

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ**  
**ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΕΚΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

**ΣΤΥΛΙΑΝΙΔΗΣ ΟΡΕΣΤΗΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Ι. Παντελής

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ**  
**ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΕΚΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

**ΣΤΥΛΙΑΝΙΔΗΣ ΟΡΕΣΤΗΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ. Ι. Παντελής,

Τριμελής Επιτροπή: Δ.Ι. Παντελής, Καθηγητής  
Ν.Γ. Τσούβαλης, Αναπληρωτής  
Καθηγητής  
Β.Ι. Παπάζογλου, Καθηγητής

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011**

Σε όσους την 8<sup>η</sup> Μάρτη του 2007 ήταν εκεί που έπρεπε.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ :**

#### ***ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ***

##### *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ –ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ 1

1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 5

1.2.1 ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ 7

1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ 10

1.4 ΡΟΗ ΥΛΙΚΟΥ 14

1.5 ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 17

1.6 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ 18

1.6.1 ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ 18

1.6.2 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ 22

1.6.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ 24

### **ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ:**

#### ***ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ***

#### ***ΚΡΑΜΑΤΑ ΕΚΤΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ***

##### *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΑΛΚΟΣ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ*

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ- 26

1.2 ΚΑΘΑΡΟΣ ΧΑΛΚΟΣ- 27

1.2.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ – 27

1.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – 31

1.3 ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ – 38

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΑΓΝΗΣΙΟ*

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ – 41

2.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ – 41

2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – 45

2.3.1 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – 45

2.3.2 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ & ΘΡΑΥΣΗ – 45

2.4 ΑΤΕΛΕΙΕΣ – 48

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ*

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ – 52

3.2 ΚΑΘΑΡΟ ΤΙΤΑΝΙΟ – 53

3.2.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ – 53

3.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – 56

3.2.2.1 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – 56

3.2.2.2 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ – 58

3.3 Ti-6Al-4V – 59

3.3.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ – 60

3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – 62

3.3.2.1 ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ – 62

3.3.2.2 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ – 63

## *ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΛΥΒΕΣ*

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ – 66

4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ – 68

4.3 ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ -71

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – 71

4.3.2 ΥΠΟΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΕΙΣ – 71

4.3.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ – 73

4.3.2.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ - 73

4.3.2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - 78

4.3.3 ΥΠΕΡΕΥΤΗΚΟΕΙΔΕΙΣ - 81

4.4 ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ – 83

4.5 ΑΝΟΞΕΙΔΟΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ – 87

4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - 87

4.5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ & ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ – 87

4.5.3 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ – 88

4.5.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ – 89

4.5.5 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ - 90

4.5.6 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ – 91

*ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ*

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -93

5.2 ΚΑΘΑΡΟΣ ΧΑΛΚΟΣ – 95

5.3 ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ – 95

5.4 ΜΑΓΝΗΣΙΟ – 96

5.5 ΤΙΤΑΝΙΟ – 96

5.6 ΧΑΛΥΒΕΣ – 97

*ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -99*





## Abstract

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία επισκόπηση επιστημονικών άρθρων σχετικά με τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση σε διάφορα μεταλλικά κράματα, πλην των κραμάτων αλουμινίου. Στο πρώτο μέρος γίνεται μία εισαγωγή στους κυριότερους παράγοντες της εν λόγω μεθόδου, όπως αυτοί έχουν καταγραφεί σε συγκολλήσεις κυρίως κραμάτων αλουμινίου με σκοπό την εξοικείωση με αυτήν. Η έμφαση δίνεται στην περιγραφή της μεθόδου, στην ορολογία της και στα πλεονεκτήματά της, στις παραμέτρους της συγκόλλησης, στις αρχές παραγωγής θερμότητας, στη ροή του υλικού, στις γεωμετρίες συγκόλλησης και, τέλος, στη μικροδομή που επιτυγχάνεται.

Στο δεύτερο μέρος εξετάζονται διάφορα κράματα για τα οποία υπάρχει ικανοποιητική βιβλιογραφία. Τα κράματα που εξετάζονται είναι: χαλκός και κράματα χαλκού (Κεφάλαιο 1), μαγνήσιο (Κεφάλαιο 2), τιτάνιο και κράματα τιτανίου (Κεφάλαιο 3) και διάφοροι χάλυβες (Κεφάλαιο 4). Σε κάθε κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή με τις ιδιαιτερότητες του κάθε κράματος σχετικά με τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση και ακολουθεί η συγκριτική παράθεση των βιβλιογραφικών συμπερασμάτων όσον αφορά τη μικροδομή και τις κύριες μηχανικές ιδιότητες (κυρίως τον εφελκυσμό). Όπου κρίθηκε απαραίτητο έγινε ειδική αναφορά σε πιο εξειδικευμένα ζητήματα. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα της μελέτης. Παρουσιάζονται πρώτα κάποια γενικά συμπεράσματα και δυσκολίες, και στη συνέχεια τα συμπεράσματα ανά κράμα.

The present study consists of a survey based on scientific papers concerning Friction Stir Welding of various metal alloys. The first part is an introduction in the main factors of the method, as these have been registered mainly in welds of aluminum alloys, in order to get familiar with FSW. This part focuses on the description of the method, its terms and its advantages, the method's variables, the principles of heat generation, the material flow, the joint geometry and, finally, the microstructure.

The second part examines various alloys for which there is satisfactory bibliography. The alloys under examination are: copper and copper alloys (Chapter 1), magnesium (Chapter 2), titanium and titanium alloys (Chapter 3) and various steels (Chapter 4). Each chapter consists of an introduction on specific issues of each alloy in relation with FSW, followed by a comparative exposition of the bibliography's conclusions in regard to the microstructure and the mechanical properties (mainly tensile properties). More specific matters are examined where needed. Finally, Chapter 5 gathers the conclusions of this study. Some general conclusions and difficulties are presented and then the conclusions for each alloy.



## ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

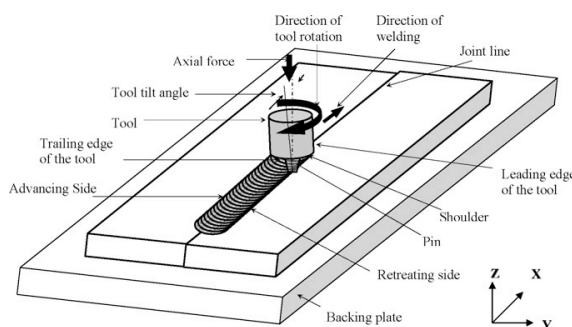
### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ –ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding, FSW) είναι μία μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης η οποία εισείχθη από το Ινστιτούτο Συγκόλλησης στην Μεγάλη Βρετανία το 1991, και θεωρείται από τις πλέον σημαντικές εξελίξεις στη σύνδεση μετάλλων τα τελευταία χρόνια.

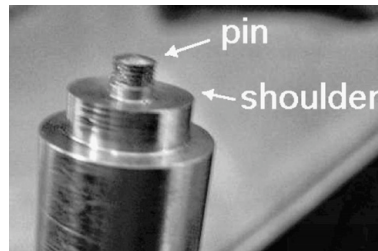
Η βάση της μεθόδου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1, έχει ως εξής: οι προς συγκόλληση μεταλλικές πλάκες τοποθετούνται παράπλευρα και υποστηρίζονται από μία πλάκα υποστήριξης. Ένα μη καταναλισκόμενο εργαλείο ( Σχήμα 1.2 ) με περιανχένιο που καταλήγει σε έναν ειδικά σχεδιασμένο πείρο βυθίζεται στο σημείο επαφής των πλακών και περιστρέφεται ενώ παράλληλα κινείται και κατά μήκος της επαφής. Οι προς συγκόλληση πλάκες συγκρατούνται προκειμένου να παραμείνουν σταθερές. Η θερμότητα που παράγεται μέσω τριβής στην επαφή του περιανχενίου με το δοκίμιο «μαλακώνει» το προς συγκόλληση μέταλλο. Κατά την κίνηση του εργαλείου στην κατεύθυνση της συγκόλλησης λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση και καθώς το υλικό μεταφέρεται από την εμπρόσθια στην οπίσθια άκρη του εργαλείου πραγματοποιείται η σύνδεση.

Στις συγκολλούμενες πλάκες διακρίνονται η πλευρά προώθησης (το ήμισυ όπου η κατεύθυνση της περιστροφής είναι ίδια με την κατεύθυνση της συγκόλλησης) και η πλευρά υποχώρησης. Αυτή η διαφορά δύναται να οδηγήσει σε ασυμμετρία στη ροή του υλικού, στη μεταφορά της θερμότητας και στις ιδιότητες μεταξύ των δύο πλευρών.



**Σχήμα 1.1:** Η διάταξη της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, η τυπική δομή ύστερα από το πέρας της διαδικασίας χαρακτηρίζεται από τρεις περιοχές, κατά την ακόλουθη διάταξη: τη ζώνη συγκόλλησης ή αλλιώς, ζώνη ανάδευσης, τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη – μοναδικό χαρακτηριστικό της FSW που στο εξής θα αναφέρεται ως ΘΜΕΖ, και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη – ΘΕΖ, στο εξής.



**ΣΧΗΜΑ 1.2** ΤΟ εργαλείο που χρησιμοποιείται στην FSW.

Διακρίνονται ο πείρος και το περιαιχένιο.

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση αρχικά χρησιμοποιήθηκε για κράματα αλουμινίου όμως τα τελευταία χρόνια η μέθοδος εφαρμόζεται και σε άλλα μεταλλικά κράματα. Η μέθοδος έχει βρει ευρεία χρήση στη διαστημική τεχνολογία όπου χρησιμοποιούνται αλουμίνια υψηλής αντοχής. Επίσης ολοένα και αυξάνονται οι εφαρμογές στη ναυπηγική, την κατασκευαστική βιομηχανία, τους σιδηροδρόμους και τη βιομηχανία αυτοκινήτων.

Η μέθοδος έδωσε λύση στην ανάγκη συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου υψηλής αντοχής που μέχρι πρότινος θεωρούνταν ασύμφορο ή αδύνατο να συγκολληθούν με συμβατικές μεθόδους. Στα διάφορα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται το γεγονός ότι είναι φιλική προς το περιβάλλον, δίνει πολύ καλές μεταλλουργικές ιδιότητες (ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης), καθώς και ότι είναι εξαιρετικά οικονομική από ενεργειακής άποψης. Παρακάτω κατηγοριοποιούνται και συνοψίζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου:

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ

1. Ευκολία χειρισμού
2. Ακριβής εξωτερικός έλεγχος
3. Υψηλή επαναληψιμότητα

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΣΚΟΠΙΑ

1. Εξαιρετικές μεταλλουργικές ιδιότητες στην περιοχή της συγκόλλησης
2. Μικρόκοκκη δομή
3. Καμία απώλεια υλικού
4. Δεν υπάρχει ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση
5. Καλή σταθερότητα διαστάσεων και επαναληψιμότητα
6. Μειωμένη στρέβλωση του δοκιμίου

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΣΚΟΠΙΑ

1. Δεν χρησιμοποιούνται αέρια προστασίας, διαλύτες
2. Δεν απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας
3. Ελάχιστη ρύπανση

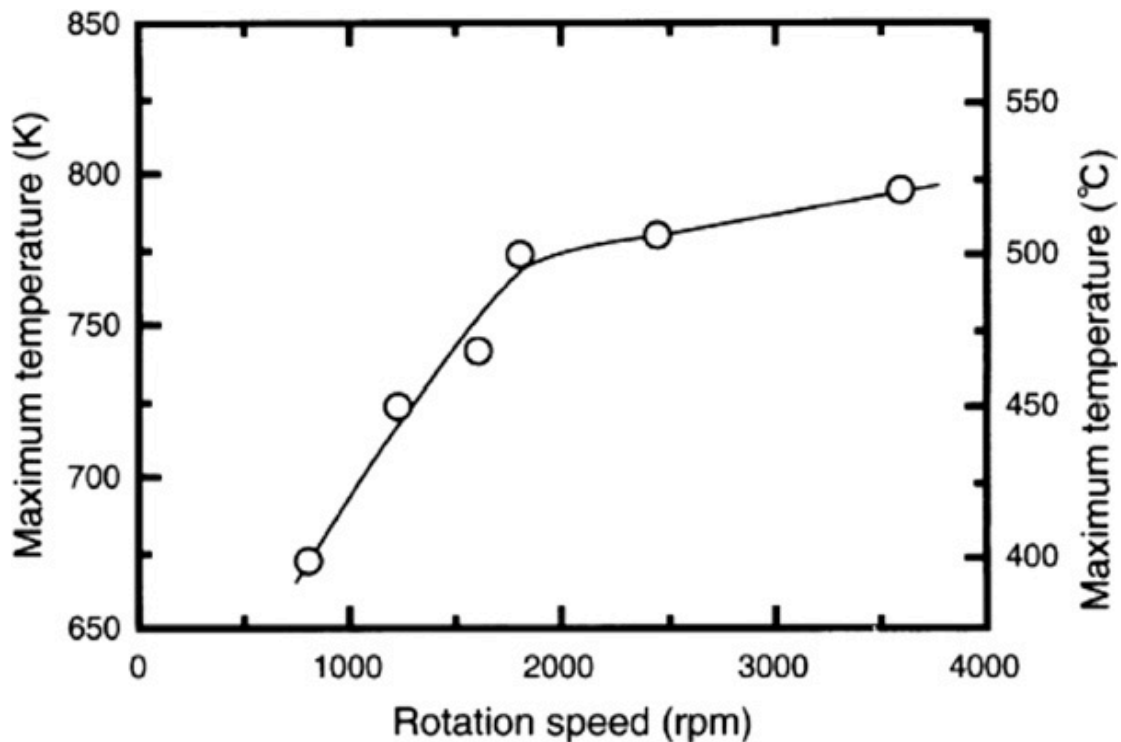
## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΚΟΠΙΑ

1. Απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας (ενδεικτικά, μόνο το 2,5% της απαιτούμενης ενέργειας για συγκόλληση με laser
2. Δίνει τη δυνατότητα για μείωση του βάρους των κατασκευών καθώς δίνει τη δυνατότητα για συγκόλληση διαφορετικών παχών

## 1.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Οι κύριες ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί η κατεργασία είναι η ταχύτητα συγκόλλησης, η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, η κάθετη δύναμη του εργαλείου, η γωνία του εργαλείου (η γωνία μεταξύ του άξονα του εργαλείου και της καθέτου στην επιφάνεια των μετάλλων) και η γεωμετρία του εργαλείου.

Σχετικά με την ταχύτητα περιστροφής και την ταχύτητα συγκόλλησης, αυτές επηρεάζουν κυρίως την τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας και κατά συνέπεια τη μίξη του υλικού. Εν συντομία, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, η μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα και μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης. [Nandan, 2008]. Η αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οφείλεται φυσικά στην υψηλότερη θέρμανση λόγω τριβής και οδηγεί σε υψηλότερη μίξη και ανάδευση. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι στην αύξηση της θερμοκρασίας υπεισέρχεται και ο παράγοντας του συντελεστή τριβής. Καθώς και αυτός αυξάνεται με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία έτσι ώστε θα ήταν λάθος να αποδώσουμε την αύξηση της τελευταίας αποκλειστικά στην περιστροφική κίνηση. Η σχέση της ταχύτητας περιστροφής με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1.3).



ΣΧΗΜΑ 1.3: Σχέση ταχύτητας περιστροφής με μέγιστη θερμοκρασία.

Όσον αφορά τη στρέψη, αυτή μειώνεται με την αύξηση της γωνιακής ταχύτητας, λόγω της αύξησης του ρυθμού παραγωγής θερμότητας και της θερμοκρασίας για σταθερές λοιπές μεταβλητές. Δηλαδή η ροή του υλικού διευκολύνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ταχύτητα συγκόλλησης αντιθέτως δεν επηρεάζει σημαντικά τη στρέψη. Υπάρχει μόνο μία ελάχιστη αύξηση της στρέψης σε υψηλές ταχύτητες λόγω της μείωσης της θερμότητας και της θερμοκρασίας, μείωση που καθιστά δυσκολότερη τη ροή υλικού.

Αυτό αν το δούμε κάτω από τη σκοπιά της παραγωγής θερμότητας μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως ούτε και αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα συγκόλλησης, καθώς η σχετική ταχύτητα (velocity) μεταξύ του εργαλείου και του υλικού καθορίζεται κυρίως από τη γωνιακή ταχύτητα.

Πολύ μεγάλη δύναμη κατά τον κάθετο άξονα μπορεί να οδηγήσει σε φθορά του εργαλείου ή ακόμα και θραύση. Η αξονική δύναμη επηρεάζει και την ποιότητα της συγκόλλησης. Πολύ υψηλή δύναμη οδηγεί σε υπερθέρμανση και εκλέπτυνση της σύνδεσης ενώ πολύ χαμηλή σε ανεπαρκή θέρμότητα και κενά.



Σχετικά με τη γωνία του εργαλείου, αυτή επηρεάζει σημαντικά τη ροή του υλικού. Η κατάλληλη γωνία διασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά του υλικού από την άγουσα ακμή προς τα πίσω. Τέλος, το βάθος διείδυσης του πείρου είναι σημαντικό καθώς όταν δεν είναι επαρκές δεν υπάρχει επαφή του περιουχένιου με την επιφάνεια του δοκιμίου, δηλαδή δεν υπάρχει αποτελεσματική μεταφορά υλικού από μπρος προς τα πίσω, με αποτέλεσμα συγκολλήσεις με σφάλματα (τούνελ στο εσωτερικό, επιφανειακά κοιλώματα). Στην αντίθετη περίπτωση του υπερβολικού βάθους, το περιουχένιο βυθίζεται στο δοκίμιο προκαλώντας εκτεταμένη υπερχειλίση με αποτέλεσμα κοίλη συγκόλληση και τοπική λέπτυνση των υπό συγκόλληση πλακών.

Σημαντικός παράγοντας για συγκεκριμένες κατεργασίες FSW είναι η προθέρμανση ή η ψύξη. Σε υλικά όπως ο χάλυβας ή το τιτάνιο με υψηλό σημείο τήξης, ή σε υλικά με υψηλή αγωγιμότητα όπως ο χαλκός, η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να μην είναι επαρκής για την πλαστικοποίηση του υλικού γύρω από το εργαλείο και συνεπώς να καθίσταται δύσκολη η παραγωγή μίας συνεχούς συγκόλλησης δίχως ατέλειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις η προθέρμανση ή η χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς διευκόλυνση της ροής του υλικού. Αντίθετα σε υλικά όπως το αλουμίνιο ή το μαγνήσιο, με χαμηλό σημείο τήξης, η ψύξη χρησιμοποιείται για τη μείωση της εκτεταμένης αύξησης μεγέθους ανακρυσταλλωμένων κόκκων και την αποφυγή ανεπιθύμητης σκλήρυνσης.

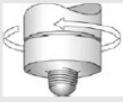


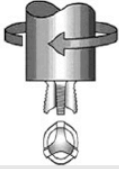
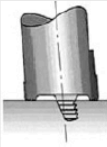

Τέλος, ξεχωριστή αναφορά πρέπει να γίνει στο ρόλο της γεωμετρίας του εργαλείου καθώς αποτελεί ίσως την καθοριστικότερη παράμετρο της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης.

### 1.2.1. ΤΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ

Ο ρόλος του εργαλείου στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι διπλός. Αφενός παράγει θερμότητα. Καθώς το εργαλείο βυθίζεται στο υλικό μέχρι το περιουχένιο να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο, η θερμότητα παράγεται αρχικά από την τριβή του πείρου με το δοκίμιο και δευτερευόντως, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Η συγκράτηση του μέρους του υλικού που έχει θερμανθεί διασφαλίζεται από το περιουχένιο. Αφεταίρου, το εργαλείο προκαλεί τη

ροή του υλικού, μέσω της ανάδευσης και της μεταφοράς του υλικού. Εν γένει χρησιμοποιούνται κοίλα περιανχένια και πείροι με σπείρωμα.

Η γεωμετρία του εργαλείου επηρεάζει τη ροή του υλικού, την παραγωγή θερμότητας, την απαιτούμενη δύναμη, και την ομοιογένεια της ραφής. Ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα και ακολουθώντας τα πειραματικά και ερευνητικά συμπεράσματα που αποσαφηνίζουν το ρόλο της γεωμετρίας του εργαλείου στην κάθε πτυχή της κατεργασίας, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι εργαλείων, οι κυριότεροι εκ των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 1.4

Tool	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Schematics						
Tool pin shape	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Threaded, tapered with three flutes	Tri-flute with flute ends flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads
Ratio of pin volume to cylindrical pin volume	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
Swept volume to pin volume ratio	1.1	1.8	2.6	2.6	Depends on pin angle	1.8
Rotary reversal	No	No	No	No	No	Yes
Application	Butt welding; fails in lap welding	Butt welding with lower welding torque	Butt welding with further lower welding torque	Lap welding with lower thinning of upper plate	Lap welding with lower thinning of upper plate	When minimum asymmetry in weld property is desired

**Σχήμα 1.4.** Κύριοι τύποι εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην FSW

Τα εργαλεία whorl και MX-triflute έχουν μικρότερο όγκο πείρου σε σχέση με τα κυλινδρικά εργαλεία, και κάνουν εφικτή τη συγκόλληση μεγαλύτερου πάχους. Το σπείρωμα στην γεωμετρία Whorl διευκολύνει τη ροή του υλικού, ενώ το σωληνοειδές στο MX triflute αυξάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ εργαλείου-δοκιμίου κάτι που αυξάνει την παραγωγή θερμότητας, τη πλαστικοποίηση και τη ροή του υλικού. Έτσι, καθώς

επιτυγχάνεται ισχυρότερη ανάδευση, μειώνεται η δύναμη που προκαλεί την εγκάρσια κίνηση του εργαλείου και η στρέψη συγκόλλησης.

Τα εργαλεία Flared triflute και A-skew σχεδιάστηκαν προκειμένου να επιτευχθεί πιο πλατιά ραφή. Και οι δύο αυτές γεωμετρίες αυξάνουν την έκταση της ανάδευσης δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για ραφές μεγαλύτερου πλάτους και βελτιώνουν την ποιότητα στη ρίζα της συγκόλλησης.

Τέλος το re-stir εργαλείο που περιοδικά περιστρέφεται αντίθετα με την κατεύθυνση της περιστροφής σχεδιάστηκε προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα ασυμμετρίας στην παραγωγή της θερμότητας και τη ροή του υλικού.

### 1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η θερμότητα κατά την FSW, παράγεται μέσω τριβής και μέσω πλαστικής παραμόρφωσης μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου και μέσω πλαστικής παραμόρφωσης στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ). Ένα μέρος της πλαστικής παραμόρφωσης αποθηκεύεται μέσα στη θερμομηχανικά κατεργασμένη περιοχή σε μορφή ατελειών υψηλής πυκνότητας [Nandan, 2008]. Στη ραφή, συμβαίνουν συγχρόνως φαινόμενα αποκατάστασης και ανακρυστάλλωσης. Η παραμόρφωση αυξάνει την πυκνότητα διαταραχών, καθώς και την ποσότητα επιφάνειας και ακμής κόκκου ανά μονάδα όγκου, και κατακερματίζοντας τα κατακρημνίσματα μπορεί να οδηγήσει σε πλαστικοποίηση του υλικού.

Πιο συγκεκριμένα, το εργαλείο κινείται κατά μήκος της ραφής με σταθερή ταχύτητα  $U$  και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , έτσι ώστε σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο στη διεπιφάνεια του εργαλείου και του δοκιμίου, η εφαπτομενική ταχύτητα του εργαλείου σχετικά με το δοκίμιο να είναι:

$$v_r = \omega r - U \sin \theta$$

όπου  $r$  η αξονική απόσταση από τον άξονα του εργαλείου και  $\theta$  η γωνία μεταξύ της διανυσματικής ακτίνας  $r$  και της διεύθυνσης της συγκόλλησης.

Έτσι η τοπική παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής είναι αποτέλεσμα της δύναμης τριβής και της ταχύτητας ολίσθησης, ενώ η διεπιφανειακή παραγωγή θερμότητας, αποτέλεσμα της διατμητικής τάσης και της ταχύτητας του υλικού του δοκιμίου που προσκολλάται στο εργαλείο κατά την κίνησή τους.

Συμβολίζουμε  $de_f$  την τοπική παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής, ενώ  $de_s$  την παραγωγή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης όταν το υλικό προσκολλάται στο εργαλείο.

Η πρώτη δίδεται από τον τύπο:

$$de_f = \delta v_r \mu_f p dA \quad (1)$$

όπου:

$\delta$ , έκταση ολίσθησης

$\mu_t$ , συντελεστής τριβής

$p$ , τοπική πίεση που εφαρμόζεται στο εργαλείο στην στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$

Όταν  $\delta=1$ , δεν υφίσταται επικόλληση υλικού στο εργαλείο, συνεπώς όλη η θερμότητα παράγεται λόγω τριβής. Αντιθέτως όταν  $\delta=0$ , δηλ δεν συμβαίνει ολίσθηση, όλη η θερμότητα παράγεται από πλαστική παραμόρφωση. [Schmidt H, 2004].

Εδώ προκύπτει και ένα βασικό πρόβλημα υπολογισμού της παραγόμενης θερμότητας καθώς ο συντελεστής τριβής δε μπορεί να προσδιοριστεί από βασικές αρχές και πειράματα έχουν δείξει πως συσχετίζεται με τις συνθήκες της συγκόλλησης.

Η δεύτερη παραγωγή θερμότητας, αποτέλεσμα της προαναφερθείσας επικόλλησης υλικού, δίδεται από τον τύπο

$$de_s = (1-\delta)v_t \tau_y dA \quad (2)$$

όπου  $\tau_y$  η διατμηματική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην τάση  $\sigma_y$ , βάσει του κριτηρίου von Mises, όπου  $\tau_y = \sigma_y/3^{1/3}$ .

Η χρήση μιας αποτελεσματικής  $\tau_y$  μπορεί να γίνει είτε υπολογίζοντάς την από τη μέση ισχύ του συστήματος [Khandkar, 2003], είτε εκτιμάται από τοπική διατμηματική παραμόρφωση χρησιμοποιώντας αναλογίες μεταξύ θερμοκρασίας και καταπόνησης [Nandan, 2007].

Όσον αφορά την πλαστική παραμόρφωση μακριά από τη διεπιφάνεια εργαλείου-δοκιμίου, η επίδρασή της στην τοπική παραμόρφωση μπορεί να εκτιμηθεί από τον τύπο

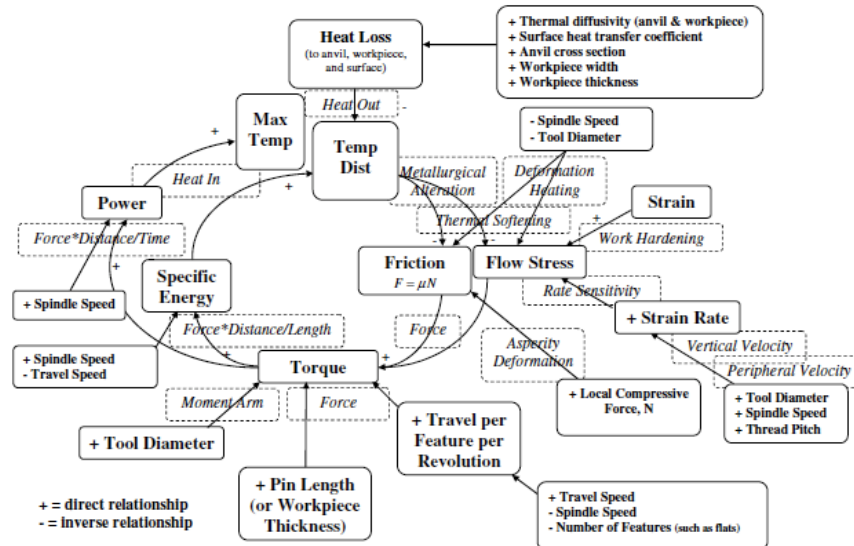
$$de_p = \beta \mu \phi dV$$

όπου β το μέρος της πλαστικής παραμόρφωσης που εκλύεται ως θερμότητα, μ το μη νευτώνιο ιξώδες του πλαστικοποιημένου υλικού και, τέλος, φ:

$$\phi = 2 \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right)^2$$

Τα τελευταία χρόνια γίνονται απόπειρες για τη δημιουργία μοντέλων της κατεργασίας. Στόχος, η όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση της διαδικασίας, ώστε να είναι εφικτή η αλλαγή των συνθηκών της κατεργασίας προκειμένου να επιτευχθούν επιθυμητά αποτελέσματα, όπως, η βελτίωση της αντοχής της σύνδεσης, η εξαφάνιση συνήθων ατελειών, και η μεταφορά μιας γνωστής κατεργασίας συγκόλλησης σε νέες συνθήκες.

Ένα τέτοιο μοντέλο προτείνεται στο [Colligan, 2007] από όπου και το παρακάτω διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση των μεταβλητών της κατεργασίας με τις φυσικές επιδράσεις τους, εστιάζοντας κυρίως στην παραγωγή θερμότητας.



ΣΧΗΜΑ 1.5 Σχέση παραμέτρων συγκόλλησης με τις επιδράσεις τους

Εξαιρετικά σημαντική για την κατανόηση της παραγωγής θερμότητας στην FSW, είναι η διπλή της φύση. Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, η θερμότητα παράγεται και λόγω τριβής αλλά και λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, αναλόγως με τον αν υπάρχει τοπική σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου με αποτέλεσμα τις δυνάμεις τριβής στην διεπιφάνεια, ή αν υπάρχει τοπικός αποχωρισμός. [Colligan, 2007]. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί μπορούν να συνυπάρχουν οποιαδήποτε στιγμή σε διαφορετικές περιοχές του εργαλείου. Αν και είναι αδύνατον να απομονωθεί πειραματικά το ποσοστό παραγωγής θερμότητας που αναλογεί στον κάθε μηχανισμό, έχουν αμφότεροι παρατηρηθεί πειραματικά και υπάρχουν αριθμητικά μοντέλα για τον καθένα [ Colligan, 2004, P.A. Colegrove, 2003].

#### 1.4. ΡΟΗ ΥΛΙΚΟΥ

Η ροή υλικού κατά την FSW αποτελεί μία εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία η οποία δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ακόμα. Η πρόσφατη έρευνα, μέσω πειραμάτων και μοντέλων, έχει καταστήσει κατανοητές πολλές πτυχές της ροής του υλικού κατά την FSW, κυρίως όσον αφορά τη διαδρομή της ροής στην πλευρά υποχώρησης και την πλευρά προώθησης. Παράλληλα όμως έχουν έρθει στην επιφάνεια πολλές ιδιαιτερότητες όπως η έλλειψη μίξης των πλαστικοποιημένων μετάλλων σε ατομικό επίπεδο και ο σχηματισμός ενδιαφέροντων μοτίβων της δομής οι οποίες μένει να ερευνηθούν περαιτέρω. Άλλωστε είναι κοινώς αποδεκτό πως επειδή η γεωμετρία του εργαλείου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη ροή του υλικού, οι γενικεύσεις από τις εκάστοτε παρατηρήσεις πρέπει να γίνονται με μεγάλη προσοχή.

Δύο είναι οι βασικές ιδιαιτερότητες της ροής στην FSW σε σχέση με τις συμβατικές μορφές συγκόλλησης. Πρώτον, η έλλειψη ατομικής σύνδεσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία μη ομοιογενούς μίγματος στη συγκόλληση διαφορετικών υλικών, εν αντιθέσει με την κοινή συγκόλληση σύντηξης, όπου ύστερα από τη στερεοποίηση το μίγμα γίνεται ομογενές ως προς τη σύνθεση. Δεύτερον το γεγονός ότι λόγω της μεσολάβησης του εργαλείου, δημιουργούνται νέες επιφάνειες σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους συγκόλλησης στερεάς κατάστασης.

Προκειμένου να κατανοηθεί η ροή του υλικού στην FSW έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Αφενός υπάρχουν οι πειραματικές, οι οποίες χωρίζονται στις τεχνικές ανίχνευσης, στην οπτικοποίηση της ροής κατά τη συγκόλληση ανόμοιων υλικών, και σε αυτές που βασίζονται στην παρατήρηση της μικροδομής. Αφεταίρου εσχάτως έχει αναπτυχθεί και η μοντελοποίηση της ροής του υλικού. Μία χρήσιμη σύνοψη των αποτελεσμάτων της κάθε προσέγγισης έχει γίνει στο [Mishra, 2005].

