

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

# ΡΟΪΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 5083 ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ COMSOL MULTIPHYSICS

ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επίβλεψη: Δημήτρης Ι. Παντελής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Αφιερωμένη στον αδελφό μου και στους γονείς μου

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Η ανάπτυξη του ροϊκού μοντέλου της συγκόλλησης πραγματοποιήθηκε στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics.

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Δημήτρη Ι. Παντελή για την ανάθεση της εργασίας αυτής και την καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της μελέτης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Καρακίζη για την άριστη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδελφό μου και τους γονείς μου για τη συνεχή στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

# <u>Περίληψη</u>

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding - FSW) είναι μια σχετικά καινούρια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης. Χρησιμοποιείται πια ευρέως σε διάφορους τομείς της κατασκευαστικής βιομηχανίας, όπως την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και τη ναυπηγική, για τη συγκόλληση μεταλλικών κραμάτων που είναι δύσκολο να συγκολληθούν με τις κλασικές μεθόδους τήξης. Ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς έρευνας στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι η μελέτη της ροής του υλικού στην περιοχή γύρω από το εργαλείο καθώς και το πώς αυτή επηρεάζει τη μεταλλουργική δομή και τις μηχανικές ιδιότητες της περιοχής συγκόλλησης.

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι μια πολύ περίπλοκη διεργασία, κατά την οποία αρκετά διαφορετικά φυσικά φαινόμενα συμβαίνουν ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν. Για να κατανοήσουμε τη διεργασία αυτή, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τη φύση της ροής του υλικού γύρω από το εργαλείο. Η πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων με σκοπό την ανάλυση της ροής αποδείχθηκε αρκετά χρονοβόρα και υψηλού κόστους για τους ερευνητές. Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω εμπόδια, από το 2000 γίνονται μελέτες με σκοπό την αριθμητική προσομοίωση της διεργασίας FSW.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα συνδυασμένο θερμικό – ροϊκό μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής με χρήση του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics για τη μοντελοποίηση FSW αλουμινίου 5083. Το υπό συγκόλληση υλικό θεωρείται ρευστό υψηλού ιξώδους και γίνεται ανάλυση της ροής του γύρω από το περιστρεφόμενο εργαλείο. Τα ροϊκά πεδία που παράγονται από το πρόγραμμα μας δείχνουν τη μορφή της ροής στην περιοχή συγκόλλησης. Επίσης εξετάζεται η μεταβολή του δυναμικού ιξώδους, του πεδίου ταχυτήτων και του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης για διάφορες παραμέτρους συγκόλλησης. Καινοτομία της εργασίας αποτελεί η προσπάθεια μοντελοποίησης της συγκόλλησης δίνοντας στον άξονα του εργαλείου μια μικρή κλίση προς την αντίθετη κατεύθυνση της συγκόλλησης (tilt angle). Τέλος τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω μελέτη αναλύονται διεξοδικά, συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και εν κατακλείδι αντλώνται συμπεράσμτα.

## **Abstract**

Friction stir welding is a relatively new solid state joining technique. It is widely used in various sectors of the industry, such as automotive, railway, aerospace and shipbuilding in order to join different metallic alloys that are hard to be welded by conventional fusion welding. One of the most important fields of research in friction stir welding is the study of the material flow around the tool and how it affects the metallurgy and the mechanical properties of the welded area.

Friction stir welding is a highly complex process comprising several coupled physical phenomena. In order to understand the process it is very important to know the nature of the material flow that occurs around the tool. Lab experiments are often time consuming and costly for the researchers. In order to overcome these obstacles, numerical simulation has frequently been used since the 2000s.

In the present work a model based approach is adopted in order to study the material flow. A coupled thermal and flow CFD model is developed using the Finite Element package, Comsol Multiphysics, for the friction stir welding simulation of aluminum 5083. The material is considered as a high viscosity fluid and the flow analysis is done. The flow fields generated by the streamline plot give an idea of the material flow. The variation of dynamic viscosity, velocity field and shear strain fields with various welding parameters is studied. An innovation of the study is the attempt to model the FSW process with a tilt angle of 3 degrees. Finally the results obtained from the above mentioned conditions is discussed elaborately, compared with experimental results obtained in the Shipbuilding Technology Laboratory and concluded.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
Περίληψη	ii
Abstract	iii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	2
Ι.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	2
Ι.1.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	2
Ι.1.2 Παράμετροι της συγκόλλησης	5
Ι.1.3 Παραγωγή θερμότητας και ζώνες συγκόλλησης	8
Ι.1.4 Ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση	10
Ι.1.5 Ατέλειες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση	12
Ι.1.5 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα της μεθόδου	14
Ι.2 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ	15
Ι.2.1 Ιδιότητες αλουμινίου	15
Ι.2.2 Κράματα αλουμινίου	16
Ι.2.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000	19
Ι.3 ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ - ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ ΡΟΗ	20
Ι.3.1 Έννοια του Ιξώδους	20
Ι.3.2 Νευτώνεια ρευστά	21
Ι.3.3 Μη Νευτώνεια ρευστά	22
Ι.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	25
Ι.4.1 Μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (MHS)	26
Ι.4.2 Μεθοδολογία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)	
Ι.4.3 Μεθοδολογία Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)	43
ΙΙ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	45
ΙΙ.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	

II.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου	45
II.1.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν	48
ΙΙ.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	50
II.2.1 Εξίσωση μεταφοράς θερμότητας	50
II.2.2 Συνοριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας	51
ΙΙ.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΟΪΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	53
II.3.1 Εξισώσεις περιγραφής της ροής	54
ΙΙ.3.2 Συνοριακές συνθήκες	55
ΙΙ.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	58
ΙΙ.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ	60
ΙΙ.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	62
ΙΙΙ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	63
ΙΙΙ.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	63
ΙΙΙ.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΟΪΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	67
III.2.1 Εισαγωγή ταχύτητας στον πείρο	67
III.2.2 Εισαγωγή ταχύτητας στο περιαυχένιο	69
III.2.3 Εισαγωγή κλίσης στον άξονα του εργαλείου 3°	74
III.2.4 Μελέτη ροής για διαφορετικές συνθήκες επαφής	78
III.2.5 Μελέτη ροής για διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης	80
III.2.6 Μελέτη ροής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής	82
III.2.7 Μελέτη ιξώδους στην περιοχή του εργαλείου	84
III.2.8 Μελέτη του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης	
III.2.9 Μελέτη του πεδίου ταχυτήτων	91
ΙΥ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	95
V. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σημαντικότερος παράγοντας ανέγερσης σύνθετων κατασκευών έιναι ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων που τις αποτελούν. Οι τρόποι σύνδεσης μεταλλικών υλικών διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Μηχανική σύνδεση: Κοχλιώσεις, Ηλώσεις
- Μεταλλουργική σύνδεση: Συγκόλληση
- Σύνδεση με κόλλες: Κόλληση

Η εισαγωγή της συγκόλλησης ως μέσο σύνδεσης στοιχείων μεταλλικών κατασκευών και η εξέλιξη της επιστήμης και τεχνικής των συγκολλήσεων έχει προσφέρει και συνεχίζει να προσφέρει νέες δυνατότητες στον τομέα των κατασκευών. Η συγκόλληση μπορεί να οριστεί ως: «η ένωση δύο ή περισσότερων τεμαχίων με θερμότητα ή πίεση ή συνδυασμό των δύο έτσι ώστε τα υλικά να σχηματίζουν μια συνέχεια. Στην ένωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πληρωτικό υλικό με σημείο τήξης παραπλήσιο του μητρικού υλικού»[1].

Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των συγκολλήσεων είναι [2]:

- Η καλύτερη αντοχή δεδομένου ότι μια συγκόλληση μπορεί να έχει μέχρι και το 100% της αντοχής του βασικού μετάλλου
- Η πλήρης στεγανότητα
- Η οικονομία υλικού με πιθανή μείωση βάρους 10 20%
- Δεν υπάρχει περιορισμός στο πάχος των υπό συγκόλληση τεμαχίων
- Η απλούστευση των κατασκευών με συνέπεια την κατασκευή σε λιγότερο χρόνο και με χαμηλότερο κόστος

Οι συγκολλήσεις μπορούν να ταξινομηθούν ως προς την χρησιμοποιούμενη μέθοδο στις ακόλουθες μεγάλες δύο κατηγορίες:

- Συγκολλήσεις τήξης όπου η σύνδεση πραγματοποιείται χωρίς την εφαρμογή πίεσης
- Συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης όπου η σύνδεση πραγματοποιείται με πίεση χωρίς προηγούμενη τήξη, εκτός ίσως ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την εργασία εμπίπτει στη δεύτερη κατηγορία.

# Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Ι.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (friction stir welding - FSW) είναι μια σύγχρονη μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης η οποία εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε αρχικά από το TWI (The Welding Institute) στο Cambridge της Αγγλίας το 1991 [3]. Αρχικός σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου, σήμερα όμως χρησιμοπιείται και για τη σύγκόλληση διαφόρων άλλων μετάλλων όπως ο χαλκός, το τιτάνιο, το μαγνήσιο, ο χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το νικέλιο και σε πολυμερή [4].

#### Ι.1.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Αρχικά για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση πρέπει τα τεμάχια να συγκρατούνται σε σταθερή θέση, συνήθως πάνω σε μια πλάκα στήριξης, διότι διαφορετικά θα απωθούνταν. Κατά την έναρξη της συγκόλλησης αρχίζει η περιστροφή ενός μη καταναλισκόμενου εργαλείου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και η εισαγωγή του πείρου με πίεση στην αρχή της ραφής των υπό συγκόλληση τεμαχίων. Όταν το περιαυχένιο έρθει σε επαφή με το υπο συγκόλληση υλικό, σημαντική ποσότητα θερμότητας παράγεται στη διεπιφάνεια. Η αύξηση της θερμοκρασίας μαλακώνει το υλικό, μέρος του οποίου πλαστικοποιείται. Παρόλο που παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας, το υλικό παραμένει στη στερεά του φάση καθώς η θερμοκρασία συνήθως φτάνει το 80 με 90% της θερμοκρασίας τήξης του υλικού. Η αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή της συγκόλλησης σε συνδυασμό με την πιέση που ασκείται από το εργαλείο έχουν ως αποτέλεσμα την ανάδευση του υλικού. Στη συνέχεια το εργαλείο μετακινείται με σταθερή ταχύτητα πρόωσης κατά μήκος της ραφής και επιτυγχάνεται η συγκόλληση των δοκιμίων (σχήμα Ι.1) [5].



Σχήμα Ι.1 Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

Η διεργασία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση χωρίζεται σε τέσσερις φάσεις, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα Ι.2 [6].

- 1) Φάση βύθισης του εργαλείου στο υλικό (Plunge phase)
- 2) Φάση σταθεροποίησης (Dwell or stabilization phase)
- 3) Φάση συγκόλλησης (Welding or advancing phase)
- 4) Φάση αφαίρεσης του εργαλείου (Removal phase)

Κατά τη διάρκεια της φάσης βύθισης, ξεκινάει η περιστροφή του εργαλείου και στη συνέχεια αυτό βυθίζεται στα δοκίμια. Σε αυτή τη φάση το υλικό είναι σχετικά κρύο, καθώς μόνο ο πείρος έρχεται σε επαφή με αυτό. Η αξονική δύναμη και η ροπή που ασκείται στο εργαλείο είναι αρκετά υψηλή και στις περισσότερες περιπτώσεις φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Στο τέλος της φάσης βύθισης, ο πείρος έχει εισχωρήσει πλήρως μέσα στο υλικό και το περιαυχένιο είναι σε επαφή με την επιφάνεια των δοκιμίων. Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου στη φάση της βύθισης είναι συχνά η ίδια με αυτή της φάσης συγκόλλησης.



Σχήμα Ι.2 Φάσεις της friction stir welding

Η φάση σταθεροποίησης ξεκινάει όταν το επιθυμητό βάθος διείσδυσης του εργαλείου έχει επιτευχθεί. Η αξονική δύναμη συνεχίζει να ασκείται στο εργαλείο κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Ο συνδυασμός της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του περιστρεφόμενου εργαλείου και του υλικού μαζί με την ασκούμενη αξονική δύναμη προκαλεί την παραγωγή θερμότητας λόγω τριβής στη διεπιφάνεια εργαλείου – υλικού. Το εργαλείο παραμένει σε αυτή τη θέση μέχρι η θερμοκρασία να φθάσει την απαιτούμενη για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση.

Μετά τη φάση σταθεροποίησης το εργαλείο αρχίζει να επιταχύνεται μεχρι να πιάσει την επιθυμητή σταθερή ταχύτητα πρόωσης κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Η επιτάχυνση του εργαλείου δεν πρέπει να γίνει πολύ γρήγορα διότι οι μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται τόσο στο εργαλείο όσο και στον εξοπλισμό της συγκόλλησης μπορεί να μειώσουν το λειτουργικό χρόνο ζωής τους. Ανάλογα με τη γεωμετρία του εργαλείου και τις παραμέτρους συγκόλλησης, μπορεί να δοθεί μια μικρή κλίση προς τα πίσω στον άξονα του εργαλείου (tilt angle) για τη βελτίωση της ποιότητας της συγκόλλησης.

### Ι.1.2 Παράμετροι της συγκόλλησης [10-12]

#### α) Γεωμετρία Εργαλείου

Τα βασικό μέρος του εξοπλισμού της μεθόδου είναι το περιστρεφόμενο εργαλείο (rotating tool) το οποίο θεωρείται μη καταναλισκόμενο. Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη διαμόρφωση της ροής του υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Το κατώτερο τμήμα του εργαλείου αποτελείται από το περιαυχένιο (shoulder), η επιφάνεια του οποίου έρχεται σε επαφή με τα συγκολλούμενα τεμάχια και μέσω τριβής προσδίδει το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης θερμότητας, και τον πείρο (pin ή probe), ο οποίος πραγματοποιεί την ανάδευση.



Σχήμα Ι.3 Εργαλείο συγκόλλησης με κυλινδρικό πείρο με σπείρωμα [7]

Η γεωμετρία του πείρου και του περιαυχενίου επηρεάζουν το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας στο συγκολλούμενο υλικό και κατά συνέπεια την ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται η πλαστικοποίησή του. Η διάμετρος του περιαυχενίου καθορίζει τον όγκο του υλικού που θερμαίνεται και για το λόγο αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο λόγο διαμέτρων περιαυχενίου/πείρου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η πρόσδοση της απαιτούμενης θερμότητας στο υλικό που τίθεται προς ανάδευση στον πείρο. Τέλος η ομοιομορφία της μικροδομής και οι ιδιότητές της καθώς και τα φορτία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, διέπονται από τη γεωμετρία του εργαλείου. Ο πείρος μπορεί να έχει διάφορες γεωμετρικές μορφές π.χ. κυλινδρικός , τριγωνικός με κοίλες πλευρές (trivex pin), επίσης μπορεί να διαθέτει ή όχι σπείρωμα και το ύψος του πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων. Διάφορες γεωμετρίες μπορεί να διαθέτει και το περιαυχένιο π.χ. με αυλάκωση ή τελείως επίπεδο.



Σχήμα Ι.4 Κατατομή εργαλείων συγκόλλησης F.S.W. με διάφορα είδη πείρων [8]

#### β) Γωνία κλίσης εργαλείου και βάθος διείσδυσης

Εκτός από τη γεωμετρία του εργαλείου, σημαντικό ρόλο στη ροή του υλικού έχει και η κλίση του εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια του τεμαχίου. Δίνοντας μια μικρή κλίση στον άξονα του εργαλείου προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν της συγκόλλησης, εξασφαλίζουμε ότι το περιαυχένιο μεταφέρει το αναδευόμενο υλικό αποδοτικά από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου.

Το βάθος διείσδυσης του πείρου στο υλικό είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας χωρίς ατέλειες. Βάθος διείσδυσης ορίζεται η απόσταση του χαμηλότερου σημείου του πείρου από την άνω επιφάνεια των υπό συγκόλληση τεμαχίων. Όταν το βάθος διείσδυσης είναι πολύ μικρό, το περιαυχένιο δε βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του τεμαχίου και δεν μπορεί να συνεισφέρει στη διαδικασία ούτε θερμικά, ούτε κινητικά αλλά ούτε και στον περιορισμό του υλικού στη ζώνη ανάδευσης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία συγκολλήσεων με ατέλειες όπως εσωτερικά ή επιφανειακά κενά. Αντίθετα όταν το βάθος διείσδυσης είναι πολύ μεγάλο, το περιαυχένιο διεισδύει σε τέτοιο βαθμό εντός του τεμαχίου που παρατηρείται η δημιουργία γρεζιού (flash). Στην περίπτωση αυτή, παράγεται μια σημαντικά κοίλη συγκόλληση, γεγονός το οποίο οδηγεί στην εκλέπτυνση των συγκολλημένων τεμαχίων.



Σχήμα Ι.5 F.S.W. με κλίση του άξονα του εργαλείου προς τα πίσω [9]

#### γ) Ταχύτητα περιστροφής και ταχύτητα πρόωσης

Για την εφαρμογή της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση το εργαλείο εκτελεί δύο κινήσεις. Περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα κάθετο, ή με πολύ μικρή κλίση, στο επίπεδο συγκόλλησης ενώ ταυτόχρονα κινείται κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης.

Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου προκαλεί την ανάδευση και ανάμιξη του υλικού των υπό συγκόλληση τεμαχίων, ενώ η ευθύγραμμη κίνηση προωθεί το πλαστικοποιημένο υλικό από το εμπρός στο πίσω μέρος του πείρου. Μεγάλες ταχύτητες περιστροφής οδηγούν στην πρόσδοση περισσότερης θερμότητας στο υλικό και κατά συνέπεια στην αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή συγκόλλησης. Η αυξημένη θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την πλαστικοποίση μεγαλύτερου όγκου υλικού (μεγαλύτερη ζώνη ανάδευσης) και την εντονότερη ανάδευση και ανάμιξη του.

Η ταχύτητα πρόωσης επηρεάζει κυρίως τη μεταβολή του ιξώδους του πλαστικοποιημένου υλικού εξαιτίας του χρόνου έκθεσής του σε υψηλή θερμοκρασία λόγω της τριβής. Οι χαμηλές ταχύτητες καταλήγουν στην παραμονή του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα που δεν είναι πάντα επιθυμητά, προκαλώντας ελαττώματα, ανάπτυξη κόκκων και συσσωματώματα. Αντίθετα μεγάλες ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την μη επαρκή πλαστικοποίηση του υλικού. Η επιλογή της ταχύτητας πρόωσης εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου με σκοπό να αποδοθεί η απαιτούμενη θερμότητα στο υλικό.

Ο κατάλληλος συνδυασμός ταχύτητας πρόωσης και ταχύτητας περιστροφής μελετάται μέσω της παραμέτρου «weld pitch». Ως weld pitch ορίζεται ο λόγος της ταχύτητας

πρόωσης προς την περιστροφική ταχύτητα. Το weld pitch και η γεωμετρία του πείρου καθορίζουν την πολυπλοκότητα της ροής του υλικού στην περιοχή του εργαλείου, και κατά συνέπεια την ποιότητα της συγκόλλησης.

