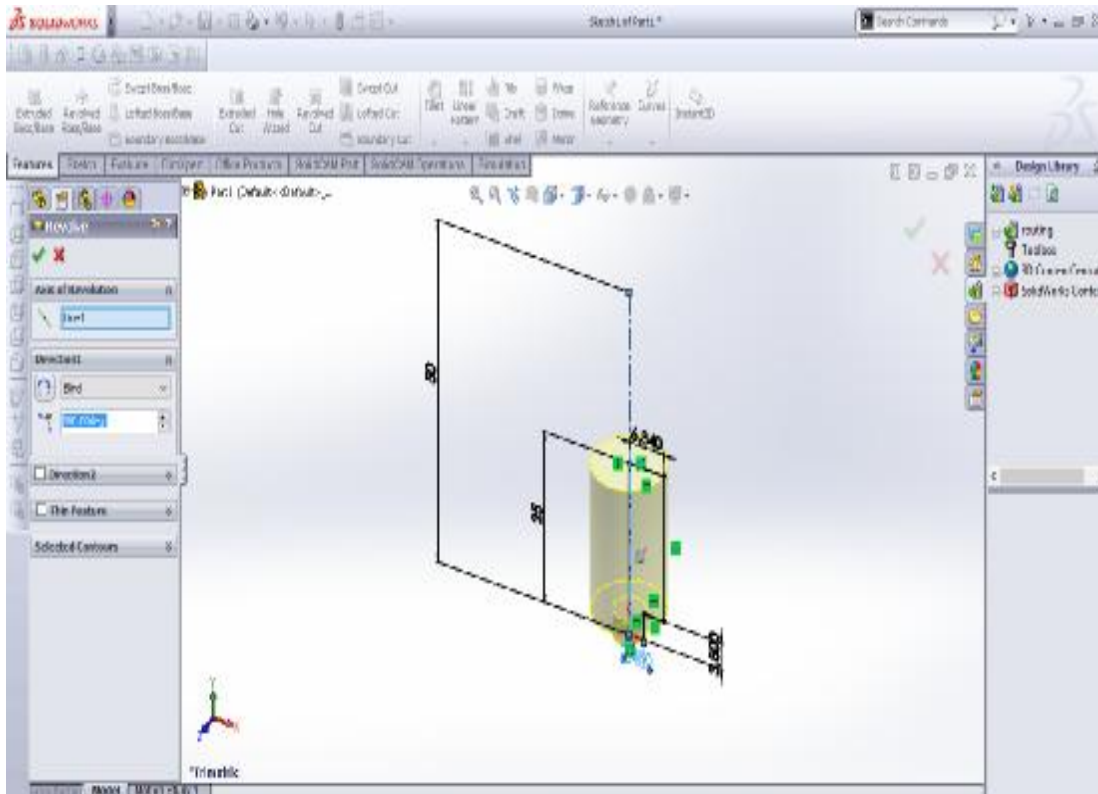
Σχήμα 4.4: Συγκεκριμένες διαστάσεις στις πλευρές του εργαλείου

Βήμα 5^ο: Σε αυτό το σημείο κάνουμε έξοδο από τη σχεδιαστική επιφάνεια και πλέον οδηγούμαστε σε τρισδιάστατο χώρο μέσω της επιλογής Features, όπου σε αυτή επιλέγουμε το Revolved Boss/Base.



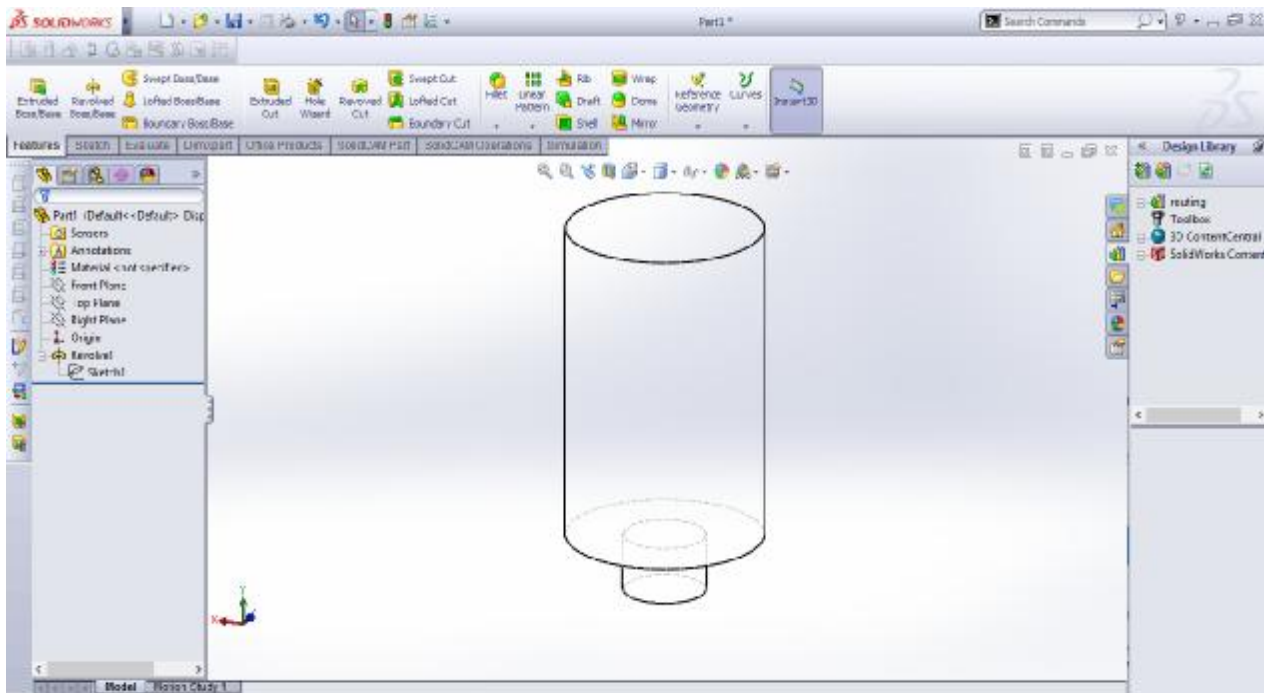
Σχήμα 4.5: Επιλογή τρισδιάστατου χώρου σχεδίασης

Βήμα 6°: Αυτή η επιλογή μας ζητά να καθορίσουμε έναν άξονα περιστροφής στον οποίο επιλέγουμε τη γραμμή συμμετρίας μας και περιστρέφουμε το προφίλ κατά 360°.



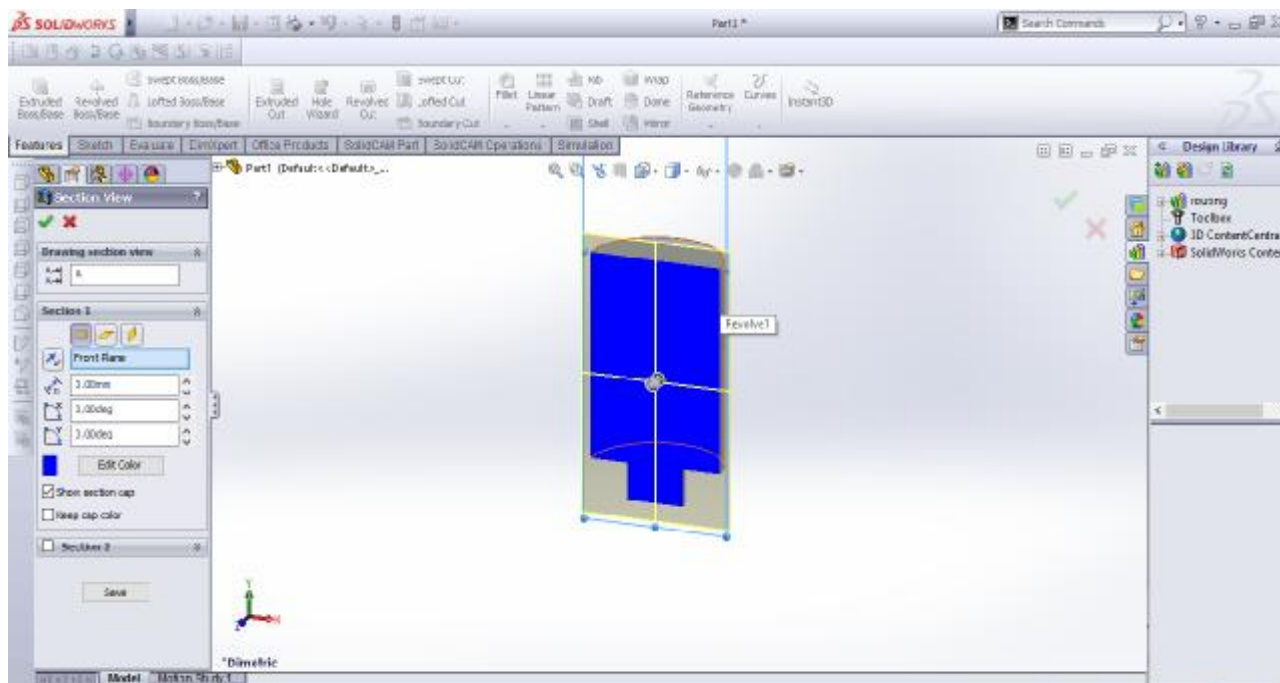
Σχήμα 4.6: Καθορισμός άξονα περιστροφής

Βήμα 7^ο: Στο σημείο αυτό το σχέδιο μας έχει γίνει τρισδιάστατο και μπορούμε να το παρατηρήσουμε από τις συνεχείς γραμμές οι οποίες αναπαριστούν ορατές ακμές, ενώ αντίθετα οι διακεκομμένες αναπαριστούν μη ορατές ακμές.



Σχήμα 4.7: Τρισδιάστατο σχέδιο

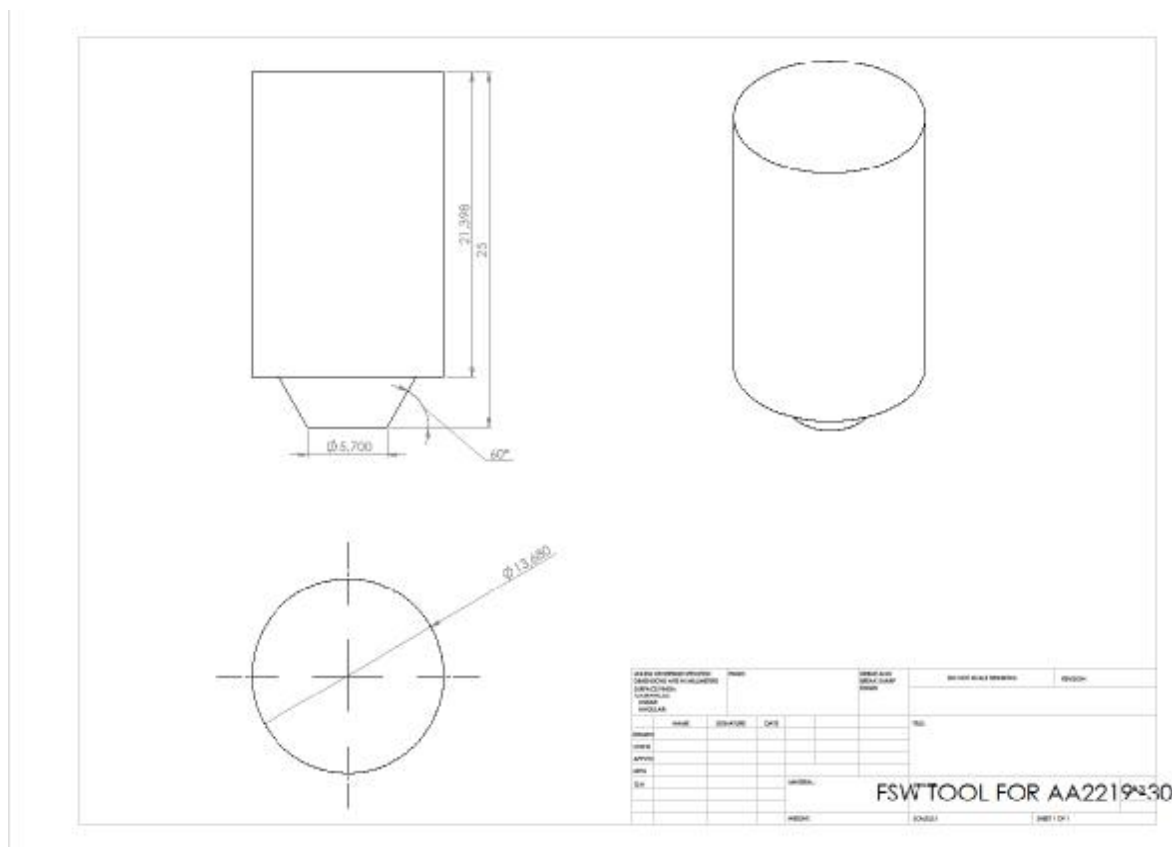
Βήμα 8^ο: Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε μια τομή στο κέντρο του εργαλείου που σχεδιάσαμε το οποίο μας βοηθά να κάνουμε έναν έλεγχο για την ορθότητα του σχεδίου μας.



Σχήμα 4.8: Έλεγχος για ορθότητα σχεδίου

Βήμα 9^ο: Τέλος, εξάγουμε μηχανολογικά σχέδια με όλες τις απαραίτητες διαστάσεις.

4.1.2 Σχέδιο δεύτερου κοπτικού εργαλείου

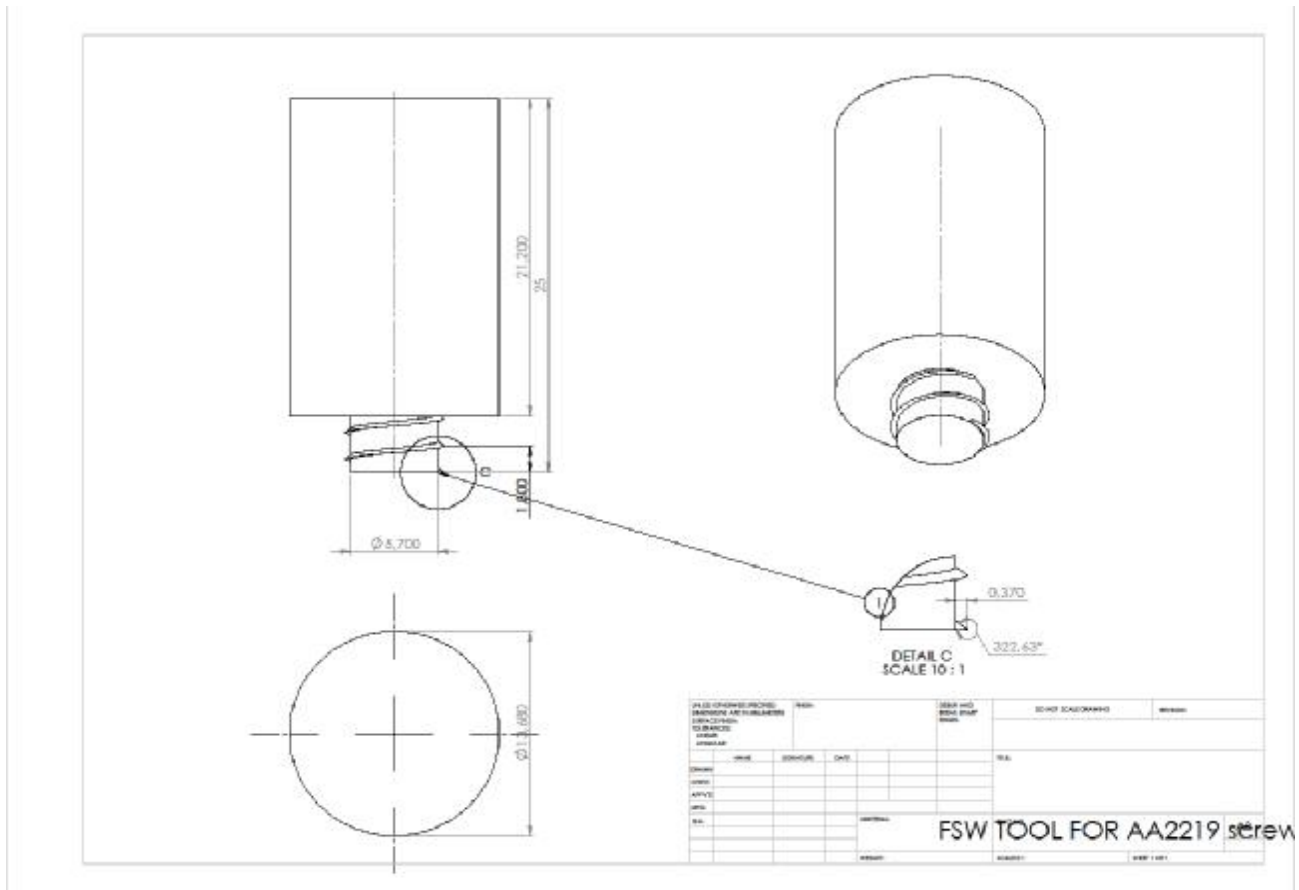


Σχήμα 4.10: Σχέδιο δεύτερου κοπτικού εργαλείου

4.1.3 Σχέδιο τρίτου κοπτικού εργαλείου

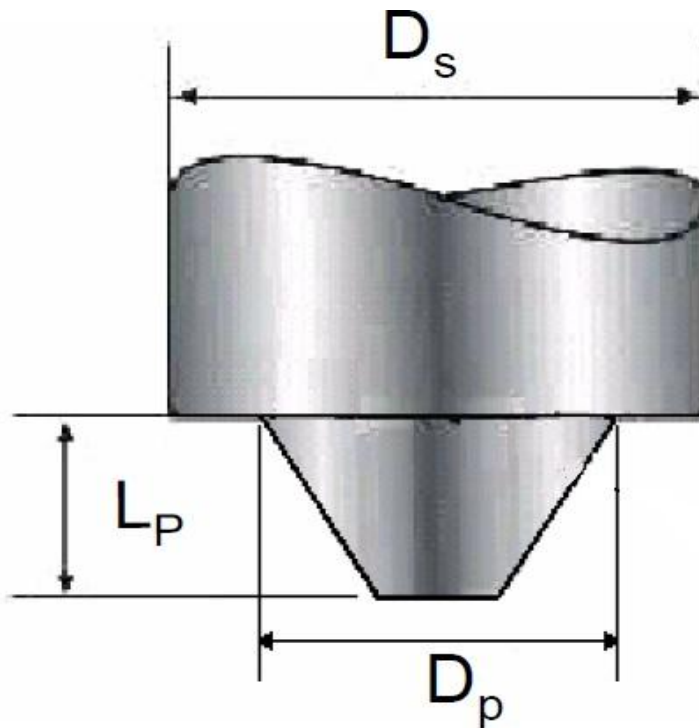
4.1.4 Σχέδιο τέταρτου κοπτικού εργαλείου

Το συγκεκριμένο σχέδιο διαφέρει από τα υπόλοιπα, διότι χρησιμοποιούμε εγκοπές και σπείρωμα στην επιφάνεια επαφής του εργαλείου με τις πλάκες που προορίζονται για συγκόλληση.



Σχήμα 4.12: Σχέδιο τέταρτου κοπτικού εργαλείου

Πιο αναλυτικά, για τα παραπάνω σχέδια μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:
Αρχικά, για να καταλήξουμε στις διαστάσεις των κοπτικών εργαλείων ακολουθήσαμε έναν γενικό πίνακα με αναλογίες διαστάσεων, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.13: Σκαρίφημα σχεδίασης[763]

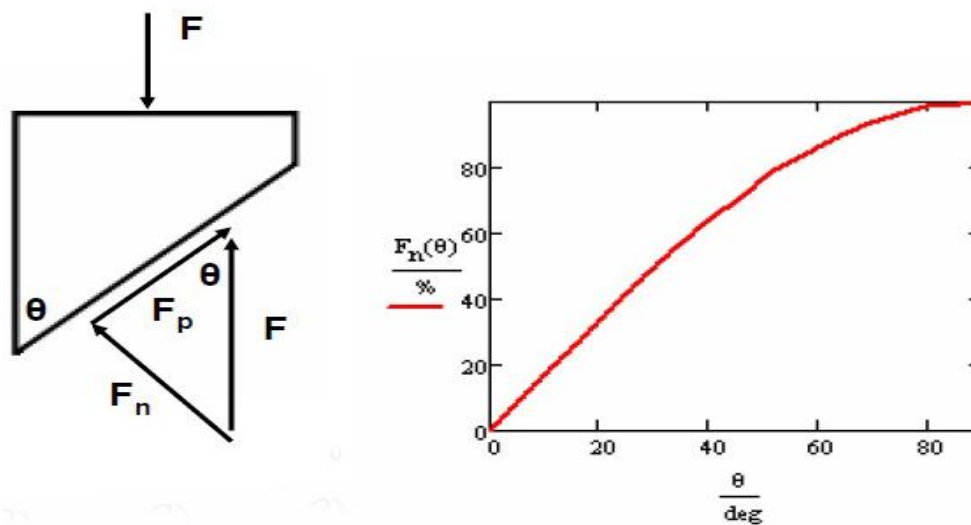
Πίνακας 4.14: Γεωμετρία εργαλείου και υλικό[763]

Γεωμετρία εργαλείου	Υλικό Αλουμίνιο
D_s/D_p	2.4
D_p/L_p	1.5
Επιφάνεια Ακίδας	Με/Χωρίς σπείρωμα
Γωνία	$0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης κάθετης δύναμης για εργαλεία που έχουν γωνία 30° ή 60° χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι:

$$F_n = F \cos(90^\circ - \theta)$$

$$F_p = F \sin(90^\circ - \theta)$$



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα υπολογισμού κάθετης δύναμης[763]

Στην έρευνα μελετήθηκαν οι συνθήκες συγκόλλησης στο πρόγραμμα Ansys και καθορίστηκε ο εξής πίνακας για την επίτευξη μιας συγκόλλησης:

Πίνακας 4.2: Καθορισμένες τιμές για επίτευξη συγκόλλησης[763]

