



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΡΟΪΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ
ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΠΛΑΚΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6082
ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ANSYS

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Καθηγητής Δ.Ι. Παντελής

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΟΝΑΚΗΣ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Στους δικούς μου

Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση στο περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων, ANSYS CFX. Με την εργασία αυτή κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών.

Πρώτα από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κύριο Δ. Παντελή για την έμπνευση που μου έδωσε, ήδη από τα πρώτα χρόνια των σπουδών μου για να ασχοληθώ με την επιστήμη των συγκολλήσεων. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Παναγιώτη Καρακίζη για την υπομονή και την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Καθοριστικής σημασίας ήταν οι συμβουλές του κυρίου Χ. Παπαδόπουλου, Επίκουρου Καθηγητή της Σχολής, μιας και με έβγαλαν από πολλά αδιέξοδα. Επίσης, πολύ σημαντική ήταν η συμβολή του Υποψήφιου Διδάκτορα, Αστρονίου Παπαδάκη, στην παροχή τεράστιου όγκου υλικού για την εκμάθηση του ANSYS.

Τέλος, για την ολοκλήρωσή της εργασίας, οφείλω να πω ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στους αφανείς ήρωες: τους γονείς μου, Νικόλαο και Χριστοφίλη και τις αδερφές μου Φωτεινή και Βέρα, που από την αρχή των σπουδών μου μέχρι σήμερα με βοήθησαν να πετύχω τους στόχους μου, με κορύφωμα την διπλωματική εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εξαδέλφη μου Μαριλία, που σε συνθήκες τρομερής πίεσης χρόνου βοήθησε σημαντικά στην επιμέλεια της εργασίας αυτής.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ροϊκή μοντελοποίηση με τη μέθοδο της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε πλάκες κράματος αλουμινίου 6082 σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα στο λογισμικό ANSYS CFX.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας γίνεται μια σύντομη αναφορά σε βασικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου και σε βασικά ζητήματα που έχουν αποτελέσει πεδίο έρευνας για την συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση. Μιας και στην μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, το αλουμίνιο θεωρείται ως ρευστό πολύ υψηλού ιξώδους δίνεται συνοπτικά ένα θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τις συμπεριφορές των ρευστών ως προς το ιξώδες. Παρουσιάζονται οι τρεις βασικές ερευνητικές προσεγγίσεις της μοντελοποίησης της διεργασίας και, τέλος, επεξηγούνται κάποιες διαδικασίες που ακολουθεί το ANSYS CFX κατά την επίλυση μοντέλων CFD.

Στο υπολογιστικό μέρος, γίνεται αρχικά αναλυτική παρουσίαση της κατάστρωσης του μοντέλου, από την κατασκευή της γεωμετρίας μέχρι τον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών, ενώ γίνεται διερεύνηση για τις κατάλληλες μαθηματικές παραμέτρους της μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πείραμα αναφοράς που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Το βασικό μέγεθος που μετράται είναι η ροϊκή ακτίνα και μελετάται και η μεταβολή του ιξώδους. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής διαφόρων παραμέτρων συγκόλλησης. Η καινοτομία της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της αλλαγής διαμέτρου περιαιχενίου στην παραγόμενη ροϊκή ακτίνα με την ταυτόχρονη εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων.

Abstract

The aim of this paper is the flow modeling of the friction stir welding process of a butt joint between two 6082 aluminum alloy plates, using the method of Computational Fluid Dynamics, in the Finite Element environment of ANSYS Workbench and specifically in the ANSYS CFX Software.

In the theoretical part of this paper, there is a brief reference, concerning the basic properties of the aluminum alloys and the most significant subjects that have been researched in the field of Friction Stir Welding. Regarding the CFD modeling approach of the phenomenon, the aluminum is considered a fluid of very high dynamic viscosity, so the fundamental theoretical background of the viscous behavior of fluids is presented. The three major research approaches regarding the modeling of FSW are explained, as well as the procedure that ANSYS CFX follows to solve CFD models.

In the beginning of the experimental part, there is a thorough presentation of the set-up of the model (from the geometry construction to the definition of the boundary conditions) along with an investigation of the appropriate mathematical parameters of the model. The results are compared to a reference experiment performed in the Shipbuilding Technology Laboratory. The elementary properties measured are the flow radius and the variation of the dynamic viscosity. Lastly, an examination of the effect of the alternation of the welding parameters is displayed. The innovation of this project is the examination of the impact of the shoulder diameter alternation on the produced flow radius. The results of the models are discussed elaborately and the respective conclusions are reached.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Επίδραση κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες του αλουμινίου ...	1
Πίνακας 2 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.....	3
Πίνακας 3 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης	3
Πίνακας 4 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα A.A., των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.....	4
Πίνακας 5 Χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση	5
Πίνακας 6 Καταστάσεις επαφής εργαλείου και υλικού.....	37
Πίνακας 7 Κριτήρια σύγκλισης των RMS Residuals	48
Πίνακας 8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διάταξης FSW στο ENT	49
Πίνακας 9 Γεωμετρία σχημάτων μοντέλου.....	50
Πίνακας 10 Τομείς της γεωμετρίας του μοντέλου	51
Πίνακας 11 Σύσταση του κράματος αλουμινίου 6082.....	59
Πίνακας 12 Πυκνότητα του αλουμινίου για διάφορες θερμοκρασίες	60
Πίνακας 13 Διαστάσεις ροής σε τρεις κατακόρυφες θέσεις της πλάκας	65
Πίνακας 14 Ροϊκή ακτίνα μοντέλου και πειράματος για $\delta=0.5$	68
Πίνακας 15 Ροϊκή ακτίνα μοντέλου σε τρεις διαφορετικές θέσεις της πλάκας	73
Πίνακας 16 Σύγκριση ροϊκής ακτίνας μοντέλου και πειράματος.....	73
Πίνακας 17 Ροϊκή ακτίνα σε τρεις θέσεις κατά το πάχος για διαφορετικές διαμέτρους του περιαιχενίου.....	88

Κατάλογος εικόνων και σχημάτων

Εικόνα 1 Οι τέσσερις κύριες φάσεις της FSW	9
Εικόνα 2 Η διεργασία της FSW	9
Εικόνα 3 Εργαλεία που αναπτύχθηκαν από το The Welding Institute (4).....	10
Εικόνα 4 Εργαλεία που αναπτύχθηκαν από το The Welding Institute. (α) neutral flutes, (β) left flutes, και (γ) right hand flutes (8).....	11
Εικόνα 5 Εργαλείο που αναπτύχθηκε από το The Welding Institute. (α) πλάγια όψη, (β) πρόσθια όψη, και (γ) περιοχή που σαρώνεται από τον πείρο (8)	11
Εικόνα 6 Γεωμετρίες περιαιχενίου - κάτω όψη (4).....	12
Εικόνα 7 Ανάλυση ζωνών μικροδομής σε συγκόλληση FSW του κράματος αλουμινίου 2024. Α) Βασικό μέταλλο ανεπηρέαστο από την διεργασία.	14
Εικόνα 8 Μικροδομή του συγκολλημένου με FSW κράματος αλουμινίου 2199 - φαίνεται η εκλέπτυνση της μικροδομής στον πυρήνα συγκόλλησης. (5) ...	15
Εικόνα 9 Επιμέρους θερμότητες σε κάθε επιφάνεια επαφής εργαλείου και υλικού.....	17
Εικόνα 10 Οι τρεις επιφάνειες παραγωγής θερμότητας του εργαλείου	18
Εικόνα 11 (a), (b): Ροή προκαλούμενη από τον πείρο συγκόλλησης, (c), (d): Ροή μετά την επαφή του περιαιχενίου με το συγκολλούμενο υλικό.....	19
Εικόνα 12 Οι ζώνες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση: η ζώνη προθέρμανσης, η ζώνη αρχικής παραμόρφωσης, η ζώνη εξώθησης - διέλασης, η ζώνη σφυρηλάτησης και η ζώνη απόψυξης	19
Εικόνα 13 Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης (ροής) υλικού κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση.....	20
Εικόνα 14 Χαρακτηριστικά ελαττώματα τύπου «κενού» σε FSW (5)	21
Εικόνα 15 α) Ελαττώματα οξειδίων στο κράμα 5083 τα οποία μπορούν σε σοβαρές περιπτώσεις να οδηγήσουν σε σφάλμα τύπου «kissing bond» στην βάση.....	22
Εικόνα 16 Χαρακτηριστικό ελάττωμα ρίζας σε συγκόλληση FSW λόγω πολύ μικρού πείρου σε κράμα αλουμινίου 5083 (11).....	23
Εικόνα 17 Chevron markings στην κάτω πλευρά της συγκόλλησης FSW σε κράμα αλουμινίου 5083 (5).....	24
Εικόνα 18 Αριστερά:Το μπροστινό και το πίσω μέρος της οθόνης του iMac (2012) της Apple έχουν συγκολληθεί με FSW επιτυγχάνοντας μείωση του πάχους στα 5cm [Πηγή: Apple].....	28
Εικόνα 19 Ροή Couette και κατανομή της ταχύτητας	30
Εικόνα 20 Συμπεριφορά νευτώνειων και μη νευτώνειων ρευστών	31
Εικόνα 21α) Διατμητική τάση σε σχέση με ρυθμό διάτμησης και β) Ιξώδες σε σχέση με το ρυθμό διάτμησης	41
Εικόνα 22 Η μεταποιημένη φρέζα - μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας	49
Εικόνα 23 Μέση Τομή και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου.....	52

Εικόνα 24 Άνω Όψη και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου (επισημαίνονται οι τομείς 4 και 5)	52
Εικόνα 25 Κάτω Όψη και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου (επισημαίνονται οι τομείς 1,2 και 3).....	53
Εικόνα 26 Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας	58
Εικόνα 27 Συνοριακές συνθήκες στο περιαιχένιο και τη βάση του πείρου ...	61
Εικόνα 28 Συνοριακές συνθήκες στην παράπλευρη επιφάνεια του πείρου ...	61
Εικόνα 29 Είσοδος ροής.....	62
Εικόνα 30 Έξοδος ροής	63
Εικόνα 31 Τοιχώματα της πλάκας.....	63
Εικόνα 32 Πείραμα αναφοράς	65
Εικόνα 33 Προφίλ ροής για συντελεστή ολίσθησης $\delta=0.5$ (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	66
Εικόνα 34 Ταχύτητα στο πάνω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	67
Εικόνα 35 Ταχύτητα στο μέσο του πάχους της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	67
Εικόνα 36 Ταχύτητα στο κάτω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	68
Εικόνα 37 Προφίλ ροής για $\lambda=20$ $sn=0.2$ (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	69
Εικόνα 38 Ροϊκές γραμμές στο μέσο του πάχους της πλάκας υπό την επίδραση μόνο του πείρου χωρίς το περιαιχένιο (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	70
Εικόνα 39 Ταχύτητες στο πάνω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	71
Εικόνα 40 Ταχύτητες στο μέσο του πάχους της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$) ...	71
Εικόνα 41 Ταχύτητες στο κάτω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	72
Εικόνα 42 Προφίλ ροής με τις σωστές παραμέτρους (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	72
Εικόνα 43 Γραμμές ροής στην άνω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	74
Εικόνα 44 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους (επιλέχθηκε πιο πυκνή παράσταση γραμμών ροής για καλύτερη ανάδειξη του φαινομένου) (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	74
Εικόνα 45 Γραμμές ροής στην κάτω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)	75
Εικόνα 46 Διανύσματα ταχυτήτων στην άνω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	76
Εικόνα 47 Διανύσματα ταχυτήτων στο μέσο του πάχους (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$). 76	
Εικόνα 48 Διανύσματα ταχυτήτων στην κάτω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	77
Εικόνα 49 Κατανομή δυναμικού ιξώδους στην περιοχή του εργαλείου (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	78
Εικόνα 50 Κατανομή του ιξώδους σε τρεις διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις της πλάκας (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	79
Εικόνα 51 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 47.5 mm/ min (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$).....	80

Εικόνα 52 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 60 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	81
Εικόνα 53 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 118 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	81
Εικόνα 54 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 47.5 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	82
Εικόνα 55 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 60 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	82
Εικόνα 56 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 118 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	83
Εικόνα 57 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 475 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	84
Εικόνα 58 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 1180 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	84
Εικόνα 59 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 1500 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	85
Εικόνα 60 Προφίλ ροής περιαιχενίου 11.5mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	86
Εικόνα 61 Προφίλ ροής περιαιχενίου 26mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	86
Εικόνα 62 Ροϊκές γραμμές στο μέσο πάχους για το μικρό περιαιχένιο - παρατίθεται για σύγκριση το περιαιχένιο των 23 mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	87
Εικόνα 63 Ροϊκές γραμμές στο μέσο πάχους για το μεγάλο περιαιχένιο (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$).....	87

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Κατάλογος Πινάκων	vi
Κατάλογος εικόνων και σχημάτων.....	vii
Περιεχόμενα.....	x
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
Κεφάλαιο 1 Το Αλουμίνιο και τα κράματά του	1
1.1 Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του.....	1
1.2 Τα κράματα του αλουμινίου	2
1.3 Η σειρά 6000 του αλουμινίου	5
Κεφάλαιο 2 Συγκόλληση Τριβής με Ανάδευση	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Περιγραφή της διάταξης και της διαδικασίας.....	7
2.3 Παράμετροι της συγκόλλησης	9
2.4 Χαρακτηριστικές Ζώνες Συγκόλλησης	13
2.5 Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας κατά την FSW	15
2.6 Ροή Υλικού κατά την FSW	18
2.7 Σφάλματα σε Συγκολλήσεις FSW κραμάτων αλουμινίου.....	20
2.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της FSW σε σχέση με άλλες μεθόδους.....	24
2.9 Εφαρμογές της μεθόδου	27
Κεφάλαιο 3 Νευτώνεια και μη νευτώνεια ροή	29
3.1 Ροή Couette - Η έννοια του ιξώδους	29
3.2 Νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά	30
Κεφάλαιο 4 Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση	33
4.1 Η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (Moving Heat Source-MHS)	33
4.2 Η μεθοδολογία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD).....	38
4.3 Η μεθοδολογία Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)	41

4.4 Μοντελοποίηση της ροής στη συγκόλληση FSW.....	42
Κεφάλαιο 5 Το λογισμικό ANSYS CFX.....	46
5.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις.....	46
5.2 Υπόλοιπα (Residuals).....	46
5.3 Ισορροπία του μοντέλου.....	48
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	49
Κεφάλαιο 6 Κατασκευή Γεωμετρίας.....	49
Κεφάλαιο 7 Διακριτοποίηση (Meshing) του μοντέλου.....	54
Κεφάλαιο 8 Ανάπτυξη Ροϊκού Μοντέλου.....	59
8.1 Εισαγωγή.....	59
8.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.....	59
8.3 Domains και Boundaries.....	60
8.4 Συνοριακές Συνθήκες.....	60
8.5 Παράμετροι συγκόλλησης.....	64
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	65
Κεφάλαιο 9 Αποτελέσματα Ροϊκού Μοντέλου.....	65
9.1 Πείραμα Αναφοράς.....	65
9.2 Διερεύνηση ως προς το συντελεστή ολίσθησης και τις παραμέτρους του ιξώδους.....	66
9.3 Μελέτη επίδρασης του πείρου.....	69
9.4 Συνδυασμένη επίδραση πείρου και περιαιχενίου (τελικό μοντέλο) ..	70
9.5 Μελέτη της ροής.....	73
9.6 Κατανομή του ιξώδους.....	77
Κεφάλαιο 10 Μελέτη επίδρασης παραμέτρων συγκόλλησης.....	80
10.1 Ταχύτητα πρόωσης.....	80
10.2 Περιστροφική ταχύτητα εργαλείου.....	83
10.3 Μελέτη διαφορετικής διαμέτρου περιαιχενίου.....	85
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	91
Βιβλιογραφία.....	92

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1

Το Αλουμίνιο και τα κράματά του

(1), (2), (3)

1.1 Γενικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων, των οποίων η πυκνότητα έχει χαμηλές τιμές. Με πυκνότητα 2.7 g/cm^3 , έχει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ) έναντι άλλων κραμάτων, ιδιότητες που το καθιστούν πολύ σημαντικό στη βιομηχανία. Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητα και τις προσμίξεις του αλλά και από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη μηχανική του κατεργασία. Έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο και στον αέρα οξειδώνεται γρήγορα και δημιουργείται ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα Al_2O_3 που παρέχει αντιοξειδωτική και αντιδιαβρωτική προστασία.

Όπως και το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός (Cu), ο σίδηρος (Fe), το μαγγάνιο (Mn), το μαγνήσιο (Mg), το πυρίτιο (Si) και ο ψευδάργυρος (Zn). Η επίδραση των προσθηκών αυτών φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. (1)

Πίνακας 1 Επίδραση κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες του αλουμινίου

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

Το αλουμίνιο προσφέρει, ειδικά συγκριτικά με το χάλυβα, μια σειρά πλεονεκτημάτων. Λόγω του χαμηλού ειδικού του βάρους, οι κατασκευές γίνονται ελαφρότερες για τις ίδιες απαιτήσεις. Χωρίς προστασία έχει μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση αλλά και μακρύτερο χρόνο ζωής. Λόγω της εδροκεντρωμένης κυβικής ατομικής δομής του (FCC) το αλουμίνιο είναι όλκιμο ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες και γενικά τα κράματα του αλουμινίου έχουν υψηλότερη δυσθραυστότητα σε σχέση με τους περισσότερους χάλυβες.