### Ι.1.3 Παραγωγή θερμότητας και ζώνες συγκόλλησης [12,13]

Η θερμότητα παράγεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από την τριβή του περιαυχενίου με την επιφάνεια των τεμαχίων και σε μικρότερο ποσοστό από την τριβή της επιφάνειας του πείρου με το υλικό. Τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την παραγωγή θερμότητας αναλύονται ως ακολούθως:

- Ολίσθηση (sliding friction), όπου η ταχύτητα του μετάλλου είναι μηδενική και υπάρχει παραγωγή θερμότητας καθαρά από την τριβή.
- Προσκόλληση του υλικού στο εργαλείο (sticking friction), η οποία εμφανίζεται αφου μαλακώσει το υλικό λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Το προσκολλημένο υλικό και το εργαλείο στο σημείο επαφής τους έχουν την ίδια ταχύτητα. Η παραγόμενη θερμότητα στο σημείο αυτό οφείλεται καθαρά στην παραμόρφωση του υλικού.

Η θερμότητα που παράγεται έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και την πλαστικοποίηση του υλικού των τεμαχίων στην περιοχή της ραφής. Το πλαστικοποιημένο υλικό στη συνέχεια αναδεύεται και αναγκάζεται να κινηθεί προς την αντίθετη φορά από αυτήν της συγκόλλησης. Το ήδη αναδευμένο υλικό αποβάλλει τη θερμότητα, που του είχε προσδοθεί, με συναγωγή με το περιβάλλον και με αγωγή με το ψυχρότερο βασικό μέταλλο. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται με τη βαφή του αναδευμένου υλικού καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται και το υλικό επανέρχεται στην πλήρως στερεοποιημένη φάση. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σε όλο το μήκος της ραφής διακρίνονται σε εγκάρσια τομή στην περιοχή της συγκόλλησης τέσσερις ζώνες όπως φαίνεται και στο σχήμα Ι.6.



Σχήμα Ι.6 Βασικές ζώνες του υλικού μετά το πέρας της F.S.W.

Η ζώνη ανάδευσης (Nugget) είναι η περιοχή όπου η πλαστική παραμόρφωση και η προσδιδόμενη θερμότητα έχουν ως αποτέλεσμα τη δυναμική ανακρυστάλλωση των κόκκων. Η ανακρυστάλλωση που συντελείται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στη ζώνη ανάδευσης οδηγεί σε λεπτόκοκκη μικροδομή. Έχει διαπιστωθεί ότι το μέγεθος των ανακρυσταλλωμένων κόκκων μπορεί να μειωθεί με ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα πρόωσης.

Η ζώνη ανάδευσης οριοθετείται από τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ -TMAΖ). Η ονομασία της περιοχής αυτής οφείλεται στην ταυτόχρονη ανάπτυξη έντονων θερμικών και μηχανικών φαινομένων. Το βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης περιοχής είναι οι υψηλές ασκούμενες μηχανικές παραμορφώσεις, οι οποίες κατά κύριο λόγο είναι πλαστικές. Οι κόκκοι του υλικού στη ζώνη αυτή, λόγω των υψηλών παραμορφώσεων, επιμηκύνονται γύρω από τη ζώνη ανάδευσης. Παρόλο που το υλικό στην περιοχή αυτή υπόκειται σε έντονη αναδιαμόρφωση, λόγω του ασταθούς ρυθμού παραμόρφωσης, δεν προκαλείται δυναμική ανακρυστάλλωση των κόκκων αυτού. Η μορφή της ΘΜΕΖ όπως προκύπτει από ερευνητικές μελέτες καθορίζεται κυρίως από τη διάμετρο του περιαυχενίου και του πείρου.

Η μετάβαση από τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ - ΗΑΖ) γίνεται στην περιοχή όπου οι μηχανικές παραμορφώσεις εξαλείφονται και το υλικό επηρεάζεται από το εργαλείο μόνο θερμικά. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται μόνο μια ελαφρά εξομάλυνση των ορίων των κόκκων. Επίσης παρατηρείται διαλυτοποίηση των δευτερευουσών φάσεων ενίσχυσης στα θερμοσκληρυνόμενα κράματα ή μικρή ανόπτηση και απαλοιφή της όποιας εργοσκλήρυνσης στα εργοσκληρυνόμενα κράματα. Τέλος η ζώνη μητρικού υλικού ή μετάλλου βάσης (Base Metal) είναι η περιοχή στην οποία οι ιδιότητες του υλικού μένουν ανεπηρέαστες μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης.

### Ι.1.4 Ροή του υλικού κατά τη συγκόλληση [14,15]

Στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση η πλευρά στην οποία η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης έχουν την ίδια φορά ονομάζεται προωθούμενη (advancing side), ενώ η πλευρά στην οποία η περιστροφική ταχύτητα και η ταχύτητα πρόωσης έχουν αντίθετη φορά ονομάζεται υποχωρούσα (retreating side).

Αρχικά θεωρείται ότι η ροή υλικού κατά την FSW χωρίζεται σε δύο κατηγορίες (Σχήμα Ι.7):

α) ροή η οποία προκαλείται από το περιαυχένιο (shoulder-driven flow) και κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατ' όγκο

β) ροή η οποία προκαλείται από τον πείρο (pin-driven flow), κατά την οποία η μεταφορά του υλικού γίνεται κατά στρώματα



Σχήμα Ι.7 (a), (b): Ροή προκαλούμενη από τον πείρο συγκόλλησης, (c), (d): Ροή μετά την επαφή του περιαυχενίου με το συγκολλούμενο υλικό

Σε εγκάρσια τομή στην περιοχή της ζώνης ανάδευσης μπορούμε να διακρίνουμε πέντε αναπτυσσόμενες ζώνες ροής μετάλλου (σχήμα Ι.8). Οι ζώνες Ι και ΙΙ αντιπροσωπεύουν τις

ζώνες εξώθησης υλικού στην προωθούμενη και υποχωρούσα πλευρά αντίστοιχα. Η ζώνη III (flow arm zone) βρίσκεται στην άνω επιφάνεια της ζώνης ανάδευσης και αποτελείται από υλικό, το οποίο σύρεται λόγω του επριαυχενίου από την υποχωρούσα πλευρά γύρω από το πίσω μέρος του εργαλείου και εναποτίθεται στην προωθούμενη πλευρά. Η ζώνη IV είναι η ζώνη στροβιλισμού του υλικού κοντά και κάτω από την οριζόντια επιφάνεια του πείρου. Η ζώνη Ι είναι αυτή στην οποία καταλήγει το υλικό το οποίο μεταφέρεται διαμέσου των υπολοίπων ζωνών. Η ζώνη V ονομάζεται ζώνη ανακυκλοφορίας υλικού (recirculation zone) και μπορεί να σχηματιστεί όταν αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες αν η ποσότητα του ρέοντος υλικού που τείνει να εναποτεθεί πίσω από τον πείρο είναι πεισσότερη από το χώρο που προσφέρει ο πείρος προς εναπόθεση καθώς προωθείται κατά το μήκος της γραμμής συγκόλλησης.



Σχήμα Ι.8 Ζώνες ροής του μετάλλου που αναπτύσσονται κατά την FSW σε εγκάρσια τομή

Μελέτες με σκοπό την ανάλυση της ροής του υλικού στην FSW έχουν καταλήξει ότι το υλικό μεταφέρεται σε δύο φάσεις. Αρχικά μέρος του υλικού από την προωθούμενη πλευρά, ακολουθώντας την κίνηση του πείρου, υφίσταται ελικοειδή ροή και καθώς παρασύρεται από τον πείρο μέσα στο υλικό προωθείται προς τα πάνω και εναποτίθεται σε περιοχή πίσω από αυτόν, στην προωθούμενη πλευρά. Στη δεύτερη φάση υλικό από την υποχωρούσα πλευρά γεμίζει τα κενά που δημιουργήθηκαν στην προωθούμενη. Η ροή του υλικού δεν είναι συμμετρική διότι δημιουργούνται σύνθετα χαρακτηριστικά στροβιλισμού και ανάδευσης τα οποία συνθέτουν μια χαοτική – δυναμική ανάμειξη.

### Ι.1.5 Ατέλειες συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση [16]

Μη επαρκής θέρμανση του υλικού στην περιοχή συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό ατελειών όπως ανεπαρκής διείσδυση (lack of penetration), ανεπαρκής τήξη (lack of fusion), σήρραγγες (tunnels), κενά (voids), αυλακώσεις στην επιφάνεια (surface grooves), εκβολή μάζας (ribbon flash), επιφανειακή αποκόλληση υλικού (surface galling), κατάρρευση του πυρήνα συγκόλλησης (nugget collapse) και ελλάττωμα δεσμού φιλιού (kissing bond). Οι παραπάνω ατέλειες συχνά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ογκομετρικές και ατέλειες στη ραφή συγκόλλησης, ενώ ένας ακόμα τρόπος διαχωρισμού των ατελειών είναι με βάση την εισροή ενέργειας. Έχει προαναφερθεί ότι για την πρόσδοση του απαραίτητου ποσού θερμότητας στο υλικό τη μεγαλύτερη ευθύνη έχει ο σωστός συνδυασμος της ταχύτητας πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας του εργαλείου. Όπως φαίνεται και στα σχήματα I.9-I.10 για κάθε είδους συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση υπάρχει μια περιοχή όπου ο συνδυασμός των τιμών των παραπάνω ταχυτήτων δίνει μη ποιοτικές συγκολλήσεις μπορεί να χωριστεί σε τρεις υποπεριοχές που σχετίζονται με τις ακόλουθες ατέλειες:

- Μεγάλη μάζα γρεζιού στα άκρα της συγκόλλησης λόγω υπερβολικής θέρμανσης
- Εμφάνιση κοιλοτήτων ή αυλακώσεων λόγω ανεπαρκούς πρόσδοσης θερμότητας
- Εμφάνιση κοιλοτήτων που οφείλονται στην αφύσικη ανάδευση του υλικού



Σχήμα Ι.9 Κατάλληλες τιμές περιστροφικής ταχύτητας και ταχύτητας πρόωσης



Σχήμα Ι.10 Διάγραμμα ταχύτητας συγκόλλησης προς ταχύτητα περιστροφής με ομαδοποίηση των περιοχών που εμφανίζονται οι ατέλειες και οι χαρακτηριστικότεροι τύποι ατελειών [17]

### Ι.1.5 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα της μεθόδου [18]

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους συγκόλλησης με τήξη. Τα κυριότερα εξ' αυτών είναι:

- Είναι σχετικά απλή μέθοδος χωρίς αναλώσιμα και χρήση προστιθέμενου μετάλλου
- Δεν απαιτείται προετοιμασία της ραφής
- Η απομάκρυνση οξειδίων πριν την έναρξη της συγκόλλησης είναι περιττή
- Η μέθοδος μπορεί να αυτοματοποιηθεί και να πραγματοποιηθεί σε διάφορες θέσεις
- Έχει επιτευχθεί πολύ υψηλή αντοχή στη σύνδεση κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου
- Η FSW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένωση κραμάτων που δεν μπορούν να συγκολληθούν με συγκολλήσεις τήξης λόγω ευαισθησίας σε ρωγμάτωση

Παρ' όλα αυτά η μέθοδος έχει και μειονεκτήματα. Αρχικά η συγκόλληση απαιτεί την ύπαρξη ισχυρών πακτώσεων που δεν είναι πάντα εφικτές. Δεδομένου ότι είναι μια μέθοδος στερεάς φάσης, ένα μεγάλο ποσοστό της φθοράς του εργαλείου λαμβάνει χώρα κατά τη φάση βύθισης του εργαλείου στην αρχή της ραφής των δύο τεμαχίων καθώς το υλικό είναι κρύο σε αυτή τη φάση. Η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου στην FSW είναι σχετικά αργή, γεγονός που καθιστά πολλές φορές τη μέθοδο χρονοβόρα. Λόγω της ανάπτυξης πολύ μεγάλων δυνάμεων κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης μεθόδου συγκόλλησης ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι μεγάλος και δαπανηρός. Επομένως η χρήση τυποποιημένων μηχανών FSW έχει απαιτήσεις υψηλού κόστους κεφαλαίου και σχετικά χαμηλή παραγωγικότητα.

### Ι.2 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ [19,20]

Το αλουμίνιο είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο που ανήκει στην ομάδα ΙΙΙΑ του περιοδικού πίνακα, συμβολίζεται με ΑΙ και έχει ατομικό αριθμό 13. Το καθαρό αλουμίνιο είναι ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η σημασία του για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη διότι έχει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή συγκριτικά με άλλα μέταλλα. Επίσης παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση.



Σχήμα Ι.11 Βασικά στοιχεία αλουμινίου

### Ι.2.1 Ιδιότητες αλουμινίου

Το ατομκό βάρος του καθαρού αλουμινίου είναι 26.9815, η κρυσταλλική δομή του είναι εδροκεντρωμένη κυβική (FCC) και του επιτρέπει να διατηρεί την ολκιμότητά του ακόμα και σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Βασικό μειονέκτημά του είναι το χαμηλό σημείο τήξης του (660 °C), το οποίο θέτει περιορισμούς στη μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του. Το αλουμίνιο είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά αντιδρόν. Ερχόμενο σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως σχηματίζοντας ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, το οποίο του προσφέρει αντιοξειδωτική προστασία. Έχει πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό. Επίσης μορφοποιείται, χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Το καθαρό αλουμίνιο έχει αντιοχή σε εφελκυσμό 49MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ			
	ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	
Ατομικό βάρος	26.98		
Πυκνότητα (20 °C)	2.6898	Kg/m <sup>3</sup>	
Σημείο τήξης	660.2	°C	
Γραμμική διαστολή (0-100 °C)	23.5x10 <sup>-6</sup>	(°C) <sup>-1</sup>	
Ηλεκτρική αντίσταση (20 °C)	2.69	μΩcm	
Μέτρο ελαστικότητας (Ε)	68.3	GPa	
Μέτρο στρέψης (G)	25.5	GPa	
Συντελεστής Poisson	0.34		

### Ι.2.2 Κράματα αλουμινίου

Οι κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγγήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος. Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου φαίνεται στον πίνακα Ι.2

ΠΡΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
Cu	Σε ποσοστό έως 12% προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
Fe	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
Mn	Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
Mg	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6% προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
Si	Βελτιώνει κατά πολύ τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Zn	Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

Πίνακας Ι.2 Κράματα προσθήκης στο αλουμίνιο

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Η διαφορά των διαμορφωμένων κραμάτων από τα χυτά έγκειται στο ότι τα πρώτα, μετά τη διαδικασία της χύτευσης, υποβάλλονται σε πλαστική παραμόρφωση με εν ψυχρώ ή εν θερμώ κατεργασίες ή ακόμα και συνδυασμό αυτών προκειμένου να αποκτήσουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά.

#### Κράματα χυτών

Για την κωδικοποίηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιείται ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων. Το πρώτο ψηφίο υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης, όπως προκύπτει και από τον πίνακα Ι.3.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ	
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99.00%	
2XX.X	Χαλκός	
3XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγνήσιο	
4XX.X	Πυρίτιο	
5XX.X	Μαγνήσιο	
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	
7XX.X	Ψευδάργυρος	
8XX.X	Κασίτερος	
9XX.X	Άλλα στοιχεία	

Πίνακας Ι.3 Κωδικοποίηση κραμάτων χύτευσης

Ο δεύτερος και τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

#### Διαμορφωμένα κράματα

Τα κράματα αυτά χαρακτηρίζονται από έναν τετραψήφιο αριθμό (1XXX, 2XXX,...). Ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα Ι.4.

Κράματα	Σειρά
Αλουμίνιο >99%	1XXX
Χαλκός	2XXX
Μαγγάνιο	3XXX
Πυρίτιο	4XXX
Μαγνήσιο	5XXX
Μαγνήσιο + Πυρίτιο	6XXX
Ψευδάργυρος	7XXX
Άλλα στοιχεία	8XXX
Στοιχεία που δεν χρησιμοποιούνται	9XXX

Πίνακας Ι.4 Κωδικοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης

Ο δεύτερος αριθμός χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00 %, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας. Συνήθως τον τετραψήφιο αριθμό του κάθε κράματος που αναφέρθηκε, ακολουθεί ένα από τα γράμματα F (χωρίς θερμική ή μηχανική κατεργασία), Η (ενδοτράχυνση, μόνο για κράματα διαμόρφωσης), Ο (Ανόπτηση), W (θερμική κατεργασία ομογενοποίησης) και T (θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση) που είναι ενδεικτικά των βασικών κατεργασιών που υποβάλλεται το κράμα.

### Ι.2.3 Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Σε αυτά (σχήμα I.12) το μεγαλύτερο μέρος του μαγνσησίου βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση  $Mg_2AI_3$  (φάση β), η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.



Σχήμα Ι.12 Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων του διμερούς συστήματος Al-Mg

Τα κράματα της σειράς 5000 παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως, της ολκιμότητάς τους. Όταν βρίσκονται στη μεταλλουργική κατάσταση Ο, μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ ή εν θερμώ. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Τα κράματα της σειράς 5000 βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των κατασκευών (αυτοκινητόδρομοι, κτήρια, γέφυρες, δοχεία υπό πίεση, δεξαμενές αποθήκευσης και συστήματα για θερμοκρασίες έως και -270 °C) καθώς και στην αεροναυπηγική, ναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία.

### Ι.3 ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ - ΜΗ ΝΕΥΤΩΝΕΙΑ ΡΟΗ [21,22]

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εκτενής αναφορά στη μοντελοποίηση της FSW και θα δούμε ότι για την εφαρμογή του μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) αντιμετωπίζουμε το υπό συγκόλληση υλικό ως ρευστό υψηλού ιξώδους. Η ροή του υλικού στην περιοχή γύρω από το εργαλείο δεν είναι νευτώνεια και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικά μοντέλα για την ανάλυσή της.

### Ι.3.1 Έννοια του Ιξώδους

Το ιξώδες (viscocity) είναι ίσως η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα ρεολογικής συμπεριφοράς του ρευστού ή ημίρρευστου προϊόντος. Η φυσική του έννοια είναι το μέτρο της αντίστασης του ρευστού στη ροή του, αντιστοιχεί δηλαδή στο μέγεθος της εσωτερικής τριβής των μορίων των ρευστών. Το ιξώδες συνήθως χαρακτηρίζεται ως μέγεθος αντίστροφο του ποιοτικού μεγέθους της ρευστότητας. Μια περισσότερο μαθηματική περιγραφή του ιξώδους είναι ότι αποτελεί ιδιότητα του ρευστού που συσχετίζει τις τάσεις με το ρυθμό παραμόρφωσης.

Έστω ένα τμήμα ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, η μία εκ των οποίων είναι ακίνητη και στην άλλη ασκείται εξωτερική δύναμη F έτσι ώστε να κινείται με σταθερή ταχύτητα **u.** Αν το υγρό δεν έφερε καμία αντίσταση στη σταθερή εξωτερική δύναμη F, η άνω πλάκα θα επιταχυνόταν συνεχώς ομαλά. Αντίθετα, εξαιτίας των δυνάμεων αντίστασης του ρευστού, η άνω πλάκα σύντομα αποκτά σταθερή ταχύτητα εκτελώντας ομαλή κίνηση. Το ρευστό ανάμεσα στις δύο πλάκες θα κινηθεί και όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.13 αναπτύσσεται μια βαθμίδα ταχύτητας (velocity gradient), η οποία είναι γραμμική. Το τμήμα του ρευστού που προσφύεται στην ακίνητη πλάκα θα μείνει ακίνητο ενώ αυτό που είναι σε επαφή με την κινούμενη πλάκα θα κινηθεί με ταχύτητα **u**.

Αν υποθέσουμε ότι το ρευστό χωρίζεται σε στρώματα (στρωτή ροή), μεταξύ των στρωμάτων αυτών ασκούνται δυνάμεις που το θέτουν σε κίνηση. Η δύναμη που ασκείται σε κάθε στρώμα και το θέτει σε κίνηση προς την επιφάνεια του στρώματος αποτελεί την ασκούμενη διατμητική τάση (shear stress). Η διατμητική τάση μεταξύ των ενδιαμέσων στρωμάτων του ρευστού είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας. Η βαθμίδα ταχύτητας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ορίζεται ως ρυθμός διάτμησης (shear rate) ή ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης (shear rate of strain) και συμβολίζεται με γ'.