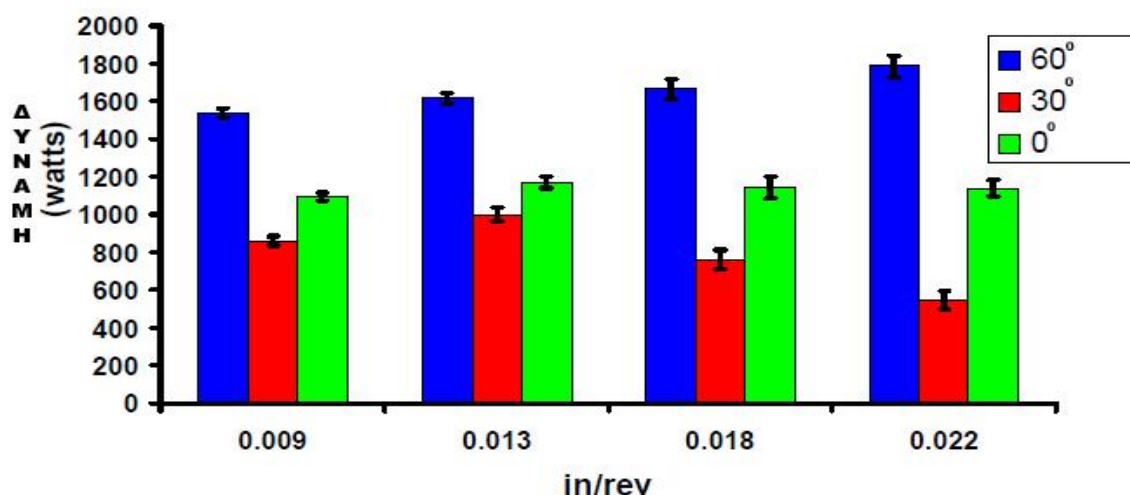
RPM	Ταχύτητα Πρόωσης (in/min)	Δύναμη (lbf)			Ταχύτητα πρόωσης/rpm (in/rev)
		0°	30°	60°	
200	1.8	4000	3500	5500	0.009
300	4.0	4000	3500	5500	0.013
400	7.1	4000	3500	5500	0.018
500	11.1	4000	3500	5500	0.022

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε τον PHI δείκτη, ο οποίος είναι ένας δείκτης θερμότητας για την ποιοτική σύγκριση της απαραίτητης θερμότητας που πρέπει να εισαχθεί. Ο τύπος δίνεται παρακάτω:

$$PHI = rpm^2 / \text{ταχύτητα πρόωσης}$$

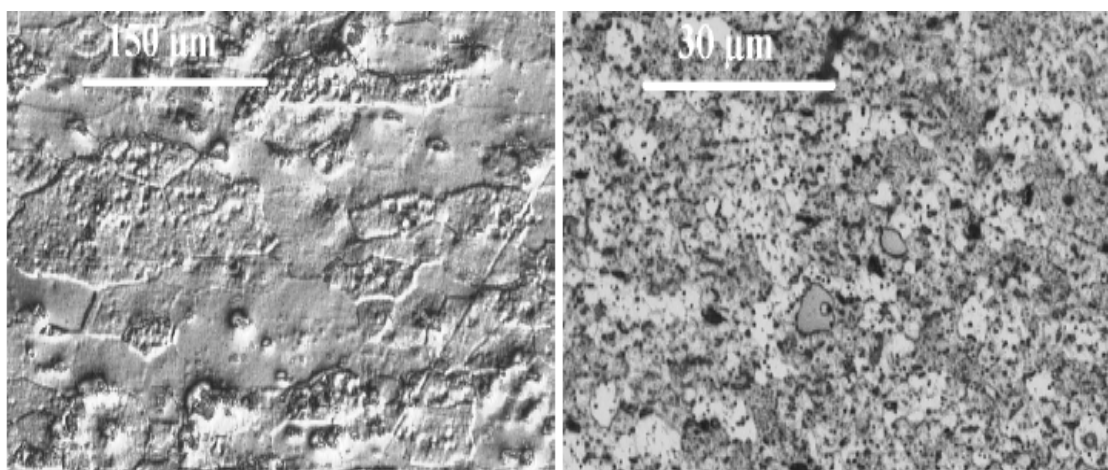
Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε πως είναι πολύ εύκολο να υπολογίσουμε την καταναλισκόμενη δύναμη, η οποία επηρεάζεται κατεξοχήν από το σχήμα της ακίδας. Παρακάτω δίνεται με γραφική παράσταση η δύναμη ως προς την πρόωση ανά rpm.

Τύπος υπολογισμού: Δύναμη = $2\pi f \cdot \text{ροπή}$ (όπου f είναι η συχνότητα [rpm])



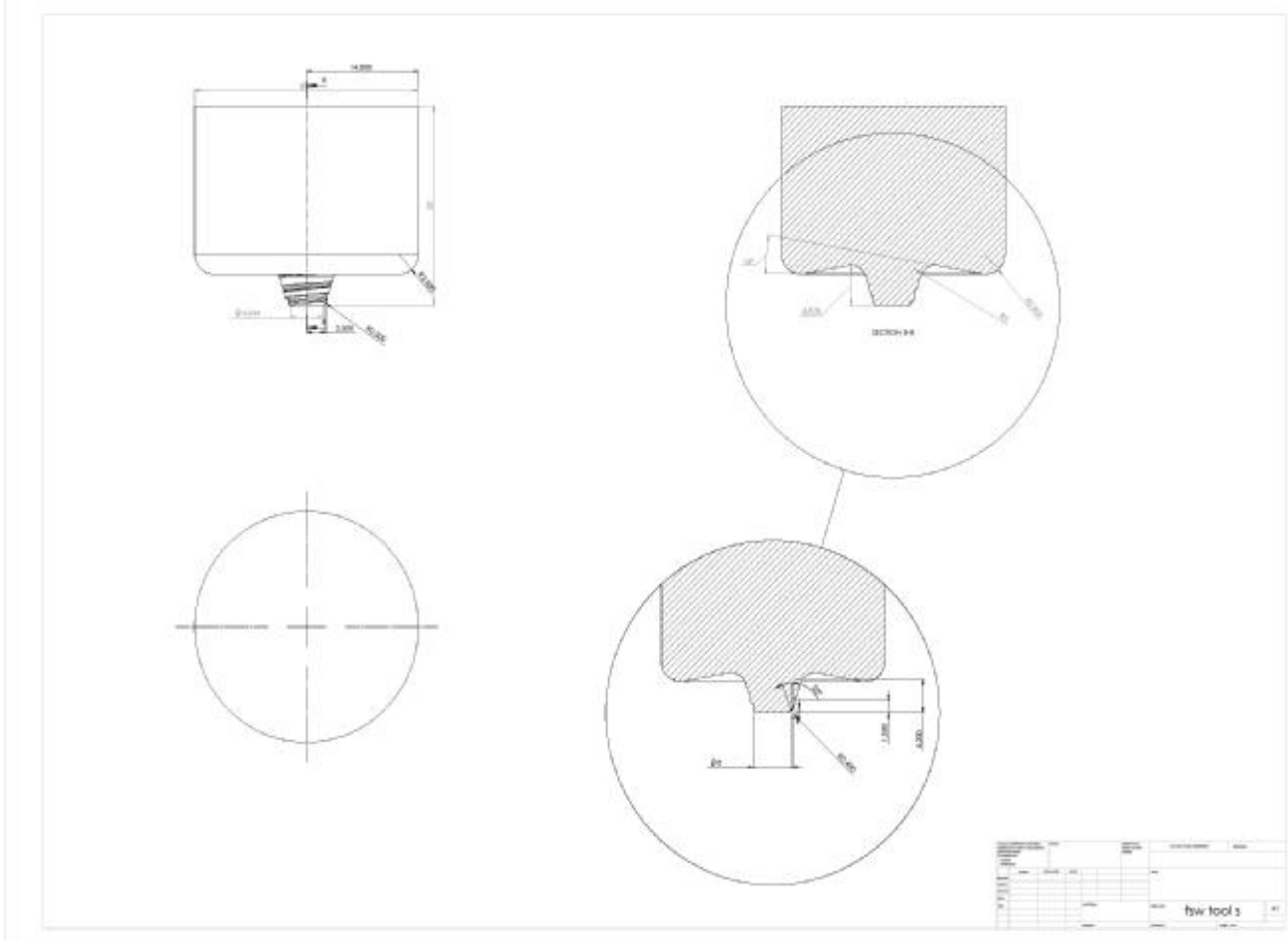
Σχήμα 4.16: Γραφική παράσταση της δύναμης προς την πρόωση ανά rpm[763]

Ύστερα από τη συγκόλληση παρατηρήθηκε το σχήμα κόκκων του υλικού και έγινε σύγκριση του με μη συγκολληθέν υλικό. Όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα το υλικό έχει μέγεθος κόκκων πριν τη συγκόλληση 100-200μm, ενώ μετά τη συγκόλληση έχει μετατραπεί σε 30-70μm.



Σχήμα 4.17: Μέγεθος κόκκων πριν και μετά τη συγκόλληση[763]

4.2 Κράμα αλουμινίου AA2024-T351



Σχήμα 4.18: Κράμα αλουμινίου AA2024-T351

Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται εργαλείο συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης στο οποίο έχει γίνει μελέτη συγκόλλησης τριβής σε αλουμίνιο 2024-T351.[767,768,772,784-788]

Σε αυτό το πείραμα που διεξήχθη από ερευνητές χρησιμοποιήθηκε σειρά αλουμινίου με κωδικό Alcalaad 2024-T351 το οποίο είναι και εμπορικά διαθέσιμο. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς και η σύσταση του δίνονται στον πίνακα 4.3. Συγκολλήθηκαν δυο όμοιες πλάκες με διαστάσεις 260mm x 65mm x 6mm.Οι πλάκες στερεώθηκαν πάνω στην επιφάνεια εργασίας με κατάλληλο τρόπο συγκράτησης ως προς την πλευρά κίνησης της ακίδας. Το μήκος των συγκολλήσεων που διεξήχθησαν είναι 210mm περίπου σε κάθε πλάκα.[790]

Πίνακας 4.3: Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες του Al2024-T351 (BA: γωνία κάμψης)[801]

Χημική σύσταση, wt%									
Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Zr	Ni	Cr
4.70	1.56	0.65	0.17	0.11	0.046	0.032	0.011	0.006	0.004

Μηχανικές ιδιότητες				
YS/MPa	UTS/Mpa	A ₅ /%	HV	BA
370	481	18	145	180

Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά είδη ακίδας τα οποία δίνονται στο σχήμα πιο κάτω. Κατά την διαδικασία της συγκόλλησης η ακίδα είχε κλίση 1° ως προς την φορά κίνησης της. Μια συνεχής κάθετη δύναμη αναπτύσσεται καθώς η ακίδα βυθίζεται στις πλάκες, η οποία θα παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της συγκόλλησης διότι το πάχος της πλάκας παραμένει το ίδιο. Παράλληλα, το μήκος βύθισης του ώμου του εργαλείου είναι 0,2mm. Όλες οι συγκολλήσεις γίνονται σε θερμή κατάσταση όπως αναπαρίσταται από την ταχύτητα περιστροφής της ακίδας ανά λεπτό (rpm) και την V που είναι η ταχύτητα πρόωσης της συγκόλλησης mm/min.[765,789] Οι παράμετροι από τις οποίες διεξήχθη ο έλεγχος αναπαρίστανται στον πίνακα 4.4, όπου η αναλογία R²/V αναπαριστά την ψευδοθερμότητα εισόδου που έχουν υποδείξει οι Arbegast και Hartly.[790]

Πίνακας 4.4: Παράμετροι συγκόλλησης [801]

Δείγμα	Χαρακτηρισμός εργαλείου	Ρυθμός περιστροφής (R) rpm	Ταχύτητα συγκόλλησης (V) mm/min	Αναλογία α R/V rev/min	Αναλογία R ² /V	Αναλογία V/R mm/rev
A	310	750	73	10.27	7700	0.0973
B			93	8.06	6050	0.1240

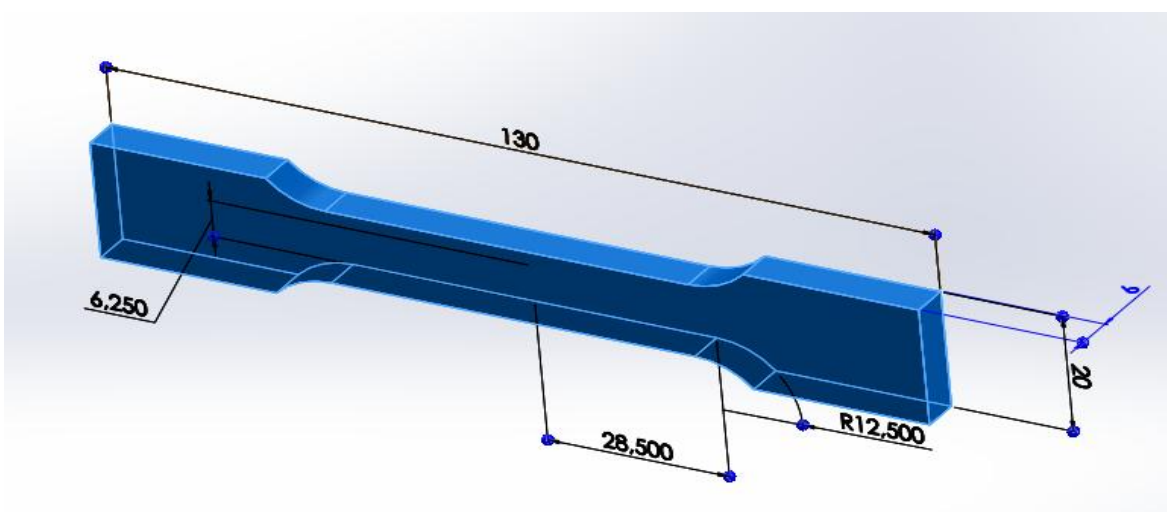
Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία του ελέγχου για τον καθορισμό ποιότητας δίνεται στον πίνακα 4.20. Προκειμένου να αποκαλυφθεί οποιοδήποτε εμφανές ή μη εμφανές ελάττωμα όλες οι συγκολλήσεις εξετάστηκαν οπτικά, με την χρήση ακτινών Xray αλλά και με υπερήχους. Τα βήματα αυτά θα εξαλείφονταν αν οι συγκολλήσεις δεν ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις και συνεπώς δεν θα συνεχιζόταν η εξέταση του δείγματος.

Πίνακας 4.5: Μεθοδολογία διαδικασίας εξέτασης

Δράση	Βήματα	Έρευνα
Μη καταστροφική	1	Οπτική εξέταση
	2	Διεισδυτική εξέταση
	3	X-ray εξέταση
	4	Υπέρηχη εξέταση
Καταστροφική	5	Αξιολόγηση της μικροδομής
	6	Έλεγχος σκληρότητας
	7	Έλεγχος έντασης
	8	Έλεγχος κάμψης

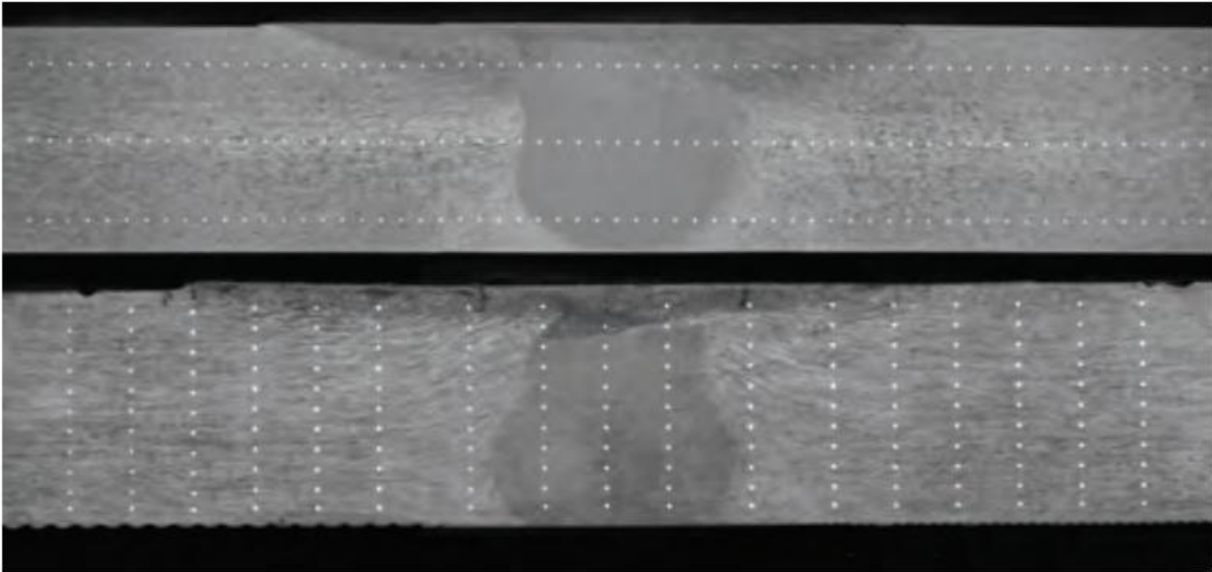
Όλα τα δείγματα που συγκολλήθηκαν παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 20 μέρες και δείγματα για εξέταση πάρθηκαν κάθετα με την φορά της συγκόλλησης όπως δείχνει το σχήμα 3. Η μεταλλογραφική παρατήρηση ήρθε εις πέρας με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου χρησιμοποιώντας Leica M205A. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην σύνδεση μεταξύ της παρατήρησης τόσο της δομής όσο και των μετρήσεων σκληρότητας.

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν από τον πυρήνα/ψήγμα της συγκόλλησης υποβλήθηκαν σε εξέταση μεγέθους με την χρήση Leica DFC295 κάμερας αλλά και με την βοήθεια του λογισμικού LAS.[791] Προκειμένου να διατηρηθούν οι θέσεις κατάγματος πάνω στην συγκόλληση FSW, η επιφάνεια των δειγμάτων που προορίζονταν για εφελκυσμό χαράχθηκε μέσω της λύσης Tucker πριν την εξέταση. Τα δείγματα που προορίζονταν για δοκιμές εφελκυσμού διεξήχθησαν σε θερμοκρασία δωματίου με ποσοστό στελέχους $3,3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ στο δείγμα ASTM E8M (σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.19 : Σχήμα και διαστάσεις του ASTM E8M[801]

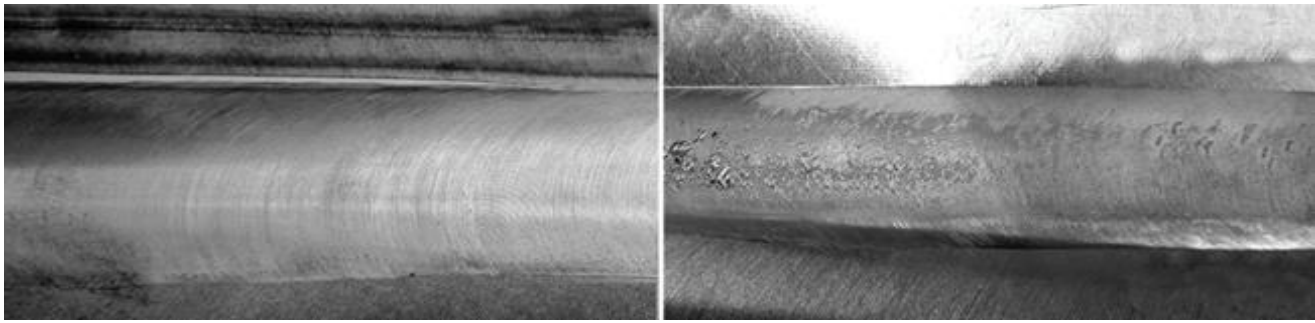
Προκειμένου να εκτιμηθεί η επαναληψιμότητα τουλάχιστον τέσσερα δείγματα ελέγχθηκαν και αναφέρθηκε η μέση τιμή τους. Δοκιμές κάμψης διεξήχθησαν σύμφωνα με το πρότυπα EN910 με κοινό κέντρο πάνω από τον άξονα. Η μέτρηση σκληρότητας Vicker διεξήχθη κάθετα αλλά ταυτόχρονα και παράλληλα προς την φορά συγκόλλησης χρησιμοποιώντας ψηφιακά ελεγχόμενη μηχανή δοκιμής σκληρότητας (HVS 1000) εφαρμόζοντας 9.807N ισχύ για 15 δευτερόλεπτα. Τα προφίλ σκληρότητας ελήφθησαν ως εξής: κατά μήκος τρεις οριζόντιες και δεκαεφτά κάθετες κατευθύνσεις (Σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.20: Οριζόντια (πάνω) και κάθετη (κάτω) γραμμές ελέγχου σκληρότητας[801]

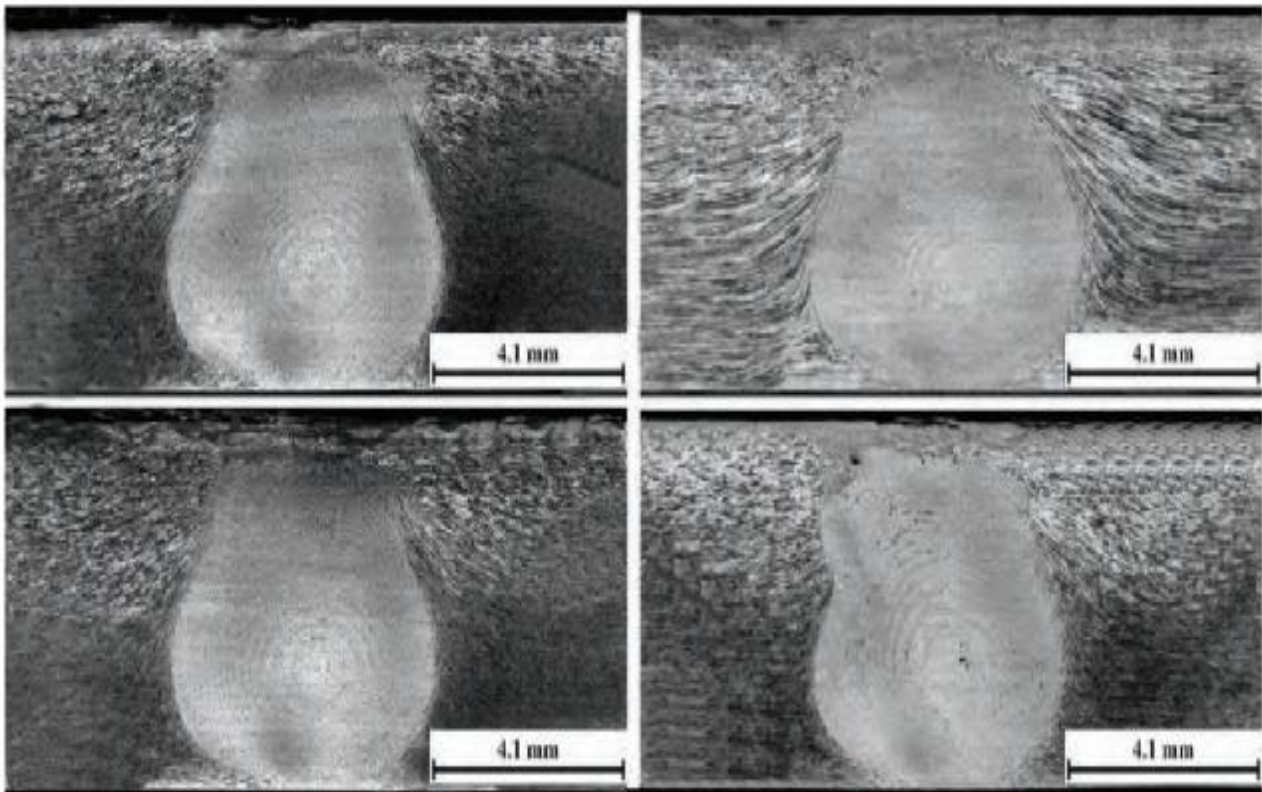
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να επιτευχθεί η διανομή σκληρότητας χαρτογραφήθηκαν σε σύνολο 183 και 187 εγκοπές σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντίστοιχα.