Τα βασικά μειονεκτήματα του αλουμινίου και των κραμάτων του, έγκεινται στις θερμικές ιδιότητές του. Ένα βασικό μειονέκτημα των κραμάτων αλουμινίου, συγκριτικά με το χάλυβα, είναι το χαμηλό σημείο τήξης και το γεγονός ότι πέραν των 93 °C υφίστανται δραστική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όταν απαιτείται διατήρηση της λειτουργικότητας της κατασκευής ύστερα από πιθανή έκθεση σε πυρκαγιά.

Αν και τα κράματα του αλουμινίου είναι συγκολλησίμα, παρουσιάζουν κάποια ελαττώματα κατά τις συγκολλήσεις. Τα βασικότερα αυτών είναι οι πόροι στη συγκόλληση, η μείωση αντοχής στη ΘΕΖ (παρατηρείται εντονότερα στα κράματα αλουμινίου που έχουν αποκτήσει τις ιδιότητές τους με θερμική κατεργασία) και η συστολή και παραμόρφωση. Τα κράματα αλουμινίου έχουν μεγαλύτερο γραμμικό συντελεστή διαστολής από το χάλυβα και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, και σε αυτές τις διαφορές οφείλεται η ανάπτυξη μεγαλύτερων συστολών και παραμορφώσεων. Κάποια από αυτά τα εμπόδια, έρχεται να υπερπηδήσει η μέθοδος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

1.2 Τα κράματα του αλουμινίου

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Οι δύο αυτές κατηγορίες υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία, με τις ιδιότητες αυτών να εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, και σε κράματα στα οποία είναι αδύνατη η θερμική κατεργασία και οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης τους.

Σύμφωνα με την Aluminum Association (A.A.) των ΗΠΑ οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων του αλουμινίου αποτελούνται από δύο μέρη που χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς και είναι διαφορετικό για κράματα χύτευσης και για κράματα διαμόρφωσης:

α) Για τα κράματα χύτευσης, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης, ο δεύτερος και ο τρίτος δίνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας και ο τέταρτος αριθμός που χωρίζεται με τελεία από τους

υπόλοιπους αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: με 0 υποδηλώνεται χυτό που πήρε την τελική του μορφή με κατ' ευθείαν χύτευση και με 1 υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα.

Πίνακας 2 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης

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	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

β) Για τα κράματα διαμόρφωσης ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης, ο δεύτερος υποδηλώνει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας ακαθαρσιών. Οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1XXX δίνουν περιεκτικότητες αλουμινίου μεγαλύτερες του 99.00% ενώ στις άλλες σειρές χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

Πίνακας 3 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1XXX	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2XXX	Χαλκός
3XXX	Μαγγάνιο
4XXX	Πυρίτιο
5XXX	Μαγνήσιο
6XXX	Μαγνήσιο και πυρίτιο
7XXX	Ψευδάργυρος
8XXX	Άλλα στοιχεία
9XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

Το δεύτερο μέρος, τόσο για τα κράματα χύτευσης όσο και για τα κράματα διαμόρφωσης αναφέρεται στην κατεργασία, θερμική ή μηχανική, που έχουν υποστεί.

Πίνακας 4 Κωδικοποίηση, κατά το σύστημα Α.Α., των κραμάτων αλουμινίου, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	<p>Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης</p> <p>H1X Μόνον ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης): H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25% H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50% H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75% H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100% H19: Υπέρσκληρο κράμα</p> <p>H2X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση.</p> <p>H3X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.</p>
T	<p>Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση</p> <p>T1 Βαφή από τη θερμοκρασία θέρμης μορφοποίησης και φυσική γήρανση.</p> <p>T2 Βαφή από τη θερμοκρασία θέρμης μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.</p> <p>T3 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.</p> <p>T4 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.</p> <p>T5 Βαφή από την θερμοκρασία θέρμης μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.</p> <p>T6 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.</p> <p>T7 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης</p> <p>T8 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.</p> <p>T9 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.</p> <p>T10 Βαφή από τη θερμοκρασία θέρμης μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.</p>
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια περαιτέρω διάκριση των κραμάτων διαμόρφωσης του Αλουμινίου γίνεται με κριτήριο αν επιδέχονται ή όχι σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία. Στα κράματα που επιδέχονται, ανήκουν οι σειρές 2000, 6000, 7000, ενώ τα μη θερμικά κατεργασμένα κράματα είναι αυτά των σειρών 1000, 3000, 4000, 5000. Τα μη θερμικά κατεργασμένα κράματα είναι μονοφασικά με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μεσομεταλλικών ενώσεων και οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

1.3 Η σειρά 6000 του αλουμινίου

Τα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν πυρίτιο και μαγνήσιο σε ποσοστά που καθιστούν δυνατή τη δημιουργία Mg_2Si , έτσι ώστε να είναι επιτρεπτή η θερμική του κατεργασία. Ένα από τα σημαντικότερα κράματα της σειράς αυτής, με ευρείες εφαρμογές είναι το 6061. Αν και τα κράματα της σειράς 6000 έχουν μικρότερη αντοχή από εκείνα των σειρών 2000 και 7000, διαθέτουν καλές ιδιότητες κατεργασιμότητας και αντοχής σε διάβρωση.

Από τα κράματα αλουμινίου που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία, το 6061 είναι αυτό που χρησιμοποιείται κύριως στη ναυπηγική. Με αυτό κατασκευάζονται οι διάφορες μορφοδοκοί που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά των ελασμάτων.

Πίνακας 5 Χημική σύσταση των κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση

Κράμα	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others Each Total	Al
6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.20	0.05-0.15	Remainder
6063	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	0.10	0.10	0.05-0.15	Remainder
6351	0.7-1.3	0.50	0.10	0.40-0.8	0.40-0.8	-	0.20	0.20	0.05-0.15	Remainder

Για τα κράματα της σειράς 6000, η θερμότητα της συγκόλλησης μετασχηματίζει το βασικό μέταλλο και η κατάσταση του προσομοιάζει την ανοπτημένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής στην περιοχή της συγκόλλησης, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς αντοχής. Για παράδειγμα το ελάχιστο όριο αντοχής σε εφελκυσμό του κράματος 6061-T6 από 289 MPa (42 ksi), που είναι το βασικό μέταλλο μειώνεται σε 165 MPa (24 ksi) στην περιοχή της συγκόλλησης.

Η σκλήρυνση της δομής των κραμάτων, οφείλεται στον σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία συνήθως, μετέχει το σύνολο της μάζας των

στοιχείων Mg και Si, με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο με 1,73. Κάποια περίσσεια Si, όπως, π.χ. στο κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση.

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στην βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση, που προκαλεί.

Τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως δε, παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150 °C. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.

1.3.1 Το κράμα 6082

Το κράμα 6082 του αλουμινίου είναι σχετικά νέο, αρκετά δημοφιλές σε Ευρώπη και Αμερική. Το κράμα αυτό προσφέρει έναν εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων όπως υψηλή αντοχή κατόπιν θερμικής κατεργασίας, ικανοποιητική συμπεριφορά σε διάβρωση και καλή συγκολλησιμότητα. Συγκρινόμενο με το ευρέως διαδεδομένο κράμα της ίδιας σειράς, 6061, το 6082 έχει υψηλότερη αντοχή (12-19% υψηλότερη για χαρακτηριστικές τιμές της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό, ανάλογα τη μορφή του τεμαχίου), καλύτερη αντοχή σε διάβρωση και είναι σχεδόν ισοδύναμο ως προς άλλες ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η εξελασιμότητα κ.α. . Το κράμα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλών αλλά και χαμηλών καταπονήσεων. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται σε υποστηρικτικές δοκούς, σε γέφυρες, σιδηροδρομικές μεταφορές και γερανούς αλλά και σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών (πχ. βαρέλια αποθήκευσης μπύρας, αναδευτήρες γάλακτος). Στη ναυπηγική συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται σε ενισχυτικά ελασμάτων και είναι ιδανικό υλικό για μέρη ταχύπλοων σκαφών.

Κεφάλαιο 2

Συγκόλληση Τριβής με Ανάδευση

2.1 Εισαγωγή

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding-FSW) ανήκει στη γενική κατηγορία των συγκολλήσεων δια τριβής. Στις συγκολλήσεις δια τριβής, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται δεν ξεπερνά το σημείο τήξης, συνεπώς πρόκειται για τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης και ως εκ τούτου, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα κοινά κράματα αλουμινίων συμπεριλαμβανομένων των σειρών 2xxx, 7xxx, 8xxx, κράματα των οποίων συγκολλούνται δύσκολα με μεθόδους τήξης.

Ήδη από το 1991 που επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε από το TWI (The Welding Institute - UK) η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση γνώρισε θεαματική ανάπτυξη, καθώς αποτέλεσε πεδίο εκτενούς έρευνας. Σήμερα, η έρευνα γύρω από τη μέθοδο επικεντρώνεται στη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου, αλλά έχει αναπτυχθεί αρκετά και για κράματα χαλκού και μαγνησίου, ενώ γίνεται έρευνα και για συγκολλήσεις κραμάτων τιτανίου, νικελίου και χάλυβα. Επίσης, πεδίο έρευνας έχει αποτελέσει και η συγκόλληση μεταξύ διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου, αλλά και αλουμινίου με κράματα άλλων μετάλλων ή και με σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας.

Η ανάπτυξη που γνώρισε η μέθοδος, φαίνεται από τις περισσότερες από 200 άδειες χρήσης της μεθόδου που εξέδωσε το TWI ως το τέλος του 2007, αλλά και από τις περισσότερες από 1900 κατοχυρωμένες εφαρμογές σχετικές με τη FSW, στην ίδια περίοδο. Είναι, λοιπόν, επόμενο ότι, βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς κλάδους της παραγωγής. Η μέθοδος δεν περιορίζει τις θερμοκρασίες υπό τις οποίες θα λειτουργούν τα τεμάχια, αφού οι εφαρμογές κυμαίνονται από κρυογονικές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού οξυγόνου) μέχρι και υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. εναλλάκτες θερμότητας).

2.2 Περιγραφή της διάταξης και της διαδικασίας

Κατά τη FSW, ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο (Tool), με ειδικά σχεδιασμένο πείρο (Pin ή Probe) και κατάλληλο περιαιχένιο (Shoulder) βυθίζεται στις επαφόμενες ακμές καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής σύνδεσης (Joint). Όταν το περιαιχένιο συναντά την επιφάνεια των ελασμάτων, παράγεται ένα σημαντικό ποσό θερμότητας λόγω της τριβής, αυξάνοντας τη θερμοκρασία, η

οποία συμβάλλει στην τοπική πλαστικοποίηση του υλικού. Ο συνδυασμός της αυξημένης θερμοκρασίας και της πίεσης οδηγεί στην ένωση αυτών.

Το περιστρεφόμενο εργαλείο πιέζεται κάθετα στα ελάσματα (τα οποία μπορεί να είναι επικαλυπτόμενα ή επαπτόμενα για lap ή butt joint αντίστοιχα). Η πλευρά της συγκόλλησης κατά την οποία η περιστροφή του εργαλείου είναι αντίθετη στην κατεύθυνση της συγκόλλησης είναι γνωστή ως υποχωρούσα πλευρά (Retreating Side- RS), ενώ η πλευρά στην οποία η περιστροφή είναι ομόρροπη με την ταχύτητα συγκόλλησης ονομάζεται προωθούμενη πλευρά (Advancing Side - AS).

Για να συγκολληθούν δυο πλάκες με την FSW, ακολουθείται μια διαδικασία τεσσάρων φάσεων, όπως φαίνονται στην Εικόνα 1 (4)

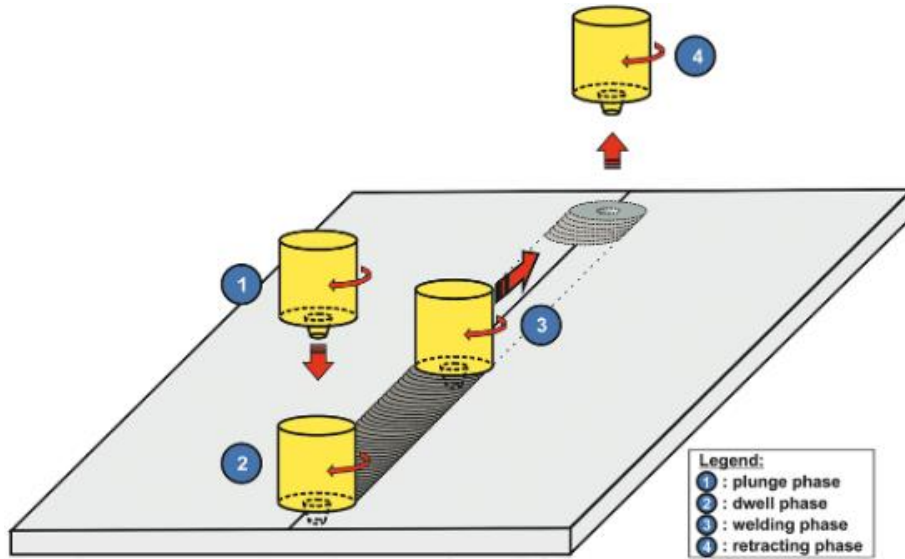
- 1) Φάση βύθισης (Plunge Phase)
- 2) Φάση σταθεροποίησης (Dwell or Stabilisation Phase)
- 3) Φάση προώθησης ή συγκόλλησης (Welding or Advancing Phase)
- 4) Απομάκρυνση του εργαλείου (Tool Removal or Retraction Phase)

Κατά τη φάση της βύθισης, ξεκινά η περιστροφή του εργαλείου το οποίο πιέζει τα τεμάχια. Το υλικό είναι σχετικά κρύο και μόνο ο πείρος είναι σε επαφή με τα τεμάχια. Η αξονική δύναμη και η ροπή που ασκούνται στο εργαλείο είναι υψηλές και τις περισσότερες φορές στις μέγιστες τιμές τους. Στο τέλος της φάσης αυτής, ο πείρος έχει διεισδύσει πλήρως στα τεμάχια και το περιαιχένιο είναι σε επαφή με την επιφάνειά των τεμαχίων. Η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου κατά τη βύθιση και τις υπόλοιπες φάσεις της συγκόλλησης είναι συνήθως η ίδια.

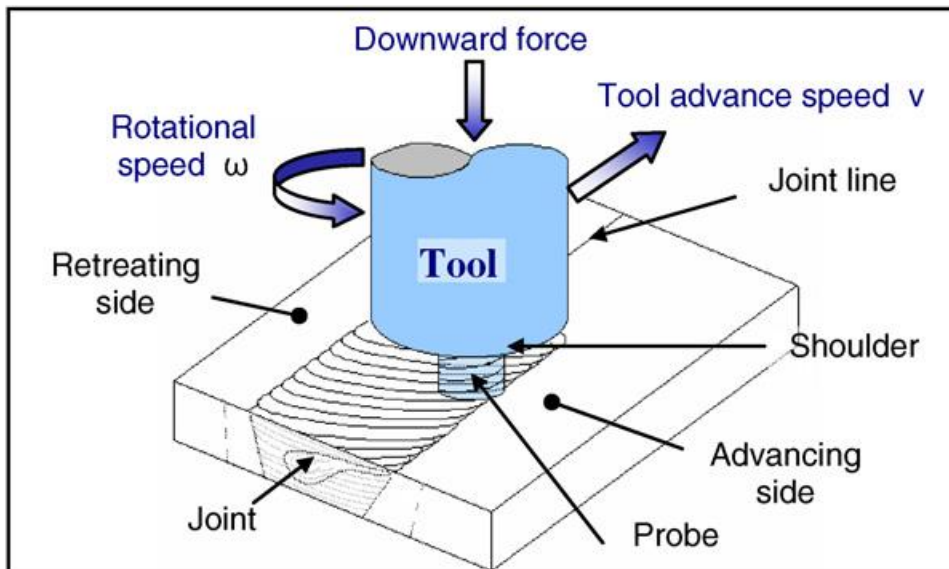
Η φάση της σταθεροποίησης ξεκινά όταν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή βύθιση. Η αξονική δύναμη διατηρείται στο εργαλείο σε αυτή τη φάση. Ο συνδυασμός της σχετικής ταχύτητας μεταξύ του εργαλείου και του υλικού, με την εφαρμοζόμενη αξονική δύναμη δημιουργεί θερμότητα λόγω τριβών στη διεπιφάνεια εργαλείου-υλικού. Το εργαλείο μένει σε αυτή τη θέση για αρκετά μεγάλο χρόνο ώστε να επιτευχθεί η θερμοκρασία που απαιτείται.

Μετά τη φάση της σταθεροποίησης, το εργαλείο αρχίζει να προωθείται και επιταχύνεται μέχρι την επιθυμητή ταχύτητα κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης. Η επιτάχυνση μπορεί να είναι αρκετά γρήγορη αν η φάση της σταθεροποίησης είχε επαρκή διάρκεια και η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή στη ζώνη συγκόλλησης. Παρ' όλα αυτά, η πολύ γρήγορη επιτάχυνση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις του εργαλείου και του λοιπού εξοπλισμού, μειώνοντας το χρόνο ζωής τους. Αναλόγως τη γεωμετρία του

εργαλείου και τις παραμέτρους της διαδικασίας, το εργαλείο μπορεί να έχει μια κλίση μερικών μοιρών για να βελτιώσει την ποιότητα της συγκόλλησης.