Σχήμα Ι.13 Ροή ιξώδους ρευστού ανάμεσα σε δύο πλάκες (Couette flow)

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα I.12 η σχέση που συνδέει το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης με τη διατμητική τάση είναι η ακόλουθη:

 $\tau = \mu \dot{\gamma}$ 

όπου μ το ιξώδες.

#### Ι.3.2 Νευτώνεια ρευστά

Η γραμμική αναλογία διατμητικής τάσεως τ και ρυθμού διάτμητικής παραμόρφωσης γ΄ ονομάζεται Νευτώνεια συμπεριφορά (Newton's Law or Newtonian behaviour) και τα ρευστά που ακολουθούν αυτή τη συμπεριφορά καλούνται Νευτώνεια ή Νευτωνικά. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις νευτώνειων ρευστών είναι ο αέρας και το νερό.

Η νευτώνεια συμπεριφορά φαίνεται στο σχήμα Ι.14 ως σχέση γραμμικής αναλογίας της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης όπου το ιξώδες μ αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες, μεγαλώνει και η κλίση της ευθείας, δηλαδή απαιτείται επιβολή μεγαλύτερης διατμητικής τάσης για την επίτευξη μεγαλύτερης τιμής ρυθμού διάτμησης. Το ιξώδες όμως παραμένει σταθερό για αύξηση ή μείωση της διατμητικής παραμόρφωσης.



Σχήμα Ι.14 Νευτώνεια συμπεριφορά ρευστού

Τα ιδανικά ή νευτώνεια ρευστά είναι ασυμπίεστα και ισότροπα, έχουν δηλαδή τις ίδιες ιδιότητες προς κάθε κατεύθυνση της ύλης τους. Επίσης δεν έχουν ελαστικές ιδιότητες, δηλαδή αν κάποια τάση ασκηθεί στο ρευστό, π.χ. διατμητική τάση λογω ανάδευσης, θα προκληθεί μόνιμη παραμόρφωση (ροή) και δε θα έχουμε επανάκτηση του αρχικού σχήματος με την απομάκρυνση της τάσης.

### Ι.3.3 Μη Νευτώνεια ρευστά

Το ιξώδες μπορεί να εξαρτάται από:

- α) Τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία επηρεάζει τον τρόπο που αλληλεπιδρούν τα μόρια.
- β) Το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης (μ=f(ÿ)). Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στο ιξώδες θεωρείται στιγμιαία, δηλαδή αν εφαρμοστεί μεγαλύτερη τάση στο ρευστό αλλάζει ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης με συνέπεια την αλλαγή και του ιξώδους.
- γ) Τη χρονική διάρκεια που ασκείται μία τάση.

Εάν το ιξώδες εξαρτάται είτε από το β) είτε από το γ), το ρευστό παρουσιάζει μη νευτώνεια συμπεριφορά. Η εξάρτηση του ιξώδους μόνο από τη θερμοκρασία δεν αρκεί για να χαρακτηρίσουμε τη συμπεριφορά του μη νευτώνεια. Στην περίπτωση της FSW, το ιξώδες εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης. Τα ρευστά που δεν εμφανίζουν νευτώνεια συμπεριφορά καλούνται μη νευτώνεια ή μη νευτωνικά ρευστά και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Ψευδοπλαστικά (shear thinning) ονομάζονται τα ρευστά των οποίων το ιξώδες μειώνεται όταν αυξάνεται ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης.

Διασταλτικά (shear thickening / Dilatant) ονομάζονται τα ρευστά των οποίων το ιξώδες αυξάνεται όταν αυξάνεται ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης.

**Ρεοπηκτικά (rheopectic)** ονομάζονται τα ρευστά των οποίων το ιξώδες αυξάνεται κατά τη διάρκεια εφαρμογής σταθερής τάσης.

**Θιξοτροπικά (thixotropic)** ονομάζονται τα ρευστά των οποίων το ιξώδες μειώνεται κατά τη διάρκεια εφαρμογής σταθερής τάσης.

**Πλαστικά Bingham (Bingham plastic)** είναι τα ρευστά τα οποία για να ξεκινήσουν να ρέουν πρέπει η διατμητική τάση να πάρει την τιμή της διατμητικής τάσης διαρροής.

**Ιξωδοελαστικά (viscoelastic fluids)** ονομάζονται τα ρευστά που εμφανίζουν ταυτόχρονα ιδιότητες ρευστού και ελαστικές ιδιότητες που αρμόζουν σε στερεά υλικά

Για όλα τα παραπάνω είδη ρευστών δεν ισχύει η γραμμική εξάρτηση τάσης, ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Επομένως θεωρούμε ότι ακολουθούν μια σχέση της μορφής  $\tau = \kappa \dot{\gamma}^n$  (νόμος των Oswald- de Waele) όπου k ο δείκτης συνεκτικότητας του ρευστού και n ο δείκτης ρεολογικής συμπεριφοράς. Για  $0 \le n < 1$  έχουμε ψευδοπλαστική συμπεριφορά, για n = 1 νευτώνεια και για n > 1 διασταλτική. Βασισμένοι στον νόμο των Oswald – de Waele μπορούμε να εξάγουμε μια σχέση υπολογισμού του ιξώδους το οποίο όπως είπαμε εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης.

 $\mu = \kappa \dot{\gamma}^{n-1}$ 

Όσο το n πλησιάζει το 0, η σχέση του ιξώδους με το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης γίνεται περισσότερο μη γραμμική.

Στα σχήματα I.15 και I.16 μπορούμε να δούμε ποιοτικά τη σχέση του ρυθμού διάτμησης με τη διατμητική τάση και το ιξώδες, αντίστοιχα, για διάφορες κατηγορίες μη νευτώνειων ρευστών.



Σχήμα Ι.15 Ρεολογική συμπεριφορά ρευστών – σχέση τάσης, ρυθμού διάτμησης



Σχήμα Ι.16 Ρεολογική συμπεριφορά ρευστών – σχέση ιξώδους, ρυθμού διάτμησης

### Ι.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Οι ιδιότητες και η αποτελεσματικότητα των συγκολλήσεων FSW καθορίζονται από την τελική μικροδομή του υλικού, η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από τη διεργασία τη συγκόλλησης. Η διεργασία της FSW διαφοροποιείται αλλάζοντας τις κύριες παραμέτρους της συγκόλλησης. Επομένως οι παράμετροι της συγκόλλησης πρέπει να επιτλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή μικροδομή. Επιπλέον καλή γνώση της διεργασίας FSW είναι προαπαιτούμενη για μια αξιόπιστη πρόβλεψη της έκτασης της συγκολλούμενης περιοχής, της τελικής μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων. Λόγω της πολυπλοκότητας της συκόλλησης κατά τη διάρκεια που αυτή πραγματοποιείται. Η αριθμητική προσομοίωση προσπαθεί να δώσει λύση στο παραπάνω πρόβλημα παρέχοντας έναν ουσιαστικό τρόπο ανάλυσης της διαδικασίας σχηματισμού της συγκόλλησης και προβλέποντας τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η εκτενής μελέτη της βιβλιογραφίας που αφορά τη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση δείχνει ότι οι ερευνητές έχουν καταλήξει σε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση της μοντελοποίησης είναι η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (Moving heat source - MHS). Τα τελευταία όμως χρόνια, παρά την πολυπλοκότητα της εφαρμογής τους, ερευνητές έχουν προσπαθήσει να προσεγγίσουν το πρόβλημα μέσω της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational fluid dynamics - CFD) και της εξελιγμένης μεθόδου μοντελοποίησης Arbitrary Langarian Eulerian (ALE). Η ύπαρξη διαφορετικών μεθόδων μοντελοποίησης της FSW οφείλεται στην πολυπλοκότητα της διεργασίας, κατά την οποία λαμβάνει χώρα μια αλληλουχία αλληλεπιδρόντων φυσικών μηχανισμών. Η βασική αλληλουχία των φυσικών αυτών μηχανισμών είναι η ακόλουθη: η τριβή μεταξύ του εργαλείου και του υλικού σε συνδυασμό με την πλαστική παραμόρφωση λόγω ανάδευσης παράγει θερμότητα με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και την ανάπτυξη θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων, ενώ ταυτόχρονα επιδρά στην ένταση των δεσμών μεταξύ των μορίων του υλικού, καθορίζοντας την αναδευσιμότητα και την ποιότητα της σύνδεσης.

### I.4.1 Μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (MHS)

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής, η διεργασία της συγκόλλησης προσομοιάζεται ως μια θερμομηχανική διεργασία κατά την οποία μία πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της ραφής συγκόλλησης αυξάνοντας τη θερμοκρασία του υλικού (σχήμα Ι.17). Η θερμότητα που προσδίδεται στο υλικό από τη θερμική πηγή υπολογίζεται με χρήση κατάλληλων αναλυτικών σχέσεων και στη συνέχεια εισάγεται σε ένα αριθμητικό μοντέλο, συνήθως πεπερασμένων στοιχείων, από το οποίο υπολογίζεται το θερμοκρασιακό ιστορικό της διεργασίας. Η πλειοψηφία των μελετών που κάνουν χρήση αυτής της μεθοδολογίας δεν λαμβάνουν υπόψιν τη θερμότητα που παράγεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης διότι δεν είναι εύκολο να υπολογισθεί με χρήση αναλυτικών σχέσεων. Κατά συνέπεια θεωρείται ότι η παραγόμενη θερμότητα οφείλεται μόνο στην τριβή του εργαλείου με το υλικό.



Σχήμα Ι.17 Μοντελοποίηση FSW με τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής στο λογισμικό ANSYS

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για τη μοντελοποίηση της διεργασίας της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση με τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής δεν υπολόγιζαν τη θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής του πείρου με το υλικό θεωρώντας την αμελητέα. Επομένως θεωρούταν ότι η θερμότητα παράγεται μόνο από την τριβή της επιφάνειας του περιαυχενίου με την ανώ επιφάνεια των τεμαχίων και με αγωγή μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό. Οι Frigaard, Grong και Midling [23,24] το 1998

ήταν οι πρώτοι που εφάρμοσαν τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής και πρότειναν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμότητας:

$$Q_{Total} = \sum_{i} \frac{4}{3} \pi^2 \mu_F \sigma_v \omega \left( R_i^3 - R_{i-1}^3 \right)$$
(1)

όπου:

 $Q_{Total}$ η θερμότητα που παράγεται από το περιαυχένιο

- $\mu_F$ ο συντελεστής τριβής μεταξύ εργαλείου και πλάκας
- $\sigma_v$ η κατακόρυφη πίεση στο εργαλείο
- ω η ταχύτητα περιστροφής
- $R_i$  η εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου i

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η επιφάνεια του περιαυχενίου χωρίζεται σε (i-1) δακτυλίους εξωτερικής ακτίνας  $R_i$ , με  $R_i$  να παίρνει τιμές στο διάστημα ( $R_{pin}$ ,  $R_{shoulder}$ ], καθένας από τους οποίους παράγει διαφορετικό ποσό θερμότητας. Ο υπολογισμός της συνολικής θερμότητας γίνεται με αλγεβρική άθροιση του συνόλου των θερμοτήτων που παράγει η τριβή κάθε δακτυλίου με το υλικό της συγκολλούμενης πλάκας. Οι ίδιοι ερευνητές συνέχισαν τη μελετή τους αναπτύσσοντας το 2001 ένα τρισδιάστατο μοντέλο ροής θερμότητας για την πρόβλεψη των θερμοκρασιακών πεδίων που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.

Οι Chao και Qi [25,26] την ίδια περίοδο ανέπτυξαν ένα μοντέλο μετακινούμενης θερμικής πηγής και με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσαν τη θερμοκρασία μετάβασης, τις παραμένουσες τάσεις και παραμένουσες παραμορφώσεις στην FSW. Βασισμένος στο μοντέλο αυτό ο Chao μαζί με το Zhu [27] ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μη γραμμικό θερμικό μοντέλο με σκοπό την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και των παραμενουσών τάσεων. Στη θερμική ανάλυση, η θερμοκρασία είναι συνάρτηση του χρόνου και των χωρικών συντεταγμένων (x, y, z) και προσδιορίζεται από την τριών διαστάσεων μη γραμμική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q_{int} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2)$$

όπου k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $Q_{int}$  η εσωτερική παροχή θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας, c η ειδική θερμοχωρητικότητα και ρ η πυκνότητα. Η ροή θερμότητας στο σύστημα εισάγεται μέσω μιας θερμικής πηγής η οποία κινείται κατά τη γραμμή συγκόλλησης. Η θερμότητα που παράγεται μόνο από την τριβή του περιαυχενίου με τις πλάκες είναι συγκεντρωμένη τοπικά και διαδίδεται με αγωγή. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι η ροή θερμότητας από το εργαλείο προς την πλάκα q(r) διανέμεται γραμμικά κατά την ακτινική διεύθυνση του περιαυχενίου σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$q(r) = \frac{3Q_{total}r}{2\pi R_{shoulder}^3} \qquad (3)$$

όπου  $r_{pin} \leq r \leq r_{shoulder}$  και  $Q_{total}$  η συνολική θερμότητα που εισάγεται στο σύστημα. Η θερμότητα που παράγεται από τον πείρο αμελήθηκε βάσει μελέτης που είχε γίνει από τους Russell και Shercliff, οι οποίοι υποστήριξαν ότι αποτελεί μόλις το 2% της συνολικής θερμότητας. Στις ελεύθερες επιφάνειες των πλακών χάλυβα θεωρήθηκε ότι υπάρχει απώλεια θερμότητας οφειλόμενη σε συναγωγή και ακτινοβολία προς το περιβάλλον. Η απώλεια θερμότητας δίνεται από τη σχέση:

$$q_s = \beta (T - T_0) + \varepsilon B (T^4 - T_0^4)$$
 (4)

όπου  $T_0$  η θερμοκρασία δωματίου,  $\beta$  ο συντελεστής συναγωγής,  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής και  $B = 5.67 \times 10^{-12}$  W/cm<sup>2</sup> °C η σταθερά Stephan Boltzmann. Η κάτω επιφάνεια των πλακών βρίσκεται σε επαφή με τη βάση στήριξης και επομένως υπάρχουν απώλειες θερμότητας με αγωγή. Όμως, η άγνωστη συνθήκη επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της βάσης δυσκολεύει τη μοντελοποίηση. Λύση στο πρόβλημα δίνεται θεωρώντας ότι η απώλεια θερμότητας οφείλεται σε συναγωγή η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$q_b = \beta_b (T - T_0)$$
 (5)

Εάν η συνολική παραγόμενη θερμότητα  $Q_{total}$  και ο συντελεστής συναγωγής  $\beta_b$  ήταν γνωστοί, όπως στην ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας συμβατικών συγκολλήσεων τήξης, με χρήση των συνοριακών συνθηκών (3)-(5) θα μπορούσε να επιλυθεί η διαφορική εξίσωση (2). Επειδή όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι άγνωστοι, οι Zhu και Chao ακολούθησαν μια διαφορετική στρατηγική για την ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, την οποία εισήγαγαν σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Έκαναν αρχικές υποθέσεις για τις τιμές της  $Q_{total}$  και του  $\beta_b$ , έλυσαν τη μη γραμμική διαφορική εξίσωση (2) και πήραν ως αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό ιστορικό σε συγκεκριμένα σημεία του δοκιμίου. Συνέκριναν τα αποτελέσματα αυτά με πειραματικές μετρήσεις με θερμοστοιχεία στα ίδια σημεία και εν συνεχεία προσάρμοσαν τις τιμές των αγνώστων βασισμένοι στις αποκλίσεις της θερμοκρασίας μεταξύ των πειραμάτων και του μοντέλου. Επανέλαβαν την ίδια διαδικασία μέχρι να έρθουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά. Αφού κατέληξαν στις

τελικές κατανομές θερμοκρασίας, ακολούθησε η θερμομηχανική ανάλυση για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων.

Επαναληπτική μέθοδο για την κατάστρωση του θερμικού μοντέλου χρησιμοποίησαν και oι Shi, Dickerson και Shercliff [28], οι οποίοι αναθεώρησαν για τη συμβολή του πείρου στην παραγωγή θερμότητας. Έτσι για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2) πρότειναν τις ακόλουθες συνοριακές συνθήκες:

$$q_{shoulder}(r) = \frac{3Q_{shoulder}r}{2\pi \left(R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3\right)}, \quad R_A \le r \le R_{shoulder} \quad (6)$$

$$q_{pin}(r) = \frac{Q_{pin}}{\pi R_{pin}^2 H_{pin}}, \quad \acute{o}\pi ov H_{pin} \tau o \acute{v}\psi o\varsigma \tau ov \pi \epsilon \acute{v}\rho ov \quad (7)$$

Με άγνωστες τις τιμές  $Q_{shoulder}$  (θερμότητα που παράγεται από το περιαυχένιο) και  $Q_{pin}$  (θερμότητα που παράγεται από τον πείρο) έκαναν μια αρχική υπόθεση της συνολικής παραγόμενης θερμότητας και πήραν την παραδοχή ότι το 75% αυτής οφείλεται στο περιαυχένιο και 25% στον πείρο. Με επαναλαμβανόμενες δοκιμές κατέληξαν σε τιμές που έδιναν θερμοκρασιακά αποτελέσματα συμβατά με πειραματικές μετρήσεις.

Βασισμένοι στην παραπάνω μεθοδολογία καθώς και σε πειραματικά αποτελέσματα, οι ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της ροής θερμότητας ανεξάρτητες από τη συνολική θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής έτσι ώστε να μην είναι αναγκαία η χρήση της επαναληπτικής μεθόδου. Οι Khandar, Khan, Reynolds και Sutton [29] κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση:

$$\dot{q}(r) = \frac{P_{av}r}{\frac{2}{3}\pi r_0^3 + 2\pi r_i^2 h} \quad (8)$$

όπου  $\dot{q}(r)$  η τοπική ροή θερμότητας ανά μονάδα όγκου γραμμικά σχετιζόμενη με την ακτινική απόσταση από το κέντρο του εργαλείου r,  $P_{av}$  η μέση κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο εργαλείο,  $r_0$  η ακτίνα του περιαυχενίου,  $r_i$  η ακτίνα του πείρου και h το ύψος του πείρου.