Από την παραπάνω έρευνα εξήχθησαν τα εξής αποτελέσματα. Αρχικά, από την μη καταστροφική έρευνα καταλήξε πως δεν υπήρχε κανένα ελάττωμα στον όγκο της συγκόλλησης. Αυτό το αποτέλεσμα παρέχει το συμπέρασμα πως όλες οι συγκολλήσεις ήταν μη ελαττωματικές. Η πάνω επιφάνεια της συγκόλλησης διαφαίνεται στο σχήμα 4.21. Σε αυτό το σχήμα μπορούμε να αντιληφθούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η επιφάνεια φαίνεται αποδεκτή ως προς την εμφάνιση της καθώς είναι λεία και χωρίς κάποιο οπτικό ελάττωμα.



Σχήμα 4.21: Εμφάνιση της επιφάνειας της συγκόλλησης[801]

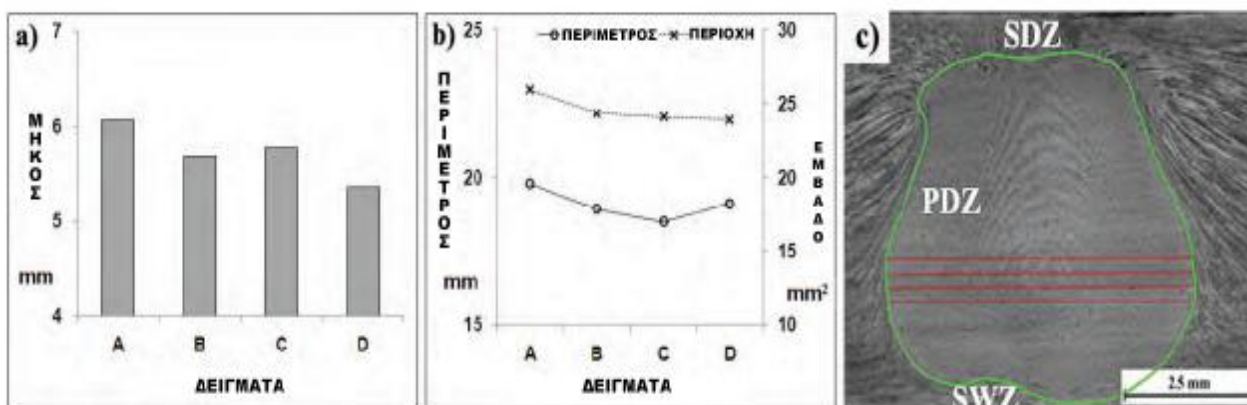
Στο σχήμα 4.22 που θα παρουσιαστεί παρακάτω φαίνεται η μακροδομή της εγκάρσιας τομής σε όλες τις περιπτώσεις. Στην μακροδιαρθρωτική εξέταση επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα του μη καταστροφικού ελέγχου καθώς δεν διαπιστώθηκαν κενά, ρωγμές ή άλλα ελαττώματα στη συγκόλληση.



Σχήμα 4.22: Μακροδομή της εγκάρσιας τομής σε όλες τις περιπτώσεις.[801]

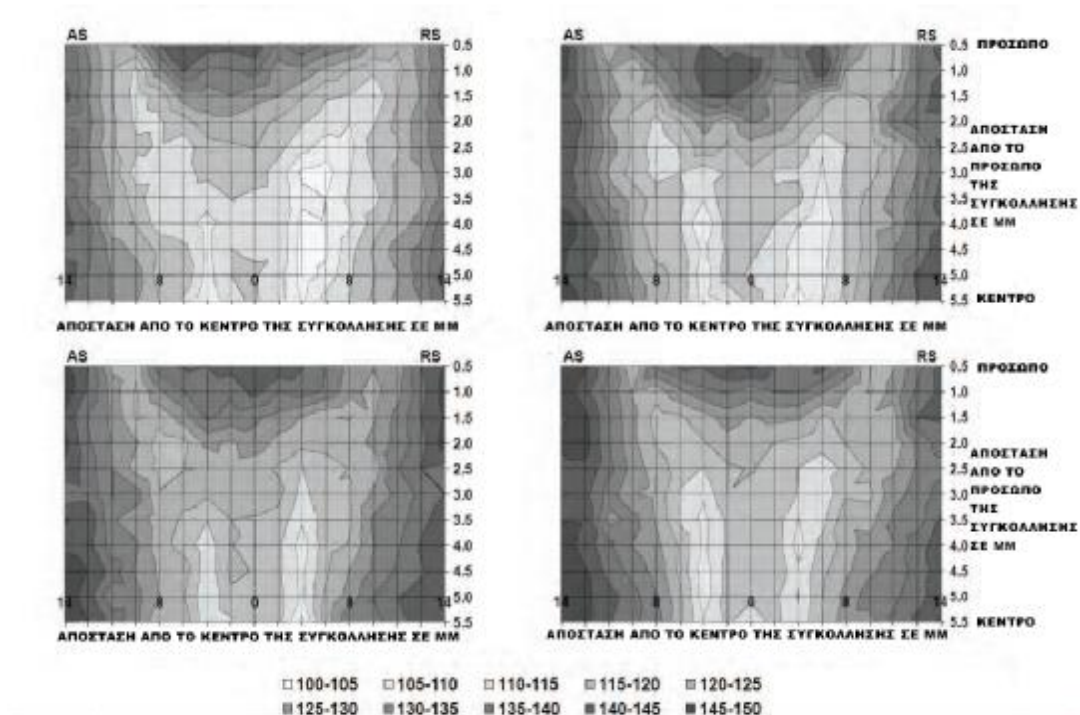
Η περιοχή όπως είναι ευρέως γνωστό χωρίζεται σε τρία μέρη: ζώνη ψήγματος (NZ), θερμομηχανική επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) και θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ). Σύμφωνα με το ρόλο του ώμου και της ακίδας στο σχηματισμό του ψήγματος, το ψήγμα μπορεί να χωριστεί σε τρεις επιμέρους ζώνες. Ονομαστικά αυτές είναι: ζώνη επηρεασμού από ώμο (SDZ), ζώνη επηρεασμένη από ακίδα (PDZ) και ζώνη στροβιλισμού (SWZ), οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 4.23.[792-795] Η γεωμετρία της ακίδας δεν δείχνει να έχει

άμεση επιρροή στην διάχυση της TMAZ περιοχής αλλά και στο σχήμα της. Από την άλλη πλευρά, η ζώνη ψήγματος NZ και συγκεκριμένα η επηρεασμένη από ακίδα PDZ σχετίζεται έντονα με την γεωμετρία της ακίδας. Σε ένα συγκριτικά μεγάλο PDZ με δομή με πολλά υποστρώματα παρατηρήθηκε ένα στενό SDZ και SWZ. Η δομή με πολλά υποστρώματα στο PDZ είναι άμεσα επηρεασμένη από τις παραμέτρους συγκόλλησης αλλά και το σχεδιασμό της ακίδας (Σχήμα 4.22) Επιπλέον, μειώνοντας την ταχύτητα συγκόλλησης για τους ίδιους ρυθμούς περιστροφής παράγεται υψηλότερη απόσταση μεταξύ των υποστρωμάτων. Διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των υποστρωμάτων σχετίζονται με την ακίδα και την πρόωση της ανά περιστροφή, δηλαδή σε ρυθμούς περιστροφής των 750 rpm και της ταχύτητας συγκόλλησης 73 και 93 mm/min, το εργαλείο κινήθηκε 0,0973 και 0,1240 mm/rev (Πίνακας 4.3). Η σχέση μεταξύ της κίνησης της ακίδας ανά περιστροφή και του μήκους των υποστρωμάτων μπορεί να περιγραφεί ως διαλείπουσα συμπεριφορά, το οποίο σχετίζεται με τη γεωμετρία της ακίδας και πιο συγκεκριμένα του σπειρώματος.[796-798] Η SDZ και η SWZ είναι λιγότερα επηρεάσιμες από τις διαφορετικές παραμέτρους συγκόλλησης. Για τον ίδιο ρυθμό περιστροφής η PDZ γίνεται στενότερη όσο η ταχύτητα συγκόλλησης αυξάνεται. Εξαιτίας των μικρών διαφορών στο σχεδιασμό της ακίδας παρατηρείται μια μικρή διαφορά στο μήκος της PDZ περιοχή (Σχήμα 4.23α).



Σχήμα 4.23: Ζώνες ψήγματος[801]

Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης η μεταλλική ροή γύρω από την ακίδα δεν είναι όμοια. Άξια αναφοράς είναι η συμπεριφορά που αποδίδεται στην αύξηση της εισόδου θερμότητας καθώς η ταχύτητα συγκόλλησης μειώνεται σε σχέση με το ρυθμό περιστροφής οδηγώντας σε μια συνολική αύξηση του πλάτους της πλαστικής ζώνης. Στο σχήμα 4.23β αναπαρίστανται η περίμετρος της PDZ αλλά και η περιοχή η οποία διανέμεται.



Σχήμα 4.24: Χάρτες κατανομής σκληρότητας[801]

Στο σχήμα 4.24 αναπαρίστανται χάρτες κατανομής σκληρότητας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των πιο αδύναμων περιοχών της συγκόλλησης. Επίσης, αυτοί οι χάρτες χρησιμοποιούνται σε μια προσπάθεια να απεικονίσουμε προβλέψεις για θέσεις τυχόν καταγμάτων που μπορεί να προκύψουν. Η χαμηλή σκληρότητα μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός της ανάπτυξης κόκκων μετά την ανακρυστάλλωση.

Μέσα από τους ελέγχους αποδόθηκαν οι νέες μέσες τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού μετά τη συγκόλληση.

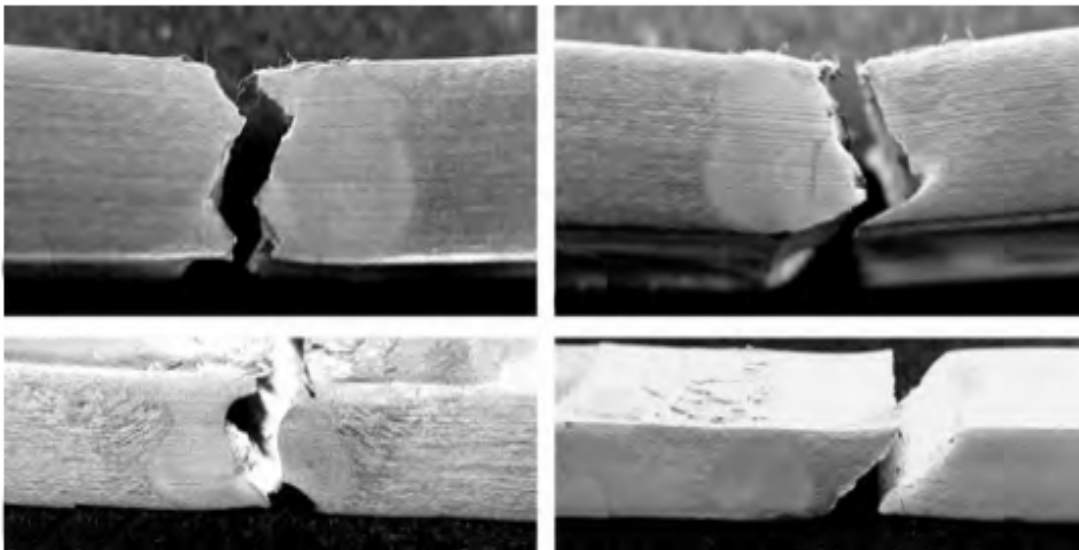
Πίνακας 4.6: Ιδιότητες εφελκυσμού[801]

Δείγμα	UTS/Μρα	A _s /%	Αποτελεσματικότητα συγκόλλησης UTS _{F_{SW}} /UTS _{B_M} (%)	Αποτελεσματικότητα συγκόλλησης A _{F_{SW}} /A _{B_M} (%)
A	395	7,5	82,2	41,4
B	355	3,9	73,7	21,7
Γ	365	4,2	75,9	23,2
Δ	309	2,8	64,2	15,5

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η επιμήκυνση της συγκόλλησης είναι πολύ μικρότερη από την αρχική επιμήκυνση του κράματος και είναι μέγιστη στην τιμή 7,5. Στον συνεχή ρυθμό περιστροφής 750 rpm η αντοχή μειώθηκε απότομα όταν αυξήθηκε η ταχύτητα συγκόλλησης. Η μείωση στην αντοχή σε εφελκυσμό είναι μια συνέπεια λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του εργαλείου. Μέγιστη UTS (μέγιστη εφελκυστική δύναμη) επιτεύχθηκε στη συγκόλληση με αναλογία 10,27 R/V, ενώ αντίθετα ελάχιστη UTS παρατηρήθηκε για αναλογία 8,06 R/V. Συνεπώς, εύκολα διεξάγεται το συμπέρασμα ότι μικρές αλλαγές στο σχεδιασμό της ακίδας όπως έλλειψη σπειρώματος ή αλλαγή γωνιών μπορεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στο αποτέλεσμα του σχηματισμού της συγκόλλησης καθώς επίσης και στις μηχανικές ιδιότητες. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα η γενική ποιότητα των συγκολλήσεων εξαρτάται κατά πολύ από την είσοδο θερμότητας και από τη μεταλλική ροή του υλικού λόγω διαφορετικών παραμέτρων συγκόλλησης.

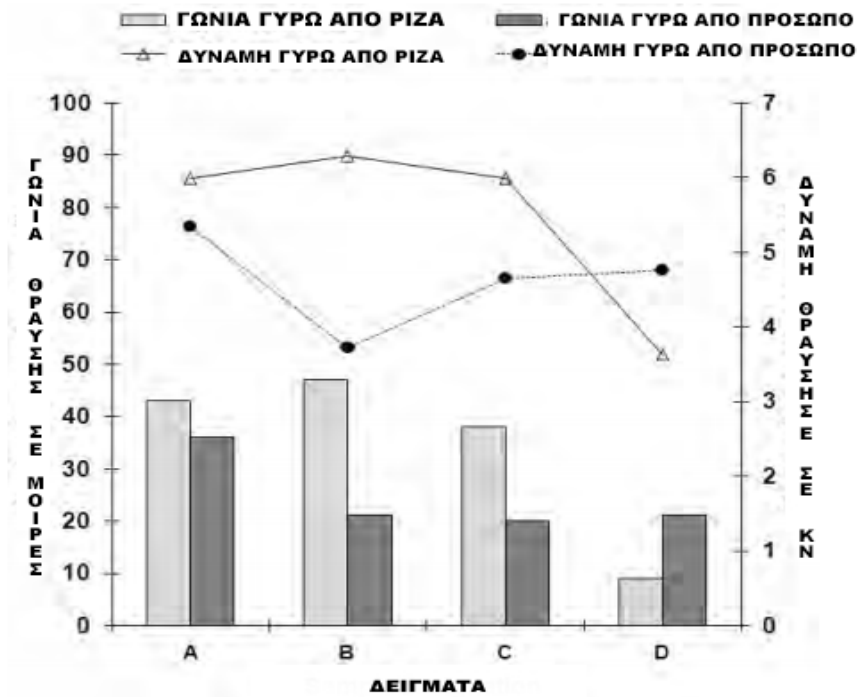
Ο προσδιορισμός της τοποθεσίας του κατάγματος είναι πολύ σημαντικός καθώς μας βοηθά να κατανοήσουμε και να βελτιώσουμε τις μηχανικές ιδιότητες. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις στα δείγματα τα κατάγματα προέκυπταν στις περιοχές διασύνδεσης NZ και TMAZ. [778,799,800]

Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η τοποθεσία των καταγμάτων πρώτα χαράχθηκαν οι διατομές όπως φαίνεται στο σχήμα 4.25. Τα δείγματα αυτά μοιάζουν πολύ με τους χάρτες σκληρότητας που προαναφέρθηκαν και που προσδιορίζουν με ακρίβεια ότι το ελάττωμα θα εμφανιστεί στο πιο αδύναμο σημείο.



Σχήμα 4.25: Τυπικό κάταγμα κατά την διαδικασία εφελκυσμού [α)Διεπαφή μεταξύ NZ/TMAZ στο AS, β) Διεπαφή μεταξύ NZ/TMAZ στο RS, γ)NZ κεντρική περιοχή και δ) Διεπαφή μεταξύ TMAZ/HAZ στο RS[801]

Παράλληλα, διεξήχθη δοκιμή κάμψης τριών σημείων για την εξέταση της γωνίας της εμφάνισης πρώτης ρωγμής. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ανάπτυξη δυνάμεων κατά την δημιουργία ρωγμής και τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής διαφαίνονται στο σχήμα 4.26. Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι οι ιδιότητες κάμψης των αρθρώσεων είναι πολύ μικρότερες από αυτές που απεικονίζονται στο BM (Πίνακας 4.1).



Σχήμα 4.26: Αποτελέσματα κάμψης[801]

Εν κατακλείδι, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός εργαλείου μπορεί να παράγει έναν μεγάλο αριθμό συγκολλήσεων χωρίς ελαττώματα. Όμως, τυχόν αλλαγές στον σχεδιασμό μπορούν να επηρεάσουν πολύ τα αποτελέσματα της συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά το πέρας της θεωρητικής ενασχόλησης μας με το θέμα της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης επιλέξαμε να κατασκευάσουμε μια από τις ακίδες, τις οποίες είχαμε αναφέρει διεξοδικά προηγουμένως.

Έπειτα από έρευνα επιλέξαμε την τελευταία ακίδα του σχήματος AA2024-T351 . Η επιλογή αυτή σέγινε για αρκετούς λόγους. Ο πρώτος λόγος που επιλέξαμε την εν λόγω ακίδα ήταν λόγω του ότι τηρεί μια πληθώρα χαρακτηριστικών, τα οποία βελτιώνουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα συγκόλλησης, όπως για παράδειγμα το σπείρωμα, το κωνικό σχήμα του κύριου κορμού αλλά και την κοιλότητα που παρατηρείται στην πατούρα. Παράλληλα, άλλο ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή μας αυτή ήταν και τα αποτελέσματα συγκολλήσεων που παρατηρήσαμε κατά την βιβλιογραφική μας αναζήτηση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αφού είχαμε κάνει την επιλογή μας στο σχέδιο της ακίδας έπρεπε να επιλέξουμε, επίσης, το κατάλληλο υλικό από το οποίο θα κατασκευαζόταν η ακίδα μας. Θεωρήσαμε σκόπιμο να επιλέξουμε τον κατασκευαστικό χάλυβα για διάφορους λόγους. Αρχικά, ο κατασκευαστικός χάλυβας είναι ένα εύκολο υλικό όσον αφορά στην κατεργασία. Επίσης, αυτού του είδους ο χάλυβας τηρούσε τα περισσότερα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την εκτέλεση μιας συγκόλλησης μέσω τριβής. Τέλος, ο μείζονος σημασίας λόγος επιλογής του συγκεκριμένου υλικού είναι ότι ο κατασκευαστικός χάλυβας είναι ένα από τα σχετικά πιο προσιτά υλικά τόσο ως προς το κόστος αγοράς όσο και κατεργασίας.

Εφόσον είχαμε κάνει την επιλογή του σχεδίου αλλά και του υλικού της ακίδας κατευθυνθήκαμε προς το μηχανουργείο για την δημιουργία της ακίδας μας. Κατασκευάστηκαν τέσσερις ακίδες του ίδιου μεγέθους αλλά και όγκου (Σχήμα 5.1), από ένα στρογγυλό δοκίμιο που κατεργάστηκε για περίπου μια ώρα. Από αυτές, οι τρεις θα χρησιμοποιηθούν για παρουσίαση κατά την παράδοση της πτυχιακής εργασίας και η τελευταία θα αποτελούσε την ακίδα, η οποία θα δοκιμαζόταν σε μια συγκόλληση τριβής .

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι τρεις ακίδες, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για παρουσίαση δεν έχουν υποστεί κάποια άλλη κατεργασία, όπως για παράδειγμα σκλήρυνση. Η μοναδική ακίδα, η οποία υπέστη σκλήρυνση για ευνόητους λόγους ήταν η ακίδα, η οποία θα δοκιμαζόταν σε συγκόλληση.

Θεωρείται άκρως σημαντικό να τονίσουμε ότι η ακίδα μέσω της οποίας θα εκτελούταν η συγκόλληση οδηγήθηκε σε ειδικό φούρνο, στον οποίο παρέμεινε για αρκετή ώρα. Η συγκεκριμένη ακίδα εκτέθηκε στους 850°C περί τις τρεις ώρες. Ύστερα, εμβαπτίστηκε μέσα σε ειδικό λάδι που βρισκόταν σε θερμοκρασία 20°C και παρέμεινε εκεί για 45 λεπτά. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε καθώς η θερμική κατεργασία βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα καθιστώντας την έτσι ικανή να φέρει εις πέρας την διαδικασία της μετέπειτα συγκόλλησης.