Εικόνα 1 Οι τέσσερις κύριες φάσεις της FSW



Εικόνα 2 Η διεργασία της FSW

2.3 Παράμετροι της συγκόλλησης

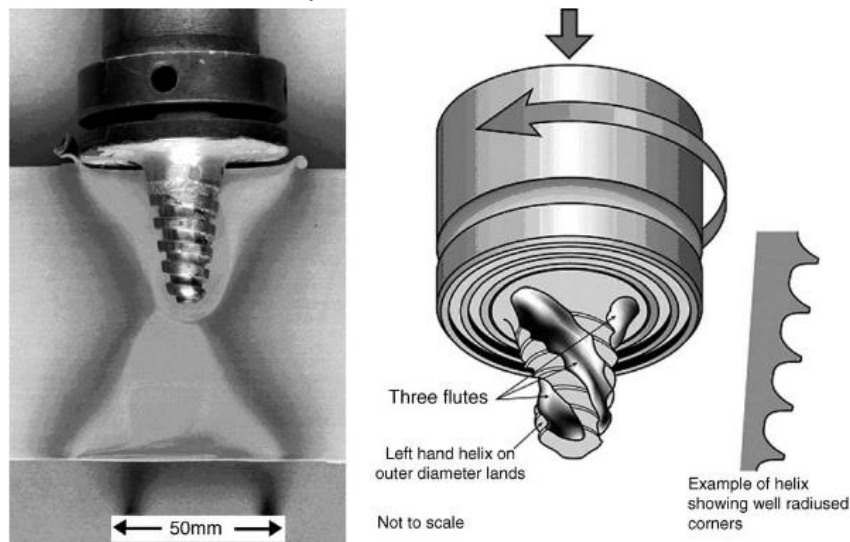
2.3.1 Γεωμετρία του εργαλείου

(5)

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της τεχνικής. Παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη ροή του υλικού και θέτει όρια στην ταχύτητα συγκόλλησης. Οι δύο βασικές λειτουργίες του εργαλείου είναι η τοπική θέρμανση και η ροή του υλικού. Στο αρχικό στάδιο της βύθισης, η θερμότητα είναι αποτέλεσμα κυρίως της τριβής μεταξύ του εργαλείου και μετάλλου. Ένα μικρό μέρος της θερμότητας οφείλεται στην παραμόρφωση. Ως προς τη θέρμανση, το σχετικό μέγεθος πείρου και περιαιχενίου είναι πολύ

σημαντικότερο σε σχέση με άλλες παραμέτρους σχεδιασμού του εργαλείου. Το περιαιχένιο επίσης περιορίζει τον θερμαινόμενο όγκο υλικού. Η δεύτερη λειτουργία του εργαλείου είναι να αναδύει και να μετακινεί το υλικό. Η ομοιομορφία της μικροδομής και οι μηχανικές ιδιότητες, καθώς και τα φορτία που μπορεί να δεχτεί κατά τη διαδικασία καθορίζονται από τη γεωμετρία του εργαλείου. Κατά κανόνα χρησιμοποιούνται κοίλα περιαιχένια και κυλινδρικοί πείροι με σπείρωμα.

Παρ' όλα αυτά, ιδιαίτερες γεωμετρίες πείρου έχουν σχεδιαστεί για βέλτιστη ροή υλικού και ανάμειξη, και μείωση των φορτίων σε μετωπικές συγκολλήσεις. Επί παραδείγματι, τα εργαλεία Whorl™ και MXTriflute™, που αναπτύχθηκαν από το TWI, με μορφολογία κόλουρου κώνου, εκτοπίζουν λιγότερο υλικό σε σχέση με κυλινδρικό με ίδια διάμετρο ρίζας. Ο Thomas (6) πρότεινε ότι, ο βασικός παράγοντας που καθιστά καλύτερες τις δύο αυτές γεωμετρίες (σε σχέση με την κυλινδρική με σπείρωμα) είναι ο λόγος του σαρωμένου όγκου κατά την περιστροφή προς τον όγκο του εργαλείου, που είναι απαραίτητος, ώστε να υπάρχει μια επαρκής ροή. Για πείρους με ίδια διάμετρο ρίζας οι λόγοι αυτοί έχουν τυπικές τιμές 1.1:1 για τον συμβατικό κυλινδρικό, 1.8 για το Whorl™ και 2.6:1 για το MXTriflute™. Ο Elangovan και η ομάδα του (7) έδειξαν ότι ο λόγος αυτός είναι 1:1 για κυλινδρικό χωρίς σπείρωμα, 1.56:1 για τετραγωνικό και 2.3:1 για τριγωνικό. Επίσης λόγω των επίπεδων επιφανειών στο τριγωνικό και τετραγωνικό προφίλ, η ανάδευση είναι παλμική, κάτι που δε συμβαίνει σε κυλινδρικούς και κωνικούς πείρους.

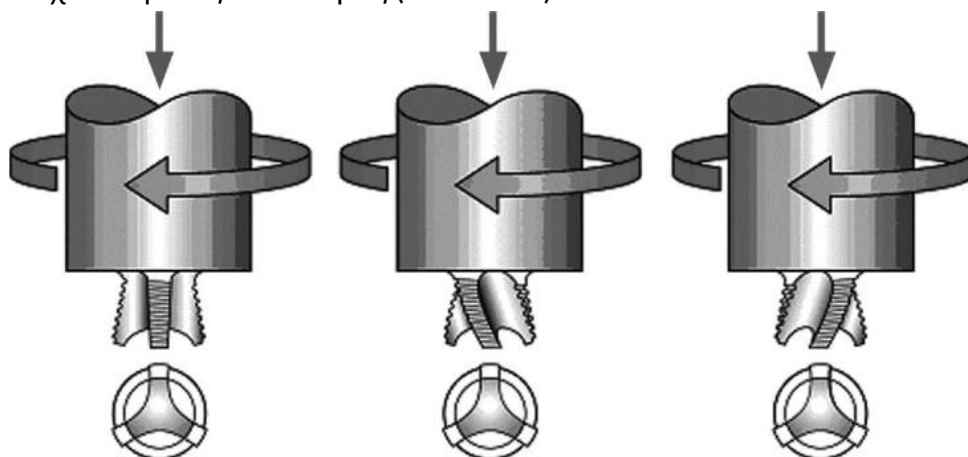


Εικόνα 3 Εργαλεία που αναπτύχθηκαν από το The Welding Institute (4)

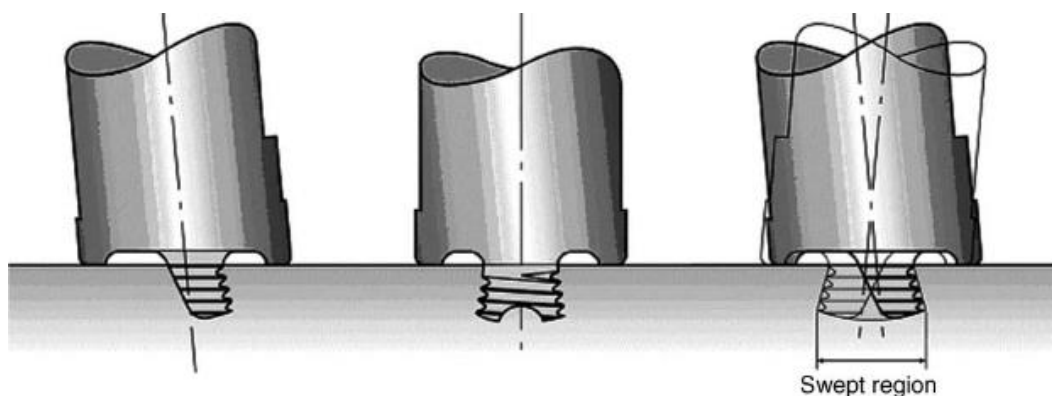
Σε συγκολλήσεις με επικάλυψη (lap joints), έχει αποδειχθεί ότι με κυλινδρικό εργαλείο με σπείρωμα, η πάνω πλάκα υφίσταται μείωση πάχους, με σημαντική υποβάθμιση της συμπεριφοράς της σύνδεσης σε κάμψη (8). Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί δύο νέες γεωμετρίες πείρου: Flared-Triflute™ και A-skew™. (Εικόνα 4 και Εικόνα 5). Οι νέες αυτές γεωμετρίες είχαν, σε σχέση με τον συμβατικό κυλινδρικό πείρο με σπείρωμα: 100% βελτίωση στην ταχύτητα

συγκόλλησης, σημαντικά φαρδύτερη περιοχή συγκόλλησης και ελαχιστοποίηση της εν λόγω μείωσης του πάχους της πάνω πλάκας. Οι Thomas και Dolby πρότειναν ότι τα εν λόγω προφίλ πείρου είναι κατάλληλα για lap και T-joints καθώς και σε όλες τις ενώσεις όπου η διεπιφάνεια των τεμαχίων είναι κάθετη στον άξονα του εργαλείου. (9)

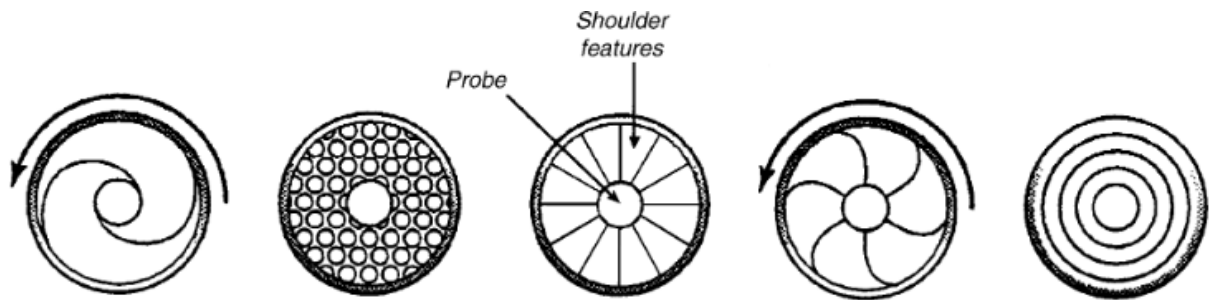
Ως προς τη γεωμετρία του περιαιχενίου, έχουν σχεδιαστεί διάφορα προφίλ από το TWI για διάφορα υλικά και συνθήκες, ώστε να βελτιώνεται η σύζευξη περιαιχενίου και τεμαχίων εγκλωβίζοντας πλαστικοποιημένο υλικό μέσα στις ειδικά σχεδιασμένες κοιλότητες. (Εικόνα 6)



Εικόνα 4 Εργαλεία που αναπτύχθηκαν από το The Welding Institute. (α) neutral flutes, (β) left flutes, και (γ) right hand flutes (8)



Εικόνα 5 Εργαλείο που αναπτύχθηκε από το The Welding Institute. (α) πλάγια όψη, (β) πρόσθια όψη, και (γ) περιοχή που σαρώνεται από τον πείρο (8)



Εικόνα 6 Γεωμετρίες περιαιχενίου - κάτω όψη (4)

2.3.2 Ταχύτητα συγκόλλησης και περιστροφική ταχύτητα εργαλείου

Σε συγκολλήσεις FSW, δύο παράμετροι είναι πολύ σημαντικές: περιστροφική ταχύτητα εργαλείου (ω , RPM), με ωρολογιακή ή αντιωρολογιακή φορά και η ταχύτητα προώθησης του εργαλείου (v , mm/min) κατά μήκος της ακμής σύνδεσης. Η περιστροφή του εργαλείου δημιουργεί την ανάδευση και ανάμιξη υλικού γύρω από τον περιστρεφόμενο πείρο και η προώθηση του εργαλείου μετακινεί το υλικό από την μπροστινή πλευρά του πείρου προς την πίσω. Υψηλότερες στροφές περιστροφής προκαλούν υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω των μεγαλύτερων ποσών θερμότητας λόγω τριβής. Αυτό έχει ως συνέπεια πιο έντονη ανάμιξη και ανάδευση υλικού.

Οι Das και Torper (10) μελετώντας την επίδραση των στροφών περιστροφής στην σύνδεση ανόμοιων κραμάτων αλουμινίου, έδειξαν ότι η δυσθραυστότητα της σύνδεσης δεν είναι ανάλογη με τον αριθμό στροφών, αλλά μεγιστοποιείται σε συγκολλήσεις περί τις 1100 RPM και μειώνεται με περαιτέρω αύξηση στροφών. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω της εκκλέπτυνσης των κόκκων σε μεγαλύτερες στροφές λόγω της υψηλότερης παραγωγής θερμότητας.

Οι Rao και Ghaffari (11) μελετώντας τις συγκολλήσεις μεταξύ κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου, έδειξαν, ότι για συνδυασμούς υψηλής περιστροφικής ταχύτητας (>2000 RPM) και ταχύτητας συγκόλλησης (>100 mm/min), οι ραφές που προκύπτουν είναι απαράδεκτες ακόμα και με γυμνό μάτι.

2.3.3 Γωνία κλίσης εργαλείου και Βάθος εισχώρησης

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος της διαδικασίας είναι η γωνία κλίσης (tilt angle) του εργαλείου σε σχέση με την επιφάνεια των δοκιμίων. Μία κατάλληλη κλίση προς την πίσω πλευρά του εργαλείου (trailing edge) συμβάλλει στην καλύτερη συγκράτηση του αναδευμένου μετάλλου από το εργαλείο και την καλύτερη ροή υλικού από την μπροστινή πλευρά (leading edge) προς την πίσω (trailing edge). Επίσης, το βάθος εισχώρησης του πείρου στα τεμάχια (target

depth) είναι σημαντικό για την δημιουργία ασφαλών συνδέσεων και σχετίζεται άμεσα με το ύψος του πείρου. Όταν το βάθος εισχώρησης δεν είναι επαρκές το περιουχένιο δεν εφάπτεται στο υλικό και δε μπορεί να μετακινήσει επαρκώς το υλικό. Όταν είναι πολύ μεγάλο, δημιουργείται γρέζι. Στη δεύτερη περίπτωση δημιουργείται κοίλη συγκόλληση (concave weld), οδηγώντας σε τοπική μείωση πάχους των πλακών. Η εισαγωγή σπειρώματος στο περιουχένιο, όπως το τελευταίο στην Εικόνα 6, επιτρέπει συγκόλληση με μηδενική κλίση, η οποία προτιμάται σε συγκολλήσεις τεμαχίων με καμπυλότητα.

2.3.4 Προθέρμανση και ψύξη

Σε υλικά με υψηλό σημείο τήξης, όπως ο χάλυβας και το τιτάνιο ή σε υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως ο χαλκός, η θερμότητα παράγεται από την τριβή και η ανάδευση μπορεί να μην είναι επαρκής για να μαλακώσει επαρκώς και εν τέλει να πλαστικοποιηθεί το υλικό γύρω από το εργαλείο. Κάτι τέτοιο εμποδίζει την δημιουργία συνεχών ενώσεων χωρίς ελαττώματα. Σε αυτές τις συνθήκες, προθέρμανση ή επιπρόσθετη θέρμανση μπορεί να βελτιώσει τη ροή υλικού. Οι Tang και Shen (12) έδειξαν ότι σε συγκολλήσεις κραμάτων χάλυβα με κράματα αλουμινίου, παρατηρείται πολύ πιο ασύμμετρη θερμική κατανομή στις δυο πλευρές της συγκόλλησης, ελλείψει προθέρμανσης. Επίσης, αυξήθηκε και η μέγιστη θερμοκρασία στην πλευρά του χάλυβα βελτιώνοντας την ροή των δύο πλαστικοποιημένων υλικών, και εν τέλει οδήγησε σε συνδέσεις με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό.

Αντιθέτως, σε υλικά όπως το αλουμίνιο και το μαγνήσιο, με χαμηλό σημείο τήξης, επιβάλλεται ψύξη ώστε να περιοριστεί η υπερβολική μεγέθυνση των ανακρυσταλλωμένων κόκκων και η κατακρήμνιση στη δυναμικά ανακρυσταλλωμένη ζώνη και γύρω από αυτή.

2.4 Χαρακτηριστικές Ζώνες Συγκόλλησης

(11)

Η πρώτη απόπειρα για τη διάκριση των ζωνών της FSW, ως προς τη μικροδομή, είχε γίνει από τον Theadgill (13). Το έργο αυτό αφορούσε αποκλειστικά σε κράματα αλουμινίου και περιοριζόταν σε χαρακτηριστικά ορατά με οπτικό μικροσκόπιο. Ωστόσο, έρευνες σε άλλα μεταλλικά υλικά έδειξαν ότι η συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου δεν είναι η χαρακτηριστική και η πρώτη διάκριση των μικροδομών ήταν ανεπαρκής, για αυτό το λόγο έγιναν οι απαραίτητες αναθεωρήσεις των προτύπων από την American Welding Society.

Οι χαρακτηριστικές ζώνες μίας συγκόλλησης FSW, δηλαδή οι χαρακτηριστικές μικροδομές είναι οι εξής:

1) Μη επηρεασμένο μέταλλο ή βασικό μέταλλο

Το μέταλλο που δεν επηρεάστηκε από τη συγκόλληση και δεν έχει παραμορφωθεί. Αν και μπορεί να έχει υποστεί κάποιο θερμικό κύκλο, δεν εντοπίζονται αλλαγές μικροδομής ή ιδιοτήτων.

2) Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ) - Heat Affected Zone (HAZ)

Είναι η περιοχή αρκετά κοντά στη συγκόλληση, ώστε ο θερμικός κύκλος αυτής να έχει επηρεάσει τη μικροδομή ή/και τις ιδιότητές της, αλλά χωρίς να υπάρχει εμφανής, σε οπτικό μικροσκόπιο, πλαστική παραμόρφωση. Βέβαια, είναι αποδεκτό ότι υπάρχει μια μικρή πλαστική παραμόρφωση όπως ισχύει στη ΘΕΖ κάθε συγκόλλησης.

3) Θερμομηχανικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΜΕΖ)- Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)

Σε αυτή την περιοχή το υλικό έχει παραμορφωθεί από το εργαλείο και η θερμότητα λόγω τριβής έχει επηρεάσει το υλικό. Στην περίπτωση του αλουμινίου είναι πιθανό να έχει αναπτυχθεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση χωρίς ανακρυστάλλωση της περιοχής. Γενικά υπάρχει ένα σαφές σύνορο, τουλάχιστον σε μακροσκοπικό επίπεδο, μεταξύ των ανακρυσταλλωμένων και πλαστικά παραμορφωμένων ζωνών της ΘΜΕΖ. Στα εξωτερικά στρώματα της ΘΜΕΖ οι κόκκοι δε μεταβάλλονται αρκετά και παραμένουν αναγνωρίσιμοι.

