

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

**Τροποποίηση φρεζομηχανής για την διενέργεια  
συγκολλήσεων FSW και αξιολόγηση συγκολλήσεων  
FSW κράματος Al 5083-H32**

Αθανασιάδης Στέφανος

Επιβλέπων: Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος

2014



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 12877/1  
Ημερ. Εισ.: 08-09-2014  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2014  
ΑΘΑ

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειχνε κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Την κ. Άννα Ζερβάκη για τις πολύτιμες συμβουλές της και την υποστήριξη της. Τον κ. Δαφερέρα Αναστάσιο για την εγκατάσταση των ηλεκτρονικών ενδείξεων. Την εταιρεία Σκλέρο Α.Ε. και συγκριμένα τον κ. Ευριπίδη Κεχαγιά για την προμήθεια του υλικού κατασκευής του εργαλείου και την θερμική του κατεργασία. Σημαντική επίσης ήταν και η συνεισφορά της εταιρείας Sielman S.A προσφέροντας την κατασκευή του εργαλείου συγκόλλησης. Πάνω απ' όλα όμως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Θανάση και Βασιλική που με στηρίζουν πάντα με αγάπη σε ότι κι αν αποφασίσω να κάνω.

## Περίληψη

Η μέθοδος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW) εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της έναντι των κλασικών μεθόδων συγκόλλησης με τήξη, έχει βρει ευρεία βιομηχανική εφαρμογή κυρίως σε κατασκευές κραμάτων Al. Το ενδιαφέρον ανάπτυξης της έρευνας για αυτό το σχετικά καινούργιο είδος συγκόλλησης σε συνδυασμό με την δυσκολία εύρεσης έτοιμων συγκολλημένων δοκιμίων και το κόστος της αγοράς μιας μηχανής FSW αποφασίστηκε η μετατροπή μιας ήδη υπάρχουσας φρεζομηχανής σε μηχανή FSW εντός των εγκαταστάσεων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΘ.

Για την επίτευξη του στόχου απαραίτητες ήταν τροποποιήσεις στην φρεζομηχανή. Οι τροποποιήσεις αυτές περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό και την κατασκευή του εργαλείου συγκόλλησης, τον σχεδιασμό και την κατασκευή του συστήματος συγκράτησης και τέλος τον σχεδιασμό και την τοποθέτηση ηλεκτρονικού εξοπλισμού για τον έλεγχο της πρόωσης, της ταχύτητας περιστροφής και του κάθετου εφαρμοζόμενου φορτίου. Η τοποθέτηση των ηλεκτρονικών ενδείξεων είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας της μεθόδου και την ακριβή καταγραφή των παραμέτρων συγκόλλησης.

Αρχικά διεξήχθησαν απλά περάσματα σε φύλλο Al 5083 πάχους 6 mm για να εξακριβωθεί αν το σύστημα συγκόλλησης παρουσιάζει κάποιου είδους ανωμαλία κατά την λειτουργία του. Πραγματοποιήθηκαν 6 περάσματα στο ίδιο έλασμα αλουμινίου και στη συνέχεια κόπηκαν δοκίμια από κάθε πέρασμα και εξετάστηκαν μακροσκοπικά και μεταλλογραφικά. Για κάθε μεταλλογραφικό δοκίμιο έγινε χαρακτηρισμός των διαστάσεων των ζωνών ανάδευσης και της μορφολογίας τους. Έπειτα χρησιμοποιήθηκαν πλακίδια πάχους 3mm του κράματος Al 5083-H32 για την διεξαγωγή μετωπικών συγκολλήσεων. Πραγματοποιήθηκαν 4 συγκολλήσεις διαφορετικές συνθήκες η καθεμιά. Κάθε συγκόλληση εξετάστηκε μακροσκοπικά, μεταλλογραφικά, με ραδιογραφία, σκληρομετρήσεις και δοκίμια εφελκυσμού.

Διαπιστώθηκε ότι η τροποποίηση της φρεζομηχανής πραγματοποιήθηκε με επιτυχία και το Al 5083 ανταποκρίνεται καλά στη μέθοδο FSW παράγοντας συγκολλήσεις καλής ποιότητας. Οι ηλεκτρονικές ενδείξεις των παραμέτρων της συγκόλλησης εξασφαλίζουν την επαναληψιμότητα της μεθόδου αλλά και την ομοιογένεια στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων είναι κοντά σε αυτές του μητρικού υλικού εμφανίζοντας περιορισμένα σφάλματα.



## Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	2
Περίληψη.....	3
Πίνακας περιεχομένων .....	4
<b>1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....</b>	<b>5</b>
1.1 Σκοπός εργασίας .....	5
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	7
1.2.1 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση – FSW.....	7
1.2.2 Μικροδομή .....	7
1.2.3 Περιγραφή εξοπλισμού .....	8
1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου .....	11
1.3 Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου.....	12
1.3.1 Οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	12
1.3.2 Τα κράματα αλουμινίου .....	13
1.3.3 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx.....	15
1.3.4 Το κράμα αλουμινίου 5083 .....	17
1.3.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση FSW .....	19
1.3.6 Βιομηχανικές εφαρμογές μεθόδου FSW .....	22
<b>2. Τροποποίηση φρεζομηχανής για συγκολλήσεις FSW .....</b>	<b>24</b>
2.1 Σχεδιασμός εργαλείου συγκόλλησης .....	24
2.2 Σχεδιασμός συστήματος συγκράτησης.....	27
2.3 Εγκατάσταση ηλεκτρονικών ενδείξεων των παραμέτρων συγκόλλησης.....	28
<b>3. Πειραματική διαδικασία.....</b>	<b>31</b>
<b>4. Αποτελέσματα/Συζήτηση .....</b>	<b>33</b>
4.1 Απλά Περάσματα ( bead-on-plate).....	33
4.1.1 Μακροσκοπική παρατήρηση.....	33
4.1.2 Μικροσκοπική παρατήρηση .....	34
4.2 Μετωπικές συγκολλήσεις.....	39
4.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση και ραδιογραφίες.....	39
4.2.2 Μεταλλογραφίες μετωπικών συγκολλήσεων.....	41
4.2.3 Μικροσκληρομετρήσεις .....	43
4.2.4 Δοκιμές εφελκυσμού .....	46
<b>5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>49</b>
<b>6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>50</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>51</b>



# 1. Εισαγωγή-Βιβλιογραφική ανασκόπηση

## 1.1 Σκοπός εργασίας

Η διαρκής ανάπτυξη νέων υλικών και η αξιοποίηση τους σε καινοτόμες εφαρμογές δίνει ώθηση στην έρευνα για σχεδιασμό και εφαρμογή νέων μεθόδων συγκόλλησης τους.

Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW), που επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε το 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (T.W.I.), αποτελεί την πλέον καινοτόμο μέθοδο συγκόλλησης. Πρόκειται για μια διεργασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κατά την οποία ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο με ειδικά σχεδιασμένο πείρο και κατάλληλο περιαιχένιο, εισέρχεται μεταξύ των επαπτόμενων ακμών των καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων και κινείται κατά μήκος της ακμής της σύνδεσης. Η θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω τριβής μεταξύ του περιαιχενίου και των υπό συγκόλληση τεμαχίων είναι αρκετή ώστε να πλαστικοποιήσει τοπικά τα τεμάχια. Ταυτόχρονα, το τοπικά πλαστικοποιημένο υλικό αναδεύεται από τον περιστρεφόμενο και κινούμενο πείρο του εργαλείου συγκόλλησης δίνοντας ραφές συγκόλλησης υψηλής ποιότητας χωρίς ατέλειες ή ελαττώματα. Η μέθοδος εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της έναντι των κλασικών μεθόδων συγκόλλησης με τήξη, έχει βρει ευρεία βιομηχανική εφαρμογή κυρίως σε κατασκευές κραμάτων Al και εξακολουθεί να αποτελεί πεδίο σημαντικής Ερευνητικής Δραστηριότητας για πολλές Ερευνητικές Ομάδες διεθνώς. Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη της μεθόδου FSW αξιοποιώντας υπάρχοντα εξοπλισμό στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας μετά από τις απαραίτητες τροποποιήσεις ώστε να είναι εφικτή η παραγωγή καλής ποιότητας συγκολλήσεων με ικανοποιητική επαναληψιμότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η μέθοδος μετράει 23 χρόνια ζωής, στον Ελληνικό χώρο, έως και την έναρξη της παρούσας εργασίας, πειραματική δραστηριότητα στο πεδίο FSW υπήρχε μόνο από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ[1].

Το υλικό που επελέγη για τις συγκολλήσεις ήταν το κράμα Al 5083-H32. Τα κράματα Al της σειράς 5xxx, όπου και ανήκει το υπό μελέτη κράμα, έχουν ευρεία εφαρμογή στον κατασκευαστικό τομέα στη χώρα μας π.χ. σε οχήματα μεταφοράς εύφλεκτων υγρών καυσίμων όπως βενζίνη, πετρέλαιο, κηροζίνη (ADR, class 3) γι'αυτό και η ανάγκη αξιόπιστης συγκόλλησης τους είναι επιτακτική. Η επιτυχής συγκόλληση τους συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση πόρων στις κατασκευές, οδηγεί σε μείωση του βάρους επομένως σε αύξηση του ωφέλιμου φορτίου, μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών καυσαερίων.

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Το πρώτο στάδιο της εργασίας ήταν η τροποποίηση της υπάρχουσας φρέζας ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μηχανή FSW. Η τροποποίηση αυτή περιελάμβανε:

- Σχεδιασμό και κατασκευή εργαλείου συγκόλλησης
- Σχεδιασμό και κατασκευή τράπεζας συγκράτησης δοκιμίων
- Σχεδιασμό και τοποθέτηση εξοπλισμού για τον έλεγχο της ταχύτητας πρόωσης,

της ταχύτητας περιστροφής και εφαρμοζόμενου κάθετου φορτίου.

Ακολούθως διεξήχθησαν αρχικά απλά περάσματα (bead-on-plate) σε έλασμα Al 5083 πάχους 6mm σε μεγάλο εύρος πειραματικών συνθηκών. Οι βέλτιστες συνθήκες που προσδιορίστηκαν κατόπιν αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση μετωπικών συγκολλήσεων (butt joints). Η μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών συνθηκών στην ποιότητα της συγκόλλησης αξιολογήθηκε με τις εξής μεθόδους:

- Μη καταστρεπτικός έλεγχος – Ραδιογραφίες
- Μακροσκοπικός έλεγχος
- Μεταλλογραφικός έλεγχος
- Μικροσκληρομετρήσεις
- Δοκιμές εφελκυσμού

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της μετατροπής της υπάρχουσας φρέζας σε μηχανή FSW πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Οι συγκολλήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν αξιόπιστα και με επαναληψιμότητα και με κατάλληλη επιλογή πειραματικών συνθηκών να παραχθούν συγκολλήσεις χωρίς σφάλματα, με ικανοποιητική μικροδομή και μηχανικές ιδιότητες.

Η εργασία παρουσιάζεται στα εξής Κεφάλαια που ακολουθούν:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή-Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία-Σχεδιασμός μηχανής FSW

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα-Συζήτηση αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Κεφάλαιο 6: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

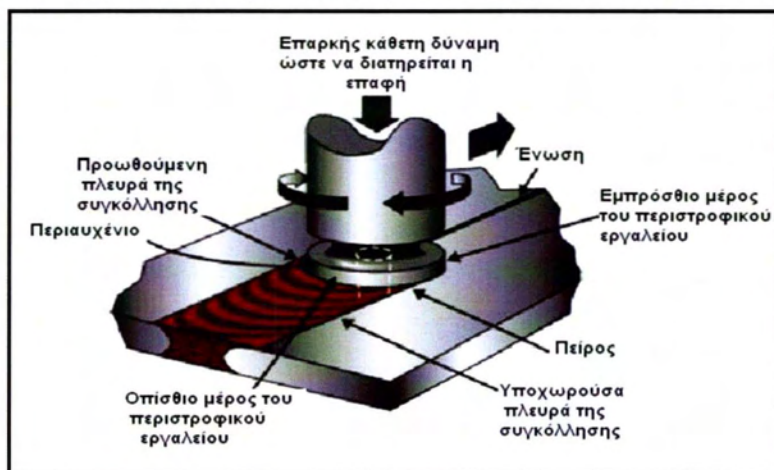


## 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 1.2.1 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση - FSW

Πρόκειται για μια τεχνική συγκόλλησης στερεής κατάστασης, δηλαδή κατά την διάρκεια συγκόλλησης στα υπό συγκόλληση μέταλλα δεν αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από την θερμοκρασία τήξεως τους. Η απουσία τηγμένου μετάλλου συνοδεύεται με την απουσία των συνηθισμένων σφαλμάτων των συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης, όπως το πορώδες και η θερμή ρηγμάτωση. Με την μέθοδο αυτή μπορούν να συγκολληθούν πολλών ειδών μέταλλα, όπως Al, Pb, χάλυβας, Ti, Zn, Cu. Πολλά κράματα τα οποία θεωρούνται δύσκολο να συγκολληθούν με τις συμβατικές μεθόδους τήξης, μπορούν να συγκολληθούν με την χρήση της μεθόδου FSW.

Ένα μη αναλώσιμο εργαλείο εισέρχεται περιστρεφόμενο στην επαφή των ακμών των δυο τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν. Το εργαλείο διαθέτει μια ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή (πείρος) η οποία είναι προέκταση του περιαιχηνίου. Κύρια λειτουργία του πείρου είναι η ανάδευση του υλικού ενώ του περιαιχηνίου η παροχή



**Εικόνα 1.1** Περιγραφή διαδικασίας συγκόλλησης τριβής με ανάδευση.[2]

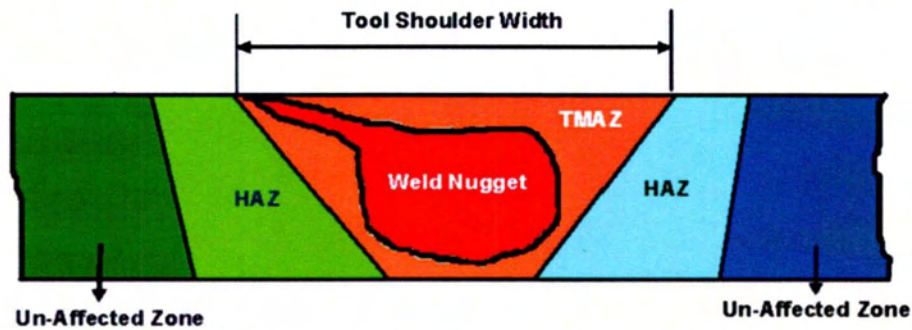
μέσω τριβής της απαιτούμενης θερμότητας για την πλαστικοποίηση του υλικού. (Εικόνα 1.1). Ταυτόχρονα το περιαιχένιο αποτρέπει και το πλαστικοποιημένο υλικό να αποβληθεί από την συγκόλληση. Μεταξύ του εργαλείου συγκόλλησης και των ελασμάτων προς συγκόλληση αναπτύσσονται δυνάμεις

μεγαλύτερες από το όριο διαρροής σε διάτμηση του υλικού προς συγκόλληση, επιτρέποντας έτσι λόγω της περιστροφής του εργαλείου το υλικό να μεταφέρεται από την προωθούμενη πλευρά (AS) στην υποχωρούσα πλευρά(RS), ενώ το εργαλείο κινείται κατά μήκος της ακμής που εφάπτονται τα δύο ελάσματα δίνοντας μια συνεχή συγκόλληση.

### 1.2.2 Μικροδομή

Παρατηρώντας μεταλλογραφικά μια συγκόλληση FSW μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικές ζώνες . Από το τμήμα του μετάλλου που έχει περάσει ο πείρος της συγκόλλησης βλέπουμε τη ζώνη ανάδευσης. Αριστερά και δεξιά της ζώνης ανάδευσης υπάρχει η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Τέλος εκατέρωθεν της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης υπάρχει η θερμικά επηρεασμένη ζώνη(Εικόνα 1.2). Πιο αναλυτικά:





**Εικόνα 1.2** Σχεδιάγραμμα ζωνών μικροδομής FSW[3]

### *Ζώνη ανάδευσης (NZ)*

Η ζώνη ανάδευσης (nugget zone, NZ) σχηματίζεται στο κέντρο της συγκόλλησης από όπου έχει διέλθει ο πείρος συγκόλλησης. Έχει λίγο μεγαλύτερο μέγεθος από τον πείρο συγκόλλησης και συνήθως έχει ελλειπτικό σχήμα. Η περιοχή αυτή είναι πλήρως ανακρυσταλλωμένη, αποτελείται από λεπτόκοκκους ισοαξονικούς κόκκους με σύνορα υψηλής γωνίας[2]. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην περιοχή προκαλεί διαλυτοποίηση των φάσεων ισχυροποίησης. Επίσης στον πάνω μέρος της ζώνης ανάδευσης υπάρχει και μια μικρή περιοχή που ονομάζεται ζώνη υπερχειλίσης. Η ύπαρξη αυτής της περιοχής οφείλεται στην επαφή του περιαιχενίου με το υλικό προς συγκόλληση.

### *Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ)*

Στην θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (thermomechanically affected zone, TMAZ) παρατηρείται έντονη παραμόρφωση των κόκκων που σε συνδυασμό με την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην περιοχή δίνουν σαν αποτέλεσμα χαμηλή σκληρότητα εξαιτίας της ανάπτυξης και διεύρυνσης των φάσεων ισχυροποίησης. Επίσης, η πυκνότητα των αταξιών είναι υψηλή.

### *Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ)*

Σε αυτή την ζώνη το υλικό επηρεάζεται μόνο από τον θερμικό κύκλο της συγκόλλησης. Οι θερμοκρασίες σε αυτή την ζώνη κυμαίνονται από 250°C–350 °C. Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η διαλυτοποίηση ή και η διεύρυνση των φάσεων ισχυροποίησης και κατά συνέπεια η σκληρότητα μειώνεται σε σχέση με τη σκληρότητα του βασικού μετάλλου. [4]

### **1.2.3 Περιγραφή εξοπλισμού**

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την διενέργεια συγκολλήσεων FSW αποτελείται από:

- Περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης
- Σύστημα συγκράτησης
- Φρεζομηχανή ή αντίστοιχη συσκευή

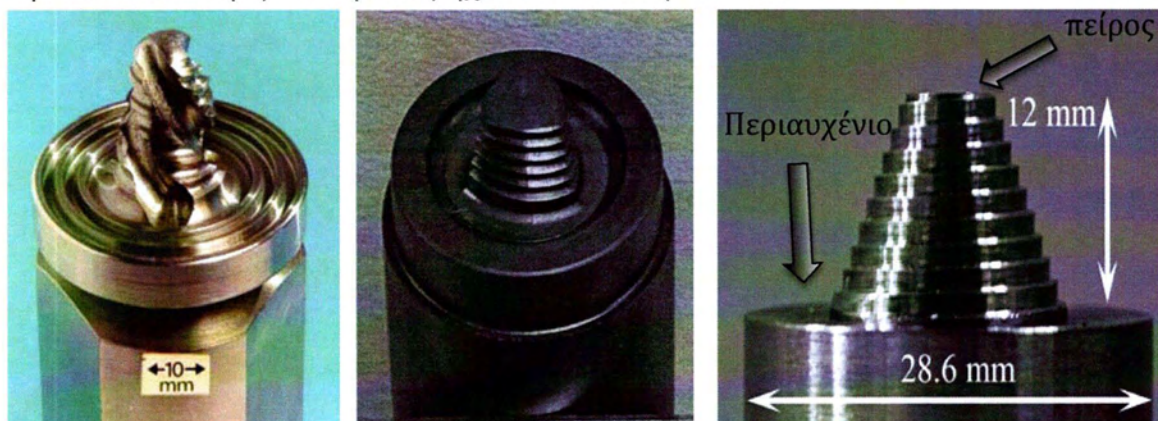


### Περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης

Το εργαλείο συγκόλλησης αποτελείται κυρίως από το περιαιχένιο και τον πείρο συγκόλλησης. Το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται με βάση το υλικό που θέλουμε να συγκολλήσουμε. Το εργαλείο μας πρέπει πάντα να έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το υλικό που θέλουμε να συγκολλήσουμε.