Ένας από τους ακαδημαϊκούς με τη μεγαλύτερη προσφορά στην έρευνα της μοντελοποίησης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι ο Colegrove. Η διδακτορική του διατριβή [30] στο πανεπιστήμιο του Cambridge το 2003 υπήρξε η βάση στην οποία στηρίχτηκαν οι περισσότεροι μετέπειτα ερευνητές. Ο Colegrove [31-34] σε
αντίθεση με τους Chao και Qi υποστήριξε ότι το ποσό της θερμότητας που παράγεται από τον πείρο δεν είναι αμελητέο και μπορεί να χωριστεί σε τρία διαφορετικά μέρη: (1) θερμότητα που παράγεται από τη διάτμηση του υλικού, (2) θερμότητα που παράγεται από την τριβή της κατακόρυφης επιφάνειας του πείρου με το υλικό, (3) θερμότητα που παράγεται από την τριβή της κάτω επιφάνειας του πείρου με το υλικό. Η σχέση υπολογισμού της συνολικής θερμότητας που οφείλεται στον πείρο είναι η ακόλουθη:

$$\dot{Q} = 2\pi r_p h_p \overline{\sigma_y} \frac{V_m}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu \overline{\sigma_y} \pi r_p h_p V_{rp}}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} + \frac{4F\mu V_\mu \cos\theta}{\pi} \quad (9)$$

όπου  $r_p$ η ακτίνα του πείρου,  $h_p$  το ύψος του πείρου,  $\overline{\sigma_y}$ η μέση ροϊκή τάση του υλικού, Fη κατακόρυφη δύναμη, λη γωνία ελίκωσης του σπειρώματος του πείρου και

$$\theta = 90 - \lambda - \tan^{-1}(\mu)$$
$$V_m = \frac{\sin \lambda}{\sin(180 - \theta - \lambda)} V_p$$
$$V_{rp} = \frac{\sin \theta}{\sin(180 - \theta - \lambda)} V_p$$
$$V_p = \omega r_p$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση βρέθηκε ότι στη συγκόλληση πλακών κράματος αλουμινίου 12 mm, το ποσοστό της συνολικής θερμότητας που οφείλεται στον πείρο είναι περίπου 20% ενώ σε συγκόλληση πλακών πάχους 6mm περίπου 15%. Για τον υπολογισμό της θερμότητας που παράγεται από το περιαυχένιο χρησιμοποιήθηκε η σχέση (1) και αθροίζοντας την με την (9) υπολογίσθηκε η συνολική παραγόμενη θερμότητα. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα θερμικό μοντέλο τριών διαστάσεων και κάνοντας χρήση της μεθοδολογίας μετακινούμενης θερμικής πηγής υπολόγισθηκαν οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασιακές κατανομές.

Χρήση της σχέσης (9) για την ανάπτυξη θερμικού μοντέλου έκαναν οι Song και Kovacevic [35,36], οι οποίοι διαίρεσαν τη διεργασία της συγκόλλησης σε τρεις περιόδους: την περίοδο εισαγωγής του πείρου στο υλικό, την περίοδο συγκόλλησης και την περίοδο εξαγωγής του πείρου. Για την ανάπτυξη του μοντέλου τους, πήραν τις ακόλουθες παραδοχές:

 Η θερμότητα που παράγεται στη διεπιφάνεια περιαυχενίου και δοκιμίου οφείλεται μόνο σε τριβή

- 2. Ο πείρος είναι κυλινδρικός και το σπείρωμα μπορεί να αμεληθεί
- Δεν υπάρχει ροή θερμότητας προς το υλικό σε περίπτωση που η θερμοκρασία τοπικά φτάσει την τιμή της θερμοκρασίας τήξης του υλικού.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμότητας τοπικά στο περιαυχένιο χρησιμοποίησαν τη σχέση:

 $q_{fi} = 2\pi\mu F_n R_i n \quad (10)$ 

όπου  $R_i$  η απόσταση του κάθε σημείου υπολογισμού από το κέντρο του άξονα του εργαλείου, n η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου,  $F_n$  η κατακόρυφη δύναμη και  $\mu$  ο συντελεστής τριβής. Για τον υπολογισμό της θερμότητας που παράγεται λόγω του πείρου χρησιμοποίησαν τη σχέση (9) του Colegrove.

Ο Kovacevic σε συνεργασία με τον Chen [37-39] και σε επόμενες εργασίες του με τους Soundararajan και Zekovic [40] ανέπτυξαν ένα διαφορετικό τρόπο υπολογισμού της συνολικής παραγόμενης θερμότητας. Ισχυρίστηκαν ότι η παραγωγή θερμότητας οφείλεται κυρίως στην τριβή του περιαυχενίου με την επιφάνεια του δοκιμίου. Θεωρώντας ένα στοιχείο στη διεπιφάνεια περιαυχενίου και δοκιμίου, ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας λόγω τριβής στο στοιχείο αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$d\dot{q} = 2\pi\omega r^2 \mu(T)p(T)dr \quad (11)$$

Επομένως η συνολική παροχή θερμότητας σε ολόκληρη την επιφάνεια επαφής βρίσκεται με ολοκλήρωση:

$$\dot{q} = \int_{r_0}^{R_0} 2\pi\omega r^2 \mu(T) p(T) dr = \frac{2}{3}\pi\omega\mu(T) p(T) (R_0^3 - r_0^3)$$
(12)

όπου  $R_0$  η ακτίνα του περιαυχενίου και  $r_0$  η ακτίνα του πείρου. Ο συντελεστής τριβής μ και η πίεση στην επιφάνεια επαφής p είναι μεταβλητές εξαρτόμενες από τη θερμοκρασία Τ, όμως για τη διευκόλυνση του υπολογισμού της παρπάνω σχέσης θεωρήθηκαν σταθερές. Μια μέση πίεση βρέθηκε από πειραματικές μετρήσεις. Ο συντελεστής τριβής μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά για τις ανάγκες της εργασίας με μέθοδο επανάληψης βρέθηκε η τιμή για την οποία τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά.

Μια από τις πιο ολοκληρωμένες και σημαντικές μελέτες για την εκτίμηση της παραγόμενης θερμότητας κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση εκπονήθηκε από τους Schmidt, Hattel [41] και Wert [42]. Υποστήριξαν ότι τα θερμικά φαινόμενα που

λαμβάνουν χώρα εξαρτώνται από τη συνθήκη επαφής μεταξύ του εργαλείου και του υλικού. Έτσι όρισαν τρεις διαφορετικές καταστάσεις επαφής:

Κατάσταση προσκόλλησης (sticking condition). Η επιφάνεια του υλικού προσκολλάται στην επιφάνεια του περιστρεφόμενου εργαλείου εάν η διατμητική τάση λόγω τριβής υπερβεί τη διατμητική τάση διαρροής του υλικού. Σε αυτήν την περίπτωση το υλικό επιταχύνεται μαζί με την επιφάνεια του εργαλείου (φτάνοντας τελικά την ταχύτητα του εργαλείου) μέχρι να επέλθει ισορροπία μεταξύ της διατμητικής τάσης επαφής και της εσωτερικής διατμητικής τάσης του υλικού. Σε αυτό το σημείο επιτυγχάνεται η κατάσταση πλήρους προσκόλλησης.

*Κατάσταση ολίσθησης (sliding condition)*. Εάν η διατμητική τάση επαφής είναι μικρότερη από την εσωτερική διατμητική τάση διαρροής του υλικού, τμήμα όγκου του υλικού διατμείται ελάχιστα σε μια στατική ελαστική παραμόρφωση, όπου η διατμητική τάση ισούται με τη "δυναμική" διατμητική τάση επαφής.

Κατάσταση μερικής ολίσθησης μερικής προσκόλλησης (partial sliding/sticking). Σε αυτήν την κατάσταση το υλικό επιταχύνεται μέχρι να φτάσει μια ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας του εργαλείου, όπου και σταθεροποιείται. Η ισορροπία επιτυγχάνεται όταν η "δυναμική" διατμητική τάση επαφής ισούται με την εσωτερική διατμητική τάση διαρροής του υλικού λόγω μιας ψευδοστατικής πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Σε αυτήν την εργασία αλλά και στις περισσότερες που ακολούθησαν [43,44] δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του δυναμικού και στατικού συντελεστή τριβής. Επομένως ορίστηκε μια μεταβλητή, δ, η οποία σχετίζει την ταχύτητα των σημείων του υλικού που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του εργαλείου με την ταχύτητα των αντίστοιχων σημείων του εργαλείου που έρχονται σε επαφή με το υλικό. Η μεταβλητή αυτή ονομάστηκε συντελεστής ολίσθησης και δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{v_{matrix}}{v_{tool}} \quad (13)$$

όπου v η εξαρτόμενη από τη θέση ταχύτητα ίση με  $\omega r$ . Για δ=0 έχουμε κατάσταση πλήρους ολίσθησης, ενώ για δ=1 έχουμε κατάσταση πλήρους προσκόλλησης. Για 0<δ<1 ισχύει η κατάσταση μερικής προσκόλλησης, μερικής ολίσθησης που είναι και η επικρατούσα.

Για τον υπολογισμό της ολικής παραγόμενης θερμότητας διαίρεσαν το εργαλείο στις τρεις επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή με το υλικό και υπολόγισαν τη θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής σε κάθε επιφάνεια χωριστά. Ονόμασαν Q<sub>1</sub> τη

θερμότητα που παράγεται στην επιφάνεια του περιαυχενίου,  $Q_2$  τη θερμότητα που παράγεται στην κατακόρυφη επιφάνεια του πείρου και  $Q_3$  τη θερμότητα που παράγεται στην κάτω επιφάνεια του πείρου. Σε κάθε σημείο και των τριών επιφανειών η σχέση υπολογισμού της παραγόμενης θερμότητας είναι η ίδια:

$$dQ = \omega \, dM = \omega r \, dF = \omega r \tau_{contact} dA \quad (14)$$

Ολοκληρώνοντας τη (14) σε κάθε επιφάνεια χωριστά υπολογίζουμε τις  $Q_1$ ,  $Q_2$  και  $Q_3$ .

$$Q_{1} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega \left( R_{shoulder}^{3} - R_{probe}^{3} \right)$$
(15)  

$$Q_{2} = 2 \pi \tau_{contact} \omega R_{probe}^{2} H_{probe}$$
(16)  

$$Q_{3} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega R_{probe}^{3}$$
(17)

Με άθροιση των παραπάνω σχέσεων βρίσκουμε τη σχέση υπολογισμού της ολικής θερμότητας  $Q_{total}$ :

$$Q_{total} = \frac{2}{3}\pi\tau_{contact}\omega \left(R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}\right)$$
(18)

Η διατμητική τάση διαρροής  $\tau_{yield}$  εκτιμάται ότι ισούται με  $\sigma_{yield}/\sqrt{3}$ , όπου  $\sigma_{yield}$ η τάση διαρροής του υπό συγκόλληση υλικού. Στην κατάσταση πλήρους προσκόλλησης ισχύει:

$$\tau_{contact} = \tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

και επομένως η ολική παραγόμενη θερμότητα για κατάσταση πλήρους προσκόλλησης είναι:

$$Q_{total,sticking} = \frac{2}{3}\pi \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \omega \left( R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe} \right)$$
(20)

Στην κατάσταση πλήρους ολίσθησης θεωρούμε ότι η επιφάνεια του εργαλείου και το συγκολλούμενο υλικό ολισθαίνουν μεταξύ τους. Μπορούμε να εισάγουμε στη σχέση (18) τη διατμητική τάση λόγω τριβής ολίσθησης τ<sub>friction</sub>:

 $\tau_{contact} = \tau_{friction} = \mu p$  (21)

όπου  $\mu$ ο συντελεστής τριβής και p η πίεση στην επιφάνεια επαφής. Η ολική παραγόμενη θερμότητα για κατάσταση πλήρους ολίσθησης είναι:

$$Q_{total,sliding} = \frac{2}{3}\pi\mu p\omega \left(R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}\right) \quad (22)$$

Στην κατάσταση μερικής προσκόλλησης, μερικής ολίσθησης ο υπολογισμός της θερμότητας γίνεται με συνδυασμό των σχέσεων (20) και (22) εισάγοντας έναν συντελεστή βαρύτητας. Ο συντελεστής βαρύτητας θεωρείται ίδιος με τον συντελεστή ολίσθησης και παίρνοντας την παραδοχή ότι η κατάσταση επαφής είναι ομοιόμορφη και στις 3 επιφάνειες, θεωρούμε ότι ο συντελεστής ολίσθησης δ δεν είναι μεταβλητή, αλλά σταθερά. Αυτό επιτρέπει ένα γραμμικό συνδυασμό των εκφράσεων για ολίσθηση και προσκόλληση.

$$Q_{total} = \delta Q_{total,sticking} + (1 - \delta) Q_{total,sliding}$$
(23)

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις για τον υπολογισμό της θερμότητας σε συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση κράματος αλουμινίου 2024, οι ερευνητές κατέληξαν στα ακόλουθα ποσοστά συνεισφοράς της κάθε επιφάνειας:

 $f_{shoulder} = 86\%$   $f_{probe \ side} = 11\%$   $f_{probe \ tip} = 3\%$ 

To 2007 η ερευνητική ομάδα του Nandan [45,46] υποστήριξε ότι εκτός από την αρχική και τελική φάση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, δηλαδή κατά την εισαγωγή και εξαγωγή του εργαλείου, η παραγωγή θερμότητας συμβαίνει με σταθερό ρυθμό εάν το εργαλείο περιστρέφεται και προωθείται με σταθερή ταχύτητα. Αυτή η παραδοχή σταθερής κατάστασης δικαιολογείται τόσο από το πανομοιότυπο προφίλ συγκόλλησης όσο και τις όμοιες ιδιότητες του υλικού σε όλη τη γραμμή συγκόλλησης. Ένα ακόμα νέο δεδομένο που εισήγαγε ο Nandan είναι ο υπολογισμός της θερμότητας που παράγεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Η μη εξαρτόμενη χρονικά διαφορική εξίσωση για τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής που χρησιμοποίησε ο Nandan στο θερμικό μοντέλο του είναι η ακόλουθη:

$$\rho C_p \nabla (uT) = -\rho C_p v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \nabla (k \nabla T) + S_b \quad (24)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού,  $C_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα, u το διάνυσμα της ταχύτητας του υλικού,  $v_x$  η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, k η θερμική αγωγιμότητα

και  $S_b$  η θερμότητα που παράγεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Για τον υπολογισμό της  $S_b$  θεώρησε ότι το υλικό κατά την πλαστικοποίηση του μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ρευστό υψηλού ιξώδους και πρότεινε ως σχέση υπολογισμού της την:

$$S_b = f_m \mu \Phi \quad (25)$$

όπου  $f_m$  είναι μια αυθαίρετη σταθερά που αντιστοιχεί στο ποσοστό του έργου πλαστικής παραμόρφωσης που μετατρέπεται σε θερμότητα,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες και

$$\Phi = 2\sum_{i=1}^{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3}\right)^2$$
(26)

όπου i=1,2,3 οι διευθύνσεις των αξόνων x,y,z αντίστοιχα.

Οι μελέτες που ακολούθησαν βασισμένες στη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής δεν πρότειναν κάτι καινούριο αλλά στηρίχτηκαν σε αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί. Η δυσκολία υπολογισμού της θερμότητας λόγω πλαστικής παραμόρφωσης παράλληλα με το γεγονός ότι αποτελεί πολύ μικρό ποσοστό της ολικής θερμότητας είχε ως αποτέλεσμα να αμελείται στις περισσότερες εργασίες που εκπονήθηκαν ως σήμερα. Στις πιο πρόσφατα δημοσιευμένες μελέτες των Bie, Liu, kai Zhang [47], Li και Liu [48] αλλά και των Mohan, Rajesh και Kumar [49] μελετάται εκτενώς η επίδραση των παραμέτρων συγκόλλησης στις τελικές ιδιότητες της περιοχής συγκόλλησης. Η υπολογιστική ικανότητα των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων που κυκλοφορούν δίνει τη δυνατότητα επίλυσης των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων ταχύτερα προς όφελος των ερευνητών. Όσον αφορά τη συνολική θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής, οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν ότι το ποσοστό που ρέει στο υλικό είναι ίσο με 95%, ενώ το ποσοστό που καταλήγει στο εργαλείο ίσο με 5%. Βασικό μειονέκτημα της μεθοδολογίας μετακινούμενης θερμικής πηγής, που δεν έχει επιλυθεί ως σήμερα, είναι ότι πρέπει να γίνει μια κρίσιμη παραδοχή για τη συνθήκη επαφής μεταξύ εργαλείου και υλικού. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων των μοντέλων με πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η τιμή του συντελεστή ολίσθησης για τα περισσότερα υλικά κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 0.8.

## I.4.2 Μεθοδολογία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)

Η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πήγης όπως είδαμε έδωσε τη δυνατότητα μελέτης του θερμοκρασιακού ιστορικού και σε συνδυασμό με ένα μηχανικό μοντέλο την εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων. Μεγαλύτερη πρόκληση για τους ερευνητές ήταν η κατάστρωση ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης της ροής του υλικού κατά την ανάδευσή του. Κατά την προσέγγιση CFD το υλικό, αν και η θερμοκρασία του δεν ξεπερνά αυτή της τήξης, αντιμετωπίζεται ως ρευστό υψηλού ιξώδους. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τη μελέτη αποκλειστικά και μόνο του φαινομένου της ροής του υλικού, εξάγοντας αποτελέσματα που πραγματεύονται την έκταση, την ταχύτητα και την πίεση της ροής. Η ρευστοδυναμική αντιμετώπιση του προβλήματος αδυνατεί να προβλέψει την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων

Η σημαντικότερη ιδιότητα του «ρευστού» που μας αφορά στη μοντελοποίηση της ροής είναι η μεταβολή του ιξώδους του. Για τον υπολογισμό του ιξώδους προτάθηκαν αρκετά διαφορετικά μοντέλα. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα θεωρούν ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης η ροή του πλαστικοποιημένου υλικού ακολουθεί μη νευτώνεια ψευδοπλαστική συμπεριφορά διότι το ιξώδες του εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα εκτίμησης του ιξώδους που εφαρμόζονται κατά τη CFD ανάλυση της ροής [50].

α) μοντέλο Zener-Hollomon (ZH) ή νόμος Sellars-Tegart

Το μοντέλο Zener-Hollomon είναι μια από τις πρώτες και πιο χρησιμοποιημένες μεθοδολογίες υπολογισμού του ιξώδους σε μελέτες που αφορούν τη μοντελοποίηση της ροής του υλικού κατά την FSW. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην υπολογιστική μηχανική στερεών (Computational Solid Mechanics – CSM) αλλά χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση CFD. Η ροϊκή τάση μπορεί να συσχετιστεί με την παράμετρο Zener-Hollomon όπως προτάθηκε από τους από τους Sellars και Tegart [51] και τροποποιήθηκε από τους Sheppard και Wright [52]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{27}$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left( \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right) \qquad (28)$$

όπου Z η παράμετρος Zener Hollomon, έ ο ενεργός ρυθμός παραμόρφωσης, Q η ενέργεια ενεργοποίησης, R η σταθερά του αερίου, T η απόλυτη θερμοκρασία και α, A και n σταθερές του μοντέλου που βρίσκονται πειραματικά. Για τον υπολογισμό του δυναμικού ιξώδους το παραπάνω μοντέλο συνδυάζεται με το μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Perzyna που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Τα μοντέλα που ακολουθούν, στηρίζονται στη μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD).