Οι περισσότερες πειραματικές μέθοδοι για την κατανόηση της ροής χρησιμοποιούν ένα υλικό ανίχνευσης (για παράδειγμα χαλκό) κατά την ευθεία της συγκόλλησης, ή συγκολλώντας ανόμοια υλικά. Ύστερα από τη συγκόλληση, η θέση του υλικού-σημάδι, βρίσκεται μέσω διαφόρων μεθόδων – όπως οι ακτίνες X ή η τομογραφία – και συγκρίνεται με την αρχική του θέση. Όμως έχουν υπάρξει ισχυρισμοί πως η εισαγωγή ενός υλικού ανίχνευσης στην ευθεία της συγκόλλησης μπορεί να παραλλάξει τη φύση της ροής λόγω διαφορετικών χαρακτηριστικών ροής ανάμεσα σε

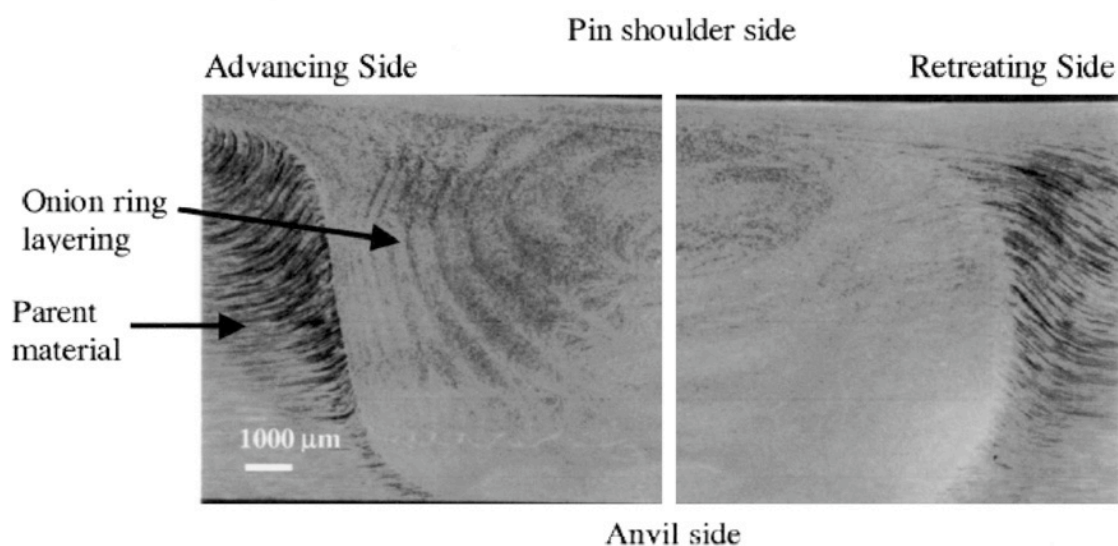


αυτό και τα μέταλλα βάσης, όπως και τις επιπρόσθετες (διε)πιφάνειες. Από την άλλη, τα συμπεράσματα από τη συγκόλληση ανόμοιων υλικών δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγκόλληση όμοιων. [Kumar, 2007]

Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικά χαλύβδινα σφαιρίδια η θέση των οποίων ύστερα από τη συγκόλληση βρίσκεται με ραδιογραφία. [Nandan, 2008]

Γενικά, η ροή λαμβάνει χώρα κυρίως στην πλευρά υποχώρησης, ενώ η σύνδεση σχηματίζεται από τη μεταφορά του πλαστικοποιημένου μετάλλου πίσω από το εργαλείο. Η μεταφορά του υλικού φαίνεται να επηρεάζεται από τριών ειδών ροές που αλληλεπιδρούν συγχρόνως: Πρώτον, υπάρχει περιστροφή μιας μάζας πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο, κίνηση που οφείλεται στην περιστροφή του εργαλείου και την συνεπακόλουθη τριβή ανάμεσα στο εργαλείο και το δοκίμιο. Δεύτερον, η περιστροφική κίνηση του πείρου τείνει να σπρώχνει υλικό προς τα κάτω κοντά στο πείρο προκαλώντας την κίνηση ίσης ποσότητας υλικού λίγο πιο μακριά. Τέλος, υπάρχει η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου – δοκιμίου.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της FSW είναι ο σχηματισμός μιας δακτυλιοειδούς δομής όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω( Σχήμα 1.6).



**Σχήμα 1.6:** Απεικόνιση της δακτυλιοειδούς δομής που παρατηρείται συχνά στην FSW

Μία σύνοψη της ροής υλικού και του μηχανισμού δημιουργίας της σύνδεσης έγινε από το [Kumar, 2007], στα πλαίσια μίας πειραματικής διαδικασίας η οποία

αναζητούσε τη σχέση της ροής και του εργαλείου. Σύμφωνα λοιπόν με τα συμπεράσματα αυτά, ο μηχανισμός της σύνδεσης στην FSW έχει ως εξής:

α) Όταν το εργαλείο βυθίζεται στο μέταλλο βάσης δημιουργείται ένα κοίλωμα, το σχήμα του οποίου καθορίζεται από το περίγραμμα του πείρου. Σε αυτό το στάδιο υπάρχει πλαστικοποιημένο υλικό γύρω από τον πείρο και κάτω από το περιουχένιο. Το πλαστικοποιημένο υλικό περιβάλλεται από ψυχρότερο μέταλλο βάσης στην ακτινική διεύθυνση, το περιουχένιο από πάνω και την πλάκα υποστήριξης από κάτω. Η διαδρομή της ροής καθορίζεται από την ανωτέρω διάταξη, την κατεύθυνση της περιστροφής του εργαλείου και την ταχύτητα.

β) Όταν το εργαλείο αρχίζει να κινείται κατά μήκος της επαφής, το υλικό από την εμπρόσθια άκρη πλαστικοποιείται σταδιακά και ρέει προς την οπίσθια άκρη μέσω της πλευράς υποχώρησης. Αυτό γίνεται με δύο τρόπους: τη ροή με οδηγό το περιουχένιο και τη ροή με οδηγό τον πείρο.

γ) Το υλικό που ρέει με οδηγό το περιουχένιο ρέει από την πλευρά υποχώρησης και κατευθύνεται προς το μέταλλο βάσης στην πλευρά προώθησης. Το υλικό που ρέει με οδηγό τον πείρο ρέει «φύλλο-φύλλο» γύρω από τον πείρο, και τα «φύλλα» στοιβάζονται στη ραφή.

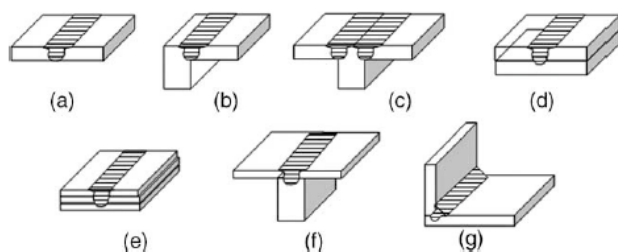
δ) Κατά τη μεταφορά υλικού αν η αντίσταση για να μεταφερθεί το υλικό στην ακολουθούσα σκμή είναι υψηλότερη από εκείνη του υλικού που ρέει έξω από το κοίλωμα, σχηματίζεται προεξοχή. Η προεξοχή σχηματίζεται στην πλευρά και οδηγεί σε ανεπαρκή πλήρωση υλικού στην πλευρά προώθησης

ε) Αν το μεταφερόμενο υλικό επαρκεί ώστε να πληρώσει το κοίλωμα, στη βέλτιστη θερμοκρασία και πίεση το υλικό που καθοδηγείται από το περιουχένιο, από τον πείρο και το μέταλλο βάσης, συγχωνεύονται.

στ) Η συγκόλληση παύει να είναι συμμετρική πάνω από μία κρίσιμη φόρτιση. Αυτό συμβαίνει διότι πραγματοποιείται ροή υλικού κάτω από την επιφάνεια λόγω της αλληλεπίδρασης της πλάτης με το μέταλλο βάσης.

### 1.5. ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

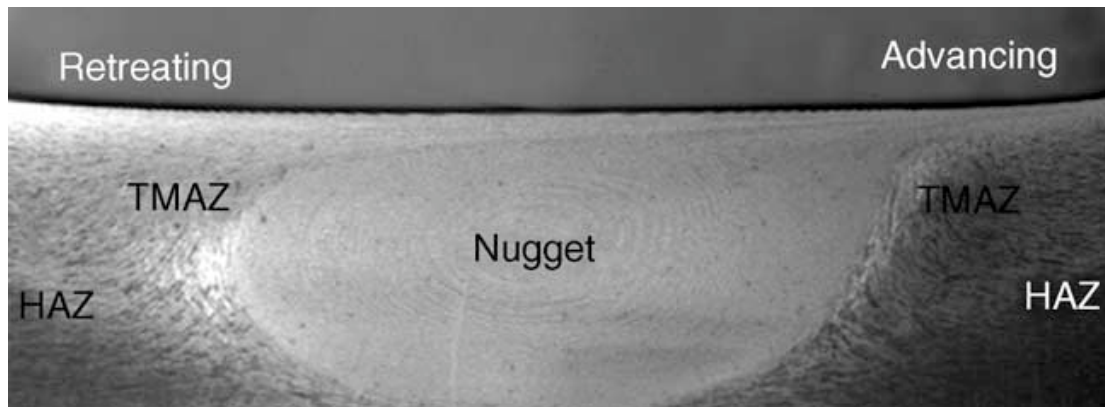
Οι πλέον συνήθεις και συμβατές γεωμετρίες συγκόλλησης με FSW, είναι η σύνδεση κατά συμβολή και η σύνδεση με επικάλυψη. Για τη συγκόλληση τέτοιων συνδέσεων δεν υπάρχει ανάγκη κάποιας ειδικής προετοιμασίας καθώς αν οι πλάκες είναι καθαρές δεν ενδιαφέρει ιδιαίτερα η κατάσταση των επιφανειών. Πέρα από αυτές τις συνδέσεις, έχουν συγκολληθεί επιτυχώς με FSW πλάκες με σύνδεση κατ'ακμή, με γωνιακή σύνδεση, με σύνδεση T. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται οι διάφορες γεωμετρίες συγκόλλησης που έχουν επιτευχθεί με FSW.



**Σχήμα 1.7.** Κύριες γεωμετρίες συγκόλλησης που έχουν επιτευχθεί με συγκόλληση δια τριβής και ανάδευση

## 1.6. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Από μικροκρυσταλλική άποψη ξεχωρίζουμε τρεις ζώνες: τη ζώνη συγκόλλησης (ΖΣ), την θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ) και τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Η μελέτη των μικροκρυσταλλικών αλλαγών κατά την FSW είναι σημαντική καθώς αυτές έχουν σημαντική επίδραση στις ιδιότητες ύστερα από τη συγκόλληση.



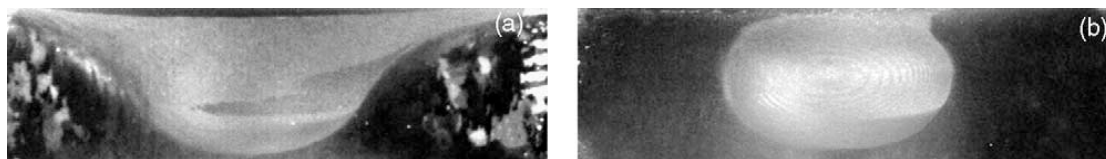
**Σχήμα 1.8:** Η διάταξη των ζωνών που προκύπτουν απ' την FSW

### 1.6.1. ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η πλαστική παραμόρφωση και η θέρμανση λόγω τριβής κατά την FSW οδηγούν στην περιοχή συγκόλλησης σε μικροδομή λεπτών ανακρυσταλλωμένων κόκκων. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες παρατηρείται η δακτυλιοειδής δομή. Στο εσωτερικό των κόκκων συνήθως υπάρχει χαμηλή πυκνότητα διαταραχών. Έχουν αναφερθεί όμως και περιπτώσεις όπου οι μικροί κόκκοι της περιοχής αυτής έχουν υψηλή πυκνότητα ορίων, διαταραχών και ατελειών.

### ΣΧΗΜΑ ΤΗΣ ΖΣ

Το σχήμα της περιοχής συγκόλλησης εξαρτάται από τη γεωμετρία του εργαλείου, τη θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου και τη θερμοκρασία του δοκιμίου. Τα διάφορα σχήματα που έχουν παρατηρηθεί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη: τις συγκολλήσεις με σχήμα «λεκάνης» και τις ελλειπτικές συγκολλήσεις, παραδείγματα των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9.



**Σχήμα 1.9:** Το σχήμα της ζώνης συγκόλλησης. (a): σχήμα «λεκάνης», (b) ελλειπτικό σχήμα.

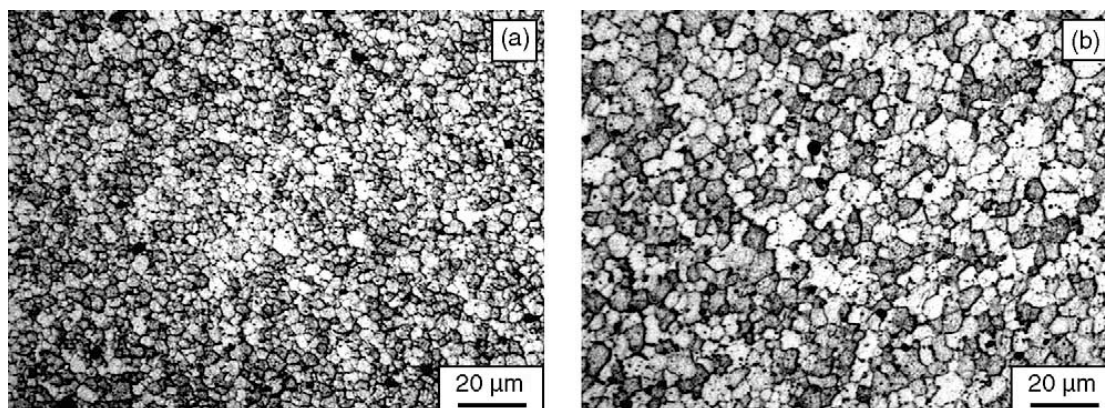
### ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΩΝ ΤΗΣ ΖΣ

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ανακρυστάλωση κατά την FSW οδηγεί στη δημιουργία λεπτών ισοαξονικών κόκκων στην περιοχή συγκόλλησης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος των κόκκων είναι οι παράμετροι της συγκόλλησης, η κάθετη δύναμη, η σύνθεση και η θερμοκρασία του δοκιμίου, η γεωμετρία του εργαλείου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαστάσεις των κόκκων για διάφορα κράματα αλουμινίου υπό διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης.

Material	Plate thickness (mm)	Tool geometry	Rotation rate (rpm)	Traverse speed (mm/min)	Grain size (μm)	Reference
7075Al-T6	6.35	–	–	127	2–4	[4]
6061Al-T6	6.3	Cylindrical	300–1000	90–150	10	[5]
Al-Li-Cu	7.6	–	–	–	9	[6]
7075Al-T651	6.35	Threaded, cylindrical	350, 400	102, 152	3.8, 7.5	[15]
6063Al-T4, T5	4.0	–	360	800–2450	5.9–17.8	[67]
6013Al-T4, T6	4.0	–	1400	400–450	10–15	[75]
1100Al	6.0	Cylindrical	400	60	4	[76]
5054Al	6.0	–	–	–	6	[77]
1080Al-O	4.0	–	–	–	20	[78]
5083Al-O	6.0	–	–	–	4	[78]
2017Al-T6	3	Threaded, cylindrical	1250	60	9–10	[79]
2095Al	1.6	–	1000	126–252	1.6	[80]
Al-Cu-Mg-Ag-T6	4.0	–	850	75	5	[81]
2024Al-T351	6.0	–	–	80	2–3	[82]
7010Al-T7651	6.35	–	180, 450	95	1.7, 6	[83]
7050Al-T651	6.35	–	350	15	1–4	[84]
Al-4Mg-1Zr	10	Threaded, cylindrical	350	102	1.5	[85]
2024Al	6.35	Threaded, cylindrical	200–300	25.4	2.0–3.9	[86]
7475Al	6.35	–	–	–	2.2	[87]
5083Al	6.35	Threaded, cylindrical	400	25.4	6.0	[88]
2519Al-T87	25.4	–	275	101.6	2–12	[89]

**Πίνακας 1:** Μέγεθος κόκκων στη ζώνη συγκόλλησης για διάφορα κράμματα αλουμινίου

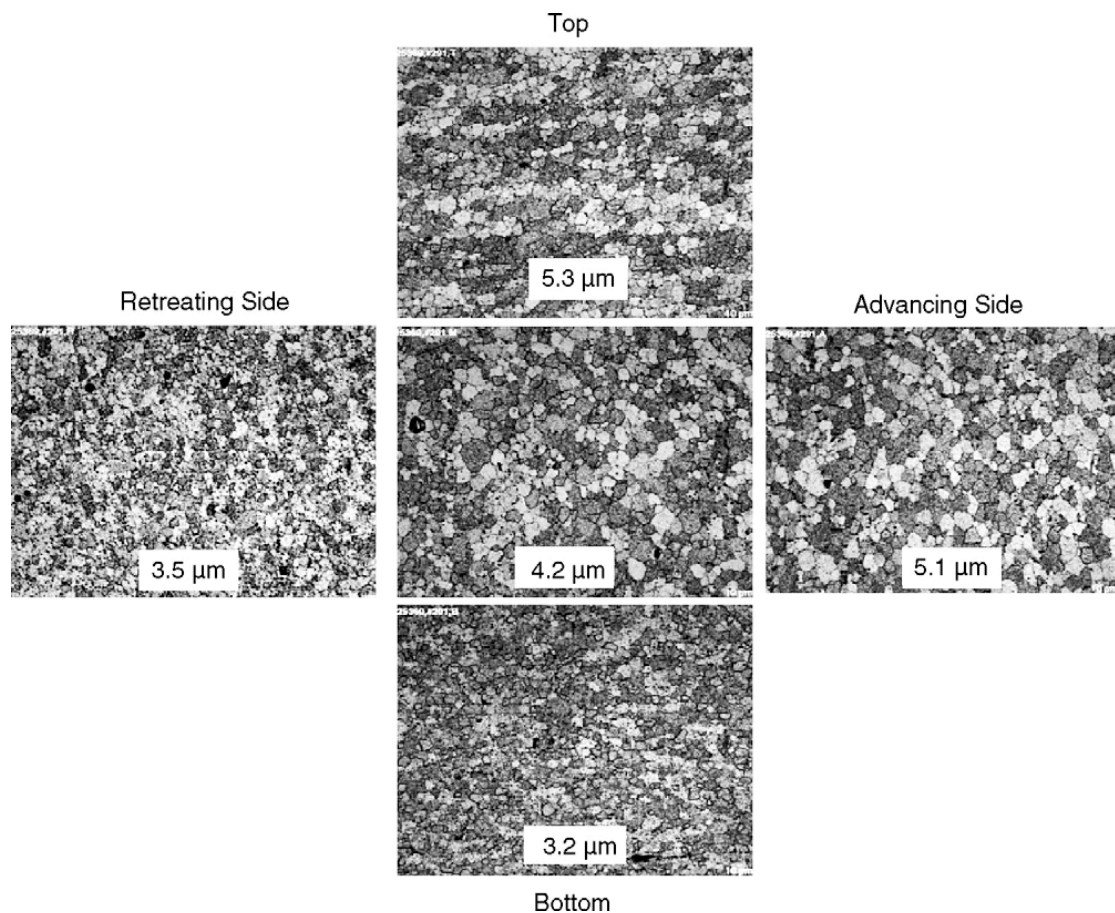
Σύμφωνα με τις γενικές αρχές της ανακρυστάλλωσης, το μέγεθος των κόκκων μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας ανόπτησης. Αυτό διαπιστώθηκε και μέσα από πειράματα, όπως με μείωση της αρχικής θερμοκρασίας του δοκιμίου μέσω ψύξης με υγρό άζωτο ή με ταχεία ψύξη πίσω από το εργαλείο μέσω μίας μίξης ξηρού πάγου, μεθανόλης και νερού καθώς επίσης και με τη μείωση της θερμοκρασίας λόγω τριβής με χρήση κωνικού πείρου. [Mishra, 2005]. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις σημειώθηκε μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας και συνεπώς μείωση του μεγέθους των κόκκων. Άλλες μελέτες δείχνουν μείωση του μεγέθους των κόκκων ως αποτέλεσμα της μείωσης του ρυθμού περιστροφής του εργαλείου για σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης ή τη μείωση του λόγου του ρυθμού περιστροφής προς την ταχύτητα συγκόλλησης. Δύο τέτοια παραδείγματα απεικονίζονται στις ακόλουθες μεγεθύνσεις. (Σχημα 1.10)



**Σχήμα 1.10:** Επίδραση των παραμέτρων συγκόλληση στο μέγεθος των κόκκων.(a) 350 rpm, 152 mm/min and (b) 400 rpm, 102 mm/min

Το μέγεθος των κόκκων τείνει να αυξάνεται κοντά στο πάνω μέρος της περιοχής συγκόλλησης και μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την κεντρική ευθεία της συγκόλλησης σε αμφότερες τις κατευθύνσεις κατά τρόπο που αντιστοιχεί στη διακύμανση της θερμοκρασίας εντός της περιοχής συγκόλλησης.

Στο Σχήμα 1.11 απεικονίζεται η διακύμανση του μεγέθους του κόκκου κατά τη συγκόλληση 7050Al



**Σχήμα 1.11:** Διακύμανση του μεγέθους των κόκκων ανάλογα με το βάθος της συγκόλλησης

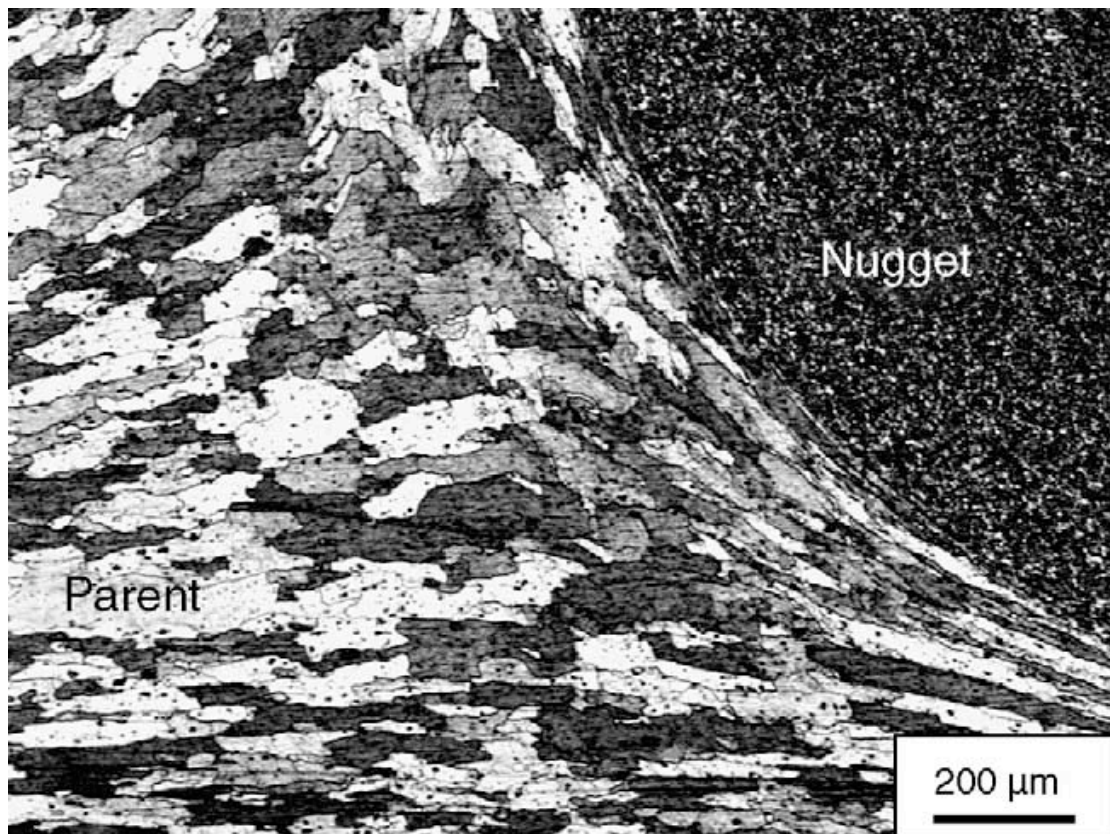
Αυτές διακυμάνσεις στο μέγεθος των κόκκων αποδίδονται στη διαφορά της θερμοκρασίας και στην έκλυση θερμότητας μέσα στην περιοχή συγκόλλησης.

#### 1.6.2. ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

Ένα από τα μοναδικά στοιχεία της FSW είναι η δημιουργία μίας μεταβατικής, θερμομηχανικά επηρεασμένης, ζώνης μεταξύ του μετάλλου βάσης και της περιοχής συγκόλλησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8. Η ΘΜΕΖ χαρακτηρίζεται από σημαντικά παραμορφωμένη δομή. Οι διαμήκεις κόκκοι του μετάλλου βάσης παραμορφώνονται γύρω από την περιοχή συγκόλλησης. Παρά την πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται η ΘΜΕΖ, δεν συμβαίνει πάντοτε ανακρυστάλλωση λόγω ανεπαρκούς παραμόρφωσης. Έχει όμως παρατηρηθεί η διάλυση



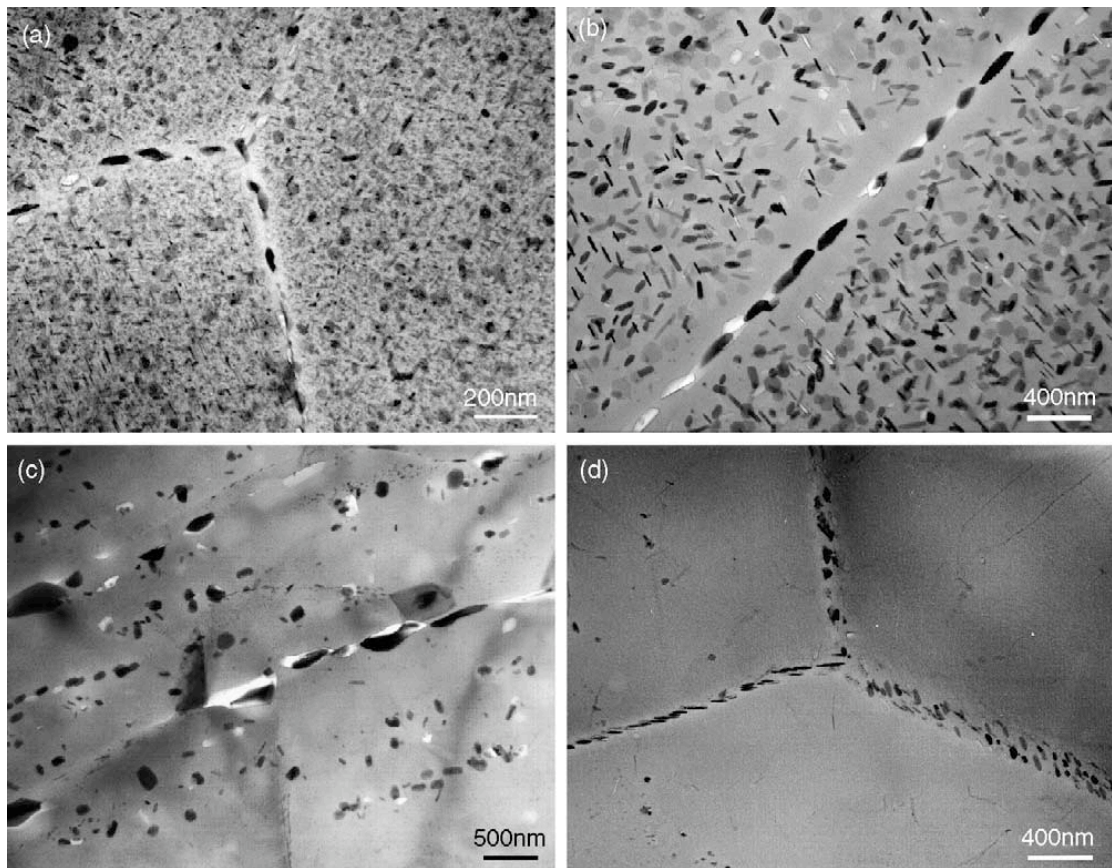
κατακρημνισμάτων λόγω έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία. Η τυπική μικροδομή κατά τη συγκόλληση 7075Al απεικονίζεται στο Σχήμα 1.12



Σχήμα 1.12 Μικροδομή της ΘΜΕΖ στη συγκλολληση 7075Α

### 1.6.3. ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

Η ΘΕΖ δεν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και διατηρεί τη μικροδομή του μετάλλου βάσης, όμως η έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά τη δομή των κατακρημνισμάτων. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται η δομή των κατακρημνισμάτων σε κάθε ζώνη.



**Σχήμα 1.13:** Μικροδομή των κατακρημνισμάτων. a) MB, b) ΘΕΖ, c) ΘΜΕΖ κοντά στη ΘΕΖ, d) ΘΜΕΖ κοντά στη ΖΣ



ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ  
 ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΧΑΛΚΟΣ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΑΛΚΟΥ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η συγκόλληση χαλκού με συμβατικές μεθόδους σύντηξης είναι δύσκολη λόγω της μεγάλης θερμικής διαχυτότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι είναι 10 έως 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή των χαλύβων. Όσον αφορά την FSW, η μεγάλη έκλυση θερμότητας δημιουργεί την ανάγκη για πολύ υψηλή θερμοκρασία κάτι που οδηγεί στη χρήση χαμηλής ταχύτητας συγκόλλησης. Επίσης η ανάγκη για υψηλές θερμοκρασίες δημιουργεί την απαίτηση για υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Οι έρευνες για τη συγκολλησιμότητα του χαλκού μέσω FSW έχουν μέχρι στιγμής επικεντρωθεί σε πλάκες καθαρού χαλκού πάχους 1.5 -50 mm καθώς επίσης και σε πλάκες ορείχαλκου. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται τα καταγεγραμμένα πειράματα FSW σε χαλκό με πληροφορίες σχετικά με το πάχος, το υλικό του εργαλείου και τις παραμέτρους συγκόλλησης.

Materials	Plate thickness (mm)	Tool materials	Rotation rate (rpm)	Traverse speed (mm/min)	References
Pure copper	3.0	Tool steel			[175,176]
Pure copper	10-25	Sintered tungsten-based alloy			[175,176]
Pure copper	10-50	High-temperature materials with specific geometry design			[175,176]
Oxygen-free copper	1.5-5.0	Sintered carbide ISO K40UF (WC-Co), Ni-based superalloy (Inconel 718), Cr-Mo-V type hot work tool steel (QRO90)	375-1250	250-400	[177]
Pure copper	4	-	1250	61	[178]
60/40 brass	2	-	250-1500	500-2000	[179]

**Πίνακας 2:** Κράματα χαλκού που έχουν συγκολληθεί με FSW

## 1.2 ΚΑΘΑΡΟΣ ΧΑΛΚΟΣ

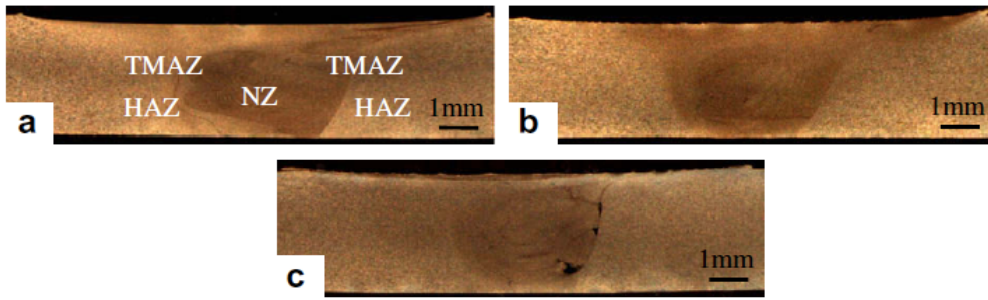
Καθώς δεν υπάρχουν πολλές πειραματικές μελέτες σχετικά με την FSW του χαλκού, τα όσα καταγράφουμε έχουν ένα εύρος σχετικά μικρό. Η κύρια μελέτη που λάβαμε υπόψη μας είναι αυτή του [Shen, 2009], εξού και τα συμπεράσματα που ακολουθούν επικεντρώνονται εκεί. Παράλληλα, θα γίνουν αναφορές και στα Hwang (2010) - C1100/ συγκόλληση κατά συμβολή/πάχος 3.1 mm/800 & 900rpm/30 & 50 mm/min- και Lee (2003) – 4mm/1250rpm/61mm/min.

Οι λόγοι που επικεντρωνόμαστε στο Shen (2009) είναι κυρίως δύο. Πρώτον ενώ στις υπόλοιπες μελέτες δεν παρατηρείται διακριτή ΘΜΕΖ, στο Shen αυτή διακρίνεται καθώς επίσης εξηγούνται και οι πιθανοί λόγοι που η ύπαρξη αυτής της ζώνης διέφυγε των υπόλοιπων μελετητών. Δεύτερον, είναι από τις λίγες μελέτες όπου το πείραμα γίνεται σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, προσπαθώντας να αποφύγει τη μείωση της αντοχής λόγω αύξησης των κόκκων.