4) Δυναμικά Ανακρυσταλλωμένη Ζώνη ή Πυρηνας (nugget)

Γενικά υπάρχει ένα σαφές σύνορο, τουλάχιστον σε μακροσκοπικό επίπεδο, μεταξύ των ανακρυσταλλωμένων και πλαστικά παραμορφωμένων ζωνών της ΘΜΕΖ.

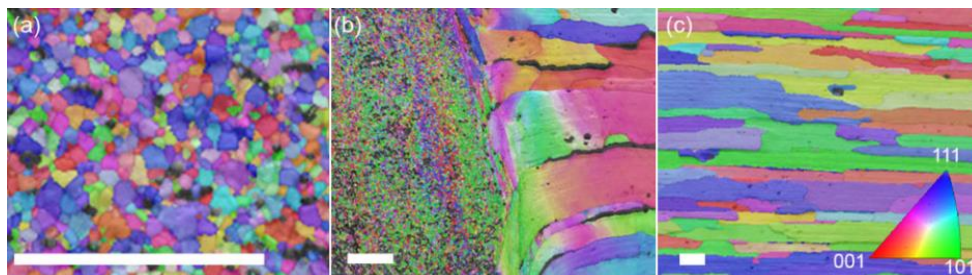
Οι περιοχές αυτές παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7 Ανάλυση ζωνών μικροδομής σε συγκόλληση FSW του κράματος αλουμινίου 2024. Α) Βασικό μέταλλο ανεπηρεαστο από την διεργασία.

Β) Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) με την εμφανή πλαστική παραμόρφωση.

Γ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (TMAZ) με επηρεασμένη από θερμότητα και πλαστική παραμόρφωση (5)



Εικόνα 8 Μικροδομή του συγκολλημένου με FSW κράματος αλουμινίου 2199 – φαίνεται η εκλέπτυνση της μικροδομής στον πυρήνα συγκόλλησης. (5)

2.5 Παραγωγή και μεταφορά θερμότητας κατά την FSW

(14)

Η παραγωγή θερμότητας κατά την FSW προκύπτει από δύο βασικές πηγές:

- Τριβή μεταξύ εργαλείου και επιφανειών των υπό συγκόλληση μετάλλων
- Θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης

2.5.1 Θερμότητα λόγω τριβής

Η τριβή μεταξύ των σωμάτων διέπεται από τρεις εμπειρικούς νόμους των Amontou και Coulomb:

- Η δύναμη τριβής σχετίζεται με το φορτίο μέσω της σχέσης $F = \mu P$, όπου μ ο συντελεστής (στατικής/δυναμικής) τριβής που είναι ανεξάρτητος του φορτίου P .
- Οι συντελεστές τριβής είναι ανεξάρτητοι της μακροσκοπικής επιφάνειας επαφής μεταξύ των σωμάτων
- Ο συντελεστής δυναμικής τριβής είναι ανεξάρτητος της σχετικής ταχύτητας μεταξύ των σωμάτων

Η τριβή μεταξύ μετάλλων και κεραμικών δημιουργείται λόγω τραχύτητας των επαφόμενων επιφανειών και λόγω της μικροσκοπικής πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη σχετική κίνηση των επιφανειών. Η ενέργεια λόγω τριβής διαχέεται κατά τις μικροσκοπικές παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα στις επιφάνειες και μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε θερμότητα. Η δύναμη τριβής επηρεάζεται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των επιφανειών, καθώς και το φορτίο, τις σχετικές ταχύτητες και τη θερμοκρασία. Οι μικροσκοπικές παραμορφώσεις συμβαίνουν κυρίως στην επιφάνεια επαφής του υλικού. Η παραγόμενη θερμότητα μεταδίδεται άνισα μεταξύ εργαλείου και

υλικού, φαινόμενο που εντείνεται ανάλογα με τις θερμικές ιδιότητες (αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα), τις σχετικές ταχύτητες και το εμβαδό επιφάνειας επαφής εργαλείου-μετάλλων.

Για την τριβή μεταξύ των σωμάτων υπάρχουν δύο μοντέλα:

- a) Τριβή Coulomb $\tau = \mu p$, όπου τ η διατμητική τάση, p η πίεση και μ ο συντελεστής τριβής
- b) Μοντέλο σταθερής διάτμησης $\tau = m \sigma_y$ όπου σ_y η τάση διαρροής σε διάτμηση και m ο συντελεστής αναλογίας που σχετίζεται με την προσκόλληση (εκτενέστερη ανάλυση γίνεται στην ενότητα 4.1)

Στο μοντέλο σταθερής διάτμησης, η επιφάνεια επαφής του μετάλλου με το εργαλείο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως υλικό με σταθερή αντοχή σε διάτμηση.

2.5.2 Θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης

Η τοπική πλαστική παραμόρφωση μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην πρόσδοση θερμότητας στη συγκόλληση. Το ποσοστό της ενέργειας πλαστικής παραμόρφωσης που διαχέεται σε θερμότητα είναι μεταξύ 80 και 100%. Για αυτό, αναφορικά με την FSW η πρόσδοση ισχύος της συγκόλλησης που μετατρέπεται σε ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να χωριστεί σε 2 μέρη: ένα μέρος που αποθηκεύεται στη μικροδομή και ένα μέρος που μετατρέπεται σε θερμότητα. Από αριθμητικές εφαρμογές, εκτιμάται ότι η θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης είναι μεταξύ 2 και 20% της συνολικής θερμότητας.

2.5.3 Διάδοση θερμότητας κατά την FSW

Εξίσου σημαντικό ρόλο με την παραγωγή θερμότητας, παίζει και η διάδοση θερμότητας, σε ό,τι έχει να κάνει με τις φυσικές ιδιότητες του τεμαχίου. Από την παραγόμενη θερμότητα, μεταφέρεται με αγωγή ένα μέρος στο εργαλείο, ένα μέρος στο μέταλλο βάσης και ένα μέρος στη βάση στήριξης, ενώ με ακτινοβολία και συναγωγή μεταφέρεται ένα μέρος στην ατμόσφαιρα. Η βασική διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας στην πλάκα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho (C_p T) = - \nabla \cdot \rho \vec{u} (C_p T) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (1)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του υλικού, C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα, T η θερμοκρασία, \vec{u} το διάνυσμα της ταχύτητας, k η θερμική αγωγιμότητα και \dot{q} ρυθμός παραγωγής θερμότητας.

2.5.4 Συνολική παραγόμενη θερμότητα

Η συνολική παραγόμενη θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί με τους δύο εξής τρόπους

1) Με υπολογισμό της συνολικής θερμότητας:

Παραγόμενη θερμότητα = δύναμη × σχετική ταχύτητα

$$Q = [(1 - \delta)\eta\tau + \delta \mu_f P](rd\theta dr)(\omega r - U \sin\theta) \quad (2)$$

Όπου

δ , συντελεστής ολίσθησης (fractional slip)

η , μηχανικός βαθμός απόδοσης (mechanical efficiency)

τ , διατμητική τάση (shear yield strength)

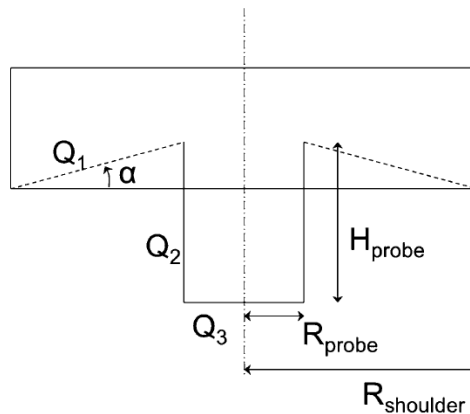
r, θ , κυλινδρικές συντεταγμένες

μ_f , συντελεστής τριβής (coefficient of friction)

P , κατακόρυφη πίεση (axial pressure)

ω , περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)

U , ταχύτητα συγκόλλησης (welding speed)

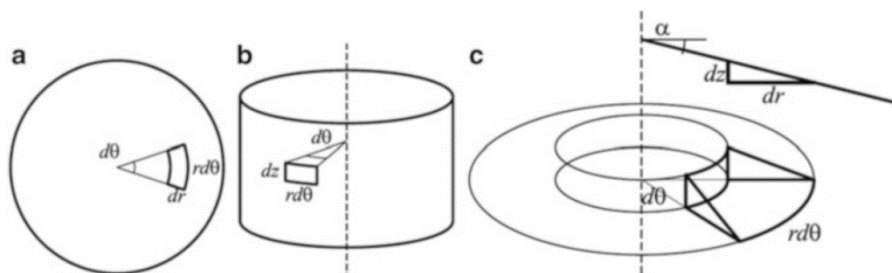


Εικόνα 9 Επιμέρους θερμότητες σε κάθε επιφάνεια επαφής εργαλείου και υλικού

2) Με υπολογισμό της θερμότητας σε κάθε επιφάνεια ξεχωριστά και άθροιση των επιμέρους

Ονομάζουμε Q_1 τη θερμότητα που παράγεται από την επιφάνεια του περιαιχηνίου, Q_2 τη θερμότητα που παράγεται από την κατακόρυφη επιφάνεια του πείρου και Q_3 τη θερμότητα που παράγεται από την βάση του πείρου. Η γενική έκφραση για την παραγόμενη θερμότητα κάθε ζώνης του εργαλείου θα είναι:

$$dQ = \omega r dF \quad (3)$$



Εικόνα 10 Οι τρεις επιφάνειες παραγωγής θερμότητας του εργαλείου
Με ολοκληρώσεις σε κάθε επιφάνεια που φαίνεται στην Εικόνα 10 προκύπτουν οι επιμέρους θερμότητες.

$$Q_1 = 2\pi(1 + \tan\alpha)\tau_{shear}(R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \quad (4i)$$

$$Q_2 = 2\pi\tau_{shear}R_{pin}^2\omega \quad (4ii)$$

$$Q_3 = \frac{2}{3}\pi\tau_{shear}\omega R_{pin}^3 \quad (4iii)$$

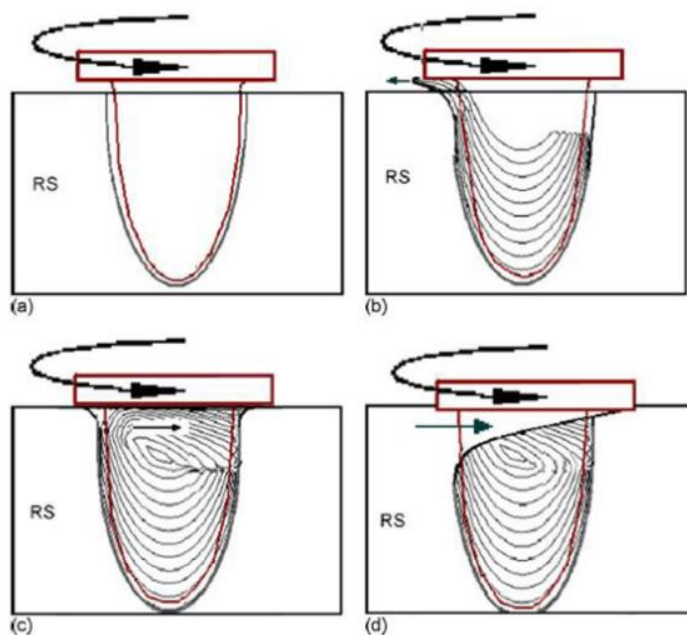
$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad 4(iv)$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, οι μηχανισμοί παραγωγής και διάδοσης θερμότητας κατά την FSW είναι αρκετά πολύπλοκοι και δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως. Για αυτό το λόγο έχουν προταθεί κάποια μοντέλα για το θερμοκρασιακό πεδίο κατά την FSW, το καθένα με διαφορετικές παραδοχές ως προς όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Κάποια από τα μοντέλα αυτά εξηγούνται στην ενότητα 4.1.

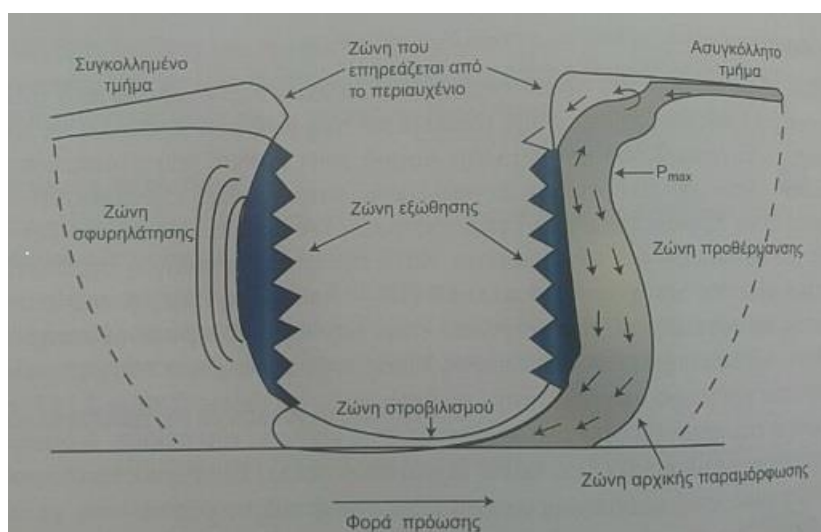
2.6 Ροή Υλικού κατά την FSW

(14)

Η συνολική μεταφορά του πλαστικοποιημένου υλικού περιγράφεται από τρεις τύπους ροής. Ο πρώτος τύπος ροής αναφέρεται στη ροή που προκαλείται από το περιαιχένιο. Αφορά στην κίνηση του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης, στην περιοχή κοντά στο εργαλείο. Η κίνηση αυτή προκαλείται από την περιστροφή του εργαλείου και από την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του δοκιμίου. Κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης υλικό από την υποχωρούσα πλευρά (RS - Retreating Side) μεταφέρεται δια μέσου της επιφάνειας του περιαιχενίου στην κορυφή της προωθούμενης πλευράς (AS - Advancing Side). Ο δεύτερος τύπος ροής αναφέρεται στη ροή που προκαλείται από τον πείρο συγκόλλησης, σε διαδοχικές στρώσεις. Αφορά το αποτέλεσμα της περιστροφικής κίνησης του πείρου, ο οποίος τείνει να σπρώξει το υλικό προς τα κάτω, κοντά στον πείρο. Το γεγονός αυτό προκαλεί την κίνηση μιας ίσης ποσότητας υλικού προς την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την τελική απομάκρυνσή της. Ο τρίτος τύπος ροής αφορά στη σχετική κίνηση μεταξύ του εργαλείου συγκόλλησης και του δοκιμίου.



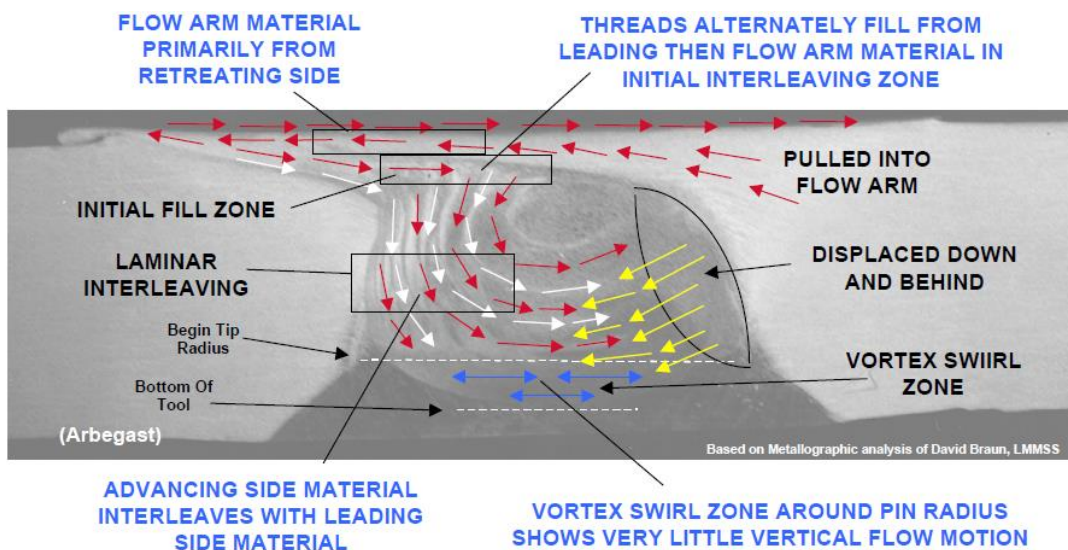
Εικόνα 11 (a), (b): Ροή προκαλούμενη από τον πείρο συγκόλλησης, (c), (d): Ροή μετά την επαφή του περιαιχενίου με το συγκολλούμενο υλικό



Εικόνα 12 Οι ζώνες που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση: η ζώνη προθέρμανσης, η ζώνη αρχικής παραμόρφωσης, η ζώνη εξώθησης - διέλασης, η ζώνη σφυρηλάτησης και η ζώνη απόψυξης

Η περιστροφική κίνηση του εργαλείου δημιουργεί τη ζώνη αρχικής παραμόρφωσης. Η θερμική παροχή από την περιστροφική αυτή κίνηση προθερμαίνει τα προς συγκόλληση τεμάχια. Σε αυτήν την ζώνη, το υλικό ωθείται προς το περιαιχενίο (ανοδική πορεία) και στη συνέχεια προς τα κάτω στη ζώνη εξώθησης - διέλασης. Στη ζώνη εξώθησης το υλικό (που έρχεται πρώτο σε επαφή με τον πείρο) κινείται γύρω από τον πείρο και καλύπτει το κενό που δημιουργείται καθώς το εργαλείο προχωράει. Το πίσω μέρος του περιαιχενίου περνάει πάνω από το μέταλλο που εξέρχεται της ζώνης

εξώθησης και το σφυρηλατεί εξασφαλίζοντας τη συγκόλληση. Στη συνέχεια το μέταλλο αποψύχεται.