#### β) Μοντέλο Perzyna

Το δυναμικό ιξώδες το οποίο αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας και του ρυθμού παραμόρφωσης, μπορεί να περιγραφεί ως ο λόγος της ενεργούς ροϊκής τάσης προς τον ενεργό ρυθμό παραμόρφωσης με χρήση του ιξωδοπλαστικού μοντέλου του Perzyna όπως παρουσιάστηκε πρώτα από τον Zienkiewicz και εφαρμόστηκε από τον Ulysse [53] στη μοντελοποίηση της FSW:

$$\mu(T,\dot{\varepsilon}) = \frac{\sigma(T,\dot{\varepsilon})}{3\dot{\varepsilon}} \quad (29)$$

Για την εφαρμογή αυτού του μοντέλου απαιτείται η χρήση σχέσεων υπολογισμού της ροϊκής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης. Στις περισσότερες μελέτες που αφορούν τη ροϊκή μοντελοποίηση της FSW, το μοντέλο Perzyna συνδυάζεται με το μοντέλο Zener - Hollomon

#### γ) Μοντέλο Power law

Εφόσον υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου της διατμητικής τάσης και του λογαρίθμου του ιξώδους, τότε το ιξώδες του υλικού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mu(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (30)$$

όπου *m* ο συντελεστής συνεκτικότητας και *n* ο δείκτης ροής. Για  $0 \le n < 1$  έχουμε ψευδοπλαστική συμπεριφορά, για n = 1 νευτώνεια και για n > 1 διασταλτική. O Colegrove [54] και ο Reynolds [55] ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν το συγκεκριμένο μοντέλο, ενώ στη συνέχεια ο Reynolds τροποποίησε τη σχέση (30) έτσι ώστε το μοντέλο να λαμβάνει υπ' όψιν του την εξάρτηση του ιξώδους και από τη θερμοκρασία.

$$\mu(T, \dot{\gamma}) = K \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (31)$$

#### δ) Μοντέλο Carreau

Το μοντέλο Carreau έχει αποδειχθεί πολύ λειτουργικό για την περιγραφή του ιξώδους ψευδοπλαστικών ρευστών υψηλού ιξώδους και η εξίσωση που το περιγράφει είναι η ακόλουθη:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (32)$$

Όπου  $\mu_{\infty}$  το δυναμικό ιξώδες για άπειρο ρυθμό διάτμησης,  $\mu_0$  το ιξώδες σε μηδενικό ρυθμό διάτμησης,  $\lambda$  χρονική σταθερά και *n* ο δείκτης ροής. Ο Atharifar [56] χρησιμοποίησε πρώτος το μοντέλο Carreau στη μοντελοποίηση της FSW εισάγοντας την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία στην ακόλουθη μορφή:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[ 1 + \left( \dot{\gamma} \lambda \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$
(33)

Ο Colegrove [57,58] είναι ο πρώτος που προσπάθησε να μοντελοποιήσει τη διεργασία FSW ακολουθώντας την προσέγγιση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Για τη μελέτη της ροής ανέπτυξε ένα τρισδιάστατο τοπικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο περιοριζόταν στην περιοχή περιμετρικά του πείρου. Για να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στις ιδιότητες του υπό συγκόλληση υλικού χρησιμοποίησε ως αρχική συνθήκη την κατανομή της θερμοκρασίας που υπολογίσθηκε από το θερμικό μοντέλο μετακινούμενης θερμικής πηγής το οποίο είχε αναπτύξει ο ίδιος. Για τον υπολογισμό του ιξώδους χρησιμοποίησε το μοντέλο Zener Holomon σε συνδυασμό με το μοντέλο Perzyna (σχέσεις 27, 28, 29). Βασική παραδοχή που πήρε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και των επόμενων με τον Shercliff ήταν η απόλυτη προσκόλληση του υλικού στο εργαλείο ως συνθήκη επαφής. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό που βρίσκεται στη διεπιφάνεια εργαλείου πλάκας εξαναγκάζεται σε περιστροφή με ταχύτητα ίση με αυτή του εργαλείου. Ο Colegrove πραγματοποίησε τη μοντελοποίηση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS με χρήση του κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής FLUENT. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που επιλύει ο συγκεκριμένος κώδικας είναι:

Η εξίσωση συνέχειας της μάζας:

 $\nabla \boldsymbol{u} = 0 \quad (34)$ 

όπου  $\boldsymbol{u}$  το διάνυσμα της ταχύτητας.

Η εξίσωση για τη διατήρηση της ορμής:

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} \quad (35)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα, p η πίεση και  $\pmb{\tau}$  ο τανυστής τάσεων που δίνεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} (\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T) \quad (36)$$

όπου  $\mu$  το ιξώδες υπολογισμένο κατά Perzyna-Zener Holomon.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη σταθερή προώθηση του εργαλείου στη FSW μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ιδιότητες του υλικού είναι οι ίδιες σε όλη τη γραμμή συγκόλλησης. Επομένως για τη μελέτη της ροής τοπικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει χρονική εξάρτηση και η εξίσωση (35) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

 $\rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} \quad (36)$ 

Τα πρώτα αποτελέσματα που εξήχθησαν για την εικόνα της ροής έιχαν την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα I.18 arrow plots a) κάτω από τον πείρο, b) στη μέση του πάχους της πλάκας c) στο περιαυχένιο

Το μοντέλο προέβλεψε ότι το υλικό που εισέρχεται στην περιοχή που υφίσταται παραμόρφωση ρέει γύρω από την υποχωρούσα πλευρά. Η ποσότητα του υλικού που περιστρέφεται είναι μεγαλύτερη στις περιοχές κοντά στο περιαυχένιο. Παρ΄όλα αυτά το μέγεθος της περιοχής που υφίσταται παραμόρφωση ήταν πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που παρατηρείται πειραματικά.

Οι περισσότερες μελέτες που ακολούθησαν στηρίχτηκαν στο μοντέλο του Colegrove. Ο Nandan [45,46] μελέτησε τη ροή κατά την FSW χάλυβα και ήταν ο πρώτος που

παρουσίασε αποτελέσματα σχετικά με την κατανομή του ιξώδους στην περιοχή γύρω από το εργαλείο (σχήμα Ι.19).



Σχήμα Ι.19 Κατανομή του δυναμικού ιξώδους (Pa s) σε διάφορα ύψη των συγκολλούμενων πλακών

Όπως βλέπουμε στις περιοχές κοντά στο εργαλείο όπου η θερμοκρασία και οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες, το ιξώδες λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές ενώ όσο απομακρυνόμαστε αυξάνεται έως μια τιμή στην οποία θεωρούμε ότι το υλικό δε δέχεται παραμορφώσεις και δε συμπεριφέρεται ως ρευστό. Ο Nandan για τη μελέτη του χρησιμοποίησε και αυτός τον κώδικα FLUENT στο λογισμικό ANSYS.

Χρήση νεότερων εκδόσεων του κώδικα FLUENT χρησιμοποίησαν οι περισσότεροι ερευνητές που βασίστηκαν στην έρευνα του Colegrove. Μελέτησαν τη ροή του υλικού, τη μεταβολή του ιξώδους και τη μεταβολή του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης σε συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου, κραμάτων χάλυβα, ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου χάλυβα.

Ο Schmidt και ο Hattel [59] ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics για τη μοντελοποίηση της συγκόλλησης FSW. Συνδύασαν ένα θερμικό και ένα ροϊκό μοντέλο τα οποία τρέχουν ταυτόχρονα και επομένως η μετάβαση των θερμικών αποτελεσμάτων στο ροϊκό μοντέλο για τον υπολογισμό του ιξώδους γίνεται αυτόματα. Ο Scmidt και ο Hattel χρησιμοποίησαν το μοντέλο power law για τον υπολογισμό του ιξώδους και μελέτησαν τη ροή του υλικού για διαφορετικές συνθήκες επαφής του υλικού με το εργαλείο.

Οι Saha Roy, Medhi και Saha [60,61] ανέπτυξαν επίσης στο Comsol ένα συνδυασμένο θερμικό-ροϊκό μοντέλο και μελέτησαν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων συγκόλλησης στη ροή, το ιξώδες και το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης. Για τον υπολογισμό του ιξώδους χρησιμοποίησαν το μοντέλο Carreau.

Τέλος αξίζει να σημειωθούν δύο ακόμη μελέτες σε Comsol, του Doerfler [62] και των Hilgert, Huetsch, dos Santos και Huber [63]. Ο πρώτος ανέπτυξε ένα καινοτόμο μοντέλο υπολογισμού του ιξώδους που πήρε και το όνομά του, το οποίο βασίστηκε σε στοιχεία που εξήχθησαν απο πειραματικές δοκιμές στρέψης, ενώ οι δεύτεροι πραγματοποίησαν την πρώτη εργασία μοντελοποίησης της ροής για FSW με χρήση διπλού εργαλείου (bobbin tool).



Σχήμα Ι.20 Συγκόλληση FSW με χρήση bobbin tool

### **Ι.4.3 Μεθοδολογία Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)**

Μία ακόμα πιο εξελιγμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται την τελευταία δεκαετία στη μοντελοποίηση της διεργασίας FSW, και πιο συγκεκριμένα στη μελέτη της ανάδευσης του υλικού στην περιοχή του εργαλείου, είναι η μέθοδος ALE. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την αυτόματη επαναδιακριτοποίηση (re-mesh) περιοχών οι οποίες υφίστανται υψηλές παραμορφώσεις. Κατά τη μοντελοποίηση της FSW με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μπορούμε να προσδιορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις συνθήκες επαφής μεταξύ εργαλείου και υλικού καθώς μας δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της τάσης επαφής και του πλαστικού έργου παραμόρφωσης. Λόγω, όμως, της συνεχούς επαναδιακριτοποίησης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων η μέθοδος ALE έχει ιδιαίτερα υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις που καθιστούν την εξαγωγή αποτελεσμάτων αρκετά πιο χρονοβόρα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους. Για το λόγο αυτό, όπως και στη CFD ανάλυση, οι ερευνητές δεν συμπεριλαμβάνουν στα αποτελέσματά τους την πρόβλεψη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι βασίζεται σε μηχανική παραμορφωσίμου στερεού και κατά συνέπεια έχει τη δυνατότητα εκτίμησης της πραγματικής ποιότητας της συγκόλλησης, καθώς προβλέπει πιθανή δημιουργία κενών και άλλων ατελειών.



Trailing side

Leading side

Σχήμα Ι.21 Εμφάνιση κενού (void), μοντελοποίηση FSW με μέθοδο ALE

Οι πρώτοι που μελέτησαν τη ροή στη FSW με τη μέθοδο ALE ήταν οι Fourment και Guerdoux [64-66]. Για την εκπόνηση της μελέτης τους χώρισαν τη διεργασία σε δύο στάδια, σε αυτό της εισχώρησης του εργαλείου στο υλικό και σε αυτό της προώθησης του εργαλείου κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Αρχικά σκοπός της μελέτης τους ήταν να συγκρίνουν τις προκύπτουσες θερμοκρασιακές κατανομές και τα ροϊκά πεδία με πειραματικές και CFD εργασίες που είχαν προηγηθεί. Σύμφωνα με τους ίδιους η προσέγγιση ALE είναι η πιο αποτελεσματική για τη μοντελοποίηση της FSW διότι λαμβάνει υπ' όψιν τις αλλαγές που συμβαίνουν στη διεπιφάνεια εργαλείου υλικού. Ανάλογη προσέγγιση χρησιμοποίησαν σε δικές τους εργασίες ο Ulysse [53] και οi Hong, Cao και Dong [67]. Ο Ulysse κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στη ζώνη ανάδευσης του υλικού είναι αρκετά μεγαλύτερες για αυξημένη ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, ενώ μειώνονται για αυξημένες περιστροφικές ταχύτητες. Σε πιο πρόσφατες εργασίες οι Schmidt και Hattel [68,69], Zhang [70-72] και Bastier [73] με χρήση της μεθόδου ALE ανέπτυξαν θερμομηχανικά μοντέλα με αποκλειστικό σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού που έρχεται σε επαφή με το εργαλείο, ενώ οι Kishta, Abed και Darras [74] μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας πρόωσης και της περιστροφικής ταχύτητας στις προκύπτουσες θερμοκρασιακές κατανομές. Την τελευταία πενταετία έγιναν προσπάθειες χρήσης της ALE προσέγγισης για μοντελοποίηση FSW με σκοπό την εξέταση της ακρίβειας της μεθόδου και της ικανότητάς της να μελετάει διεργασίες FSW με μη κυλινδρικό εργαλείο [75].



Σχήμα Ι.22 Θερμοκρασιακή κατανομή με χρήση της μεθόδου ALE

# ΙΙ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΙΙ.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics, το οποίο μας επιτρέπει την ταυτόχρονη επίλυση πολλαπλών φυσικών φαινομένων (Multiphysics). Το Comsol προτιμάται για την επίλυση πολύπλοκων μη γραμμικών προβλημάτων λόγω των υψηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων του. Μελέτες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα αυτό για την ανάλυση της ροής στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση έχουν καταλήξει σε αρκετά ακριβή αποτελέσματα συγκρινόμενα με αντίστοιχα πειραματικά.

#### II.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου

Ο ορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου έγινε με βάση την κατάλληλα τροποποιημένη κατακόρυφη φρεζομηχανή (σχήμα ΙΙ.1) του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί συγκολλήσεις FSW.



Σχήμα ΙΙ.1 Μηχανή FSW Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Τα τμήματα της μηχανής που εισήχθησαν στο μοντέλο σε απλοποιημένη γεωμετρική μορφή είναι η άτρακτος στήριξης του εργαλείου, το εργαλείο (περιαυχένιο και πείρος) και η βάση στήριξης των πλακών αλουμινίου. Η τελική μορφή του μοντέλου μετά και την εισαγωγή των πλακών αλουμινίου στη βάση στήριξης φαίνεται στο σχήμα ΙΙ.2.



Σχήμα ΙΙ.2 Εμφάνιση του γεωμετρικού μοντέλου στο Comsol

Όπως φαίνεται και στο σχήμα II.2, έχει σημασία να αναφέρουμε για τη συνέχεια της μελέτης ότι ο άξονας του εργαλείου περνάει από το σημείο (0,0,0). Η διεύθυνση της συγκόλλησης ταυτίζεται με αυτή του άξονα x, ενώ στα θετικά y βρίσκεται η υποχωρούσα πλευρά της συγκόλλησης και στα αρνητικά y η προωθούμενη.



Σχήμα ΙΙ.2 Διεύθυνση συγκόλλησης στο μοντέλο

Οι διαστάσεις των γεωμετρικών σχημάτων που αποτελούν το μοντέλο φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ						
	Σχήμα	Μήκος	Πλάτος	Ύψος		
Πλάκα αλουμινίου	Ορθογώνιο	200 mm	100 mm	3 mm		
Βάση στήριξης	Ορθογώνιο	300 mm	250 mm	100 mm		
		Ακτίνα		Ύψος		
Άτρακτος στήριξης	Κύλινδος	34.5 mm		60 mm		
Περιαυχένιο	Κύλινδρος	11.5 mm		45 mm		
Πείρος	Κύλινδρος	3.25 mm		3.25 mm		2.8 mm

Πίνακας ΙΙ.1 Διαστάσεις γεωμετρικών σχημάτων του μοντέλου

Από τον πίνακα II.1 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το βάθος διείσδυσης του εργαλείου είναι 2.8 mm.

## II.1.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

#### α) Πλάκες αλουμινίου

Το μέταλλο βάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι κράμα αλουμινίου ΑΑ5083-Η111. Η χημική του σύσταση δίνεται στον πίνακα ΙΙ.2.

Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
Περιεκτικότητα %	0.4	0.4	0.1	0.4 - 1.0	4.0 - 4.9	0.25	0.15	0.05 - 0.25	Bal

#### Πίνακας ΙΙ.2 Χημική σύσταση ΑΑ5083

Κύρια χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κράματος είναι η υψηλή του αντοχή (μετά την εν ψυχρώ κατεργασία), η ευκολία στη διαμόρφωσή του, η οποία οφείλεται στην πολύ καλή ολκιμότητά του και η καλή συγκολλησιμότητά του. Όπως όλα τα κράματα αλουμινίου, έχει μικρή πυκνότητα και παρουσιάζει πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έχει, επίσης, εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες στο θαλασσινό νερό (χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό στη ναυπηγική) και σε χημικά προϊόντα. Ανήκει στα μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα και η όποια κατεργασία γίνεται εν ψυχρώ. Σημαντικές ιδιότητές του ΑΑ 5083-Η111 φαίνονται στον πίνακα ΙΙ.3.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΑ5083-Η111 (θερμοκρασία δωματίου)				
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες		
Πυκνότητα	2650	kg/m <sup>3</sup>		
Ειδική Θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση	950	J/(kg∙K)		
Θερμική Αγωγιμότητα	117	W/(m∙K)		
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	3.774 · 10 <sup>7</sup>	S/m		
Μέτρο Ελαστικότητας Young	70	GPa		
Λόγος Poisson	0.33			
Συντελεστής θερμικής διαστολής	23·10 <sup>-6</sup>	1/K		

Πίνακας ΙΙ.3 Φυσικές Ιδιότητες ΑΑ5083

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση η θερμοκρασία στην περιοχή του εργαλείου αυξάνεται αρκετά με αποτέλεσμα κάποιες ιδιότητες του κράματος να μεταβάλλονται σημαντικά. Για το λόγο αυτό στο Comsol εισάγουμε τις ιδιότητες που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία με τη μορφή διαγραμμάτων παρεμβολής τα οποία έχουν προκύψει από πειραματικές μελέτες στη βιβλιογραφία [76,77].

Θερμοκρασία	Θερμική Συναγωγιμότητα	Ειδική θερμοχωρητικότητα	Πυκνότητα
(К)	(W/mK)	(J/kgK)	(kg/m³)
253	106.9	924.1	2673.9
353	120.7	984.2	2642.7
453	134.5	1039.6	2629.4
553	142.9	1081.2	2611.5
653	148.9	1136.6	2589.3
753	159.5	1178.2	2567.0
853	177.2	1261.4	2549.2

Πίνακας ΙΙ.4 Φυσικές Ιδιότητες ΑΑ5083 θερμοκρασιακά εξαρτόμενες

#### β) Εργαλείο συγκόλλησης (περιαυχένιο και πείρος)

Το εργαλείο είναι κατασκευασμένο από θερμικά κατεργασμένο χάλυβα SVERKER 21 με σκληρότητα 61 HRC. Οι ιδιότητες του χάλυβα SVERKER 21 που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση φαίνονται στον πίνακα II.5.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ SVERKER 21				
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες		
Πυκνότητα	7700	kg/m <sup>3</sup>		
Ειδική Θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση	460	J/(kg∙K)		
Θερμική Αγωγιμότητα	20	W/(m∙K)		

Πίνακας ΙΙ.5 Φυσικές Ιδιότητες SVERKER 21

#### γ) Βάση στήριξης πλακών και άτρακτος στήριξης εργαλείου

Η άτρακτος στην οποία εφαρμόζει το εργαλείο και η βάση στήριξης των πλακών αλουμινίου είναι κατασκευασμένες από χυτοσίδηρο. Οι ιδιότητες του χυτοσιδήρου που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση φαίνονται στον πίνακα ΙΙ.6.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΥ				
Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδες		
Πυκνότητα	7920	kg/m <sup>3</sup>		
Ειδική Θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση	456	J/(kg∙K)		
Θερμική Αγωγιμότητα	55	W/(m∙K)		

Πίνακας ΙΙ.6 Φυσικές Ιδιότητες χυτοσιδήρου

## ΙΙ.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το θερμικό μοντέλο αναπτύχθηκε με τη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής κάνοντας χρήση του heat transfer module του Comsol. Λόγω της ομοιομορφίας και των κοινών ιδιοτήτων που εμφανίζονται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης θεωρούμε ότι το στάδιο προώθησης του εργαλείου δεν περιλαμβάνει χρονικά εξαρτόμενα φαινόμενα και επομένως μπορούμε να κάνουμε στατική (steady-state) ανάλυση. Το θερμικό μοντέλο που θα περιγραφεί παρακάτω στηρίχθηκε στο μοντέλο που ανέπτυξε ο υποψήφιος διδάκτωρ Π. Ν. Καρακίζης ως κομμάτι της διδακτορικής του διατριβής [78].