### 1.2.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

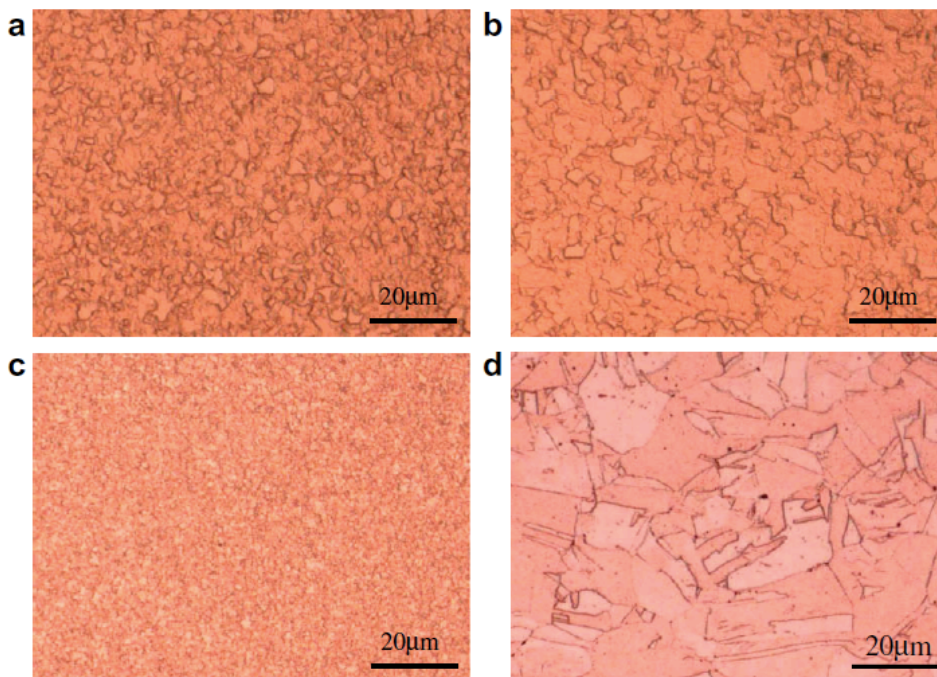
Στο [Shen, 2010] καταγράφεται μία από τις πιο ολοκληρωμένες πειραματικές μελέτες για την FSW καθαρού χαλκού, κυρίως όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας στη μικροδομή και συνεπώς στις ιδιότητες της συγκολλούμενης πλάκας. Κατά το πείραμα συγκολλήθηκαν πλάκες καθαρού χαλκού πάχους 3mm και εμβαδού 200 mm x 50 mm, σε συγκόλληση κατά συμβολή. Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σταθερή περιστροφή 600 rpm και ταχύτητες πρόωσης 20, 50, 100, 150 και 200 mm/min.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν ατέλειες στις χαμηλές ταχύτητες (μέχρι 100 mm/min) αλλά οι υψηλές ταχύτητες οδήγησαν στη δημιουργία διακένωσης. (Σχήμα 1.2.1).



**Σχήμα 1.2.1:** Τομή της συγκόλλησης χαλκού σε διάφορες ταχύτητες (a) 25 mm/min, (b) 100 mm/min, (c) 200 mm/min

Η συγκόλληση χαρακτηρίζεται από τις τρεις τυπικές ζώνες της FSW. Η μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης σε διάφορες ταχύτητες και η σύγκριση με τη μικροδομή του μετάλλου βάσης απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα.



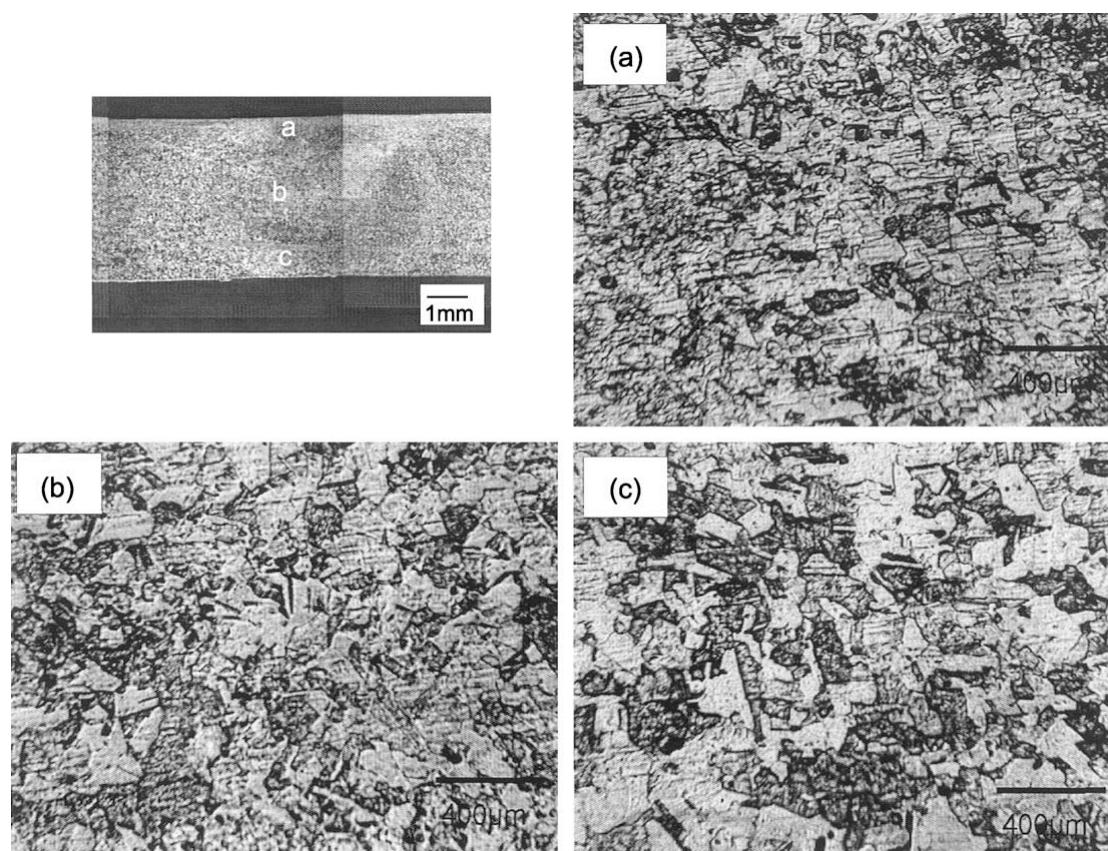
**Fig. 2.** Microstructure of NZ: (a) 25 mm/min, (b) 100 mm/min, (c) 200 mm/min, and (d) BM.

**Σχήμα 1.2.2:** Μικροδομή της ΖΣ του χαλκού σε διάφορες ταχύτητες

Παρατηρούμε πως υπάρχει αισθητή μείωση του μεγέθους των κόκκων, λόγω, προφανώς δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα οι κόκκοι γίνονται αρχικά τραχείς και ύστερα αρχίζουν να μειώνονται σε μέγεθος. Επίσης

παρατηρείται μείωση του πλάτους της ζώνης συγκόλλησης με την αύξηση της ταχύτητας.

Αντίστοιχη μικροδομή της ΖΣ παρατηρείται και στις υπόλοιπες μελέτες. Στο [Lee ,2004] αναφέρεται μέγεθος κόκκων στη ζώνη συγκόλλησης 100 $\mu\text{m}$  ενώ το μέταλλο βάσης έχει κόκκους 210 $\mu\text{m}$ . Επίσης καταγράφεται η διαφορά της δομής ανάμεσα στη «ρίζα», το μέσο και την επιφάνεια της συγκόλλησης, παρατηρώντας πως η δομή στην επιφάνεια είναι πιο λεπτόκοκκη, βλ ακόλουθο σχήμα.(Σχήμα 1.2.3)



**Σχήμα 1.2.3:** Μικροδομή της ΖΣ του χαλκού σε τρία επίπεδα, όπως αυτά ορίζονται στην εικόνα πάνω δεξιά

Η μικροδομή της ΘΕΖ χαρακτηρίζεται από μικρή αύξηση του μεγέθους των κόκκων σε σχέση με το μέταλλο βάσης, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 1.2.4).

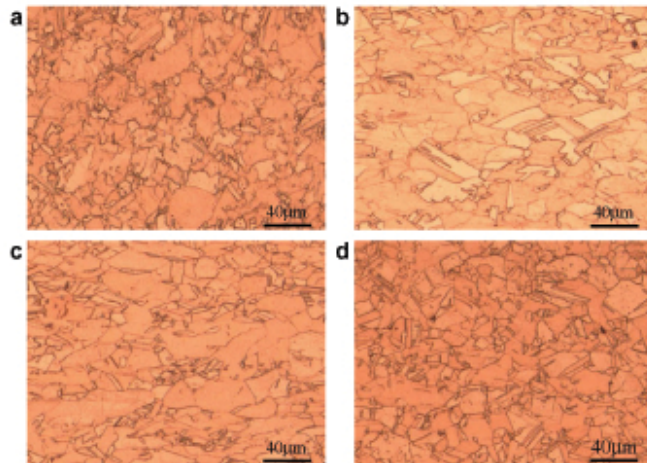


Fig. 3. Microstructure of HAZ: (a) 25 mm/min, (b) 100 mm/min, (c) 200 mm/min (a-c on the RS), and (d) 200 mm/min (AS).

#### Σχήμα 1.2.4: Μικροδομή της ΘΕΖ του χαλκού σε διάφορες ταχύτητες

Αυτή η ελαφρά αύξηση του μεγέθους των κόκκων στη ΘΕΖ αναφέρεται και στις υπόλοιπες μελέτες (στο [Lee, 2004] αναφέρεται μέγεθος κόκκων 230 µm) και αποδίδεται στην ανόπτηση που προκαλεί η θερμοκρασία τριβής.

Η ταχύτητα φαίνεται να μην επηρεάζει το μέγεθος των κόκκων στη ΘΕΖ, καθώς δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αλλαγή καθώς αυτή αυξάνεται. Τέλος οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι στην πλευρά υποχώρησης από ότι στην πλευρά προώθησης.

Τέλος, η ΘΜΕΖ απεικονίζεται ανά ταχύτητα συγκόλλησης στο Σχήμα 1.2.5

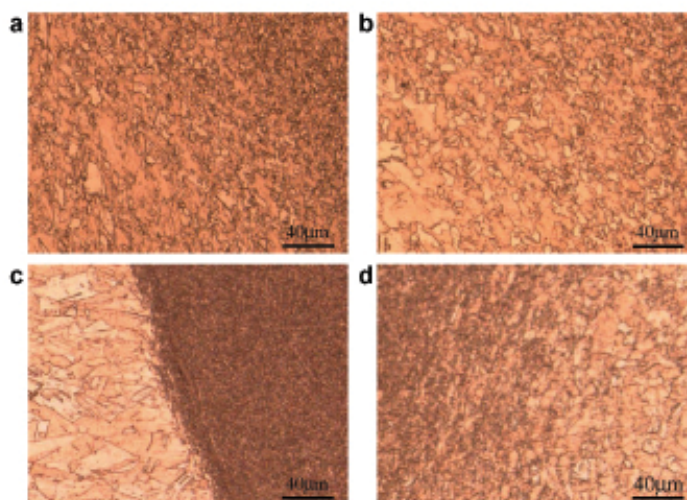


Fig. 4. Microstructure of TMAZ: (a) 25 mm/min, (b) 100 mm/min, (c) 200 mm/min (a-c on the AS), and (d) 200 mm/min (RS).

#### Σχήμα 1.2.5: Μικροδομή της ΘΕΖ του χαλκού σε διάφορες ταχύτητες

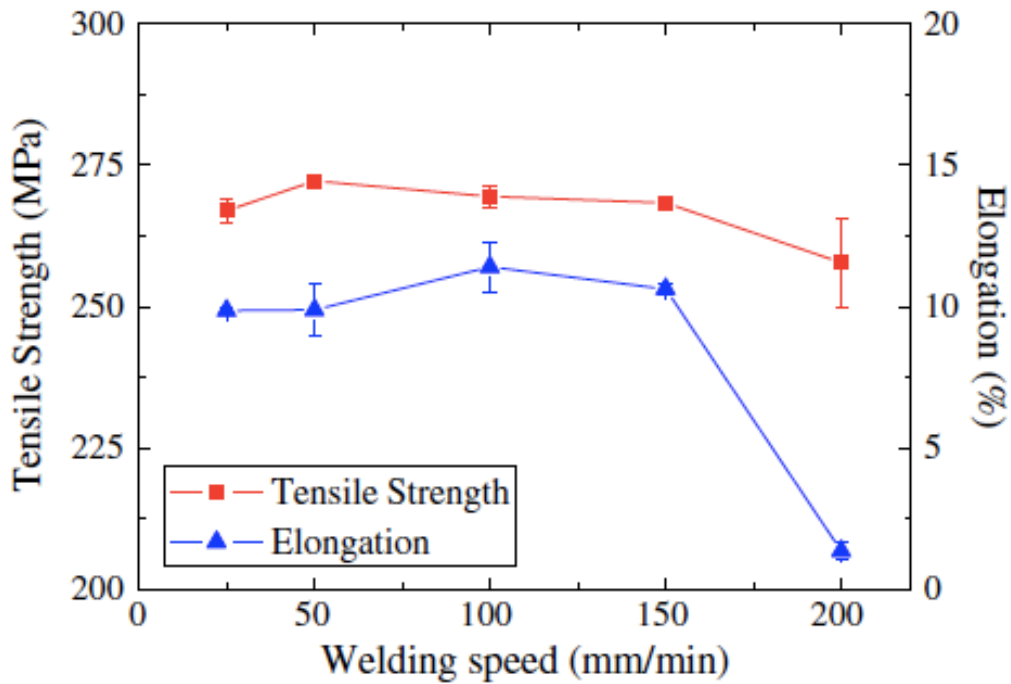


Από τις παρατηρήσεις της μικροδομής της ΘΜΕΖ προκύπτουν τρία κύρια συμπεράσματα. Πρώτον, η ΘΜΕΖ δεν είναι τόσο ξεκάθαρα διακριτή όσο στα κράματα αλουμινίου. Τα σύνορά της δε με τη ΖΣ, γίνονται πιο δυσδιάκριτα όσο μειώνεται η ταχύτητα. Συνεπώς ξεκάθαρη ΘΜΕΖ στην FSW χαλκού εντοπίζεται σε υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Επίσης όσο υψηλότερη η ταχύτητα τόσο πιο μικρό το πάχος της ΘΜΕΖ και αντιστρόφως. Δεύτερον, οι κόκκοι στην ΘΜΕΖ είναι μεγαλύτεροι από αυτούς της ΖΣ μεν, αλλά μικρότεροι από τους κόκκους στη ΘΕΖ. Τέλος, η ΘΜΕΖ διακρίνεται από την ΖΣ πιο ξεκάθαρα στην πλευρά προώθησης, ενώ στη πλευρά υποχώρησης η μετάβαση από τη μία ζώνη στην άλλη είναι δυσδιάκριτη, κάτι που απεικονίζει το μηχανισμό ροής υλικού στην FSW.

Τα παραπάνω εξηγούν και γιατί σε πολλές μελέτες η ΘΜΕΖ ταυτίζεται με την ΘΕΖ.

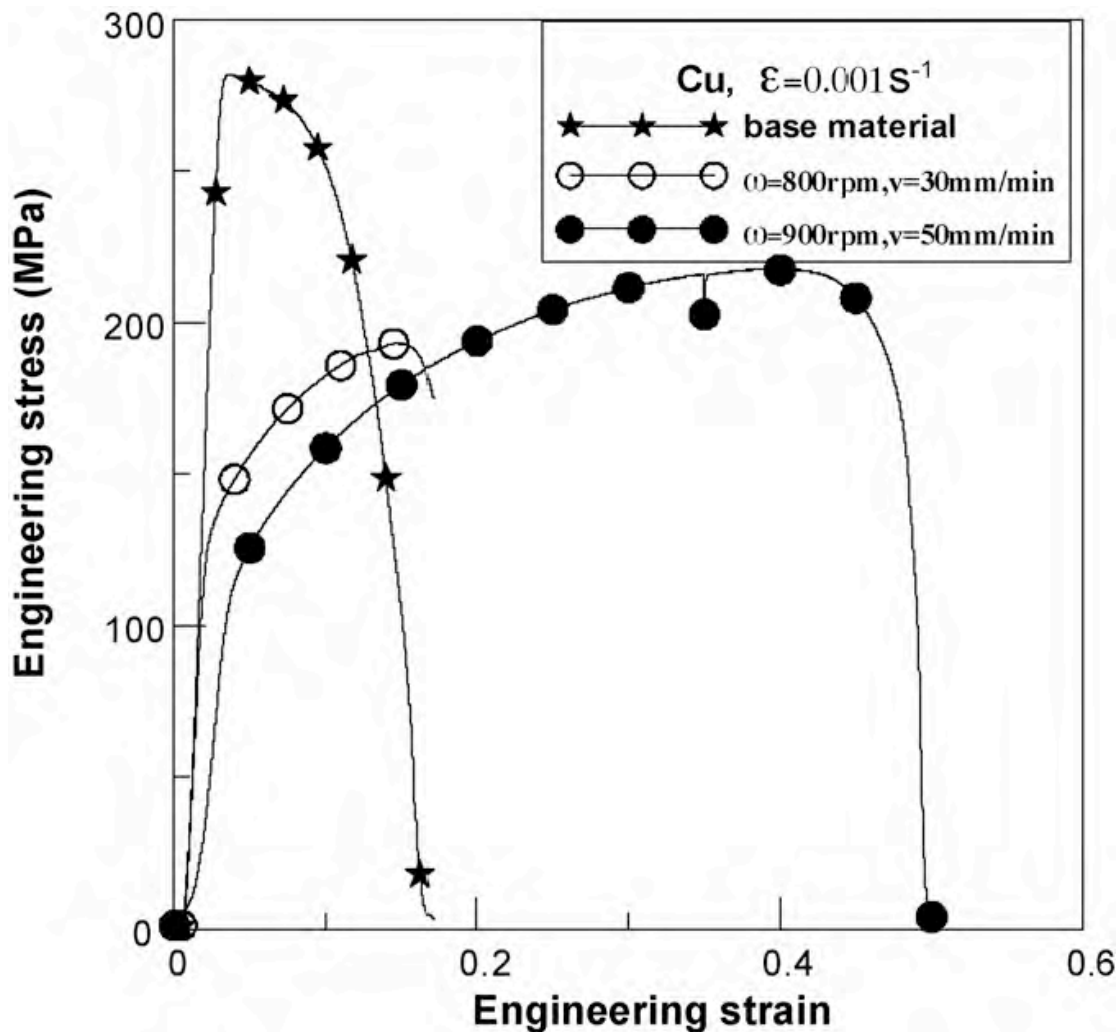
### 1.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Συνεχίζοντας την καταγραφή των συμπερασμάτων στο Shen, 2010 η αντοχή σε εφελκυσμό και η επιμήκυνση ακολουθούν παρεμφερείς διακυμάνσεις στις διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό παρατηρείται σε ταχύτητα 50 mm/min και βρίσκεται κοντά στα 275 MPa, ενώ η μέγιστη επιμήκυνση στα 100mm/min και είναι της τάξης του 13%. Αμφότερες αρχικά αυξάνονται και κατόπιν μειώνονται. Τα παραπάνω συμπεράσματα απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 1.2.6.)



**Σχήμα 1.2.6:** Αντοχή σε εφελκυσμό και επιμήκυνση της συγκόλλησης χαλκού

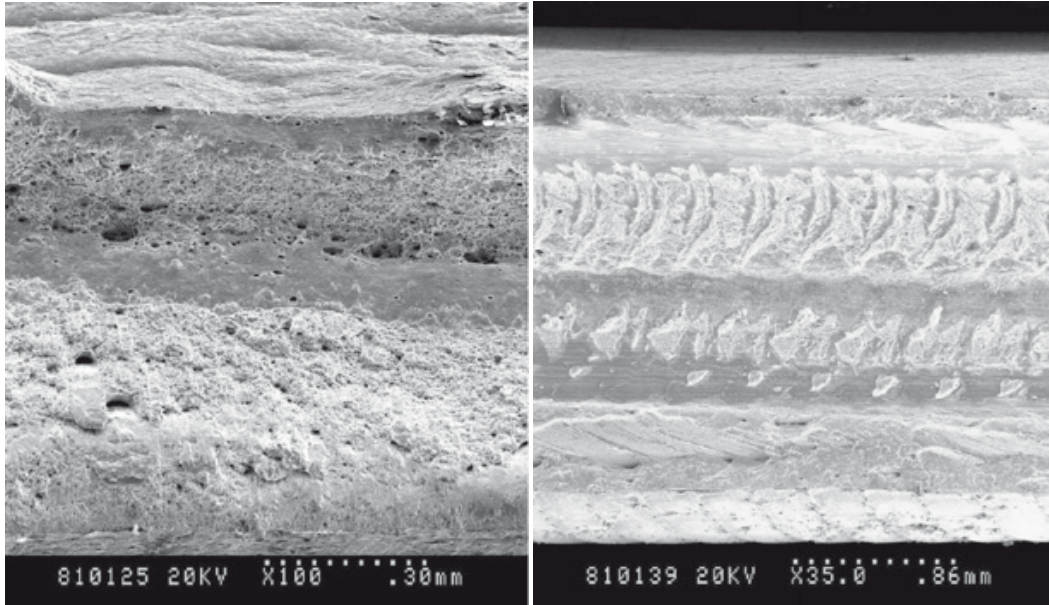
Αντίθετα, στις υπόλοιπες μελέτες [π.χ. Y.M. Hwang, 2010] παρατηρείται πτώση της αντοχής της τάξης του 60 – 70 % σε σχέση με το μέταλλο βάσης όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 1.2.7) τάσης-παραμόρφωσης, κάτι που οφείλεται στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής.



Σχήμα 1.2.7: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωση της συγκόλλησης χαλκού

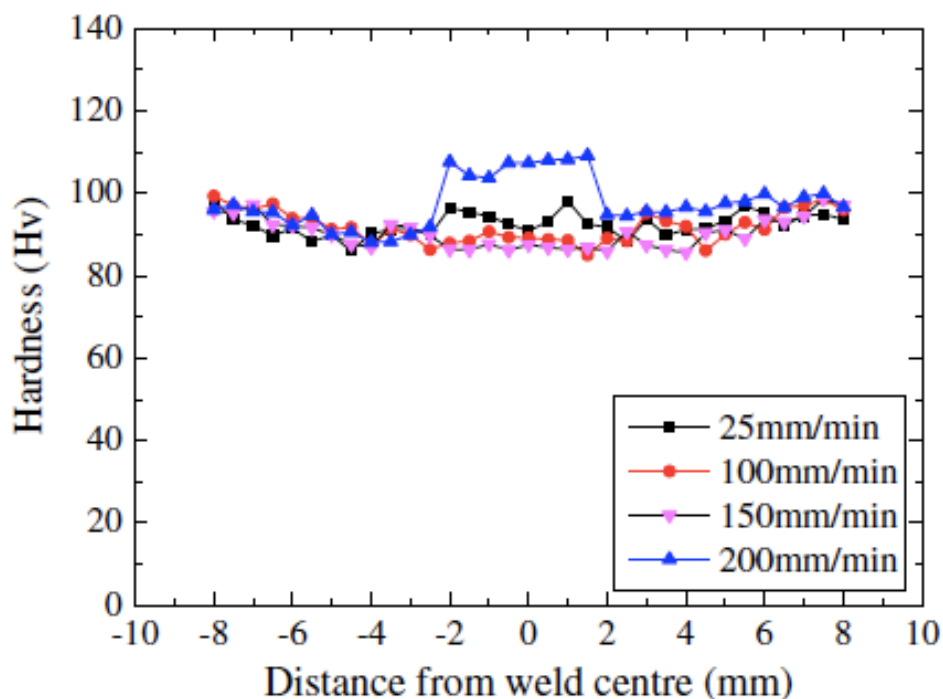
Όσον αφορά τη θέση της θραύσης, τα συμπεράσματα διακρίνονται στις μικρές και μεσαίες ταχύτητες (μέχρι 150 mm/min) και στις υψηλές (200 mm/min). Στις πρώτες παρατηρείται λαιμός γύρω από το σημείο της θραύσης, κάτι που αποτελεί ένδειξη της μακροπλαστικής παραμόρφωσης κατά τις δοκιμές εφελκυσμού. Η θραύση, σε αυτές τις ταχύτητες, διέρχεται από την ΘΜΕΖ, τη ΘΕΖ και το ΜΒ. Στις υψηλές ταχύτητες, δεν παρατηρείται λαιμός ενώ η θραύση λαμβάνει χώρα στη διακένωση που έχει δημιουργηθεί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Συγκρίνοντας τη χαμηλότερη ταχύτητα των 25 mm/min με την υψηλότερη των 200 mm/min, η επιφάνεια θραύσης στην πρώτη χωρίζεται σε δύο περιοχές ενώ στη δεύτερη σε τέσσερις. (Σχήμα 1.2.8).



**Σχήμα 1.2.8:** Η επιφάνεια θραύσης της συγκόλλησης χαλκού

Χρήσιμα στοιχεία για την αντοχή της συγκόλλησης μας δίνει η εγκάρσια κατανομή της σκληρότητας που παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα για διάφορες ταχύτητες (Σχήμα 1.2.9).

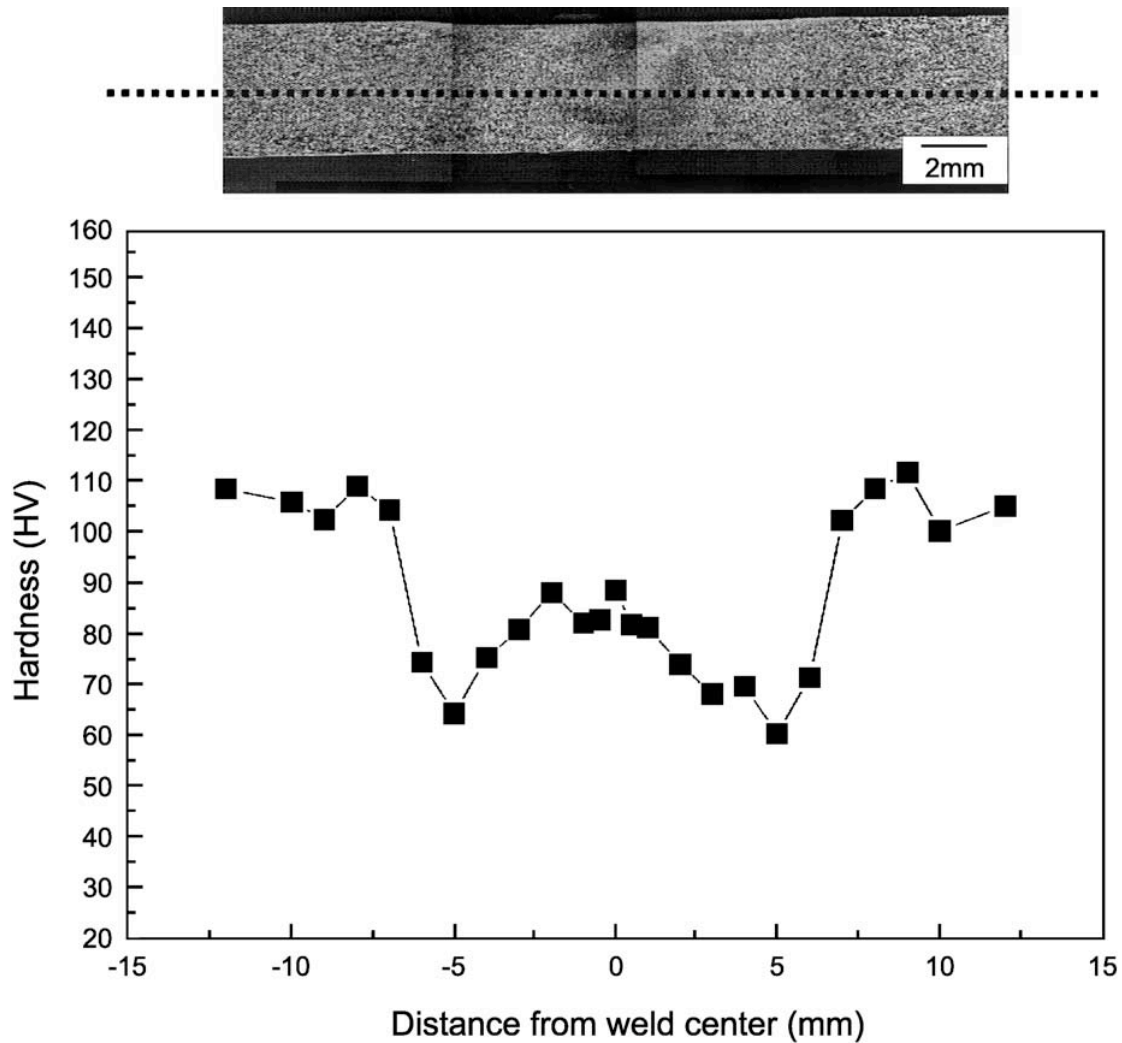


**Σχήμα 1.2.9:** Κατανομή της μικροσκληρότητας για διάφορες ταχύτητες

Παρατηρούμε τα εξής:

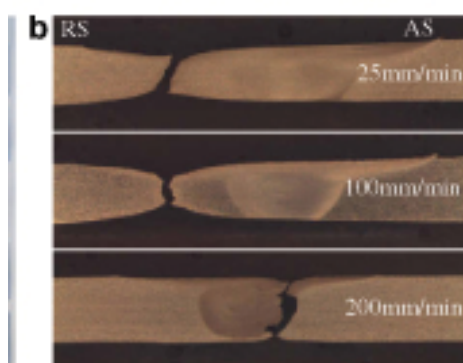
1. Η σκληρότητα της ΖΣ ακολουθεί τις αυξομειώσεις του μεγέθους των κόκκων (αρχικά μειώνεται και ύστερα αυξάνεται).
2. Στη μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα, η μέγιστη σκληρότητα παρατηρείται στη ΖΣ και σταδιακά μειώνεται σε αμφότερες τις πλευρές, ενώ στις ενδιάμεσες ταχύτητες έχουμε σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή.
3. Στις ενδιάμεσες ταχύτητες (100, 150 mm/min), η σκληρότητα στη ΖΣ είναι περίπου ίση με αυτή του μετάλλου βάσης.

Είναι εντυπωσιακό πως στις μελέτες όπου οι ταχύτητα περιστροφής ήταν σαφώς υψηλότερη παρουσιάστηκαν διαφορετικά αποτελέσματα, με κύριο την μείωση της σκληρότητας στη ζώνη συγκόλλησης (Σχήμα 1.2.10). Φαίνεται συνεπώς πως από μία ταχύτητα περιστροφής και ύστερα παρατηρείται δραστική μείωση στη σκληρότητα της ΖΣ.



Σχήμα 1.2.10: Κατανομή σκληρότητας

Αυτές οι παρατηρήσεις είναι διαφωτιστικές ως προς τα πιθανά σημεία παρουσίασης της θραύσης. Σε μέσες ταχύτητες (100, 150 mm/min) όπου το μέγεθος των κόκκων της ΘΕΖ είναι μεγαλύτερο και η ΖΣ πιο ομοιογενής, η θραύση είναι πιθανότερο να συμβεί στην ανομοιογενή περιοχή όπου συνυπάρχουν η ΘΜΕΖ, η ΘΕΖ και το ΜΒ.. Στις ακραίες ταχύτητες (25mm/min, 200 mm/min) η θραύση είναι πιθανότερο να συμβεί στις περιοχές χαμηλής σκληρότητας, δηλ. στην ΘΜΕΖ την ΘΕΖ ή το ΜΒ αν δεν υπάρχουν ατέλειες και μάλιστα στη ζώνη υποχώρησης λόγω μεγαλύτερου μεγέθους κόκκων, ή στην περιοχή της ατέλειας σε περίπτωση ύπαρξης τέτοιας (πχ, διακένωση στα 200 mm/min). Συμπερασματικά, σε συγκολλήσεις δίχως ατέλειες η κρίσιμη περιοχή για θραύση είναι αυτή που απαρτίζεται από τη ΘΜΕΖ, τη ΘΕΖ και το ΜΒ, και εντοπίζεται στη ζώνη υποχώρησης. Τρεις εγκάρσιες τομές του σημείου θραύσης απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα (1.2.12).