Εικόνα 13 Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης (ροής) υλικού κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση

Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται σχηματικά η κίνηση (ροή) του υλικού κατά τη συγκόλληση. Ένα τμήμα του ρέοντος υλικού μεταφέρεται από την RS στην AS. Ένας συγκεκριμένος όγκος υλικού από το άνω τμήμα της AS και κάτω από την αριστερή περιοχή του flow arm εναποτίθεται στο δεξί μέρος της ζώνης εξώθησης (στην AS) και στο μέσο του πυρήνα συγκόλλησης. Ένας άλλος όγκος υλικού από τη ζώνη εξώθησης της RS φαίνεται να μετατοπίζεται κάτω και προς τα πίσω. Το κάτω μέρος του πυρήνα συγκόλλησης απαρτίζεται από τη ζώνη στροβιλισμού.

2.7 Σφάλματα σε Συγκολλήσεις FSW κραμάτων αλουμινίου

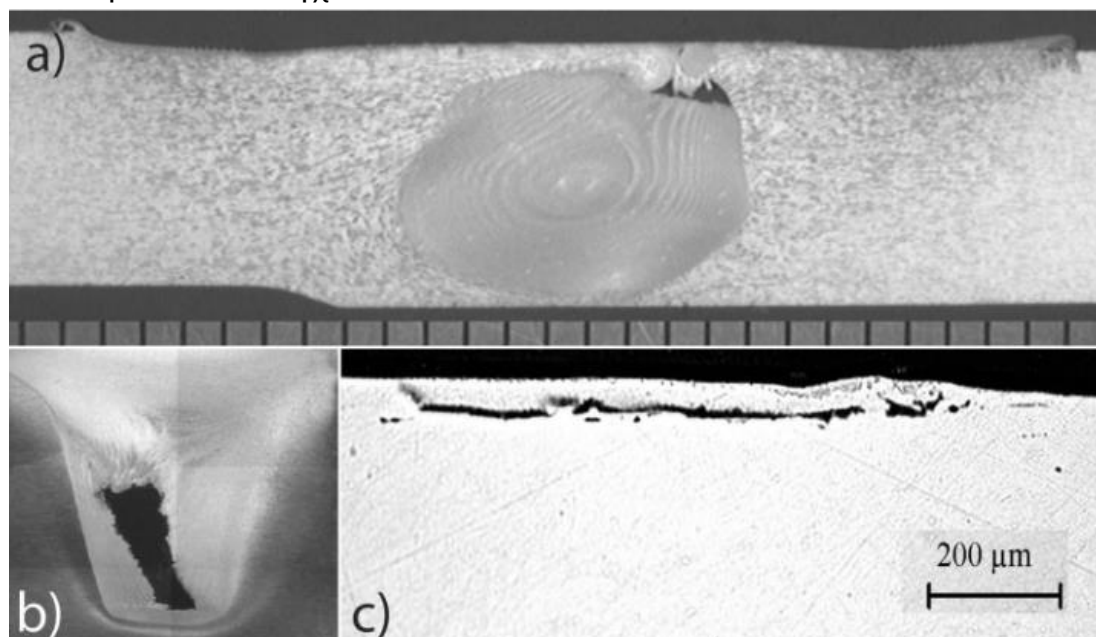
(5), (13)

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης υπερπηδά εμπόδια συγκολλήσεων σύντηξης όπως το πορώδες και η θερμή ρωγμάτωση. Σε αυτό το πλαίσιο, κρίνεται σκόπιμη μια διάκριση μεταξύ ελαττωμάτων και σφαλμάτων. Η βασική διαφορά έγκειται στο ότι το ελάττωμα (ή ατέλεια) -flaw- είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο αν και πρέπει να αποφεύγεται σε συγκολλήσεις, δεν υποβαθμίζει εν γένει την συνοχή της συγκόλλησης. Εάν, κατόπιν αξιολόγησης, το ελάττωμα κριθεί μη αποδεκτό (με κριτήριο την εφαρμογή και τις συνθήκες λειτουργίας), τότε θεωρείται σφάλμα -defect.

Σε συγκολλήσεις FSW οι πιο κοινοί τύποι ελαττωμάτων είναι συνέπεια της χρήσης μη βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας ή της έλλειψης επαρκούς ελέγχου. Εφ' όσον, η κατανόηση των αιτιών των σφαλμάτων/ αστοχιών, είναι καλή, είναι συνήθως δυνατό να αποφευχθούν με κατάλληλη αλλαγή στις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω ή τις υπηρεσιακές συνθήκες.

2.7.1 Κενά

Στην Εικόνα 14a παρουσιάζεται ένα τυπικό κενό στην AS. Παρόμοια χαρακτηριστικά παρατηρούνται συνήθως κοντά στην βάση του πείρου .Ο σχηματισμός ενός κενού «τύπου τούνελ» (Εικόνα 14b) ήταν συνήθης σε παλιότερες εφαρμογές της μεθόδου, αλλά απαλείφθηκε με κατάλληλη κλίση του εργαλείου. Στην Εικόνα 14c φαίνεται μια ασυνέχεια υλικού κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης που δημιουργήθηκε από την πίσω πλευρά του περιαιχηνίου. Τέτοιου είδους κενά, μιας και δεν είναι επιφανειακά δε μπορούν να εντοπιστούν με επιφανειακή επιθεώρηση αλλά απαιτείται η διενέργεια μη καταστρεπτικών ελέγχων.



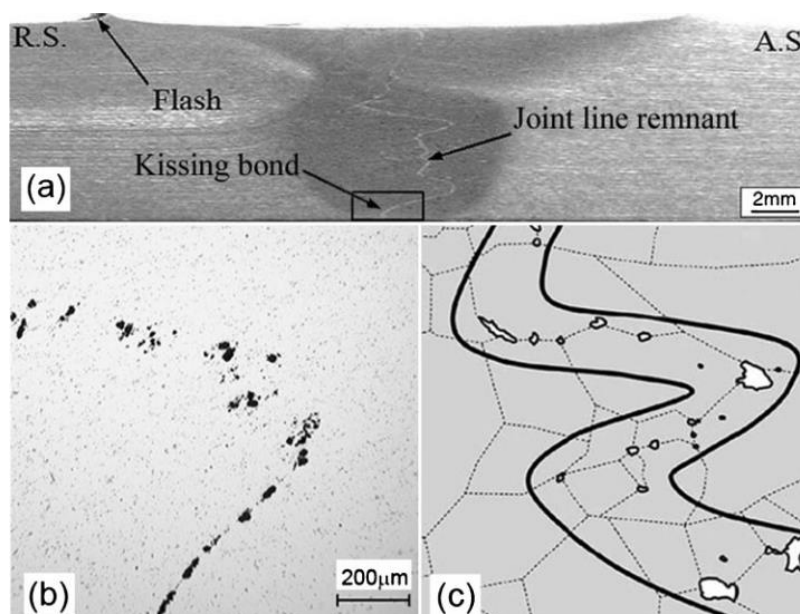
Εικόνα 14 Χαρακτηριστικά ελαττώματα τύπου «κενού» σε FSW (5)

Οι βασικοί παράγοντες που έχουν διαπιστωθεί ότι επιδεινώνουν τη δημιουργία κενών είναι η ανεπαρκής πίεση συγκόλλησης, η υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, η χαμηλή περιστροφική ταχύτητα και η κακή συγκράτηση των τεμαχίων μεταξύ τους. Στην περίπτωση χαμηλής πίεσης του εργαλείου δεν είναι επαρκής η πίεση σφυρηλάτησης (forging pressure). Με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και με χαμηλή περιστροφική ταχύτητα, το υλικό λαμβάνει λιγότερο έργο ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης (δηλαδή λιγότερες περιστροφές του εργαλείου ανά mm). Υπό αυτές τις συνθήκες το

πλαστικοποιημένο υλικό μπορεί να μη φτάσει σε ικανοποιητικά υψηλή θερμοκρασία. Υπάρχει όριο στο ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί το αλουμίνιο και τα κράματά του, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το οποίο αν ξεπεραστεί δημιουργούνται κενά.

2.7.2 Lazy S

Τα ελαττώματα τύπου «Lazy S» είναι μορφές, σχήματος χορδής, που εκτείνονται από τη ρίζα της συγκόλλησης κατά μήκος των επιφανειών προς συγκόλληση. Οι χορδές αυτές είναι το Al_2O_3 των προς συγκόλληση επιφανειών των πλακών αλουμινίου, όπως έδειξε ο Sato (15), με χρήση TEM. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15a (16) η αρχική ακμή σύνδεσης είναι διακριτή ενώ με μεγέθυνση της ίδιας εικόνας (Εικόνα 15b) φαίνονται οι μικρές συσσωρεύσεις οξειδίων. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από την ταχύτητα συγκόλλησης. Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης μειώνει την διάσπαση του οξειδίου, ανά μονάδα μήκους που διανύει το εργαλείο. Το μέγεθος του εργαλείου και ειδικά του περιαιχηνίου μπορεί επίσης να συμβάλει στο φαινόμενο. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτές οι λωρίδες οξειδίων είναι αβλαβείς, δεδομένης μιας καλής ανάμιξης. Είναι σημαντικό η διεπιφάνεια οξειδίων μεταξύ των εφαπτόμενων πλακών να διασπάται επαρκώς ώστε να δημιουργηθεί ο δεσμός. Το στρώμα οξειδίων σπάει και διασπείρεται οπότε η αρχική γραμμή σύνδεσης γίνεται η θέση ενός πολύ ισχυρού δεσμού.



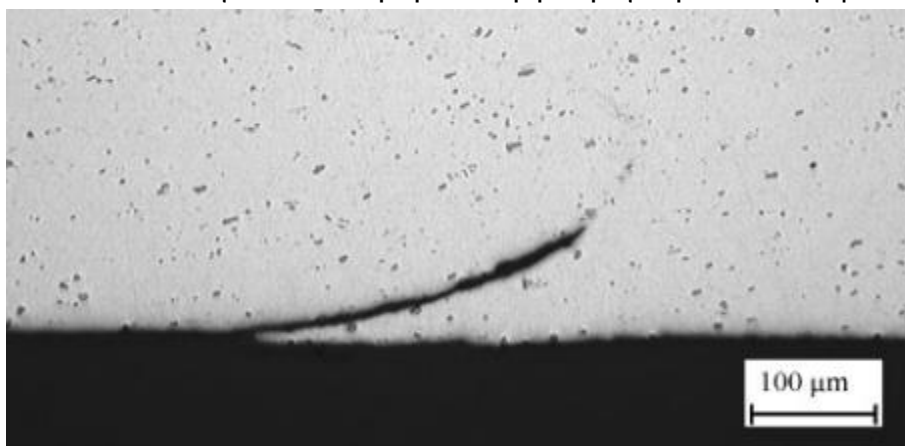
Εικόνα 15 α) Ελαττώματα οξειδίων στο κράμα 5083 τα οποία μπορούν σε σοβαρές περιπτώσεις να οδηγήσουν σε σφάλμα τύπου «kissing bond» στην βάση.

β) Μεγέθυνση σε συγκόλληση κράματος 2014 όπου φαίνονται εγκλείσματα οξειδίων κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης

γ) Μοτίβο των υπολειμμάτων γραμμής σύνδεσης (5)

2.7.3 Δεσμός «τύπου φιλιού»

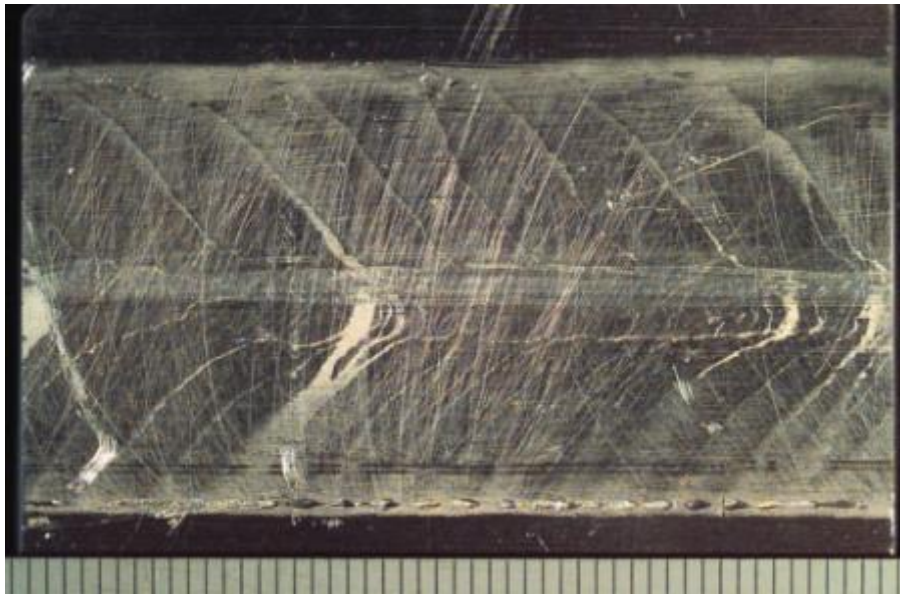
Όταν χρησιμοποιείται κοντός πείρος, όπου το βάθος εισχώρησης δεν έχει οριστεί σωστά ή όταν δεν έχει γίνει σωστή ευθυγράμμιση του εργαλείου με τη γραμμή συγκόλλησης, δημιουργείται ελάττωμα στη ρίζα, ελάττωμα που υποδεικνύει παντελή έλλειψη σύνδεσης (Εικόνα 16). Σε τέτοιες περιπτώσεις η ποιότητα σύνδεσης βελτιώνεται πλησιάζοντας προς τον πυρήνα. Έτσι, δημιουργείται μια ζώνη μετάβασης όπου υπάρχει μεν δεσμός, αλλά είναι πάρα πολύ αδύναμος και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “kissing bond” ή «δεσμός τύπου φιλιού». Οι kissing bonds δεν μπορούν να εντοπιστούν με έλεγχο της μικροδομής. Ο Zhou (15) έδειξε ότι οι δεσμοί έχουν πολύ μειωμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Ειδικά στο 5083, οι kissing bonds έχουν 20-40 φορές μικρότερη ζωή σε κοπωτικές φορτίσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό είναι σπάνιο και με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων δεν εμφανίζεται.



Εικόνα 16 Χαρακτηριστικό ελάττωμα ρίζας σε συγκόλληση FSW λόγω πολύ μικρού πείρου σε κράμα αλουμινίου 5083 (11)

2.7.4 Αυλακώσεις της επιφάνειας επαφής με το τραπέζι της μηχανής συγκόλλησης

Μια ασυνήθιστη επιφάνεια με αυλακώσεις έχει παρατηρηθεί στην κάτω (όπως και στην πάνω) επιφάνεια συγκολλήσεων της σειράς 5XXX (Εικόνα 17). Ο Pryzdatek (16) επισήμανε ότι αυτές οι μορφές συμπιπτον με μικρές ατέλειες στη ρίζα στο κράμα 5083 και συμπέρανε ότι ήταν αποτέλεσμα της εκτόξευσης υλικού από την ραφή, αφήνοντας ανοιχτό το ενδεχόμενο ότι έχει συμβεί κάποια μικρής έκτασης τήξη. Εντούτοις, τέτοιου είδους μορφές δεν έχει αναφερθεί ότι επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου ή τη συμπεριφορά του σε διάβρωση.



Εικόνα 17 Chevron markings στην κάτω πλευρά της συγκόλλησης FSW σε κράμα αλουμινίου 5083 (5)

2.7.5 Ελαττώματα σε συγκολλήσεις με επικάλυψη

Σε συγκολλήσεις με επικάλυψη παρατηρούνται από τα παραπάνω τα κενά και τα υπολείμματα γραμμής σύνδεσης, με τα τελευταία να εμφανίζονται κάθετα σε σχέση με το εργαλείο. Λόγω της φύσης της διαδικασίας δεν υπάρχουν ελαττώματα στη ρίζα, όπως ο kissing bond.

Όμως, στις επιφάνειες επαφής εμφανίζονται κάποιες ανωμαλίες, είτε στην επιφάνεια περιαιχενίου είτε στην επιφάνεια επαφής με το τραπέζι της μηχανής συγκόλλησης. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση του ενεργού πάχους της πλάκας. Συχνά το σφάλμα αυτό καλείται “hooking” και περιλαμβάνει μια σημαντική συστροφή της μη συγκολλημένης επιφάνειας (ακόμα και κατά 90°). Εντοπίζεται στην προωθούμενη πλευρά και συχνά στην πάνω πλάκα υπάρχει εκκλίνση της στην υποχωρούσα πλευρά. Κάτι τέτοιο επηρεάζει σημαντικά την ικανότητα της συγκόλλησης να φέρει φορτία. Η γεωμετρία του εργαλείου είναι σημαντικός παράγοντας για το σφάλμα αυτό.