Η αντοχή του στα φορτία που αναπτύσσονται κατά την συγκόλληση πρέπει να διατηρείται και σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι δύσκολο να εκτιμήσουμε ακριβώς τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται αλλά σαν ένδειξη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την θερμοκρασία τήξης του προς συγκόλληση υλικού.

Η διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου και η αντοχή του στον ερπυσμό επίσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Διότι η έκθεση του εργαλείου επαναλαμβανόμενα σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στην μικροδομή του εργαλείου που με τη σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν την μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του.



Εικόνα 1.3 Διάφοροι τύποι περιστρεφόμενων εργαλείων συγκόλλησης[4]

Η αντίσταση στη φθορά παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου, επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα της συγκόλλησης. Για τον ίδιο λόγο πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και ο συντελεστής διαστολής ιδιαίτερα αν ο πείρος και το περιαιχένιο είναι από διαφορετικό υλικά. Το εργαλείο συγκόλλησης μπορεί να αποτελείται από ένα ενιαίο κομμάτι ή από δύο δίνοντας διευκολύνοντας την χρήση διαφορετικών πείρων.

Τέλος η κατεργασιμότητα του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα αν το εργαλείο έχει περίπλοκη μορφή. Οι δυνατές μορφολογίες που μπορεί να έχει ο πείρος ποικίλουν από απλές κωνικές ή με σπείρωμα μέχρι σύνθετες όπως το MX Triflute (Εικ. 1.3).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων συγκόλλησης και ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις είναι οι εργαλειοχάλυβες, τα κράματα με βάση το νικέλιο και το κοβάλτιο, πυρίμαχα μέταλλα (βολφράμιο, μολυβδαίνιο, νιόβιο) και τα καρβιδιούχα κράματα.

Οι εργαλειοχάλυβες είναι το σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται για αυτού του είδους τα εργαλεία καθώς οι περισσότερες εφαρμογές FSW αφορούν κράματα Al τα οποία έχουν χαμηλότερη σκληρότητα και αντοχή σε σύγκριση με το εργαλείο



συγκολλήσεως. Επίσης το μικρό τους κόστους και η ευκολία κατεργασίας τους συντελούν στην επιλογή τους.

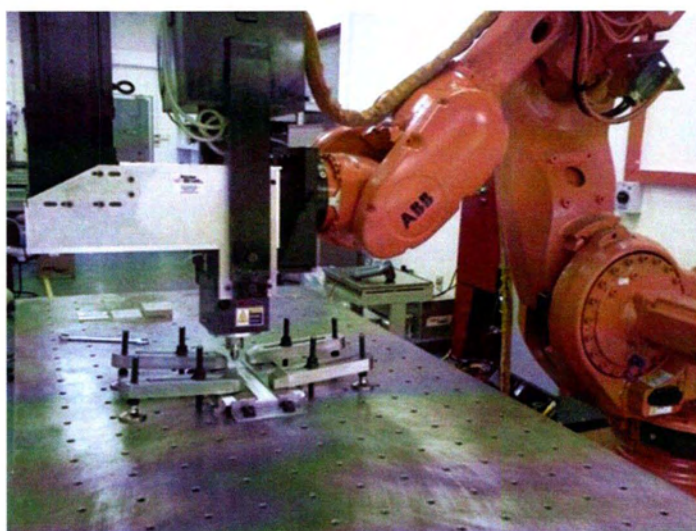
Τα κράματα με βάση το νικέλιο και το κοβάλτιο αναπτύχθηκαν αρχικά για την χρήση τους σε κινητήρες αεροσκαφών. Έχουν υψηλό όριο διαρροής, ολκιμότητα και καλή αντίσταση στον ερπυσμό και την διάβρωση αλλά η κατεργασιμότητα τους είναι δύσκολη. Χρησιμοποιούνται επίσης για την συγκόλληση κραμάτων Al.

### **Σύστημα συγκράτησης**

Τα συστήματα συγκράτησης διαφέρουν ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης(μήκος, πλάτος και αριθμός διαστάσεων) . Σε κάθε περίπτωση η συγκράτηση απαιτείται να είναι ισχυρή και να υπάρχει επαρκής στήριξη στο πίσω μέρος του προς συγκόλληση τεμαχίου καθώς αναπτύσσονται μεγάλα θλιπτικά φορτία κατά την διεργασία

### **Μηχανή συγκόλλησης**

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μηχανής που χρησιμοποιούνται για FSW, είτε για συγκεκριμένη εφαρμογή είτε για ευρύτερη χρήση. Αρκετά συνήθης είναι η χρήση φρεζομηχανών με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στο σύστημα συγκράτησης και με την αντικατάσταση του κοπτικού εργαλείου με το περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης (Είκ. 1.4).



**Εικόνα 1.4** Μηχανή FSW και σύστημα συγκράτησης [5]

#### 1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Παράγει συγκολλήσεις με:

- υψηλότερη αντοχή από αυτές των συμβατικών συγκολλήσεων τήξεως, ειδικότερα για τα μέταλλα Al, χάλυβα, Ni, Cu, Mg και τα κράματα τιτανίου.
- Καλύτερη αντοχή σε κόπωση
- Μικρότερες παραμορφώσεις
- Χαμηλότερες παραμένουσες τάσεις
- Μικρότερη ευαισθησία στη διάβρωση

Επίσης:

- Καθιστά δυνατή την συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων μεταξύ τους
- Είναι μια διαδικασία στερεάς κατάστασης, άρα τα συνήθη προβλήματα των συμβατικών μεθόδων συγκόλλησης απουσιάζουν. Όπως το πορώδες και η θερμή ρηγμάτωση.
- Δεν υπάρχει η ανάγκη χρήσης προστατευτικού αερίου και πρόσθετου συγκολλητικού υλικού
- Είναι μια αυτοματοποιημένη μέθοδος, δεν απαιτεί έμπειρους τεχνίτες.

Μειονεκτήματα

- Κατά την έξοδο του εργαλείου συγκόλλησης η οπή από τον πείρο συγκόλλησης παραμένει. Αν και υπάρχουν εργαλεία που επιτρέπουν την σταδιακή υποχώρηση του πείρου μέσα στο περιαυχένιο για την εξάλειψη του σφάλματος δεν είναι πάντα εφικτή η χρήση τους.
- Χρειάζεται να εφαρμοστούν μεγάλες δυνάμεις για την στερέωση των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Δημιουργία αποβλίττου (flash) στην υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης (RS)



## 1.3 Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου.

Μια σειρά ιδιαίτερων χαρακτηριστικών καθιστά το αλουμίνιο και τα κράματα του ευρέως γνωστά για τις δυνατότητες τους και τις εφαρμογές τους. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους είναι το χαμηλό τους βάρος, σχεδόν τρεις φορές μικρότερο από αυτό των χαλύβων, ενώ μερικά κράματα έχουν και υψηλότερη αντοχή. Τα περισσότερα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντίσταση στη διάβρωση. Επίσης λόγω της χαμηλής σκληρότητας που έχουν μπορούμε εύκολα να τα κατεργαστούμε και να τα διαμορφώσουμε.

### 1.3.1 Οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το καθαρό αλουμίνιο δεν είναι αρκετά ισχυρό (35 MPa όριο διαρροής) για να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε σαν δομικό υλικό. Όμως μετά από κραμάτωση, ψυχρή έλαση ή θερμική κατεργασία η αντοχή του μπορεί να αυξηθεί αρκετές φορές. Τα συνήθη κραματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι: Mn, Si, Cu, Mg ή Zn. Ενδεικτικό της βελτίωσης στην αντοχή σε εφελκυσμό από την προσθήκη κραματικών στοιχείων και της θερμικής κατεργασίας είναι το όριο διαρροής του κράματος 7075-T651 που φτάνει τα 503 MPa .

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των κραμάτων αλουμινίου είναι η διατήρηση της ολκιμότητας τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης εμφανίζει καλή αντίσταση στην διάβρωση λόγω της ύπαρξης ενός λεπτού στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του, το οποίο αναπτύσσεται σε ελεγχόμενο πάχος με κατεργασία ανοδίωσης. Επειδή η διαδικασία αυτή γίνεται σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες, αυτό το στρώμα οξειδίου παρουσιάζει συνεκτικότητα και υψηλή σκληρότητα ενισχύοντας έτσι την αντιδιαβρωτική του ιδιότητα. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε θαλάσσιες κατασκευές, όπως πλατφόρμες και πλοία.

Το γεγονός ότι το Al είναι μη τοξικό, μη απορροφητικό και δεν θρυμματίζεται το έχει κάνει ιδιαίτερα δημοφιλές στην βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων. Οι παραπάνω ιδιότητες συμβάλλουν στην καλύτερη αποθήκευση τροφίμων αποτρέποντας την δημιουργία βακτηρίων και ανεπιθύμητων οσμών. Φύλλα αλουμινίου, κονσέρβες, κουτάκια αναψυκτικών, μαγειρικά σκεύη είναι μερικές από τις εφαρμογές του.

Η χαμηλή πυκνότητα του και η μεγάλη διαθεσιμότητα του το καθιστά ως έναν από τους καλύτερους υποψήφιους για την χρήση του στην αυτοκινητοβιομηχανία. Κύλινδροι, κεφαλές κινητήρα, εισαγωγές και εξαγωγές αέρα, έδρανα κύλισης και τροχοί είναι μερικά μόνο εξαρτήματα του αυτοκινήτου που κατασκευάζονται σήμερα από αλουμίνιο. Ελαφρότερα αυτοκίνητα σημαίνει καλύτερες επιδόσεις με μικρότερη κατανάλωση καυσίμου άρα και μικρότερες εκπομπές ρύπων.

Το αλουμίνιο είναι ένα από τα δύο πιο κοινά μέταλλα, που έχουν αρκετά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα για τη χρήση σαν ηλεκτρικός αγωγός. Επειδή το αλουμίνιο έχει λιγότερο από το ένα τρίτο της πυκνότητας του χαλκού, ένας αγωγός αλουμινίου έχει το μισό βάρος από έναν αγωγό χαλκού που παρουσιάζει την ίδια δυνατότητα μεταφοράς φορτίου.



Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι σημαντική σε εφαρμογές ανταλλαγής θερμότητας όπου η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα μέσο σε άλλο λαμβάνει χώρα, είτε θερμαίνοντας είτε ψύχοντας. Κατά συνέπεια εναλλάκτες θερμότητας από αλουμινίου είναι κοινοί στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία πετρελαίου, στα αεροσκάφη και σε άλλες βιομηχανίες.

Η ανακλαστικότητα του φωτός του καθαρού αλουμινίου μπορεί να φτάσει το 95% σε ειδικά προετοιμασμένες επιφάνειες σχεδόν σε όλο το φάσμα ακτινοβολίας. Χρησιμοποιείται για καθρέφτης σε φακούς και τηλεσκόπια. Επίσης το χαρακτηριστικό της ανακλαστικότητας οδηγεί στη χρήση του ως μονωτικό υλικό.

### 1.3.2. Τα κράματα αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, αυτά που ισχυροποιούνται μέσω θερμικής κατεργασίας και αυτά που ισχυροποιούνται μέσω της εργοσκήρυνσης. Πιο συγκεκριμένα ως θερμική κατεργασία εννοούμε την κατεργασία της γήρανσης.

Η ισχυροποίηση για τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα προκύπτει από την καθίζηση. Η καθίζηση μιας δεύτερης φάσεως ή μιας ενδομεταλλικής ένωσης από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους ισχυροποίησης κραμάτων. Το ίζημα της δεύτερης φάσεως, με την μορφή λεπτής διασποράς σωματιδίων, εμποδίζει την ολίσθηση των αταξιών και αυξάνει την αντοχή του κράματος. Η καθίζηση είναι ένας διαχυτικός μετασχηματισμός φάσεων και πραγματοποιείται με πυρήνωση και ανάπτυξη. [6]

Για κράματα που δεν μπορούν να ισχυροποιηθούν με θερμική κατεργασία χρησιμοποιείται η διεργασία της εργοσκήρυνσης. Κατά την διεργασία αυτή τα μέταλλα παραμορφώνονται πλαστικά αποθηκεύοντας ενέργεια παραμόρφωσης. Η ενέργεια αυτή οφείλεται κυρίως στην αύξηση των οπών και των αταξιών στη δομή του μετάλλου (ψυχρό έργο). [7]

Για την κατηγοριοποίηση των κραμάτων ακολουθείται το σύστημα που προτάθηκε από την Aluminum Association USA, ένα τετραψήφιο σύστημα που αποτελείται μόνο από αριθμούς. Από τον κωδικό κάθε κράματος πέραν του πρώτου ψηφίου, που δίνει την πληροφορία για το κύριο κραματικό στοιχείο, δεν παρέχονται επιπλέον πληροφορίες για τη σύσταση του κράματος. Συνοπτικά οι σειρές κραμάτων και τα κύρια κραματικά στοιχεία τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1.1** Οι σειρές των κραμάτων αλουμινίου και τα κύρια κραματικά στοιχεία τους.

Σειρά	Κύριο κραματικό στοιχείο	Μέθοδος ισχυροποίησης
1xxx	Εμπορικά καθαρό αλουμίνιο Al>99.00%	Έργοσκληρυνόμενο
2xxx	Al-Cu-Mg	Θερμοσκληρυνόμενο
3xxx	Al-Mn	Έργοσκληρυνόμενο
4xxx	Al-Si	Έργοσκληρυνόμενο
5xxx	Al-Mg	Έργοσκληρυνόμενο
6xxx	Al-Mg-Si	Θερμοσκληρυνόμενο
7xxx	Al-Zn	Θερμοσκληρυνόμενο
8xxx	Al-Sn και άλλα κραματικά στοιχεία	

Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο μόνο για την σειρά 1xxx δηλώνουν την καθαρότητα του κράματος. Δηλαδή για παράδειγμα το κράμα 1145 έχει περιεκτικότητα σε αλουμίνιο 99.45%. Μετά τον τετραψήφιο αριθμό υπάρχει συμβολισμός για την κατεργασία που υπέστησαν μετά την παραγωγή τους. Τα βασικότερα σύμβολα είναι:

- F: Το κράμα παρέμεινε ως είχε μετά την παραγωγή.
- O: Ανοπτημένο, έχει υποστεί ανακρυστάλλωση.
- H: Έχει υποστεί ψυχρή έλαση με αύξηση της αντοχής του, μετά την οποία μπορεί να ακολουθήσει θερμική κατεργασία για ανόπτηση. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την θερμική κατεργασία:
  - H1: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, χωρίς να έχει ακολουθήσει θερμική κατεργασία
  - H2: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, έχει ακολουθήσει μερική ανόπτηση
  - H3: Εν ψυχρώ κατεργασμένο, έχει ακολουθήσει ανόπτηση για την σταθεροποίηση της αντοχής.

Το δεύτερο ψηφίο δείχνει το επίπεδο αντοχής που επιτυγχάνεται για το κράμα:

- 0: Ανοπτημένο
- 1: 1/8 Σκλήρυνση
- 2: 1/4 Σκλήρυνση
- 3: 3/8 Σκλήρυνση
- 4: 1/2 Σκλήρυνση
- 5: 5/8 Σκλήρυνση
- 6: 3/7 Σκλήρυνση
- 7: 7/8 Σκλήρυνση
- 8: Πλήρης σκλήρυνση
- 9: Εξαιρετικά σκληρό
- W: Θερμικά κατεργασμένο με στερεό διάλυμα παρεμβολής



• T: Θερμικά κατεργασμένο κράμα. Το T ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την θερμική κατεργασία:

- 3: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ.
- 4: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στην συνέχεια φυσική γήρανση.
- 5: Τεχνητή γήρανση
- 6: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής και στη συνέχεια τεχνητή γήρανση.
- 8: Θερμική κατεργασία με στερεό διάλυμα παρεμβολής, στη συνέχεια τεχνητή γήρανση και τέλος διαμόρφωση εν ψυχρώ.
- 9: Τεχνητή γήρανση και στη συνέχεια διαμόρφωση εν ψυχρώ.

### 1.3.3 Η σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx

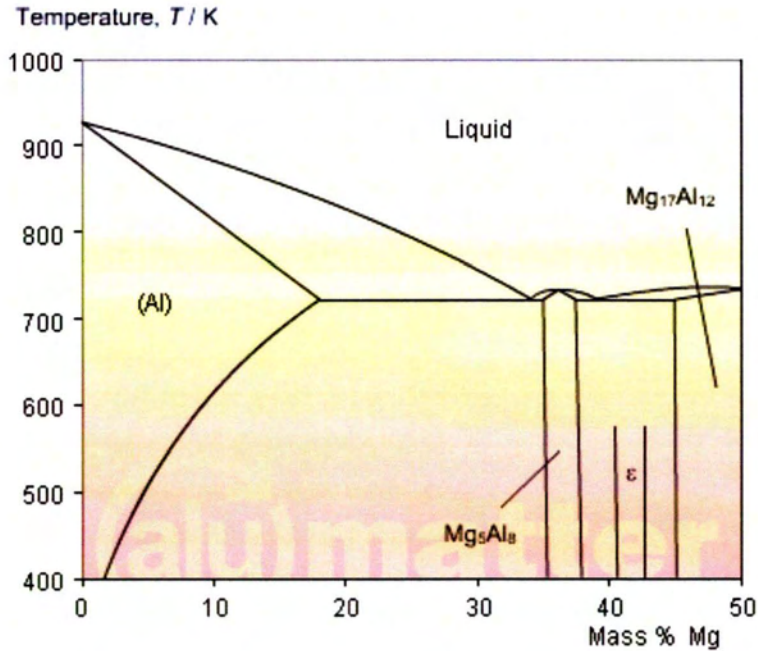
Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx ανήκουν στην κατηγορία των θερμικά μη κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου. Το κύριο κραματικό στοιχείο της σειράς είναι το Mg ενώ προστίθενται και άλλα κραματικά στοιχεία σε μικρό ποσοστό όπως το Li, Zn και Si. Τα κράματα της σειράς 5xxx παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με καλή συγκολλησιμότητα και αντίσταση στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις μεταφορές, σε δοχεία πίεσης και σε θαλάσσιες κατασκευές.

Η παρουσία του Mg σαν κύριο κραματικό στοιχείο οδηγεί στην δημιουργία στερεού διαλύματος παρεμβολής. Στα διαλύματα αυτά το μαγνήσιο καταλαμβάνει θέσεις παρεμβολής στο κρυσταλλικό πλέγμα του αλουμινίου [8]. Το μαγνήσιο παρουσιάζει καλή διαλυτότητα στο αλουμίνιο, το εύρος της περιεκτικότητας του στα κράματα 5xxx συνήθως κυμαίνεται από 0.8% έως λίγο πάνω από το 5%. Στα κράματα της σειράς 5xxx προστίθενται χρώμιο, μαγγάνιο, σίδηρος και ζirkόνιο για την αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, την αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό και της αντοχής στη διάβρωση. Τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία που περιέχονται στη σειρά 5xxx υπάρχουν στον Πίν. 1.2. Επίσης στο Σχήμα 1.1 υπάρχει το σχεδιάγραμμα των φάσεων αλουμινίου-μαγνησίου.