**Σχήμα 1.2.12:** Σημεία θραύσης ανάλογα με ταχύτες συγκόλλησης

### 1.3 ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ

Αν για την FSW του καθαρού χαλκού έχουμε λίγες μεν πειραματικές μελέτες, αρκετές δε για να εξάγουμε κάποια στοιχειώδη συμπεράσματα, τα βιβλιογραφικά στοιχεία για τον ορείχαλκο είναι ακόμα πιο περιορισμένα. Η σημασία της ανάπτυξης της έρευνας στα κράματα Cu-Zn είναι σημαντική για αντίστοιχους αλλά ακόμα ισχυρότερους από τη σημασία της εφαρμογής της μεθόδου στον καθαρό χαλκό, καθώς, οι μέθοδοι σύντηξης είναι προβληματικές για τους παρακάτω λόγους. Το ζήτημα της θερμικής διαχυτότητας που αναφέρθηκε προηγουμένως, ισχύει προφανώς και για τον ορείχαλκο. Επιπλέον, τα σημεία τήξης και βρασμού του χαλκού και του ορείχαλκου ανέρχονται στους 1083/2590 °C και 419/907 °C αντίστοιχα. Επίσης η θερμοκρασία τήξης του οξειδίου του ψευδαργύρου, αποτέλεσμα της εξάτμισης του ψευδαργύρου, είναι 1970°C. Ως εκ τούτου είναι πιθανό κατά τη συγκόλληση να εξατμιστεί ο ψευδάργυρος. Τα μεγέθη αυτά καθιστούν εξαιρετικά δυσχερή τη συγκόλληση του ορείχαλκου με συμβατικές μεθόδους σύντηξης, καθώς, ενδεικτικά, η θερμοκρασία συγκόλλησης στην TIG ανέρχεται στους 4200°C στο ηλεκτρόδιο και 3200°C στο δοκίμιο.

Η FSW έχει εφαρμοστεί κυρίως σε κράμα 70%Cu-30%Zn, σε πλάκες πάχους 3mm. Η χημική ανάλυση και οι ιδιότητες του εν λόγω κράματος παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Chemical composition of the brass (CuZn30 (CW508L) (EN 1652))

%Sn	%Pb	%P	%Mn	%Fe	%Ni	%Si	%Mg	%Al	%S	%Zn	%Cu
0.0010	0.0110	0.00213	0.00050	0.0146	0.00196	0.00251	0.00050	0.00050	0.00100	29.23	70.73

**Πίνακας 3:** Χημική σύσταση του κράματος CuZn30

Mechanical properties of base materials (CuZn30)

Material	Tensile strength $R_m$ (MPa)	Yield strength $R_{p0.2}$ (MPa)	Elongation (%)	$E$ (kN/mm <sup>2</sup> )
CuZn30 (CW508L)	360	215	67	110

**Πίνακας 4:** Μηχανικές ιδιότητες του κράματος CuZn30

Στο [Meran, 2006] εφαρμόστηκε υψηλή περιστροφή (2050 rpm) και μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα εξετάστηκαν οπτικά κατά ANSI/AWS καθώς στον

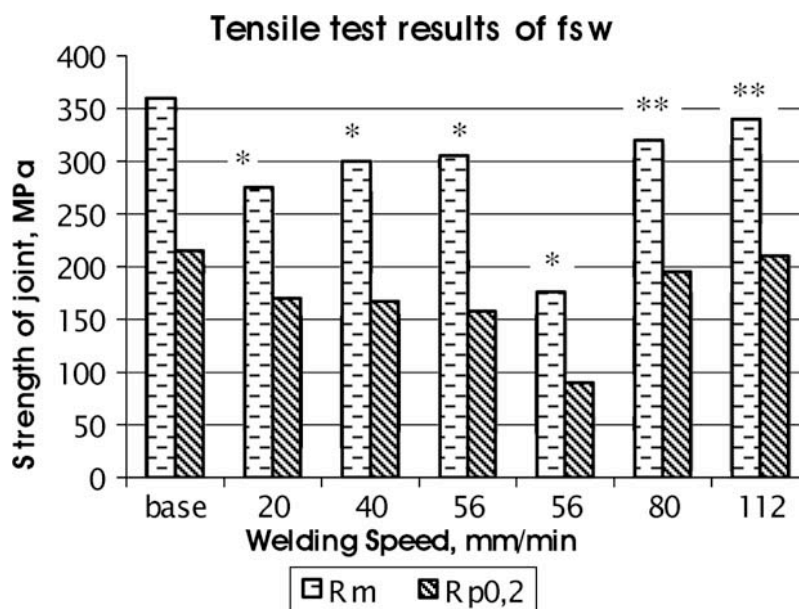


ορείχαλκο είναι σημαντική η διατήρηση του κιτρινωπού χρώματος και η λεία επιφάνεια. Παρουσιάστηκαν μία σειρά από ατέλειες:

1. Χαμηλή ποιότητα της επιφάνειας συγκόλλησης, αποτέλεσμα της ακατάλληλης επαφής και βύθισης του εργαλείου.
2. Ύπαρξη ζώνης μη ανάδευσης κοντά στη «ρίζα» της συγκόλλησης, αποτέλεσμα ανεπαρκούς βύθισης.
3. Εμφάνιση πορώδους μορφής τούνελ.
4. Μεταλλικές ακμές που εξέρχουν από την επιφάνεια.

Ως λύσεις για την εξάλειψη των ατελειών προσδιορίζονται η βελτίωση του ελέγχου της βύθισης του πείρου και οι σωστές ταχύτητες συγκόλλησης, με καλλύτερα αποτελέσματα να δίνουν οι μεγαλύτερες εξ' αυτών (89, 112 mm/min).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 1.3.1), και κρίνονται ικανοποιητικά αν και όχι συγκρίσιμα με την αντοχή του μετάλλου βάσης με την καλύτερη αντοχή να επιτυγχάνεται στα 112mm/min.



**Σχήμα 1.3.1:** Αντοχή σε εφελκυσμό συγκόλλησης ορείχαλκου  
Δοκιμές εφελκυσμού σε διαφορετικές ταχύτητες και περιστροφή 2050 rpm.

Rm: Όριο Αντοχής

Rp0.2: Όριο Διαρροής

\*: Θραύση στη ΖΣ

\*\* : Θραύση στη ΘΕΖ

Στη μικροδομή της συγκόλλησης δε διακρίνεται ΘΜΕΖ (κάτι που πιθανώς να οφείλεται στη μεγάλη περιστροφή), αλλά η ΘΕΖ, η ΖΣ και το ΜΒ (Σχήμα 1.3.2).



**Σχήμα 1.3.2** : Οι περιοχές συγκόλλησης του ορείχαλκου

Όσον αφορά τη σκληρότητα, τα καλύτερα αποτελέσματα προήλθαν από τη συγκόλληση στα 112mm/min.

Τέλος οι αναλύσεις της χημικής σύστασης της συγκόλλησης δείχνουν ότι κατά την FSW προστατεύεται η εξάχνωση του χαλκού και του ψευδαργύρου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΑΓΝΗΣΙΟ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

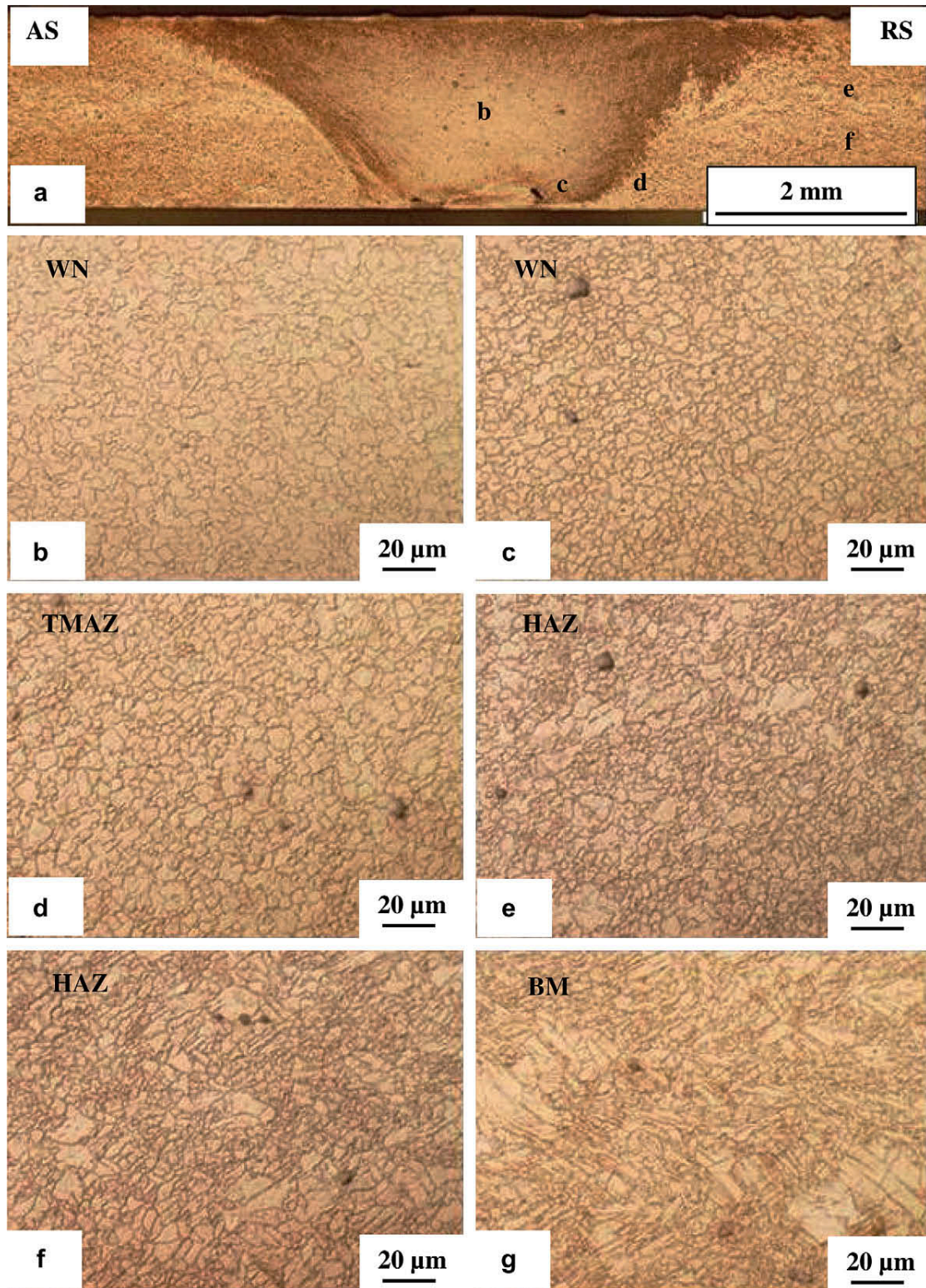
Τα κράματα μαγνησίου είναι εξαιρετικά χρήσιμα σε ποικίλες εφαρμογές κυρίως λόγω της δυνατότητας που δίνουν για κατασκευές με μειωμένο βάρος, λόγω του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος που τα χαρακτηρίζει. Η ανάγκη της διερεύνησης της συγκολλησιμότητας των κραμάτων αυτών με τη μέθοδο συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση συνίσταται σε μια σειρά λόγων. Η FSW δίνει τη δυνατότητα για σημαντική μείωση ατελειών που συναντάμε συχνά σε συγκολλήσεις σύντηξης όπως εγκλείσματα οξειδίου, πορώδες, ρωγμές. Εν γένει, ούσα μία συγκόλληση στερεάς κατάστασης δύναται να εξαλείψει ατέλειες που συνδέονται με τη στερεοποίηση.

Όπως και σε άλλα κράματα, η έρευνα δεν έχει προχωρήσει στο επιθυμητό βάθος και μάλιστα τα συμπεράσματα είναι συχνά αντιφατικά. Η έρευνα έχει εστιάσει στο κράμα AZ31, στη μικροδομή και τις ιδιότητες του οποίου θα περιοριστούμε στην παρούσα εργασία.

### 2.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων έχουν αναφερθεί περιπτώσεις τόσο μείωσης, όσο και αύξησής του στη ζώνη συγκόλλησης. [Wang, 2006, Satoshi, Afrin, 2007]. Αντίστοιχα έχει παρατηρηθεί αύξηση της σκληρότητας [Wang, 2006], ενώ αλλού παρατηρείται η σκληρότητα να μειώνεται [Satoshi, 2003]. Οι αποκλίσεις μεταξύ των διαφόρων ερευνών οφείλονται στις διαφορετικές παραμέτρους συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε πείραμα. Παρακάτω θα εκθέσουμε τις περιοχές συμφωνίας των διαφόρων παρατηρήσεων και θα αναφέρουμε τις διαφορές τους όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Η τυπική δομή των τριών ζωνών της FSW αναφέρεται σε όλες τις περιπτώσεις. Παρακάτω (Σχήμα 2.1) απεικονίζεται η δομή μίας συγκολλημένης πλάκας AZ31B-H24. [Cao, 2008] και η μικροδομή της κάθε ζώνης με παραμέτρους συγκόλλησης 20mm/s και 2000 rpm.

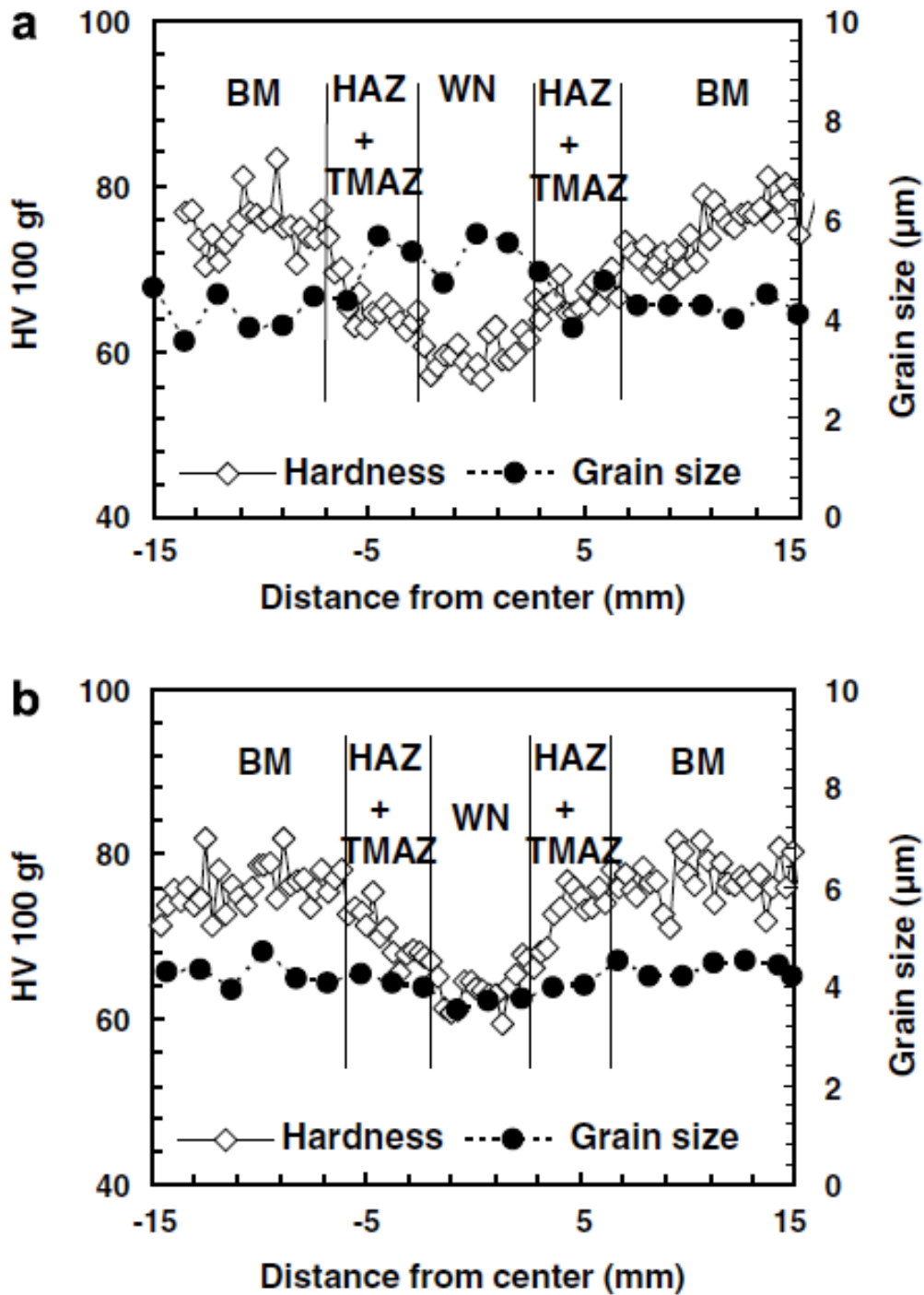


Σχήμα 2.1: Ζώνες και μικροδομή FSW Μαγνησίου (AZ31B-H24)

Σε όλες τις μελέτες οι κόκκοι τόσο στη ζώνη συγκόλλησης όσο και στην ΘΜΕΖ έχουν ισοαξονική δομή λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης ενώ μερική ανακρυστάλλωση παρατηρείται στη ΘΕΖ. Όσον αφορά το μέγεθός τους οι διαφορές ανάμεσα στις διάφορες μελέτες μπορούν να εξηγηθούν με τις διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης που εφαρμόζονται κάθε φορά. Όσο υψηλότερη η ταχύτητα τόσο μικρότερο το μέγεθος των κόκκων στη ΖΣ και στη ΘΜΕΖ, διότι οι υψηλές ταχύτητες οδηγούν σε μικρότερη θερμοκρασία και υψηλότερη παραμόρφωση με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος αύξησης του μεγέθους των κόκκων ύστερα από την ανακρυστάλλωση. Έτσι στο [Cao, 2008] με σταθερή περιστροφή 2000 rpm παρατηρείται μείωση του μεγέθους των κόκκων στη ΖΣ σε σχέση με το μέταλλο βάσης από την ταχύτητα των 20mm/min και πάνω. Επίσης στο [Afrin, 2007] όπου χρησιμοποιούνται σαφώς χαμηλότερες ταχύτητες, οι κόκκοι στη ΖΣ είναι μεν πάντοτε μεγαλύτεροι από αυτούς του MB αλλά μειώνονται σαφώς όσο η ταχύτητα αυξάνει. Συμπερασματικά, η λεπτόκοκκη δομή μπορεί να επιτευχθεί σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής της τάξης των 2000 rpm και ταχύτητες συγκόλλησης 20mm/s και άνω. Πιο συγκεκριμένα στο Cao (2008) αναφέρεται ότι η μείωση του μεγέθους των κόκκων συντελείται από 0.6 mm ανά περιστροφή και άνω.

Αυτό γίνεται σαφές αν δούμε τα παρακάτω διαγράμματα όπου απεικονίζεται το μέγεθος των κόκκων και η σκληρότητα σε κάθε ζώνη όπως αυτές προκύπτουν από την εξέταση των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν στη μικρότερη και τη μεγαλύτερη ταχύτητα στη συγκεκριμένη μελέτη (5 mm/sec και 30mm/sec αντίστοιχα).

(Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2: Μέγεθος κόκκων και κατανομή σκληρότητας στην FSW Μαγνησίου για (a) 5 mm/s και (b) 30 mm/s

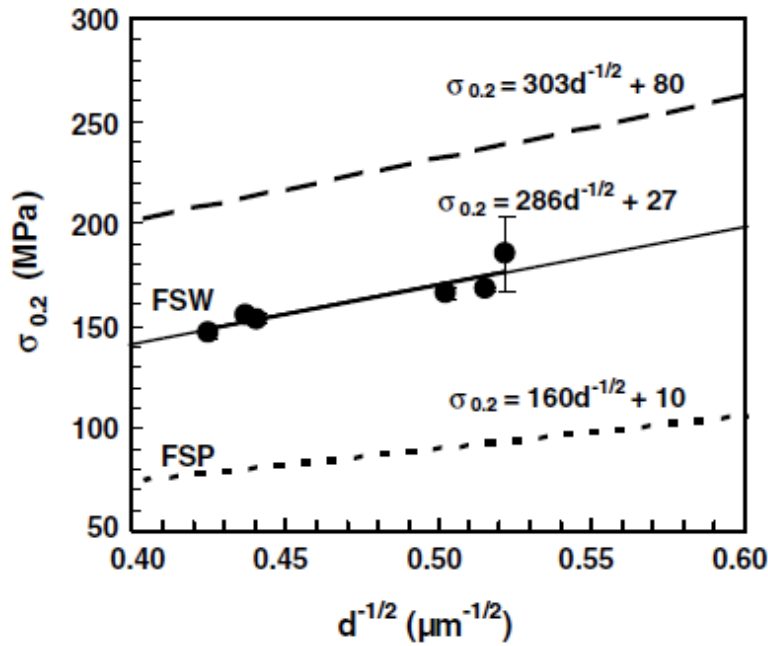
## 2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

### 2.3.1. Σκληρότητα

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τη μικροσκληρότητα αυτή μειώνεται καθώς προχωράμε προς την ΖΣ και η μείωσή της δεν επηρεάζεται σημαντικά από το τελικό μέγεθος των κόκκων. Βέβαια οι μεγάλες ταχύτητες και συνακόλουθα οι μικρότεροι κόκκοι οδηγούν σε μία μικρή αύξηση της σκληρότητας, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση που γίνεται σε άλλες μελέτες, καθώς και με τον τύπο Hall-Petch ότι πιθανή επίτευξη λεπτόκοκκης δομής θα είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη σκληρότητα. (βλ. [Afrin,2007]). Έτσι στην πλειοψηφία των αναφορών παρατηρείται σκληρότητα στη ΖΣ της τάξης του 80-85% της σκληρότητας του μετάλλου βάσης.

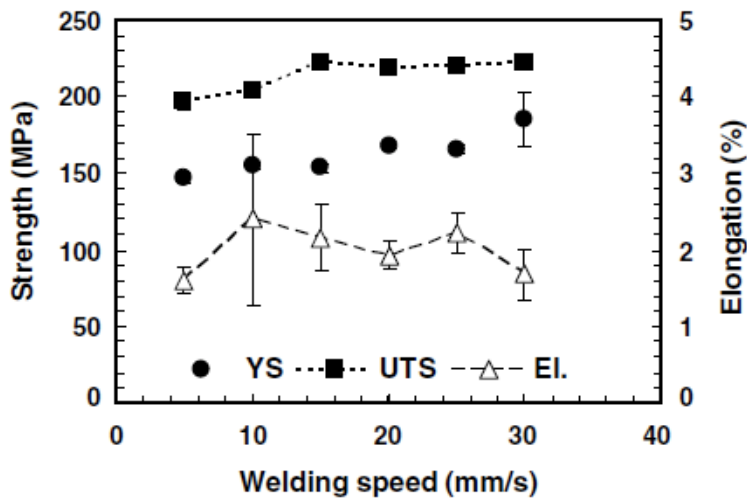
### 2.3.2. Εφελκυσμός

Τόσο η αντοχή σε εφελκυσμό όσο και το όριο διαρροής, όπως και η επιμήκυνση μειώνονται κατά την FSW του μαγνησίου. Η ταχύτητα φαίνεται όμως να αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθώς όσο αυξάνεται, τόσο υψηλότερη αντοχή παρατηρείται. Αυτό εξηγείται και αν δούμε τη σχέση μεταξύ ορίου διαρροής και μεγέθους κόκκων μέσα από την εξίσωση Hall-Petch. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Σχέση μεταξύ ορίου διαρροής και μεγέθους κόκκων

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση μεταξύ αντοχής και ταχύτητας και παρατηρούμε ότι το όριο διαρροής αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα, ενώ το όριο αντοχής αυξάνεται μεν αρχικά αλλά παραμένει σταθερό από μία ταχύτητα και ύστερα.





### Σχήμα 2.4: Επίδραση της ταχύτητας στις ιδιότητες εφελκυσμού

Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τη σχέση της αντοχής ύστερα από τη συγκόλληση σε δύο διαφορετικές καταστάσεις με την αντοχή του μετάλλου βάσης. Εφόσον και στις δύο μελέτες το κράμα είναι πανομοιότυπο (AZ31B-H24) μπορούμε να πούμε τα εξής: Η μέγιστη καταγεγραμμένη αντοχή σε εφελκυσμό είναι της τάξης του 70-75%, και εφόσον σταθεροποιείται από μία ταχύτητα και ύστερα μπορούμε, με τα υπάρχοντα δεδομένα να θεωρήσουμε την αντοχή αυτή βέλτιστη. Το όριο διαρροής, φτάνει το 90%, μπορούμε όμως να υποθέσουμε ότι συγκόλληση σε υψηλότερη ταχύτητα θα έδινε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, αφού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μειώνεται το μέγεθος των κόκκων.

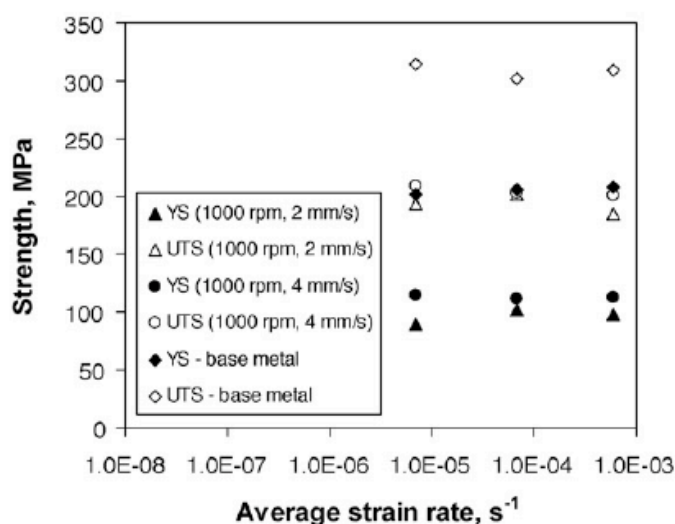
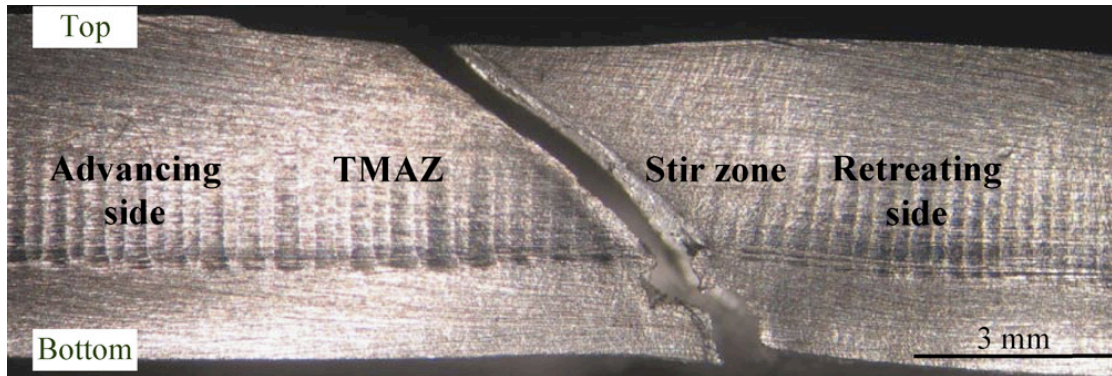


Fig. 11. Yield strength and ultimate tensile strength as a function of the strain rate for the base metal and friction stir welded samples IV (1000 rpm, 2 mm/s) and VI (1000 rpm, 4 mm/s) of AZ31B-H24 alloy.

### Σχήμα 2.5: Όριο διαρροής και αντοχής σε εφελκυσμό

### Θραύση

Όσον αφορά τη θραύση σε εφελκυσμό, οι περισσότερες αναφορές αναφέρουν πως αυτή συμβαίνει στην πλευρά προώθησης, στο σύνορο μεταξύ ΖΣ και ΘΜΕΖ



Σχήμα 2.6: Σημείο θραύση συγκόλλησης μαγνησίου

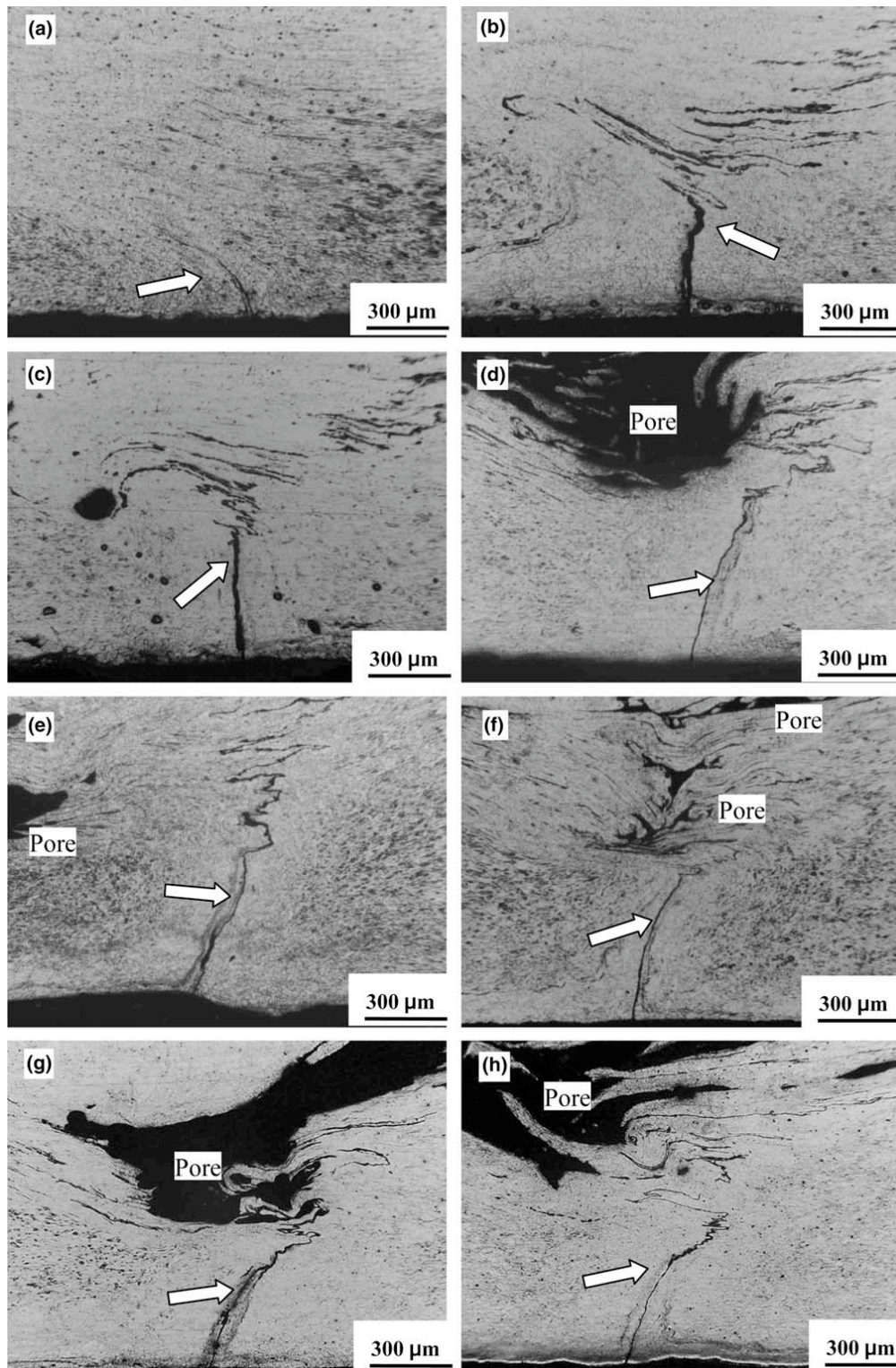
## 2.4 ΑΤΕΛΕΙΕΣ

Οι κυριότερες ατέλειες που έχουν αναφερθεί σχετικά με την FSW κραμάτων μαγνησίου είναι το πορώδες και οι ρωγματοειδείς ατέλειες. Η πλειοψηφία των μελετών συσχετίζουν άμεσα το πορώδες με την ταχύτητα συγκόλλησης, καθώς η έκτασή του αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Παρακάτω απεικονίζεται το πορώδες κατά τη συγκόλληση σε ταχύτητες από 40 έως 600 mm/min και σταθερή περιστροφή 1000 rpm. Παρατηρούμε ότι το πορώδες αρχίζει να εμφανίζεται στα 200 mm/min σε ένα λόγο ταχύτητας/ περιστροφής δηλαδή 0.2mm/r.

Πέρα από το πορώδες, έχουν παρατηρηθεί ρωγματοειδείς ατέλειες. Η συνηθέστερη ρωγματοειδής ατέλεια στην FSW είναι ο λεγόμενος «δεσμός φιλιού», ο οποίος προκύπτει λόγω της παγίδευσης οξειδίων από την επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτή η επιφάνεια στα κράματα μαγνησίου συνίσταται σε ξεχωριστούς κρυστάλλους

μαγνησίας, οι οποίοι μοιάζουν με τραχύ γυαλόχαρτο. Η παρουσία τέτοιου είδους τραχείας επιφάνειας κόκκων μπορεί να δυσκολέψει τη δημιουργία μεταλλικών δεσμών [Cao, 2008], με αποτέλεσμα τη δημιουργία του δεσμού φιλιού.