2.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της FSW σε σχέση με άλλες μεθόδους

2.8.1 Πλεονεκτήματα

Η FSW, ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης, μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα κράματα αλουμινίου, αποφεύγοντας προβλήματα που συχνά παρουσιάζονται σε συγκολλήσεις τήξης (πχ θερμή ρωγμάτωση, πόροι,

απώλεια υλικού κ.α.). Η FSW δε στηρίζεται στην ειδίκευση του συγκολλητή και η ανθρώπινη παρέμβαση είναι σπάνια απαραίτητη. Είναι επίσης ευέλικτη μέθοδος, αφού μπορεί να εφαρμοστεί σε μια, δύο ή τρεις διαστάσεις και διαφορετικές θέσεις (μετωπική συγκόλληση, συγκόλληση με επικάλυψη κτλ) και μπορεί να δώσει τεμάχια για εφαρμογές σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (από κρυογονικές εφαρμογές μέχρι εναλλάκτες θερμότητας). Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από απουσία υπερϊώδους ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εμφανίζονται σε συγκολλήσεις τόξου). Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελούν τα χαμηλά επίπεδα θορύβου και η σχεδόν μηδενική εκπομπή καπνού, σπιθών και αναθυμιάσεων. Όλα αυτά την καθιστούν πολύ ασφαλή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Η μέθοδος δεν απαιτεί ιδιαίτερα αυστηρή προετοιμασία των προς συγκόλληση ακμών : κενά έως και 20% του πάχους των τεμαχίων είναι ανεκτά αν και κάτι τέτοιο οδηγεί αναπόφευκτα σε μείωση του πάχους συγκόλλησης αφού δεν προστίθεται μέταλλο. Η απουσία τήξης αφαιρεί μεγάλο ποσοστό της θερμικής συστολής που σχετίζεται με την στερεοποίηση και την απόψυξη οδηγώντας σε εμφανώς μειωμένες, αλλά όχι μηδενικές, παραμορφώσεις.

Επίσης, δεν απαιτεί προστατευτικό αέριο ή ηλεκτρόδιο αφού δεν είναι συγκόλληση με τόξο. Τα τεμάχια που προκύπτουν παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες συγκρινόμενα με αυτά άλλων μεθόδων. Ως προς την ταχύτητα, είναι συγκρίσιμη με τις συγκολλήσεις τήξεως.

2.8.2 Μειονεκτήματα και περιορισμοί της μεθόδου

Κάποια από τα παραπάνω θετικά χαρακτηριστικά μπορούν υπό συγκεκριμένες συνθήκες να καταστούν προβληματικά. Επί παραδείγματι, η απουσία προστιθέμενου μετάλλου (π.χ. μέσω κάποιου ηλεκτροδίου) σημαίνει ότι η διαδικασία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυχενικές συγκολλήσεις. Επίσης η οπή στο τέλος της συγκόλλησης όπου ο πείρος αποσύρεται είναι μειονέκτημα, αν και σπάνια έχει παρουσιαστεί ως σημαντικό πρόβλημα, αφού υπάρχουν πολλές πιθανές λύσεις. Το τεμάχιο πρέπει να είναι στιβαρά στηριγμένο στην εργαλειομηχανή ώστε να μπορεί να ανθίσταται στις επιβαλλόμενες δυνάμεις, αλλά και για να μην διαχωρίσει ο πείρος τα δύο τεμάχια. Ακόμη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η μέθοδος ενδέχεται να μειώσει την αντοχή των κραμάτων αλουμινίου, γεγονός που μπορεί να αντισταθμιστεί από κατάλληλη σχεδίαση στην περιοχή της σύνδεσης, λ.χ. με τοπική αύξηση του πάχους, αν και αυτό εφαρμόζεται σπάνια. Η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η συγκόλληση είναι συνήθως μικρότερη από αυτή των συγκολλήσεων τήξης. Ωστόσο σε περιπτώσεις που χρειάζονται λιγότερα περάσματα αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα. Μειονέκτημα θεωρείται και το μεγάλο κόστος επένδυσης για τον εξοπλισμό που είναι

απαραίτητος για τη μέθοδο. Τέλος, κατά τη συγκόλληση αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις που καθιστούν απαραίτητη την χρήση πλάκας υποστήριξης κάτω από τα προς συγκόλληση ελάσματα. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι και ο υψηλός ρυθμός φθοράς του εργαλείου συγκόλλησης. (17)

2.8.3 Σύγκριση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι μηχανικές ιδιότητες ραφών με FSW είναι γενικά καλύτερες από τις αντίστοιχες συγκολλήσεων τόξου. Βέβαια, οι μηχανικές ιδιότητες είναι μία μόνο από τις παραμέτρους επιλογής μεθόδου συγκόλλησης. Τα τεχνικοοικονομικά στοιχεία της διαδικασίας είναι επίσης σημαντικά, τομέας στον οποίο η FSW υστερεί. Οι βασικοί ανταγωνιστές της μεθόδου σε ό, τι έχει να κάνει με τις συγκολλήσεις αλουμινίου είναι η συγκόλληση με δέσμη Laser (Laser Beam Welding) και οι συγκολλήσεις τόξου (GMAW/GTAW).

Έρευνα στο κράμα 6005 (18) έδειξε ότι οι ιδιότητες σε εφελκυσμό στην GMAW και τη συγκόλληση με Laser ήταν ελαφρώς καλύτερες απ' ό,τι στην FSW, όμως η FSW υπερείχε σε συμπεριφορά σε κόπωση. Ανάλογα αποτελέσματα έδειξε και έρευνα στο 6082-T6 (για ναυπηγική εφαρμογή). Η FSW ήταν καλύτερη ως προς την ποιότητα συγκόλλησης αλλά με πολύ υψηλό κόστος εξοπλισμού.

Το γεγονός ότι η FSW πραγματοποιείται σε εργαλειομηχανή της δίνει το πλεονέκτημα του πλήρους αυτοματισμού. Αυτό όμως σε βάρος της ευελιξίας, ιδιότητας στην οποία, η GMAW και η GTAW υπερτερούν. Σε σχέση με τις συγκολλήσεις τήξης (με εξαίρεση τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων), έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος παχών ελασμάτων που μπορεί να συγκολληθούν. Με ένα πάσο, είναι δυνατό να συγκολληθούν ελάσματα με πάχη από 0.5 μέχρι 100 mm. Το κόστος της μεθόδου είναι ένα βασικό της μειονέκτημα στη βιομηχανία, σε σχέση με άλλες μεθόδους (GTAW, GMAW, Laser), ειδικά σε περιπτώσεις που ένας τόσο ακριβός εξοπλισμός δε θα μπορεί να κάνει σύντομα απόσβεση ή σε περιπτώσεις που το χαμηλό κόστος είναι βασική προτεραιότητα. Στο μέλλον φαίνεται ότι η FSW θα κερδίσει έδαφος σε εφαρμογές που απαιτούν ευθείες συγκολλήσεις μεγάλου μήκους, καθώς και στη συγκόλληση πλακών αλουμινίου. Αν και δεν προβλέπεται να αντικαταστήσει την GMAW σε πολλές εφαρμογές, έχει καταστήσει δυνατή τη συγκόλληση κραμάτων υψηλής αντοχής. Η GMAW θα επικρατήσει σε περιπτώσεις που απαιτούν προστιθέμενο μέταλλο ή όπου η φορητότητα της μεθόδου είναι απαραίτητη.

2.9 Εφαρμογές της μεθόδου

Στη ναυπηγική αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε ελάσματα της σειράς 6000 του αλουμινίου σε ψυκτικές μονάδες αλιευτικών σκαφών. Σήμερα βρίσκει εφαρμογή στη συγκόλληση φρακτών και καταστρωμάτων σε ταχύπλοα αλουμινένια σκάφη και σε μεγάλα χαλύβδινα πλοία με ελαφριές αλουμινένιες υπερκατασκευές. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, οι λαμαρίνες είναι πολύ επίπεδες λόγω των χαμηλών παραμορφώσεων και κόβονται σε μικρότερα μέρη επιθυμητού μεγέθους τα οποία έπειτα κολλούνται σε μεγαλύτερες κατασκευές, συνήθως με τη μέθοδο GMAW. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στο μεγαλύτερο αλουμινένιο σκάφος, Ogasawara (Ιαπωνία-2004), γίνεται εκτεταμένη χρήση της μεθόδου στις υπερκατασκευές του.

Στην αεροναυπηγική, η πρώτη μεγάλη εφαρμογή της ήταν στις δεξαμενές καυσίμου στους μη επανδρωμένους πυραύλους Delta II και Delta IV της Boeing, όπου αντικατέστησε μεθόδους σύντηξης και ειδικά την συγκόλληση με πλάσμα, σε σχέση με την οποία παρουσίασε πολύ λιγότερα ελαττώματα με μικρότερο κόστος. Έκτοτε, η μέθοδος έχει γίνει αντικείμενο έρευνας σε πολλούς κατασκευαστές ατράκτων αεροσκαφών, ώστε να αντικαταστήσει άλλες πιο συμβατικές μεθόδους.

Στη σιδηροδρομική βιομηχανία, η μέθοδος εφαρμόζεται σε υψηλής ταχύτητας αλουμινένια βαγόνια, όπου οι απαιτούμενες, μεγάλου μήκους (μέχρι και 25m) ευθείες συγκολλήσεις την καθιστούν ιδανική. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, βρίσκει εφαρμογή σε εξαρτήματα όπως καθίσματα, αναρτήσεις, τροχούς. Λόγω περιορισμένου αριθμού μικρών και ευθείων συγκολλήσεων σε οχήματα, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης ρομποτικών μεθόδων FSW συμβατών με τις πολύπλοκες γεωμετρίες.

Η χρήση της μεθόδου, δεν περιορίζεται μόνο στους κλάδους των μεταφορών, αλλά και στην πυρηνική βιομηχανία (συγκόλληση FSW σε δοχεία πυρηνικών αποβλήτων), τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Apple- iMac 2012), τη ρομποτική και άλλες βιομηχανίες.



Εικόνα 18 Αριστερά: Το μπροστινό και το πίσω μέρος της οθόνης του iMac (2012) της Apple έχουν συγκολληθεί με FSW επιτυγχάνοντας μείωση του πάχους στα 5cm [Πηγή: Apple]

Κεφάλαιο 3

Νευτώνεια και μη νευτώνεια ροή

(19)

3.1 Ροή Couette – Η έννοια του ιξώδους

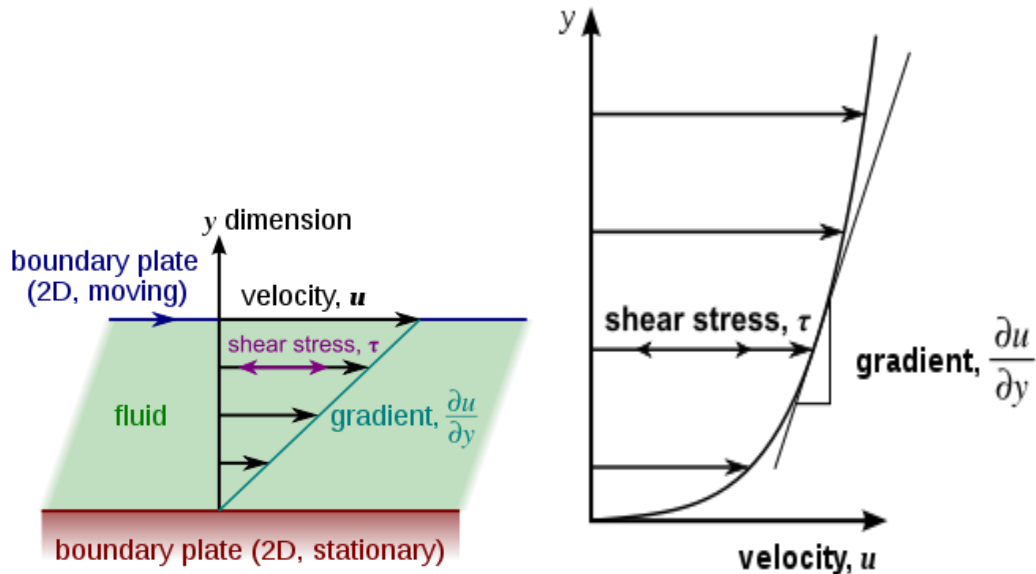
Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η προσέγγιση μοντελοποίησης που θα ακολουθήσουμε θα είναι αυτή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), στην οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η έννοια του ιξώδους. Για αυτό και γίνεται μια ανάλυση της στοιχειώδους συμπεριφοράς των ρευστών, σε ό,τι έχει να κάνει με το ιξώδες.

Το ιξώδες είναι η ιδιότητα του ρευστού που αντιτίθεται στη σχετική κίνηση δύο επιφανειών του που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Μία πιο θεμελιώδης προσέγγιση του ιξώδους δείχνει ότι είναι η ιδιότητα του ρευστού που σχετίζει την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση με την αναπτυσσόμενη διατμητική παραμόρφωση.

Μία αρκετά παραστατική ροή για τις έννοιες αυτές είναι η ροή Couette. Έστω ρευστό κινούμενο ανάμεσα σε δύο πλάκες, όπως στο επόμενο σχήμα. Η γεωμετρία είναι τέτοια ώστε η διατμητική τάση τ_{xy} να είναι σταθερή σε όλο τον όγκο του ρευστού. Η κίνηση γίνεται κατά τον x- άξονα και αλλάζει μόνο κατά τον y- άξονα, ισχύει δηλαδή $u=u(y)$. Για αυτό, υπάρχει μόνο μία παραμόρφωση σε αυτή τη ροή

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{du}{dy} \quad (5)$$

Για αυτό το λόγο για μία κίνηση με ταχύτητα \mathbf{V} της άνω πλάκας και την τ_{xy} να είναι σταθερές, συνεπάγεται ότι σε τέτοια ρευστά ο ρυθμός της παραμόρφωσης $\dot{\varepsilon}_{xy}$, και συνεπώς η $\frac{\partial u}{\partial y}$ θα είναι σταθερές, ώστε η ταχύτητα να ακολουθεί γραμμική κατανομή κατά μήκος της πλάκας όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα



Εικόνα 19 Ροή Couette και κατανομή της ταχύτητας

Αν ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης (no slip condition), το προφίλ της ταχύτητας θα είναι γραμμικό από 0 στο κάτω τοίχωμα μέχρι V στο άνω. Για τα περισσότερα ρευστά, έχει υπολογιστεί πειραματικά η ακριβής συνάρτηση που ορίζεται στη σχέση (6).

3.2 Νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά

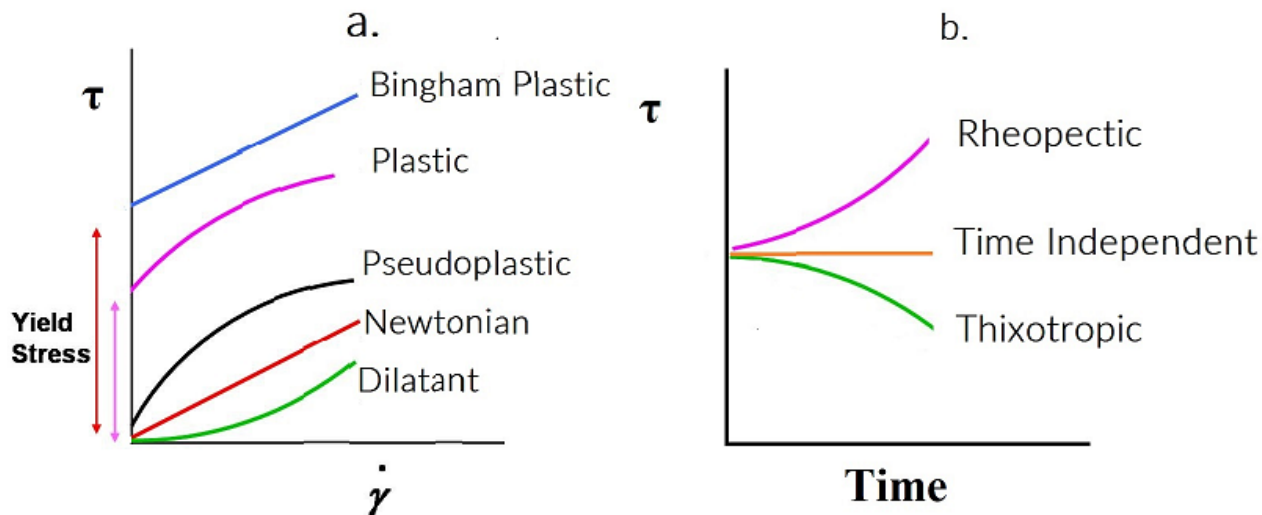
Για τα περισσότερα ρευστά η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση είναι μοναδική συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης.

$$\tau_{xy} = f(\dot{\epsilon}_{xy}) \quad (6)$$

Για απλά ρευστά η σχέση μεταξύ των τ_{xy} και $\dot{\epsilon}_{xy}$ είναι γραμμική ή «νευτώνεια» (Εικόνα 20) δηλαδή ισχύει:

$$\tau_{xy} \sim \dot{\epsilon}_{xy} \rightarrow \tau_{xy} = \mu \frac{V}{h} = 2\mu \dot{\epsilon}_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \dot{\gamma} \quad (7)$$

Η ποσότητα μ καλείται «συντελεστής ιξώδους ενός νευτώνειου ρευστού» ή πιο σύντομα «ιξώδες» και οι μονάδες του στο SI είναι $\frac{Ns}{m^2}$ ή $Pa \cdot s$. Ο συντελεστής μ είναι θερμοδυναμική ιδιότητα και μεταβάλλεται με την πίεση και τη θερμοκρασία. Αν η σχέση μεταξύ των τ_{xy} και $\dot{\epsilon}_{xy}$ είναι μη γραμμική, τότε το ρευστό αποκαλείται «μη νευτώνειο». Κάποια παραδείγματα μη νευτώνειας συμπεριφοράς (δηλαδή της σχέσης τ_{xy} και $\dot{\epsilon}_{xy}$) παρουσιάζονται στην Εικόνα 20. Κάποιες ουσίες καλούνται «yielding fluids» και έχουν μη μηδενική διατμητική τάση για μηδενικό ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης, και είναι στην πραγματικότητα μερικώς ρευστά και μερικώς στερεά.