**Πίνακας 1.2.** Τα όρια περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων στα κράματα της σειράς 5xxx.

Στοιχείο	Περιεκτικότητες	Στοιχείο	Περιεκτικότητα
Mg	0.5-13 %	Zn	max 3 %
B	max 0.05 %	Li	max 3 %
Si	max 2 %	Cr	max 0.5 %
Ni	max 0.5 %	Zr	max 0.5 %
Fe	max 0.8 %	Ti	max 0.2 %
Be	max 0.01 %	Mn	max 2 %
Cu	max 0.2 %	-	-

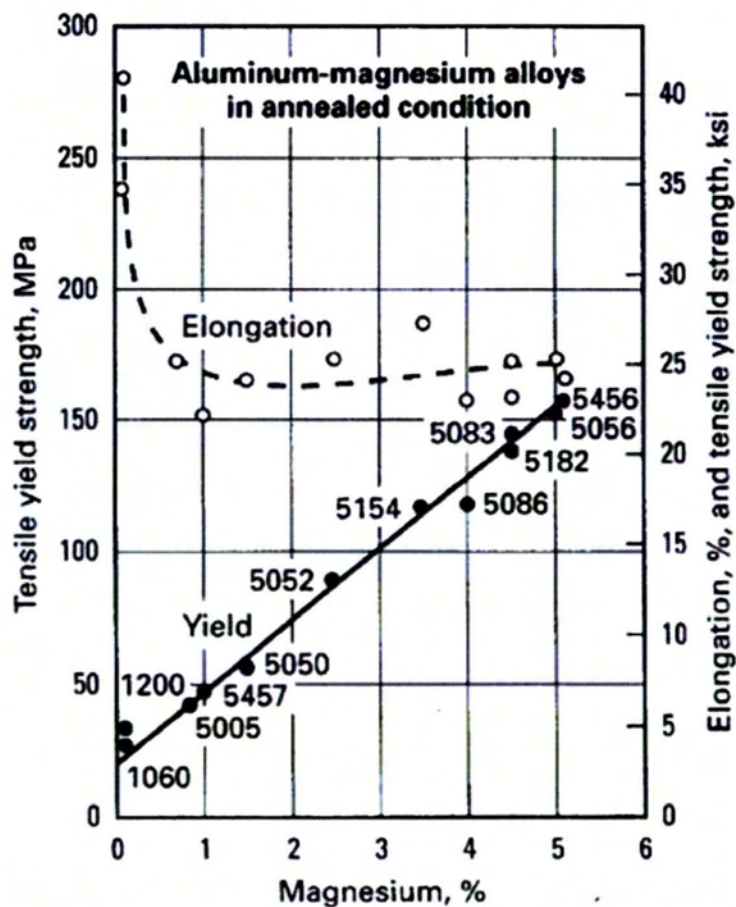




**Σχήμα 1.1** Το διάγραμμα φάσεων αλουμινίου –μαγνησίου [10]

Τα κραματικά στοιχεία δημιουργούν σύνθετα σωματίδια (ενδομεταλλικές ενώσεις), αδιάλυτα στο κράμα, τα οποία κατακρημνίζονται μέσα στο βασικό μέταλλο. Η προσθήκη μαγνησίου προσφέρει σημαντική βελτίωση της αντοχής και της ιδιότητας της εργοσκληρυνσης. Σε συνδυασμό με το πυρίτιο σχηματίζει τη φάση Mg<sub>2</sub>Si, το οποίο είναι αδιάλυτο και αυξάνει την αντοχή. Παρουσία σιδήρου, μαγγάνιου και χρώμιου σχηματίζονται σωματίδια όπως το (FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub>, τα οποία βελτιώνουν την ολκιμότητα του υλικού. Πιο συγκεκριμένα η προσθήκη μαγγάνιου βελτιώνει και το όριο διαρροής και την αντίσταση του σε ολιγοκυκλική κόπωση. [9]

Το μαγνήσιο αποτελεί τον κύριο παράγοντα που καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 5xxx ενώ τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία συνεισφέρουν. Στο Σχήμα 1.2 δίνεται η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε μαγνήσιο και των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς 5xxx.



**Σχήμα 1.2** Η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε Μαγνήσιο (μέχρι 5% κ.β.) και μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς 5xxx.[9]

### 1.3.4 Το κράμα αλουμινίου 5083

Το κράμα αλουμινίου 5083 (*USA*: AA 5083, *EUROPE*: EN AW-A 5083, *ISO* Al Mg4.5Mn0.7) παρουσιάζει πολύ καλή συγκολλησιμότητα και αντοχή στη κόπωση. Επιπρόσθετα παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση από θαλασσινό νερό. Έχει πολύ καλή αντοχή σε υδατικά διαλύματα με pH από 4 έως 9. Η αντοχή στη διάβρωση οφείλεται στο προστατευτικό φιλμ οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του. Επίσης έχει, όπως όλα τα κράματα αλουμινίου, χαμηλή πυκνότητα και άριστη θερμική αγωγιμότητα. Η σύσταση του κράματος φαίνεται στον Πίν. 1.3.

**Πίνακας 1.3.** Η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083.

Στοιχείο	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Cu
Περιεκτικότητα % κ.β.	4.0-4.9	0.40-1.0	0.05-0.25	0.4-0.7	0.40	0.10

**Πίνακας 1.4** Οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος Al-5083 σε διαφορετικές εργοσκληρύνσεις [9]

	Όριο θραύσης $\sigma_{UTS}$ (MPa)	Όριο διαρροής $\sigma_y$ (MPa)	Επιμήκυνση %
5083-0	290	145	22
5083-H112	303	193	16
5083-H116 ή H321	317	228	16
5083-H323,H32	324	248	10
5083-H343	345	283	9

Το κράμα αλουμινίου 5083 μπορεί να διαμορφωθεί εν ψυχρώ, ενώ ταυτόχρονα υπόκειται σε εργοσκλήρυνση ώστε να αυξηθεί η αντοχή του. Δεν μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία, επομένως δεν ενδείκνυται για χρήση σε περιβάλλον με θερμοκρασία άνω των 65°C. Στους Πίν. 1.4, 1.5 και 1.6 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες και οι φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083.

**Πίνακας 1.5.** Τυπικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083-0 σε διάφορες θερμοκρασίες [9].

Θερμοκρασία °C	Όριο θραύσης $\sigma_{UTS}$ (MPa)	Όριο διαρροής $\sigma_y$ (MPa)	Επιμήκυνση $\epsilon_f$ (%)
<i>Ελατό πλακίδιο, Θερμική κατεργασία 0, Διαμήκης μέτρηση στη διεύθυνση έλασης</i>			
-195	407	165	36
-80	295	145	30
0	290	145	27
24	290	145	25
100	275	145	36
150	215	130	50
205	152	117	60
260	117	75	80
315	75	52	110
370	40	29	130



**Πίνακας 1.6** Τυπικές φυσικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 5083-0 [9].

<b>Πυκνότητα</b>	2.65×10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>
<b>Περιοχή Τήξης</b>	590°C-638°C
<b>Μέτρο ελαστικότητας</b>	71 GPa
<b>Ηλεκτρική αντίσταση</b>	0.06 Ω·mm <sup>2</sup> /m
<b>Θερμική αγωγιμότητα</b>	117 W/m·C
<b>Ειδική ηλεκτρική αντίσταση</b>	6.1 Ωm×10 <sup>-8</sup>

### 1.3.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση FSW

Ο Wayne Thomas το 1991 συνέλαβε την ιδέα της χρήσης ενός περιστρεφόμενου εργαλείου, κατασκευασμένο από σκληρότερο υλικό από το προς συγκόλληση υλικό, σαν ένα μηχανισμό πλαστικοποίησης και μεταφοράς υλικού πετυχαίνοντας συγκόλληση. Αυτή η ιδέα αξιοποιήθηκε βιομηχανικά και σηματοδότησε την εξέλιξη της συγκόλλησης FSW που ξέρουμε σήμερα.

Το ενδιαφέρον της βιομηχανίας όπως ήταν αναμενόμενο ήταν μεγάλο γι'αυτό και παρουσιάστηκε η ανάγκη προτύπων για τις παραμέτρους των συγκολλήσεων.

Ενδεικτικό του ενδιαφέροντος είναι η υψηλή χρηματοδότηση που έχει προσελκύσει η μέθοδος από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, όπως για παράδειγμα αναφέρεται στον Πίνακα 1.7.

**Πίνακας 1.7** - Ενδεικτικές χρηματοδοτήσεις για FSW [10]

<b>Acronym</b>	<b>Title and WWW addresses of the proposals</b>	<b>Value [Euro]</b>
EuroStir <sup>®</sup>	'European Industrialisation of Friction Stir Welding' www.eurostir.co.uk and <a href="http://www3.eureka.be/Home/projectdb/PrjFormFrame.asp?pr_id=2430">www3.eureka.be/Home/projectdb/PrjFormFrame.asp?pr_id=2430</a> (needs 30sec)	6.8M
QualiStir <sup>™</sup>	'Development of Novel Non Destructive Testing Techniques and Integrated In-line Process Monitoring for Robotic and Flexible Friction Stir Welding Systems'	2M
AMTT User 27	Characterisation of friction stir welded and laser welded Aluminium Joints <a href="http://www.arcs.ac.at/0xc1aa8791_0x000bf90b">www.arcs.ac.at/0xc1aa8791_0x000bf90b</a>	
WAFS	'Welding of airframes by friction stir' Enter search term 'WAFS' at <a href="http://dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html">dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html</a>	5.1M
JOIN-DMC	'Joining dissimilar materials and composites by friction stir welding' Enter search term 'JOIN-DMC' at <a href="http://dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html">dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html</a>	2.0M
TANGO	'Technology application for the near term business goals of the aerospace industry'	88.0M
MAGJOIN	'New joining techniques for light magnesium components' Enter search term 'MAGJOIN' at <a href="http://dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html">dbs.cordis.lu/EN_PROJL_search.html</a>	3.0M



Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάστηκε από την αεροδιαστημική βιομηχανία, διότι η συγκόλληση θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις ηλώσεις σε κράματα αλουμινίου μειώνοντας το βάρος των αεροσκαφών. Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος της Αμερικής έκδωσε το πρώτο πρότυπο της διαδικασίας συγκόλλησης FSW το 2002. Ακολούθησε το 2005 η Αμερικάνικη Εταιρεία Συγκολλήσεων εκδίδοντας προδιαγραφές συγκόλλησης FSW αλουμινίου για αεροδιαστημικές εφαρμογές [11].

Για να μπορέσει να εφαρμοστεί ευρέως από όλους τους τομείς της βιομηχανίας απαιτείται η ύπαρξη ενός διεθνούς προτύπου (ISO). Η προσπάθεια δημιουργίας του ξεκίνησε το 2003 και ολοκληρώθηκε το 2011. Η έλλειψη προδιαγραφών για συγκολλήσεις FSW ώθησε την επιστημονική κοινότητα στη διεξαγωγή ερευνών για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων συγκόλλησης.

Οι ερευνητικές προσπάθειες που συνεχίζονται μέχρι και σήμερα ευρίσκονται στην περιοχή της μοντελοποίησης, αξιολόγησης των μηχανικών ιδιοτήτων των συγκολλήσεων και εφαρμογής της μεθόδου σε νέα υλικά. Ενδεικτικά αναφέρονται πειράματα για τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών συγκόλλησης σε Al 5083-O με εργαλείο συγκόλλησης με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά: 20mm διάμετρος περιαιχηνίου, με 4.5mm και 5.0mm μήκος και διάμετρος πείρου αντίστοιχα. Διεξήχθησαν συγκολλήσεις σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης και τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Κάθε συγκόλληση αξιολογήθηκε σε εφελκυσμό και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης: ταχύτητα πρόωσης 124 mm/min και ταχύτητα περιστροφής 800rpm [12]. Μια παρόμοια μελέτη [1] για το κράμα Al 5083-H111 προτείνει βέλτιστες παραμέτρους συγκόλλησης: 75 mm/min 475 r/min και 85 mm/min 475 r/min αντίστοιχα.

Πολλές μελέτες έχουν δημοσιευτεί και για την αντόχη των συγκολλήσεων FSW Al 5083 σε κόπωση. Για παράδειγμα η εργασία των Zhou και Yang [13] που αποδεικνύει ότι οι συγκολλήσεις FSW έχουν 9-12 φορές μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση συγκρινόμενες με συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο MIG. Επίσης από μια άλλη μελέτη [14] φαίνεται ότι οι χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης επηρεάζουν ευνοϊκά την αντοχή των συγκολλήσεων σε κόπωση, επειδή με τις χαμηλές ταχύτητες πρόωσης αυξάνουμε την επίδραση του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης στην μικροδομή της και πετυχαίνουμε μηχανικά καλύτερες συγκολλήσεις διατηρώντας χωρίς σφάλματα την δομή τους.

Μια άλλη ιδιότητα που μελετήθηκε είναι η ολκιμότητα και η διαμορφωσιμότητα συγκολλήσεων FSW Al 5083-O. Συσχετίστηκε η μικροδομή που προκύπτει μετά με τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης. Βρέθηκε ότι το μέγεθος των κόκκων στην ζώνη ανάδευσης μειώθηκε με την μείωση της ροής θερμότητας κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Η ολκιμότητα αυξήθηκε με την μείωση της ροής θερμότητας, ενώ υπήρχαν ενδείξεις ότι η διαμορφωσιμότητα αυξήθηκε από την εκλέπτυνση των κόκκων στη ζώνη ανάδευσης.[15]

Το εργαλείο συγκόλλησης και η γεωμετρία του παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα συγκόλλησης. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτό και η επίδραση της γεωμετρίας του αποτελούν επίσης αντικείμενο έρευνας. Για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (600rpm) το σχήμα του εργαλείου δεν επηρεάζει σημαντικά την μικροδομή και της μηχανικές ιδιότητες του υλικού [16]. Επιπλέον μελετώντας τις δυνάμεις, την ροπή και τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο

εργαλείο συγκόλλησης προκύπτει ότι οι ισχυρότερες συγκολλήσεις διεξήχθησαν με τα εργαλεία που περιστρέφονται σε χαμηλές στροφές και στα οποία αναπτύσσονται μεγάλες διαφορές μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης δύναμης. Τα εργαλεία με τον καλύτερο σχεδιασμό μπορούν να πετύχουν συγκολλήσεις με όριο διαρροής που φτάνει μέχρι και 97% του ορίου διαρροής του μητρικού υλικού [17]. Τέλος στον Πίν. 1.8 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων για διάφορα κράματα αλουμινίου.

**Πίνακας 1.8-** Ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων FSW κραμάτων αλουμινίου [10]

<b>Material</b>	<b>0.2% Proof strength MPa</b>	<b>Tensile strength MPa</b>	<b>Welding factor UTS FSW / UTS Parent</b>
5083-O Parent	148	298	N/A
5083-O FSWed	141	298	1.00
5083-H321 Parent	249	336	N/A
5083-H321 FSWed	153	305	0.91
6082-T6 Parent	286	301	N/A
6082-T6 FSWed	160	254	0.83
6082-T6 FSWed and artificially aged	274	300	1.00
6082-T4 Parent	149	260	N/A
6082-T4 FSWed	138	244	0.93
6082-T4 FSWed and artificially aged	285	310	1.19
7108-T79 Parent	295	370	N/A
7108-T79 FSWed	210	320	0.86
7108-T79 FSWed naturally aged	295	370	N/A

### 1.3.6 Βιομηχανικές εφαρμογές μεθόδου FSW

Η FSW αρχικά εφαρμόστηκε στις βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας, όπως στη διαστημική και στην αεροναυπηγική. Τα τελευταία χρόνια βρίσκει εφαρμογή και σε άλλους τομείς όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυπηγική.

Αναλυτικότερα :

- Αεροπορική βιομηχανία : Η μέθοδος προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις ηλώσεις όπως το μειωμένο κόστος παραγωγής και την εξοικονόμηση βάρους. Η FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μηχανολογικών στοιχείων όπως: φτερά, άτρακτοι, κρυογονικές δεξαμενές καυσίμων για διαστημικά οχήματα, δεξαμενές καυσίμων αεροπορίας, στρατιωτικούς πυραύλους , καθώς και για την επισκευή ελαττωματικών συγκολλήσεων MIG.
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιείται από πολλές μεγάλες εταιρίες για την συγκόλληση πλαισίων, πάνελ και τμημάτων της ανάρτησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3, ιεραρχημένα με βάση την χρονολογία εισαγωγής της FSW στην γραμμή παραγωγής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η Honda είναι η πρώτη που υιοθέτησε την μέθοδο για την ένωση του χαλύβδινου και του αλουμινένιου τμήματος του εμπρόσθιου υποπλαίσιου του μοντέλου Accord. Με τον τρόπο αυτό πέτυχε μείωση βάρους 25%, μείωση της κατανάλωσης και αύξηση της άνεσης οδήγησης λόγω της αύξησης της στιβαρότητας της κατασκευής.(Είκ. 1.5)
- Στη ναυπηγική βιομηχανία: σε πάνελ για καταστρώματα, σε ψυκτικές εγκαταστάσεις σε θαλάσσιες μεταφορές κ.α
- Στη σιδηροδρομική βιομηχανία: σε τρένα υψηλής ταχύτητας , σε κοντέινερ, σε δεξαμενές καυσίμου κ.α





### SLOW YOUR ROLLOUT

*So far, friction stir welding has been used only in specialized roles.*

2013 Honda Accord (front subframe)

2010 Toyota Prius (rear hatch)

2007 Audi R8 (part of space frame)

2006 Mazda MX-5 Miata (trunk and hood)

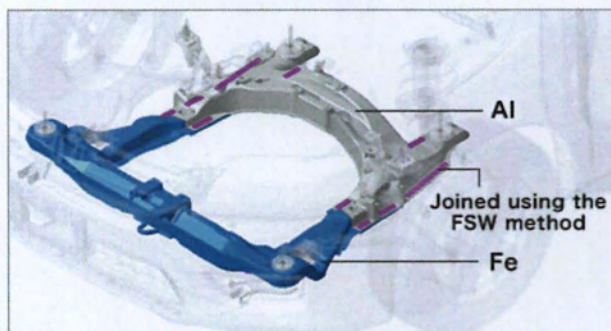
2005 Ford GT (part of space frame)

2004 Mazda RX-8 (rear doors and hood)

2003 Lincoln Town Car L  
(suspension components)

2001 Volvo V70 (rear seat frame)

**Σχήμα 1.3** - Εφαρμογή μεθόδου FSW στην αυτοκινητοβιομηχανία[18]



Weight — **↓ -25%**

Power consumption **↓ -50%**

Rigidity — **↑ +20%**

**Εικόνα 1.5** - Εφαρμογή και πλεονεκτήματα FSW. [19]



## 2. Τροποποίηση φρεζομηχανής για συγκολλήσεις FSW

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, στόχος της εργασίας αυτής ήταν η διενέργεια συγκολλήσεων Al 5083 με τριβή και ανάδευση εντός των εγκαταστάσεων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΘ. Το ενδιαφέρον ανάπτυξης της έρευνας για αυτό το σχετικά καινούργιο είδος συγκόλλησης σε συνδυασμό με την δυσκολία εύρεσης έτοιμων συγκολλημένων δοκιμίων συνετέλεσε στην λήψη αυτής της απόφασης. Όμως το κόστος της αγοράς μιας μηχανής FSW ήταν απαγορευτικό για τον προϋπολογισμό του Εργαστηρίου των Υλικών. Έτσι αποφασίστηκε η προσπάθεια μετατροπής μιας ήδη υπάρχουσας φρεζομηχανής σε μηχανή FSW. Για την επίτευξη του στόχου απαραίτητες ήταν οι παρακάτω τροποποιήσεις:

### 2.1 Σχεδιασμός εργαλείου συγκόλλησης

Για να είναι εφικτός ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκόλλησης πρώτα είναι απαραίτητη η γνώση των παρακάτω:

- Το υλικό που πρέπει να συγκολληθεί

Ορίζοντας το προς συγκόλληση υλικό μπορεί να επιλεγεί το υλικό κατασκευής του εργαλείου συγκόλλησης λαμβάνοντας υπ'όψιν το κόστος, την διαθεσιμότητα και την κατεργασιμότητα του. Το Al-5083 είναι ένα σχετικά μαλακό υλικό με περιοχή τήξης 590-638 °C γι'αυτό το υλικό κατασκευής του εργαλείου συγκόλλησης που επιλέχθηκε ήταν ο εργαλειοχάλυβας H13 (Πίν. 2.1). Με το πέρας της μηχανουργικής κατεργασίας το εργαλείο υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία ωστενιτοποίησης, βαφής και διπλής επαναφοράς για την αύξηση της σκληρότητας του (53 Rockwell C) και την βελτίωση της διάρκειας ζωής του. Στην κατάσταση αυτή ο χάλυβας διατηρεί την σκληρότητα του και την αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η αντίσταση στη θερμική κόπωση είναι υψηλή.