Τέτοιου τύπου ατέλειες έχουν παρατηρηθεί σε υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Όμως οι γραμμικές ρωγματοειδείς ατέλειες που έχουν παρατηρηθεί σε χαμηλότερες ταχύτητες, μάλλον δεν ταξινομούνται σε αυτήν την κατηγορία καθώς η «χαλαρή δομή» που τις προκαλεί οφείλεται στην ανεπαρκή ροή.



**Σχήμα 2.7.** Ατέλειες σε διάφορες ταχύτητες. Απ' την εικόνα (a) – (h) οι ταχύτητες είναι 40, 120, 150, 200, 250, 300, 400 και 600 mm/min. Το βέλος υποδικνύει τη διεύθυνση της συγκόλλησης

Σε μελέτες, όπως του [Cao, 2008], η μέγιστη επιφάνεια του πορώδους προκύπτει στα 20mm/sec- 2000rpm, δηλ σε λόγο 0.6/rpm, ακολουθώντας αυξητικές τάσεις αλλά κατόπιν μειώνεται.

Το πορώδες συνήθως αποδίδεται σε απώλεια υλικού όταν εμφανίζεται κοντά στην επιφάνεια, και σε ανεπαρκή ροή υλικού και μείξη όταν εμφανίζεται κοντά στη «ρίζα» της συγκόλλησης. Έχει παρατηρηθεί ότι η ανεπαρκής ροή οφείλεται σε πολύ υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης ή σε λανθασμένο συνδυασμό ταχύτητας και περιστροφής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΙΤΑΝΙΟ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΙΤΑΝΙΟΥ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Αν και το τιτάνιο και τα κράματά του θεωρούνται συγκολλησίμα με μεθόδους σύντηξης, τα προϊόντα της συγκόλλησης δεν έχουν πάντα το επιθυμητό αποτέλεσμα. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, προκαλείται παραμόρφωση του υλικού κατά τη σύντηξη. Επίσης τέτοιες μέθοδοι στο τιτάνιο προκαλούν συχνά πορώδες και οξειδία. Συνεπώς, και σε αυτή την κατηγορία κραμάτων θεωρείται σημαντική η έρευνα γύρω από τη συγκολλησιμότητα τους με τη μέθοδο FSW.

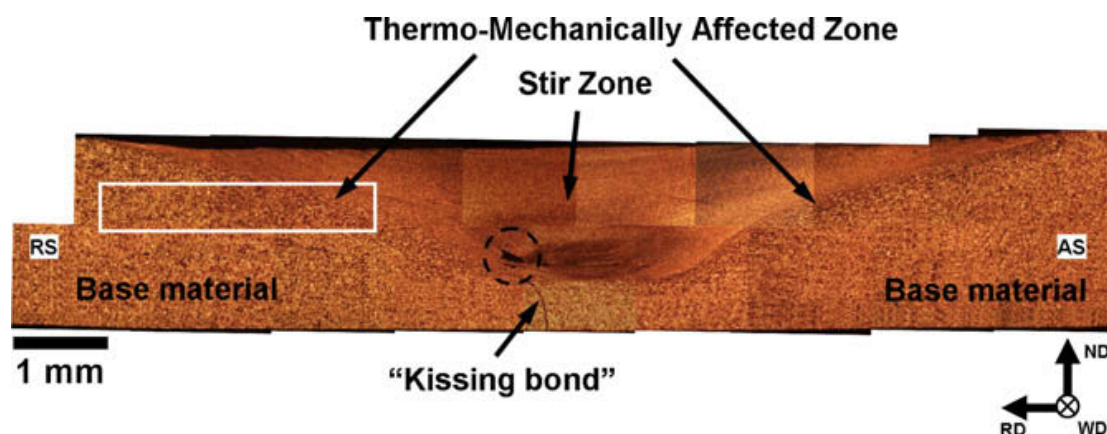
Το τιτάνιο έχει υψηλό σημείο τήξης συγκρινόμενο με τον χάλυβα, συνεπώς απαιτούνται εργαλεία ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης διαθέτει δομή μέγιστης πυκνότητας εξαγωνικού (hcp), σταθερή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία από τους 880°C και πάνω μετασχηματίζεται σε δομή κυβικού χωροκεντρομένου (bcc). Αυτός ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός φάσης μπορεί να λάβει χώρα κατά την FSW καθιστώντας δύσκολη τη δημιουργία ποιοτικών συγκολλήσεων. Πλέον, με την ανάπτυξη των εργαλείων υπάρχει η δυνατότητα για επιτυχή συγκόλληση κραμάτων τιτανίου. Γενικά πολλές μελέτες (ενδεικτικά, [Fujii, 2009]) δείχνουν ότι μπορούν να επιτευχθούν βελτιωμένες ιδιότητες μέσω FSW, όμως υπάρχει ακόμα έλλειψη στην έρευνα γύρω από τις παραμέτρους συγκόλλησης και την επιρροή τους στη μικροδομή και τις ιδιότητες.

Πέρα από το καθαρό τιτάνιο ειδική αναφορά θα γίνει στο κράμα Ti-6Al-4V. Η υψηλή αντοχή και η εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση του συγκεκριμένου κράματος, το καθιστά πολύ χρήσιμο σε βιομηχανικές εφαρμογές, και η FSW μπορεί να βελτιώσει τις συγκολλήσεις αποφεύγοντας προβλήματα μικροδομής, παραμενουσών τάσεων και υψηλής παραμόρφωσης που προκύπτουν από τη συγκόλληση με μεθόδους σύντηξης.

## 3.2 ΚΑΘΑΡΟ ΤΙΤΑΝΙΟ

### 3.2.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

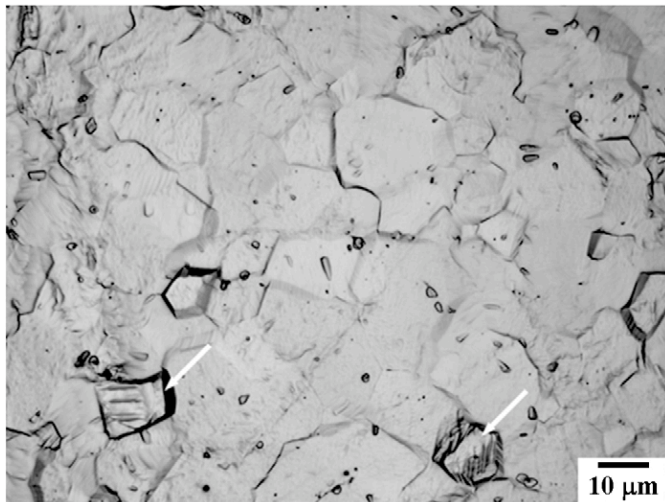
Οι πλειοψηφία των μελετών ξεχωρίζει τρεις διακριτές ζώνες στην FSW του τιτανίου. Τη ΖΣ, το MB και τη ΘΜΕΖ.



Σχήμα 3.1: Ζώνες της FSW τιτανίου

### ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η δομή της ΖΣ αποτελείται από λεπτούς ισοαξονικούς κόκκους. Στο Fujji (2009) αναφέρεται μέσο μέγεθος κόκκου 10μm. Επίσης στην πλειοψηφία των μελετών γίνεται αναφορά για διδυμίες, οι οποίες στην ακόλουθη φωτογραφία από οπτικό μικροσκόπιο, σημειώνονται με λευκό βέλος. (Σχήμα 3.2)



**Σχήμα 3.2:** Μικροδομή της ΖΣ του τιτανίου. Τα λευκά βέλη σημειώνουν τις διδυμίες

Σε μία ευρεία γκάμα από εξεταζόμενες ταχύτητες, (50, 100, 200,300mm/min) στα 200 rpm οι μέγιστες θερμοκρασίες σύμφωνα με την ίδια μελέτη είναι 843, 694, 555, 498 °C αντίστοιχα, συνεπώς δεν υπάρχει μετασχηματισμός φάσης. Σε όλες τις παραπάνω ταχύτητες από το μέγεθος των κόκκων συνάγεται ότι λαμβάνει χώρα δυναμική ανακρυστάλλωση. Όσον αφορά τη σχέση της ταχύτητας με το μέγεθος των κόκκων, αυτό μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, κάτι εμφανές και στο Σχήμα 3.3 (TEM –transmission electron microscopy).



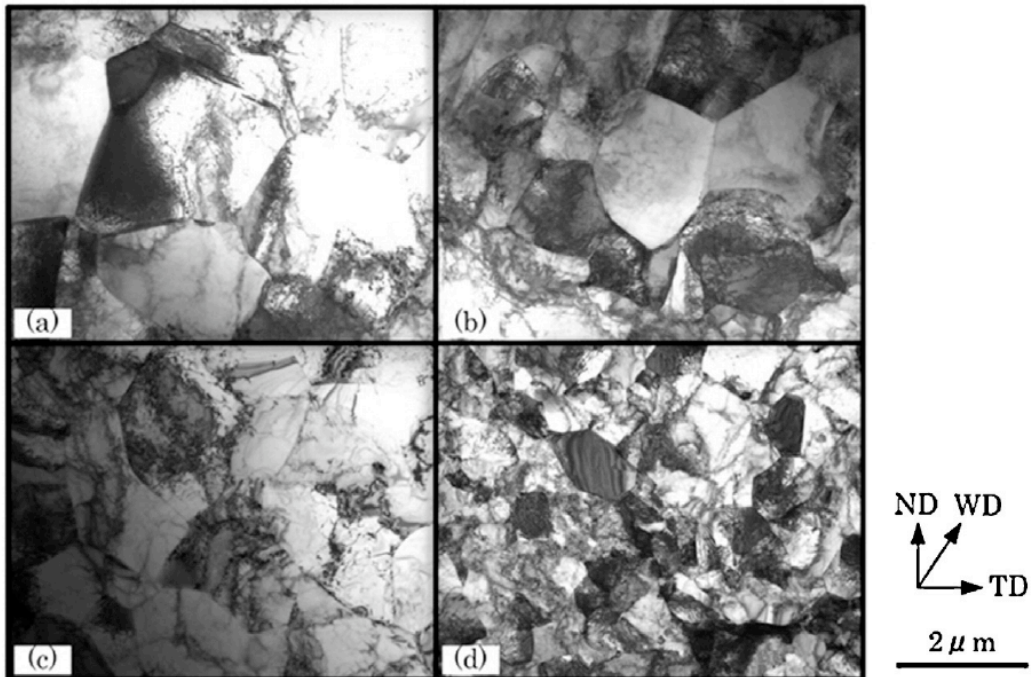


Fig. 4. TEM images showing the microstructure of the stir zone at welding speed of (a) 50 mm/min; (b) 100 mm/min; (c) 200 mm/min; and (d) 300 mm/min.

### Σχήμα 3.3: Μέγεθος κόκκων στηs ΖΣ για διάφορες ταχύτητες

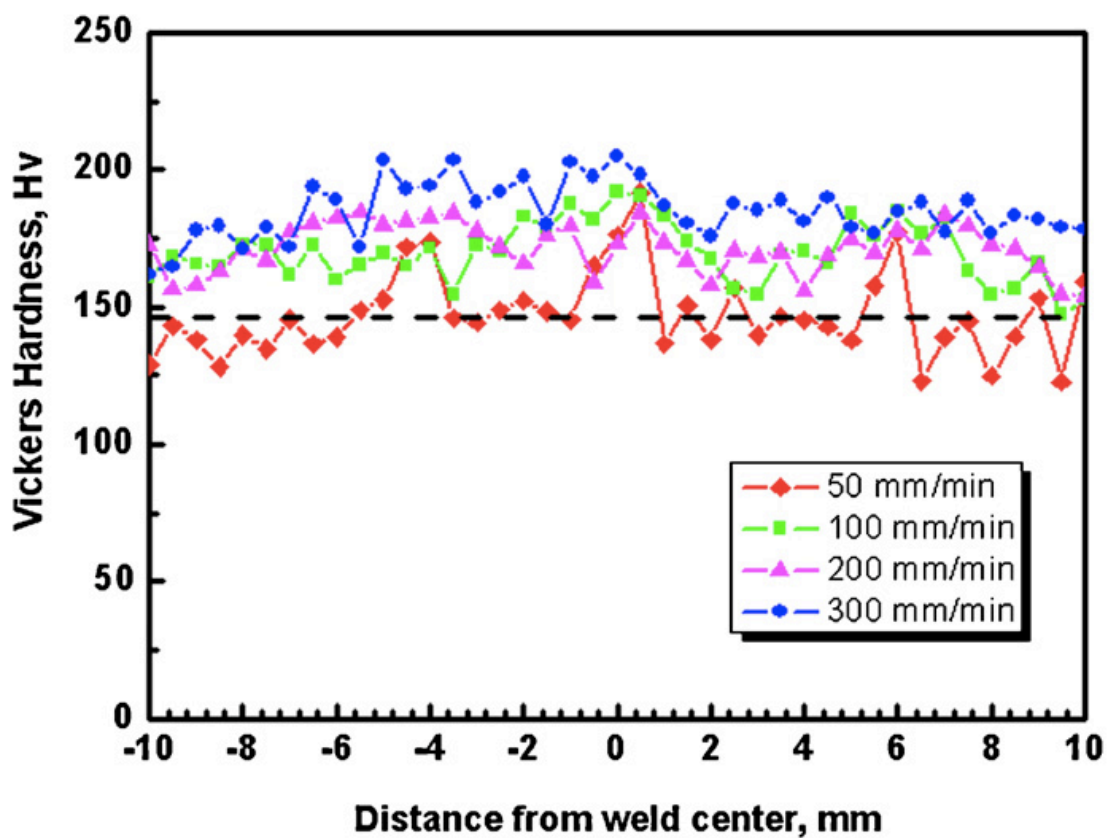
Ένα χαρακτηριστικό που διακρίνει τη μικροδομή του τιτανίου ύστερα από FSW από όλα τα άλλα κράματα που εξετάζουμε είναι η ύπαρξη κρυσταλλογραφικής διύεθυνσης .

Τέλος παρατηρείται υψηλή πυκνότητα διαταραχών στο κέντρο της ΖΣ, η οποία μάλιστα αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα

### 3.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 3.2.2.1. Σκληρότητα

Από τις διαθέσιμες μελέτες διαπιστώνεται αύξηση της σκληρότητας από τα 0.25 mm/r (λόγος ταχύτητας/περιστροφή) . Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η σκληρότητα σε διάφορες ταχύτητες, και ακολουθεί ο πίνακας με τις τιμές στη ΖΣ.

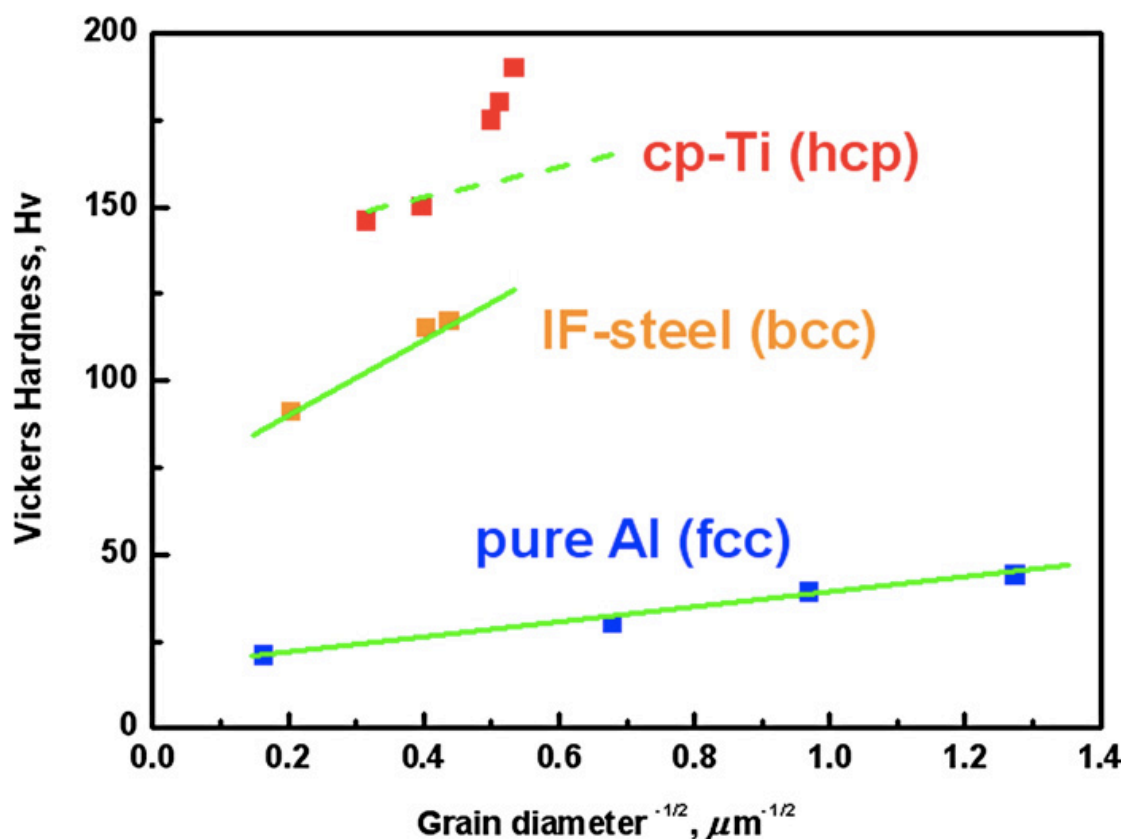


Σχήμα 3.4: Κατανομή σκληρότητας για διάφορες ταχύτητες

Welding speed (mm/min)	Grain size ( $\mu\text{m}$ )	Hardness (HV)
Base metal	10	146
50	6.3	150
150	4	175
200	3.8	180
300	3.5	190

**Πίνακας 5:** Σκληρότητα και μέγεθος κόκκων στη ΖΣ για διάφορες ταχύτητες

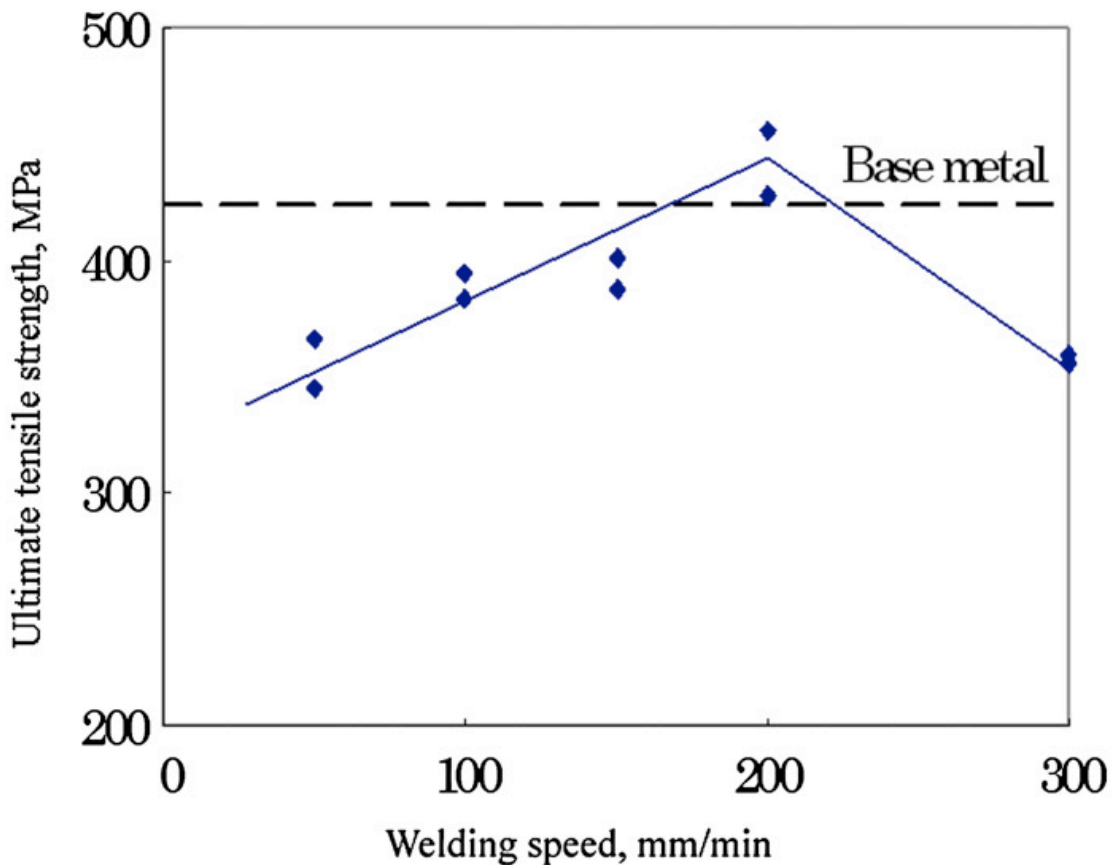
Είναι σαφές ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα, και συνεπώς μειώνεται το μέγεθος των κόκκων, αυξάνεται και η σκληρότητα. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι αυτή η αύξηση δεν ακολουθεί το ρυθμό που αναμένεται από την εξίσωση Hall-Petch, παρά μόνο στις χαμηλές ταχύτητες σε αντίθεση με το αλουμίνιο ή τον χάλυβα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Σχήμα 3.5:** Σχέση πραγματικής σκληρότητας με εκτίμηση εξίσωσης Hall-Petch για αλουμίνιο, τιτάνιο και χάλυβα

### 3.2.2.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι γενικά μειωμένη στην ΖΣ σε σχέση με το μέταλλο βάσης, εκτός από ένα συγκεκριμένο συνδυασμό ταχύτητας-περιστροφής όπου έχει παρατηρηθεί η αντοχή της ΖΣ να ξεπερνά τα 420 MPa του μετάλλου βάσης, με αποτέλεσμα η θραύση να αναμένεται στο μέταλλο βάσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα, η αντοχή ακολουθεί ανοδική πορεία καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, φτάνει σε ένα μέγιστο στα 1mm/r (200 mm/min – 200rpm) , και κατόπιν μειώνεται ξανά. Η μείωση της αντοχή στις υψηλές ταχύτητες αποδίδεται στο σχηματισμό ατελειών λόγω της ανεπαρκούς ροής υλικού.



Σχήμα 3.6: Αντοχή σε εφελκυσμό ανάλογα με ταχύτητες. Με διακεκομμένη η αντοχή του μετάλλου βάσης

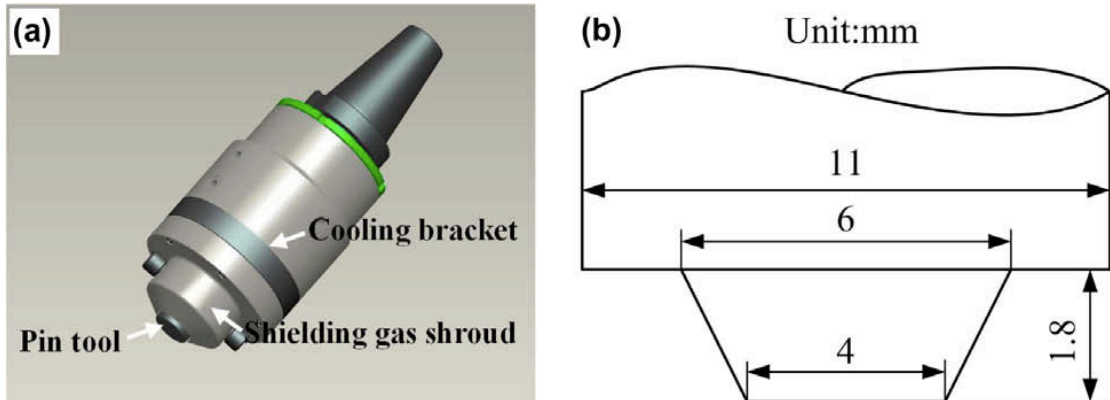
### 3.3 Ti-6Al-4V

Μια σειρά μελετών γύρω από τη συγκολλησιμότητα του Ti-6Al-4V μας δίνουν τη δυνατότητα να συνοψίσουμε τα βασικά στοιχεία της συμπεριφοράς του κράματος αυτό σε FSW. Καθώς το Ti-6Al-4V είναι, ως γνωστόν, διφασικό κράμα, η κυριότερη παράμετρος που καθορίζει την συμπεριφορά του είναι η υπέρβαση ή όχι της θερμοκρασίας μετάβασης από τη φάση α (δομή hcp) στη φάση β (δομή bcc), η τιμή της οποίας είναι 995 °C. Έτσι, υπάρχουν αποκλίσεις στα όσα αναφέρονται στις διάφορες μελέτες, καθώς οι μετασχηματισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την FSW οδηγούν σε περίπλοκες μικροδομές.

Πέρα από τις διαφορές, υπάρχουν αρκετά σημεία συμφωνίας. Σε όλες τις μελέτες δεν παρατηρείται διακριτή ΘΜΕΖ, με εξαίρεση το [Ramirez and Juhas, 2003] όπου παρατηρείται μία εξαιρετικά στενή ΘΜΕΖ, πάχους περίπου 30μm. Πέραν τούτου, η ΘΕΖ είναι συνήθως πολύ στενή, κάτι που οφείλεται στη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του κράματος σε σχέση με το αλουμίνιο. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες, στην πλειοψηφία των μελετών διαπιστώνεται πως η θερμοκρασία στην ΖΣ υπερβαίνει τη θερμοκρασία μετασχηματισμού σε β φάση, με αποτέλεσμα να προκύπτει πλακοειδής μικροδομή. Έχουν όμως παρατηρηθεί και περιπτώσεις που η θερμοκρασία στη ΖΣ δεν υπερβαίνει την τιμή αυτή (βλ. παρακάτω). Στη ΘΕΖ, η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει την θερμοκρασία μετασχηματισμού με αποτέλεσμα να διατηρείται εκεί σε μεγάλο βαθμό η μικροδομή του μετάλλου βάσης.

Όσον αφορά τις ιδιότητες τα διάφορα συμπεράσματα είναι αντιφατικά. Συνήθως παρατηρείται μείωση της σκληρότητας στη ΖΣ, αλλά στο [Juhas, 2001] αναφέρεται σαφέστατη αύξηση, ενώ στο [Lienert, 2001], παρατηρείται αυξημένη σκληρότητα στη ΘΕΖ σε σχέση με το ΜΒ. Αντιφατικά είναι τα συμπεράσματα και όσον αφορά την αντοχή του δοκιμίου ύστερα από τη συγκόλληση. Παρακάτω αυτά αναπτύσσονται διεξοδικότερα, με βάση το άρθρο [Zhou, 2007] ενώ, όπου κρίνεται αναγκαίο θα σχολιαστούν και συμπεράσματα άλλων μελετών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη στη συγκόλληση του κράματος Ti-6Al-4V χρησιμοποιείται ειδικό υδρόψυκτο εργαλείο με προστασία αερίου (βλ. Σχήμα 3.7).

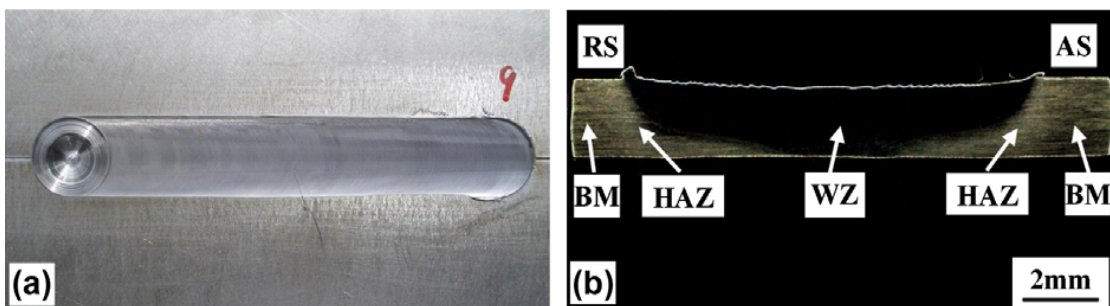


Σχήμα 3.7: Υδρόψυκτο εργαλείο για τη συγκόλληση Ti-6Al-4V

Παρακάτω γίνεται μία ανασκόπηση των συμπερασμάτων κατά τη συγκόλληση δοκιμίων πάχους 2mm με ταχύτητα 75mm/min και περιστροφή 400, 500 και 600 rpm.

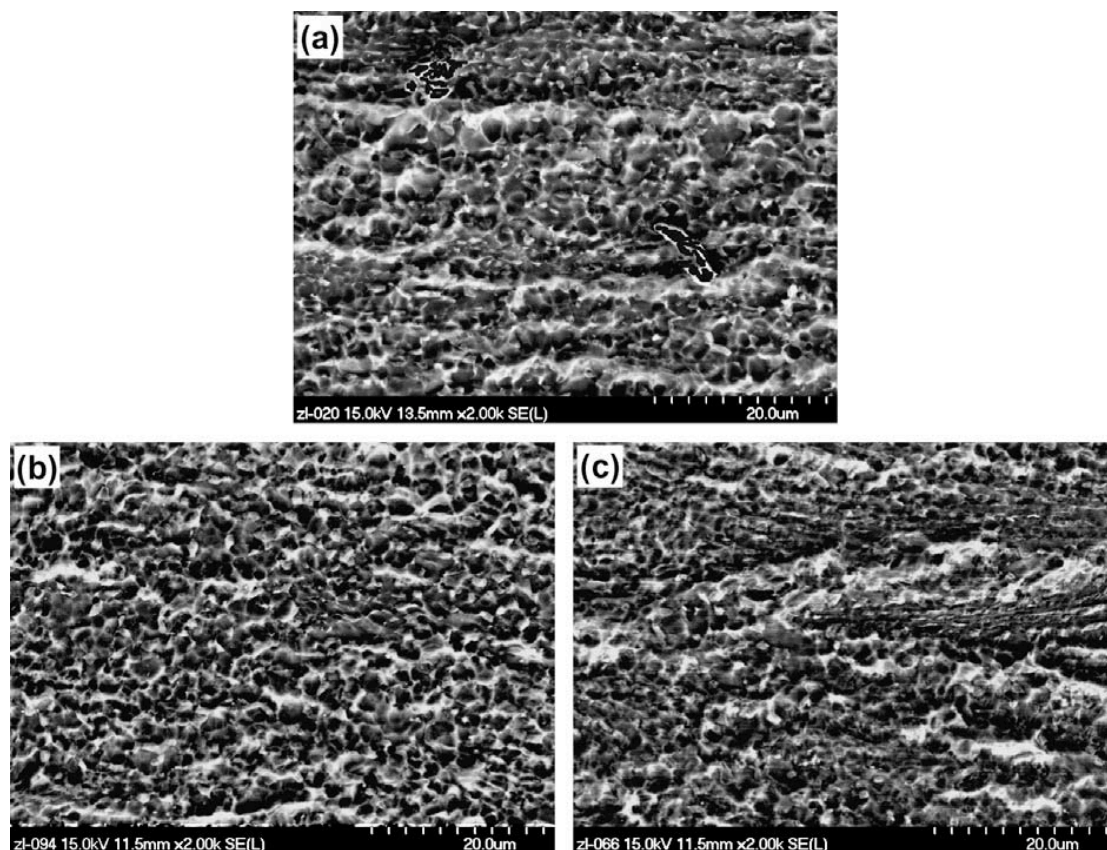
### 3.3.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Η συγκόλληση διακρίνεται σε τρεις περιοχές (ΖΣ, ΘΕΖ, ΜΒ) δίχως την εμφάνιση διακριτής ΘΜΕΖ.



Σχήμα 3.8: Ζώνες της FSW του Ti-6Al-4V

Η μικροδομή της ΘΕΖ δεν διαφέρει σημαντικά από αυτήν του μετάλλου βάσης, όπως φαίνεται και από την ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 3.9), του οποίου η μικροδομή χαρακτηρίζεται από διαμήκεις κόκκους α και β φάσης, συνεπώς συμπεραίνεται πως η θερμοκρασία στη ΘΕΖ παραμένει κάτω από τα επίπεδα αλλαγής φάσης.