Εικόνα 20 Συμπεριφορά νευτώνειων και μη νευτώνειων ρευστών

Στην Εικόνα 20α βλέπουμε επίσης, τις εξής συμπεριφορές μη νευτώνειων ρευστών:

1. Ψευδοπλαστικά ρευστά (**Pseudoplastic - Shear Thinning**): το ιξώδες τους μειώνεται με αύξηση του ρυθμού διατμητικής παραμόρφωσης. Όπως φαίνεται, η τοπική κλίση της καμπύλης μειώνεται με αύξηση της τάσης. Αν η συμπεριφορά αυτή είναι πολύ έντονη, το ρευστό μπορεί να χαρακτηριστεί ως «πλαστικό» (Plastic).
2. Διασταλτικά ρευστά (**Dilatant - Shear Thickening**): η αντίθετη περίπτωση από τα ψευδοπλαστικά, όπου το ιξώδες αυξάνεται με αύξηση της διατμητικής τάσης.
3. Πλαστικά Bingham (**Bingham Plastic**): Υλικό με πεπερασμένη διατμητική τάση (για μηδενικό ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης) που αυξάνεται γραμμικά. Το ιδανικό αυτό υλικό, χρησιμοποιείται σε αναλυτικούς υπολογισμούς, για διαρρέοντα (yielding) υλικά σε συνθήκες ροής. Οι ουσίες αυτές δεν έχουν απαραίτητα γραμμική αύξηση, αλλά μπορούν να συμπεριφέρονται ως ψευδοπλαστικά ή διασταλτικά.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 20b, η συμπεριφορά του ρευστού μπορεί να είναι και χρονικά εξαρτώμενη. Τα ρευστά αυτά μπορεί να είναι:

4. Θιξοτροπικά (**Thixotropic**): Για σταθερό ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης το υλικό υφίσταται μείωση στη διατμητική τάση.
5. Ρεοπηκτικά (**Rheopectic**): Για σταθερό ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης το υλικό υφίσταται αύξηση στη διατμητική τάση.

Μια απλή προσέγγιση της μη νευτώνειας συμπεριφοράς είναι ο νόμος των Ostwald και de Waele (Power-law approximation):

$$\tau_{xy} = 2K \varepsilon_{xy}^n = K \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

Όπου οι σταθερές K και n είναι ιδιότητες του υλικού και εξαρτώνται από την πίεση, τη θερμοκρασία και τη σύσταση του ρευστού σε περίπτωση μείγματος. Όσον αφορά στον εκθέτη n , δείχνει τη συμπεριφορά του ρευστού:

$$\begin{aligned} n < 1 & \quad \text{Ψευδοπλαστικό} \\ n = 1 & \quad \text{Νευτώνειο } (\mu = K) \\ n > 1 & \quad \text{Διασταλτικό} \end{aligned}$$

Ο νόμος των Ostwald de Waele, βέβαια δε δίνει ρεαλιστικές τιμές κοντά στην αρχή των αξόνων, αφού προβλέπει άπειρη κλίση για ψευδοπλαστικά ρευστά (άρα άπειρο ιξώδες) και μηδενική κλίση για τα διασταλτικά. Για αυτόν το λόγο έχουν αναπτυχθεί άλλου είδους μοντέλα για την περιγραφή μη νευτώνειων ρευστών, με κάποια από αυτά να αναφέρονται στο εδάφιο 4.2 .

Κεφάλαιο 4

Η μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση ως μέθοδος στερεάς κατάστασης, παρουσιάζει αρκετές ιδιομορφίες ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης της, συγκρινόμενη με άλλες (π.χ. συγκολλήσεις τόξου). Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, υπάρχει τριβή μεταξύ εργαλείου και μετάλλου, η οποία συνδυαζόμενη με την πλαστική παραμόρφωση λόγω ανάδευσης, παράγει θερμότητα και άρα ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών που οδηγούν σε θερμικές τάσεις και παραμορφώσεις. Η περιστροφική κίνηση σε συνδυασμό με την προώθηση του εργαλείου προκαλούν περιστροφή του υλικού και εναπόθεσή του πίσω από το εργαλείο. Τα παραπάνω επιδρούν στην ένταση των δεσμών του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού καθορίζοντας εν τέλει και την ποιότητα της σύνδεσης. Η πολύπλοκη αλληλεπίδραση των θερμικών, ροϊκών και μηχανικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία, οδηγεί σε διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης, καθεμία με διαφορετικές παραδοχές, πλεονεκτήματα και αδυναμίες.

Για αυτό το λόγο δεν υπάρχει μία πεπατημένη διαδικασία μοντελοποίησης, όπως στις συμβατικές συγκολλήσεις. Η πιο ευρέως διαδεδομένη αυτών είναι η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (Moving Heat Source - MHS). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, παρά την πολυπλοκότητα και τις υψηλές υπολογιστικές τους απαιτήσεις, έχουν αναπτυχθεί δύο ακόμα ερευνητικές οδοί: η προσομοίωση του προβλήματος μέσω της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) και μέσω της πιο προηγμένης μέθodu Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). Στην παρούσα εργασία ακολουθείται η προσέγγιση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.

4.1 Η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής (Moving Heat Source- MHS)

Η μεθοδολογία μετακινούμενης θερμικής πηγής θεωρεί ότι η διεργασία της συγκόλλησης προσομοιάζεται ως μια θερμομηχανική κατεργασία, κατά την οποία μια πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της ραφής αυξάνοντας τη θερμοκρασία του τεμαχίου. Η θερμότητα που μεταδίδεται στο υλικό υπολογίζεται με αναλυτικές σχέσεις. Αφού γίνει εισαγωγή κι άλλων θερμικών ιδιοτήτων του υλικού μαζί με τις αντίστοιχες θερμικές συνοριακές συνθήκες σε μοντέλο (συνήθως πεπερασμένων στοιχείων), υπολογίζεται η θερμική ιστορία της συγκόλλησης. Στις περισσότερες μελέτες δε λαμβάνεται υπ' όψιν

η θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, λόγω του πολύπλοκου υπολογισμού τους μέσω αναλυτικών σχέσεων. Συνεπώς, η μέθοδος θεωρεί ότι η παραγόμενη θερμότητα οφείλεται αποκλειστικά στην τριβή του υλικού με το εργαλείο.

Μία από τις πρώτες εργασίες στη μοντελοποίηση με τη μέθοδο MHS (1998), ήταν αυτή των Frigaard et al (20), οι οποίοι θεώρησαν αμελητέα την επίδραση του πείρου στην παραγόμενη θερμότητα και ότι μόνο η επιφάνεια του περιαιχηνίου επιδρά στην αύξηση θερμοκρασίας. Στην υπολογιζόμενη θερμότητα δεν περιλαμβάνεται η επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης. Η σχέση που πρότειναν ήταν:

$$Q_{total} = \sum_i \frac{4}{3} \pi^2 \mu_F \sigma_v \omega (R_i^3 - R_{i-1}^3) \quad (9)$$

Όπου, μ_F ο συντελεστής τριβής εργαλείου-πλάκας και σ_v η κατακόρυφη πίεση στο εργαλείο. Σύμφωνα με αυτή τη σχέση, η επιφάνεια του περιαιχηνίου χωρίζεται σε (i-1) δακτυλίους εξωτερικής ακτίνας R_i , με R_i να παίρνει τιμές στο διάστημα $[R_{pin}, R_{shoulder}]$. Κάθε δακτύλιος παράγει διαφορετικό ποσό θερμότητας και η συνολική παραγόμενη θερμότητα προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους.

Την ίδια περίοδο, οι Chao και Qi (21) εργαζόμενοι σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσαν την θερμοκρασία μετάβασης, τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις στην FSW. Βασισμένος στο μοντέλο αυτό οι Chao και Zhu (22) ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μη γραμμικό θερμικό μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και των παραμενουσών τάσεων, όπου η θερμοκρασία είναι συνάρτηση των (x,y,z,t) και προσδιορίζεται από την μη γραμμική διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{int} = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Όπου k , ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, Q_{int} η εσωτερική παροχή θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και ρ η πυκνότητα.

Θεώρησαν ότι η θερμική ροή από το εργαλείο προς την πλάκα διαδίδεται ακτινικά κατά τη διεύθυνση του περιαιχηνίου σύμφωνα με τη σχέση

$$q(r) = \frac{3Q_{total}r}{2\pi R_{shoulder}^3} \quad (11)$$

Οι Chao και Zhu (22), όπως και ο Frigaard, επίσης αμέλησαν τη θερμότητα που παράγεται λόγω του πείρου, στηριζόμενοι σε μελέτη των Russell και Shercliff

(23) που υποστήριζαν ότι αποτελεί το 2% της συνολικής θερμότητας. Ως προς τις απώλειες θερμότητας θεώρησαν ότι οφείλονται σε συναγωγή και ακτινοβολία στις ελεύθερες επιφάνειες

$$q_s = \beta(T - T_0) + \varepsilon B(T^4 - T_0^4) \quad (12)$$

Όπου T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος, β ο συντελεστής συναγωγής, ε ο συντελεστής εκπομπής και $B = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ η σταθερά Stephan Boltzmann.

Το βασικό εμπόδιο στη μοντελοποίηση τους είναι οι άγνωστες συνθήκες στην επιφάνεια επαφής με τη βάση στήριξης όπου οι απώλειες συναγωγής δίνονται από τη σχέση

$$q_b = \beta_b(T - T_0) \quad (13)$$

καθώς και η συνολική παραγόμενη θερμότητα Q_{total} . Λόγω των αγνώστων τιμών η εξίσωση (9) δε μπορεί να επιλυθεί για αυτό και λειτούργησαν με τη μέθοδο "trial and error", δίνοντας αρχικές τιμές στα Q_{total} και β_b και συνέκριναν τα αποτελέσματα με τα πειραματικά κάνοντας νέες εκτιμήσεις.

Για τα μέχρι τότε δεδομένα, η πιο ολοκληρωμένη θερμική μοντελοποίηση έγινε από τον Colegrove (25), ο οποίος ανέπτυξε πιο περίπλοκες αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της θερμότητας. Θεώρησε ότι η θερμότητα που παράγεται από το περιαιχένιο δίνεται από τη σχέση που πρότεινε ο Frigaard και ότι η θερμότητα λόγω του πείρου δίνεται από τις σχέσεις:

$$Q_{pin} = 2\pi R_{pin} H_{pin} \bar{Y} \frac{V_m}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu_F \bar{Y} \pi R_{pin} H_{pin} V_{rp}}{\sqrt{3}(1 + \mu^2)} + \frac{4F_{κατ} \mu_F V_m \cos\theta}{\pi} \quad (14i)$$

$$\theta = 90^\circ - \lambda_\Sigma - \tan^{-1}(\xi) \quad (14ii)$$

$$V_m = \frac{\sin\lambda_\Sigma}{\sin(180^\circ - \theta - \lambda_\Sigma)} V_p \quad (14iii)$$

$$V_{rp} = \frac{\sin\theta}{\sin(180^\circ - \theta - \lambda_\Sigma)} V_p \quad (14iv)$$

$$V_p = R_{pin} \omega_{pin} \quad (14v)$$

Με παρόμοια επαναληπτική διαδικασία όπως οι Chao και Zhu, λειτούργησαν και οι Shi, Dickerson και Shercliff (24), οι οποίοι όμως δε θεώρησαν αμελητέα τη θερμική επίδραση του πείρου ύστερα από την συμβολή της μελέτης του Colegrove, αλλά έκαναν την παραδοχή ότι η συνολική θερμότητα οφείλεται κατά 75% στο περιαιχένιο και 25% στον πείρο.

Μία από τις πιο σημαντικές συνεισφορές στη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση ήταν η μελέτη των Schmidt, Hattel, Wert (25), οι οποίοι υποστήριξαν ότι τα θερμικά φαινόμενα στο σύνορο εργαλείου-υλικού εξαρτώνται από τη συνθήκη επαφής μεταξύ τους. Έτσι ορίστηκαν τρεις διαφορετικές καταστάσεις επαφής:

1. Κατάσταση προσκόλλησης (Sticking Condition): Η επιφάνεια του υλικού θα προσκολληθεί στην επιφάνεια του εργαλείου, εάν η διατμητική τάση επαφής είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική διατμητική τάση διαρροής του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση το τμήμα του υλικού επιταχύνεται κατά μήκος της επιφάνειας του εργαλείου φτάνοντας την ταχύτητα του εργαλείου και μέχρι να επικρατήσει ισορροπία όπου η εσωτερική διατμητική τάση ισούται με την διατμητική τάση επαφής.
2. Κατάσταση ολίσθησης (Sliding Condition): Εάν η επιφανειακή διατμητική τάση είναι μικρότερη από την εσωτερική διατμητική τάση διαρροής του υλικού, μέρος του υλικού διατμείται ελαφρώς σε μια στατική ελαστική παραμόρφωση όπου η διατμητική τάση ισούται με τη “δυναμική” διατμητική τάση επαφής.
3. Μερική προσκόλληση/ολίσθηση (Partial Sliding/Sticking). Η τελευταία πιθανή κατάσταση επαφής είναι η ενδιάμεση των δύο πρώτων. Σε αυτή την περίπτωση, το υλικό επιταχύνεται κατά μήκος της επιφάνειας του εργαλείου μέχρι μία ταχύτητα μικρότερη της επιφανειακής ταχύτητας του υλικού. Η ισορροπία επικρατεί όταν η δυναμική διατμητική τάση επαφής ισούται με την εσωτερική διατμητική τάση διαρροής. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ στατικού και δυναμικού συντελεστή τριβής.

Οι παραπάνω καταστάσεις μπορούν να εκφραστούν αριθμητικά από την μεταβλητή κατάστασης επαφής δ , που συνδέει την ταχύτητα στην επιφάνεια του υλικού με την ταχύτητα στην επιφάνεια του εργαλείου που βρίσκεται σε επαφή. Η παράμετρος αυτή είναι ο αδιάστατος συντελεστής ολίσθησης και ορίζεται ως

$$\delta = \frac{U_{matrix}}{U_{tool}} \quad (15)$$

Οι τρεις καταστάσεις επαφής μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 6 Καταστάσεις επαφής εργαλείου και υλικού

Συνθήκη	Ταχύτητα υλικού	Ταχύτητα εργαλείου	Διατμητική τάση	Κατάσταση επαφής
Sticking	$U_{matrix} = U_{tool}$	$U_{tool} = \omega r$	$\tau_{friction} > \tau_{yield}$	$\delta = 1$
Sticking/sliding	$U_{matrix} < U_{tool}$	$U_{tool} = \omega r$	$\tau_{friction} \geq \tau_{yield}$	$0 < \delta < 1$
Sliding	$U_{matrix} = 0$	$U_{tool} = \omega r$	$\tau_{friction} < \tau_{yield}$	$\delta = 0$

Πέραν της εισαγωγής του συντελεστή δ , οι ερευνητές χώρισαν το εργαλείο στις 3 επιφάνειες που έρχεται σε επαφή με το υλικό και υπολόγισαν την παραγόμενη θερμότητα κάθε επιφάνειας ξεχωριστά: Q_1 - Θερμότητα στην επιφάνεια του περιαιχενίου, Q_2 - Θερμότητα στην κατακόρυφη επιφάνεια του πείρου Q_3 θερμότητα στην κάτω επιφάνεια του πειρου. Με άθροισμα των παραπάνω προκύπτει η ολική θερμότητα Q_{total}

$$Q_{total, sticking} = \frac{2}{3} \pi \tau_{contact} \omega (R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}) \quad (16)$$

Η διατμητική τάση διαρροής εκτιμάται ότι ισουται με

$$\tau_{contact} = \tau_{yield} = \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

άρα σε πλήρη προσκόλληση ισχύει και η $Q_{total, sticking}$

$$Q_{total, sticking} = \frac{2}{3} \pi \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \omega (R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}) \quad (18)$$

Σε πλήρη ολίσθηση η διατμητική τάση επαφής ισούται με την διατμητική τάση λόγω τριβής ολίσθησης και η αντίστοιχη $Q_{total, sliding}$ θα είναι:

$$\tau_{contact} = \tau_{friction} = \mu p \quad (19i)$$

$$Q_{total, sliding} = \frac{2}{3} \pi \mu p \omega (R_{shoulder}^3 + 3R_{probe}^2 H_{probe}) \quad (19ii)$$

Σε μερική ολίσθηση/προσκόλληση η συνολική θερμότητα είναι γραμμικός συνδυασμός των 2 παραπάνω:

$$Q_{total} = \delta Q_{total, sticking} + (1 - \delta) Q_{total, sliding} \quad (20)$$

Η παραπάνω εξίσωση στηρίζεται στην παραδοχή ότι η κατάσταση επαφής είναι ομοιομορφή και στις 3 επιφάνειες άρα ο δ είναι σταθερά όχι μεταβλητή.

Ο Nandan et al (26), (27) υποστήριξε ότι εκτός από τις φάσεις εισαγωγής και εξαγωγής του εργαλείου η παραγωγή θερμότητας συμβαίνει με σταθερό ρυθμό αν το εργαλείο προωθείται και περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, κάτι που επιβεβαιώνεται από το πανομοιότυπο προφίλ συγκόλλησης όσο και

την ομοιομορφία ιδιοτήτων κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης. Ο Nandan ήταν ο πρώτος που συμπεριέλαβε την θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης,

$$\rho C_p \nabla(\vec{u}T) = -\rho C_p U_x \frac{\partial T}{\partial x} + \nabla(k\nabla T) + S_b \quad (21)$$

Για τη θερμότητα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης θεώρησε ότι το υλικό κατά την πλαστικοποίηση του αντιμετωπίζεται ως ρευστό υψηλού ιξώδους. 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.