**Πίνακας 2.1** – Χημική σύσταση εργαλειοχάλυβα AISI H13 [14]

Υλικό	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
H13	0.32-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	1.1-1.75	0.8-1.2

- Το βάθος διείσδυσης

Η διαστασιολόγηση του εργαλείου είναι ανάλογη του επιθυμητού βάθους διείσδυσης. Αποφασίστηκε οι πρώτες προσπάθειες να γίνουν για ελάσματα Al 5083 πάχους 3mm, το μικρό πάχος των οποίων διευκολύνει την διεξαγωγή των συγκολλήσεων καθώς απαιτούνται μικρότερες δυνάμεις από την μηχανή συγκόλλησης.

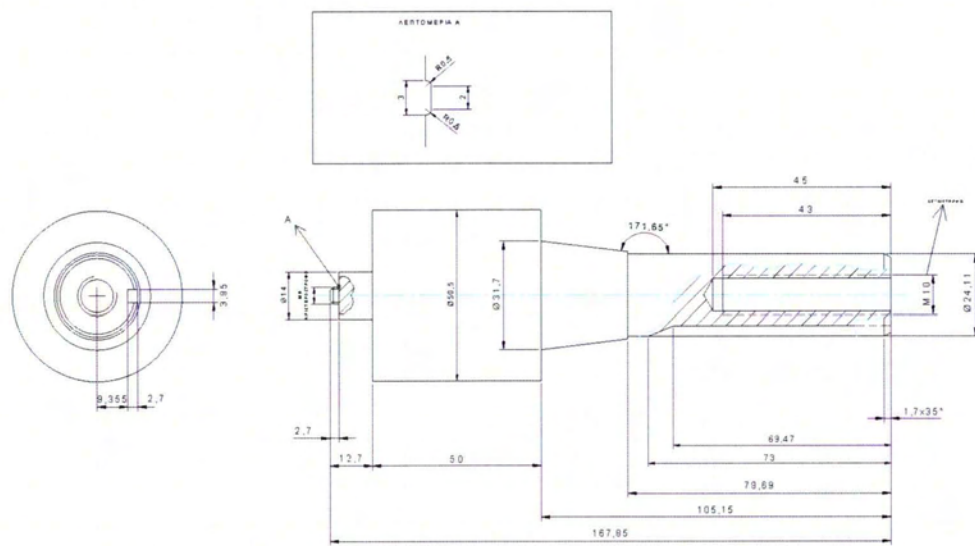
Παίρνοντας ως δεδομένο το βάθος της συγκόλλησης μπορεί να ξεκινήσει η διαστασιολόγηση του εργαλείου συγκόλλησης. Το μήκος του πείρου πρέπει να είναι σχεδόν όσο το επιθυμητό βάθος διείσδυσης συνυπολογίζοντας την κλίση που μπορεί να δοθεί στο εργαλείο και την πιθανή καθίζηση υλικού στην επιφάνεια των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Έτσι προκύπτει το μήκος του πείρου στα 2,7mm.

Η διάμετρος του πείρου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αντέχει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται αλλά και αρκετά μικρή ώστε να επιτρέπει την μεταφορά υλικού χωρίς κενά και σφάλματα. Αφού λοιπόν επιλέγει η διάμετρος πείρου 5mm το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή της διαμέτρου του περιουχενίου. Το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων προτείνει η αναλογία διαμέτρων μεταξύ πείρου και περιουχενίου να κυμαίνεται από 2.5 προς 1 μέχρι 3 προς 1 για πάχη τεμαχίων μέχρι 6mm.

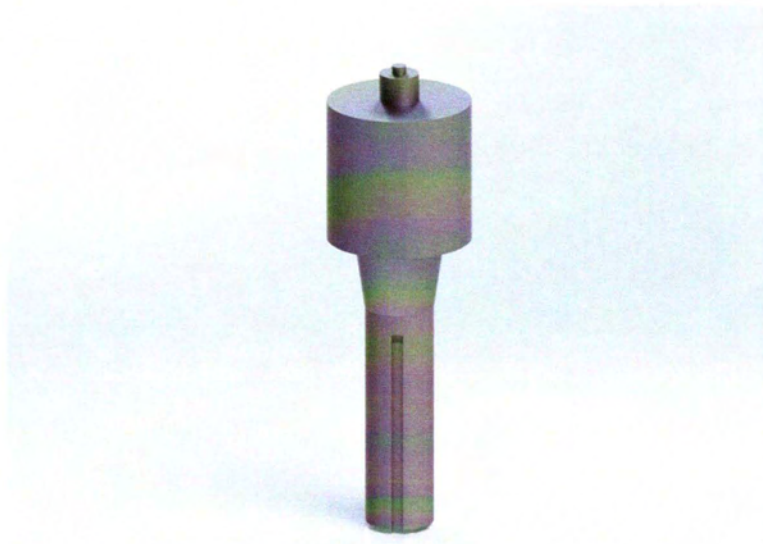
Βασιζόμενοι στην παραπάνω αναλογία η επιλογή της διαμέτρου του περιουχενίου ήταν 14mm. Η διαμόρφωση που επιλέχθηκε για τον πείρο ήταν σπείρωμα M5 αριστερόστροφο και για το περιουχένιο απλή επίπεδη. Ο λόγος που επιλέχθηκε αριστερόστροφο σπείρωμα ενώ το εργαλείο περιστρέφεται δεξιόστροφα είναι επειδή προτιμάται η κάθετη μεταφορά υλικού ώστε να διασφαλιστεί ότι το βάθος διείδυσης θα είναι ίσο με το πάχος του ελάσματος.

Τέλος όσον αφορά την σχεδίαση του εργαλείου συγκόλλησης σημαντική είναι η ολοκλήρωση του τμήματος που εισέρχεται στην φρεζομηχανή για την στερέωση του και την μετάδοση της κίνησης. Επειδή η μηχανή είναι παλαιού τύπου δεν ήταν δυνατό να βρεθούν σχέδια από τα ήδη υπάρχοντα κοπτικά εργαλεία, ακολουθήθηκε η μέθοδος της αντίστροφης σχεδίασης. Για τις μετρήσεις των διαστάσεων αρχικά χρησιμοποιήθηκε παχύμετρο, ενώ για τις κρίσιμες διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε μετρητική μηχανή laser για μεγαλύτερη ακρίβεια (Εικόνα 2.1 & 2.2). Η ακριβής διαστασιολόγηση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην σωστή τοποθέτηση του εργαλείου ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή λειτουργία του εργαλείου. Τέλος ανάμεσα στο τμήμα του εργαλείου που εκτελεί την συγκόλληση και το τμήμα που εισέρχεται στην φρεζομηχανή υπάρχει και ένας κύλινδρος διαμέτρου 50,5mm που χρησιμοποιείται για την απαγωγή θερμότητας από το κάτω τμήμα του εργαλείου. Η διατήρηση του εργαλείου σε όσο το δυνατό χαμηλότερες θερμοκρασίες συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής του και στη διατήρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του.





**Εικόνα 2.1** – Κατασκευαστικό σχέδιο εργαλείου συγκόλλησης



**Εικόνα 2.2** - 3D απεικόνιση του εργαλείου συγκόλλησης

## 2.2 Σχεδιασμός συστήματος συγκράτησης

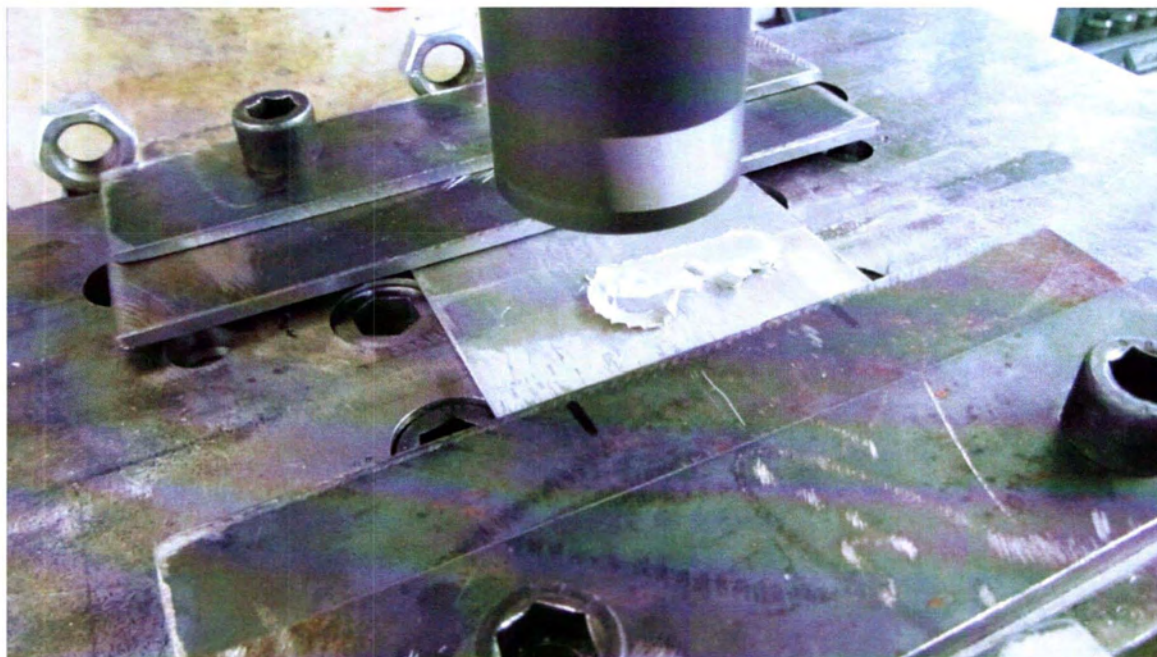
Το σύστημα συγκράτησης απαιτείται να είναι στιβαρό και να αποτρέπει την οποιαδήποτε μετατόπιση των υπό συγκόλληση τεμαχίων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το σύστημα συγκράτησης που παρουσιάζεται στην Είκ. 2.3.



**Εικόνα 2.3** – Αρχικό σύστημα συγκράτησης

Αποτελείται από 4 βραχίονες οι οποίοι ενώνονται με την τράπεζα της φρεζομηχανής μέσω κοχλίας, ενώ εφαρμόζουν πίεση μέσω της σύσφιξης του περικοχλίου που εφάπτεται στο κάθε βραχίονα. Στόχος ήταν η επίτευξη συγκολλήσεων μήκους περίπου 10cm. Για αυτό λοιπόν και οι διαστάσεις της επιφάνειας υποστήριξης είναι 400x230x23mm. Το υλικό κατασκευής του συστήματος ήταν ο χάλυβας St37. Η επιφάνεια υποστήριξης εκτός από την απαραίτητη επιπεδότητα για την διεξαγωγή της συγκόλλησης λειτουργεί και σαν απαγωγός θερμότητας των τεμαχίων συγκόλλησης βοηθώντας έτσι την ροή θερμότητας από το σημείο επαφής του περιουχενίου σε όλο το πλάτος των τεμαχίων. Αργότερα κατά την διεξαγωγή των συγκολλήσεων παρατηρήθηκε ότι αρκετές φορές τα προς συγκόλληση τεμάχια απομακρύνονταν μεταξύ τους, έτσι αποφασίστηκε αλλαγή του συστήματος συγκράτησης με αυτό που παρουσιάζεται στην Εικ. 2.4. Σε αυτό δυο ελάσματα ασκούν πίεση στα τεμάχια συσφίγγοντας τους κοχλίες στην επιφάνειά τους. Ταυτόχρονα κάτω από τα ελάσματα τοποθετήθηκαν λεπτότερα ελάσματα από τα προς συγκόλληση τεμάχια τα οποία έχουν σαν μόνη λειτουργία την αποτροπή της πλευρικής μετατόπισης των τεμαχίων.





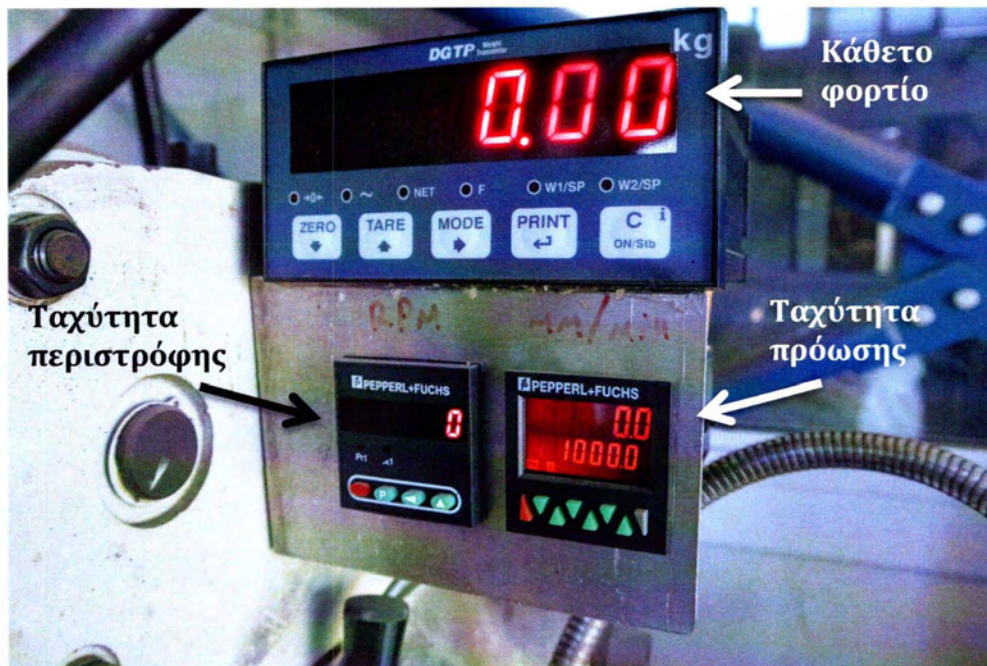
**Εικόνα 2.4-** Τελικό σύστημα συγκράτησης

### **2.3 Εγκατάσταση ηλεκτρονικών ενδείξεων των παραμέτρων συγκόλλησης**

Η δυνατότητα διεξαγωγής επιτυχημένων συγκολλήσεων FSW εξαρτάται από το σχεδιασμό του εργαλείου συγκόλλησης, τις παραμέτρους της συγκόλλησης που επιλέχθηκαν, την ακρίβεια της μηχανής και τέλος το σύστημα συγκράτησης.

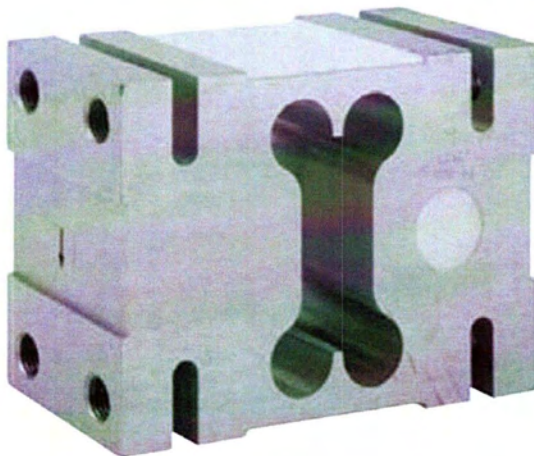
Για την καλύτερη καταγραφή και έλεγχο των παραμέτρων της συγκόλλησης αποφασίστηκε να εγκατασταθούν ηλεκτρονικές ενδείξεις της ταχύτητας πρόωσης της τράπεζας της φρεζομηχανής, της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου και της κάθετης δύναμης που εφαρμόζεται κατά την συγκόλληση (Εικ. 2.5). Ένας ακόμα λόγος που οδήγησε σε αυτή την τροποποίηση ήταν η μεταβολή των παραμέτρων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα ενώ η μηχανή ρυθμιζονταν στις 800rpm πριν την έναρξη της συγκόλλησης ήταν εμφανές ότι κατά την συγκόλληση υπήρχε επιβράδυνση των στροφών, έτσι λοιπόν η παρακολούθηση των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο κρίθηκε απαραίτητη.





**Εικόνα 2.5** – Ηλεκτρονικές ενδείξεις φρεζομηχανής

Η μέτρηση του αριθμού των στροφών γίνεται με μαγνητικό τρόπο χρησιμοποιώντας έναν proximity sensor. Η μέτρηση της ταχύτητας πρόωσης γίνεται με οπτικό τρόπο με την χρήση ενός optical tacho sensor.



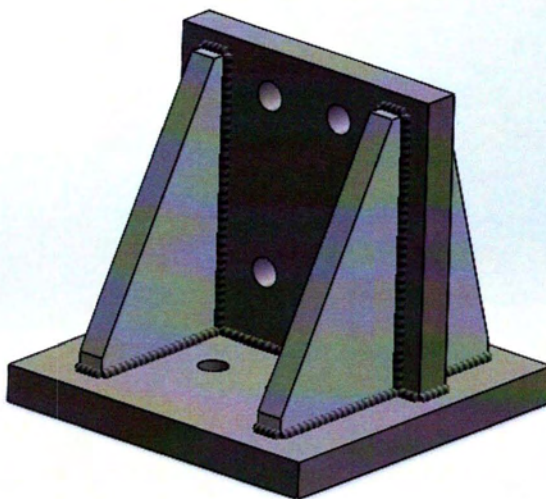
**Εικόνα 2.6** – Δυναμοκυψέλη-Tedea Huntleigh 1320

Για την μέτρηση του κάθετου φορτίου χρησιμοποιήθηκε μια δυναμοκυψέλη τύπου single-point της εταιρείας Tedea-Huntleigh model 1320 (Εικόνα 2.6) και δυναμικότητας μέχρι 2000kg . Η διατήρηση σταθερού κάθετου φορτίου έχει πάρα πολύ σημαντική επίδραση στη ποιότητα της συγκόλλησης σε όλο το μήκος της και στην ομοιογένεια της. Η ένδειξη της κάθετης φόρτισης επιβεβαιώνει την διατήρηση της επαφής του περιαιχενίου με τα τεμάχια συγκόλλησης. Αυξομείωση της δύναμης συνοδεύεται από αυξομείωση του ρυθμού εισαγωγής θερμότητας στην συγκόλληση.