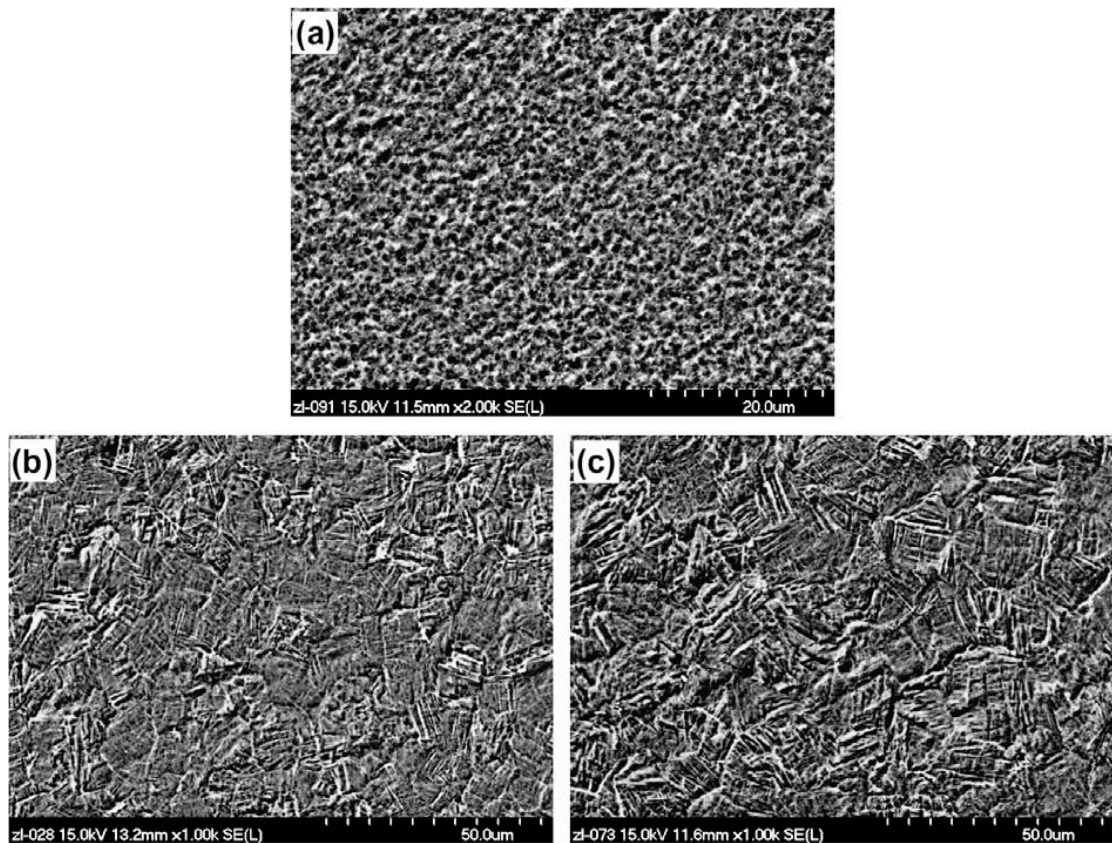
**Σχήμα 3.9:** Μικροδομή του MB και της ΘEZ (α-MB, b- ΘEZ στα 400rpm, c-ΘEZ στα 600 rpm)

Στη ΖΣ η θερμοκρασία υπερβαίνει τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία πλακοειδούς δομής. Αυτό συμεραίνεται και στην πλειονότητα των υπόλοιπων διαθέσιμων μελετών, όπως στο [Ramirez – Junas ,2003] και [Mironov, 2008].

Εξάιρεση εδώ αποτελεί η περίπτωση των 400rpm όπου προκύπτει λεπτόκοκκη δομή σε σχέση με το μέταλλο βάσης, απ' το οποίο συμπεραίνεται πως η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία μετάβασης. Και σε αυτή την παρατήρηση υπάρχουν αντιστοιχίες με άλλες μελέτες [Zhang, 2008].

Παρακάτω απεικονίζονται οι μικροδομές της ΖΣ (Σχήμα 3.10)

Όσον αφορά την επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους των κόκκων.



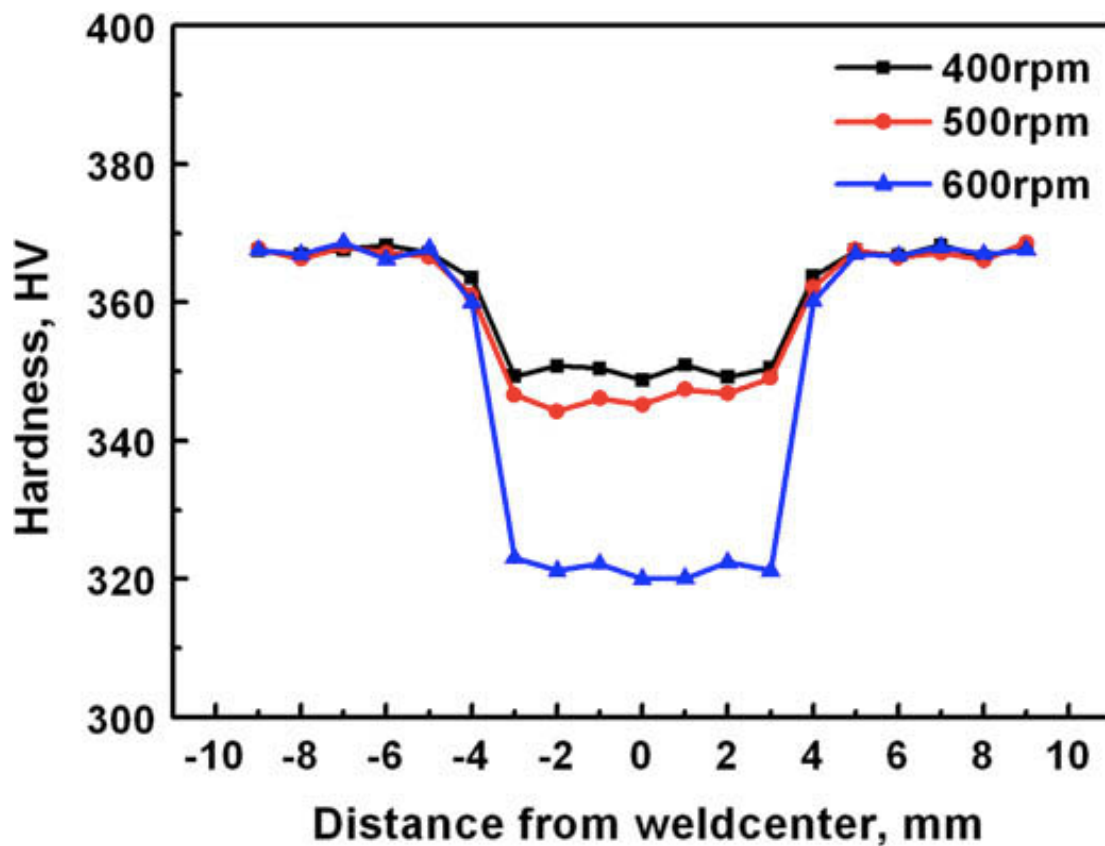
**Σχήμα 3.10:** Μικροδομή της ΖΣ για περιστροφές 400rpm (a), 500 rpm (b), 600 rpm (c)

### 3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 3.3.2.1. ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

Η σκληρότητα στη WZ είναι μειωμένη. Αυτό στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα δυναμική ανακρυστάλλωση αποδίδεται στην μαλάκωση που αυτή προκαλεί και στην πλαστική παραμόρφωση λόγω του πείρου του εργαλείου, ενώ στις άλλες περιπτώσεις αποδίδεται στη μείωση της πυκνότητας των διαταραχών. [L. Zhou, 2010]



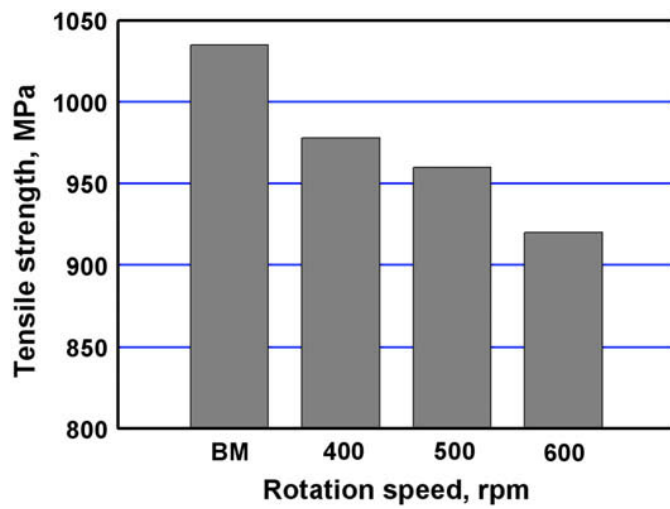


Σχήμα 3.11: Κατανομή της σκληρότητας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής

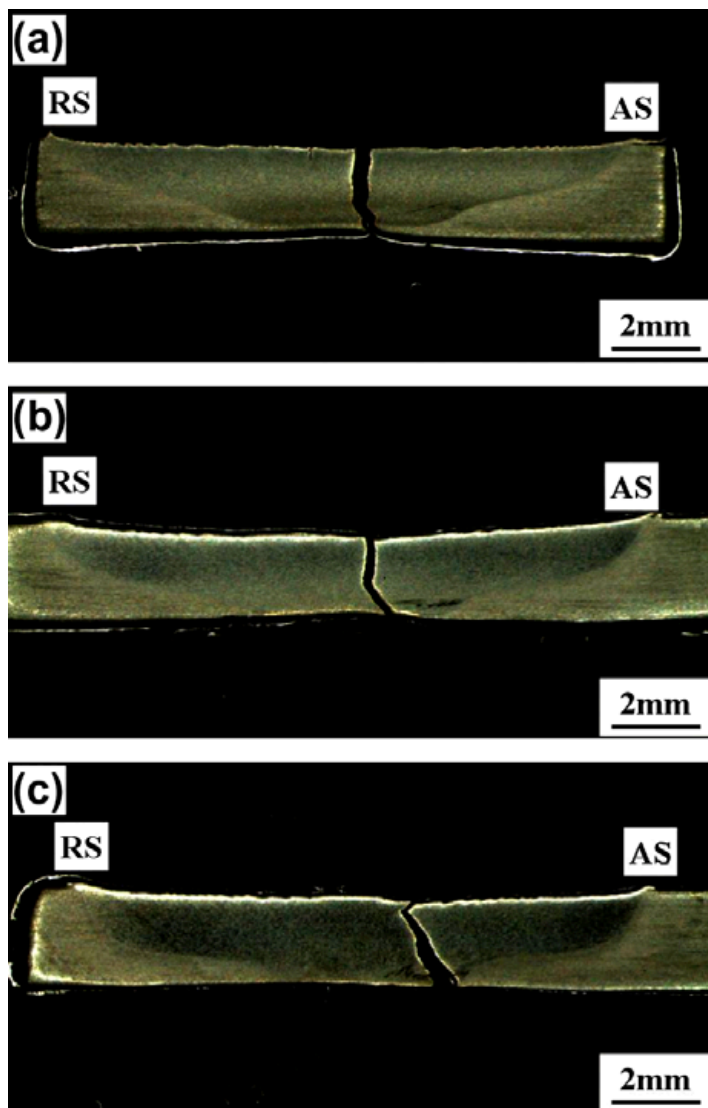
### 3.3.2.2. Αντοχή σε εφελκυσμό

Σε όλες τις περιπτώσεις του συγκεκριμένου πειράματος υπάρχει μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό. Επιπλέον η αντοχή μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

Όσον αφορά το σημείο θραύσης, αυτό ταυτίζεται με το σημείο χαμηλότερης σκληρότητας.



Σχήμα 3.12: Αντοχή σε εφελκυσμό για διάφορες ταχύτητες.



Σχήμα 3.13: Σημεία θραύσης των δοκιμίων

Επισημάνουμε ότι σε άλλες μελέτες έχουν προκύψει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Παραθέτουμε ενδεικτικά τα αποτελέσματα από το Lienert (2001).

Material	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Failure location
Base metal	897.0 ± 0.7	957.7 ± 3.4	12.7 ± 0.5	NA
FSW	912.9 ± 8.3	1013.6 ± 8.3	12.7 ± 0.9	Base

**Πίνακας 6:** Μηχανικές ιδιότητες FSW κράματος Ti-6Al-4V

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΑΛΥΒΕΣ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η έρευνα για τη συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση χαλύβων έχει σημαντική καθυστέρηση σε σχέση με τη συγκόλληση του αλουμινίου, κάτι που οφείλεται σε μια σειρά λόγων. Πρώτον υπάρχουν πολλές αποτελεσματικές μέθοδοι συγκόλλησης του χάλυβα. Δεύτερον, λόγω της αυξημένης αντοχής του χάλυβα, το εργαλείο πρέπει να είναι ανθεκτικό σε συνθήκες μεγάλης καταπόνησης. Τρίτον, δεν έχουν μελετηθεί σε αρκετό βάθος τα επακόλουθα των μετασχηματισμών φάσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την FSW. Τέλος, η ποικιλία των χαλύβων είναι τέτοια που απαιτείται μεγάλο πλήθος πειραμάτων για να βελτιστοποιηθεί η συγκόλληση σύμφωνα με τις επιθυμητές ιδιότητες. Ενδεικτικό της καθυστέρησης της έρευνας είναι πως πέρα από δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και σκληρότητας, δεν υπάρχουν, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων, δεδομένα για πιο πολύπλοκες ιδιότητες. Οι περισσότερες έρευνες εστιάζουν στη μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης ενώ δεν υπάρχουν αρκετές αναφορές όπως στη θερμομηχανική κατεργασία και στους μετασχηματισμούς φάσεων.

Το κύριο ενδιαφέρον στην έρευνα FSW στους χάλυβες προκύπτει από τη δυνατότητα που δίνει η μέθοδος για συγκόλληση σε χαμηλές θερμοκρασίες, συγκριτικά με τις συγκολλήσεις σύντηξης. Η χαμηλή θερμοκρασία μειώνει τις μεταλλουργικές αλλαγές στη ΘΕΖ, καθώς επίσης περιορίζει σημαντικά τις παραμένουσες τάσεις και την στρέβλωση, κάτι εξαιρετικά σημαντικό για τη συγκόλληση τμημάτων μεγάλου πάχους, στην ναυπηγική και τη βαριά βιομηχανία για παράδειγμα. Επίσης τα προβλήματα ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου θεωρητικά θα μπορούσαν να εξαλειφθούν με μία μέθοδο στερεάς κατάστασης. Τέλος δεν υπάρχουν αέρια συγκόλλησης.

Ακολουθεί πίνακας όπου είναι καταχωρημένοι οι χάλυβες και οι συνθέσεις τους που έχουν μελετηθεί στην FSW.

**Table 3**  
Compositions of steels (wt.%) that have been studied using FSW

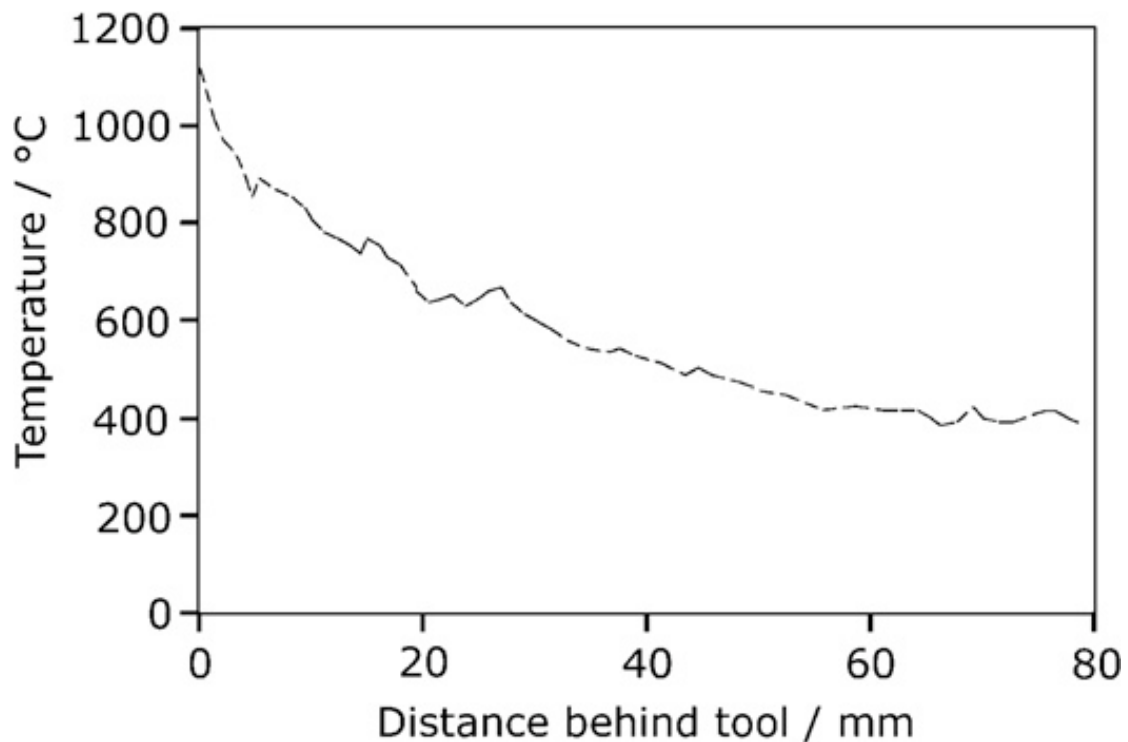
Alloy	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	V	Others	Hardness (HV)			Reference
									Plate	HAZ	TMAZ	
1	0.01	0.38	1.09	0.55	0.03	11.2	0.01	Nb 0.27	158	280	230	[176]
2	0.10	0.16	0.69	0.08	0.01	0.06	-		131	149	158	[176]
3	0.002		0.10					Ti 0.04	90	100	130	[122,180,108]
4	0.12		0.29						110		130 (160)	[180,108]
5	0.21	0.24	0.50						125		230 (500)	[108]
6	0.34	0.21	0.69					Cu 0.01	155		280 (360)	[180,108]
7	0.50	0.20	0.70					Cu 0.01	200		360 (520)	[108]
8	0.18		0.82						135		165	[48]
9	0.10	0.20	1.4					Cu 0.22	180		200	[181]
10	0.18	0.30	1.25			0.08	0.35		175		320	[123]
11	0.14	0.02	0.64			0.08	0.35		280-460		150	[182]
12	0.13	0.26	1.52	0.03	0.17	0.03	0.06				200	[183]
13	0.32	0.35	1.20	0.20	0.65	1.30	0.05	B 0.0025	250		360	[183]
14	0.32	0.35	1.20	0.20	0.65	1.30	0.05	B 0.0025	250		450	[183]

The Vickers hardness values represent approximate mean values within the zone concerned; more detail can be found in the original references. Peak hardness values are reported in brackets. In some cases the compositions are assumed from the published specification range.

### Πίνακας 7: Σύσταση χαλύβων που έχουν συγκολληθεί με FSW

#### 4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται μία τυπική θερμοκρασιακή κατανομή στην FSW του χάλυβα. Η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει λίγο κάτω από τους 1200° C ενώ ο χρόνος πτώσης της θερμοκρασίας από τους 800° C στους 500 °C είναι περίπου 11s, δεδομένα που είναι συγκρίσιμα με άλλες μεθόδους όπως για παράδειγμα την συγκόλληση τόξου με εισροή θερμότητας 1.3kJ mm<sup>-1</sup>. Ως εκ τούτου θα αναμέναμε να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις μεταλλουργικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στην FSW σε σχέση με τις κοινές μεθόδους συγκόλλησης. (περισσότερα στη μικροδομή)



**Σχήμα 4.1:** Θερμοκρασίες σε σχέση με την απόσταση από το εργαλείο

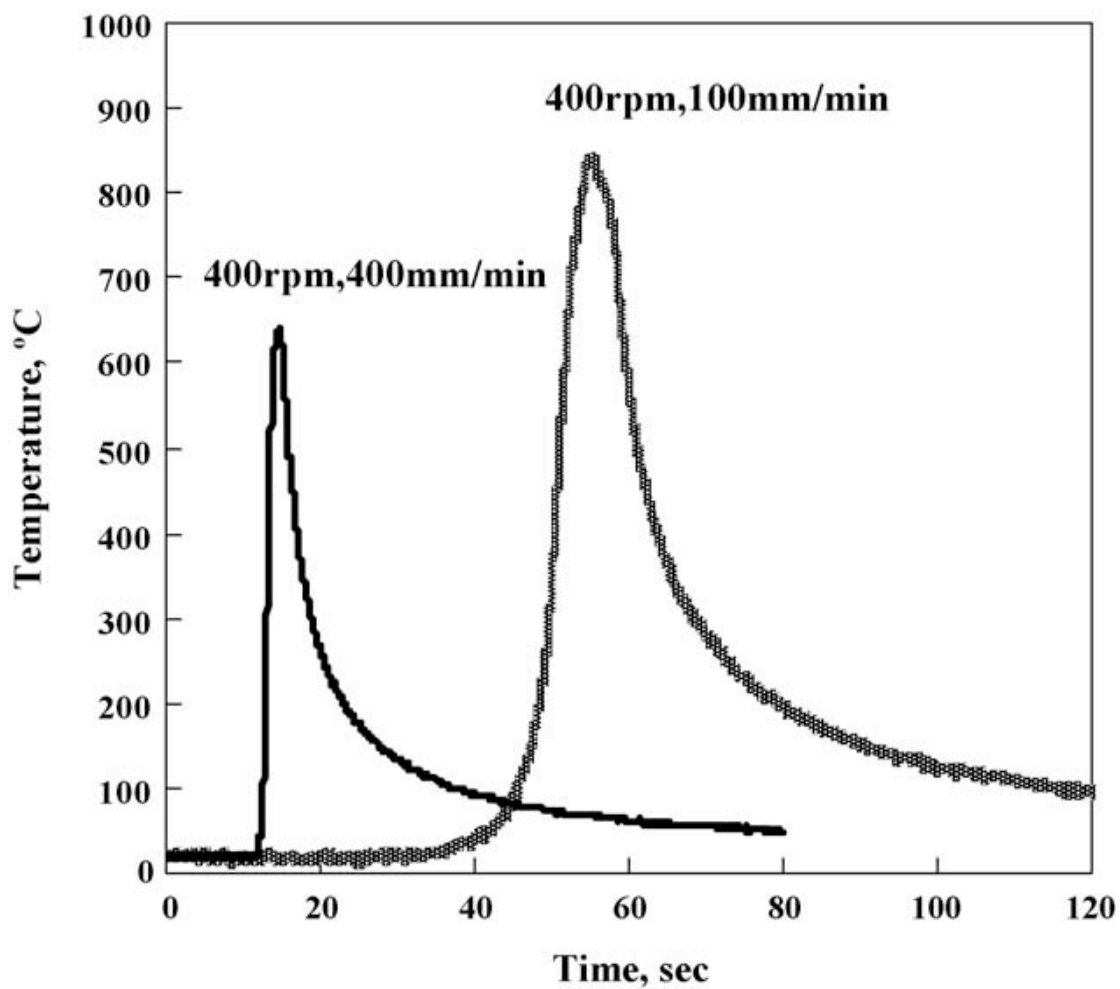
Οι παραπάνω παρατηρήσεις σχετικά με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στην FSW των χαλύβων επιβεβαιώνονται τόσο από πειραματικά δεδομένα όσο και από προβλέψεις θερμικών μοντέλων. Ενδεικτικά, έχει διαπιστωθεί [Mishra, 2005] διαπιστώθηκε θερμοκρασία του περιανυχένιου πάνω από  $1000^{\circ}\text{C}$ , στη συγκόλληση χάλυβα χαμηλού άνθρακα και χάλυβα 12% Cr με ταχύτητες 102, 240 αντίστοιχα ενώ θερμοκρασία στην ραφή πίσω από την ακολουθούσα ακμή του εργαλείου  $900^{\circ}\text{C}$  –  $1000^{\circ}\text{C}$ . Στο Lienert (2003) μετρήθηκε πως η μέγιστη θερμοκρασία υπερβαίνει τους  $1100^{\circ}\text{C}$ , ενώ βάσει του θερμικού μοντέλου που αναπτύσσεται εκεί η θερμοκρασία στη ζώνη συγκόλλησης προβλέπεται να υπερβαίνει κατά πολύ τους  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Όσον αφορά τη σχέση των παραμέτρων συγκόλλησης με τη θερμοκρασία, στο [Fujii, 2006] κατά τη συγκόλληση τριών ανθρακούχων χαλύβων (IF, S12C, S35C) παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Η μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται με τη μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης (και για τα 3 κράματα, περίπου  $650^{\circ}\text{C}$  σε ταχύτητα 400 mm/min).
- Ο ρυθμός θέρμανσης και ψύξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης.

- Γενικά αναφέρονται χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες από άλλες μελέτες.

Τα συμπεράσματα αυτά αποτυπώνονται και γραφικά το επόμενο διάγραμμα



Σχήμα 4.2: Θερμοκρασίες για δύο ταχύτητες

### 4.3 ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

#### 4.3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

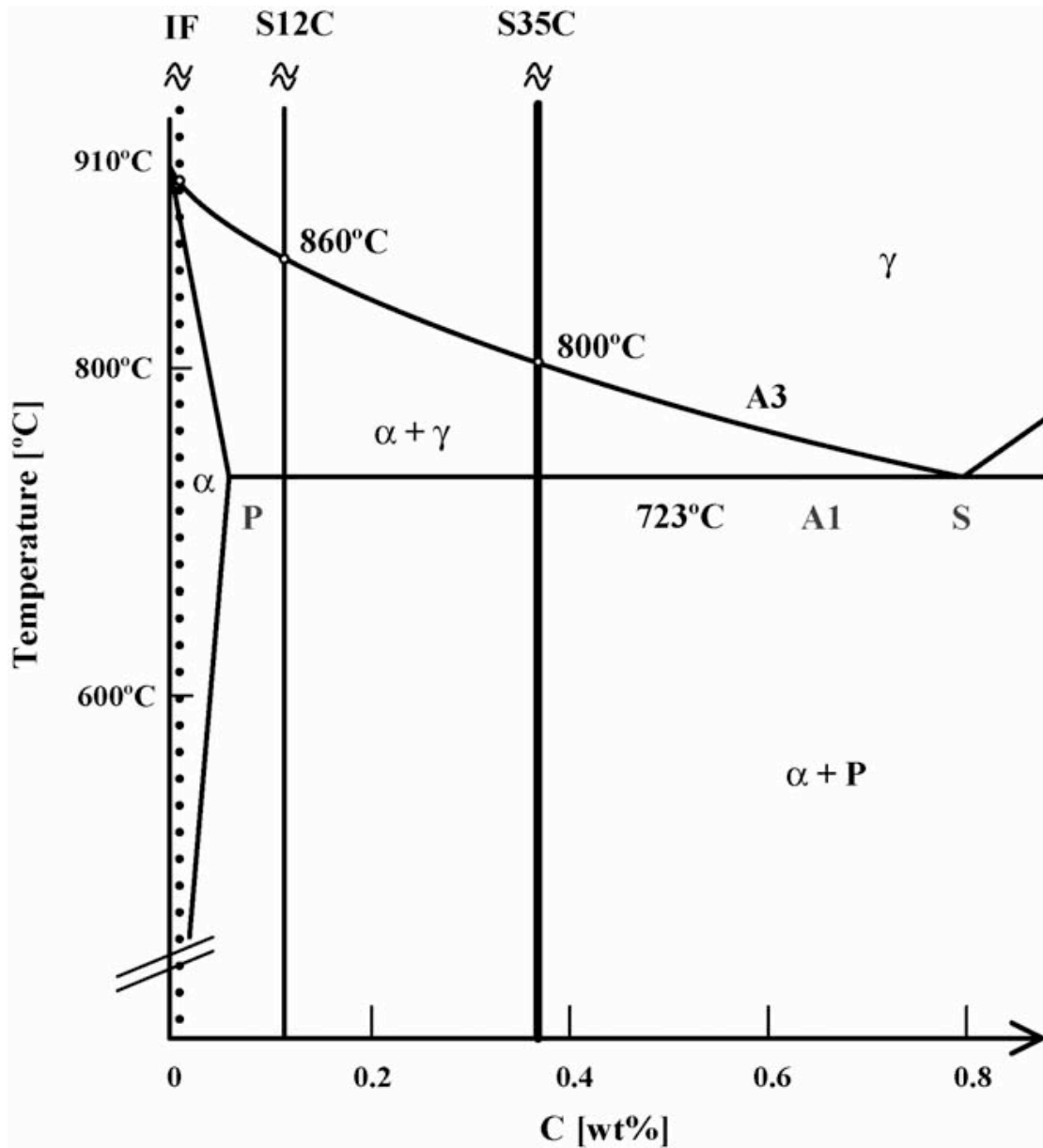
Οι περισσότερες μελέτες για τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση ανθρακούχων χαλύβων, αναφέρουν πως επιτυγχάνεται λεπτόκοκκη δομή στη ζώνη συγκόλλησης αντίστοιχη με αυτή των κραμάτων αλουμινίου, και λαμβάνουν χώρα πολύπλοκοι μετασχηματισμοί φάσεων με αποτέλεσμα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το μέταλλο βάσης.

#### 4.3.2 ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΙ ΜΕΣΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΥΠΟΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΕΙΣ)

Στην πλειονότητα των μελετών για χάλυβες χαμηλής και μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, αναφέρεται λεπτόκοκκη δομή αντίστοιχη με αυτή του αλουμινίου και αύξηση της σκληρότητας. Οι διάφορες μελέτες όμως αποκλίνουν ως προς τους μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα, άμεση συνέπεια των διαφορετικών μετρήσεων της μέγιστης θερμοκρασίας. Παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε ως κύριο παράδειγμα το [Fujii, 2006], καθώς εκεί οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι κατώτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες μελέτες και εξετάζονται 2 σημαντικοί παράγοντες: η επίδραση της ταχύτητας και της περιεκτικότητας του άνθρακα.

Θα επικεντρωθούμε στη μελέτη τριών κραμάτων. Τα τρία κράματα που θα μας απασχολήσουν είναι ο χάλυβας IF, εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο JIS S12C (1012 κατά SAE-AIEI) περιεκτικότητας κατά βάρος 0.12%, και ο JIS S35C, (1035 κατά SAE-AIEI) περιεκτικότητας κ.β. 0.34%. . Για λόγους ευκολίας παρατίθεται παρακάτω το μέρος του διαγράμματος ισορροπίας που μας ενδιαφέρει καθώς και η ακριβής σύσταση και οι κύριες μηχαν. ιδιότητες των εν λόγω κραμάτων.





Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ισορροπίας υποευτηκτοειδούς χάλυβα

Type	Chemical composition in mass%							Mechanical property		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
IF	0	–	0.1	0.01	–	–	0.04	284	155	92
S12C	0.12	–	0.29	0.01	0.02	–	–	317	202	76
S35C	0.34	0.21	0.69	0.01	0	0.01	–	533	327	57

**Πίνακας 8:** Σύσταση και μηχανικές ιδιότητες χαλύβων IF, S12C, S35C

Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα ισορροπίας, ο χάλυβας IF, χαρακτηρίζεται από μονοφασικό φερρίτη σε όλη την έκταση των θερμοκρασιών κάτω από του 910°C, όπου λαμβάνει χώρα μετασχηματισμός φερρίτη-οστενίτη. Για τους δύο χάλυβες S12C και S35C, ο μετασχηματισμός λαμβάνει χώρα μεταξύ της  $A_3$  (860°C και 800° αντίστοιχα), και τη θερμοκρασία  $A_1$  (723°C). Συνεπώς ο S12C αναμένεται να χαρακτηρίζεται από προευθηκτοειδή φερρίτη και περλίτη όταν ύστερα από αργή ψύξη από τον οστενίτη, με λόγο όγκου του περλίτη 13%, ενώ αντίστοιχα ο σχηματισμός φερρίτη-περλίτη που θα προκύψει για τον S35C ανμένεται να είναι σχεδόν ισόποσος (57% φερρίτης -43% περλίτης).

Τα ακόλουθα συμπεράσματα πάνω στη μικροδομή και τις ιδιότητες των χαλύβων αυτών μετά από την FSW, βασίζονται στις ακόλουθες παραμέτρους συγκόλλησης:

Διάμετρος περιανχένιου: 12 mm

Διάμετρος πείρου: 4 mm

Μήκος πείρου: 1.4 mm

Γωνία εργαλείου: 3°

Ταχύτητα περιστροφής 400 rpm

Ταχύτητα συγκόλλησης: 100 – 400 mm/min

#### 4.3.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Οι θερμοκρασιακές μετρήσεις έδειξαν:

- Η μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται όσο μειώνεται η ταχύτητα συγκόλλησης.
- Οι ρυθμοί θέρμανσης και ψύξης μειώνονται όσο μειώνεται η θερμοκρασία.
- Η μέγιστη θερμοκρασία στη μέγιστη ταχύτητα είναι πάντα κάτω από την  $A_1$  (περίπου  $650^{\circ}\text{C}$ ) και για τους τρεις χάλυβες.

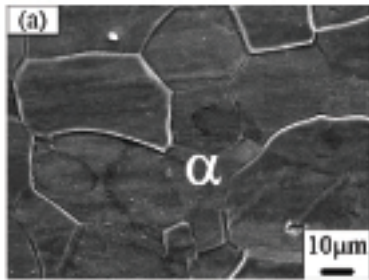
Φυσικά μικρότερες ταχύτητες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε υπέρβαση της  $A_1$  ή της  $A_3$ .