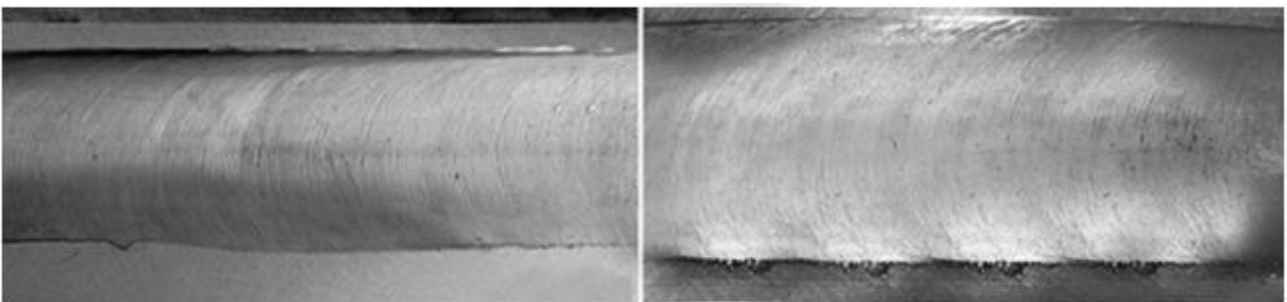
Σχήμα 5.1: Ακίδα του σχήματος AA2024-T351

Μετά τη δημιουργία μιας ακίδας ικανής να εκτελέσει την διαδικασία της συγκόλλησης αναζητήσαμε δυο πλάκες φτιαγμένες από αλουμίνιο ώστε να τις συγκολλήσουμε. Οι πλάκες οι οποίες θα συγκολλούνταν ήταν ίδιων διαστάσεων με την βιβλιογραφία και πιο συγκεκριμένα 260mm x 65mm x 6mm.

Αφότου δημιουργήσαμε την κατάλληλη ακίδα αποφασίσαμε να εκτελέσουμε την συγκόλληση στη φρέζα. Στο συγκεκριμένο σημείο, οι δυο πλάκες, αφού καθαρίστηκαν ώστε να μην φέρουν κανένα εξωγενές υλικό, το οποίο μπορούσε να παραμορφώσει την υφή της συγκόλλησης, προσδέθηκαν στην τράπεζα της μηχανής. Η παραπάνω πρόσδεση έλαβε χώρα στις γωνίες των δυο πλακών σε σχηματισμό 45°. Παράλληλα, συνέβησαν και άλλες δυο προσθέσεις κατά τον διαμήκη άξονα των δυο πλακών. Η πρόσδεση αυτή συντελέστηκε

με απώτερο σκοπό τόσο να επιτύχουμε την πλήρη ακινητοποίηση των πλακών όσο και να διασφαλίσουμε ότι καμία από τις πλάκες δεν θα μετακινηθεί λόγω των εντονότατων διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται με την κίνηση της ακίδας στην επιφάνεια των πλακών. Εφόσον βεβαιωθήκαμε ότι έχει γίνει σωστή συγκράτηση των κομματιών μας αποφασίσαμε να ακολουθήσουμε με ευλάβεια τις βιβλιογραφικές τιμές σχετικά με την ταχύτητα περιστροφής (R) αλλά και την πρόωση (V), οι οποίες ήταν 750 rpm για την περιστροφή της ακίδας και 73 mm/min για την πρόωση αντίστοιχα.

Εφόσον επιτεύχθηκε η επιλογή τόσο της πρόωσης όσο και της ταχύτητας περιστροφής επιλέξαμε την κάθετη αξονική δύναμη στους 2,5 KN . Επίσης, θεωρήσαμε απαραίτητο η συγκόλληση να μην ξεκινήσει από την αρχή της ένωσης των πλακών αλλά 10 mm αργότερα και να τελειώσει 10mm νωρίτερα, με αποτέλεσμα το μήκος της συγκόλλησης μας να είναι 240mm. Πιο συγκεκριμένα, η απόφαση αυτή πάρθηκε για ένα και κύριο λόγο: επειδή ο σχεδιασμός της ακίδας έχει γίνει ώστε η ακίδα να ξεκινήσει τρυπώντας τις επιφάνειες των δυο πλακών και έπειτα να συνεχίσει την κίνηση της κατά μήκος της ραφής και όχι να ξεκινήσει την συγκόλληση με μια μετωπική επαφή της προωθημένης άκρης της ως προς τις δυο επιφάνειες. Αυτός ο τρόπος έναρξης της συγκόλλησης αποδείχτηκε πως είναι ιδιαίτερα απαραίτητος ώστε η ακίδα να παραλάβει τόσο τα δυναμικά όσο και τα θερμικά φορτία, τα οποία θα δημιουργούνταν με τον σωστό τρόπο ώστε να αποφευχθεί η ομολογουμένως μη επιθυμητή καταστροφή της. Με την ολοκλήρωση της συγκόλλησης θα γινόταν οπτικός έλεγχος τόσο της ακίδας για να διαπιστωθεί κάποια τυχόν αστοχία ή ακόμη και τοπικά κατάγματα στην ακίδα, όσο και οπτικός έλεγχος της επιφάνειας της συγκόλλησης.



Σχήμα 5.2: Υφή συγκόλλησης(δεξιά) σε σχέση με την βιβλιογραφία(αριστερά)

Εν τέλει, μεταβήκαμε στην βιβλιογραφία για σύγκριση της υφής της συγκόλλησης. Όπως είναι φανερό και από την παραπάνω φωτογραφία η συγκόλληση (Σχήμα 5.2), η οποία διεξήχθη με επιτυχία παρουσιάζει σε αρκετά μεγάλο ποσοστό την ίδια υφή με την εικόνα της βιβλιογραφίας. Συνεπώς, λόγω των παραπάνω παραμέτρων κρίνουμε ότι η συγκόλληση δυο πλακών αλουμινίου είναι εφικτή με τον σχεδιασμό του επιλεγμένου εργαλείου του σχήματος AA2024-T351 και φέρει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΝΑΣΧΟΛΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ

Κάθε πτυχιακή εργασία, όπως και η συγκεκριμένη, έχει πολλαπλά οφέλη για τον φοιτητή ή τους φοιτητές που την εκπονούν. Αρχικά, σε μεγάλο ποσοστό η πτυχιακή εργασία δίνει την ευκαιρία σε κάθε φοιτητή να δοκιμάσει τις θεωρητικές του γνώσεις αλλά και δεξιότητες που απέκτησε κατά τη διάρκεια της φοίτησης του στο εκάστοτε τμήμα. Επίσης, προκαλεί το φοιτητή να εφαρμόσει εκτεταμένα τις γνώσεις που απέκτησε κατά τη διάρκεια των σπουδών του και να διερευνήσει σε βάθος ένα θέμα το οποίο τον ενδιαφέρει.

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήθηκαν οι βάσεις για έρευνα πάνω στο θέμα της συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης.

Ειδικότερα, μελετήθηκε εκτεταμένα η τεχνική συγκόλλησης τριβής μέσω ανάδευσης και παρουσιάστηκε αναλυτικά. Με βάση την μελέτη που διεξήχθη πραγματοποιήθηκε δοκιμή συγκόλλησης με εργαλείο που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας. Τα αποτελέσματα ήταν απόλυτα επιτυχή.

Παράλληλα, η έρευνα που κάναμε πριν την συγγραφή της παρούσας πτυχιακής μας έδωσε τη δυνατότητα να γνωρίσουμε καλύτερα τόσο τα υλικά όσο και τη διαδικασία της συγκόλλησης. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ενασχόληση μας με την παρούσα εργασία μας δίδαξε πώς να ολοκληρώσουμε μία επιστημονική μελέτη με τη βοήθεια ενός επιβλέποντα καθηγητή. Συμπερασματικά, η πτυχιακή εργασία μας ωφέλησε πολλαπλά καθώς μας έφερε σε επαφή με πολλά θεωρητικά κομμάτια γνώσεων που είχαμε αποκτήσει στο παρελθόν, τα οποία πλέον είναι κτήμα μας και σε πρακτικό επίπεδο και ευχόμαστε να σταθεί αφορμή για περαιτέρω μελέτη μελλοντικών συναδέλφων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: 'Friction stir butt welding', GB patent no. 9125978· 8, 1991
- [2] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: 'Improvements relating to friction welding', US patent no. 5 460 317; EPS 0 616 490, 1991
- [3] I. J. Smith and D. D. R. Lord: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI, Paper no. 2007-01-1707
- [4] P. L. Threadgill: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 357-360
- [5] W. Tang, X. Guo, J. C. McClure and L. E. Murr: *J. Mater. Process. Manuf. Sci.*, 1999, **7**, 163-172
- [6] M. W. Mahoney, C. G. Rhodes, J. G. Flintoff, R. A. Spurling and W. H. Bingel: *Metall. Mater. Trans. A*, 1998, **29A**, 1955-1964
- [7] A. P. Reynolds, W. D. Lockwood and T. U. Seidel: *Mater. Sci. Forum*, 2000, **331-337**, 1719-1724
- [8] L. E. Murr, G. Liu and J. C. McClure: *J. Mater. Sci.*, 1998, **33**, 1243-1251
- [9] G. J. Bendszak, T. H. North and C. B. Smith: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI
- [10] K. A. A. Hassan, P. B. Prangnell, A. F. Norman, D. A. Price and S. W. Williams: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2003, **8**, 257-268
- [11] Y. K. Yang, H. Dong and S. Kou: *Weld. J.*, 2008, **87**, 202s-211s
- [12] A. Gerlich, M. Yamamoto and T. H. North: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 472-480
- [13] J. H. Yan, M. A. Sutton and A. P. Reynolds: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2005, **10**, 725-736
- [14] P. A. Colegrove, H. R. Shercliff and R. Zettler: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 284-297
- [15] C.-G. Andersson, R. E. Andrews, B. G. I. Dance, M. J. Russell, E. J. Olden and R. M. Sanderson: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI
- [16] L. Cedeqvist and R. E. Andrews: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI, 1400-1430
- [17] K. Savolainen, J. Mononen, T. Saukkonen, H. Hänninen and J. Koivula: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI, 19
- [18] W. B. Lee and S. B. Jung: *Mater. Lett.*, 2004, **58**, 1041-1046
- [19] H. S. Park, T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata and M. Ushio: *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, **A371**, 160-169
- [20] T. Sakhivel and J. Mukhopadhyay: *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**, 8126-8129
- [21] G. M. Xie, Z. Y. Ma and L. Geng: *Scr. Mater.*, 2007, **57**, 73-76
- [22] P. Volovitch, J.-E. Masse, T. Baudin, B. da Costa, J. C. Goussain, W. Saikaly and L. Barrallier: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI
- [23] J. A. Esparza, W. C. Davis, E. A. Trillo and L. E. Murr: *Mater. Sci. Lett.*, 2002, **21**, 917-920
- [24] R. Johnson: *Mater. Sci. Forum*, 2003, **419-422**, 365-370
- [25] P. L. Threadgill and R. Johnson: Proc. Symp. on 'Magnesium technology', San Diego, CA, USA, March 2003, TMS

- [26] W. B. Lee, J. W. Kim, Y. M. Yeon and S. B. Jung: *Mater. Trans.*, 2003, **44**, 917-923
- [27] S. H. C. Park, Y. S. Sato and H. Kokawa: *Scr. Mater.*, 2003, **49**, 161-166
- [28] S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa and T. Tsukeda: in 'Trends in welding research', (ed. S. A. David *et al.*), 267-272; 2003, Materials Park, OH, ASM International
- [29] N. Afrin, D. L. Chen, X. Cao and M. Jahazi: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A472**, 179-186
- [30] W. B. Lee, C. Y. Lee, W. S. Chang, Y. M. Yeon and S. B. Jung: *Mater. Lett.*, 2005, **59**, 3315-3318
- [31] A. J. Ramirez and M. C. Juhas: *Mater. Sci. Forum*, 2003, **426-432**, 2999-3004
- [32] A. P. Reynolds, E. Hood and W. Tang: *Scr. Mater.*, 2005, **52**, 491-494
- [33] B. P. Wynne, P. S. Davies, M. J. Thomas, B. S. Ng and P. L. Threadgill: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI
- [34] M. J. Russell, P. L. Threadgill, M. J. Thomas and B. P. Wynne: Proc. 11th Int. Conf. on 'Titanium', Kyoto, Japan, June 2007, Japan Institute of Metals, 1095-1098
- [35] W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 1999, **4**, 365-372
- [36] R. Johnson and P. L. Threadgill: Proc. 6th Int. Conf. on 'Trends in welding research', Pine Mountain, GA, USA, June 2002, TWI
- [37] T. J. Lienert, W. L. Stellwag, B. B. Grimmer and R. W. Warke: *Weld. J.*, 2003, **82**, 1S-9S
- [38] S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano and M. Inagaki: *Scr. Mater.*, 2003, **49**, 1175-1180
- [39] A. P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold and H. Prask: *Scr. Mater.*, 2003, **48**, 1289-1294
- [40] A. P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. DeLoach: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2003, **8**, 455-460
- [41] H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A429**, 50-57
- [42] L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: *Scr. Mater.*, 2007, **56**, 637-640
- [43] S. J. Barnes, A. Steuwer, S. Mahawish, R. Johnson and P. J. Withers: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A492**, 35-44
- [44] H. J. Jun and R. Ayer: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI
- [45] H. J. Jun, R. Ayer, T. Neeraj and R. Steel: *Mater. Sci. Forum*, 2007, **539-543**, 3763-3768
- [46] F. X. Ye, H. Fujii, T. Tsumura and K. Nakata: *J. Mater. Sci.*, 2006, **41**, 5376-5379
- [47] H. Fujii, H. Kato, K. Nakata and K. Nogi: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI
- [48] G. Biallas, R. Braun, C. Dalle Donne, G. Staniek and W. A. Kaysser: Proc. Conf. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI
- [49] H. Larsson, L. Karlsson, S. Stoltz and E.-L. Bergqvist: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI
- [50] S. Tanaka and M. Kumagai: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI

- [51] H. R. Shercliff, M. J. Russell, A. D. Taylor and T. L. Dickerson: *Mécan. Indust.*, 2005, **6**, 25-35
- [52] M. J. Peel, A. Steuwer and P. J. Withers: *Metall. Mater. Trans. A*, 2006, **37A**, 2195-2206
- [53] M. J. Peel, A. Steuwer, P. J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi and H. Shercliff: *Metall. Mater. Trans. A*, 2006, **37A**, 2183-2193
- [54] A. Steuwer, M. J. Peel and P. J. Withers: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A441**, 187-196
- [55] F. Palm: Proc. Conf. Materials Week '99, Munich, Germany, September 1999, DGM
- [56] W. B. Lee, Y. M. Yeon and S. B. Jung: *Scr. Mater.*, 2003, **49**, 423-428
- [57] Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure: *Mater. Sci. Eng. A*, 1999, **A271**, 213-223
- [58] Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure: *Scr. Mater.*, 1999, **40**, 1041-1046
- [59] S. Lim, S. Kim and C. G. Lee: *Metall. Mater. Trans. A*, 2004, **35A**, 2837-2843
- [60] O. T. Midling: Proc. 4th Int. Conf. on 'Aluminium alloys', Atlanta, GA, USA, September 1994, Georgia Institute of Technology, 451-458
- [61] J. H. Ouyang and R. Kovacevic: *J. Mater. Eng. Perform.*, 2002, **11**, 51-63
- [62] A. Gerlich, P. Su and T. H. North: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2005, **10**, 647-652
- [63] S. A. Khodir and T. Shibayanagi: *Mater. Trans.*, 2007, **48**, 2501-2505
- [64] Y. S. Sato, S. H. C. Park, M. Michiuchi and H. Kokawa: *Scr. Mater.*, 2004, **50**, 1233-1236
- [65] A. C. Somasekharan and L. E. Murr: *Mater. Charact.*, 2004, **52**, 49-64
- [66] J. A. Wert: *Scr. Mater.*, 2003, **49**, 607-612.
- [67] C. M. Chen and R. Kovacevic: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2004, **44**, 1205-1214.
- [68] K. Kimapong and T. Watanabe: *Weld. J.*, 2004, **83**, 277S-282S.
- [69] H. Uzun, C. D. Donne, A. Argagnotto, T. Ghidini and C. Gambaro: *Mater. Design*, 2005, **26**, 41-46.
- [70] W. B. Lee and S. B. Jung: *Mater. Res. Innov.*, 2004, **8**, 93-96.
- [71] L. E. Murr, Y. Li, R. D. Flores, E. A. Trillo and J. C. McClure: *Mater. Res. Innov.*, 1998, **2**, 150-163.
- [72] L. E. Murr, R. D. Flores, O. V. Flores, J. C. McClure, G. Liu and D. Brown: *Mater. Res. Innov.*, 1998, **1**, 211-223.
- [73] L. E. Murr, Y. Li, E. A. Trillo, R. D. Flores and J. C. McClure: *J. Mater. Process. Manuf. Sci.*, 1999, **7**, 145-161.
- [74] R. S. Mishra and Z. Y. Ma: *Mater. Sci. Eng. R*, 2005, **R50**, 1-78.
- [75] R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia: *Prog. Mater. Sci.*, 2008, **53**, 980-1023.
- [76] R. S. Mishra and M. W. Mahoney (eds.): in 'ASM specialty handbook: friction stir welding and processing'; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [77] H. R. Shercliff and P. A. Colegrove: in 'Mathematical modelling of weld phenomena 6', (ed. H. Cerjak), 927-974; 2002, London, The Institute of Metals.

- [78] H. R. Shercliff and P. A. Colegrove: in 'Friction stir welding and processing', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 187-217; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [79] D. A. Price, S. W. Williams, A. Wescott, C. J. C. Harrison, A. Rezai, A. Steuwer, M. Peel, P. Staron and M. Kocak: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 620-633.
- [80] M. M. Z. Ahmed, B. P. Wynne, W. M. Rainforth and P. L. Threadgill: *Scr. Mater.*, 2008, **59**, 507-510.
- [81] P. L. Threadgill and M. E. Nunn: 'A review of friction stir welding: part 1 process overview ', TWI members report no. 760/2003, TWI, Abington, UK, 2003.
- [82] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, T. Kurita and S. Murata: *Int. J. Fatig.*, 2008, **30**, 1956-1966.
- [83] O. T. Midling, J. S. Kvåle and O. Dahl: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [84] D. Gesto, V. Pintos, J. Vazquez, J. Rasilla and S. Barreras: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [85] 'Super high-speed passenger cargo TSL successfully completed its sea trial', www.mes.co.jp/english/ 2005 (accessed September 2008).
- [86] J. Ray: 'Delta 4 fleet goes from: 'Medium' to 'Heavy"', in 'Spaceflight Now', 2002.
- [87] M. R. Johnsen: *Weld. J.*, 1999, **78**, 35-39.
- [88] D. J. Waldron and R. W. Roberts: Proc. Conf. on 'Aerospace automated fastening', Long Beach, CA, USA, September 1998, SAE, 15-17.
- [89] J. Ding, R. Carter, K. Lawless, A. Nunes, C. Russell, M. Suites and J. Schneider. 'A decade of friction stir welding R and D at NASA's Marshall Space Flight Center and a glance into the future', ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080009619_2008009118.pdf 2005 (accessed September 2008).
- [90] C. Dawes: Proc. AIAA Int. Air and Space Symp., Dayton, OH, USA, July 2003, AIAA, AIAA-2003-2769.
- [91] Z. S. Loftus, W. J. Arbegast and P. J. Hartley: Proc. 5th Int. Conf. on 'Trends in welding research', Pine Mountain, GA, USA, June 1998, ASM International, 580.
- [92] B. Christner, J. McCoury and S. Higgins: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [93] T. Kawasaki, T. Makino, S. Todorii, H. Takai, M. Ezumi and Y. Ina: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.

- [94] D. Otsuka and Y. Sakai: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [95] M. M. Shahri and R. Sandström: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [96] Anon: *Mach. Design*, 2003, **75**, S2.
- [97] J. C. Bassett and S. S. Birley: Proc 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [98] G. Campbell and T. Stotler: *Weld. J.*, 1999, **78**, 45-47.
- [99] R. S. Mishra and M. W. Mahoney: in 'Superplasticity in advanced materials: ICSAM-2000', 507-512; 2001, Zurich-Uetikon, Trans Tech Publications Ltd.
- [100] J. Q. Su, T. W. Nelson and C. J. Sterling: *Scr. Mater.*, 2005, **52**, 135-140.
- [101] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. McFadden, N. A. Mara and A. K. Mukherjee: *Scr. Mater.*, 1999, **42**, 163-168.
- [102] P. B. Berbon, W. H. Bingel, R. S. Mishra, C. C. Bampton and M. W. Mahoney: *Scr. Mater.*, 2001, **44**, 61-66.
- [103] J. C. Bersaas, A. Oosterkamp and L. D. Oosterkamp: 'Friction stir welding method and apparatus', Patent no. WO/2001/028732, 2001.
- [104] P. Su, A. Gerlich, T. H. North and G. J. Bendzsak: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**, 61-71.
- [105] W. S. Chang, C. K. Chun, H. J. Kim, H. J. Cho and T. K. Kim: Proc. IWJC-Korea 2007, Seoul, South Korea, May 2007, Genicom Co., Ltd, 435-438.
- [106] M. Mahoney, R. S. Mishra, T. Nelson, J. Flintoff, R. Islamgaliev and Y. Hovansky: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 183-194; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [107] I. Charit, R. S. Mishra and M. W. Mahoney: *Scr. Mater.*, 2002, **47**, 631-636.
- [108] I. Charit, R. S. Mishra and K. V. Jata: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 225-234; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [109] I. Shigematsu, N. Saito, T. Komaya, T. Tamaki, G. Yamauchi and M. Nakamura: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 217-224; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [110] J. Zheng, R. S. Mishra, P. B. Berbon and M. W. Mahoney: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 235- 242; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [111] T. U. Seidel and A. P. Reynolds: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2003, **8**, 175-183.
- [112] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2004, **9**, 483-492.
- [113] A. P. Reynolds: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2000, **5**, 120-124.