### II.2.1 Εξίσωση μεταφοράς θερμότητας

Ο θεμελιώδης νόμος που προσδιορίζει τη μεταφορά θερμότητας είναι ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής ή όπως συχνά αναφέρεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Όμως η εσωτερική ενέργεια είναι μια ποσότητα που δεν μπορεί να μετρηθεί εύκολα και δεν χρησιμοποιείται σε προσομοιώσεις. Επομένως ο βασικός νόμος συνηθώς γράφεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics επιλύει την ακόλουθη διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας:

 $\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q = \rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T \quad (1)$ 

όπου ρ η πυκνότητα, C<sub>p</sub> η ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση, k η θερμική συναγωγιμότητα, **u** το διάνυσμα της ταχύτητας, T η απόλυτη θερμοκρασία και Q περιλαμβάνει τις πηγές θερμότητας που δεν οφείλονται σε ιξώδη θέρμανση.

#### II.2.2 Συνοριακές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας

Η ακριβής μοντελοποίηση της παραγωγής θερμότητας κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση είναι υψίστης σημασίας για την εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην περιοχή του εργαλείου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Θεωρούμε ότι η ολική θερμότητα παράγεται λόγω τριβής στις επιφάνειες που εφάπτεται το υλικό με το εργαλείο, δηλαδή στην επιφάνεια επαφής του περιαυχενίου, στην κατακόρυφη επιφάνεια του πείρου και στην κατώτερη επιφάνεια του πείρου. Η θερμότητα που παράγεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα όταν το θερμικό μοντέλο συνδυάζεται με CFD ροϊκό μοντέλο. Το πολύ μικρό πάχος των πλακών αλουμινίου στο συγκεκριμένο μοντέλο καθιστά τη θερμότητα που παράγεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης αμελητέα.

Η μοντελοποίηση της παραγωγής θερμότητας έγινε με χρήση των σχέσεων που πρότεινε ο Colegrove. Η θερμότητα που παράγεται στην κατακόρυφη επιφάνεια επαφής του πείρου με το εργαλείο ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$q_{pin}|(T) = \frac{\mu}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} r_p \omega \overline{Y}(T) \left(\frac{W}{m^2}\right)$$
(2)

όπου  $\mu$  ο συντελεστής τριβής ίσος με 0.4,  $r_p$  η ακτίνα του πείρου,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα και  $\overline{Y}$  η μέση τάση διαρροής. Όπως υποδεικνύεται και στην εξίσωση (2) η μέση τάση διαρροής είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και εισάγεταιι στο Comsol με τη μορφή διαγραμμάτος παρεμβολής που έχει προκύψει από πειραματικές μελέτες στη βιβλιογραφία.

Θερμοκρασία (Κ)	Τάση διαρροής (MPa)
293	440
373	437
473	364
573	181
673	61
773	50
873	40
973	0

Πίνακας ΙΙ.7 Θερμοκρασιακά εξαρτόμενη τάση διαρροής

Επιπροσθέτως, η θερμότητα που παράγεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του περιαυχενίου και του δοκιμίου ανά μονάδα όγκου είναι:

$$q_{shoulder}(r,T) = \begin{cases} \left(\frac{\mu F_n}{A_s}\right)\omega r & ; T < T_{melt} \\ 0 & ; T \ge T_{melt} \end{cases}$$
(3)

όπου  $F_n$  η κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο εργαλείο,  $A_s$  είναι η επιφάνεια επαφής του περιαυχενίου με το υλικό, r η ακτινική απόσταση και  $T_{melt}$  η θερμοκρασία τήξης του δοκιμίου ίση με 864 Κ.

Η θερμότητα που παράγεται στην κάτω επιφάνεια επαφής του πείρου με το υλικό δίνεται όπως και αυτή του περιαυχενίου ανά μονάδα όγκου από τη σχέση:

$$q_{pin} - (r, T) = \begin{cases} \left(\frac{\mu F_n}{A_p}\right) \omega r & ; T < T_{melt} \\ 0 & ; T \ge T_{melt} \end{cases}$$
(4)

όπου  $A_p$  είναι η κάτω επιφάνεια του πείρου. Πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου, η τριβή μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου είναι πολύ μικρή. Επομένως, το μοντέλο θέτει την παραγωγή θερμότητας από το περιαυχένιο και τον πείρο ίση με το Ο όταν η θερμοκρασία είναι ίση ή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας τήξης.

Στην άνω επιφάνεια του αλουμινίου έχουμε απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας στο περιβάλλον που δίνονται από τη σχέση:

$$q_{up} = h_{up}(T_0 - T) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$
(5)

όπου  $h_{up}$  είναι ο συντελεστής συναγωγής,  $T_0$  η θερμοκρασία αναφοράς, ε ο συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας, σ η σταθερά Stefan – Boltzmann και  $T_{amb}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κάνοντας χρήση της σχέσης (5) με τις κατάλληλες τιμές των παραπάνω σταθερών υπολογίζουμε τις απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής στις ελεύθερες επιφάνειες του περιαυχενίου, της ατράκτου στήριξης του εργαλείου και της βάσης στήριξης των πλακών. Τέλος, μεταφορά θερμότητας με αγωγή έχουμε μεταξύ της επιφάνειας του αλουμινίου και της βάσης στήριξης και μεταξύ της άνω επιφάνειας του περιαυχενίου και της βάσης στήριξης και μεταξύ της άνω επιφάνειας του μεταφορά θερμότητας η στηρίξης. Στο Comsol η μεταφορά θερμότητας με αγωγή μεταξύ δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή μοντελοποιείται με χρήση της συνοριακής συνθήκης (thermal contact).

Τέλος για να αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα την προώθηση του εργαλείου δίνουμε στην παραγόμενη θερμότητα μια μεταφορική ταχύτητα ίση και αντίθετης φοράς με την ταχύτητα συγκόλλησης u\_weld.

### ΙΙ.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΡΟΪΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το ροϊκό μοντέλο αναπτύχθηκε με τη μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) κάνοντας χρήση του laminar flow module του Comsol. Λόγω της ομοιομορφίας και των κοινών ιδιοτήτων που εμφανίζονται κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης θεωρούμε ότι το στάδιο προώθησης του εργαλείου δεν περιλαμβάνει χρονικά εξαρτόμενα φαινόμενα και επομένως μπορούμε να κάνουμε στατική (steady-state) ανάλυση. Η στατική ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στις επιφάνειες επαφής του εργαλείου με το υλικό έτσι ώστε το πρόγραμμα να αντιλαμβάνεται την περιστροφική κίνηση και στη συνέχεια δίνοντας πρόωσης του εργαλείου.

### II.3.1 Εξισώσεις περιγραφής της ροής

Για τη μοντελοποίηση της ροής στη διεργασία FSW επιλέχθηκε η επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων Navier – Stokes για ασυμπίεστα ρευστά, δηλαδή η εξίσωση της ορμής και η εξίσωση της συνέχειας.

$$\rho u \nabla u = \nabla [-Ip + \mu (\nabla u + \nabla u^T)] \quad (6)$$
$$\nabla u = 0 \quad (7)$$

Ο όρος  $(\nabla u + \nabla u^T)$  είναι ο τανυστής του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης και πολλαπλασιασμένος με το δυναμικό ιξώδες μ δίνει την ασκούμενη διατμητική τάση  $\tau = \mu \dot{\gamma}$ . Το ιξώδες, όμως, είναι συνάρτηση του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Επομένως, στην πραγματικότητα στη σχέση (6) εμφανίζεται ο όρος  $f(\dot{\gamma}) * \dot{\gamma}$ , ο οποίος μετατρέπει τη σχέση (6) σε μη γραμμική. Ο όρος  $\rho u \nabla u$  αποτελεί την ορμή του ρέοντος ρευστού. Λόγω της κυρίαρχης ιξώδους δύναμης, ο όρος της αδράνειας μπορεί να αμεληθεί για τη μοντελοποίηση της FSW.

Το ιξώδες υπολογίζεται με τη χρήση του θερμοκρασιακά εξαρτόμενου μοντέλου Carreau, δηλαδή της σχέσης (33) της πρώτης ενότητας.

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[ 1 + \left( \dot{\gamma} \lambda \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$
(8)

Η επιλογή των κατάλληλων σταθερών έγινε λαμβάνοντας υπ' όψιν τιμές που είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες μελέτες [60,61] και έδιναν αξιόλογα αποτελέσματα.

 $\mu_{\infty}$  (το δυναμικό ιξώδες σε άπειρη διάτμηση) = 0

 $\mu_0$  (το δυναμικό ιξώδες σε μηδενική διάτμηση) =  $10^8$  Pa\*s

λ (η χρονική σταθερά) = 10

n (δείκτης ροής) = 0

Η επιλογή της τιμής του δείκτη ροής ίση με το 0 καθιστά τη σχέση του ιξώδους με το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης μη γραμμική και υποδηλώνει τη φύση της ροής στην περιοχή της συγκόλλησης. Όπως είχαμε αναφέρει και στο θεωρητικό μέρος στη CFD ανάλυση της ροής FSW, το αλουμίνιο θεωρείται ρευστό υψηλού ιξώδους και έχει μη νευτώνεια ψευδοπλαστική (shear thinning) ρεολογική συμπεριφορά.

#### II.3.2 Συνοριακές συνθήκες

Τα διανύσματα ταχύτητας που εισάγονται στις επιφάνειες επαφής του εργαλείου με το μοντέλο για τον καθορισμό της περιστροφικής ταχύτητας είναι:

$$u = -y\delta\omega \quad (9)$$
$$v = x\delta\omega \quad (10)$$

όπου δ η μεταβλητή της συνθήκης επαφής που περιγράφει τον αδιάστατο βαθμό προσκόλλησης του υλικού στο εργαλείο, γνωστή ως συντελεστής ολίσθησης και ω η περιστροφική ταχύτητα σε rad/s. Οι παραπάνω συνθήκες επαφής αντιστοιχούν σε περιστροφή του εργαλείου με κατεύθυνση αντίθετη αυτής του ρολογιού (counter-clockwise rotation) και το διάνυσμα της ταχύτητας σε οποιοδήποτε σημείο επαφής έχει εφαπτόμενη ταχύτητα ίση με δωr, όπου r η ακτινική θέση.

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (11)$$



Σχήμα II.3 velocity boundaries

Για να μπορέσει το Comsol να μοντελοποιήσει τη ροή ενός ρευστού πρέπει να δοθεί υποχρεωτικά συνοριακή συνθήκη για τον καθορισμό της επιφάνειας από την οποία εισέρχεται το ρευστό στο χώρο ροής και της ταχύτητας με την οποία αυτό εισέρχεται (inlet flow velocity). Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε η επιφάνεια που επιλέχθηκε φαίνεται στο σχήμα II.4, ενώ η ταχύτητα της εισερχόμενης ροής ισούται με την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, αλλά με αντίθετη φορά (inlet flow velocity =-u<sub>weld</sub>).



Σχήμα II.4 inlet flow boundary

Αντίστοιχα με το σύνορο εισχώρησης της ροής πρέπει να προσδιοριστεί και το σύνορο από το οποίο εξέρχεται η ροή (outlet flow boundary) καθώς και οι συνθήκες με τις οποίες συμβαίνει αυτό. Η επιφάνεια εξόδου της ροής που επιλέχθηκε φαίνεται στο σχήμα II.5, και η συνθήκη που τη συνοδεύει είναι πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (p<sub>outflow</sub> = 1 atm).



Σχήμα II.5 outlet flow boundary

Οι υπόλοιπες επιφάνειες των πλακών αλουμινίου αντιμετωπίζονται από το μοντέλο ως ακίνητοι τοίχοι. Για να μπορέσει να γίνει σωστά η μοντελοποίηση θεωρούμε ότι και οι υπόλοιπες επιφάνειες του αλουμινίου έχουν σταθερή ταχύτητα ίση με –u<sub>weld</sub> και επομένως ρέουν μαζί με το εισερχόμενο ρευστό.



Σχήμα II.6 moving walls with constant velocity

#### ΙΙ.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το Comsol ως πακέτο πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των βασικών διαφορικών εξισώσεων, που διέπουν τα φαινόμενα που μοντελοποιεί, πρέπει να διακριτοποιήσει τη γεωμετρία του μοντέλου σε μικρότερα στοιχεία. Επιλέχθηκε διακριτοποίηση του μοντέλου σε τριγωνικά στοιχεία, τα οποία όπως φαίνεται και στο σχήμα ΙΙ.7 είναι πιο πυκνά στην περιοχή του εργαλείου και αραιώνουν όσο απομακρυνόμαστε από αυτό.



Σχήμα ΙΙ.7 Διακριτοποίηση του μοντέλου



Σχήμα ΙΙ.8 Διακριτοποίηση στην περιοχή του εργαλείου

Κάνοντας δοκιμές και εξετάζοντας την ποιότητα των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι η καλύτερη ποιότητα επιτυγχάνεται για fine physics-controlled mesh. Σε καλύτερης ή χειρότερης ποιότητας διακριτοποίηση το πρόγραμμα εμφανίζει μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του ρυθμού παραμόρφωσης και του ιξώδους στην κοινή ακμή πείρου και περιαυχενίου. Επίσης οι επιλογές finer και extra fine mesh απαιτούν τουλάχιστον διακριτοποίησης και επίλυσης του προβλήματος. Τα στοιχεία στα οποία διακριτοποιείται το μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

Number of vertex elements: 40 Number of edge elements: 744 Number of boundary elements: 15486 Number of elements: 79374

### ΙΙ.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ

Καινοτομία της εργασίας αποτελεί η προσπάθεια μοντελοποίησης της διεργασίας FSW δίνοντας στον άξονα του εργαλείου γωνία κλίσης 3° αντίθετη της φοράς της συγκόλλησης. Το μοντέλο μετά την τροποποίηση της γεωμετρίας έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα II.9 tilt angle 3°

Όπως βλέπουμε στο σχήμα ΙΙ.9 το πίσω τμήμα του περιαυχενίου εισέρχεται στα υπό συγκόλληση δοκίμια, ενώ από λίγα χιλιοστά πίσω από τον πείρο μέχρι το μπροστινό μερος του εργαλείου, η επιφάνεια του περιαυχενίου δεν έρχεται σε επαφή με το υλικό. Λόγω της περιπλοκότητας της νέας γεωμετρίας επιβαρύνεται η διακριτοποίηση και ο υπολογιστικός χρόνος προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, ενώ στη διακριτοποίηση του μοντέλου χωρίς γωνία κλίσης ο συνολικός αριθμός των στοιχείων για fine physics controlled mesh ήταν 79374, στην αντίστοιχη

διακριτοποίηση στο μοντέλο με tilt angle ο αριθμός των στοιχείων είναι 248627, τουλάχιστον τρεις φορές μεγαλύτερος. Παρ' όλα αυτά, η συγκεκριμένη ποιότητα διακριτοποίησης θεωρείται χαμηλή για την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας στην περιοχή του εργαλείου και το λογισμικό επισημαίνει ότι πρέπει να βελτιωθεί για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στη λύση. Τελικά επιλέγεται extra fine physics controlled mesh και τα στοιχεία στα οποία διακριτοποιείται το μοντέλο είναι τα ακόλουθα:

Number of vertex elements: 55 Number of edge elements: 3451 Number of boundary elements: 164514 Number of elements: 2896578

#### ΙΙ.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Οι παράμετροι συγκόλλησης που έχουν επιλεχθεί για τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση, ως καταλληλότεροι ύστερα από πειραματικές μελέτες στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, είναι:

Ταχύτητα συγκόλλησης: u<sub>weld</sub> = 1.417 mm/s Περιστροφική ταχύτητα εργαλείου: N = 750 RPM Κατακόρυφη δύναμη στον άξονα του εργαλείου: F<sub>n</sub> = 12 kN

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση η αξονική φόρτιση είναι πολύ υψηλή. Επομένως, οι πλάκες πρέπει να είναι σφιχτά στερεωμένες στην τράπεζα της μηχανής. Στην περίπτωσή μας η αξονική φόρτιση μετρήθηκε με χρήση ενός Kistler πιεζοηλεκτρικού δυναμομέτρου. Ύστερα από την αρχική βύθιση του εργαλείου στο υλικό, το δυναμόμετρο σταθεροποιήθηκε στα 12 kN.

Για την επίλυση του συνδυασμένου θερμικού – ροϊκού μοντέλου χωρίς γωνία κλίσης στον άξονα χρειάστηκαν 62 λεπτά υπολογιστικού χρόνου και 327 επαναλήψεις (iterations) του non linear solver του Comsol για να επιτευχθεί σύγκλιση (convergence). Οι απαιτήσεις μνήμης ήταν:

Physical memory: 2.08 GB

Virtual memory: 2.5 GB

Αντίστοιχα για την επίλυση του θερμικού – ροϊκού μοντέλου με γωνία κλίσης στον άξονα του εργαλείου χρειάστηκαν 135 λεπτά υπολογιστικού χρόνου και 456 επαναλήψεις του non linear solver του Comsol για να επιτευχθεί σύγκλιση. Οι απαιτήσεις μνήμης ήταν:

Physical memory: 5.22 GB

Virtual memory: 6.04 GB

Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας για τους οποίους επιλύθηκε το πρόβλημα ήταν 237526. Η σχετική απόκλιση (relative error) που απαιτείται μεταξύ των τελευταίων επαναλήψεων για την επιτυχή λήξη της μοντελοποίησης είναι ίση με 10<sup>-6</sup>. Ο υπολογιστής στον οποίο πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση έχει επεξεργαστή 2.5 GHz Intel(R) Core(TM) i7-4710HQ CPU και μνήμη RAM 12 GB.

## **ΙΙΙ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

#### ΙΙΙ.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Παρόλο που δεν είναι στόχος της παρούσης εργασίας η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς της διεργασίας FSW, πρέπει να γίνει παρουσίαση της κατανομής της θερμοκρασίας στην περιοχή γύρω από το εργαλείο για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο τα ροϊκά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.



Σχήμα ΙΙΙ.1 γενική άποψη της κατανομής της θερμοκρασίας στο μοντέλο

Όπως βλέπουμε στο σχήμα ΙΙΙ.1, οι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται στη διεπιφάνεια περιαυχενίου και δοκιμίου. Η μέγιστη θερμοκρασία που φτάνει το υλικό είναι τα 829 Κ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου ΑΑ 5083 (864 Κ). Στο σχήμα ΙΙΙ.2 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε εγκάρσια τομή στη γραμμή συγκόλλησης και μπορούμε να διακρίνουμε τις ζώνες που σχηματίζονται με τα όριά τους. Η πιο σκούρα κόκκινη περιοχή κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου είναι η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) οριοθετούμενη από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) όπου με απομάκρυνση λίγων χιλιοστών από το εργαλείο παρατηρείται ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας.



Σχήμα ΙΙΙ.2 Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή κάθετη στη γραμμή συγκόλλησης

Στο σχήμα III.3 βλέπουμε σε τομή παράλληλη της άνω επιφάνειας της πλάκας την κατανομή της θερμοκρασίας περιμετρικά του εργαλείου.



Σχήμα ΙΙΙ.3 Κατανομή της θερμοκρασίας σε τομή 0.2 mm κάτω από την άνω επιφάνεια της πλάκας

Στα σχήματα ΙΙΙ.4 και ΙΙΙ.5 φαίνεται η διαγραμματική κατανομή της θερμοκρασίας στη μέση του πάχους της πλάκας κατά τη διεύθυνση της συγκόλλησης (άξονας x) και κατά διεύθυνση κάθετη σε αυτή (άξονας y) στην περιοχή του εργαλείου. Με AS συμβολίζεται η προωθούμενη πλευρά (Advancing Side) και με RS η υποχωρούσα πλευρά (Retreating Side). Στο σχήμα ΙΙΙ.5 παρατηρούμε ότι και στις δύο πλευρές η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη. Επίσης επιβεβαιώνεται και γραφικά ότι για τα χιλιοστά του υλικού που αντιστοιχούν στη ζώνη ανάδευσης και τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη η πτώση της θερμοκρασίας είναι πολύ πιο ήπια σε σχέση με την περιοχή που ξεκινάει η θερμικά επηρεασμένη ζώνη.