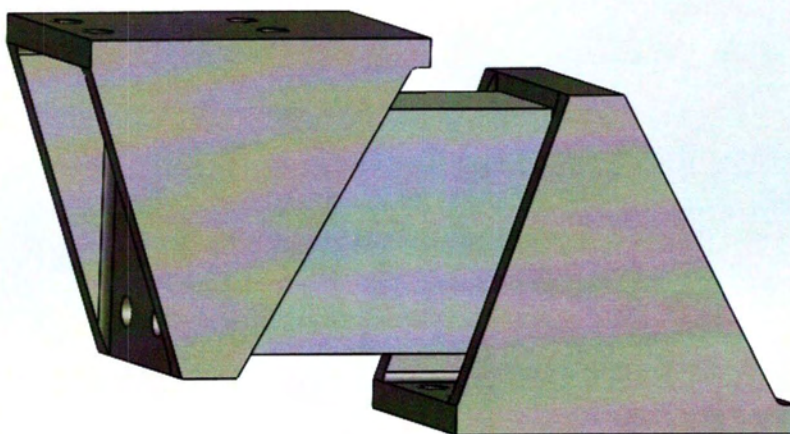
Για την εγκατάσταση της δυναμοκυψέλης απαραίτητη ήταν η τροποποίηση του συστήματος στήριξης. Πλέον η επιφάνεια υποστήριξης δεν συνδέεται απευθείας με την τράπεζα της φρεζομηχανής αλλά μεσολαβεί και μια δυναμοκυψέλη.



Για να επιτευχθεί η συνδεσμολογία σχεδιάστηκαν δυο εξαρτήματα τύπου T με ενισχυμένες νευρώσεις (Είκ. 2.7-2.8) για την αποφυγή λυγισμού κατά την φόρτιση ο οποίος θα μεταφράζονταν σε σφάλμα μέτρησης του κάθετου φορτίου.



**Εικόνα 2.7-** Στήριξη δυναμοκυψέλης



**Εικόνα 2.8 -** Σύστημα συγκράτησης δυναμοκυψέλης

### 3. Πειραματική διαδικασία

Οι πρώτες δοκιμές της τροποποιημένης φρεζομηχανής έγιναν πριν την εγκατάσταση των ηλεκτρονικών ενδείξεων. Αρχικά διεξήχθησαν απλά περάσματα σε φύλλο Al 5083 πάχους 6 mm για να εξακριβωθεί αν το σύστημα συγκόλλησης παρουσιάζει κάποιου είδους ανωμαλία κατά την λειτουργία του. Πραγματοποιήθηκαν 6 περάσματα στο ίδιο φύλλο αλουμινίου (Εικ. 3.1). Στη συνέχεια κόπηκαν δοκίμια από κάθε πέρασμα και εξετάστηκαν μακροσκοπικά και μεταλλογραφικά.

Για κάθε μεταλλογραφικό δοκίμιο έγινε χαρακτηρισμός των διαστάσεων των ζωνών ανάδευσης και της μορφολογίας τους.

**Πίνακας 3.1-** Παράμετροι περασμάτων

Αριθμός συγκόλλησης	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Κλίση εργαλείου (deg)
1	830	11,8	0
2	830	118	0
3	830	22,2	0
4	830	75,4	0
5	1000	75,4	0
6	1200	75,4	0

Μετά την εγκατάσταση των ηλεκτρονικών ενδείξεων έγινε προσπάθεια διεξαγωγής μετωπικής συγκόλλησης με 4 διαφορετικές συνθήκες. Οι δυο από αυτές διέφεραν στην ταχύτητα περιστροφής και οι άλλες δυο στην ταχύτητα πρόωσης για την αξιολόγηση της επίδρασης των συνθηκών συγκόλλησης στις μηχανικές ιδιότητες (Πίν. 3.2). Επίσης δόθηκε κλίση 1° στο εργαλείο στη διεύθυνση της συγκόλλησης.

**Πίνακας 3.2 –** Παράμετροι μετωπικών συγκολλήσεων

Αρ. Συγκ.	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Κάθετο φορτίο (kg)	Κλίση (deg)	Βήμα (mm /rev)
1	800	230	680-700	1	0.29
2	820	104	680-710	1	0.13
3	500	93	680-700	1	0.19
4	1180	104	680-700	1	0.09



## Προετοιμασία μεταλλογραφικών δοκιμίων

Η κοπή των δοκιμίων έγινε με το κοπτικό Unitom-2 της Struers και στη συνέχεια ακολούθησε εγκιβωτισμός σε ρητίνη Acryfix. Τα δοκίμια λειάνθηκαν διαδοχικά στους δίσκους των 120, 180, 220, 300, 500, 800, 1000, 2400 και 4000 Grid και στη συνέχεια στιλβώθηκαν με διαμαντόπαστα 3 μm. Σαν τελικό βήμα της μεταλλογραφικής προετοιμασίας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ηλεκτρολυτικής προσβολής με αντιδραστήριο Barker's. ( 5 mL HBF<sub>4</sub> (48%) σε 200 mL νερού).

## Μακροσκοπικός έλεγχος

Οι επιφάνειες των συγκολλήσεων (top surface) εξετάστηκαν αρχικά στο στερεοσκόπιο για να παρατηρηθούν ιδιαίτερα οι συγκολλήσεις των οποίων τα σφάλματα ήταν εμφανή μέχρι την επιφάνεια των τεμαχίων. Χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο Leica Wilz M3Z σε μεγεθύνσεις 6X-45X.

## Μικροσκοπικός έλεγχος

Η μικροσκοπική αξιολόγηση των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε σε εγκάρσιες τομές. Για την παρατήρηση χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο τύπου Leitz Wild GMBH με την χρήση πολωμένου φωτός.

## Μικροσκληρομετρήσεις

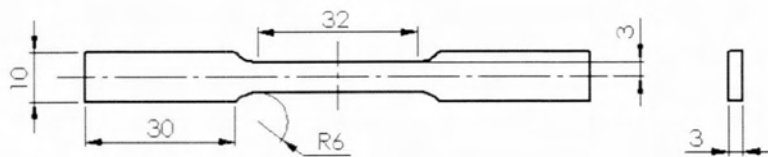
Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έγινε με σκοπό την δημιουργία του προφίλ μικροσκληρότητας των δοκιμίων σε εγκάρσια τομή, από το κέντρο της συγκόλλησης έως το μέταλλο βάσης. Η μικροσκληρομέτρηση έγινε με φορτίο 100 gr (HV<sub>0,1</sub>) και χρόνο μέτρησης 10 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο Wolpert 402 MVD.

## Ραδιογραφίες

Οι 4 μετωπικές συγκολλήσεις εξετάστηκαν με την μέθοδο της ραδιογραφίας για να εξακριβωθεί η ύπαρξη σφαλμάτων στο εσωτερικό των συγκολλήσεων χωρίς την χρήση καταστροφικού ελέγχου.

## Δοκιμές εφελκυσμού

Από μετωπικές συγκολλήσεις κόπηκαν δοκίμια εφελκυσμού κάθετα στην διεύθυνση συγκόλλησης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8M (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 - Σχέδιο δοκιμίου εφελκυσμού

## 4. Αποτελέσματα/Συζήτηση

### 4.1 Απλά Περάσματα ( bead-on-plate)

#### 4.1.1 Μακροσκοπική παρατήρηση

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1 υπάρχει απόβλιττο (flash) σε κάθε πέρασμα. Η ποσότητα του αποβλίττου φαίνεται να μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης, έχοντας έτσι την μεγαλύτερη ποσότητα αποβλίττου στο πρώτο πέρασμα (11,8 mm/min). Η ποσότητα αποβλίττου φαίνεται να μην επηρεάζεται από την περιστροφική ταχύτητα παρατηρώντας τα περάσματα 4,5 και 6 των οποίων οι παράμετροι συγκόλλησης διαφέρουν μόνο στην ταχύτητα περιστροφής. Σημαντικό ρόλο στην δημιουργία αποβλίττου έπαιξε και η κλίση του εργαλείου που στην περίπτωση των περασμάτων ήταν μηδενική. Η μηδενική κλίση δυσχεραίνει την πορεία του εργαλείου συγκόλλησης.

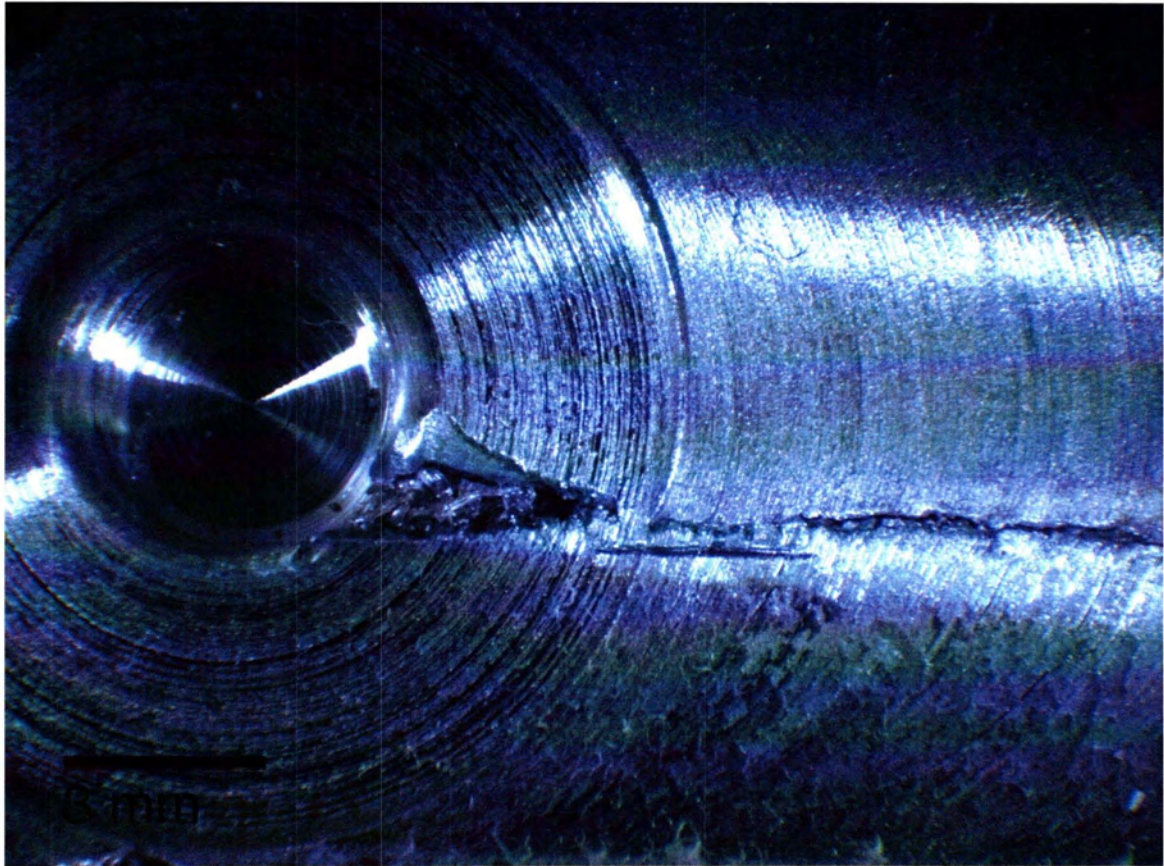
Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία αποβλίττου είναι το μέγεθος του κάθετου φορτίου. Σε αυτή την φάση των πειραμάτων δεν είχαν τοποθετηθεί οι ηλεκτρονικές ενδείξεις στη φρεζομηχανή καθιστώντας έτσι δύσκολη την διατήρηση της επαφής του περιαιχενίου με το πλακίδιο. Όπως φαίνεται και στην Είκ. 4.1 στο πέρασμα 2,3 και 4 σε κάποια σημεία χάθηκε η πλήρης επαφή μεταξύ περιαιχενίου και πλακιδίου, τα σημεία αυτά επισημαίνονται με κόκκινους κύκλους.



**Εικόνα 4.1** – Πρώτα δοκιμαστικά περάσματα με διάφορες συνθήκες συγκόλλησης σημειώνεται η διεύθυνση κίνησης και η φορά περιστροφής του εργαλείου.

Επίσης μόνο το πρώτο πέρασμα δεν έχει επιφανειακό σφάλμα. Στα υπόλοιπα περάσματα παρατηρείται μια ασυνέχεια τύπου «τούνελ» στην προωθούσα πλευρά όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 4.2.





**Εικόνα 4.2** – Φωτογραφία από μακροσκόπιο του τέταρτου περάσματος σε μεγέθυνση X 6.5

#### 4.1.2 Μικροσκοπική παρατήρηση

Οι μικροφωτογραφίες που παρουσιάζονται στις Εικ. 4.1-4.6 προέκυψαν από την συρραφή πολλών φωτογραφιών από τα επιμέρους τμήματα της τομής των περασμάτων. Ο λόγος είναι ότι το μέγεθος όλης της συγκόλλησης είναι αρκετά μεγαλύτερο από το εύρος πεδίου του μικροσκοπίου στη μικρότερη μεγέθυνση. Σε κάθε μεταλλογραφία μετρήθηκε η απόσταση της ζώνης ανάδευσης από την επιφάνεια ( $h$  σε mm), το πλάτος της ζώνης ανάδευσης ( $x$  σε mm) και το πλάτος της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης στην πλευρά υποχώρησης ( $y$  σε mm). Αναλυτικά ανά δοκίμιο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

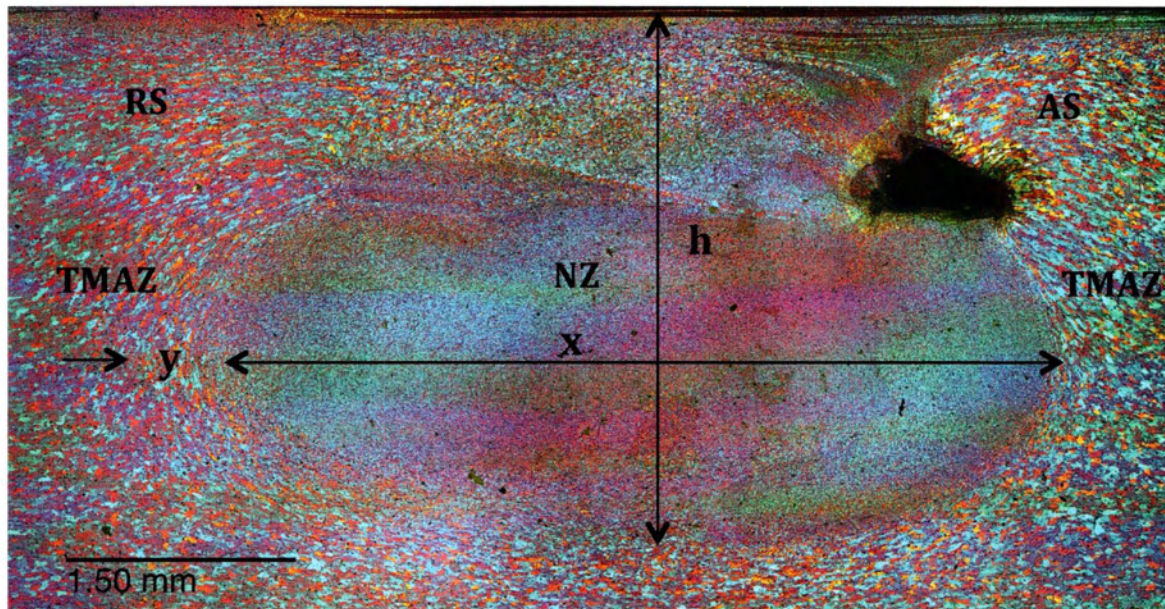
##### **Δοκίμιο 1**

Οι συνθήκες του περάσματος παρουσιάστηκαν στον Πίν. 3.1. Η μικροδομή της συγκόλλησης δίδεται στην Εικ. 4.1.

Διακρίνεται καθαρά η ζώνη ανάδευσης (NZ), η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) και τμήμα βασικού μετάλλου στα αριστερά. Στην Εικ. 4.1 επίσης σημειώνονται η φορά περιστροφής και η διεύθυνση



κίνησης του εργαλείου. Παρατηρείται ότι μεταξύ της ζώνης ανάδευσης και της επιφανείας συγκόλλησης υπάρχει σφάλμα τύπου «τούνελ», το οποίο δημιουργείται από την πλευρά είσοδο του εργαλείου. Το σφάλμα αυτό εντοπίζεται 0.5mm από την επιφάνεια του ελάσματος. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης και του σφάλματος όπως ορίζονται στην Εικ. 4.1 δίδονται στον Πίν. 4.1.

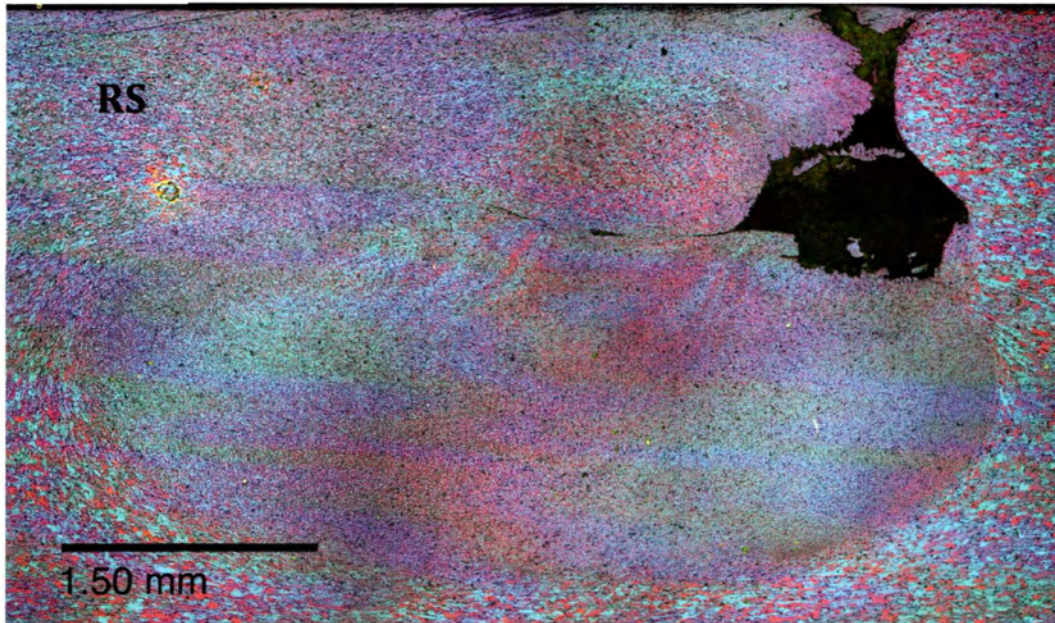


Εικόνα 4.1- Μεταλλογραφία πρώτου περάσματος, 830rpm 11,8 mm/min

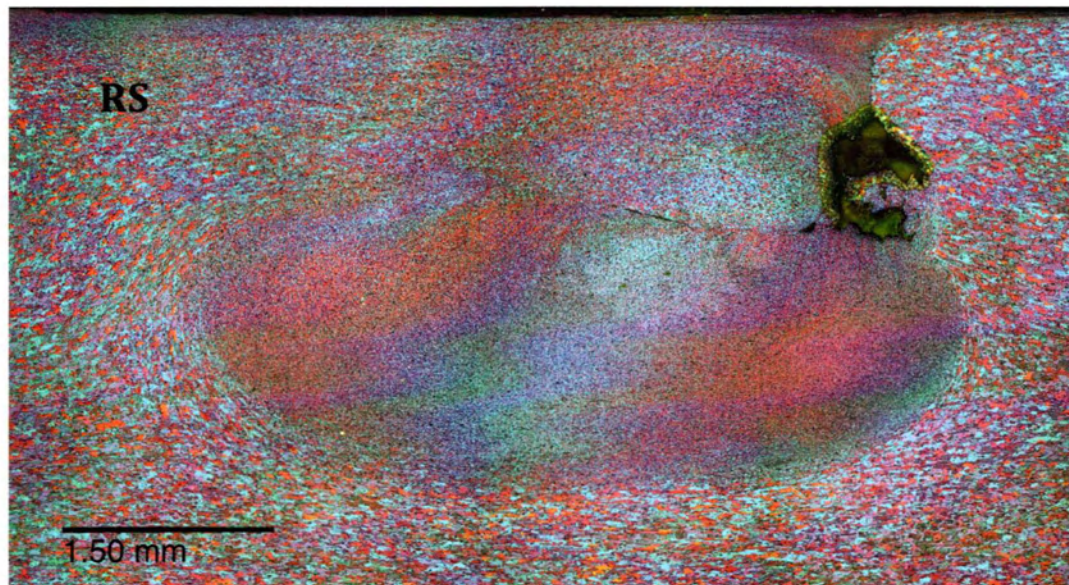
#### Δοκίμια 2-6

Η μικροδομή των δοκιμίων 2-6 παρουσιάζεται στις Εικόνα 4.2-4.6 αντίστοιχα. Η διεύθυνση κίνησης και η φορά του εργαλείου είναι αντίστοιχα με αυτά που σημειώνονται στην Εικ. 4.1. Τα χαρακτηριστικά είναι όμοια με αυτά του δοκιμίου 1, τόσο όσον αφορά τις περιοχές συγκόλλησης που περιγράφηκαν παραπάνω όσο και στην πλευρά εμφάνιση του σφάλματος (AS). Ως προς τις διαστάσεις των περιοχών αυτών οι μετρήσεις συγκεντρωτικά δίδονται στον Πίνακα 4.1. Από την σύγκριση των τιμών φαίνεται καθαρά ότι οι συνθήκες της συγκόλλησης επηρεάζουν άμεσα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό Πίν. 4.1 η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει τις διαστάσεις του σφάλματος. Το μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται στο πρώτο πέρασμα ενώ το μεγαλύτερο στο δεύτερο με ταχύτητες πρόωσης 11,8 mm/min και 118 mm/min αντίστοιχα. Το πλάτος της ζώνης ανάδευσης δεν δείχνει μεγάλη ευαισθησία στην αλλαγή της ταχύτητας περιστοφής εμφανίζοντας μικρή αύξηση του πλάτους στο έκτο πέρασμα με ταχύτητα περιστροφής 1200rpm. Το πλάτος της TMAZ κυμαίνεται από 0,73mm μέχρι 1,68mm.