- [114] W. M. Thomas, E. D. Nicholas and S. D. Smith: in 'Aluminum 2001', (ed. S. K. Das *et al.*), 213-224; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [115] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2004, **9**, 352-361.
- [116] D. Allehaux and F. Marie: *Mater. Sci. Forum*, 2006, **519-521**, 1131-1138.
- [117] C. B. Fuller: in 'Friction stir welding and processing', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 7-35; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [118] L. Dubourg and P. Dacheux: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Mont., Canada, October 2006, TMS.
- [119] A. Bastier, M. H. Maitournam, K. D. Van and F. Roger: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**, 278-288.
- [120] K. Colligan: *Weld. J.*, 1999, **78**, 229S-237S.
- [121] O. Frigaard, O. Grong and O. T. Midling: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 1189-1200.
- [122] M. J. Russell, H. R. Shercliff and P. L. Threadgill: in 'Aluminum 2001', (ed. S. K. Das *et al.*), 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [123] Y. J. Chao, X. H. Qi and W. Tang: *Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 2003, **125**, 138-145.
- [124] M. Song and R. Kovacevic: *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2003, **217B**, 73-85.
- [125] A. P. Reynolds, Z. Khandkar, T. Long, W. Tang and J. Khan: *Mater. Sci. Forum*, 2003, **426-432**, 2959-2964.
- [126] H. Schmidt, J. Hattel and J. Wert: *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2004, **12**, 143-157.
- [127] R. Kovacevic, V. Soundararajan and S. Zekovic: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2005, **45**, 1577-1587.
- [128] Q.-Y. Shi, T. L. Dickerson and H. R. Shercliff: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [129] A. Simar, T. Pardoën and B. Meester: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [130] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**, 429-441.
- [131] V. I. Vill': 'Friction welding of metals'; 1959, Mashgiz, Leningrad.
- [132] R. E. Andrews and K. A. Beamish: 'Characterisation of and guidelines for rotary friction welding of common metallic engineering materials', TWI members report no. 824, TWI, Abington, UK, 2005.
- [133] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki and K. Nakata: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A415**, 250-254.
- [134] P. L. Threadgill: *TWI Bull.*, 1997, **28**, 30-33.

- [135] P. L. Threadgill and A. J. Leonard: 'Macro and microstructural features of friction stir welds in various materials', TWI members report no. 693/1999, TWI, Abington, UK, 1999.
- [136] 'Specification for friction stir welding of aluminum alloys for aerospace applications', Standard D17- 3:200X, American Welding Society, Miami, FL, USA, 2006.
- [137] A. Gerlich, P. Su, M. Yamamoto and T. H. North: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2008, 13, 254-264.
- [138] A. D. Gingell and T. G. Gooch: 'Review of factors influencing porosity in aluminium arc welds', TWI members report no. 625/1997, TWI, Abington, UK, 1997.
- [139] M. F. Gittos and M. H. Scott: *TWI Bull.*, 1987, **28**, 259-263.
- [140] A. J. Leonard and S. A. Lockyer: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [141] T. Hashimoto, S. Jyogan, K. Nakata, Y. G. Kiu and M. Ushio: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [142] Y. S. Sato, M. Urata and H. Kokawa: *Metall. Mater. Trans. A*, 2002, **33A**, 625-635.
- [143] B. K. Christner and G. D. Sylva: Proc. Conf. ICAWT '96, Columbus, OH, USA, November 1996, EWI, 359-368.
- [144] S. K. Chimbli, D. J. Medlin and W. J. Arbegast: in 'Friction stir welding and processing IV', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 135-142; 2007, Warrendale, PA, TMS.
- [145] V. Balasubramanian: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A480**, 397-403.
- [146] K. Kumar, S. V. Kailas and T. S. Srivatsan: *Mater. Manuf. Process.*, 2008, **23**, 189-195.
- [147] S. T. Wei, C. Y. Hao and J. C. Chen: *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **A452**, 170-177.
- [148] Y. H. Zhao, S. B. Lin, L. Wu and F. X. Qu: *Mater. Lett.*, 2005, **59**, 2948-2952.
- [149] R. Crawford, G. E. Cook, A. M. Strauss, D. A. Hartman and M. A. Stremler: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**, 657-665.
- [150] O. Lorrain, V. Favier, H. Zahrouni and M. E. Hadrouz: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, 2008, TWI.
- [151] H. Schmidt and J. Hattel: in 'Friction stir welding processing III', (ed. K. V. Jata *et al.*), 225-232; 2005, Warrendale, PA, TMS.
- [152] H. Schmidt and J. Hattel: *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2005, **13**, 77-93.
- [153] H. Jin, S. Saimoto, M. Ball and P. L. Threadgill: *Mater. Sci. Technol.*, 2001, **17**, 1605-1614.
- [154] H. Okamura, K. Aota, M. Sakamoto, M. Ezumi and K. Ikeuchi: *Weld. Int.*, 2002, **16**, 266-275.

- [155] F. Palm, H. Steiger and U. Henneböhle: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [156] T. Jene, G. Dobmann, G. Wagner and D. Eifler: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI.
- [157] K. Savolainen, T. Saukkonen, J. Mononen and H. Hänninen: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [158] Y. S. Sato, F. Yamashita, Y. Sugiura, S. H. C. Park and H. Kokawa: *Scr. Mater.*, 2004, **50**, 365-369.
- [159] H. Okamura, K. Aota, M. Sakamoto, M. Ezumi and K. Ikeuchi: *J. Jpn Weld. Soc.*, 2001, **19**, 446-456.
- [160] T. L. Dickerson, H. R. Shercliff and H. Schmidt: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [161] C. Z. Zhou, X. Q. Yang and G. H. Luan: *Scr. Mater.*, 2006, **54**, 1515-1520.
- [162] J. Pryzdatek: Proc 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [163] A. J. Leonard: Unpublished work, TWI Ltd, 2001.
- [164] C. J. Goodfellow and A. J. Leonard: Unpublished work, TWI and Birmingham University, 2003.
- [165] R. Johnson: 'Further assessment of the friction stir welding of magnesium alloys', TWI members report no. 766/2003, TWI, Abington, UK, 2003.
- [166] L. Cederqvist and A. R. Reynolds: *Weld. J.*, 2001, **80**, 281S-287S.
- [167] W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris and R. de Frias: Proc. FSW Semin., Porto, Portugal, December 2002, IST.
- [168] P. A. Colegrove, T. Hyoe and H. R. Shercliff: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [169] D. Lévesque, C. Mandache, L. Dubourg and P. Gougeon: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [170] C. R. Bird: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, Utah, USA, May 2003, TWI.
- [171] C. R. Bird: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [172] T. Vugrin, G. Staniek, W. Hillger and C. Dalle Donne: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [173] M. Moles and A. Lamarre: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [174] N. Goldfine, D. Grundy, V. Zilberstein and D. G. Kinchen: Proc. 6th Int. Conf. on 'Trends in welding research', Pine Mountain, GA, April 2002, ASM International.

- [175] N. Oiwa, S. Iwaki, T. Okada, N. Eguchi, S. Tanaka and K. Namba: Proc. Int. Conf. on 'Aluminium connections', Cleveland, OH, USA, June 2004, Lincoln Electric Company.
- [176] A. Lamarre, O. Dupuis and M. Moles: Proc. WCNDT 2004, Montreal, Canada, August-September 2004, Paper 84.
- [177] A. Steuwer, M. Dumont, J. Altenkirch, S. Biroasca, A. Deschamps, P. B. Prangnell and P. J. Withers: 'Friction stir welding Al-Li AA2199: I microstructural aspects', In preparation, 2008.
- [178] A. J. Leonard: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [179] J. Karlsson, B. Karlsson, H. Larsson, L. Karlsson and L.-E. Svensson: Proc. 7th Int. Conf. on 'Joints in aluminium', Cambridge, UK, April 1998, TWI, 221-230.
- [180] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss and P. J. Withers: *Acta Mater.*, 2003, **51**, 4791-4801.
- [181] H. W. Hayden, S. A. David, S. S. Babu, S. Spooner, J. M. Vitek and P. J. Hartley: Prof. Conf. 3rd Int. Forum on 'Aluminium ships', Haugesund, Norway, May 1998.
- [182] J. Q. Su, T. W. Nelson, R. Mishra and M. Mahoney: *Acta Mater.*, 2003, **51**, 713-729.
- [183] A. F. Norman, I. Brough and P. B. Prangnell: *Mater. Sci. Forum*, 2000, **331-333**, 1713-1718.
- [184] M. M. Attallah, C. L. Davis and M. Strangwood: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 361-369.
- [185] K. N. Krishnan: *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, **A327**, 246-251.
- [186] T. U. Seidel and A. P. Reynolds: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 2879-2884.
- [187] M. Strangwood, J. E. Berry, D. P. Cleugh, A. J. Leonard and P. L. Threadgill: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [188] L.-E. Svensson and L. Karlsson: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [189] T. J. Lienert and R. J. Grylls: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [190] C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel and M. Calabrese: *Scr. Mater.*, 2003, **48**, 1451-1455.
- [191] K. V. Jata, K. K. Sankaran and J. J. Ruschau: *Metall. Mater. Trans. A*, 2000, **31A**, 2181-2192.

- [192] Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto and S. Jogan: *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, **30A**, 2429-2437.
- [193] K. A. A. Hassan, B. P. Wynne and P. B. Prangnell: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, May 2003, TWI.
- [194] H. S. Yang: Proc. Conf. 6th Int. Conf. on 'Aluminium alloys', Toyohashi, Japan, July 1998, The Japan Institute of Light Metals, 1483-1488.
- [195] Ø. Frigaard, Ø. Grong, J. Hjelen, S. Gulbrandsen-Dahl and O. T. Midling: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [196] R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [197] R. S. Mishra, R. K. Islamgaliev, T. W. Nelson, Y. Hovansky and M. W. Mahoney: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 205-216; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [198] K. V. Jata and S. L. Semiatin: *Scr. Mater.*, 2000, **43**, 743-749.
- [199] P. B. Prangnell and C. P. Heason: *Acta Mater.*, 2005, **53**, 3179-3192.
- [200] Y. S. Sato, H. Watanabe, S. H. C. Park and H. Kokawa: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [201] R. S. Mishra, R. K. Islamgaliev, T. W. Nelson, Y. Hovansky and M. W. Mahoney: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 205-216; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [202] E. Litwinski: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [203] M. M. Attallah and H. G. Salem Hassan: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [204] Y. S. Sato and H. Kokawa: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 3023-3031.
- [205] K. N. Krishnan: *J. Mater. Sci.*, 2002, **37**, 473-480.
- [206] M. Karlsen, S. Tangen, J. Hjelen, Ø. Frigaard and Ø. Grong: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [207] K. A. A. Hassan, A. F. Norman, D. A. Price and P. B. Prangnell: *Acta Mater.*, 2003, **51**, 1923-1936.
- [208] F. J. Humphreys and M. Hatherly: 'Recrystallisation and related annealing phenomena'; 1995, Oxford, Pergamon.
- [209] F. J. Humphreys: *Acta Mater.*, 1997, **45**, 5031-5039.
- [210] F. J. Humphreys: *Acta Mater.*, 1997, **45**, 4231-4240.
- [211] M. F. Gittos and K. Bridges: 'A study of arc and friction stir welding of two Al alloys containing a low level scandium addition', TWI members report no. 776/2003, TWI, Abington, UK, 2003.

- [212] B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya and A. Poitou: in 'Friction stir welding processing III', (ed. K. V. Jata *et al.*), 253-260; 2005, Warrendale, PA, TMS.
- [213] C. S. Paglia, K. V. Jata and R. G. Buchheit: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A424**, 196-204.
- [214] Y. S. Sato, M. Urata, H. Kokawa and K. Ikeda: *Scr. Mater.*, 2002, **47**, 869-873.
- [215] I. Charit and R. S. Mishra: *Acta Mater.*, 2005, **53**, 4211-4223.
- [216] C. J. Hsu, C. Y. Chang, P. W. Kao, N. J. Ho and C. P. Chang: *Acta Mater.*, 2006, **54**, 5241-5249.
- [217] Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 941-948.
- [218] D. P. Field, T. W. Nelson, Y. Hovanski and K. V. Jata: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 2869-2877.
- [219] T. W. Nelson, B. Hunsaker and D. P. Field: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [220] O. V. Flores, C. Kennedy, L. E. Murr, D. Brown, S. Pappu, B. M. Nowak and J. C. McClure: *Scr. Mater.*, 1998, **38**, 703-708.
- [221] H. Larsson, L. Karlsson and L.-E. Svensson: Proc. 6th Int. Conf. on 'Aluminium alloys', Toyohashi, Japan, July 1998, The Japan Institute of Light Metals, 1471-1476.
- [222] C. Genevois, A. Deschamps and A. Denquin: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [223] M. M. Attallah, C. L. Davis and M. Strangwood: *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**, 7299-7306.
- [224] R. W. Fonda and J. F. Bingert: in 'Friction stir welding and processing II', (ed. K. V. Jata *et al.*), 191-198; 2003, Warrendale, PA, TMS.
- [225] C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling and C. C. Bampton: *Scr. Mater.*, 1997, **36**, 69-75.
- [226] M. Kumagai and S. Tanaka: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [227] Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto: *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, **30A**, 3125-3130.
- [228] Y. S. Sato, S. H. C. Park and H. Kokawa: *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**, 3033-3042.
- [229] J. D. Robson, A. Sullivan, H. R. Shercliff and G. McShane: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [230] M. Dumont, A. Steuwer, A. Deschamps, M. Peel and P. J. Withers: *Acta Mater.*, 2006, **54**, 4793-4801.
- [231] R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan: *Scr. Mater.*, 2004, **51**, 243-248.

- [232] C. Genevois, A. Deschamps, A. Denquin and B. Doisneaucottignies: *Acta Mater.*, 2005, **53**, 2447-2458.
- [233] C. J. Dawes: *TWI Bull.*, 2000, **41**, 51-55.
- [234] K. Lindner, Z. Khandkar, J. Khan, W. Tang and A. P. Reynolds: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [235] R. Y. Hwang and C. P. Chou: *Scr. Mater.*, 1997, **38**, 215-221.
- [236] A. Sullivan and J. D. Robson: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A478**, 351-360.
- [237] L. E. Svensson, L. Karlsson, H. Larsson, B. Karlsson, M. Fazzini and J. Karlsson: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2000, **5**, 285-296.
- [238] O. R. Myhr and Ø. Grong: *Acta Metall. Mater*, 1991, **39**, 2703-2711.
- [239] O. R. Myhr and Ø. Grong: *Acta Metall. Mater*, 1991, **39**, 2693-2702.
- [240] O. R. Myhr, O. Grong, S. Klokkehaug, H. G. Fjoer and A. O. Klukun: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 1997, **2**, 245-253.
- [241] Ø. Grong and H. R. Shercliff: *Prog. Mater. Sci.*, 2002, **47**, 163-282.
- [242] O. Grong and O. R. Myhr: *Acta Mater.*, 2000, **48**, 445-452.
- [243] O. R. Myhr and O. Grong: *Acta Mater.*, 2000, **48**, 1605-1615.
- [244] M. Nicolas and A. Deschamps: *Acta Mater.*, 2003, **2003**, 6077- 6094.
- [245] T. Hyoe, P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: in 'Friction stir welding and processing II', (ed. K. V. Jata *et al.*), 33-42; 2003, Warrendale, PA, TMS.
- [246] J. D. Robson, A. Sullivan, G. McShane and H. R. Shercliff: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [247] C. Gallais, A. Denquin, A. Pic, A. Simar and T. Pardoen: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [248] P. A. Colegrove, H. R. Shercliff, J. D. Robson, N. Kamp, A. Sullivan and S. W. Williams: in 'Mathematical modelling of weld phenomena 8', (ed. H. Cerjak *et al.*), 2008, London, Maney Publishing.
- [249] A. Sullivan, N. Kamp and J. D. Robson: *Mater. Sci. Forum*, 2006, **519-521**, 1181-1186.
- [250] N. Kamp, A. Sullivan, R. Tomasi and J. D. Robson: *Acta Mater.*, 2006, **54**, 2003-2014.
- [251] N. Kamp, A. Sullivan and J. D. Robson: *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **A466**, 246-255.
- [252] A. Deschamps and Y. Brechet: *Acta Mater.*, 1998, **47**, 293-305.
- [253] A. Deschamps, F. Livet and Y. Brechet: *Acta Mater.*, 1998, **47**, 281-292.
- [254] C. G. Derry and J. D. Robson: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A490**, 328-334.
- [255] M. W. Mahoney: in 'Friction stir welding and processing', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 187-217; 2007, Materials Park, OH, ASM International.

- [256] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [257] A. von Strombeck, G. Çam, J. F. dos Santos, V. Venzke and M. Koçak: in 'Aluminum 2001', (ed. S. K. Das *et al.*), 249-264; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [258] S. Brinkmann, A. von Strombeck, C. Schilling, J. F. dos Santos, D. Lohwasser and M. Koçak: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [259] A. von Strombeck, J. F. dos Santos, F. Torster, P. Laureano and M. Koçak: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [260] D. Allehaux, G. Petit, M.-H. Campagnac, G. Lapasset and A. Denquin: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [261] A. Denquin, D. Allehaux, H.-H. Campagnac and G. Lapasset: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [262] G. Biallas and C. D. Donne: *Materialprüfung*, 2000, **42**, 236-239.
- [263] O. Hatamleh, J. Lyons and R. Forman: *Int. J. Fatig.*, 2007, **29**, 421-434.
- [264] M. A. Sutton, B. C. Yang, A. P. Reynolds and J. H. Yan: *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, **A364**, 66-74.
- [265] M. J. Peel, M. Preuss, A. Steuwer, M. Turski and P. J. Withers: in 'Trends in welding research, proceedings', (ed. S. A. David *et al.*), 273-278; 2003, Materials Park, OH, ASM International.
- [266] J. Altenkirch, A. Steuwer, M. J. Peel, D. G. Richards and P. J. Withers: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A488**, 16-24.
- [267] J. K. Kristensen, C. Dalle Donne, T. Ghidini, J. Mononen, A. Norman, A. Pietras, M. J. Russell and S. Slater: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [268] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi: *Mater. Sci. Technol.*, 2004, **20**, 103-105.
- [269] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi: *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **142**, 692-696.
- [270] Lockheed Martin: presented at Aeromat '99, Dayton, OH, USA, June 1999, ASM.
- [271] K. Masubuchi: in 'Encyclopedia of materials: science and technology', (ed. K. H. J. Buschow *et al.*), 8121-8126; 2003, Oxford, Elsevier.
- [272] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia: *Mater. Sci. Technol.*, 2001, **17**, 366-375.
- [273] J. Lu (ed.): in 'Handbook of measurement of residual stresses'; 1996, Lilburn, GA, Fairmont Press.

- [274] M. B. Prime: *J. Mater. Eng. Technol.*, 2001, **123**, 162-168.
- [275] P. J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P. J. Bouchard and D. J. Buttle: *Int. J. Press. Vess. Pip.*, 2008, **85**, 118-127.
- [276] P. J. Withers: *C. R. Phys.*, 2007, **8**, 806-820.
- [277] P. J. Withers and P. J. Webster: *Strain*, 2001, **37**, 19-31.
- [278] P. J. Withers, M. Preuss, P. J. Webster, D. J. Hughes and A. M. Korsunsky: *Mater. Sci. Forum*, 2002, **404-407**, 1-10.
- [279] D. J. Buttle and C. Scruby: in 'Encyclopedia of materials: science and technology', (ed. K. H. J. Buschow *et al.*), 8173-8180; 2001, Oxford, Elsevier.
- [280] L. D. Oosterkamp, P. J. Webster, P. A. Browne, G. B. M. Vaughan and P. J. Withers: Proc. 5th Eur. Conf. on 'Residual stresses', *Mater. Sci. Forum*, 2000, **347-349**, 687-693.
- [281] C. Dalle Donne: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [282] P. J. Webster, L. D. Oosterkamp, P. A. Browne, D. J. Hughes, W. P. Kang, P. J. Withers and G. B. M. Vaughan: *J. Strain Anal. Eng. Design*, 2001, **36**, 61-70.
- [283] M. N. James, D. J. Hughes, D. G. Hattingh, G. R. Bradley, G. Mills and P. J. Webster: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2004, **27**, 187-202.
- [284] X. L. Wang, Z. Feng, S. A. David, S. Spooner and C. R. Hubbard: Proc. 6th Int. Conf. on 'Residual stresses', Oxford, UK, July 2000, IOM.
- [285] P. Staron, M. Kocak and S. Williams: in 'Trends in welding research, proceedings', (ed. S. A. David *et al.*), 253-256; 2003, Materials Park, OH, ASM International.
- [286] M. B. Prime, T. Gnaupel-Herold, J. A. Baumann, R. J. Lederich, D. M. Bowden and R. J. Sebring: *Acta Mater.*, 2006, **54**, 4013- 4021.
- [287] M. Mahoney, C. Fuller, A. DeWald and M. R. Hill: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI.
- [288] T. Ghidini and C. Dalle Donne: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2007, **30**, 214-222.
- [289] D. Stefanescu, C. E. Truman, D. J. Smith and P. S. Whitehead: *Experim. Mech.*, 2006, **46**, 417-427.
- [290] P. Staron, M. Koçak, S. Williams and A. Wescott: *Physica B*, 2004, **350B**, E491-E493.
- [291] R. A. Owen, R. V. Preston, P. J. Withers, H. R. Shercliff and P. J. Webster: *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **A346**, 159-167.
- [292] M. A. Sutton, A. P. Reynolds, D. Q. Wang and C. R. Hubbard: *J. Eng. Mater. Technol.*, 2002, **124**, 215-221.

- [293] Y. J. Chao and X. H. Qi: *J. Mater. Process. Manuf. Sci.*, 1999, **7**, 215-233.
- [294] C. M. Chen and R. Kovacevic: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2003, **43**, 1319-1326.
- [295] Z. Feng, X. L. Wang, S. A. David and P. S. Sklad: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**, 348-356.
- [296] D. G. Richards, P. B. Prangnell, S. W. Williams and P. J. Withers: *Mater. Sci. Eng.*, 2008, **489**, 351-362.
- [297] A. Bastier, M. H. Maitournam, F. Roger and K. D. Van: *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **200**, 25-37.
- [298] T. D. Vuyst, V. Madhavan, B. Ducoeur, A. Simar, B. D. Meester and L. D'Alvise: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [299] M. T. Milan, W. W. Bose, J. R. Tarpani, A. M. S. Malafaia, C. P. O. Silva, B. C. Pellizer and L. E. Pereira: *J. Mater. Eng. Perform.*, 2007, **16**, 86-92.
- [300] H. Lombard, D. G. Hattingh, A. Steuwer and M. N. James: *Mater. Sci. Eng. A*, 2009, **A501**, 119-124.
- [301] T. W. Greene and A. A. Holzbaur: *Weld. J. Res. Suppl.*, 1946, **11**, 171s-185s.
- [302] P. A. McGuire and J. J. Groom: 'Computational analysis and experimental evaluation for residual stresses from induction heating', RP1394-4, Battelle Memorial Institute, 1979.
- [303] P. Michaleris and X. Sun: *Weld. J.*, 1997, **76**, 451s-457s.
- [304] R. M. Dull, J. R. Dydo and J. J. Russell: Proc. 82nd Annual AWS Convention, Cleveland, OH, USA, May 2001, AWS, 95-96.
- [305] P. Dong, J. K. Hong and P. Rogers: *Weld. J.*, 1998, **77**, 439s-445s.
- [306] T. E. Barber, F. W. Brust, H. W. Mishler and M. F. Kanninen: 'Controlling residual stresses by heat sink welding', EPRI report no. NP-2159-LD, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, 1981.
- [307] E. M. van der Aa, M. J. M. Hermans, I. M. Richardson, N. M. van der Pers and R. Delhez: *Mater. Sci. Forum*, 2006, **524-525**, 479-484.
- [308] J. Gabzdyl, M. Cole, S. W. Williams and D. Price: Proc. ICALEO 2001, Jacksonville, FL, USA, October 2001, Laser Institute of America, Vols. 92 and 93, 1236-1245.
- [309] J. T. Gabzdyl: 'Thermal welding', US patent no. 20010054639, 2001.
- [310] D. G. Richards, P. B. Prangnell, P. J. Withers, S. W. Williams and S. Morgan: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [311] G. Luan, G. Li, C. Li and C. Dong: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.