Σχήμα ΙΙΙ.4 Κατανομή της θερμοκρασίας στη μέση του πάχους της πλάκας κατά τη διεύθυνση τηςσυγκόλλησης



Σχήμα ΙΙΙ.5 Κατανομή της θερμοκρασίας στη μέση του πάχους της πλάκας σε διεύθυνση κάθετη της συγκόλλησης

## ΙΙΙ.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΟΪΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

#### III.2.1 Εισαγωγή ταχύτητας στον πείρο

Αρχικά εισάγουμε ταχύτητα μόνο στον πείρο και θεωρούμε ότι παράγεται θερμότητα μόνο από την τριβή της επιφάνειάς του με το υλικό. Η περιστροφική ταχύτητα ισούται με 750 RPM, η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου με 1.417 mm/s και ο συντελεστής ολίσθησης ίσος με 0.5. Παρατηρούμε στο σχήμα III.6 ότι η θερμότητα που παράγεται δεν είναι αρκετή για να πλαστικοποιήσει το υλικό στην περιοχή γύρω από το εργαλείο και να το θέσει σε ανάδευση. Πολύ μικρή ποσότητα υλικού γύρω από την επιφάνεια του πείρου φαίνεται να παρασύρεται σε ροή, η οποία δε μεταδίδεται στο υπόλοιπο υλικό. Στο σχήμα III.7 μπορούμε να δούμε σε διαγραμματική μορφή ότι το υλικό επηρεάζεται από την περιστροφή του πείρου μέχρι απόσταση περίπου 1 mm από αυτόν. Επίσης από τα σχήματα III.7 και III.8 φαίνεται ότι η ταχύτητα ροής για θετικά γ, δηλαδή στην υποχωρούσα πλευρά, έχει ελάχιστα μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τα αρνητικά γ, δηλαδή την προωθούμενη πλευρά. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως θα δούμε καλύτερα στα αποτελέσματα που εισάγεται ταχύτητα και στο περιουχένιο, το μεγαλύτερο ποσοστό της ροής λαμβάνει χώρα στην υποχωρούσα πλευρά.



Σχήμα ΙΙΙ.6 Ροή υλικού σε επιφάνεια στη μέση του πάχους του δοκιμίου για εισαγωγή ταχύτητας μόνο στον πείρο



Σχήμα ΙΙΙ.7 Διαγραμματική κατανομή της ροϊκής ταχύτητας στην περιοχή του εργαλείου στη μέση του πάχους της πλάκας για περιστροφή μόνο του πείρου



Σχήμα ΙΙΙ.8 Επιφανειακή κατανομή της ροϊκής ταχύτητας στην περιοχή του εργαλείου στη μέση του πάχους της πλάκας για περιστροφή μόνο του πείρου

### III.2.2 Εισαγωγή ταχύτητας στο περιαυχένιο

Για τις ίδιες παραμέτρους που εισήχθη η ταχύτητα στον πείρο, εισάγεται ταχύτητα και στο περιαυχένιο. Στο σχήμα ΙΙΙ.9 φαίνονται οι ροϊκές γραμμές του πεδίου ταχυτήτων στη μέση του πάχους της πλάκας αλουμινίου. Οι γραμμές δείχνουν την πορεία που τα μόρια του υλικού ακολουθούν από την inlet μέχρι την outlet region. Τα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της ροής προκύπτουν στην περιοχή κοντά στο εργαλείο. Οι απομακρυσμένες ροϊκές γραμμές από την περιοχή του εργαλείου ακολουθούν ευθεία πορεία. Κοντά στο εργαλείο όμως, αναστροφές της ροής αρχίζουν να συμβαίνουν στην προωθούμενη πλευρά. Ένα σημείο στασιμότητας, όπου η ταχύτητα είναι μηδέν, υπάρχει πλησίον του σημείου αναστροφής. Οι κυκλικές ροϊκές γραμμές κοντά στο εργαλείο δείχνουν ότι μέρος του υλικού αναδεύεται από τον πείρο. Φαίνεται καθαρά ότι μόρια κοντά στον πείρο πραγματοποιούν παραπάνω από μία περιστροφή γύρω από αυτόν πρωτού εναποτεθούν στο πίσω μέρος του εργαλείου. Επίσης φαίνεται ότι η πορεία που ακολουθούν τα μόρια είναι από την υποχωρούσα προς την προωθούμενη πλευρά. Στα σχήματα III.9 και III.10 φαίνεται η μορφή της ροής και η κατανομή της ροϊκής ταχύτητας κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου, στη μέση του πάχους της πλάκας και στην κάτω επιφάνεια του πείρου. Βλέπουμε ότι όσο απομακρυνόμαστε κατακόρυφα από το περιαυχένιο, δηλαδή για χαμηλότερα z, η ροϊκή έκαταση μειώνεται ραγδαία. Τέλος, μέσω των διαγραμμάτων III.9 και III.10 μπορούμε να προβλέψουμε τη ζώνη ανάδευσης του υλικού.





β)



γ)

Σχήμα ΙΙΙ.9 Μορφή ροϊκών γραμμών σε διαφορετικά ύψη της πλάκας αλουμινίου: α) κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου, β) στη μέση του πάχους της πλάκας και γ) στο ύψος της κάτω επιφάνειας του πείρου



α)



γ)

Σχήμα ΙΙΙ.10 Διαγραμματική κατανομή της ταχύτητας ροής σε διαφορετικά ύψη της πλάκας αλουμινίου: α) κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου, β) στη μέση του πάχους της πλάκας και γ) στο ύψος της κάτω επιφάνειας του πείρου

Στο σχήμα III.10 α) βλέπουμε ότι στο σημείο όπου το περιαυχένιο και ο πείρος έχουν κοινή ταχύτητα ίση με ωr<sub>p</sub>, όπου r<sub>p</sub> η ακτίνα του πείρου, το υλικό κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου περιστρέφεται με ταχύτητα δωr<sub>p</sub>. Σε απόσταση 9.5 mm από το κέντρο του άξονα το υλικό φαίνεται να αποκτάει τη μέγιστη ταχύτητα που οφείλεται σε ταυτόχρονη επιρροή του πείρου και του περιαυχενίου ενώ για επιπλεόν απομάκρυνση του υλικού από το κέντρο του εργαλείου, η ταχύτητα μειώνεται ραγδαία.

Στα σχήματα ΙΙΙ.10 β) και γ) μπορούμε να παρατηρήσουμε μικρές ασυνέχειες των καμπυλών κατανομής της ροϊκής ταχύτητας στις περιοχές όπου η ταχύτητα τείνει να μηδενίσει. Ο λόγος που έχουμε αυτές τις ασυνέχειες οφείλεται στην απότομη μεταβολή των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του υλικού που αντιστοιχεί στα όρια της θερμομηχανικά και θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Σε αυτές τις περιοχές παρόλο που φαίνεται το υλικό να έχει μια πολύ μικρή ταχύτητα, στην πραγματικότητα δε ρέει, αλλά το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται μια τάση του υλικού να κινηθεί.

Την εγκυρότητα των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορούμε να την εξετάσουμε συγκρίνοντας τα με αντίστοιχα πειραματικά, τα οποία προέκυψαν κατά τη συγκόλληση ιδίων διαστάσεων πλακών AA5083-H111 με ίδιων διαστάσεων εργαλείο. Το μέγεθος της ζώνης ανάδευσης στην πειραματική μελέτη φαίνεται σε εγκάρσια τομή στο σχήμα III.11.



Σχήμα ΙΙΙ.11 Τομή του συγκολλημένου δοκιμίου ΑΑ5083-Η111 με χρήση των ίδιων παραμέτρων συγκόλλησης

Στην άνω επιφάνεια της πλάκας, αν δε λάβουμε υπ' όψιν μας την ύπαρξη του flow arm, η έκταση της ροής φαίνεται να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη διάμετρο του πείρου. Στη μέση του πάχους της πλάκας η έκταση της ροής θεωρείται ότι περιλαμβάνει τη ζώνη ανάδευσης και την περιοχή όπου τα όρια των κόκκων είναι προσανατολισμένα. Αυτή η περιοχή έχει έκταση 8 mm. Στο κάτω μέρος της πλάκας φαίνεται η ροή να εκετείνεται σε μέγεθος ελάχιστα μεγαλύτερο της διαμέτρου του πείρου.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνουν στα ανώτερα στρώματα της πλάκας αρκετά μεγαλύτερη ροϊκή έκταση σε σχέση με τα πειραματικά. Ο κύριος λόγος που υπάρχει αυτή η απόκλιση είναι ότι στην πραγματικότητα δεν έρχεται όλη η επιφάνεια του περιαυχενίου σε επαφή με το υλικό διότι ο άξονας του εργαλείου έχει μια μικρή κλίση αντίθετη προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σύγκριση με τα πειραματικά στον πίνακα που ακολουθεί.

	AS	RS	Πειραματικά αποτελέσματα αθροιστικά
Επιφάνεια του περιαυχενίου	12.6 mm	12.8 mm	7.5 mm
Μέση κατά το πάχος	6	6.2	8 mm
Επιφάνεια υποστήριξης	4	4.5	7 mm

Πίνακα ΙΙΙ.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων ροϊκής έκτασης μοντέλου με πειραματικά σε τρία διαφορετικά ύψη της πλάκας

### III.2.3 Εισαγωγή κλίσης στον άξονα του εργαλείου 3°

Για τη μοντελοποίηση της FSW με tilt angle απαιτήθηκε υψηλότερης ποιότητας διακριτοποίηση και περισσότερος υπολογιστικός χρόνος για να συγκλίνει ο non-linear solver του Comsol. Οι ροϊκές γραμμές στη μέση του πάχους της πλάκας φαίνονται στο σχήμα III.12. Παρατηρούμε ότι μέρος του υλικού με τη βοήθεια του τμήματος του περιαυχενίου που έχει εισχωρήσει στο δοκίμιο, εναποτίθεται στο πίσω μέρος του εργαλείου. Η ροή του υλικού γίνεται πάλι από την υποχωρούσα πλευρά







Σχήμα III.12 Μορφή ροϊκών γραμμών με tilt angle σε διαφορετικά ύψη της πλάκας αλουμινίου: α) κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου, β) στη μέση του πάχους της πλάκας και γ) στο ύψος της κάτω επιφάνειας του πείρου



α)



γ)

Σχήμα ΙΙΙ.13 Διαγραμματική κατανομή της ταχύτητας ροής σε διαφορετικά ύψη της πλάκας αλουμινίου: α) κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου, β) στη μέση του πάχους της πλάκας και γ) στο ύψος της κάτω επιφάνειας του πείρου

Το γεγονός ότι μόνο ένα τμήμα του περιαυχενίου επιδρά στη ροή του υλικού, λόγω της κλίσης του άξονα του εργαλείου, περιορίζει την έκταση της ροής. Επίσης παρατηρούμε όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα, ότι αν εξαιρέσουμε το flow arm στην άνω επιφάνεια, ότι η έκταση της ροής είναι μεγαλύτερη στη μέση του πάχους της πλάκας σε σχέση με τα ανώτερα και κατώτερα στρώματα αυτής. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα αντίστοιχα πειραματικά βλέπουμε ότι υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση με εξαίρεση μια μικρή υπερδιαστασιολόγηση 0.1-0.2 mm της έκτασης του αναδευόμενου όγκου του υλικού στα ανώτερα και κατώτερα στρώματα αυτής σπειρώματα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην μη μοντελοποίηση της ροής που προκαλείται λόγω του σπειρώματος του πείρου, καθώς το Comsol δεν προσφέρει ακόμα τη δυνατότητα εισαγωγής σπειρώματος σε κυλινδρικές επιφάνειες.

	AS	RS	Πειραματικά αποτελέσματα αθροιστικά
Επιφάνεια του περιαυχενίου	3.7 mm	3.9 mm	7.5 mm
Μέση κατά το πάχος	3.9 mm	4.1 mm	8 mm
Επιφάνεια υποστήριξης	3.5 mm	3.7 mm	7 mm

Πίνακα ΙΙΙ.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ροϊκής ακτίνας μοντέλου με πειραματικά σε συγκόλληση FSW με tilt angle

## III.2.4 Μελέτη ροής για διαφορετικές συνθήκες επαφής

Αρχικά θα μελετήσουμε τη ροή του υλικού για διαφορετικές συνθήκες επαφής της επιφάνειας του εργαλείου με την επιφάνεια του αλουμινίου. Υποθέτουμε τις τρεις διαφορετικές συνθήκες επαφής που προτείνονται από τη βιβλιογραφία, σχεδόν πλήρης ολίσθηση (nearly full sliding δ=0.1), μερική ολίσθηση - μερική προσκόλληση (partial sliding δ = 0.5), και πλήρης προσκόλληση (full sticking δ = 1).

Στα σχήματα ΙΙΙ.14 α)-γ) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για συνθήκη σχεδόν πλήρους ολίσθησης η ταχύτητα που μεταφέρεται από το εργαλείο στο υλικό που βρίσκεται σε επαφή είναι αρκετά μικρή για να διαδοθεί στο υπόλοιπο υλικό και να προκύψει ανάδευση. Επίσης φαίνεται ότι κανένα μόριο του υλικού δεν εκτελεί πλήρη περιστροφή γύρω από το εργαλείο. Αντίθετα στις συνθήκες μερικής ολίσθησης/προσκόλλησης και πλήρους προσκόλλησης παρατηρούμε ότι το υλικό αναδεύεται πολύ καλύτερα και μέρος αυτού παρασύρεται από τον πείρο εκτελώντας περισσότερες από μία περιστροφές γύρω από αυτόν. Τέλος παρατηρούμε ότι η έκταση στην οποία υπάρχει ροή υλικού είναι μεγαλύτερη σε συνθήκη πλήρους προσκόλλησης.







в)



Y)

Σχήμα III.14 Ροϊκές γραμμές σε τομή στη μέση του πάχους της πλάκας για διάφορες συνθήκες επαφής, α) nearly full sliding, β) partial sliding/sticking, γ)full sticking για περιστροφική ταχύτητα 750 RPM και ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου 85 mm/min

#### III.2.5 Μελέτη ροής για διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης

Οι ροϊκές γραμμές για διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης του εργαλείου φαίνονται στα σχήματα III.15 α) – γ). Οι ταχύτητες που μελετώνται 60, 72 και 85 mm/min δε φαίνεται να παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές στην ποιότητα των ροϊκών γραμμών. Και στις 3 περιπτώσεις φαίνεται ότι το υλικό πλαστικοποιείται και αναδεύεται περιμετρικά του εργαλείου. Επειδή και στις τρεις ταχύτητες τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, προτιμάται η μεγαλύτερη ταχύτητα από τις 3. Επίσης μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι ροϊκές γραμμές τείνουν να είναι πιο προσανατολισμένες για μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης εφόσον επιτυγχάνεται η απαιτούμενη πρόσδοση θερμότητας και η πλαστικοποίηση του υλικού.



α)



в)



Σχήμα III.15 Ροϊκές γραμμές σε τομή στη μέση του πάχους της πλάκας για ταχύτητες συγκόλλησης α) 60 mm/min, β) 72 mm/min και γ) 85 mm/min για περιστροφική ταχύτητα 750 RPM και συνθήκη επαφής partial sliding/sticking

## III.2.6 Μελέτη ροής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

Οι ροϊκές γραμμές για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του εργαλείου φαίνονται στα σχήματα III.16 α) – γ). Οι ταχύτητες που μελετώνται, 400, 750 και 1180 RPM εμφανίζουν διαφορετικό μέγεθος ζωνών ανάδευσης. Μεγάλες ταχύτητες περιστροφής οδηγούν στην πρόσδοση περισσότερης θερμότητας στο υλικό και κατά συνέπεια στην αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή συγκόλλησης. Η αυξημένη θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα την πλαστικοποίση μεγαλύτερου όγκου υλικού (μεγαλύτερη ζώνη ανάδευσης) και την εντονότερη ανάδευση και ανάμιξή του. Αυτό αποδεικνύεται και από την ποιότητα των ροϊκών γραμμών καθώς για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής φαίνεται να μειώνονται οι ασυνέχειες.



в)



Σχήμα ΙΙΙ.16 Ροϊκές γραμμές σε τομή στη μέση του πάχους της πλάκας για ταχύτητες περιστροφής α) 400 RPM, β) 750 RPM και γ) 1180 RPM για ταχύτητα συγκόλλησης 85 mm/min και συνθήκη επαφής partial sliding/sticking

#### III.2.7 Μελέτη ιξώδους στην περιοχή του εργαλείου

Στα σχήματα III.17 α) – γ) βλέπουμε σε εγκάρσια τομή στη γραμμή συγκόλλησης την κατανομή του δυναμικού ιξώδους στην περιοχή κάτω από το εργαλείο. Αν συγκρίνουμε τα προφίλ του ιξώδους με αυτό της θερμοκρασίας παρατηρούμε ότι οι ζώνες που εμφανίζονται στα θερμοκρασιακά προφίλ σχεδόν συμπίπτουν με αυτά του ιξώδους. Σε συνθήκη σχεδόν πλήρους ολίσθησης παρατηρούμε ότι η επιφάνεια που το ιξώδες παίρνει χαμηλές τιμές είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σε συνθήκη πλήρους προσκόλλησης. Επίσης οι ελάχιστες τιμές που παίρνει το ιξώδες μειώνονται αρκετά από full sliding σε full sticking condition Αυτό συμβαίνει διότι σε συνθήκες πλήρους ήγκος υλικού πλαστικοποιείται, ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερος και η ανάδευση καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση.



α)



в)



Σχήμα ΙΙΙ.17 Κατανομή του ιξώδους σε τομή κάθετη της γραμμής συγκόλλησης για συνθήκη α) nearly full sliding, β) partial sliding/ sticking, γ) full sticking

Όπως βλέπουμε στα παραπάνω σχήματα η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει το ιξώδες στην περιοχή του εργαλείου σε συνθήκη σχεδόν πλήρους ολίσθησης είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε κατάσταση πλήρους προσκόλλησης. Οι κατανομές του ιξώδους περιμετρικά του πείρου μπορούν να φανούν εύκολα και από τα σχήματα III.18.



α)



в)



Σχήμα III.18 Κατανομή του ιξώδους περιμετρικά του εργαλείου για συνθήκη α) nearly full sliding, β) partial sliding/ sticking, γ) full sticking

Η μεταβολή του ιξώδους σε διαφορετικά ύψη της πλάκας, για συνθήκη πλήρους προσκόλλησης φαίνεται στο σχήμα ΙΙΙ.19. Παρατηρούμε ότι για χαμηλότερα z το ιξώδες αρχίζει να αυξάνεται σε πιο κοντινές αποστάσεις από το εργαλείο. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού στις περιοχές κοντά στο περιαυχένιο μεταδίδεται περισσότερη θερμότητα με αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση τους σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το υλικό που βρίσκεται πιο κοντά στο κάτω μέρος της πλάκας. Στο διάγραμμα φαίνεται το ιξώδες να παίρνει μηδενική τιμή κοντά στο εργαλείο. Στην πραγματικότητα η ελάχιστη τιμή είναι 2.92\*10<sup>3</sup> Pa\*s όπως δίδεται και στο σχήμα ΙΙΙ.17 γ).