#### 4.3.2.2 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Γενικά η τελική δομή είναι λεπτόκοκκη, με μέγεθος κόκκων μικρότερο από αυτό του μετάλλου βάσης. Το πιο σημαντικό στοιχείο για την τελική δομή είναι η περιοχή του διαγράμματος ισορροπίας εντός της οποίας πραγματοποιείται η συγκόλληση και οι μετασχηματισμοί που πραγματοποιούνται με την πτώση της θερμοκρασίας μετά το πέρας της συγκόλλησης. Έτσι, το κυριότερο είναι η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού περιστροφής και ταχύτητας έτσι ώστε η μέγιστη θερμοκρασία να είναι η επιθυμητή. Από τις μέχρι τώρα μελέτες συμπεραίνεται ότι η ικανοποιητικότερη μικροδομή αλλά και οι βέλτιστες ιδιότητες προκύπτουν όταν η συγκόλληση λαμβάνει χώρα στην περιοχή φερρίτη-οστενίτη και ο μετασχηματισμός του οστενίτη σε περλίτη πραγματοποιείται μετά το πέρας της συγκόλλησης.

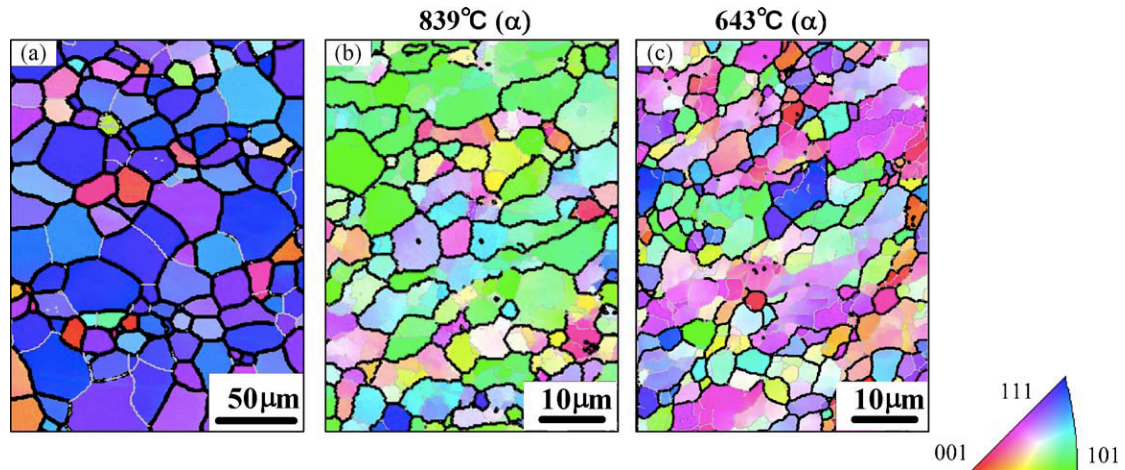
## ΧΑΛΥΒΑΣ IF

Η μικροδομή του μετάλλου βάσης, φάσης  $\alpha$ , απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα:



**Σχήμα 4.4:** Μικροδομή μετάλλου βάσης χάλυβα IF

Τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας (EBSP) για τη ζώνη συγκόλλησης και το μέταλλο βάσης παρουσιάζονται παρακάτω.



**Σχήμα 4.5:** Μικροδομή FSW χάλυβα IF. α-MB και ΖΣ, b- 100mm/min, c- 400mm/min

Καθώς η μέγιστη θερμοκρασία για την ελάχιστη και τη μέγιστη ταχύτητα μετρήθηκε 839°C και 643°C αντίστοιχα, η συγκόλληση έγινε στην μονοφασική φερριτική φάση. Υπάρχει σημαντική μείωση του μεγέθους των κόκκων. Το μέταλλο βάσης έχει κόκκους μεγέθους 25μm, ενώ οι κόκκοι στο κέντρο της ΖΣ είναι 6μm και 5μm στις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασιακές συνθήκες αντίστοιχα. Οι ισοαξονικοί λεπτοί κόκκοι στη ΖΣ χαρακτηρίζονται από διαταραχές, κάτι που αποτελεί ένδειξη

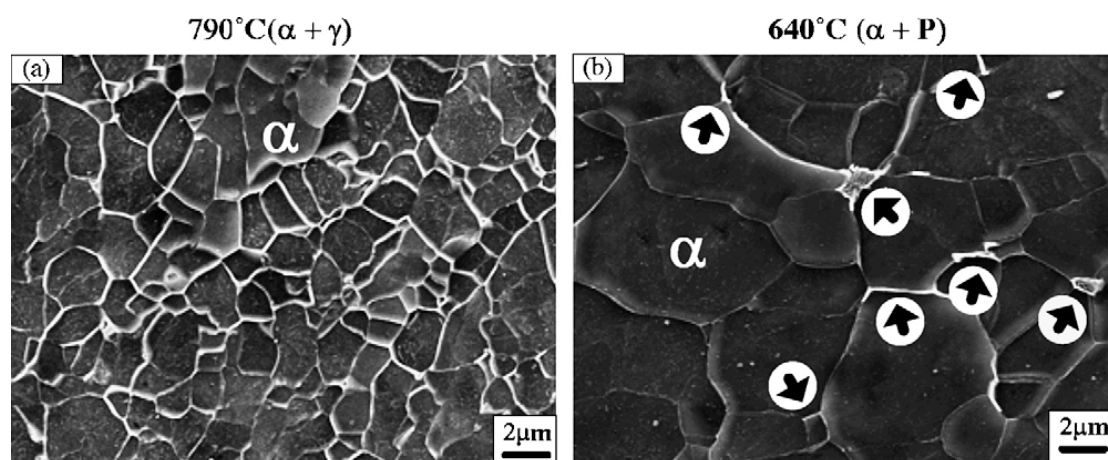
σημαντικής παραμόρφωσης. Η ανάπτυξη των κόκκων συνεπώς χαρακτηρίζεται από συνεχή ανακρυστάλλωση και υψηλή παραμόρφωση, δίχως μετασχηματισμό φάσης.

## S12C

Οι μέγιστες θερμοκρασιακές συνθήκες (100mm/min) έδωσαν μέγιστη θερμοκρασία 790 °C, συνεπώς η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε στη διφασική περιοχή φερρίτη-περλίτη ( $\alpha + \gamma$ ), συνεπώς ο μετασχηματισμός έλαβε χώρα κατά την ψύξη ύστερα από τη συγκόλληση. Η τελική φερριτική δομή εμπεριέχει περλίτη ανομοιογενώς κατανεμημένο κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι μόνο το 13% του ωστενίτη μετατράπηκε σε περλίτη κάτω από την  $A_1$ . Ο κόκκος του φερρίτη είναι μικρός (3 $\mu\text{m}$ ), καθώς η υψηλή παραμόρφωση στη διφασική περιοχή φερρίτη-ωστενίτη προκαλεί λεπτόκοκη δομή λόγω ανακρυστάλλωσης.

Οι ελάχιστες θερμοκρασιακές συνθήκες έδωσαν μέγιστη θερμοκρασία 640°C. Συνεπώς η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε κάτω από τη θερμοκρασία  $A_1$ , άρα δεν υπάρχει μετασχηματισμός κατά την ψύξη μετά το πέρας της συγκόλλησης. Έτσι ο περλίτης του μετάλλου βάσης διασπάστηκε σε μικρά κομμάτια και κατανεμήθηκε ομοιόμορφα μέσα στη φερριτική δομή. Ο φερρίτης είναι λεπτόκοκκος.

Η δομή της ΖΣ στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα απεικονίζεται παρακάτω. Τα βέλη αντιστοιχούν στον περλίτη.

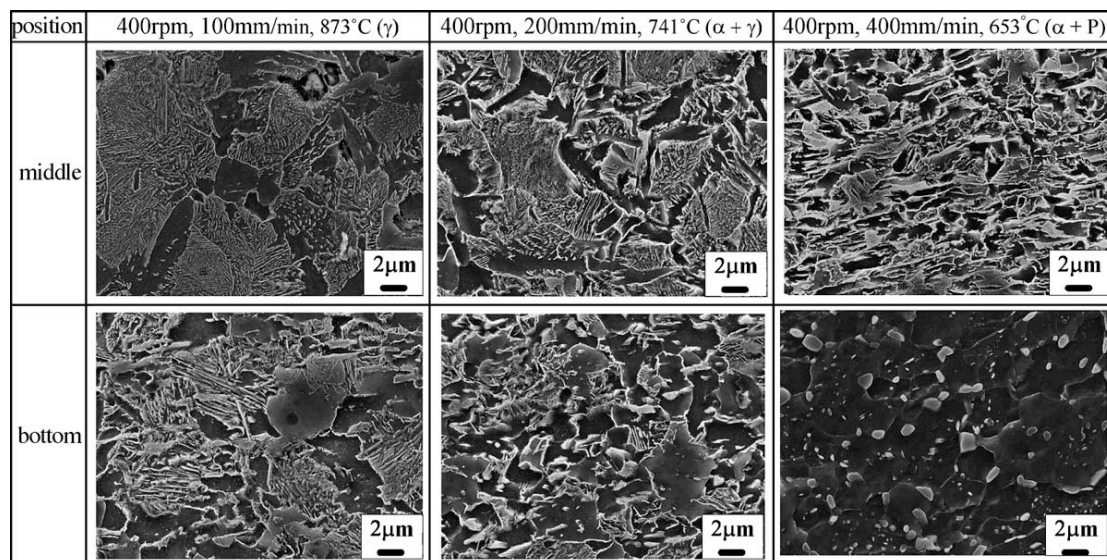


**Σχήμα 4.6:** Μικροδομή της ΖΣ στην μέγιστη και στην ελάχιστη θερμοκρασία

Ένα ακόμη σημείο στο οποίο πρέπει να σταθούμε είναι το γεγονός ότι ενώ στην υψηλή ταχύτητα, το μέγεθος των κόκκων φερρίτη και η μορφολογία του φερρίτη είναι ομοιόμορφα στα διάφορα σημεία της ΖΣ, στη χαμηλή ταχύτητα, το μέγεθος κόκκων φερρίτη στη βάση είναι μικρότερο από ότι στο μέσο και την επιφάνεια της ΖΣ. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η θερμοκρασία στο μέσο και στην επιφάνεια πιθανώς να ξεπέρασε και την θερμοκρασία  $A_3$ , με αποτέλεσμα η συγκόλληση να πραγματοποιηθεί στην περιοχή του ωστενίτη και κατόπιν, ύστερα από την ψύξη, να δώσει λεπτόκοκκη μεν δομή αλλά κόκκους μεγαλύτερους συγκριτικά με τη βάση καθώς η ανακρυστάλλωση επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. [Fujii, 2006]

S35C

Υπό τις περισσότερες συνθήκες συγκόλλησης, η τελική δομή αποτελούνταν από φερρίτη-περλίτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



**Σχήμα 4.7:** Η μικροδομή στο μέσο και στη ρίζα της συγκόλλησης, για τρεις καταστάσεις

Όσον αφορά τους μετασχηματισμούς που έλαβαν χώρα σημειώνονται τα εξής: οι μέγιστες θερμοκρασίες για τις ταχύτητες 100, 200 και 400 mm/min, ήταν 873°C (ωστενίτης), 741°C (φερρίτης + ωστενίτης) και 653°C (φερρίτης και σεμεντίτης).

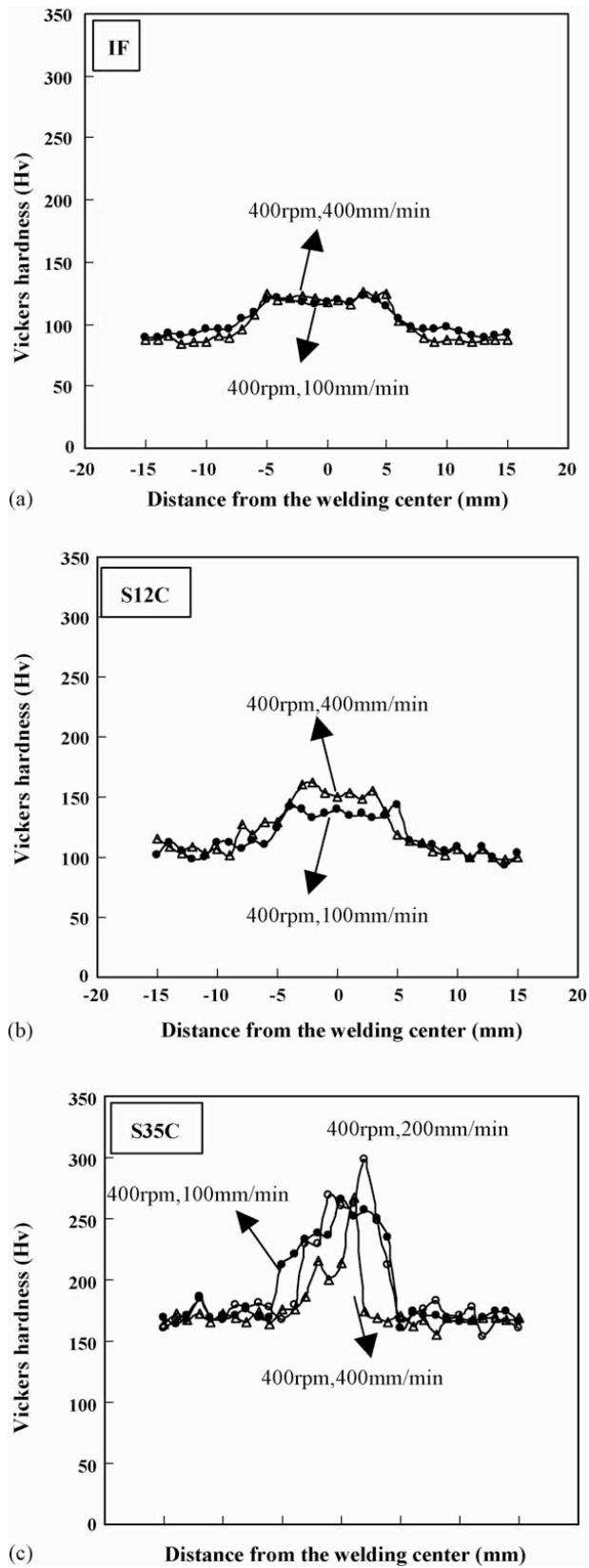
#### 4.3.3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

##### 4.3.3.3.1 Σκληρότητα

Και στα τρία κράματα διαπιστώνεται αύξηση της σκληρότητας σε σχέση με το MB. Για τον IF, η ταχύτητα συγκόλλησης φαίνεται να μην επηρεάζει τη σκληρότητα, ενώ για τα άλλα δύο κράματα, η σκληρότητα αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας. Εξάιρεση αποτελεί ο S35 όπου η μέγιστη σκληρότητα προκύπτει στα 200mm/min. Αυτό συμβαίνει διότι η μέγιστη θερμοκρασία στην περίπτωση αυτή, όπως εξηγείται προηγουμένως, βρίσκεται στην περιοχή φερρίτη + περλίτη, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην υψηλότερη ταχύτητα των 400mm/min βρίσκεται στην περιοχή φερρίτη + σεμεντίτη, που είναι μαλακότερη δομή.

Ο κύριος παράγοντας στον οποίο αποδίδεται η αύξηση της σκληρότητας είναι η μείωση του μεγέθους των κόκκων. Ακολουθούν τα διαγράμματα σκληρότητας κατά Vickers για τα τρία κράματα.

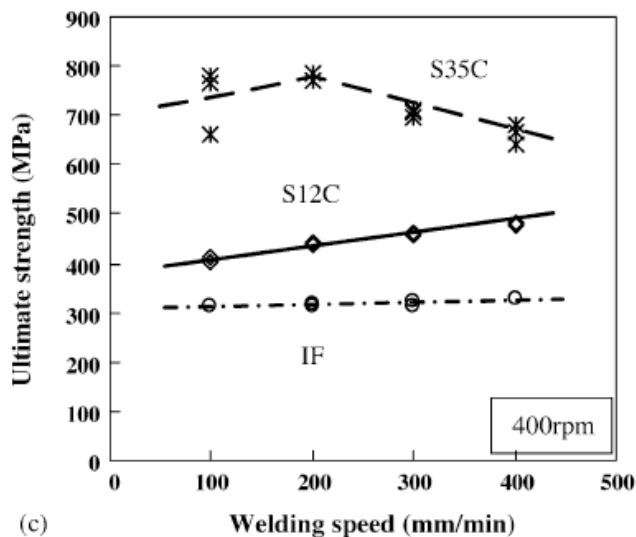




Σχήμα 4.7: Κατανομή σκληρότητας. (a) IF, (b) S12C, (c) S35C

#### 4.3.3.3.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Η αντοχή σε εφελκυσμό των τριών χαλύβων απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα.



**Σχήμα 4.7:** Αντοχή σε εφελκυσμό των τριών χαλύβων

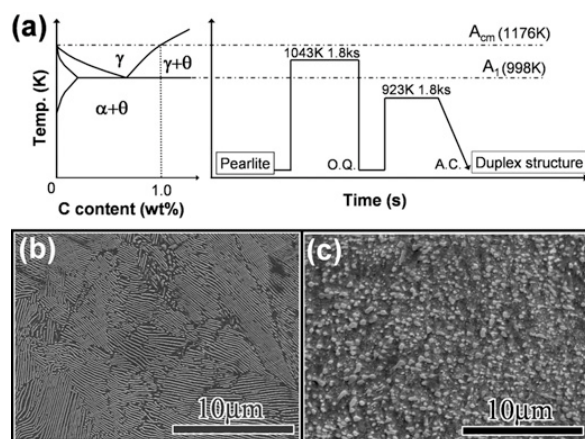
Υπάρχει βελτίωση της αντοχής (όλα τα δοκίμα υπέστησαν θραύση στο μέταλλο βάσης), και η αντοχή δείχνει να βελτιώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα, έτσι ώστε να μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή αυξάνεται όσο μειώνονται οι θερμοκρασιακές συνθήκες – πράγμα που έχει παρατηρηθεί και σε άλλα κράματα (αλουμίνιο, χαλκός). Εξαίρεση αποτελεί ο S35C, για λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως.

#### 4.3.3.3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κυριότερο συμπέρασμα εξετάζοντας ανθρακούχους χάλυβες είναι ότι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη σημασία είναι η σχέση των θερμοκρασιών  $A_1$  και  $A_3$ . Παρατηρούμε ότι η καλύτερες ιδιότητες προκύπτουν όταν η συγκόλληση λαμβάνει χώρα στην περιοχή φερρίτη- ωστενίτη.

### 4.3.3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΥΠΕΡΕΥΤΗΚΟΕΙΔΕΙΣ)

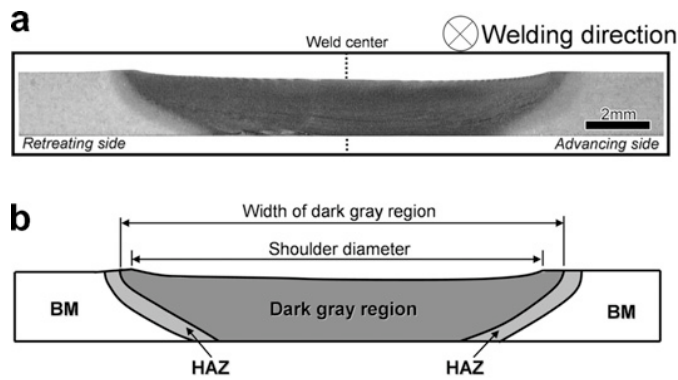
Και στους υπερευτηκοειδείς χάλυβες (περιεκτικότητα c κ.β.: 0.8-2%), δεν διακρίνεται ξεχωριστή θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Επίσης παρατηρείται σημαντική αύξηση της σκληρότητας στη ΖΣ. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα βασικά στοιχεία της FSW σε υπερευτηκοειδής χάλυβες, θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του χάλυβα SUJ2 (1.02% c κ.β). Στο παράδειγμά μας [Sato, 2007] , ο χάλυβας υπέστη, πριν την FSW, θερμική κατεργασία και τελικά απέκτησε τη διπλή δομή φερρίτη-σεμεντίτη που απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα (c).



**Σχήμα 4.8:** Η δομή φερρίτη σεμεντίτη που απέκτησε ο χάλυβας ύστερα από κατεργασία

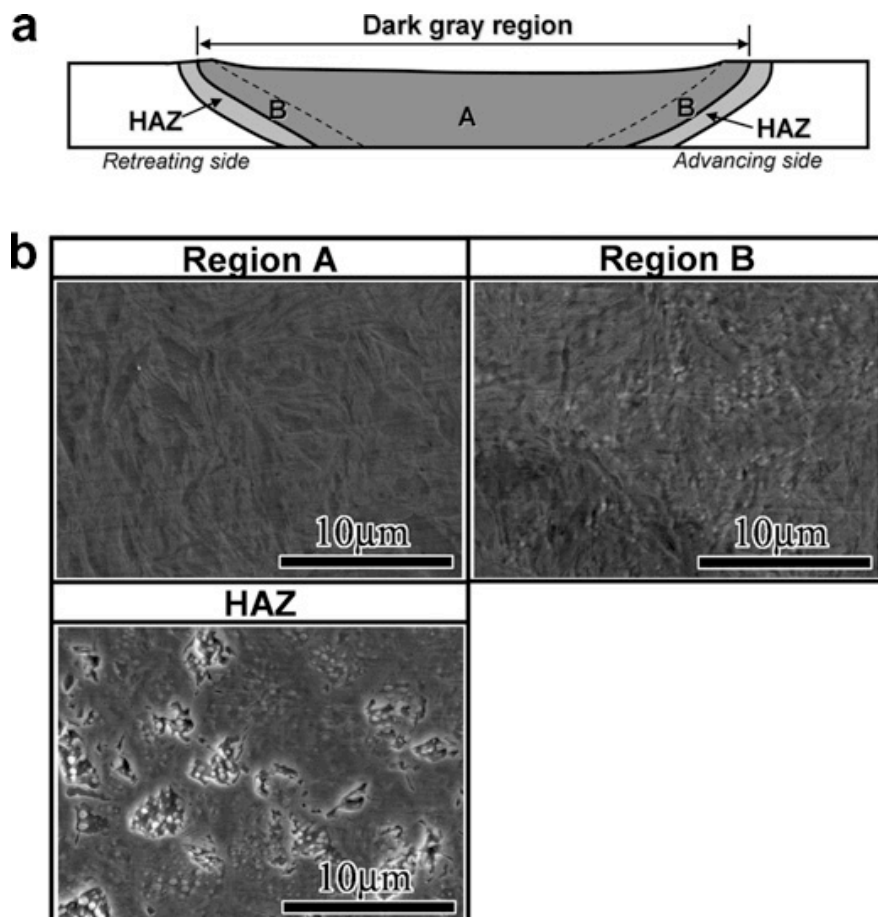
Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε 1.27mm/s και σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής. Καθότι όμως δεν διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση της ταχύτητας περιστροφής, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα 400 rpm. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε αέριο αργό για προστασία.

Η τομή του δοκιμίου, όπου διακρίνονται η ΖΣ, η ΘΕΖ και το ΜΒ, απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.9: Τομή της συγκόλλησης

Στη μελέτη διαπιστώνονται στην ουσία δύο περιοχές της ΖΣ, οι οποίες απεικονίζονται ακολούθως με Α και Β.



Σχήμα 4.10: Η μικροδομή των δύο περιοχών της ΖΣ και της ΘΕΖ

Η μικροδομή στην περιοχή A είναι μαρτενσιτική και λεπτομερής εξέταση έδειξε μάζα ωστενίτη 11%, ενώ στην περιοχή B παρατηρούνται μέσα στη μαρτενσιτική δομή αδιάλυτα σωματίδια σεμεντίτη. Η δομή στη ΘΕΖ αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη καθώς και την προαναφερθείσα μαρτενσιτική δομή. Η δομή της περιοχής A μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Η αρχική διπλή δομή μετασχηματίζεται πλήρως σε ωστενίτη κατά τη θέρμανση που προκαλείται από τη συγκόλληση. Κατόπιν, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη αλλά όχι πλήρως διότι η τελική θερμοκρασία του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ( $M_f$ ), είναι κατώτερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για χάλυβες περιεκτικότητας σε άνθρακα 0.6% και άνω.

#### 4.4 (ΜΑΡΤΕΝΙΣΙΤΙΚΟΣ) ΧΑΛΥΒΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Σε χάλυβες υψηλής αντοχής, η έρευνα για την εφαρμογή της FSW είναι σημαντική λόγω της μη δυνατότητας συγκόλλησης σύντηξης. Η τελευταία προκαλεί αλλαγές στη μικροδομή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, διευκολύνει τη ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση και υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες.

Η μικροδομή και οι μετασχηματισμοί φάσεων κατά την FSW έχουν μελετηθεί και ενώ σε κάποια σημεία μπορούμε να θεωρήσουμε τα συμπεράσματα ασφαλή, υπάρχουν ακόμα σημεία που δεν έχουν εξηγηθεί επαρκώς. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία σχετικά με τη δομή και τις ιδιότητες του χάλυβα M190 έχοντας ως κύριο σημείο αναφοράς το [Ghosh, 2010], καθώς η πλειοψηφία των μελετών δίνει παρεμφερή συμπεράσματα.

Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης τεσσάρων δειγμάτων χάλυβα 190, κάθε ένα από τα οποία συγκολλήθηκε με παραμέτρους που καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Sample ID	Tool description	Tool rotation rate and tilt	Processing condition	Linear velocity ( $\text{mm min}^{-1}$ )
Sample 1	Hybrid carbide tool:	1000 rpm and 2.5°	Forced air cooling from	50.8
Sample 2	shoulder $\phi$ 10 mm,		the top and a chilled	101.6
Sample 3	cylindrical pin $\phi$ 4 mm,		backing plate	203.2
Sample 4	pin length 1.1 mm			304.8

**Πίνακας 8:** Οι παράμετροι συγκόλλησης για τα τέσσερα δοκίμια

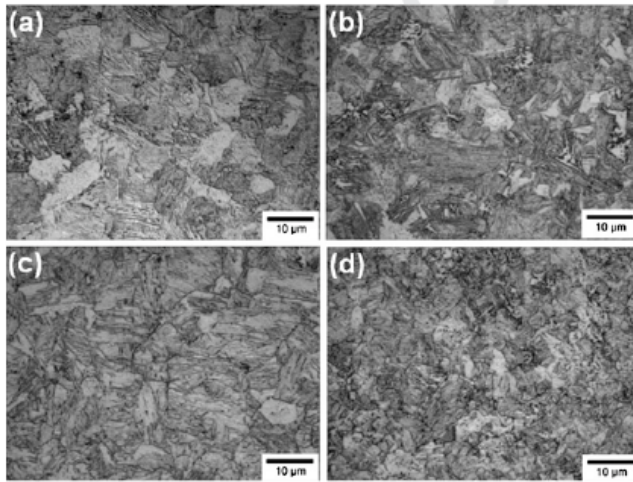
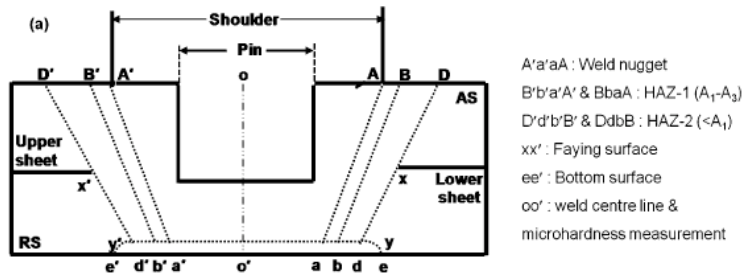


Figure 1. Optical microstructure of WN showing prior-austenitic grains: (a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

**Σχήμα 4.11:** Μικροδομή της ζώνης συγκόλλησης, για τέσσερα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με τις παραμέτρους που αναγράφονται στον πίνακα

Η μικροδομή είναι κυρίως μαρτενσιτική. Οι μετασχηματισμοί της δομής κατά τη συγκόλληση έχουν ως εξής: ο αρχικός μαρτενσίτης μετασχηματίστηκε σε ωστενίτη. Κατόπιν ο ωστενίτης υπέστη μαρτενσιτικό μετασχηματισμό αφού το εργαλείο διέτρεξε το δοκίμιο.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα επίπεδα για τα οποία έγιναν υπολογισμοί της σκληρότητας, και ακολουθεί εκτενής περιγραφή των σχηματισμών στα διάφορα επίπεδα με τις αντίστοιχες σκληρότητες που έχουν καταγραφεί.



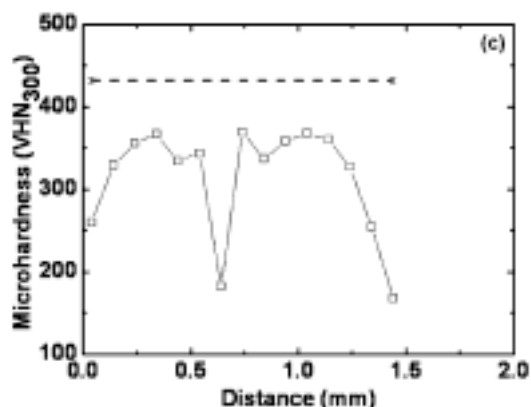
**Σχήμα 4.12:** Επίπεδα υπολογισμού της σκληρότητας

Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μία ελαφρά πτώση μικροσκληρότητας περίπου 200 VHN, στη διεπιφάνεια των υπο συγκόλληση μερών. Εκεί παρατηρείται ο

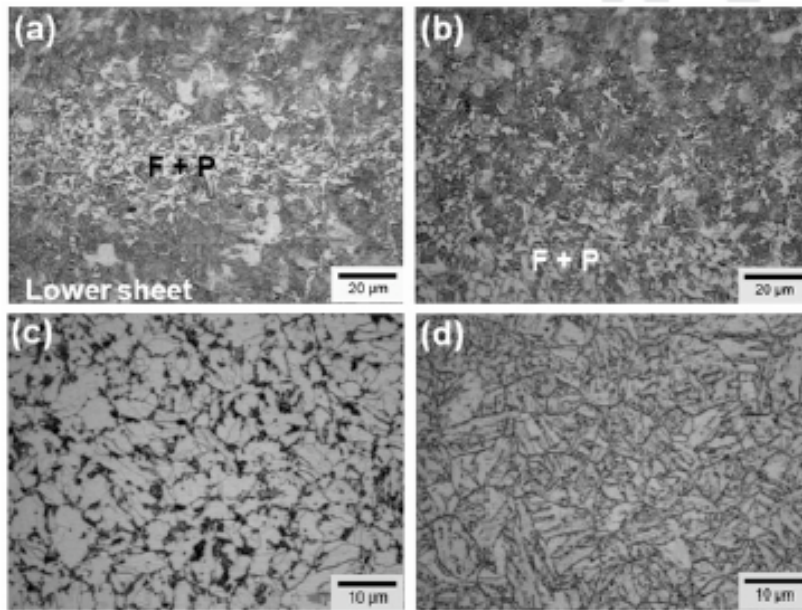
σηματισμός μίας στρώσης φερρίτη με περλίτη, για την οποία δεν έχει υπάρξει ακόμα επαρκής εξήγηση [Ghosh, 2010]. Κάτω από τη στρώση φερρίτη, η δομή είναι μαρτενσιτική, κάτι που αποτυπώνεται και στη σκληρότητα. Στη βάση των συγκολλήσεων, σχηματίζεται φερρίτης-περλίτης, ο οποίος αποτυπώνεται και με τη ραγδαία μείωση της σκληρότητας. Αυτή η μείωση οφείλεται στην αργή έκλυση θερμότητας μέσω της πλάκας υποστήριξης.

Το πρώτο μέρος της ΘΕΖ, αποτελείται από πολυγωνικό φερρίτη-περλίτη, ενώ το δεύτερο από επαναφερμένο μαρτενσίτη.

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στις ακόλουθες εικόνες όπου αναπαρίσταται η κατανομή της σκληρότητας από την επιφάνεια έως τη βάση της συγκόλλησης (Σχήμα 4.13) καθώς και η μικροδομή στις προαναφερθείσες επιφάνειες για το δεύτερο δοκίμιο του πίνακα. (Σχήμα 4.14)



Σχήμα 4.13. Κατανομή σκληρότητας ανάλογα με το βάθος της συγκόλλησης



Σχήμα 4.14: Μικροδομή του Δοκμίου 2.