- [312] Y. P. Yang, P. Dong, X. Tian and Z. Zhang: Proc. 5th Int. Conf. on 'Trends in welding research', (ed. S. A. David *et al.*), 700-705; 1998, Materials Park, OH, ASM International.
- [313] Y. P. Yang, P. Dong, J. Zhang and X. Tian: *Weld. J. Res. Suppl.*, 2000, **79**, 9s-17s.
- [314] S. W. Williams, D. A. Price, A. Wescott, C. J. C. Harrison, P. Staron and M. Kocak: Proc. Conf. on 'Welding and brazing of aerospace structures - modern applications and materials for new and in-service', Berlin, Germany, May 2004, DVS Berichte, 95-101.
- [315] A. L. Lafly, C. D. Donne, G. Biallas, D. Allehaux and F. Marie: *Mater. Sci. Forum*, 2006, **519-521**, 1089-1094.
- [316] P. Prevey and M. Mahoney: *Mater. Sci. Forum*, 2003, **426-432**, 2933-2939.
- [317] P. S. Prevey, D. J. Hornbach and N. Jayaraman: *Mater. Sci. Forum*, 2007, 539-547, 3807-3813.
- [318] A. Ali, X. An, C. A. Rodopoulos, M. W. Brown, P. O'Hara, A. Levers and S. Gardiner: *Int. J. Fatig.*, 2007, **29**, 1531-1545.
- [319] O. Hatamleh, J. Lyons and R. Forman: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2007, **30**, 115-130.
- [320] O. Hatamleh, I. V. Rivero and J. Lyons: *J. Mater. Eng. Perform.*, 2007, **16**, 549-553.
- [321] N. Jayaraman, P. Prevey and M. Mahoney: in 'Friction stir welding and processing II', (ed. K. V. Jata *et al.*), 259-269; 2003, Warrendale, PA, TMS.
- [322] S. W. Wen, S. W. Williams, S. A. Morgan, A. Wescott and M. Poad: submitted to *Sci. Technol. Weld. Join.*
- [323] J. Altenkirch, A. Steuwer, P. J. Withers, S. W. Williams, M. Poad and S. Wen: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2009, **14**, 185-192.
- [324] S. W. Williams, D. A. Price, W. Wescott, A. Steuwer, M. Peel, J. Altenkirch, P. J. Withers and M. Poad: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI.
- [325] J. Altenkirch, A. Steuwer, M. J. Peel, P. J. Withers, S. Williams and M. Poad: *Metall. Mater. Trans. A*, 2008, **39A**, 3246-3259.
- [326] J. Z. Zhang, R. Pedwell and H. Davies: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [327] G. E. Shepherd: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [328] L. Magnusson and L. Källman: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.

- [329] H. Hori, S. Makita and H. Hino: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, June 1999, TWI.
- [330] G. Bussu and P. E. Irving: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, June 1999, TWI.
- [331] D. Lohwasser: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [332] M. Ericsson and R. Sandstrom: *Int. J. Fatig.*, 2003, **25**, 1379-1387.
- [333] P. Moreira, A. M. P. de Jesus, A. S. Ribeiro and P. de Castro: in 'Advances in fracture and damage mechanics VI', (ed. J. Alfaiate *et al.*), 209-212; 2007, Zurich, Trans Tech Publications.
- [334] M. Ericsson, R. Sandström and J. Hagström: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [335] S. Kim, C. G. Lee and S.-J. Kim: *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **A478**, 56-64.
- [336] H. Lombard, D. G. Hattingh, A. Steuwer and M. N. James: *Eng. Fract. Mech.*, 2008, **75**, 341-354.
- [337] C. Dalle Donne, G. Biallas, T. Ghidini and G. Raimbeaux: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [338] R. John and K. V. Jata: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 57-69; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [339] A. Cirello, G. Buffa, L. Fratini and S. Pasta: *Proc. Inst. Mech. Eng. B*, 2006, **220B**, 805-811.
- [340] G. Bussu and P. E. Irving: *Int. J. Fatig.*, 2003, **25**, 77-88.
- [341] J. M. L. Tan, M. E. Fitzpatrick and L. Edwards: *Eng. Fract. Mech.*, 2007, **74**, 2030-2054.
- [342] S. S. Di, X. Q. Yang, G. H. Luan and B. Jian: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A435**, 389-395.
- [343] C. Z. Zhou, X. Q. Yang and G. H. Luan: *J. Mater. Sci.*, 2006, **41**, 2771-2777.
- [344] A. Oosterkamp, L. D. Oosterkamp and A. Nordeide: *Weld. J.*, 2004, **83**, 225S-231S.
- [345] A. Ali, M. W. Brown and C. A. Rodopoulos: Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Saint-Sauveur, Montreal, Canada, October 2006, TWI.
- [346] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang and Y. Zhao: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A433**, 64-69.
- [347] M. N. James, D. G. Hattingh and G. R. Bradley: *Int. J. Fatig.*, 2003, **25**, 1389-1398.
- [348] M. N. James, G. R. Bradley, H. Lombard and D. G. Hattingh: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2005, **28**, 245-256.
- [349] T. L. Dickerson and J. Przydatek: *Int. J. Fatig.*, 2003, **25**, 1399-1409.

- [350] C. A. Widener, B. M. Tweedy and D. A. Burford: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [351] C. Dalle Donne and G. Biallas: Proc. Eur. Conf. on 'Spacecraft structures, materials and mechanical testing', Noordwijk, The Netherlands, November-December 1999, ESA, 309-314.
- [352] S. G. Russell, M. Tester, E. Nichols, A. Cleaver and J. Maynor: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 93-104; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [353] M. T. Milan, W. W. B. Filho, C. O. F. T. Ruckert and J. R. Tarpani: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2008, **31**, 526-538.
- [354] C. Z. Zhou, X. Q. Yang and G. H. Luan: *Scr. Mater.*, 2005, **53**, 1187-1191.
- [355] H. Q. Qu, M. Tsujikawa, S. W. Chung, S. Oki and K. Higashi: in 'Recrystallization and grain growth III', (ed. S. J. L. Kang *et al.*), 793-796; 2007, Zurich, Trans Tech Publications.
- [356] M. Ranes, A. O. Kluken and O. T. Midling: Proc. 4th Int. Conf. on 'Trends in welding research', Gatlinburg, TN, USA, June 1995, ASM International.
- [357] S. Hong, S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim: *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**, 9888-9893.
- [358] P. S. Pao, R. W. Fonda, H. N. Jones, C. R. Feng, B. J. Connolly and A. J. Davenport: in 'Friction stir welding processing III', (ed. K. V. Jata *et al.*), 27-34; 2005, Warrendale, PA, TMS.
- [359] P. Cavaliere, G. Campanile, F. Panella and A. Squillace: *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, **180**, 263-270.
- [360] S. J. Hong, S. S. Kim, C. G. Lee and S. J. Kim: in 'Advances in nanomaterials and processing', (ed. B. T. Ahn *et al.*), 1321-1324; 2007, Zurich, Trans Tech Publications.
- [361] M. Ericsson and R. Sandstrom: *Steel Res. Int.*, 2006, **77**, 450-455.
- [362] P. J. Haagensen, O. T. Midling and M. Ranes: in 'Computer methods and experimental measurements for surface treatment effects II', (ed. M. H. Aliabadi *et al.*), 225-237; 1995, Southampton, Wit Pr/Computational Mechanics.
- [363] M. Kumagai, S. Tanaka, H. Hatta, H. Yoshida and H. Sato: Proc. 3rd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [364] M. Ericsson and R. Sandström: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [365] W. M. Thomas, M. F. Gittos, P. Tubby, D. G. Staines and S. Lockyer: 'Friction skew stir lap welding of 5083-H111- preliminary fatigue studies', TWI members report, TWI, Abington, UK, to be published.

- [366] R. Pedwell, H. Davies and A. Jefferson: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, June 1999, TWI.
- [367] R. Talwar, D. Bolser, R. Lederich and J. Baumann: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [368] G. E. Shepherd: Proc. 4th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [369] W. M. Thomas, I. M. Norris, D. G. Staines and E. R. Watts: Proc. SME Summit, Oconomowoc, WI, USA, August 2005, SME.
- [370] D. Fersini and A. Pirondi: *Eng. Fract. Mech.*, 2008, **75**, 790-803.
- [371] D. Hornbach, M. Mahoney, P. Prevey, D. Waldron and J. Cammett: in 'Trends in welding research, proceedings', (ed. S. A. David *et al.*), 302-306; 2003, Materials Park, OH, ASM International.
- [372] S. Lomolino, R. Tovo and J. dos Santos: *Int. J. Fatig.*, 2005, **27**, 305-316.
- [373] M. G. Dawes, T. L. Dickerson, S. A. Karger and J. Przydatek: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [374] M. K. Kulekci, F. Mendi, I. Sevim and O. Basturk: *Metalurgija*, 2005, **44**, 209-213.
- [375] M. A. Sutton, A. P. Reynolds, B. C. Yang and R. Taylor: *Eng. Fract. Mech.*, 2003, **70**, 2215-2234.
- [376] W. J. Arbogast, K. S. Baker and P. J. Hartley: Proc. 5th Int. Conf. on 'Trends in welding research', Pine Mountain, GA, USA, June 1998, ASM International.
- [377] H. R. Kroninger and A. P. Reynolds: *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2002, **25**, 283-290.
- [378] M. Mochizuki, M. Inuzuka, H. Nishida, K. Nakata and M. Toyoda: *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2006, **11**, 366-370.
- [379] C. G. Derry and J. D. Robson: Proc. 7th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Awaji Island, Japan, May 2008, TWI.
- [380] M. G. Dawes, S. A. Karger and J. Przydatek: 'Fracture toughness of friction stir welds in 2014A, 7075 and 5083 aluminium alloys', TWI report no. 705/2000, TWI, Abington, UK, 2000.
- [381] D. G. Kinchen, Z. Li and G. P. Adams: Proc. 1st Int. Symp. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, June 1999, TWI.
- [382] D. Dumont, A. Deschamps and Y. Brechet: *Acta Mater.*, 2004, **52**, 2529-2540.
- [383] J. Lumsden: in 'Friction Stir Welding and Processing', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 187-217; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [384] F. Hannour, A. J. Davenport and M. Strangwood: Proc. 2nd Int. Symp. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.

- [385] J. Corral, E. A. Trillo, Y. Li and L. E. Murr: *J. Mater. Sci. Lett.*, 2000, **19**, 2117-2122.
- [386] D. P. P. Booth, M. J. Starink and I. Sinclair: *Mater. Sci. Technol.*, 2007, **23**, 276-284.
- [387] A. J. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, N. Tareelap, B. J. Connolly, S. Williams and E. Siggs: *Mater. Sci. Forum*, 2006, **699**, 519-521.
- [388] C. Dalle Donne, R. Braun, G. Staniek, A. Jung and W. A. Kaysser: *Mater. Werkst.*, 1998, **29**, 609-617.
- [389] D. B. Mitton, A. Squillace, A. De Fenzo, C. Padovani, T. Monetta, G. Giorleo, P. Cozzolino and F. Bellucci: *Corros. Rev.*, 2007, **25**, 449-459.
- [390] J. B. Lumsden, M. W. Mahoney, G. Pollock and C. G. Rhodes: *Corrosion*, 1999, **55**, 1127-1135.
- [391] R. G. Buchheit and C. S. Paglia: in 'Corrosion and protection of light metal alloys', (ed. R. G. Buchheit *et al.*), 94-103; 2004, Pennington, NJ, Electrochemical Society.
- [392] C. S. Paglia, K. V. Jata and R. G. Buchheit: *Mater. Corros.*, 2007, **58**, 737-750.
- [393] X. Zhou, Y. Younes, D. Wadeson, T. Hashimoto and G. E. Thompson: *Adv. Mater. Res.*, 2008 **38**, 298-305.
- [394] B. J. Connolly, A. J. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, R. Ambat, S. W. Williams, D. A. Price, A. Wescott, C. J. Goodfellow and C.-M. Lee: Proc. 5th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [395] M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price: *Corros. Sci.*, 2007, **49**, 877-909.
- [396] A. Squillace, A. de Fenzo, G. Giorleo and F. Bellucci: *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, **152**, 97-105.
- [397] W. Hu and E. I. Meletis: *Mater. Sci. Forum*, 2000, **331-337**, 1683-1688.
- [398] C. S. Paglia and R. G. Buchheit: *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **A429**, 107-114.
- [399] F. Zucchi, G. Trabanelli and V. Grassi: *Mater. Corros.*, 2001, **52**, 853-859.
- [400] S. Maggiolino and C. Schmid: *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **197**, 237-240.
- [401] R. Braun, C. D. Donne and G. Staniek: *Mater. Werkst.*, 2000, **31**, 1017-1026.
- [402] J. B. Lumsden, M. W. Mahoney, C. G. Rhodes and G. A. Pollock: *Corrosion*, 2003, **59**, 212-219.
- [403] C. S. Paglia, L. M. Ungaro, B. C. Pitts, M. C. Carroll, A. P. Reynolds and R. G. Buchheit: in 'Friction stir welding and processing II', (ed. K. V. Jata *et al.*), 65-75; 2003, Warrendale, PA, TMS.

- [404] K. K. Sankaran, H. L. Smith and K. Jata: in 'Trends in welding research, proceedings', (ed. S. A. David *et al.*), 284-286; 2003, Materials Park, OH, ASM International.
- [405] D. P. Field, T. W. Nelson, Y. Hovanski and D. F. Bahr: in 'Friction stir welding and processing', (ed. K. V. Jata *et al.*), 83-91; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [406] C. S. Paglia, M. C. Carroll, B. C. Pitts, T. Reynolds and R. G. Buchheit: *Mater. Sci. Forum*, 2002, **396-402**, 1677-1684.
- [407] X. Y. Yun, Y. Motohashi, T. Ito, T. Asano and S. Hirano: *J. Jpn Inst. Met.*, 2006, **70**, 96-105.
- [408] D. A. Wadson, X. Zhou, G. E. Thompson, P. Skeldon, L. D. Oosterkamp and G. Scamans: *Corros. Sci.*, 2006, 48, 887-897.
- [409] L. A. Willey: in 'Aluminium: properties, physical metallurgy and phase diagrams', (ed. K. R. van Horn), 140-158; 1967, Cleveland, OH, ASM.
- [410] J. R. Galvele and S. M. de Micheli: *Corros. Sci.*, 1970, **10**, 795-807.
- [411] J. T. Staley, S. C. Byrne, E. L. Colvin and K. P. Palmer: *Mater. Sci. Forum*, 1996, **217**, 1587-1592.
- [412] C M. Lee: *Corrosion*, submitted.
- [413] C. S. Paglia and R. G. Buchheit: *Scr. Mater.*, 2008, **58**, 383-387.
- [414] R. Cook, T. Handboy, S. L. Fox and W. Arbegast: in 'Friction stir welding processing III', (ed. K. V. Jata *et al.*), 35-42; 2005, Warrendale, PA, TMS.
- [415] P. B. Srinivasan, W. Dietzel, R. Zettler, J. F. dos Santos and V. Sivan: *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, **A392**, 292-300.
- [416] C. A. Widener, J. E. Talia, B. M. Tweedy and D. A. Burford: in 'Friction stir welding and processing IV', (ed. R. S. Mishra *et al.*), 449-458; 2007, Warrendale, PA, TMS.
- [417] M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price: *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 2006, **41**, 135-142.
- [418] J. Lumsden, G. Pollock and M. Mahoney: *Mater. Sci. Forum*, 2003, **426-432**, 2867-2872.
- [419] C. A. Widener, D. A. Burford, B. Kumar, J. E. Talia and B. Tweedy: *Mater. Sci. Forum*, 2007, **539-543**, 3781-3788.
- [420] <http://www.springer.com/gp/book/9783319070421>
- [421] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, G.B. Patent Application No. 9125978.8 (December 1991).
- [422] C. Dawes, W. Thomas, TWI Bulletin 6, November/December 1995, p. 124.
- [423] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28 September (2001)

- [424] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton *Scripta Mater.*, 36 (1997), p. 69
- [425] G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega *Scripta Mater.*, 37 (1997), p. 355
- [426] K.V. Jata, S.L. Semiatin *Scripta Mater.*, 43 (2000), p. 743
- [427] S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure *Scripta Mater.*, 41 (1999), p. 809
- [428] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo *Mater. Res. Innovat.*, 2 (1998), p. 150
- [429] Y. Li, E.A. Trillo, L.E. Murr *J. Mater. Sci. Lett.*, 19 (2000), p. 1047
- [430] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure *Mater. Sci. Eng. A*, 271 (1999), p. 213
- [431] H.B. Cary, *Modern Welding Technology*, Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
- [432] C.J. Dawes, W.M. Thomas *Weld. J.*, 75 (1996), p. 41
- [433] R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, A.K. Mukherjee *Scripta Mater.*, 42 (2000), p. 163
- [434] R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Mater. Sci. Forum*, 357–359 (2001), p. 507
- [435] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Acta Mater.*, 50 (2002), p. 4419
- [436] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, I. Charit *Mater. Sci. Eng. A*, 341 (2002), p. 307
- [437] P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, M.W. Mahoney *Scripta Mater.*, 44 (2001), p. 61
- [438] J.E. Spowart, Z.Y. Ma, R.S. Mishra
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS (2003), pp. 243-252
- [439] Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Mater. Sci. Forum*, 426–432 (2003), p. 2891
- [440] M.R. Johnsen *Weld. J.*, 78 (2) (1999), p. 35
- [441] E.D. Nicholas, W.M. Thomas *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, 13 (1998), p. 45
- [442] S.W. Kallee, J. Davenport, E.D. Nicholas *Weld. J.*, 81 (10) (2002), p. 47
- [443] S. Kallee, A. Mistry *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [444] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith
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
- [445] W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner *Adv. Eng. Mater.*, 5 (2003), p. 485
- [446] W.M. Thomas, A.B.M. Braithwaite, R. John *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [447] W.M. Thomas, R.E. Dolby
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
- [448] A.P. Reynolds, T.U. Seidel, M. Simonsen *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [449] A.P. Reynolds *Sci. Technol. Weld. Joining*, 5 (2000), p. 120
- [450] T.U. Seidel, A.P. Reynolds *Metall. Mater. Trans. A*, 32 (2001), p. 2879
- [451] M. Guerra, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes
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. 25

- [452] K. Colligan Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [453] K. Colligan Weld. J., 78 (1999), pp. 229S-237S
- [454] B. London, M. Mahoney, W. Bingel, M. Calabrese, R.H. Bossi, D.Waldron K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), Friction Stir Welding and Processing II, TMS (2003), p. 3
- [455] O.T. Midling T.H. Sanders Jr., E.A. Strake Jr. (Eds.), Proceedings of the Fourth International Conference on Aluminum Alloys, vol. 1, Georgia Institute of Technology, School of Materials Science and Engineering, Atlanta, GA, USA (1994), pp. 451-458
- [456] J.H. Ouyang, R. Kovacevic J. Mater. Eng. Perform., 11 (2002), p. 51
- [457] L.E. Murr, R.D. Flores, O.V. Flores, J.C. McClure, G. Liu, D. Brown Mater. Res. Innovat., 1 (1998), p. 211
- [458] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure Scripta Mater., 40 (1999), p. 1041
- [459] K.N. Krishnan Mater. Sci. Eng. A, 327 (2002), p. 246
- [460] G. Biallas, R. Braun, C.D. Donne, G. Staniek, W.A. Kaysser Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [461] M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling, W.H. Bingel Metall. Mater. Trans. A, 29 (1998), p. 1955
- [462] M.A. Sutton, B. Yang, A.P. Reynolds, R. Taylor Mater. Sci. Eng. A, 323 (2002), p. 160
- [463] Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Unpublished results.
- [464] Z.Y. Ma, S.C. Tjong, L. Geng Scripta Mater., 42 (2000), p. 367
- [465] Z.Y. Ma, S.C. Tjong, L. Geng, Z.G. Wang J. Mater. Res., 15 (2000), p. 2714
- [466] S.C. Tjong, Z.Y. Ma Mater. Sci. Technol., 15 (1999), p. 429
- [467] S. Xu, X. Deng, A.P. Reynolds, T.U. Seidel Sci. Technol. Weld. Joining, 6 (2001), p. 191
- [468] P. Dong, F. Lu, J.K. Hong, Z. Cao Sci. Technol. Weld. Joining, 6 (2001), p. 281
- [469] P. Colegrove, H. Shercliff
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
- [470] 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.
- [471] G.J. Bendzsak, C.B. Smith Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [472] A. Askari, S. Silling, B. London, M. Mahoney
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Filed (Eds.), Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), p. 43
- [473] R.L. Goetz, K.V. Jata
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Filed (Eds.), Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), p. 35
- [474] 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
- [475] A.C. Nunes Jr. S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert (Eds.), Aluminum 2001, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), p. 235