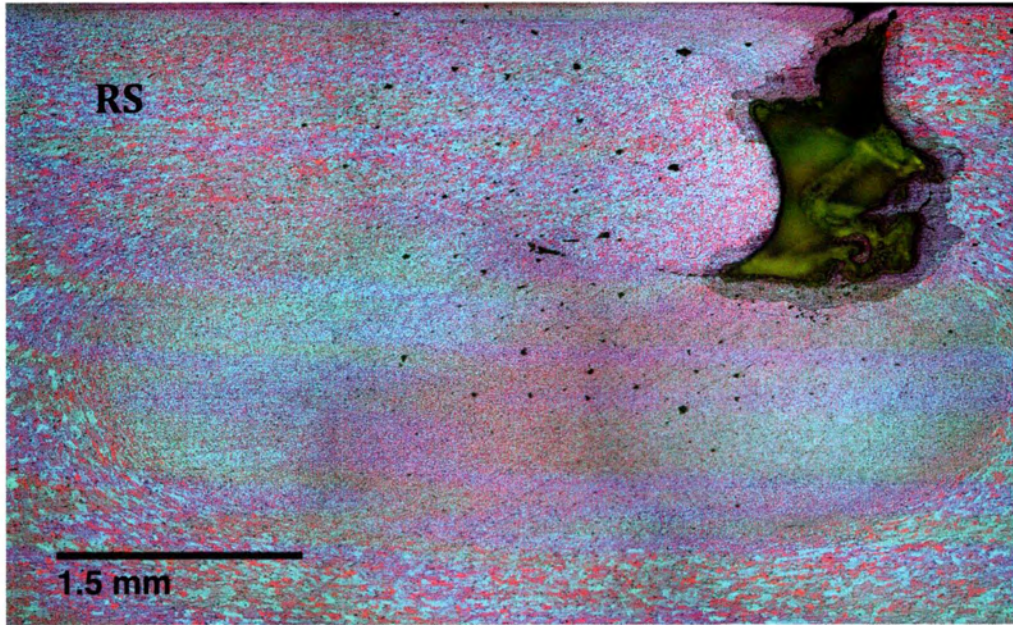


Εικόνα 4.2- Μεταλλογραφία δεύτερου περάσματος, 830grm 118mm/min

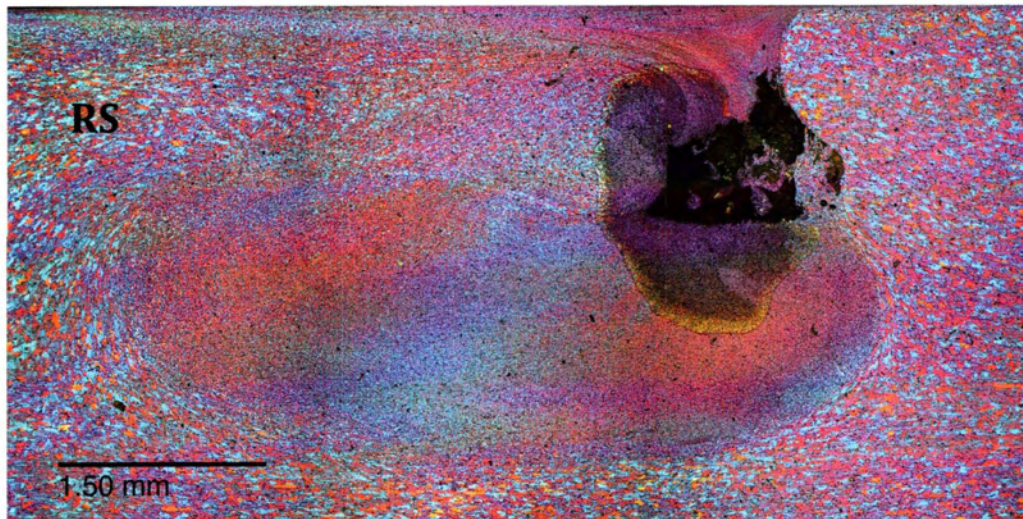


Εικόνα 4.3- Μεταλλογραφία τρίτου περάσματος, 830grm 22,2 mm/min



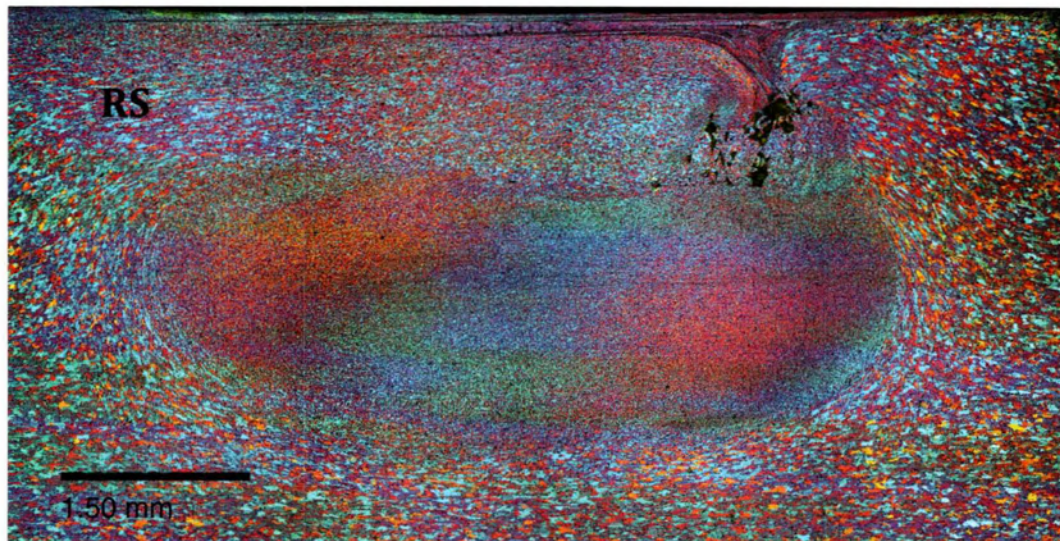


Εικόνα 4.4- Μεταλλογραφία τέταρτου περάσματος, 830grm 75,4mm/min



Εικόνα 4.5- Μεταλλογραφία πέμπτου περάσματος, 1000grm 75,4mm/min





**Εικόνα 4.6-** Μεταλλογραφία έκτου περάσματος, 1200rpm 75,4mm/min

**Πίνακας 4.1** – Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών περασμάτων.

Αρ. Περ.	h,mm	x,mm	y,mm	Πλάτος σφάλματος (mm)	Μήκος σφάλματος (mm)	Ταχύτητα Προώσης (mm/min)	Ταχύτητα Περιστρ. (rpm)
1	3,45	5,31	1.68	0,37	0,78	11,8	830
2	3.38	5.39	1.01	1,55	1,37	118	830
3	3.33	5,35	1.25	0,86	0,67	22,2	830
4	3,24	5,26	0,73	1,46	0,92	75,4	830
5	3,24	5,38	1,06	1,08	0,92	75,4	1000
6	3.42	5,75	1,08	0,87	1,25	75,4	1200

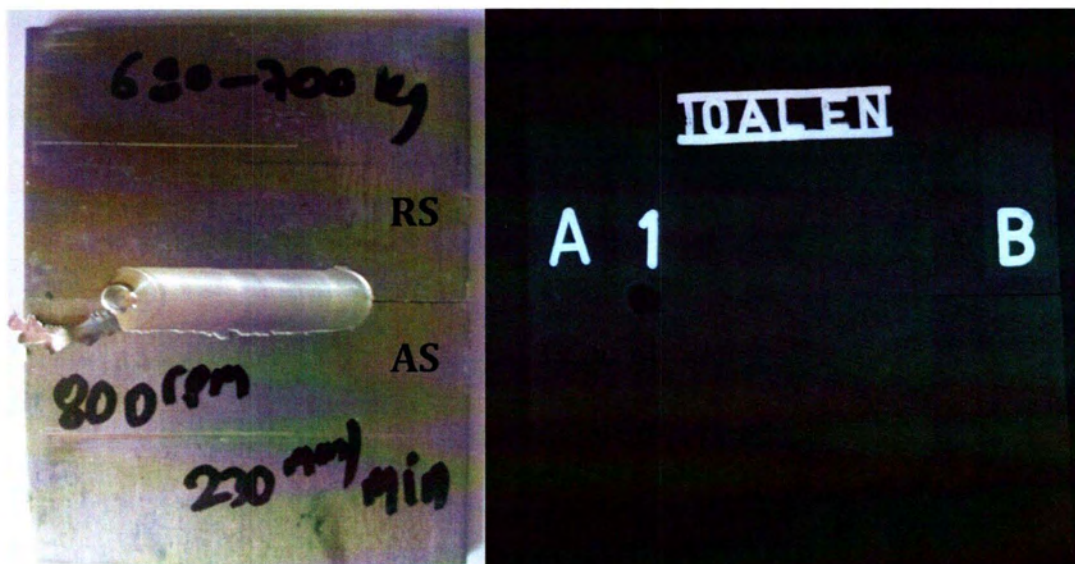
h: απόσταση της ζώνης ανάδευσης από την επιφάνεια  
x: πλάτος ζώνης ανάδευσης  
y: πλάτος θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης



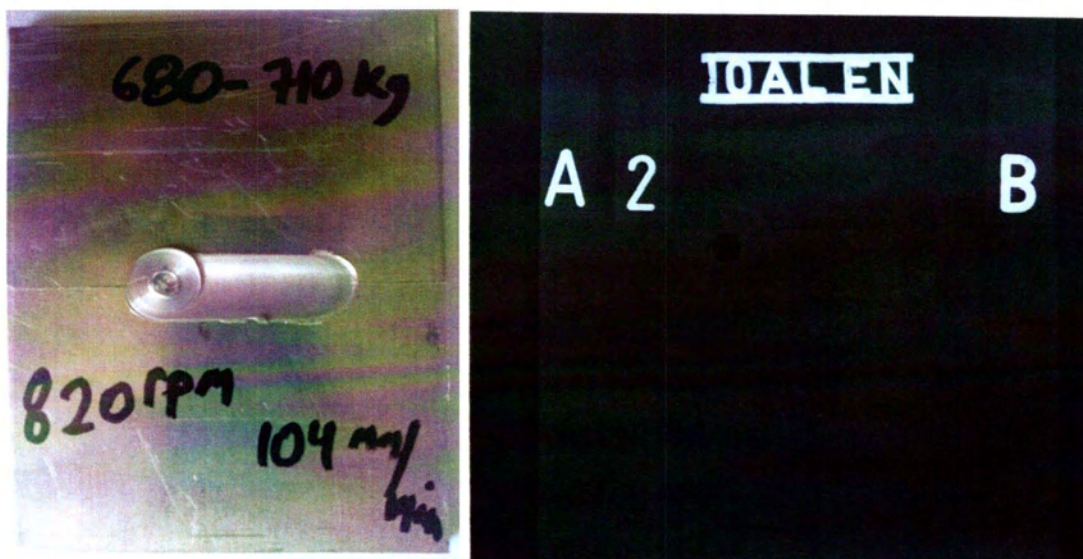
## 4.2 Μετωπικές συγκολλήσεις

### 4.2.1 Μακροσκοπική παρατήρηση και ραδιογραφίες

Αρχικά οι μετωπικές συγκολλήσεις εξετάστηκαν με την μέθοδο της ραδιογραφίας για τον έλεγχο εσωτερικών σφαλμάτων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι συγκολλήσεις και οι ραδιογραφίες τους. Οι ραδιογραφίες έδειξαν ότι δεν υπήρχαν σφάλματα στο εσωτερικό των συγκολλήσεων. Επίσης υπάρχει μεγάλη διαφορά στην ποσότητα του αποβλίττου που δημιουργήθηκε λόγω της κλίσης του εργαλείου στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Στις συγκολλήσεις 2 και 4 απουσιάζει, ενώ στις 1 και 3 είναι μικρό.

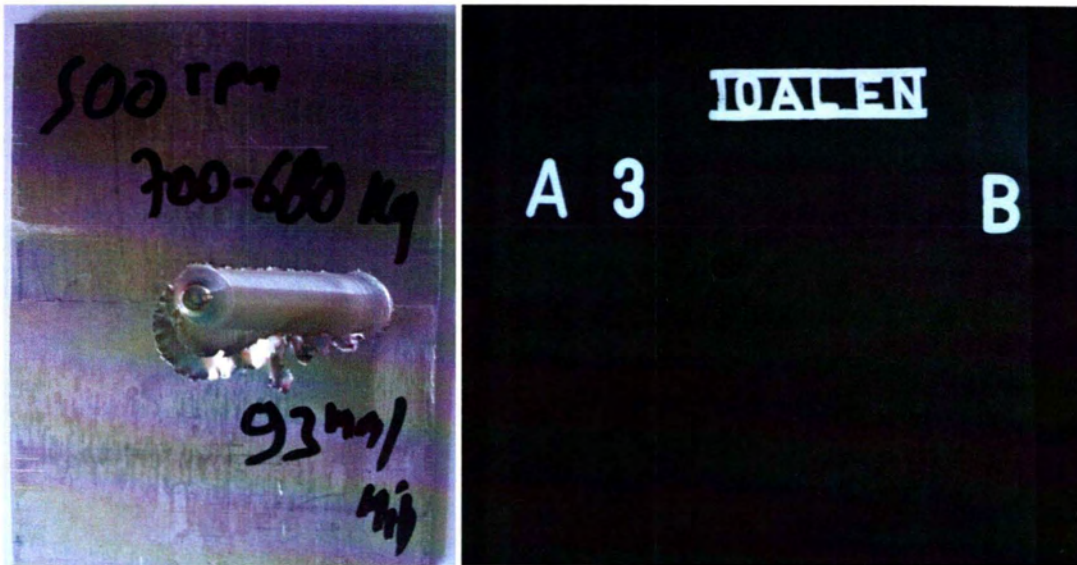


Εικόνα 4.7 - Μετωπική συγκόλληση Νο 1. και αντίστοιχη ραδιογραφία

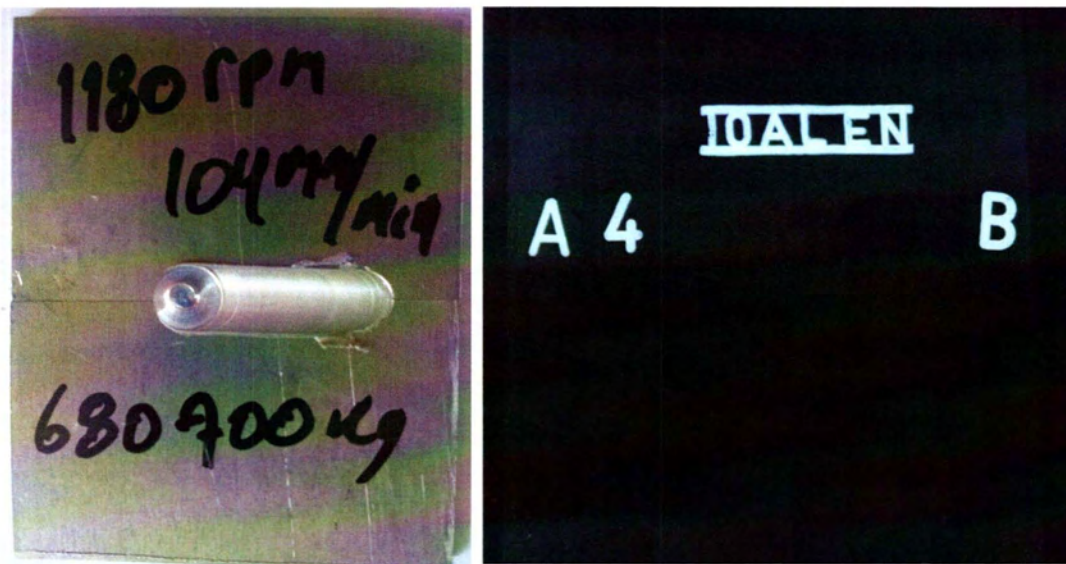


Εικόνα 4.8 - Μετωπική συγκόλληση Νο 2. και αντίστοιχη ραδιογραφία





Εικόνα 4.9 – Μετωπική συγκόλληση Νο 3. και αντίστοιχη ραδιογραφία



Εικόνα 4.10 – Μετωπική συγκόλληση Νο 4. και αντίστοιχη ραδιογραφία

#### 4.2.2 Μεταλλογραφίες μετωπικών συγκολλήσεων

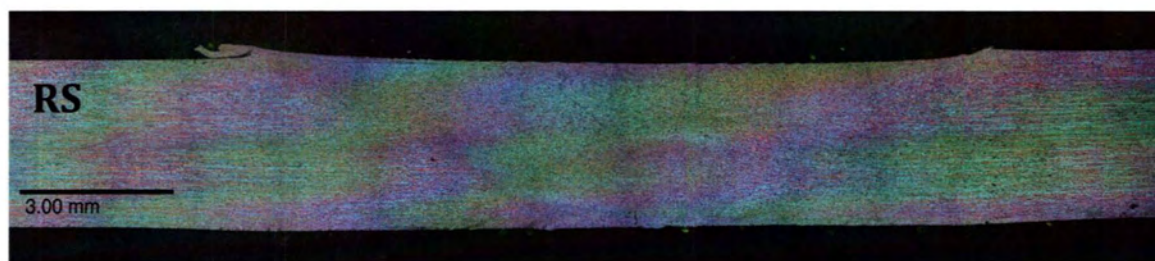
Οι μεταλλογραφίες των συγκολλήσεων και οι μετρήσεις έγιναν με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκε παραπάνω εκτός από την απόσταση της ζώνης ανάδευσης από την επιφάνεια συγκόλλησης η οποία μετρήθηκε από την επιφάνεια μέχρι την αρχή της ζώνης ανάδευσης.(βλ. Εικ .4.10) Η αλλαγή αυτή γίνεται διότι σε όλες τις συγκολλήσεις επετεύχθη πλήρης διείσδυση. Σε όλες τις συγκολλήσεις παρατηρείται το σφάλμα «joint line remnant», γνωστό και ως «kissing bond», «lazy S» ή «entrapped oxide defect». Αυτό το ημισυνεχές στρώμα οξειδίου αρχικά ήταν ένα συνεχές στρώμα οξειδίου στις πλευρές των προς συγκόλληση τεμαχίων. Το σφάλμα αυτό αποδίδεται ή σε ανεπαρκή καθαρισμό των τεμαχίων πριν την συγκόλληση ή σε ανεπαρκή παραμόρφωση της επιφάνειας επαφής των τεμαχίων λόγω εσφαλμένης τοποθέτησης του εργαλείου συγκόλλησης ή πολύ μεγάλης ταχύτητας πρόωσης ή πολύ μεγάλης διαμέτρου περιαιχενίου[4].