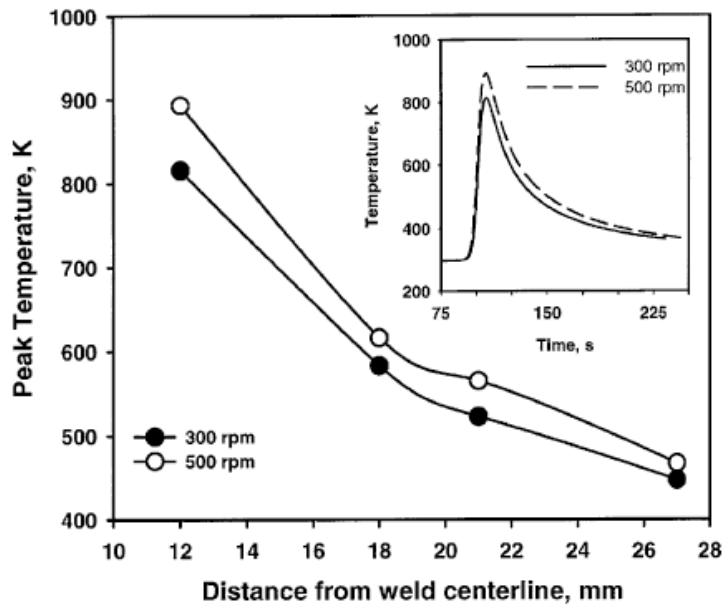
## 4.5 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

### 4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα γύρω από την FSW στους ανοξείδωτους χάλυβες δεν έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό για αντίστοιχους λόγους με αυτούς που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 4. Παρ'όλα αυτά, η έρευνα έχει ιδιαίτερη σημασία κυρίως στους οστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, καθώς η συγκόλλησή τους με μεθόδους όπου λαμβάνει χώρα θέρμανση δημιουργεί τη λεγόμενη περικρυσταλλική διάβρωση, λόγω του σχηματισμού καρβιδίων χρωμίου. Τα καρβίδια χρωμίου σχηματίζονται όταν ο χάλυβας θερμανθεί στο εύρος θερμοκρασιών από 773 ως 1073° C. Έτσι, για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της υποβάθμισης της αντίστασης της διάβρωσης συνήθως χρησιμοποιείται ταχεία ψύξη στον κύκλο της συγκόλλησης. Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την FSW, καθιστούν την έρευνα γύρω από την εφαρμογή της μεθόδου στους ανοξείδωτους χάλυβες σημαντική όσον αφορά την επίλυση του παραπάνω ζητήματος. Παρακάτω εκτίθενται τα βιβλιογραφικά συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες και τη δομή του ανοξείδωτου χάλυβα 304L.

### 4.5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

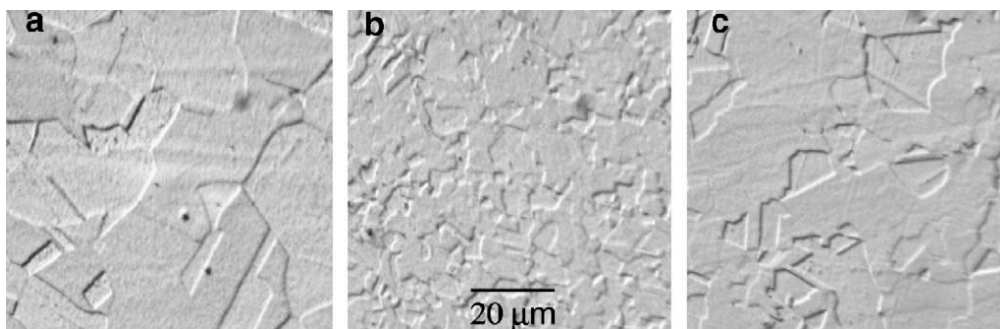
Η πλειονότητα των πειραμάτων χρησιμοποιούν σχετικά χαμηλές ταχύτητες πρόωσης και μεσαίες ταχύτητες περιστροφής. Τα συμπεράσματα που παρατίθενται αφορούν κυρίως το [Reynolds, 2002], με ταχύτητα 1.7 mm/s και περιστροφή 300 και 500 rpm. Σχετικά με τη θερμοκρασία, τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα με τα όσα γνωρίζουμε για τη συγκόλληση του αλουμινίου. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι υψηλότερη στην υψηλή περιστροφή τόσο σε διάφορες αποστάσεις από τη ραφή όσο και στην επιφάνεια επαφής του εργαλείου με το δοκίμιο. Παρατίθεται η γραφική απεικόνιση αυτών των παρατηρήσεων.



**Σχήμα 4.15:** Οι μέγιστες θερμοκρασίες για τις δύο συγκολλήσεις συναρτήσει της απόστασης από την ευθεία συγκόλλησης. Στο συνημμένο διάγραμμα απεικονίζεται η συνάρτηση θερμοκρασίας – χρόνου σε απόσταση 12 mm από την ευθεία συγκόλλησης

#### 4.5.3 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

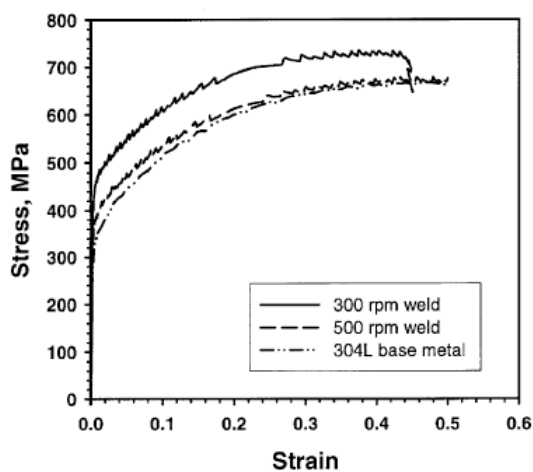
Η μικροδομή του μετάλλου βάσης είναι η τυπική δομή ωστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα ύστερα από ανόπτηση, με ισοαξονικούς κόκκους και κάποιες διδυμίες. Ο κόκκος του μετάλλου βάσης είναι περίπου 15μm. Στη συγκόλληση οι κόκκοι είναι επίσης ισοαξονικοί και μειωμένου μεγέθους, ανάλογα με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής (7.6 μm στα 300 rpm, και 13 στα 500 rpm).



**Σχήμα 4.16:** Μικροδομές : (a) μεταλλο βάσης, (b) ΖΣ στα 300 rpm, και (c) ΖΣ στα 500 rpm .

#### 4.5.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

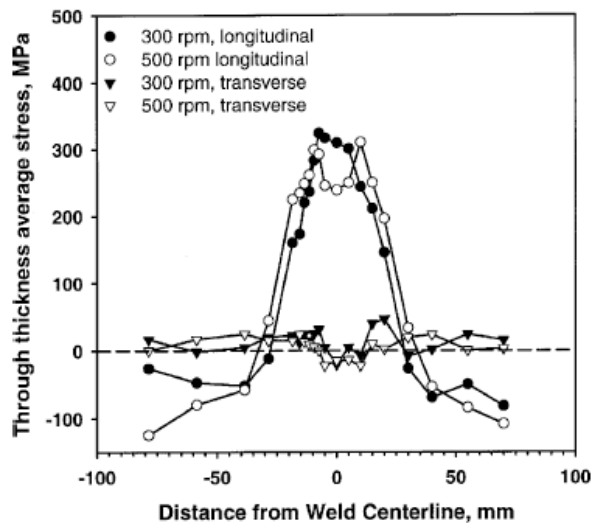
Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι βελτιωμένη και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης των συγκολλήσεων ακολουθεί αυτήν του μετάλλου βάσης. Οι χαμηλές στροφές των 300 rpm δίνουν καλύτερες ιδιότητες από τα 500 rpm. Συγκεκριμένα, τα όρια διαρροής είναι 430, 360, γανδ 295 MPa και τα όρια αντοχής, 735, 678, and 667 MPa στα 300 rpm, 500 rpm, και το μέταλλο βάσης αντίστοιχα. Η βελτιωμένη αντοχή της συγκόλλησης ανταποκρίνεται στη μικροδομή που παρατηρήθηκε προηγουμένως.



**Σχήμα 4.17:** Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης για το μέταλλο βάσης και τις συγκολλήσεις 300 και 500 rpm

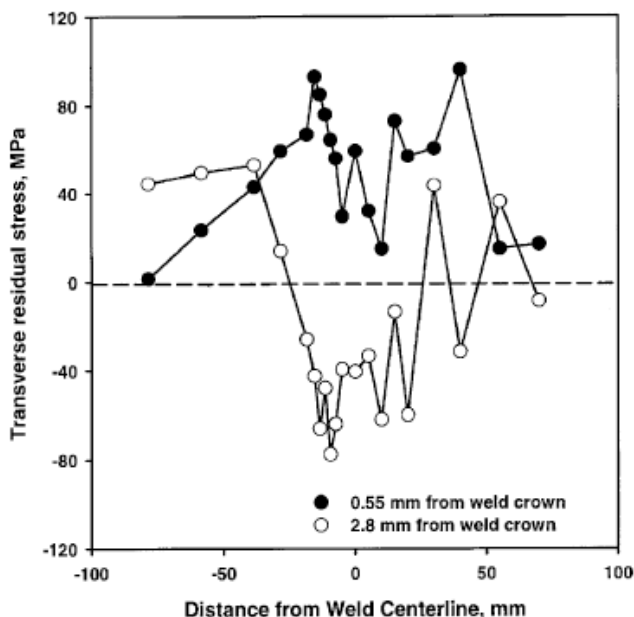
#### 4.5.5. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Οι μέσες διαμήκεις και εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις που μετρήθηκαν παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Σχήμα 4.18:** Μέσες διαμήκεις και εγκάρσιες τάσεις

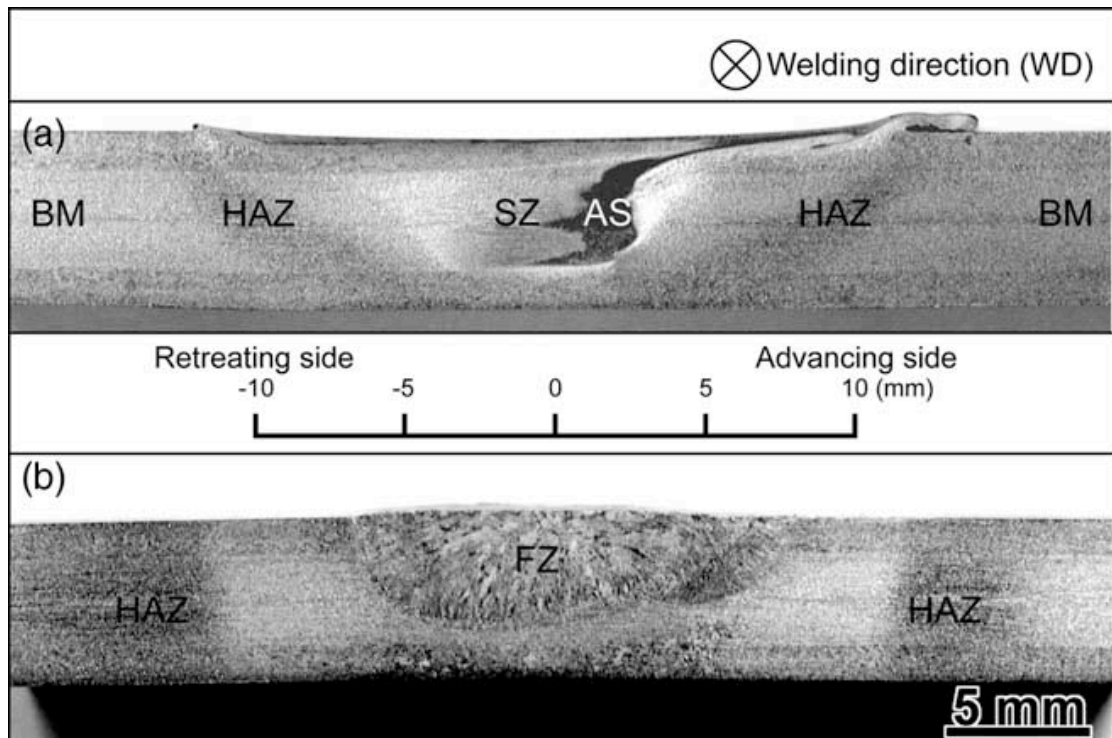
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, η περιοχή υψηλών τάσεων είναι ευρύτερη στην υψηλότερη περιστροφή, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στην κατανομή της θερμοκρασίας που παρουσιάστηκε προηγουμένως ( στα 500 rpm παρατηρούνται μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε μεγαλύτερη απόσταση από την ευθεία συγκόλλησης). Ειδικότερα, η κατανομή των εγκάρσιων τάσεων, στη ρίζα και την κορυφή της συγκόλλησης, ακολουθεί το διάγραμμα του σχήματος 4.19. Παρατηρείται πως στην κορυφή είναι εφελκυστικές ενώ στη ρίζα θλιπτικές.



**Σχέδιο 4.19:** Παραμένουσες εγκάρσιες τάσεις στη ρίζα και στην επιφάνια της συγκόλλησης

#### 4.5.6 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Σύμφωνα με μελέτες, το πρόβλημα της περικρυσταλλικής διάβρωσης, μειώνεται σημαντικά στην FSW συγκριτικά με άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα έχει διαπιστωθεί πολύ μικρή διάβρωση στη ΘΕΖ λόγω του μικρού χρόνου έκθεσης στην περιοχή θερμοκρασιών που προκαλεί το σχηματισμό καρβιδίων χρωμίου. Όμως παράλληλα διαπιστώνεται αρκετά υποβαθμισμένη αντοχή σε διάβρωση στην πλευρά πρόωσης της FSW [Park, 2004]. Ενδεικτικά παρατίθενται οι εικόνες των τομών συγκόλλησης FSW και GTA ύστερα από έκθεση 72 ωρών σε οξύ (θειικό σουλφικό – σουλφορικό)



**Σχέδιο 4.19:** Τομή της συγκόλλησης ύστερα από δοκιμές διάβρωσης για (a) FSW και (b) GTA

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση σε κράματα εκτός κραμάτων αλουμινίου, βάσει της διαθέσιμης βιβλιογραφίας δεν είναι εύκολη υπόθεση. Η δυσκολία αυτή οφείλεται σε ποκίλους παράγοντες, κάποιιοι εκ των οποίων σχετίζονται άμεσα με βιβλιογραφικές ελλείψεις ενώ άλλοι με την ίδια τη φύση της μεθόδου.

Η βιβλιογραφία απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί επαρκής για μια σειρά από κράματα. Επίσης, όπου βρέθηκαν εκτεταμένες μελέτες, αυτές αναπόφευκτα περιορίζονται σε ένα συγκεκριμένο κράμα, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των συμπερασμάτων. Αυτό το πρόβλημα γίνεται πολύ έντονο για παράδειγμα στους χάλυβες, όπου η σύνθεση του κράματος παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στις τελικές ιδιότητες. Επίσης, πέραν της εξειδίκευσης των μελετών ανά κράμα, και της έλλειψης συγκριτικών μελετών, ένα σημαντικό ζήτημα είναι η εξειδίκευση των σημείων όπου εστιάζει η μελέτη. Ο κάθε ερευνητής επιλέγει μία σκοπιά που κατά τη γνώμη του έχει καίρια σημασία, εμβαθύνει σε αυτήν αλλά τα συμπεράσματά του είναι δύσκολο να συγκριθούν με κάποια άλλη μελέτη που εστιάζει σε διαφορετικούς παράγοντες.

Αυτή η αδυναμία σύνθεσης των διαφόρων μελετών εντείνεται από περιορισμούς που προκύπτουν απ' τη φύση της FSW. Πρώτον είναι μία μέθοδος σχετικά καινούρια, με αποτέλεσμα η έρευνα να κατευθύνεται κάποιες φορές «στα τυφλά» δίχως να στηρίζεται σε κάποια προηγούμενα ασφαλή συμπεράσματα και μεθοδολογία. Δεύτερον, είναι μια μέθοδος εξαιρετικά ευαίσθητη στις παραμέτρους συγκόλλησης, οι οποίοι μάλιστα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολο να απομονωθεί κάποια και να εξεταστεί η επίδρασή της. Ένα παράδειγμα για να γίνει αυτό σαφέστερο, είναι η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης και της ταχύτητας περιστροφής. Ενώ είναι δεδομένο ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης μειώνονται οι θερμοκρασίες ενώ αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αυξάνει τη θερμοκρασία, καθώς η συγκόλληση γίνεται υπό την επίδραση του συνδυασμού και των δύο και καθώς, επίσης, η κάθε μία ξεχωριστά επηρεάζει διαφορετικά το τελικό αποτέλεσμα, τα συμπεράσματα κάθε πειράματος δεσμεύονται από τη μία ή την άλλη παράμετρο. Η πλειονότητα των μελετών χρησιμοποιεί σταθερή ταχύτητα πρόωσης και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, ή το αντίστροφο. Έτσι μπορούν να

προκύψουν συμπεράσματα από κάποια μελέτη για το πως επηρεάζει η μία παράμετρος το φαινόμενο, αλλά αυτά τα συμπεράσματα περιορίζονται στη συγκεκριμένη τιμή της άλλης. Αυτό το πρόβλημα κάποιες φορές μπορεί να ξεπεραστεί συγκρίνοντας τις τιμές του λόγου τους (mm/r), όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό διότι οι ίδιοι λόγοι που μπορούν να προκύψουν από διαφορετικό συνδυασμό, επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τη διαδικασία της συγκόλλησης. Το αναφέρουμε αυτό εκτενώς, καθώς διαπιστώσαμε ότι αποτελεί το σημαντικότερο εμπόδιο στην εξαγωγή συμπερασμάτων που να έχουν ευρεία εφαρμογή.

Δεδομένου αυτών των δυσκολιών, ακολουθούν τα κύρια συμπεράσματα ανά κράμα που μπορούν να εξαχθούν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.



## 5.2 ΚΑΘΑΡΟΣ ΧΑΛΚΟΣ

- Η υψηλή θερμική διαχυτότητα δημιουργεί την ανάγκη για υψηλές θερμοκρασίες, συνεπώς για χαμηλές ταχύτητες πρόωσης και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.
- Η μικροδομή χαρακτηρίζεται από τη ΖΣ, τη ΘΕΖ, και το ΜΒ, ενώ σε κάποιες μελέτες αναφέρεται διακριτή ΘΜΕΖ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ΘΜΕΖ γίνεται όλο και πιο δυσδιάκριτη στις χαμηλές ταχύτητες με αποτέλεσμα να εξαφανίζεται τελικά. Επίσης, είναι γενικά πιο ορατή στην πλευρά προώθησης.
- Η ΖΣ έχει λεπτόκοκκη δομή λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης, στη ΘΕΖ παρατηρείται μικρή αύξηση του μεγέθους των κόκκων λόγω ανόπτησης, ενώ στην ΘΜΕΖ, όταν αυτή διακρίνεται, οι κόκκοι έχουν μικρότερο μέγεθος από την ΘΕΖ και μεγαλύτερο από τη ΘΜΕΖ.
- Σχετικά με την αντοχή, τα συμπεράσματα διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις παραμέτρους συγκόλλησης. Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό: 275 MPa  
Γενικά η αντοχή μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα.
- Η σκληρότητα αυξάνεται όσο μειώνονται οι κόκκοι αλλά παρατηρείται δραστική μείωσή της από μία ταχύτητα και ύστερα.

## 5.3 ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΣ

- Η έρευνα έχει ασχοληθεί κυρίως με το κράμα 70% Cu-30% Zn.
- Δεν διακρίνεται ΘΜΕΖ.
- Η αντοχή είναι ικανοποιητική αλλά κατώτερη αυτής του ΜΒ. Μέγιστη αντοχή: 340 MPa. Μέγιστο όριο διαρροής : 210 MPa.
- Έχουν παρατηρηθεί μια σειρά ατέλειες ανάλογα με την ταχύτητα συγκόλλησης, όπως: κακή ποιότητα επιφάνειας συγκόλλησης, πορώδες μορφής τούνελ, μεταλλικές ακμές που εξέχουν απ' την επιφάνεια, ζώνη μη ανάδευσης στη ρίζα της συγκόλλησης.

#### 5.4 ΜΑΓΝΗΣΙΟ

- Διακρίνονται οι τυπικές ζώνες της FSW (ΖΣ, ΘΕΖ, ΘΜΕΖ).
- Η ΖΣ και η ΘΜΕΖ έχουν αμφοτέρως ισοαξονικούς κόκκους, λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης, ενώ μερική ανακρυστάλλωση παρατηρείται στη ΘΕΖ. Το μέγεθος των κόκκων μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας.
- Η σκληρότητα είναι στο 80-85% αυτής του μετάλλου βάσης.
- Γενικά η αντοχή είναι μειωμένη αλλά βελτιώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Μέγιστη αντοχή : 230-240 MPa, Μέγιστο όριο διαρροής: 180-190 MPa.
- Η θραύση λαμβάνει χώρα στην πλευρά προώθησης, στο σύνορο της ΖΣ και της ΘΜΕΖ.
- Παρατηρήθηκαν ατέλειες όπως πορώδες και ρωγματοειδείς ατέλειες.

#### 5.5 ΤΙΤΑΝΙΟ

- Κύρια παράμετρος η υπέρβαση ή όχι της θερμοκρασίας (880°C) όπου συμβαίνει ο αλλοτροπικός μετασχηματισμός από δομή hcp σε bcc.
- Διακρίνονται οι ΖΣ, ΘΜΕΖ και ΜΒ.
- Η μικροδομή στη ΖΣ είναι λεπτόκοκκη και ισοαξονική ενώ υπάρχουν και κάποιες διδυμίες. Μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας. Παρατηρείται κρυσταλλογραφική διεύθυνση. Στο κέντρο της ΖΣ υπάρχει αύξηση της πυκνότητας διαταραχών.
- Η σκληρότητα αυξάνεται από ένα συνδυασμό ταχύτητας πρόωσης – ταχύτητας περιστροφής και ύστερα ( 0.25 mm/r). Η αύξησή της δεν ακολουθεί την εξίσωση Hall- Petch σε όλο το εύρος των ταχυτήτων ( στις υψηλές ταχύτες αυξάνεται με σαφώς υψηλότερο ρυθμό).
- Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μειωμένη εκτός από ένα βέλτιστο που έχει παρατηρηθεί στα 200 mm/min -200 rpm όπου και υπερβαίνει ελάχιστα την αντοχή του ΜΒ.

## 5.6 ΧΑΛΥΒΕΣ

### 5.6.1 ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΥΠΟΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΕΙΣ

- Δεν διακρίνεται ΘΜΕΖ. Η μικροδομή της συγκόλλησης είναι λεπτόκοκκη με μέγεθος κόκκων μικρότερο από αυτό του ΜΒ.
- Η ικανοποιητικότερη μικροδομή (και ιδιότητες) επιτυγχάνεται όταν οι παράγοντες της συγκόλλησης επιλεγθούν έτσι ώστε η συγκόλληση να γίνει στην περιοχή φερρίτη – ωστενίτη και όταν ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη συμβεί μετά το πέρας της συγκόλλησης.
- Παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας λόγω μείωσης του μεγέθους των κόκκων
- Η αντοχή είναι βελτιωμένη σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Σε όλα τα κράματα η θραύση έγινε στο μέταλλο βάσης.

### 5.6.2 ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΥΠΕΡΕΥΤΗΚΤΟΕΙΔΕΙΣ

- Δε διακρίνεται ΘΜΕΖ.
- Στη ΖΣ διακρίνονται δύο περιοχές. Η πρώτη έχει μαρτενσιτική δομή με ένα μικρό ποσοστό μάζας ωστενίτη ενώ η δεύτερη έχει μαρτενσιτική δομή με σωματίδια σεμεντίτη. Η δομή στη ΘΕΖ αποτελείται από φερρίτη, σεμεντίτη και μαρτενσίτη.
- Παρατηρείται σημαντική αύξηση σκληρότητας στη ζώνη συγκόλλησης.

### 5.6.3 ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

- Η τελική δομή της ΖΣ είναι κυρίως μαρτενσιτική καθώς ο μαρτενσίτης μετασχηματίστηκε σε ωστενίτη, ο οποίος κατόπιν υπέστη εκ νέου μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.
- Η ΘΕΖ αποτελείται από δύο περιοχές, μία πολυγωνικού φερρίτη-περλίτη και μία επαναφερμένου μαρτενσίτη.
- Παρατηρήθηκε μείωση της σκληρότητας. Υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στη σκληρότητα ανάμεσα στην κορυφή και τη ρίζα της συγκόλλησης.

### 5.6.4 ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ (304)

- Η μικροδομή της ΖΣ χαρακτηρίζεται από ισοαξονικούς κόκκους μεγέθους μικρότερου από το ΜΒ. Η μείωση των κόκκων είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα περιστροφής.
- Οι ιδιότητες είναι βελτιωμένες. Μέγιστο όριο αντοχής : 735 ΜΡα, Μέγιστο όριο διαρροής: 430 ΜΡα.
- Η αντοχή σε διάβρωση λόγω περικρυσταλλικής διάβρωσης είναι καλύτερη συγκριτικά με άλλες μεθόδους συγκόλλησης με το πρόβλημα να εντοπίζεται κυρίως στην πλευρά πρόωσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## I. ΒΙΒΛΙΑ

- Παντελής Δ., Χρυσουλάκης Γ. (1996), «*Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996
- Παπάζογλου Β. (1995), «*Ναυπηγική Τεχνολογία*», Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 1995
- Παπάζογλου Β., Παπαδημητρίου Γ (1994), «*Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων*», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1994

## II. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- Σώκου Μ. (2010), «*Μελέτη της ροής του υλικού κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση*», Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2010

## III. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

- Afrin N., Chena D.L., Cao X., Jahazi M. (2007), “*Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy*”, Materials Science and Engineering, A 472, 2008
- Assidi M., Fourment L., Guerdoux S., Nelson T (2009), “*Friction model for friction stir welding process simulation: Calibrations from welding experiments*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50, 2010
- Buffa G, Hua J., Shivpuri R., Fratini L. (2005) “*A continuum based fem model for friction stir welding—model development*”, Materials Science and Engineering A 419, 2006
- Cao X., Jahazi M. (2008), “*Effect of welding speed on the quality of friction stir welded butt joints of a magnesium alloy*”, Materials and Design, 30, 2009
- Chen H.B (2006), “*The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds*”, Materials Science and Engineering, A 433, 2006

- Chen Y.C., Nakata K. (2009), “*Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir processed SKD61 tool steel*”, *Materials Characterization*, 60, 2009
- Chowdhury S.M. (2010), “*Tensile properties and strain-hardening behavior of double-sided arc welded and friction stir welded AZ31B magnesium alloy*”, *Materials Science and Engineering, A* 527, 2010
- Chung Y.D., Fujii H., R. Ueji, N. Tsuji (2010), “*Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility*”, *Scripta Materialia*, 63, 2010
- Colligan K.J, Mishra R.S. (2007), “*A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum*”, *Scripta Materialia*, 58, 2008
- Fazel-Najafabadi M. , Kashani-Bozorg S.F. ,Zarei-Hanzaki A. (2010), “*Joining of CP-Ti to 304 stainless steel using friction stir welding technique*”, *Materials and Design* 31, 2010
- Fratini L., Buffa G., Palmeri D. (2009), “*Using a neural network for predicting the average grain size in friction stir welding processes*”, *Computers and Structures*, 87, 2009
- Fratini (2007), “*Improving friction stir welding of blanks of different thicknesses*”, *Materials Science and Engineering, A* 459, 2007
- Fujii H., Cui L., Tsuji, Maeda M., Nakata K., Nogi K. (2006), “*Friction stir welding of carbon steels*”, *Materials Science and Engineering A* 429, 2006
- Fujii H., Sun Y., Kato H., Nakata K. (2010), “*Investigation of welding parameter dependent microstructure and mechanical properties in friction stir welded pure Ti joints*”, *Materials Science and Engineering, A* 527, 2010
- Ghosh M., Kumar K., Mishra R.S. (2010), “*Analysis of microstructural evolution during friction stir welding of ultrahigh-strength steel*”, *Scripta Materialia*, 2010
- Guerra M., Schmidta C., McClurea J.C. ,Murra L.E. , Nunesb A.C. (2001), “*Flow patterns during friction stir welding*”, *Materials Characterization* 49, 2003

- Hamilton C, Dymek S., Blicharski M. (2007), “*A model of material flow during friction stir welding*”, *MATERIALS CHARACTERIZATION*, 59, 2008
- Hwang Y.M. , Fan P.L. , Lin C.H. (2010), “*Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals*”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010
- Juhas, Viswanathan, Fraser (2001),”*Proceedings of the Lightweight Alloys for Aerospace Application*”, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001
- Khandkar MZH, Khan JA, Reynolds AP. (2003), “*Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model.*” *Sci Technol Weld Join*, 8, 2003
- Kumar K., Kailas S.V. ( 2008), “*The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation*”, *Materials Science and Engineering*, A 485, 2008
- Kwon Y.J. (2008), “*Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys*” *Materials Letters*, 62, 2008
- Lienert T.J., Jata K.V. , Wheeler R. , Seetharaman V. (2001) “*Proceedings of the Joining of Advanced and Specialty Materials III*”, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001
- Lee W-B., Jung S-B. (2004), “*The joint properties of copper by friction stir welding*”, *Materials Letters* 58, 2004
- LIU Hui-jie, ZHANG Hui-jie (2008), “*Repair welding process of friction stir welding groove defect*”,
- Lorrain O., Favier V., Zahrouni H., Lawrjaniec D. (2008), “*Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools*”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010
- Meran C. (2005), “*The joint properties of brass plates by friction stir welding*”, *Materials and Design* 27, 2006

- Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. (2009), “*Development of grain structure during friction stir welding of pure titanium*”, *Acta Materialia*, 57, 2009
- Mironov S, Zhang Y, Sato YS, Kokawa H. (2008), “*Crystallography of transformed beta microstructure in friction stir welded Ti–6Al–4V alloy*”. *Scripta Mater.*, 2008
- Mishra R.S., Mab Z.Y. (2005), “*Friction stir Welding and processing*”, *Materials Science and Engineering R 50*, 2005
- Nandan R. , Debroy T., Bhadeshia H.K.D.H. (2008), “*Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties*” *Progress in Materials Science*, 53, 2008
- Nandan R. , Debroy T., Lienert T.J., Roy G.G. (2006), “*Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel*”, *Acta Materialia*, 55, 2007
- Park S.H.C, Sato Y.S., Kokawa H., Okamoto K., Hirano S., Inagaki M. (2004), “*Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel*”, *Scripta Materialia*, 51, 2004
- Park S.H.C, Sato Y.S., Kokawa H., Okamoto K., Hirano S., Inagaki M. (2003), “*Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding*”, *Scripta Materialia*, 49, 2003
- Ramirez A.J., Juhas M.C. (2003) , “*Microstructural Evolution in Ti-6Al-4V Friction Stir Welds*”, *Materials Science Forum*, 426-432, 2003
- Reynolds A.P., Tang W., Gnaupel-Herold T., Prask H. (2002), “*Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds*”, *Scripta Materialia*, 48, 2003
- RESERCH CENTER OF THE BELGIAN WELDING INSTITUTE  
(2006), “*TAP2/PAT2 project CASSTIR about friction stir welding of aluminium alloys*”
- Satoshi H., Kazutaka O., Masayuki D., (2003), “*Microstructure of Dissimilar Joint Interface of Magnesium Alloy and Aluminum Alloy by Friction Stir Welding*”, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 21, 2003



- Sato Y.S., Yamanoi H., Kokawa H., Furuhashi T. (2007), “*Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding*”, *Scripta Materialia*, 57, 2007
- Schmidt H.B. and Hattel J.H. (2007), “*Thermal modelling of friction stir welding*” *Scripta Materialia*, 58, 2008
- Shen J.J., Liu H.J., Cui F. (2010), “*Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper*”, *Materials and Design*, 31, 2010,
- Suhuddin, Mironov, Sato, Kokawa, Lee (2009), “*Grain structure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy*”, *Acta Materialia* 57, 2009
- Sun Y. (2010), “*Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of Zr55Cu30Al10Ni5 bulk metallic glass with pure copper*”, *Materials Science and Engineering*, A 527, 2010
- Ueji R., Fujii H, Cui L., Nishioka A. (2005), “*Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process*”, *Materials Science and Engineering*, A 423, 2006
- Uzun H. (2004), “*Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel*”, *Materials and Design*, 26, 2005
- Vilaca P., Quintino L., dos Santos Jorge F. (2004), “*iSTIR—Analytical thermal model for friction stir welding*”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 2005
- Wang X, Wang K. (2006), “*Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy.*”, *Mater Sci Eng A* , 2006
- Watanabe T., Takayama H., Yanagisawa A. (2006), “*Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding*”, *Journal of Materials Processing Technology*, 178, 2006
- Yang Q., Mironov S., Sato Y.S., Okamoto k. (2010) “*Material flow during friction stir spot welding*”, *Materials Science and Engineering*, A 527, 2010

- Zhang H.-W (2006), "*Effect of viscosity on material behavior in friction stir welding process*" Trans. Nonferrous Met. SOC. China, 16, 2006
- Zhang H.W., Zhang Z., Chen J.T. (2005), "*The finite element simulation of the friction stir welding process*", Materials Science and Engineering, A 403, 2005
- Zhang H.W., Zhang Z., Chen J.T. (2005), "*3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters*", Journal of Materials Processing Technology, 183, 2007
- Zhang H., Lin S.B. (2005), "*Defects formation procedure and mathematic model for defect free friction stir welding of magnesium alloy*", Materials and Design 27,2006
- Zhang Y, Sato YS, Kokawa H, Park SHC, Hirano S. (2008), "*Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds.*" Mater Sci Eng A, 2008
- Zhou L., Liu H.J., Liu Q.W. (2010), "*Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welded joints*", Materials and Design 31, 2010
- Zhu X.K, Chao H.J. (2002), "*Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel*", Journal of Materials Processing Technology, 146, 2004