- [476] L. Ke, L. Xing, J.E. Indacochea **Joining of Advanced and Specialty Materials IV** ASM International, Materials Park, USA (2002) pp. 125–134
- [477] W.J. Arbegast Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), *Hot Deformation of Aluminum Alloys III*, TMS, Warrendale, PA, USA (2003), p. 313
- [478] J.M. McGlaun, S.L. Thompson, L.N. Kmetyk, M.G. Elrick *Int. J. Impact Eng.*, 10 (1990), p. 351
- [479] *DEFORM-2D Version 7.0, Users Manual*, Scientific Forming Technologies Corporation, January 30, 2000.
- [480] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure *J. Mater. Sci.*, 33 (1998), p. 1243
- [481] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999), p. 2429
- [482] W. Tang, X. Guo, J.C. McClure, L.E. Murr *J. Mater. Process. Manufact. Sci.*, 7 (1998), p. 163
- [483] Y.J. Kwon, N. Saito, I. Shigematsu *J. Mater. Sci. Lett.*, 21 (2002), p. 1473
- [484] J.A. Wert *Scripta Metall.*, 15 (1981), p. 445
- [485] G.W. Lorimer K.C. Russell, H.I. Aaronson (Eds.), *Precipitation Processes in Solids*, Met. Soc. AIME, Warrendale, PA (1978), p. 87
- [486] R.H. Brown, L.A. Willey K.R. Van Horn (Ed.), *Aluminum*, vol. 1: Properties, Physical Metallurgy, and Phase Diagrams, ASM, Metals Park, OH (1967), p. 31
- [487] Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa *Metall. Mater. Trans. A*, 33 (2002), p. 625
- [488] T. Hashimoto, S. Jyogan, K. Nakata, Y.G. Kim, M. Ushio *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [489] O. Frigaad, O. Grong, O.T. Midling *Metall. Mater. Trans. A*, 32 (2001), p. 1189
- [490] Y.J. Chao, X. Qi *J. Mater. Process. Manufact.*, 7 (1998), p. 215
- [491] M.Z.H. Khandkar, J.A. Khan *J. Mater. Process. Manufact.*, 10 (2001), p. 91
- [492] W.J. Arbegast, P.J. Hartley *Proceedings of the Fifth International Conference on Trends in Welding Research*, Pine Mountain, GA, USA, June 1–5 (1998), p. 541
- [493] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 12 (2004), p. 143
- [494] S.R. Sharma, R.S. Mishra, Unpublished research, 2005.
- [495] B. Heinz, B. Skrotzki *Metall. Mater. Trans. B*, 33 (6) (2002), p. 489
- [496] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure *J. Mater. Mater. Lett.*, 16 (1997), p. 1081
- [497] G.S. Frankel, Z. Xi *Corrosion*, 55 (1999), p. 139
- [498] Y.S. Sato, S.H.C. Park, H. Kokawa *Metall. Mater. Trans. A*, 32 (2001), p. 3023
- [499] S.H. Kazi, L.E. Murr
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Fiedel (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), p. 139
- [500] H.G. Salem, A.P. Reynolds, J.S. Lyons *Scripta Mater.*, 46 (2002), p. 337
- [501] R. Braun, L. Litynska-Dobrzynska *Mater. Sci. Forum*, 396–402 (2002), p. 1531
- [502] A.F. Norman, I. Brough, P.B. Prangnell *Mater. Sci. Forum*, 331–337 (2000), p. 1713
- [503] K.A.A. Hassan, A.F. Norman, P.B. Prangnell *Mater. Sci. Forum*, 396–402 (2002), p. 1549
- [504] J.Q. Su, T.W. Nelson, R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Acta Mater.*, 51 (2003), p. 713
- [505] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, R. Grimes *Mater. Sci. Eng. A*, 351 (2003), p. 148
- [506] I. Charit, R.S. Mishra *Mater. Sci. Eng. A*, 359 (2003), p. 290

- [507] I. Charit, R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Scripta Mater.*, 47 (2002), p. 631
- [508] I. Charit, Z.Y. Ma, R.S. Mishra
Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), *Hot Deformation of Aluminum Alloys III*, TMS (2003), pp. 331-342
- [509] P.S. Pao, E. Lee, C.R. Feng, H.N. Jones, D.W. Moon
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
- [510] Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito *Mater. Trans.*, 44 (2003), p. 1343
- [511] Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito *Scripta Mater.*, 49 (2003), p. 785
- [512] K.V. Jata, K.K. Sankaran, J.J. Ruschau *Metall. Mater. Trans. A*, 31 (2000), p. 2181
- [513] M. James, M. Mahoney *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [514] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney
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
- [515] J.Q. Su, T.W. Nelson, C.J. Sterling *J. Mater. Res.*, 18 (2003), p. 1757
- [516] I. Charit, R.S. Mishra
Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.Z. Valiev, S.L. Semiatin, D.H. Shin, T.C. Lowe(Eds.), *Ultrafine Grained Materials III*, TMS (2004)
- [517] F.J. Humphreys, M. Hotherly **Recrystallization and Related Annealing Phenomena** Pergamon Press, New York (1995)
- [518] C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, M. Calabrese *Scripta Mater.*, 48 (2003), p. 1451
- [519] I. Charit, R.S. Mishra, Unpublished research, 2005.
- [520] M. Mahoney, R.S. Mishra, T. Nelson, J. Flintoff, R. Islamgaliev, Y.Hovansky
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. 183
- [521] A.W. Bowen *Mater. Sci. Technol.*, 6 (1990), p. 1058
- [522] J. Hirsch, K. Lücke *Acta Metall.*, 36 (1998), p. 2863
- [523] K. Lücke, O. Engler L. Arnberg, *et al.* (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Aluminum Alloys*, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway (1992), p. 439
- [524] R.D. Doherty, D.A. Hughes, F.J. Humphreys, J.J. Jonas, D.J. Jensen, M.E. Kassner, W.E. King, T.R. McNelley, H.J. McQueen, A.D. Rollett *Mater. Sci. Eng. A*, 238 (1997), p. 219
- [525] S. Gourder, E.V. Konopleva, H.J. McQueen, F. Montheillet *Mater. Sci. Forum*, 217–222 (1996), p. 441
- [526] H.J. McQueen, E. Evangelista, M.E. Kassner *Z. Metallkd.*, 82 (1991), p. 336
- [527] R.H. Bricknell, J.W. Edington *Acta Metall. A*, 22 (1991), p. 2809
- [528] S.J. Hales, T.R. McNelle *Acta Metall.*, 36 (1988), p. 1229
- [529] Q. Liu, X. Huang, M. Yao, J. Yang *Acta Metall. Mater.*, 40 (1992), p. 1753
- [530] K. Matsuki, T. Iwaki, M. Tokizawa, Y. Murakami *Mater. Sci. Technol.*, 7 (1991), p. 513
- [531] H. Gudmundsson, D. Brooks, J.A. Wert *Acta Metall. Mater.*, 39 (1991), p. 19
- [532] K. Ameyama, H. Matsuoka, A. Miyazaki, M. Tokizane *J. Jpn. Inst. Met.*, 53 (1989), p. 991
- [533] X. Huang, K. Tsuzaki, T. Maki *Acta Metall. Mater.*, 43 (1995), p. 3375
- [534] K. Tsuzaki, X. Huang, T. Maki *Acta Mater.*, 44 (1996), p. 4491

- [535] K.A.A. Hassan, A.F. Norman, P.B. Prangell Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [536] L.E. Murr, E.A. Trillo, S. Pappu, C. Kennedy J. Mater. Sci., 37 (2002), p. 3337
- [537] Y. Hovanski, T.W. Nelson, D.P. Field Proceedings from Joining of Advanced and Specialty Materials, St. Louis, MO, October 9–11, ASM International (2000), p. 167
- [538] Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan, T. Hashimoto Metall. Mater. Trans. A, 32 (2001), p. 941
- [539] D.V. Field, T.W. Nelson, Y. Hovanski, K.V. Jata Metall. Mater. Trans. A, 32 (2001), p. 2869
- [540] H. Jin, S. Saimoto, M. Ball, P.L. Threadgill Mater. Sci. Technol., 17 (2001), p. 1605
- [541] C.D. Donne, E. Lima, J. Wegener, A. Pyzalla, T. Buslaps Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [542] X.L. Wang, Z. Feng, S. David, S. Spooner, C.S. Hubbard Proceedings of the Sixth International Conference on Residual Stresses (ICRS-6), IOM Communications, Oxford, UK (2000), pp. 1408-1420
- [543] M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss, P.J. Withers Acta Mater., 51 (2003), p. 4791
- [544] A.P. Reynolds, W. Tang, T. Gnaupel-Herold, H. Prask Scripta Mater., 48 (2003), p. 1289
- [545] **ASM Handbook, vol. 6: Welding, Brazing, and Soldering** ASM International, USA (1995) p. 1097
- [546] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, T. Hashimoto Metall. Mater. Trans. A, 30 (1999), p. 3125
- [547] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, T. Hashimoto Metall. Mater. Trans. A, 32 (2001), p. 941
- [548] D.L. Zhang, L. Zheng Metall. Mater. Trans. A, 27 (1996), p. 3983
- [549] D.H. Bratland, O. Grong, H. Shercliff, O.R. Myhr, S. Tjøtta Acta Mater., 45 (1997), p. 1
- [550] L.E. Svensson, L. Karlsson, H. Larsson, B. Karlsson, M. Fazzini, J. Karlsson Sci. Technol. Weld. Joining, 5 (2000), p. 285
- [551] B.J. Dracup, W.J. Arbegast Proceedings of the 1999 SAE Aerospace Automated Fastening Conference & Exposition, Memphis, TN, October 5–7 (1999)
- [552] L.E. Svensson, L. Karlsson, H. Larsson, B. Karlsson, M. Fazzini, J. Karlsson Sci. Technol. Weld. Joining, 5 (2000), p. 285
- [553] A. Denquin, D. Allehaux, M.H. Campagnac, G. Lapasset Mater. Sci. Forum, 3 (402) (2002), p. 1199
- [554] M.G. Dawes, S.A. Karger, T.L. Dickerson, J. Przydatek Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [555] A. von Strombeck, J.F. dos Santos, F. Torster, P. Laureano, M. Koçak Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [556] L. Magnusson, L. Källman Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)

- [557] C.D. Donne, G. Biallas, T. Ghidini, G. Raimbeaux Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [558] P.S. Pao, S.J. Gill, C.R. Feng, K.K. Sankara Scripta Mater., 45 (2001), p. 605
- [559] R.S. Mishra, S.R. Sharma, N.A. Mara, M.W. Mahoney Proceedings of the International Conference on Joining of Advanced and Specialty Materials III, ASM International (2000), p. 157
- [560] H. Hori, S. Makita, H. Hino Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [561] M. Kumagai, S. Tanaka Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [562] G. Bussu, P.E. Irving Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16 (1999)
- [563] J.Z. Zhang, R. Pedwell, H. Davies Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden (June 2000)
- [564] M. Erisson, R. Sandstrom, J. Hagstrom Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden (June 2000)
- [565] N. Jayaraman, P. Prevey, M. Mahoney
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), Friction Stir Welding and Processing II, TMS (2003), p. 259
- [566] R. Braun, G. Biallas, C.D. Donne, G. Staniek P.J. Winkler (Ed.), Materials for Transportation Technology EUROMAT'99, vol. 1, Wiley/VCH (1999), pp. 150-155
- [567] G. Bussu, P.E. Irving Int. J. Fatigue, 25 (2003), p. 77
- [568] J.R. Gordon, ASM Handbook, vol. 6, 1993, p. 1108.
- [569] W.J. Arbegast, K.S. Baker, P.J. Hartley Proceedings of the Fifth International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, USA, June 1–5 (1998), pp. 558-562
- [570] D.G. Kinchen, Z. Li, G.P. Adams Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA (June 1999)
- [571] L.D. Oosterkamp, A. Ivankovic, A. Oosterkamp Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [572] H.R. Kroninger, A.P. Reynolds Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 25 (2002), p. 283
- [573] E. Hornborg, E.A. Starke Jr. Acta Metall. Mater., 41 (1993), p. 1
- [574] K.V. Jata, E.A. Starke Jr. Metall. Trans. A, 17 (1986), p. 1011
- [575] M. Graf, E. Hornborg Acta Metall., 25 (1977), p. 883
- [576] R.H. Van Stone, T.B. Cox, J.R. Low Jr., J.A. Psioda Int. Met. Rev., 30 (1985), p. 157
- [577] J. Gurland, Plateau Trans. ASM, 56 (1963), p. 442
- [578] T. Watanabe Texture Microstruct., 20 (1993), p. 195
- [579] J. Corral, E.A. Trillo, Y. Li, L.E. Murr J. Mater. Sci. Lett., 19 (2000), p. 2117
- [580] F. Zucchi, G. Trabanelli, V. Grassi Mater. Corros., 52 (2001), p. 853
- [581] E.I. Meletis, P. Gupta, F. Nave
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
- [582] J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, G. Pollock, C.G. Rhodes Corrosion, 55 (1999), p. 1127

- [583] F. Hannour, A.J. Davenport, M. Strangwood Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [584] C.S. Paglia, L.M. Ungaro, B.C. Pitts, M.C. Carroll, A.P. Reynolds, R.G. Buchheit, 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. 65
- [585] C.S. Paglia, M.C. Carroll, B.C. Pitts, A.P. Reynolds, R.G. Buchheit Mater. Sci. Forum, 396–402 (2002), p. 1677
- [586] J. Lumsden, G. Pollock, M. Mahoney
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
- [587] B.N. Padgett, C. Paglia, R.G. Buchheit
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. 55
- [588] J.R. Galvele, S.M. de Micheli Corros. Sci., 10 (1970), p. 179
- [589] I.L. Muller, J.R. Galvele Corros. Sci., 17 (1977), p. 995
- [590] F. Hannour, A.J. Davenport, S.W. Williams, P.C. Morgan, C.C. Figures Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [591] S. Williams, R. Ambat, D. Price, M. Jariyaboon, A. Davenport, A. Wescott Mater. Sci. Forum, 426–432 (2003), p. 2855
- [592] C.S. Paglia, B.C. Pitts, M.C. Carroll, A.P. Reynolds, R.G. Buchheit, 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. 279
- [593] J.B. Lumsden, G. Pollock, M.W. Mahoney Mater. Sci. Forum, 426–432 (2003), p. 2867
- [594] A. Merati, K. Sarda, D. Raizenne, C.D. Donne
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. 77
- [595] C.G. Andersson, R.E. Andrews Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA, June (1999)
- [596] C.G. Andersson, R.E. Andrews, B.G.I. Dance, M.J. Russell, E.J. Olden, R.M. Sanderson Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden (June 2000)
- [597] T. Hautala, T. Tianien
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. 324
- [598] W.B. Lee, S.B. Jung **The joint properties of copper by friction stir welding** Mater. Lett., 58 (2004), pp. 1041-1046
- [599] 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), pp. 160-169
- [600] K. Okamoto, M. Doi, S. Hirano, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono, T.C. Ping Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [601] W.A. Baeslack, D.W. Becker, F.H. Froes J. Met., 5 (1984), p. 46
- [602] M.C. Juhas, G.B. Viswanathan, H.L. Fraser Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden (June 2000)

- [603] M.C. Juhas, G.B. Viswanathan, H.L. Fraser
K. Jata, E.W. Lee, W. Frazier, N.J. Kim (Eds.), Proceedings of the Lightweight Alloys for Aerospace Application, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), pp. 209-217
- [604] T.J. Lienert, K.V. Jata, R. Wheeler, V. Seetharaman Proceedings of the Joining of Advanced and Specialty Materials III, ASM International, Materials Park, OH, USA (2001), p. 160
- [605] A.J. Ramirez, M.C. Juhas Mater. Sci. Forum, 426–432 (2003), p. 2999
- [606] T. Trap, E. Helder, P.R. Subramanian
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. 173
- [607] W.A. Baeslack, J.R. Davis, C.E. Cross **Metal Handbook, vol. 6: Welding, Brazing and Soldering** ASM International (1993) pp. 507–527
- [608] Occupational Safety and Health Administration, Occupational Exposure to Hexavalent Chromium, OSHA RIN: 1218-AB45, 2001.
- [609] W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas Sci. Tech. Weld. Joining, 4 (1999), p. 365
- [610] T.J. Lienert, J.E. Gould Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA (June 1999)
- [611] T.J. Lienert, W.L. Stellwag Jr., B.B. Grimmett, R.M. Warke Weld. J., 82 (1) (2003), p. 1s
- [612] A.P. Reynolds, M. Posada, J. Deloach, M.J. Skinner, J. Halpin, T.J.Lienert Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan (September 2001)
- [613] M. Posada, J. Deloach, A.P. Reynolds, M. Skinner, J.P. Halpin
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Filed (Eds.), Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), p. 159
- [614] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki Scripta Mater., 49 (2003), p. 1175
- [615] R. Johnson, P.L. Threadgill
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. 88-92
- [616] M. Posada, J. Deloach, A.P. Reynolds, J.P. Halpin
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
- [617] P.J. Konkol, J.A. Mathers, R. Johnson, J.R. Pickens Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan (September 2001)
- [618] A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada, J. Deloac Sci. Technol. Weld. Joining, 8 (6) (2003), p. 455
- [619] C.J. Sterling, T.W. Nelson, C.D. Sorensen, R.J. Steel, S.M. Packer
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
- [620] **ASM Special Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys** ASM International (1999) pp. 106–118
- [621] R. Johnson Indian Foundry J., 48 (3) (2002), pp. 36-37
- [622] R. Johnson Mater. Sci. Forum, 419–422 (2003), p. 365

- [623] K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano, T. Hashimoto, S. Johgan, M. Ushio
Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir
Welding, Kobe, Japan, September 27–28 (2001)
- [624] W.B. Lee, J.W. Kim, Y.M. Yeon, S.B. Jung *Mater. Trans.*, 44 (2003), p. 917
- [625] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung *Mater. Sci. Technol.*, 19 (2003), p. 785
- [626] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa
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
- [627] J.A. Esparza, W.C. Davis, E.A. Trillo, L.E. Murr *J. Mater. Sci. Lett.*, 21 (2002), pp. 917-920
- [628] J.A. Esparza, W.C. Davis, L.E. Murr *J. Mater. Sci.*, 38 (2003), pp. 941-952
- [629] G. Kohn, S. Antonsson, A. Munitz S.K. Das (Ed.), *Automotive Alloys 1999*, TMS (2000), pp. 285-292
- [630] T. Nagasawa, M. Otsuka, T. Yokota, T. Ueki
H.I. Kaplan, J. Hym, B. Clow (Eds.), *Magnesium Technology 2000*, TMS(2000), pp. 383-386
- [631] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa *Scripta Mater.*, 49 (2003), p. 161
- [632] S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa *Metall. Mater. Trans. A*, 34 (2003), p. 987
- [633] M.W. Mahoney, W.H. Harrigan, J.A. Wert *Proceedings of the INALCO'98*, vol. 2, Cambridge, UK, April (1998), pp. 231-236
- [634] T.W. Nelson, H. Zhang, T. Haynes *Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden (June 2000)
- [635] L.E. Murr, Y. Li, E.A. Trillo, J.C. McClure *Mater. Technol.*, 15 (2000), p. 37
- [636] R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo, K.F. Sota *Scripta Mater.*, 45 (2001), p. 75
- [637] K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano, M. Ushio *Mater. Sci. Forum*, 426–432 (2003), p. 2873
- [638] S.C. Baxter, A.P. Reynolds
K. Jata, E.W. Lee, W. Frazier, N.J. Kim (Eds.), *Proceedings of the Lightweight Alloys for Aerospace Application*, TMS, Warrendale, PA, USA (2001), pp. 283-293
- [639] S.R. Sharma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, K.V. Jata
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Field (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS (2001), pp. 151-157
- [640] L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo, J.C. McClure *Mater. Res. Innovat.*, 2 (1998), p. 150
- [641] L.E. Murr, G. Sharma, F. Contreras, M. Guerra, S.H. Kazi, M. Siddique, R.D. Flores, D.J. Shindo, K.F. Soto, E.A. Trillo, C. Schmidt, J.C. McClure S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert (Eds.), *Aluminum 2001—Proceedings of the TMS 2001 Annual Meeting Aluminum Automotive and Joining Symposia*, TMS (2001)
- [642] H. Larsson, L. Karlsson, S. Stoltz, E.L. Bergqvist *Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden, June 26–28 (2000)
- [643] R.J. Lederich, J.A. Baumann, P.A. Oelgoetz
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
- [644] J.A. Wert *Scripta Mater.*, 49 (2003), p. 607

- [645] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung
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. 123
- [646] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung *Scripta Mater.*, 49 (2003), p. 423
- [647] J.A. Baumann, R.J. Lederich, D.R. Bolser, R. Talwar
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. 199
- [648] S. Lim, S. Kim, C.G. Lee, S. Kim *Metall. Mater. Trans. A*, 35 (9) (2004), pp. 2837-2843
- [649] Y.S. Sato, S.H.C. Park, M. Michiuchi, H. Kokawa *Scripta Mater.*, 50 (2004), pp. 1233-1236
- [650] A.C. Somasekharan, L.E. Murr *Mater. Charact.*, 52 (2004), pp. 49-64
- [651] K. Kimapong, T. Watanabe *Weld. J.*, 83 (10) (2004), pp. 277S-282S
- [652] C.M. Chen, R. Kovacevic *Int. J. Mach. Tool. Manufact.*, 44 (2004), pp. 1205-1214
- [653] J.C. Bassett, S.S. Birley *Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding*, Gothenburg, Sweden (June 2000)
- [654] G. Campbell, T. Stotler *Weld. J.*, 78 (1999), p. 45
- [655] K.J. Colligan, J.J. Fisher, J.E. Gover, J.R. Pickens *Adv. Mater. Process.*, 160 (2002), p. 39
- [656] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney *Scripta Mater.*, 50 (2004), p. 931
- [657] I. Charit, R.S. Mishra, Unpublished results.
- [658] Z.Y. Ma, R.S. Mishra
S. Seel, N.B. Dahotre, J.J. Moore, C. Suryanarayana, A. Agarwal (Eds.), *Surface Engineering: Materials Science II*, TMS (2003), pp. 243-250
- [659] P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, M.W. Mahoney *Scripta Mater.*, 44 (2001), p. 61
- [660] J.E. Spowart, Z.Y. Ma, R.S. Mishra
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing II*, TMS (2003), p. 243
- [661] S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra *Scripta Mater.*, 51 (2004), p. 237
- [662] N.E. Paton, C.H. Hamilton, J. Wert, M. Mahoney *J. Met.*, 34 (1982), p. 21
- [663] X. Jiang, Q. Wu, J. Cui, L. Ma *Metall. Trans. A*, 24 (1993), p. 25
- [664] J. Xinggang, C. Jiangzhong, M. Longxiang *Acta Metall. Mater.*, 41 (1993), p. 2721
- [665] R.S. Mishra, T.R. Bieler, A.K. Mukherjee *Acta Mater.*, 43 (1995), p. 877
- [666] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, R. Grimes *Metall. Mater. Trans. A*, 36A (6) (2005), p. 1447
- [667] R.S. Mishra, R.K. Islamgaliev, T.W. Nelson, Y. Hovansky, M.W. Mahoney
K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, D.P. Field (Eds.), *Friction Stir Welding and Processing*, TMS (2001), p. 205
- [668] G. Ricciardi, M. Cantello, G. Mollino, W. Varani, E. Garlet *Proceedings of the Second International Seminar on Surface Engineering with High Energy Beam*, Science and Technology, CEMUL-IST, Lisbon, Portugal (1989), pp. 415-423
- [669] D. Pantelis, A. Tissandier, P. Manolatos, P. Ponthiaux *Mater. Sci. Technol.*, 11 (1995), p. 299
- [670] C. Hu, T.N. Baker *J. Mater. Sci.*, 30 (1995), p. 891
- [671] C. Hu, H. Xin, T.N. Baker *J. Mater. Sci.*, 30 (1995), p. 5985
- [672] C. Hu, H. Xin, T.N. Baker *Mater. Sci. Technol.*, 12 (1996), p. 227