Στη συγκόλληση Νο.1 παρατηρείται σφάλμα τύπου τούνελ μικρών διαστάσεων, μετατοπισμένο στην RS πλευρά της συγκόλλησης και σε βάθος 2 mm σε σχέση με την επιφάνεια. Οι διαστάσεις του σφάλματος είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των απλών περασμάτων. Οι συγκολλήσεις Νο. 2-4 δεν παρουσιάζουν αντίστοιχο ελάττωμα.

Συνολικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων παρουσιάζονται στον Πιν. 4.2.

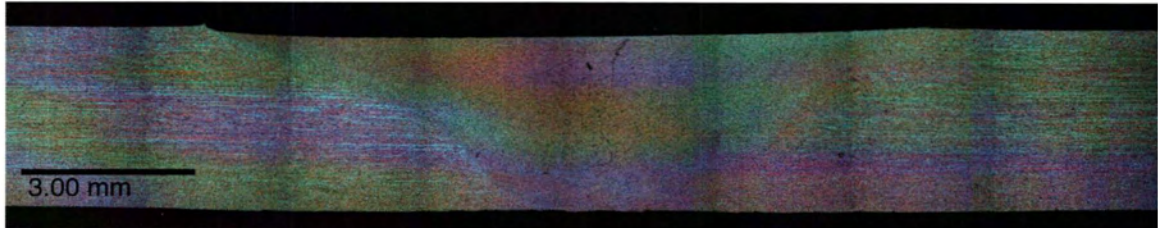


**Εικόνα 4.10** – Μεταλλογραφία πρώτης μετωπικής συγκόλλησης, 800rpm  
230mm/min

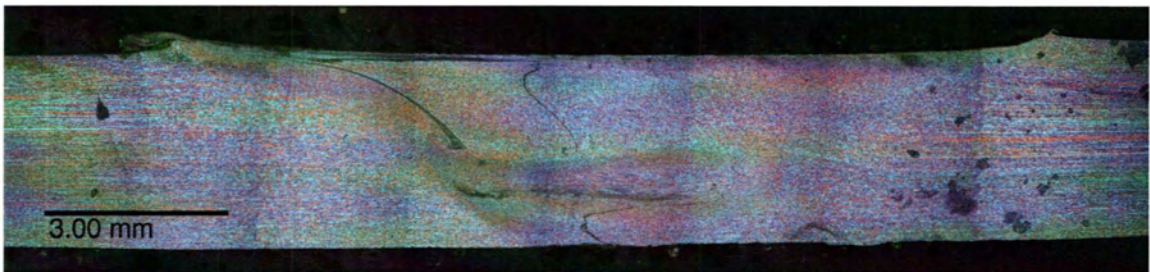


**Εικόνα 4.11** – Μεταλλογραφία δεύτερης μετωπικής συγκόλλησης 820rpm  
104mm/min





**Εικόνα 4.12** – Μεταλλογραφία τρίτης μετωπικής συγκόλλησης 500rpm  
93mm/min



**Εικόνα 4.13** – Μεταλλογραφία τέταρτης μετωπικής συγκόλλησης 1180rpm  
104mm/min

**Πίνακας 4.2** – Συγκεντρωτικός πίνακας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μετωπικών συγκολλήσεων

Αρ. Συγκ.	h,mm	x,mm	y,mm	Ταχύτητα Προώσης (mm/min)	Ταχύτητα Περιστρ. (rpm)	Κάθετο φορτίο (kg)	Κλίση (deg)
1	1.05	5,11	2.3	230	800	680-700	1
2	1,00	5,48	1.63	104	820	680-710	1
3	0.92	5,13	1.36	93	500	680-700	1
4	1,57	5.17	2.70	104	1180	680-700	1

h: απόσταση της ζώνης ανάδευσης από την επιφάνεια

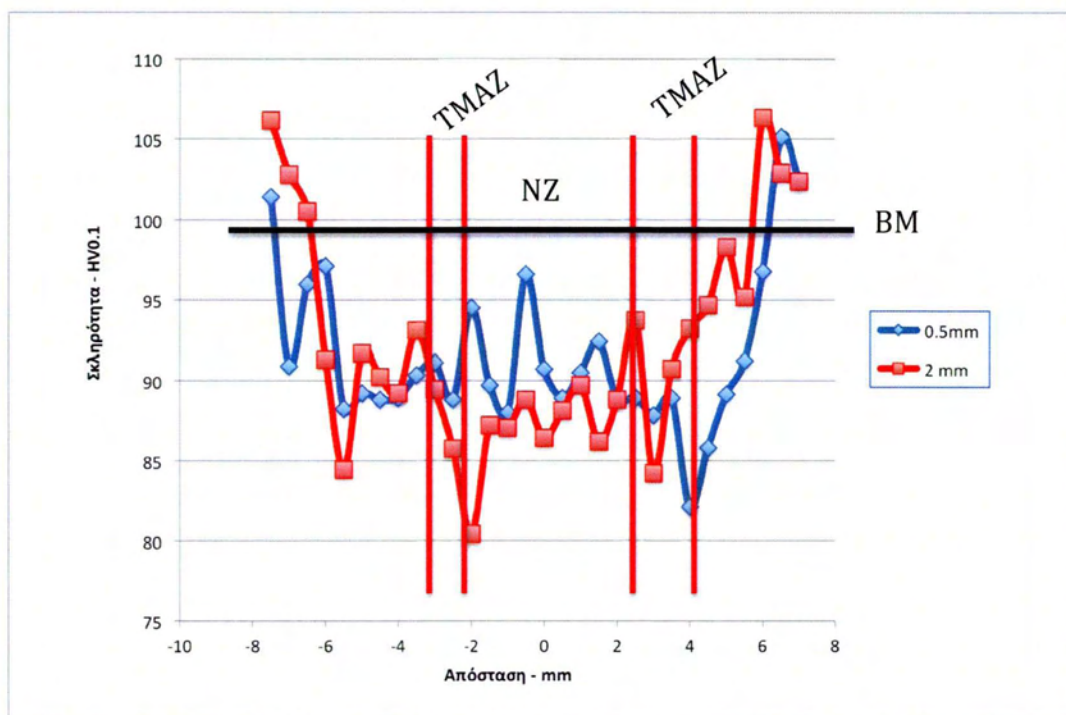
x: πλάτος ζώνης ανάδευσης

y: πλάτος θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης

Παρατηρώντας τις τιμές του Πίν. 4.2 φαίνεται ότι στη συγκόλληση Νο. 4 η ζώνη ανάδευσης ξεκινά σημαντικά χαμηλότερα από την επιφάνεια σε σχέση από τις υπόλοιπες συγκολλήσεις λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής. Η συγκόλληση με το μεγαλύτερο πλάτος στη ζώνη ανάδευσης είναι η συγκόλληση 2, ενώ την μεγαλύτερη σε πλάτος θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη την έχει η συγκόλληση 4.

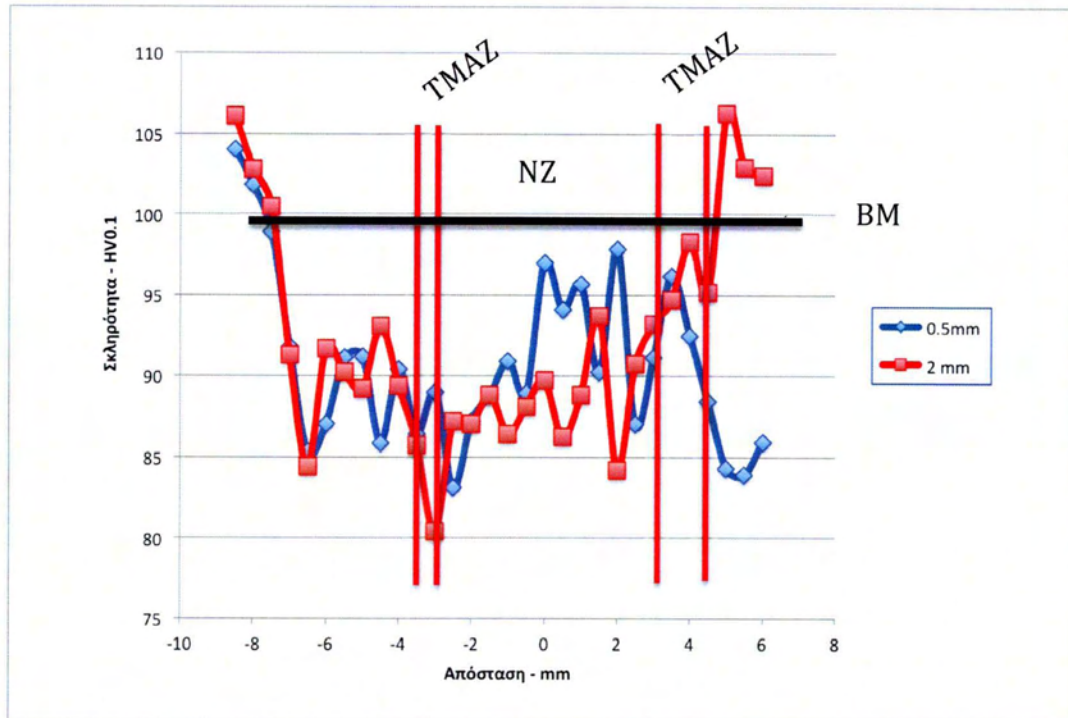
### 4.2.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων παρουσιάζονται στις Εικ. 4.14-4.17 για τις συγκολλήσεις Νο. 1-4 αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκαν δυο προφίλ μικροσκληρομετρήσεων σε κάθε δείγμα : ένα σε απόσταση 0.5mm από την επιφάνεια και ένα δεύτερο σε βάθος 2mm από την επιφάνεια. Σε κάθε προφίλ σημειώνονται οι ζώνες της συγκόλλησης από παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα με τις μικροσκληρομετρήσεις στα 2mm από την επιφάνεια. Η μικροσκληρότητα του βασικού μετάλλου είναι 100HV<sub>0.1</sub>. Όσο πλησιάζουμε στο NZ η μικροσκληρότητα μειώνεται κατά 20HV<sub>0.1</sub>. Αυτό συμβαίνει διότι στο NZ το υλικό έχει υποστεί ανακρυστάλλωση και έχει χάσει την ιδιότητα της εργοσκληύρυνσης.