Σχήμα ΙΙΙ.19 Κατανομή ιξώδους σε διαφορετικά πάχη της πλάκας για συνθήκη πλήρους προσκόλλησης

#### III.2.8 Μελέτη του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης

Ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης κάτω από το περιαυχένιο και γύρω από τον πείρο μπορεί να παρουσιασθεί όπως φαίνεται στο σχήμα III.20. Ο μέγιστος ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης εμφανίζεται κοντά στις επιφάνειες του περιαυχενίου και του πείρου όπου οι βαθμίδες ταχύτητας (velocity gradients) παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους. Σε επίπεδα κάτω από την επιφάνεια του περιαυχενίου και όσο απομακρυνόμαστε από το εργαλείο ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης μειώνεται ραγδαία μέχρι να μηδενιστεί.



a)



в)



Y)

Σχήμα III.20 Κατανομή του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης στην περιοχή του εργαλείου σε ύψος 2.5 mm για συνθήκη α) nearly full sliding, β) partial sliding/ sticking, γ) full sticking

### III.2.9 Μελέτη του πεδίου ταχυτήτων

Τα προφίλ της ταχύτητας για διάφορετικές συνθήκες επαφής φαίνονται στα σχήματα III.21 α)-γ). Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής ολίσθησης, δηλαδή η ποσότητα του υλικού που προσκολλάται στο εργαλείο, αυξάνεται και η περιοχή η οποία επηρεάζεται από την περιστροφή του εργαλείου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και η ροϊκή ταχύτητα των μορίων του ρευστού στην περιοχή γύρω από το εργαλείο.



α)



в)



Σχήμα III.21 Προφίλ ταχύτητας για συνθήκη α) nearly full sliding, β) partial sliding/ sticking, γ) full sticking

Στο σχήμα III.22 παρατηρούμε την κατανομή της ταχύτητας στην προωθούμενη και στην υποχωρούσα πλευρά δίπλα στο εργαλείο για διαφορετικά πάχη της πλάκας αλουμινίου. Επαληθεύεται ότι σε χαμηλότερα z η έκταση της ροής είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη σε περιοχές κοντά στο περιαυχένιο. Όπως έχουμε αναφέρει και στην αρχή του κεφαλαίου, ασυνέχειες που εμφανίζονται στην καμπύλη των ταχυτήτων στα σημεία που αυτή τείνει να μηδενιστεί, οφείλονται στην απότομη μεταβολή παραγόντων που επιδρούν στην επίλυση του ροϊκού μοντέλου, όπως η θερμοκρασία, το ιξώδες, ο ρυθμός παραμόρφωσης και η πυκνότητα.



Line Graph: Velocity magnitude (m/s) Line Graph: Velocity magnitude (m/s) Line Graph: Velocity magnitude (m/s)

Σχήμα ΙΙΙ.22 Κατανομή της ροϊκής ταχύτητας σε διαφορετικά πάχη της πλάκας

# Ιν. Συμπερασματά

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η αριθμητική ανάλυση της ροής του πλαστικοποιημένου υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση αλουμινίου AA5083-H111 και η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της διεργασίας σε αυτήν.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε συνδυασμένο θερμικό – ροϊκό μοντέλο τριών διαστάσεων στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics. Το θερμικό μοντέλο βασίστηκε στη μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (MHS), ενώ για τη μελέτη της ροής πραγματοποιήθηκε ανάλυση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Το αλουμίνιο θεωρήθηκε ρευστό υψηλού ιξώδους, το οποίο εμφανίζει μη νευτώνεια ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Στο μοντέλο εισήχθησαν οι εξαρτόμενες απο τη θερμοκρασία ιδιότητες του υλικού και για τον υπολογισμό του ιξώδους χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Carreau. Το εργαλείο συγκόλλησης αποτελείται από επίπεδο κυλινδρικό περιαυχένιο και κυλινδρικό πείρο από χάλυβα Sverker 21. Η ανάλυση των ροϊκών πεδίων επιτυγχάνεται με την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων Νavier – Stokes για στρωτή ροή.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης έδειξαν ότι σημαντική ροή υλικού πραγματοποιείται κοντά στο εργαλείο. Επιβεβαιώνεται ότι η πλαστικοποίηση του υλικού και η έναρξη της ροής πραγματοποιείται αφού έλθει σε επαφή η επιφάνεια του περιαυχενίου με τα δοκίμια. Οι κλειστές κυκλικές ροϊκές γραμμές κοντά στον πείρο υποδεικνύουν ότι μέρος του υλικού ολοκληρώνει τουλάχιστον μια πλήρη περιστροφή πρωτού εναποτεθεί στο πίσω μέρος του. Οι ροϊκές γραμμές επίσης δείχνουν ότι η ροή

Η σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά στην περίπτωση εισαγωγής γωνίας κλίσης στον άξονα του εργαλείου στο μοντέλο έδειξε σχεδόν απόλυτη ταύτιση της έκτασης της ροής γύρω από το εργαλείο.

Σημαντικό ρόλο στην έκταση της ροής παίζει η συνθήκη επαφής στη διεπιφάνεια του υλικού με το εργαλείο. Για αυξημένη προσκολλησιμότητα του υλικού στο εργαλείο, αυξάνεται η έκταση της ροής, ενώ επιτυγχάνεται καλύτερη και εντονότερη ανάδευση. Αντίθετα, αν το υλικό ολισθαίνει σε μεγάλο βαθμό στην επιφάνεια του εργαλείου, δεν επιτυγχάνεται διάδοση της ροής στα γειτονικά στρώματα. Το λεπτό πάχος του δοκιμίου που επιλέχθηκε δεν μας επιτρέπει να δούμε ιδιαίτερες διαφορές στην ποιότητα της ροής για διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής του εργαλείου. Παρατηρούμε όμως, ότι πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε ανάδευση αρκετά μικρότερου όγκου υλικού.

Τέλος παρατηρείται ότι κατά το πάχος του δοκιμίου μεγαλύτερη ροϊκή έκταση, υψηλότερο ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης και χαμηλότερο ιξώδες, δηλαδή εντονότερη πλαστικοποίηση, συναντάμε στα ανώτερα στρώματα του υλικού. Στα κατώτερα στρώματα βλέπουμε ότι σε ελάχιστη απόσταση από το εργαλείο παρατηρείται ραγδαία αύξηση του ιξώδους, δηλαδή μεταπήδηση από τη θερμομηχανικά στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

# V. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η χρήση του Comsol για τη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι λιγότερο διαδεδομένη σε σχέση με τα πακέτα ABAQUS και ANSYS. Η ικανότητα του Comsol να επιλύει παράλληλα πολύπλοκα μη γραμμικά προβλήματα και να εξάγει αποτελέσματα που αφορούν τόσο το θερμοκρασιακό ιστορικό όσο και τη μορφή της ροής γύρω από το εργαλείο, σε συνδυασμό με την ευκολία στη χρήση του και τις πολύ καλές υπολογιστικές δυνατότητές του, έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε Comsol, που θα βελτιώσουν τη μοντελοποίηση και την ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι οι ακόλουθες:

- Μοντελοποίηση της FSW για διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείου και κυρίως για πείρους με σπείρωμα, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της ροής στροβιλισμού στη διαμόρφωση της ροής
- Συνδυασμός του θερμικού ροϊκού μοντέλου με μηχανικό μοντέλο για την πρόβλεψη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων
- Κατασκευή μοντέλου ακριβούς πρόβλεψης της συνθήκης επαφής μεταξύ της επιφάνειας του υπό συγκόλληση μετάλλου και της επιφάνειας του εργαλείου
- Εφαρμογή του μοντέλου σε συγκόλληση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου ή σε συγκόλληση αλουμινίου-χάλυβα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Δ. Παντελής, Β. Παπάζογλου, Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014

[2] Β. Παπάζογλου, ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ (ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ), Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995

[3] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, and C.J. Dawes, G. B. Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London 1991

[4] C. Dawes and W. Thomas, TWI Bull., Vol 6, Nov/Dec 1995, p 124

[5] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, Materials Park, Ohio, 2007

[6] Kirk Fraser, Lyne St-Georges and Laszlo I. Kiss, A Mesh-Free Solid-Mechanics Approach for Simulating the Friction Stir Welding Process

[7] W. M. Thomas, K. I. Johnson, C. S. Wiesner, TWI Ltd, Friction stir welding – recent developmentes in tool and process technologies

[8] H. K. Mohanty, D. Venkateswardu, M. M. Mahapatra, Pradeep Kumar, N. R. Mandal, Modeling the Effects of Tool Probe Geometries and Process Parameters on Friction Stirred Aluminium Welds

[9] Edward F. Shultz, Edward G. Cole, Christopher B. Smith, Michael R. Zinn, Nicola J. Ferrier, Frank E. Pfefferkom, Effect of Compliance and Travel Angle on Friction Stir Welding with Gaps

[10] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R, vol 50, pp 1-78, 2005

[11] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and welding speed on formation of friction stir processing zone in AA 2219, Journal of Materials Processing Technology, vol 200, pp 163-175, 2008

[12] R. Nandan, T. Debroy and H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in Friction Stir Welding – Process weldment structure and properties, Progress in Mat. Science 53 [13] Keith M. Williamson, Tarek Abdel-Salam, A moving boundary formulation for recursive plastic heat release during friction stir welding

[14] K. Colligan, Material flow behavior during friction stir welding of aluminum, Welding Journal vol 78 no.7, pp 2290237, Jul. 1999

[15] M. Guerra, C. Schmidt, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, Materials Characterization, vol 49, no. 2, pp 95-101, 2002

[16] Paul Kah, Richard Rajan, Jukka Martikainen, Raimo Suoranta, Investigation of weld defects in friction stir welding of aluminium alloys, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2015

[17] W.J. Arbegast, Friction Stir Welding and Processing, ASM International, Materials Park, OH, 2007, ISBN-13 978-0-87170-840-3, (Chapter 13)

[18] Yufeng Sun, Hidetoshi Fujii, Recent Patented Hybrid Techniques for Friction Stir Welding of Metallic Materials, Recent Patents on Mechanical Engineering 2010, 3, 206-210

[19] Ι. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008

[20] Seymour G. Epstein, J. G. Kaufman, Peter Pollak, The Aluminum Association, Inc., Aluminum and its alloys, Mechanical Engineers' Handbook, 2<sup>nd</sup> ed., 1998

[21] R.P. Chhabra, J.F. Richardson, Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering applications, 2008

[22] S. M. Richardson, Non-Newtonian Fluids, Thermopedia Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering, 2011

[23] O. Frigaard, O. Grong, O.T. Midling, Modeling of the heat flow phenomena in friction stir welding of aluminum alloys, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on "Joints in aluminum", 1998

[24] O. Frigaard, O. Grong, B. Bjornekett, O.T. Midling, Modeling of the thermal and microstructure fields during the friction stir welding of aluminium alloys, 1<sup>st</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, 1999

[25] Y.J. Chao, X. Qi, Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science. 7 (1998) 215-233

[26] Y.J. Chao, X. Qi, Heat Transfer and thermos-mechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates, 1<sup>st</sup> Inter. Symposium on Friction Stir Welding (1999)

[27] X.K. Zhu, Y.J. Chao, Numerical Simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel. Journal of Materials Processing Technology 146 (2004) 263-272

[28] Q.Y. Shi, T. Dickerson, H.R. Shercliff, Thermomechanical FE Modeling of Friction Stir Welding, 2003, Proc. Fourth Int. Symp. on Friction Stir Welding, Park City, UT, TWI

[29] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds, M. A. Sutton, Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals. Journal of Materials Processing Technology 174 (2006) 195-203

[30] Modelling of Friction Stir Welding by Paul Andrew Colegrove, Corpus Christi College, University of Cambridge, 2003

[31] H. R. Shercliff and P. A. Colegrove, Modelling of friction stir welding, Mathematical Modeling of Weld Phenomena 6', 927-974, 2002, London, Maney Publishing

[32] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, Experimental and Numerical Analysis of 7075-T7351 Friction Stir Welds, Science and Technology, Welding and Joining

[33] T. Hyoe, P.A. Colegrove, H.R. Shercliff, Thermal and Microstructure Modeling in thick plate aluminium alloy 7075 friction stir welds, friction stir welding and processing II, 2003

[34] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, Modelling and Development of the Trivex<sup>™</sup> Friction Stir Welding Tool, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding, 2003

[35] M. Song, P. Kovacevic, A new heat transfer model for friction stir welding, Technical Paper-Society of Manufacturing Engineers, MS02-175 (2002) 1-8

[36]M. Song, R. Kovacevic, Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation, Inter. J of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 605-615

[37] C.M. Chen, R. Kovacevic, Finite Element modelling of thermomechanical performance of friction stir welding, 4<sup>th</sup> Inter. Symposium on friction stir welding, 2003

[38] C.M. Chen, R. Kovacevic, Finite Element of friction stir welding – thermal and thermomechanical analysis, Inter. J of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 1319-1326

[39] C.M. Chen, R. Kovacevic, Thermomechanical Modelling and force analysis of friction stir welding by the finite element method, Journal of Mech. Engin. Sci 5 (2004) 509-520

[40] V. Soundararajan, S. Zekovic, R. Kovacevic, Thermomechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061, Int. J. Mach. Tools % Manuf., V. 45, p. 1577-1587, 2005

[41] H.N.B. Schmidt, J. Hattel, Heat source models in simulation of heat flow in friction stir welding, Int. J. Offshore and Polar Engineering, V 14/4, p. 296-304, 2004

[42] H.N.B. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, An analytical model for the heat generation in friction stir welding, Modelling Sim. Mat. Sci. Eng., V. 12, p. 143-157, 2004

[43] Henrik Schmidt and Jesper Hattel, A thermal pseudo-mechanical model for the heat generation in friction stir welding, 7th International Symposium Friction Stir Welding, TWI, 2008

[44] Henrik B. Schmidt and Jesper H. Hattel, Thermal modelling of friction stir welding, Scripta Materialia 58 (2008), 332-337

[45] R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert., T. Debroy, Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel, Acta Materialia 55 (2007) 883-895

[46] R. Nandan, T. Debroy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in Friction Stir Welding – Process weldment structure and properties, Progress in Mat. Science 53 (2008) 980-1023

[47] J. Bie, Y. Liu, Z. Zhang, Effect of processing parameters on temperature distributions in friction stir welding, Journal of Plasticity Engineering15 (2008) 212-217

[48] Hongjun Li and Di Liu, Simplified Thermo-Mechanichal Modeling of friction stir welding with a sequential FE method, International Journal of modeling and Optimization, Vol. 4, No. 5, October 2014

[49] Renju Mohan, N. R. Rajesh, Satheesh Kumar S, Finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding of AA 1100 and optimization of process parameter by taguchi method, International Journal of Research in Engineering and Technology, May 2014

[50] M. Nourani, A. S. Milani, S. Yannacopoulos, On the effect of different material constitutive equations in modeling friction stir welding: A review and comparative study
on aluminum 6061, International Journal of Advances in Engineering & Technology, Mar. 2014

[51] C.M. Sellars, W.J.McG. Tegart, Hot workability, Int. Met. Rev., 17 (1972) 1-24

[52] T. Sheppard, D.S. Wright, Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminum alloys at elevated temperatures, Met. Technol. 6 (1979) 215-223

[53] P. Ulysse, Three-dimensional modeling of the friction stir welding, Process Int. J. Mach. Tools. Manuf., 42 (2002) 1549-1557

[54] P. A. Colegrove, M. Painter, D. Graham, T. Miller, 3 dimensional flow and thermal modeling of friction stir welding process, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, TWI, Gothenburg, 2000

[55] A. Reynolds, X. Deng, T. Seidel, S. Xu, Recent advances in FSW process physics, Proceedings of the International Conference of Joining of Advanced and Specialty Materials, TWI, St Louis, 2000

[56] H. Atharifar, D. Lin, R. Kovacevic, Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool during Friction Stir Welding, J. Mat. ENg. Perform. 18 (2009) 339-350

[57] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, 2-Dimensional CFD modeling of flow round profiled FSW tooling, Friction Stir Welding and Processing II, p. 13-22, 2003

[58] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, 3-Dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile, Journal of Materials Processing Technology, p 320-327, 205

[59] Henrik B. Schmidt and Jesper H. Hattel, Thermal and Material Flow modelling of Friction Stir Welding using Comsol, Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover

[60] Barnik Saha Roy, Subhash Chandra Saha, John Debbarma, 3-D Modeling & Numerical Simulation of Friction Stir Welding Process, Advanced Materials Research Vols. 488-489 (2012) pp 1189-1193

[61] B. Saha Roy, T. Medhi, S. C. Saha, Material Flow Modeling in Friction Stir Welding of AA6061 – T6 Alloy and Study of the Effect of Process Parameters, International Journal of

Environment, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering Vol:9, No:6, 2015

[62] Stephan M. Dorfler, Advanced modeling of friction stir welding – improved material model for aluminum alloys and modeling of different materials with different properties by using the level set method, Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover

[63] J. Hilgert, L.L. Huetsch, J.F. dos Santos and N. Huber, Material flow around a bobbin tool for friction stir welding, Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris

[64] L. Fourment, S. Guerdoux, M. Miles, T. Nelson, Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process using both Lagrangian and Arbitary Lagrangian Eulerian formulation, 1<sup>st</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, 1999

[65] S. Guerdoux and L. Fourment, ALE Formulation for the Numerical Simulation of Friction Stir Welding, VIII International Conference on Computational Plasticity, Barcelona 2005

[66] S. Guerdoux, L. Fourment, A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 17 (2009)

[67] P. Dong, F. Lu, J.K. Hong, Z. Cao, Coupled thermomechanical analysis of friction stir welding process using simplified models, Sci. Technol. Weld. Joining 6 (2001) 281-287

[68] H. Schmidt and J. Hattel, Modelling thermomechanical conditions at the tool/matrix interface in Friction Stir Welding, 5<sup>th</sup> Inter. Symposium on Friction Stir Welding 2004

[69] H. Schmidt and J. Hattel, A local model for the thermomechanical conditions in frction stir welding, Modeling Simul, Mater. Sci. Eng. 13 (2005) 77-93

[70] Z. Zhang, H.W. Zhang, Numerical studies on the effect of transverse speed in friction stir welding, Materials and Design – Article in Press (2008)

[71] Z. Zhang, J. Bie, Fully coupled thermos-mechanical model for numerical simulation of friction stir welding process, China Mechanical Engineering 19 (2008) 1240-1245

[72] Z. Zhang, H.W. Zhang, A fully coupled thermos-mechanical model of friction stir welding, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 37 (2008)

[73] A. Bastier, M.H. Maitoumam, F. Roger, K. Dang Van, Modelling of the residual state of friction stir welded plates, Journal of Materials Processing Technology 200 (2008) 25-37 [74] M. Kishta, H. Abed, M. Darras, Nonlinear Finite Element Simulation of Friction Stir Processing of Marine Grade 5083 Aluminum Alloy, Engineering Transactions 62,4, 313-328, 2014

[75] M. Chiumenti, M. Cervera, C. Agelet de Saracibar, N. Dialami, Numerical modeling of friction stir welding processes, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 254 (2013) 353-369

[76] Dongun Kim, Harsha Badarinarayan, Ill Ryu, Ji Hoon Kim, Chongmin Kim, Kazutaka Okamoto, R.H. Wagoner, Kwansoo Chung, Numerical simulation of friction stir welding process, Int J Mater Form (2009) Vol. 2 Suppl 1:383-386

[77] Dongun Kim, Harsha Badarinarayan, Ill Ryu, Ji Hoon Kim, Chongmin Kim, Kazutaka Okamoto, R.H. Wagoner, Kwansoo Chung, Numerical simulation of friction stir butt welding process for AA5083-H18 sheets, European Journal of Mechanics A/Solids 29 (2010) 204-215

[78] P.N. Karakizis, D.I. Pantelis, Numerical modeling of AA5083-H111 Friction Stir Welds and experimental validation, 6th Pan-Hellenic Conference on Metallic Materials, 2016