- [673] C. Hu, T.N. Baker *J. Mater. Sci.*, 32 (1997), p. 5047
- [674] T.C. Lei, J.H. Ouyan, Y.T. Pei, Y. Zhou *Mater. Sci. Technol.*, 11 (1995), p. 520
- [675] L.R. Katipelli, N.B. Dahotre *Mater. Sci. Technol.*, 17 (2001), p. 1061
- [676] S.H. Choo, S. Lee, S.J. Kwon *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999), p. 1211
- [677] S.H. Choo, S. Lee, S.J. Kwon *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999), p. 3131
- [678] M.C. Gui, S.B. Kang *Mater. Lett.*, 46 (2000), p. 2
- [679] Y. Wang, X. Zhang, G. Zeng, F. Li *Mater. Des.*, 21 (2000), p. 447
- [680] Y.S. Wang, X.Y. Zhang, G.T. Zeng, F.C. Li *Composites, Part A*, 32 (2001), p. 281
- [681] A.N. Attia *Mater. Des.*, 22 (2001), p. 451
- [682] D.L. Zhang, L. Zheng *Metall. Mater. Trans. A*, 27 (1996), p. 3983
- [683] T. Din, J. Campbell *Mater. Sci. Technol.*, 12 (1996), p. 644
- [684] Y.B. Yu, P.Y. Song, S.S. Kim, J.H. Lee *Scripta Mater.*, 41 (1999), p. 767
- [685] D.L. Zalensas (Ed.), *Aluminum Casting Technology* (2nd ed.), AFS Inc., Illinois (1993), p. 77
- [686] S. Kumai, J. Hu, Y. Higo, S. Nunomura *Acta Mater.*, 44 (1996), p. 2249
- [687] B. Zhang, D.R. Poirier, W. Chen *Metall. Mater. Trans. A*, 30 (1999), p. 2659
- [688] M.E. Seniw, J.G. Conley, M.E. Fine *Mater. Sci. Eng. A*, 285 (2000), p. 43
- [689] G. Atxaga, A. Pelayo, A.M. Irisarri *Mater. Sci. Technol.*, 17 (2001), p. 446
- [690] K.T. Kashyap, S. Murrall, K.S. Raman, K.S.S. Murthy *Mater. Sci. Technol.*, 9 (1993), p. 189
- [691] L. Wang, S. Shivkumar *Z. Metallkd.*, 86 (1995), p. 441
T.J. Hurley, R.G. Atkinson
- [692] *Trans. AFS*, 91 (1985), p. 291
- [693] D. Argo, J.E. Gruzleski *Trans. AFS*, 16 (1988), p. 65
- [694] J. Wang, S. He, B. Sun, K. Li, D. Shu, Y. Zhou *Mater. Sci. Eng. A*, 338 (2002), p. 101
- [695] R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo, J.C. McClure *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA (June 1999)
- [696] K.N. Krishnan *Proceedings of the International Conference on Welding*, New Delhi, India, February 15–17 (2001)
- [697] K.N. Krishnan *J. Mater. Sci.*, 37 (2002), p. 473
- [698] K.A.A. Hassan, A.F. Norman, P.B. Prangnell *Acta Mater.*, 51 (2003), p. 1923
- [699] I. Charit, R.S. Mishra, Unpublished results.
- [700] Jakob Hilgert: *Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding*, 2012, pp:3
- [701] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: GB Patent no. 9125978, 1991.
- [702] . C. Dawes and W. Thomas: 'Friction stir joining of aluminium alloys', *TWI Bull.*, 1995, 6, 124–127.
- [703] R. S. Mishra and Z. Y. Ma: 'Friction stir welding and processing', *Mater. Sci. Eng. R*, 2005, 50R, 1–78.
- [704] . M. Iordachescu, E. Scutelnicu and D. Iordachescu: 'Fundamentals of the process and tools design: friction stir processing of materials', *Weld. Equip. Technol.*, 2006, 17, 63–72.
- [705] . R. S. Mishra and M. W. Mahoney: 'Friction stir welding and processing'; 2007, Materials Park, OH, ASM International.

- [706] . L. Dubourg and P. Dacheux: 'Design and properties of FSW tools: a literature review', Proc. 6th Int. Symp. on 'Friction stir welding', Vol. 52, No. 4, 62; 2006, Saint-Sauveur, PQ, TWI.
- [707] . R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S. X. McFadden, N. A. Mara and A. K. Mukherjee: 'High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy', Scr. Mater., 2000, 42, 163.
- [708] R. S. Mishra and M. W. Mahoney: 'Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys', Mater. Sci. Forum, 2001, 357–359, 507–514.
- [709] . Y. Tozaki, Y. Uematsu and K. Tokaji: 'A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance', J. Mater. Process. Technol., 2010, 210, 844–851.
- [710] . D. Bakavos and P. B. Prangnell: 'Effect of reduced or zero pin length and anvil insulation on friction stir spot welding thin gauge 6111 automotive sheet', Sci. Technol. Weld. Join., 2009, 14, 443–456.
- [711] D. Bakavos, Y. C. Chen, L. Babout and P. B. Prangnell: 'Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet', Metall. Mater. Trans. A, 2011, 42A, 1266–1282.
- [712] R. J. Ding and P. A. Oelgoetz: 'Auto-adjustable probe tool for friction stir welding', US Patent no. 5893507, 1999.
- [713] R. J. Ding: 'Force characterization on the welding pin of a friction stir welding retractable pin-tool using aluminum-lithium 2195', Proc. 2nd Int. Conf. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [714] W. M. Thomas, E. D. Nicholas and S. D. Smith: 'Friction stir welding-tool developments', Proc. Aluminum Automotive and Joining Sessions, 213–224; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [715] M. Skinner and R. L. Edwards: 'Improvements to the FSW process using the self-reacting technology', Mater. Sci. Forum, 2003, 426, 2849–2854.
- [716] G. Sylva, R. Edwards and T. Sassa: 'A feasibility study for selfreacting pin tool welding of thin section aluminum', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [717] F. Marie, D. Allehaux and B. Esmiller: 'Development of the bobbin tool technique on various Al alloys', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [718] C. D. Sorenson, T. W. Nelson, S. M. Packer and R. J. Steel: 'Innovative technology applications in FSW of high softening temperature materials', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [719] A. P. Reynolds and W. D. Lockwood: 'Digital image correlation for determination of weld and base metal constitutive behavior', Proc. 1st Int. Conf. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [720] T. W. Nelson, B. Hunsaker and D. P. Field: 'Local texture characterization of friction stir welds in 1100 aluminum', Proc. 1st Int. Conf. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [721] M. A. Sutton, A. P. Reynolds, B. Yang and R. Taylor: 'Mode I fracture and microstructure for 2024-T3 friction stir welds', Mater. Sci. Eng. A, 2003, A354, 6–16.
- [722] J. Lumsden, G. Pollock and M. Mahoney: 'Effect of tool design on stress corrosion resistance of FSW AA7050-T7451', in 'Friction stir welding and processing III', 19–25; 2005, San Francisco, CA, TMS.

- [723] L. Dubourg, F. O. Gagnon, L. St-Georges, M. Jahazi and F. G. Hamel: 'Process window optimization for FSW of thin and thick sheet Al alloys using statistical methods', Proc. 6th Symp. on 'friction stir welding', Saint Sauveur, PQ, Canada, October 2006, TWI.
- [724] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, P. Temple-Smith, S. W. K. W. Kallee and C. J. Dawes: 'Friction stir welding', UK Patent Application 2306366, 1996.
- [725] K. Colligan: 'Tapered friction stir welding tool', US Patent no. 6669075, 2003.
- [726] K. J. Colligan and J. R. Pickens: 'Friction stir welding of aluminum using a tapered shoulder tool', in 'Friction stir welding and processing III', 161–170; 2005, San Francisco, CA, TMS.
- [727] T. Nishihara and Y. Nagasaka: 'Development of micro-FSW', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [728] C. J. Dawes and W. M. Thomas: 'Development of improved tool designs for friction stir welding of aluminum', Proc. 1st Int. Conf. on 'Friction stir welding', Thousand Oaks, CA, USA, June 1999, TWI.
- [729] S. Brinckmann, A. von Strombeck, C. Schilling, J. F. dos Santos, D. Lohwasser and M. Kocak: 'Mechanical and toughness properties of robotic-FSW repair welds in 6061-T6 aluminum alloys', Proc. 2nd Int. Conf. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [730] K. J. Colligan, J. Xu and J. R. Pickens: 'Welding tool and process parameter effects in friction stir welding of aluminum alloys', in 'Friction stir welding and processing II', 181–190; 2003, Warrendale, PA, TMS.
- [731] S. Packer, T. Nelson, C. Sorensen, R. Steel and M. Matsunaga: 'Tool and equipment requirements for friction stir welding ferrous and other high melting temperature alloys', Proc. 4th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [732] C. D. Sorensen, T. W. Nelson and S. M. Packer: 'Tool material testing for FSW of high-temperature alloys', Proc. 3rd Int. Conf. on 'Friction stir welding', Kobe, Japan, September 2001, TWI.
- [733] T. W. Nelson, H. Zhang and T. Haynes: 'Friction stir welding of aluminum MMC 6061-boron carbide', Proc. 2nd Int. Conf. on 'Friction stir welding', Gothenburg, Sweden, June 2000, TWI.
- [734] B. London, M. Mahoney, M. Bingel, M. Calabrese, R. H. Bossi and D. Waldron: 'Material flow in friction stir welding monitored with Al–SiC and Al–W composite markers', in 'Friction stir welding and processing II', 3–12; 2003, Warrendale, PA, TMS.
- [735] C. J. Dawes, P. L. Threadgill, E. J. R. Spurgin and D. G. Staines: 'Development of the new friction stir technique for welding aluminum phase II', TWI member report, Cambridge, UK, 1995.
- [736] S. P. Vaze, J. Xu, R. J. Ritter, K. J. Colligan, J. J. Fisher, Jr and J. R. Pickens: 'Friction stir processing of aluminum alloy 5083 plate for cold bending', Mater. Sci. Forum, 2003, 426–432, 2979–2986.
- [737] R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan: 'Texture and grain evolutions in a 2195 friction stir weld', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [738] Z. Loftus, J. Takeshita, A. Reynolds and W. Tang: 'An overview of friction stir welding beta 21S titanium', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.

- [739] R. Zettler, S. Lomolino, J. F. dos Santos, T. Donath, F. Beckmann, T. Lipman and D. Lohwasser: 'A study of material flow in FSW of AA2024-T351 and AA 6056-T4 alloys', Proc. 5th Int. Conf. on 'Friction stir welding', Metz, France, September 2004, TWI.
- [740] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: 'Development of trivex friction stir welding tool. Part 1: two-dimensional flow modeling', Sci. Technol. Weld. Join., 2004, 9, (4), 345–351.
- [741] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff: 'Experimental and numerical analysis of aluminum alloy 7075-T7351 friction stir welds', Sci. Technol. Weld. Join., 2003, 8, (5), 360–368.
- [742] W. M. Thomas, I. M. Norris, D. G. Staines and E. R. Watts: 'Friction stir welding – process development and variant techniques', Proc. SME Summit, Milwaukee, WI, USA, August 2005, SME.
- [743] M. Aissani, S. Gachi, F. Boubenider and Y. Benkedda: 'Design and optimization of friction stir welding tool', Mater. Manuf. Processes, 2010, 25, (11), 1199–1205.
- [744] W. M. Thomas, E. D. Nicholas and S. D. Smith: 'Friction stir welding-tool developments', Proc. TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions, 213; 2001, Warrendale, PA, TMS.
- [745] W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris and R. de Frias: 'Friction stir welding – tools and developments', Weld. World, 2002, 47, (11–12), 10–17.
- [746] W. M. Thomas, S. A. Lockyer, S. W. Kalee and D. G. Staines: 'Friction stir welding: an update on recent developments', Proc. Zhang et al. Review of tools for FSW/P 260 Canadian Metallurgical Quarterly 2012 VOL 51 NO 3 Conf. on 'Stressed components in aluminium alloys', Birmingham, UK, April 2003, ImechE.
- [747] W. M. Thomas, K. I. Johnson and C. S. Wiesner: 'Friction stir welding recent developments in tool and process technologies', Adv. Eng. Mater., 2003, 5, (7), 485–490.
- [748] R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia: 'Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties', Prog. Mater. Sci., 2008, 53, 980–1023.
- [749] X. Cao and M. Jahazi: 'Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy', Mater. Des., 2011, 32, (1), 1–11.
- [750] W. M. Thomas and R. E. Dolby: 'Friction stir welding developments', Proc. 6th Int. Trends in Welding Research, 203–211; 2003, Materials Park, OH, ASM International.
- [751] L. Dubourg, A. Merati and M. Jahazi: 'Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin', Mater. Des., 2010, 31, 3324–3330.
- [752] A. P. Reynolds and W. Tang: 'Alloy, tool geometry, and process parameter effects on friction stir weld energies and resultant FSW joint properties', in 'Friction stir welding and processing', 15–23; 2001, Indianapolis, Indiana, TMS.
- [753] X. G. Chen, M. D. Silva, P. Gougeon and L. St-Georges: 'Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063-B4C metal matrix composites', Mater. Sci. Eng. A, 2009, 518, 174–184.

- [754] R. A. Prado, L. E. Murr, D. J. Shindo and K. F. Soto: 'Tool wear in the friction stir welding of aluminum alloy 6061z20% Al₂O₃: a preliminary study', *Scr. Mater.*, 2001, 45, 75–80.
- [755] A. H. Feng and Z. Y. Ma: 'Formation of Cu₂FeAl₇ phase in friction stir welded SiCp/Al-Cu-Mg composite', *Scr. Mater.*, 2007, 57, 1113–1116.
- [756] M. Najafi, A. M. Nasiri and A. H. Kokabi: 'Microstructure and hardness of friction stir processed AZ31 with SiCp', *Int. J. Mod. Phys. B*, 2008, 22B, (18–19), 2879–2885.
- [757] M. Collier, R. Steel, T. Nelson, C. Sorensen and S. Packer: 'Grade development of polycrystalline cubic boron nitride for friction stir processing of ferrous alloys', *Proc. 4th Int. Conf. on 'Friction stir welding'*, Park City, UT, USA, May 2003, TWI.
- [758] D. J. Shido, A. R. Rivera and L. E. Murr: 'Shape optimization for tool wear in the friction stir welding of cast Al359-20% SiC MMC', *J. Mater. Sci.*, 2002, 37, 4999–5005.
- [759] R. A. Prado, L. E. Murr, K. F. Soto and J. C. McClure: 'Selfoptimization in tool wear for friction stir welding of Al 6061z20% Al₂O₃ MMC', *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, A349, 156–165.
- [760] Y. Hovanski, M. L. Santella and G. J. Grant: 'Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel', *Scr. Mater.*, 2007, 57, 873– 876.
- [761] D. H. Choi, C. Y. Lee, B. W. Ahn, J. H. Choi, Y. M. Yeon, K. Song, H. S. Park, Y. J. Kim, C. D. Yoo and S. B. Jung: 'Frictional wear evaluation of WC-Co alloy tool in friction stir spot welding of low carbon steel plates', *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2009, 27, 931–936.
- [762] A. Kumar, D. P. Fairchild, M. L. Macia, T. D. Anderson, H. W. Jin, R. Ayer and A. Ozekcin: 'Research progress on friction stir welding of pipeline steels', *Proc. 8th Int. Pipeline Conf.*, Vol. 2, 711–719; 2010, Calgary, ASME
- [763] <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090018046.pdf>
- [764] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes, GB Patent Application No. 9125978.8, 1991.
- [765] P. Vilaça, W. Thomas, *Friction Stir Welding Technology* in: P.M.G.P Moreira, L.F.M da Silva, P.M.S.T. de Castro (Eds.), *Structural connections for lightweight metallic structures*, *Adv. Struct. Mater.* 8 (2012) 85-124.
- [766] J.N. Pires, A. Loureiro, G. Bolmsjo, *Welding robots: Technology, system issues and applications*, Springer, London, 2006, pp. 27–71.
- [767] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, *Mater. Sci. Eng. R* 50 (2005) 1–78.
- [768] D. Veljic, *Experimental and numerical thermo-mechanical analysis of friction stir welding of high strength aluminum alloys*, PhD thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2012.
- [769] M. Ellis, M. Strangwood, *Welding of rapidly solidified alloy 8009 (Al-8.5Fe-1.7Si-1.3V) – Preliminary study*, *Mater. Sci. Tech.* 12 (1996) 970–977.
- [770] R.S. Mishra, M.W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*, ASM International, Materials Park, OH, 2007.
- [771] M. Ericsson, R. Sandstrom, *Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG*, *Int. J. Fatigue* 25 (2003) 1379–1387.
- [772] K. Elangovan, V. Balasubramanian, *Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy*, *J. Mater. Process. Tech.* 200 (2008) 163–175.

- [773] R. Rail, A. De, H.K. Bhadeshia, T. DebRoy, Review: friction stir welding tools, *Sci. Tech. Weld. Join.* 16 (2011) 325–342.
- [774] C.J. Dawes, W.M. Thomas, Development of improved tool design for FSW of aluminum, in *Proceedings of 1st International conference on friction stir welding*, Thousand Oaks, TWI, USA, 1999.
- [775] T. Nishihara, Development of simplified FSW tool, in *Proceedings of 6th International symposium on friction stir welding*, Saint-Sauveur, Quebec, Canada, 2006.
- [776] L. Dubourg, P. Dacheux, Design and properties of FSW tools: a literature review, in *Proceedings of 6th International symposium on friction stir welding*, Saint-Sauveur, Quebec, Canada, 2006.
- [777] S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy, *Scr. Mater.* 51 (2004) 237–241.
- [778] H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Tech.* 142 (2003) 692–696.
- [779] G. D'Urso, E. Ceretti, C. Giardini, G. Maccarini, The effect of process parameters and tool geometry on mechanical properties of FSW aluminum butt joints, *Int. J. Mater. Form.* 2(1) (2009) 303–306.
- [780] Y. Zhao, S. Lin, L. Wu, F. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Mater. Lett.* 59 (2005) 2948–2952.
- [781] K.S. Arora, S. Pandey, M. Schaper, R. Kumar, Effect of process parameters on FSW of aluminum alloy 2219-T87, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 50 (2010) 941–952.
- [782] H. Abd El-Hafez, Mechanical properties and welding power of friction stirred AA2024-T35 joints, *J. Mater. Eng. Perform.* 20 (2011) 839–845.
- [783] A.P. Reynolds, W. Tang, Z. Khandkar, J.A. Khan, K. Lindner, Relationships between weld parameters, hardness distribution and temperature history in 7050 FSW, *Sci. Tech. Weld. Join.* 10 (2005) 190–199.
- [784] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model, *Mater. Sci. Eng., A* 419 (2006) 389–396.
- [785] M. Boz, A. Kurt, The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process, *Mater. Des.* 25 (2004) 343–347.
- [786] P.A. Colegrove, H.R. Shercliff, Two dimensional CFD modeling of flow round profiled FSW tooling, *Sci. Tech. Weld. Join.* 9 (2004) 483–492.
- [787] S. Lin, Y. Zhao, Z. He, L. Wu, Modeling of friction stir welding process for tools design, *Front. Mater. Sci.* 5 (2011) 236–245.
- [788] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, *Mater. Charact.* 49 (2003) 95–101. I.Z. RADISAVLJEVIC et al.: MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF BUTT FRICTION STIR WELDED Al ALLOY *Hem. ind.* 69 (3) 323–330 (2015) 330
- [789] P. Vilaça, L. Quintino, J.F. dos Santos, iSTIR - Analytical thermal model for friction stir welding, *J. Mater. Process. Tech.* 169 (2005) 452–465.
- [790] W.J. Arbogast, P.J. Hartley, Friction stir welding technology development at Lockheed Martin Michoud space systems: an overview, in *Proceedings of 5th International conference of trends in welding research*, Pine Mountain, GA, USA, 1998, p. 541.

- [791] Leica Application Suite, ver. 3.8.0, Leica Microsystems Ltd., Switzerland
- [792] Z. Zhang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 2219-T6 joints, *J. Mater. Sci.* 47 (2012) 4075–4086.
- [793] K. Kumar, S.V. Kailas, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, *Mater. Sci. Eng., A* 485 (2008) 367–374.
- [794] W.J. Arbegast, A flow partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, *Scr. Mater.* 58 (2008) 372–376.
- [795] Z. Zhang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma, Effect of Alclad Layer on Material Flow and Defect Formation in Friction-StirWelded 2024 Aluminum Alloy, *Metall. Mater. Trans. A* 42 (2011) 1717–1726.
- [796] Kh.A.A. Hassan, P.B. Prangnell, A.F. Norman, D.A. Price, S.W. Williams, Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminum alloy friction stir welds, *Sci. Tech. Weld. Join.* 8 (2003) 257–268.
- [797] K.N. Krishnan, On the formation of onion rings in friction stir welds, *Mater. Sci. Eng., A* 327 (2002) 246–251.
- [798] M.A. Sutton, B. Yang, A.P. Reynolds, R. Taylor, Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum, *Mater. Sci. Eng., A* 323 (2002) 160–166.
- [799] M.J. Jones, P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux, J.H. Driver, Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy, *Scr. Mater.* 52 (2005) 693–697.
- [800] K.V. Jata, S.L. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scr. Mater.* 43 (2000) 743–749.
- [801] <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0367-598X/2015/0367-598X1400020R.pdf>