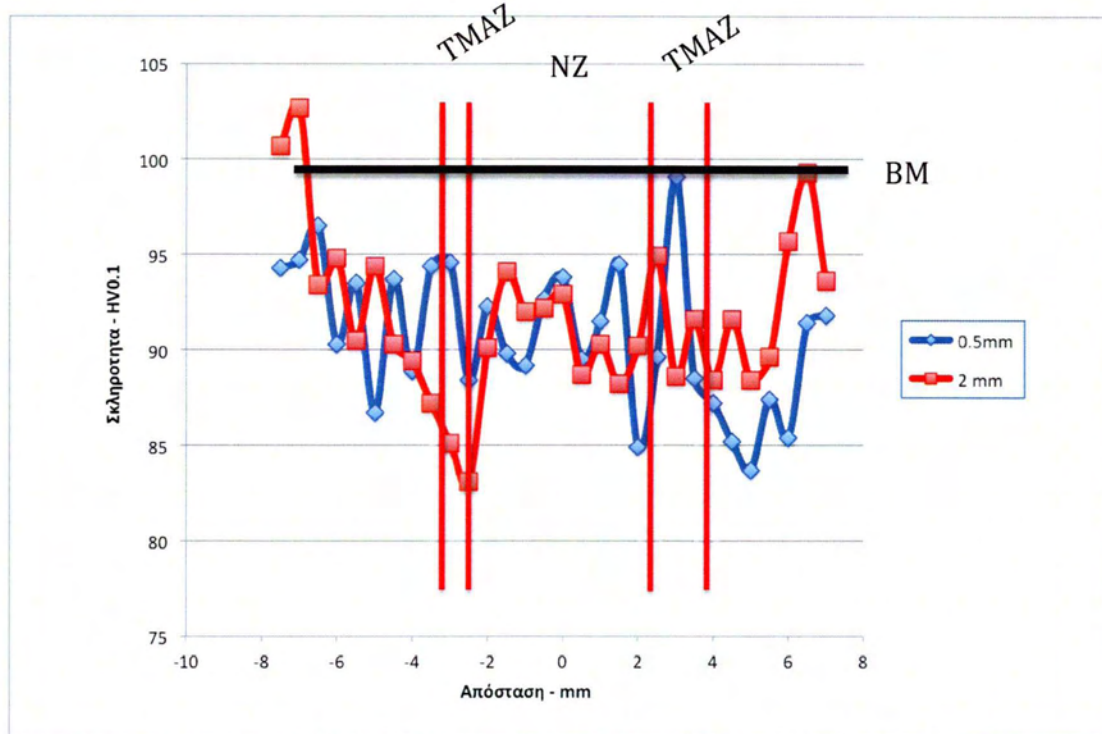


Εικόνα 4.14 – Προφίλ μικροσκληρομέτρησης συγκόλλησης 1

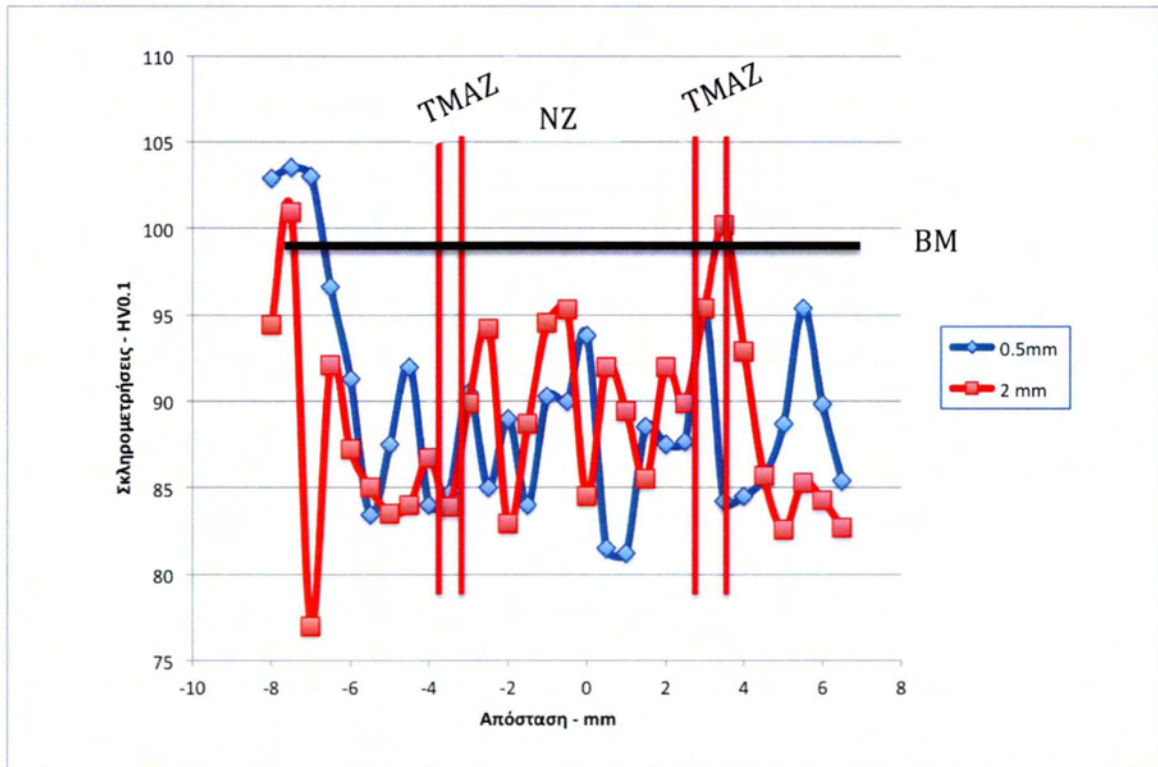




Εικόνα 4.15 - Προφίλ μικροσκληρομέτρησης συγκόλλησης 2



Εικόνα 4.16 - Προφίλ μικροσκληρομέτρησης συγκόλλησης 3

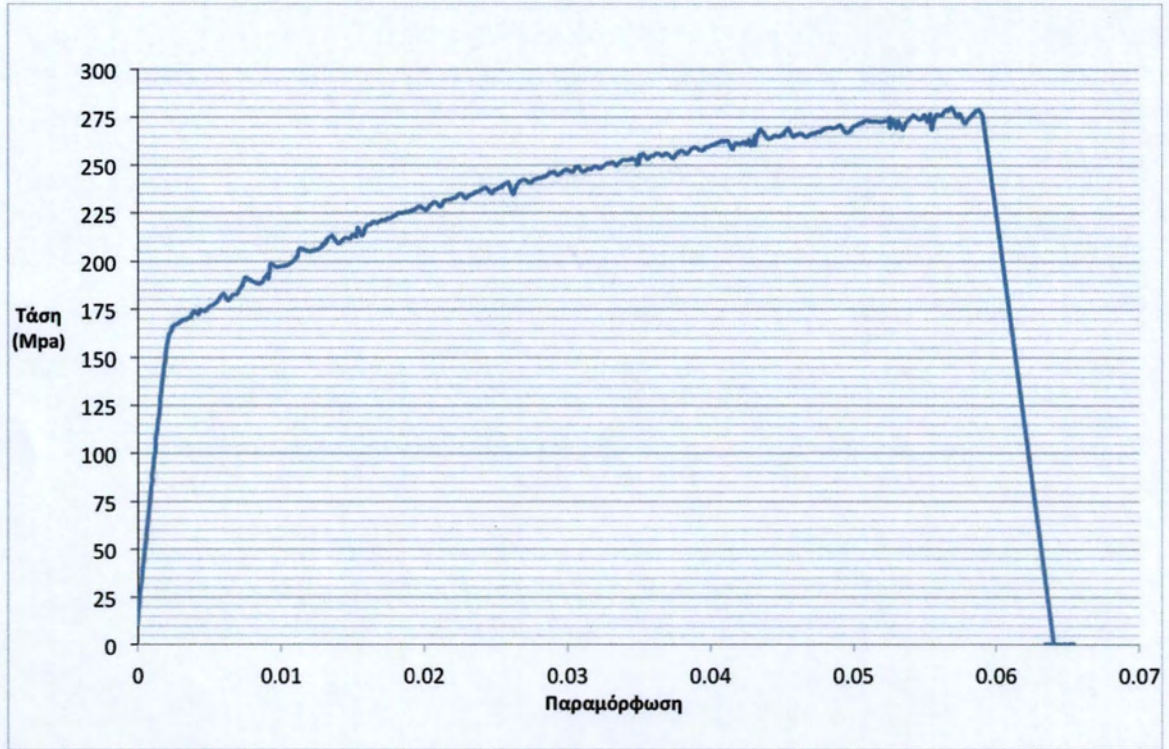


Εικόνα 4.17 - Προφίλ μικροσκληρομέτρησης συγκόλλησης 4

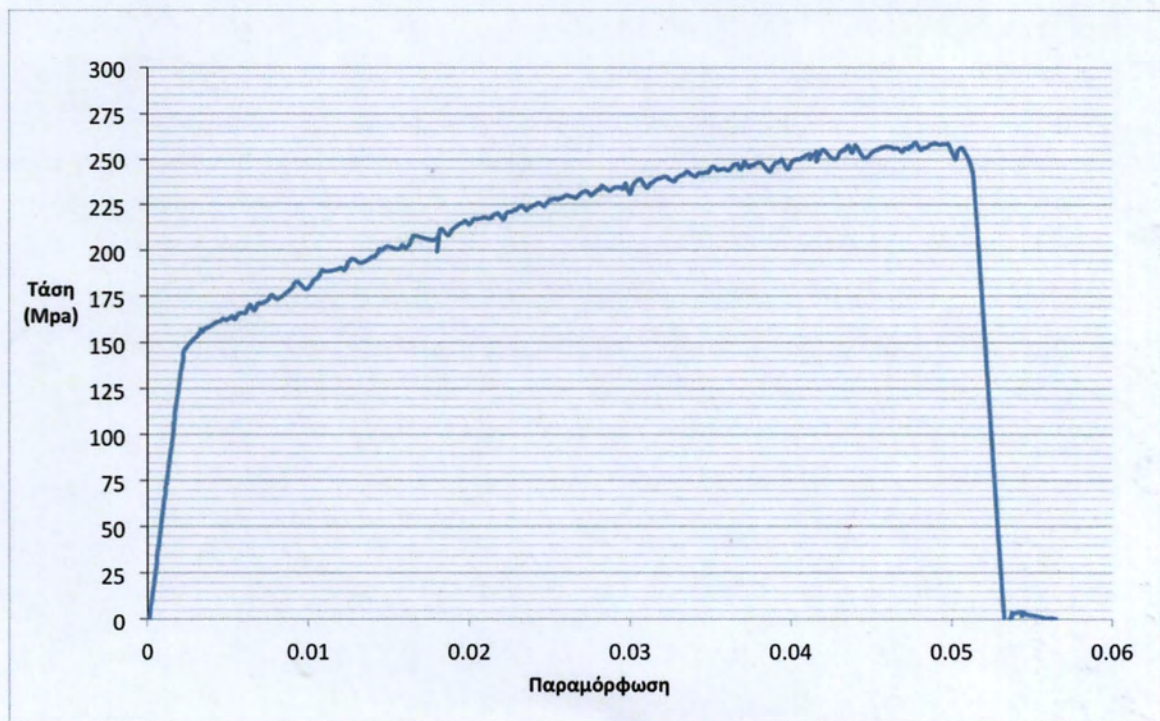


#### 4.2.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Χαρακτηριστική φωτογραφία του δοκιμίου εφελκυσμού μετά την δοκιμή δίδεται στην Εικ. 4.18 Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού (διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης) παρουσιάζονται στα σχήματα 4.1-4.4 και στον Πιν 4.3.

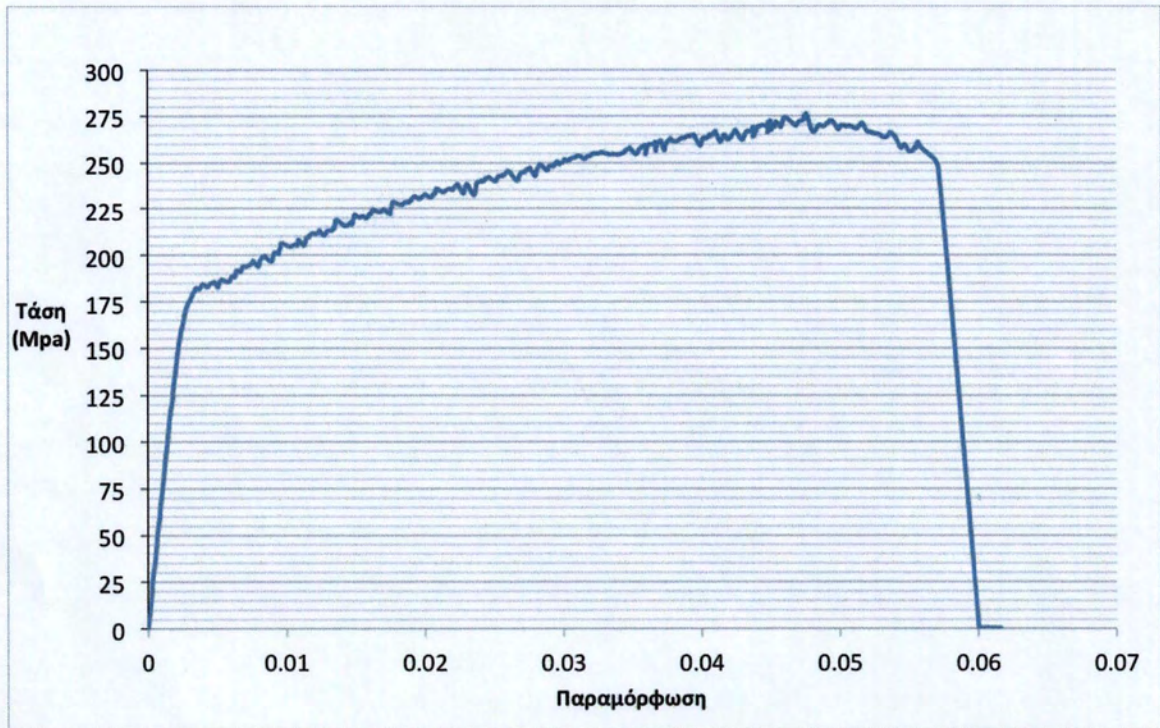


Σχήμα 4.1- Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης συγκόλλησης 1

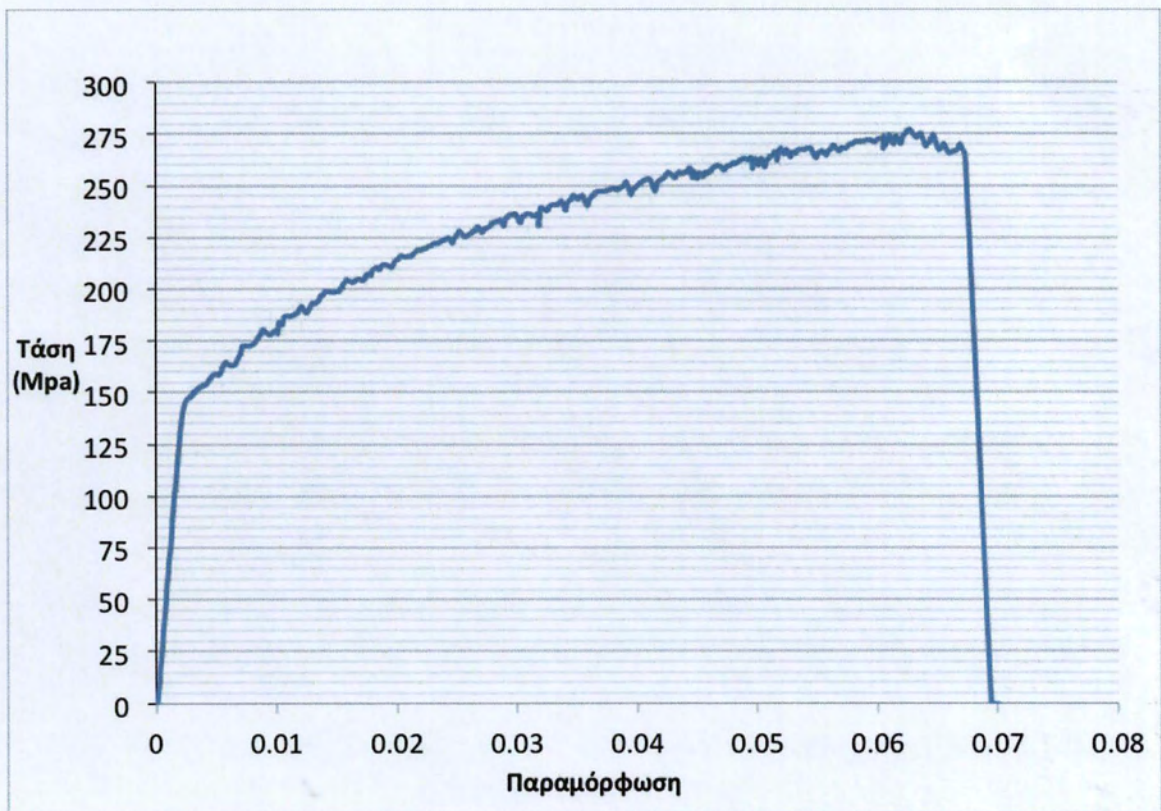


Σχήμα 4.2- Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης συγκόλλησης 2





Σχήμα 4.3- Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης συγκόλλησης 3



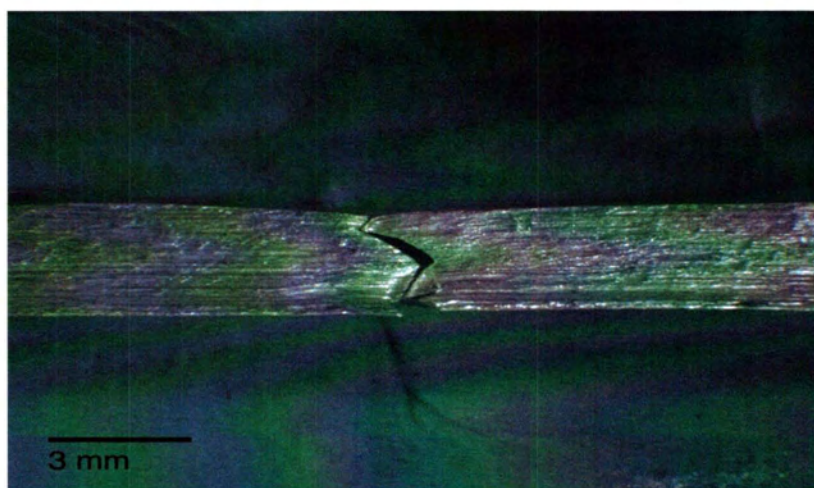
Σχήμα 4.4- Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης συγκόλλησης 4



Όπως φαίνεται το όριο διαρροής των συγκολλήσεων μετρήθηκε από 58% μέχρι 71% του ορίου διαρροής του μητρικού υλικού. Το όριο θραύσης (UTS) μετρήθηκε από 80% μέχρι 86% του ορίου αντοχής του μητρικού υλικού. Η συγκόλληση Νο. 3 έχει το μεγαλύτερο όριο διαρροής ενώ η συγκόλληση Νο.1 έχει το μεγαλύτερο όριο αντοχής φθάνοντας το 86% του μητρικού υλικού. Αξίζει να αναφερθεί ότι η συγκόλληση Νο.3 έχει το μικρότερο πλάτος θερμομηχανικής ζώνης και την μικρότερη ταχύτητα πρόωσης. Στον Πιν 4.7 σημειώνεται επίσης η πλευρά θραύσης του δοκιμίου.

**Πίνακας 4.7** - Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών εφελκυσμού.

	<b>Rp<sub>0.2</sub></b> <b>(Mpa)</b>	<b>UTS</b> <b>(Mpa)</b>	<b>Rp<sub>0.2</sub>(W)</b> <b>/ Rp<sub>0.2</sub>(B)</b>	<b>UTS(W)</b> <b>/UTS(B)</b>	<b>Θέση</b> <b>θραύσης</b>
<b>Al 5083-H32</b>	248	324	1.00	1.00	
<b>Συγκόλληση 1</b>	163	280	0.65	0.86	AS
<b>Συγκόλληση 2</b>	145	259	0.58	0.80	AS
<b>Συγκόλληση 3</b>	178	276	0.71	0.85	AS
<b>Συγκόλληση 4</b>	145	277	0.58	0.85	AS
<b>5083-H321</b> <b>FSWed</b>	153	305	0.61	0.91	-
<b>Rp<sub>0.2</sub>(W)/ Rp<sub>0.2</sub>(B)</b> = Ο λόγος του ορίου διαρροής της συγκόλλησης με το μητρικό υλικό					
<b>UTS(W)/UTS(B)</b> = Ο λόγος του ορίου αντοχής της συγκόλλησης με το μητρικό υλικό					



**Εικόνα 4.18** -Δοκίμιο εφελκυσμού συγκόλλησης Νο 1.

## 5. Συμπεράσματα

- Μετά την εγκατάσταση των ηλεκτρονικών ενδείξεων για καλύτερο έλεγχο των παραμέτρων της συγκόλλησης είναι δυνατή η διεξαγωγή συγκολλήσεων καλής ποιότητας με καλή επαναληψιμότητα.
- Το κράμα Al 5083-H32 φαίνεται να ανταποκρίνεται καλά στη μέθοδο.
- Οι συγκολλήσεις ήταν καλής ποιότητας με περιορισμένα σφάλματα και μηχανικές ιδιότητες κοντά σε αυτές του μητρικού υλικού και στις τυπικές μηχανικές ιδιότητες που δίδονται από το TWI για FSW συγκολλήσεις με Al 5083-H32. Πιο συγκεκριμένα η βέλτιστη συγκόλληση ήταν η Συγκόλληση Νο. 3 με όριο διαρροής 71% και όριο θραύσης 85% του μητρικού υλικού.
- Η ταχύτητα πρόωσης σε συνδυασμό με την κλίση του εργαλείου συγκόλλησης έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη ποσότητα αποβλίττου που δημιουργήθηκε. Όλα τα απλά περάσματα είχαν σφάλματα τύπου «τούνελ» πιθανότατα λόγω της μηδενικής κλίσης του εργαλείου και της έντονης δημιουργίας αποβλίττου.
- Η θραύση όλων των δοκιμών εφελκυσμού έγινε στην προωθούσα πλευρά.
- Η μικροσκληρότητα μειώνεται όσο πλησιάζουμε το κέντρο της συγκόλλησης εξαιτίας της ανακρυστάλλωσης των κόκκων. Ενώ δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των προφίλ μικροσκληρομετρήσεων στα 0.5mm και στα 2mm βάθος για κάθε δοκίμιο.
- Η εμπειρία από την εφαρμογή της μεθόδου στο Εργαστήριο σε συνδυασμό με την εντυπωσιακή αύξηση των εφαρμογών στην παγκόσμια βιομηχανία τα τελευταία χρόνια δείχνει ότι τα αποτελέσματα τέτοιου είδους ερευνητικών προσπαθειών είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν άμεσα πρώτα σε ημιβιομηχανική και κατόπιν σε βιομηχανική κλίμακα και στη χώρα μας. Απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει αυτό είναι η διάχυση των αποτελεσμάτων των πανεπιστημιακών ερευνητικών ομάδων στη βιομηχανία.
- Τα ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από την εμπειρία του χειριστή για την υπάρχουσα μηχανή FSW. Ο εκσυγχρονισμός λοιπόν της υποδομής για την εκτέλεση των συγκολλήσεων (σύγχρονη φρεζομηχανή) με δυνατότητα πλήρους προγραμματισμού και αυτοματοποίησης θα βελτιστοποιήσει τις ιδιότητες των συγκολλήσεων.



## 6. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε αυτήν την εργασία κύριος σκοπός ήταν η μετατροπή της φρεζομηχανής σε μηχανή συγκόλλησης FSW, για την αξιολόγηση της μετατροπής διεξήχθησαν μετωπικές συγκολλήσεις. Ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκόλλησης παίζει πρωτεύοντα ρόλο στη ποιότητα των παραγόμενων συγκολλήσεων, γι' αυτό λοιπόν αντικείμενο μελέτης θα μπορούσε να αποτελέσει η επίδραση της μορφολογίας του εργαλείου συγκόλλησης στην ποιότητα συγκόλλησης.

Επίσης στις συγκολλήσεις που διεξήχθησαν στην παρούσα εργασία μια εκ των παραμέτρων των συγκολλήσεων παρέμεινε σταθερή, αυτή του κάθετου φορτίου. Το μέγεθος του κάθετου φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο στο ποσό θερμότητας που εισάγεται στη συγκόλληση, περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του κάθετου φορτίου θα μπορούσε να γίνει πραγματοποιώντας συγκόλλησης με ίδιες συνθήκες πρόωσης και περιστροφής αλλά με διαφορετικό κάθετο φορτίο.

Τέλος θα μπορούσαν να ερευνηθούν οι μηχανικές ιδιότητες συγκολλήσεων μεταξύ ανόμοιων μετάλλων ή κραμάτων που δεν είναι δυνατό να συγκολληθούν με τις συμβατικές μεθόδους.

## Βιβλιογραφία

- [1] Παναγιώτα Ι. Σαράφογλου, *Μελέτη συγκόλλησης ναυπηγικού κράματος Al5083 με την τεχνική συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009
- [2] Κουλίδης Δημήτρης, *Διερεύνηση συμπεριφοράς κόπωσης αεροπορικού κράματος Al 2195 με διαμήκη συγκόλληση δια τριβής και ανάμιξης (FSW)*, Διπλωματική εργασία ΤΜΜ, 2010
- [3] Grujicic M., Arakere G., Yalavarthy H.V., He T., Yen C.-F., Cheeseman B.A., *Modeling of AA5083 material-microstructure evolution during butt friction-stir welding*, ASM International, 2009
- [4] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007
- [5] Singapore Institute of Manufacturing Technology, 2013, <http://www.simtech.a-star.edu.sg/projects/friction-stir-welding.aspx> (επίσκεψη την 25-06-2014)
- [6] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [7] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Εισαγωγή στις συγκολλήσεις*, εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [8] aluMATTER, 2010, <http://aluminium.matter.org.uk> (επίσκεψη την 25-06-2014)
- [9] ASM Metal Handbook, Vol 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990
- [10] Stephan W. Kallee, E. Dave Nicholas, Wayne M. Thomas, *Industrialisation of friction stir welding for aerospace structures*, 2001, <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrialisation-of-friction-stir-welding-for-aerospace-structures-december-2001/> (επίσκεψη την 27-06-2014)
- [11] Lohwasser D., Chen Z., *Friction Stir Welding: From Basics To Applications*, Woodhead Publishing, 2009
- [12] Min-Su Han, Seung-Jun Lee, Jae-Cheul Park, Seok-Cheol Ko, Yong-Bin Woo, Seong-Jong Kim, *Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 19 (2009) s17-s22
- [13] Caizhi Zhou, Xinqi Yang, Guohong Luan, *Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy*, Scripta Materialia 53 (2005) 1187-1191
- [14] Beytullah Gungor, Erdinc Kaluc, Emel Taban, Aydin Sik, *Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys*, Materials and Design 56 (2014) 84-90



[15] Tomotake Hirata, Taizo Oguri, Hideki Hagino, Tsutomu Tanaka, Sung Wook Chung, Yorinobu Takigawa, Kenji Higashi, *Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy*, Materials Science and Engineering A 456 (2007) 344–349

[16] Hidetoshi Fujii, Ling Cui, Maskatsu Maeda, Kiyoshi Nogi, *Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys*, Materials Science and Engineering A 419 (2006) 25–31

[17] Hattingh D.G., Blignault C., Van Niekerk T.I., James M.N., *Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool*, Journal of materials processing technology 203 (2008) 46–57

[18] Colwell K.C., Car and Driver Magazine, 2013  
<http://www.caranddriver.com/features/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept> (επίσκεψη την 02-07-2014)

[19] Honda Automobile, <http://world.honda.com/automobile-technology/FSW/topic1/> (επίσκεψη την 02-07-2014)

[20] ASM Metal Handbook, Vol 1- Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, 1990



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121518