Νεώτερες μελέτες βασισμένες στην μέθοδο MHS στηρίχθηκαν σε όσα έχουν ήδη προταθεί και δεν πρότειναν κάποια καινούρια προσέγγιση.

4.2 Η μεθοδολογία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)

Η πρώτη μεθοδολογία, αυτή της μετακινούμενης θερμικής πηγής, έδωσε τη δυνατότητα να μελετηθεί το θερμοκρασιακό ιστορικό και οι παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις, αν καταστρωθεί το κατάλληλο θερμομηχανικό μοντέλο. Εντούτοις, τέτοια μοντέλα αυτό δεν παρέχουν πληροφορίες για την ανάμιξη-ανάδευση του υλικού κατά τη διεργασία. Το κενό αυτό έρχεται να καλύψει η μεθοδολογία Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, με την οποία μελετάται αποκλειστικά και μόνο το φαινόμενο της ροής και τα σχετικά με αυτό μεγέθη (πχ ταχύτητα, έκταση ροής, ροϊκές γραμμές κτλ). Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή αδυνατεί να προβλέψει την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων, περιορίζοντας έτσι το πεδίο εφαρμογών της μεθόδου.

Στην μοντελοποίηση με CFD, το υλικό θεωρείται ρευστό υψηλού ιξώδους, αν και δεν υπερβαίνεται η θερμοκρασία τήξης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας λόγω ιξώδους (viscous dissipation energy), κάτι το οποίο η MHS αδυνατεί να υπολογίσει. Φαίνεται, λοιπόν, ο ιδιαίτερα σημαντικός ρόλος της ιδιότητας του ιξώδους, που σε τέτοιες μελέτες, είναι καίριας σημασίας ο τρόπος μοντελοποίησης της μεταβολής του.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στα κυριότερα μοντέλα εκτίμησης του ιξώδους που εφαρμόζονται κατά τη CFD ανάλυση της ροής (28)

1) Μοντέλο Perzyna

Βάσει του μοντέλου Perzyna, το δυναμικό ιξώδες είναι συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης ($\dot{\epsilon}$) και της θερμοκρασίας και ισούται με το λόγο της ενεργούς ροϊκής τάσης σ προς τον ενεργό ρυθμό παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}$.

$$\mu(T, \dot{\epsilon}) = \frac{\sigma(T, \dot{\epsilon})}{3 \dot{\epsilon}} \quad (22)$$

Για τον υπολογισμό της ροϊκής τάσης χρησιμοποιείται συχνά το μοντέλο Zener-Hollomon

2) Μοντέλο Zener-Hollomon

Το μοντέλο Zener-Hollomon είναι από τις πρώτες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες υπολογισμού του ιξώδους σε μελέτες ροής υλικού κατά τη FSW. Η ροϊκή τάση σχετίζεται με την παράμετρο Zener-Hollomon όπως προτάθηκε από τους Sellars και Tegart (29) και τροποποιήθηκε από τους Sheppard και Wright (30)

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left(\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (24)$$

όπου Z η παράμετρος Zener-Hollomon, $\dot{\epsilon}$ 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 υπολογίζονται πειραματικά. Το μοντέλο Zener-Hollomon βασίζεται στην υπολογιστική μηχανική στερεών σε αντίθεση με τα επόμενα που βασίζονται στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική.

3) Μοντέλο Power Law

Το μοντέλο αυτό είναι παράδειγμα ενός γενικευμένου μη νευτώνειου ρευστού. Αν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του λογαρίθμου της διατμητικής τάσης και του λογαρίθμου του ιξώδους τότε αυτό δίνεται από τη σχέση

$$\mu(\dot{\gamma}) = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (25)$$

Οι παράμετροι m και n είναι ρεολογικές ιδιότητες: συντελεστής συνεκτικότητας m και δείκτης ροής n . Για $n > 1$ έχουμε διασταλτική ροή, για $0 < n < 1$ ψευδοπλαστική και για $n = 1$ νευτώνεια. Ο Colegrove (33) και ο Reynold (34) χρησιμοποίησαν το παραπάνω μοντέλο για πρώτη φορά, ενώ ο αργότερα

ο Colegrove τροποποίησε το μοντέλο για να εισάγει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση:(35)

$$\mu(T, \dot{\gamma}) = K \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (26)$$

4) Μοντέλο Carreau

Το μοντέλο Carreau έχει αποδειχθεί πολύ λειτουργικό για την περιγραφή ψευδοπλαστικών ρευστών υψηλού ιξώδους

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\dot{\gamma} \lambda)^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (27)$$

Όπου μ_{∞} το ιξώδες σε άπειρη διάτμηση, μ_0 το ιξώδες σε μηδενική διάτμηση, λ η χρονική σταθερά και n ο δείκτης της ροής.

Ο Atharifar (31) χρησιμοποίησε πρώτος το μοντέλο Carreau στη μοντελοποίηση της FSW εισάγοντας τη θερμοκρασιακή εξάρτηση

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + (\dot{\gamma} \lambda \exp\left(\frac{T_0}{T}\right))^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (28)$$

Το λογισμικό ANSYS FLUENT εισάγει την θερμοκρασιακή εξάρτηση στο μοντέλο Carreau μέσω του θερμοκρασιακά εξαρτούμενου παράγοντα $H(T)$

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (H(T) \dot{\gamma} \lambda)^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (29)$$

$$H(T) = \exp \left[a \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_{\alpha} - T_0} \right) \right] \quad (30)$$

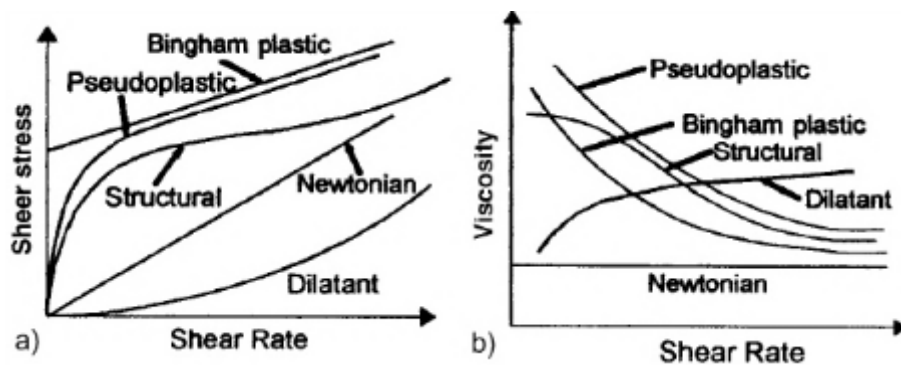
Η θερμοκρασία T_0 είναι 0 από προεπιλογή και T_{α} είναι η θερμοκρασία για την οποία $H(T)=1$. Με a συμβολίζεται η ενέργεια ενεργοποίησης

5) Μοντέλο Bingham

Η τελείως πλαστική συμπεριφορά είναι γνωστή σαν συμπεριφορά Bingham και χαρακτηρίζεται από την παρακάτω συσχέτιση:

$$\begin{cases} \bar{\tau} < \tau_0: \dot{\gamma} = 0 \\ \bar{\tau} \geq \tau_0: \bar{\tau} = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \right) \dot{\gamma} \end{cases} \quad (31)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η συμπεριφορά διαφόρων τύπων ρευστών σε σχέση με το ιξώδες τους



Εικόνα 21α) Διατμητική τάση σε σχέση με ρυθμό διάτμησης και β) Ιξώδες σε σχέση με το ρυθμό διάτμησης

4.3 Η μεθοδολογία Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

Η μέθοδος ALE προσφέρει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μέσω της σύζευξης των προσεγγίσεων κατά Euler (Eulerian) και κατά Lagrange (Lagrangian) τύπων επίλυσης. Βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα ρευστών πολλαπλών φάσεων και σε προβλήματα που απαιτούν αλληλεπίδραση του ρευστού και της κατασκευής. Η προσέγγιση κατά Lagrange εφαρμόζεται συχνά στη μηχανική στερεού σώματος και ο παρατηρητής κινείται μαζί με το υπό παρατήρηση σώμα. Ωστόσο, στη μηχανική ρευστών είναι συνήθως πιο απλό, το πεδίο ροής να περιγράφεται με ένα σταθερό όγκο ελέγχου, χωρίς να υπεισέρχεται στο πρόβλημα η κίνηση μεμονωμένων σωματιδίων ρευστού. Η προσέγγιση αυτή είναι η επονομαζόμενη κατά Euler. Η μεθοδολογία ALE συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών μεθόδων.

Σε τέτοια προβλήματα, η διακριτοποίηση γίνεται κατά Lagrange, αλλά αν κάποιες περιοχές του πλέγματος έχουν μη ευνοϊκή γεωμετρία για την επίλυση, οι κόμβοι (Nodes) μεταξύ των στοιχείων μετακινούνται τόσο, ώστε ένα αριθμητικά ασταθές πλέγμα να αποφεύγεται. Η μεθοδολογία αυτή προσφέρει, έναντι άλλων, το πλεονέκτημα ότι τόσο ο αριθμός των στοιχείων όσο και των κόμβων παραμένει σταθερός. Κατά την ALE, επαναδιακριτοποίηση περιοχών που υπόκεινται σε υψηλές παραμορφώσεις, προσφέρει ανάλυση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια για τις συνθήκες επαφής και άρα επιτρέπει ακριβή υπολογισμό της τάσης επαφής και του πλαστικού έργου παραμόρφωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η προσέγγιση αποδεσμεύεται από τη χρήση αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμότητας (λόγω τριβής και πλαστικής παραμόρφωσης). Επίσης, λόγω της κατά Lagrange προσέγγισης που βασίζεται σε μηχανική παραμορφωσίμου στερεού, προσφέρεται η δυνατότητα εκτίμησης της πραγματικής ποιότητας συγκόλλησης, αφού προβλέπεται η πιθανή δημιουργία κενών και άλλων

ατελειών. Οι θεαματικές υπολογιστικές δυνατότητες της μεθόδου ωστόσο, έχουν και το ανάλογο κόστος: η επαναδιακριτοποίηση του πλέγματος (re-meshing), την καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα και επεξεργαστικά απαιτητική.

Η πρώτη προσέγγιση της FSW με τη μέθοδο ALE έγινε από τους Fourment και Guerdoux το 1999 (32), (33), (34) , οι οποίοι χώρισαν τη διεργασία σε δύο στάδια, αυτό της εισχώρησης (plunge) και αυτό της συγκόλλησης (προώθησης εργαλείου - advancing). Στη φάση της εισχώρησης λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο τα θερμικά και μηχανικά φαινόμενα ενώ στη φάση της προώθησης το μοντέλο παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι δημιουργείται λόγω του πείρου αυλάκι και όχι ανάμιξη του υλικού. Ωστόσο αυτό το εμπόδιο υπερπηδήθηκε σε επόμενη εργασία τους το 2009 (35), στην οποία εκτός των άλλων έγινε μια πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου όπου λήφθηκαν υπ' όψιν όλα τα φαινόμενα στις επιφάνειες επαφής μεταξύ εργαλείου και υλικού. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να μοντελοποιηθούν διάφορες αστάθειες του φαινομένου, όπως π.χ. η δημιουργία κενών κατά την βύθιση. Αναλόγως εργάστηκε και ο Dong με τους συνεργάτες του (36). Ο Ulysse μελέτησε την επίδραση του εργαλείου στο θερμοκρασιακό πεδίο χρησιμοποιώντας στους υπολογισμούς του και τις δυνάμεις που δέχεται το εργαλείο, με τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων του να χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ανθεκτικότερων εργαλείων . Στις εργασίες αυτές πλην της (39) έχει θεωρηθεί αμελητέα η θερμική επίδραση της βάσης στήριξης για εξοικονόμηση υπολογισμών, η οποία δε μπορεί να αμεληθεί στην πραγματικότητα διότι απορροφά λόγω αγωγής μεγάλο μέρος της αναπτυσσόμενης θερμότητας. Σε πιο πρόσφατες εργασίες, οι Li et al (37), έκαναν θερμομηχανική προσομοίωση του φαινομένου σε ABAQUS και μελέτησαν την ασύμμετρη θερμοκρασιακή κατανομή μεταξύ υποχωρούσας και προωθούμενης πλευρά, ενώ ο Badour et al (38) μοντελοποίησαν την επίδραση παραμέτρων συγκόλλησης στη δημιουργία κενών.

4.4 Μοντελοποίηση της ροής στη συγκόλληση FSW

Όπως αναλύθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, καθοριστικό ρόλο στη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, έπαιξαν οι μελέτες των Colegrove et al και Nandan et al. Πριν τον Colegrove, μία σημαντική μελέτη ήταν το 2000 αυτή των Bendzsak et al. (39), οι οποίοι έκαναν σύζευξη του μοντέλου μεταφοράς θερμότητας με το μοντέλο της ροής, εκτιμώντας το ιξώδες ως συνάρτηση του ρυθμού διάτμησης και της θερμοκρασίας, ειδικά για κράματα αλουμινίου.

Το 2003, ο Colegrove (40), (41), (42), δημοσιεύει τη διδακτορική διατριβή του πάνω στη μοντελοποίηση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση στο

κράμα αλουμινίου 7075, όπου εκτός άλλων έκανε μελέτη της ροής σε FSW με τα εργαλεία MX Triflute και Trivex, που εφευρέθηκαν από το TWI. Η προσομοίωση που έκανε ήταν αρχικά σε διδιάστατα και έπειτα σε τριδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Μία βασική παραδοχή που έκανε ήταν αυτή της πλήρους προσκόλλησης εργαλείου και βασικού μετάλλου, η οποία όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.3, θα επαναπροσδιοριζόταν σε μεταγενέστερες μελέτες. Η μοντελοποίησή του πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό FLUENT.

Πολύ σημαντική ήταν και η συμβολή των Nandan et al (43), (27), (44) στη ροική μοντελοποίηση της FSW. Το 2006, έγινε θερμοροϊκή μελέτη με τη μεθοδολογία υπολογιστικής υδροδυναμικής σε συγκόλληση FSW σε κράμα αλουμινίου 6061 (πάχος πλάκας 12.7 mm) με σκοπό τον προσδιορισμό του μεγέθους της TMAZ. Το 2007 σε νεώτερη μελέτη της ερευνητικής ομάδας του, έγινε ανάλογη μελέτη σε FSW χάλυβα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι μελέτες του Nandan και των συνεργατών του ήταν από τις πρώτες στις οποίες ερευνήθηκε η κατανομή του ιξώδους γύρω από το εργαλείο και σε ποιες αποστάσεις αυτό αποκτά τιμές τόσο υψηλές, ώστε να μην υπάρχει πλέον ροή υλικού. Όπως και ο Colegrove, κατάστρωσε τα μοντέλα του στο λογισμικό FLUENT.

Το 2005 οι Zhang et al (45) πραγματοποίησαν θερμομηχανική μοντελοποίηση με τη μεθοδολογία ALE στο κράμα 6061 και έδειξαν ότι υπάρχει στροβιλισμός υλικού στην προωθούμενη πλευρά και η ταχύτητα ροής υλικού εντός του στροβίλου αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας πρόωσης εργαλείου.

Το 2007, η ομάδα του Hamilton (46) εργάστηκε στη μοντελοποίηση συγκόλλησης του κράματος 6061, με πάχος προς συγκόλληση πλακών 6.35 mm. Χαρακτηριστικά της μελέτης τους ήταν αφενός ότι οι διαμήκεις άξονες των προς συγκόλληση πλακών ήταν κάθετοι μεταξύ τους (και όχι παράλληλοι όπως σε προγενέστερες μελέτες) και αφετέρου ότι οι πλάκες είχαν επίστρωση από κασσίτερο πάχους (0.05 mm). Οι ερευνητές δεν κατέληξαν σε διαφορετικά συμπεράσματα, όσον αφορά στη συμπεριφορά της ροής.

Η ομάδα του Feulvarch (47), επίσης μέσω της μεθοδολογίας ALE, πραγματοποίησε μοντελοποίηση για ροή υλικού σε FSW με πείρο τριγωνικής διατομής. Το μοντέλο που έφτιαξαν, μπορεί να εφαρμοστεί και στη μοντελοποίηση FSW πείρων διαφορετικής γεωμετρίας από την υπό μελέτη. Οι Ji et al (48), εργαζόμενοι στο FLUENT, μελέτησαν τη ροή σε πλάκες αλουμινίου 2014 πάχους 6 mm για διαφορετικές γεωμετρίες, τόσο περιαιχενίου (plane shoulder, inner-concave flute shoulder, concentric-circles-flute shoulder) όσο και πείρου (φορά και βήμα σπειρώματος). Έδειξαν, όπως οι προηγούμενοί, ότι η ταχύτητα ροής μειώνεται με αύξηση της απόστασης από

το εργαλείο. Επίσης, συγκρίνοντας τις γεωμετρίες περιαιχενίου, κατέληξαν ότι το περιαιχένιο με ομόκεντρα αυλάκια (concentric-circles-flute shoulder) δίνει ταχύτερη ροή σε σχέση με τα άλλα δύο. Επιπλέον, το δεξιόστροφο σπείρωμα κατά την περιστροφή εργαλείου με ωρολογιακή φορά, οδηγεί σε ροή υλικού και προς τα πάνω στην περιοχή του εργαλείου. Σε αριστερόστροφο σπείρωμα τα αποτελέσματα είναι αντίθετα.

Οι Chen et al (49), δραστηριοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση της παραγωγής θερμότητας και του αναπτυσσόμενου θερμοκρασιακού πεδίου σε συγκόλληση FSW πλακών αλουμινίου 6061, πάχους 3.1 mm, με την αντίστοιχη επίδραση στην ταχύτητα του υλικού. Έδειξαν συν τοις άλλοις, όπως και οι Ji et al, ότι η ταχύτητα μειώνεται απότομα όσο απομακρυνόμαστε από το εργαλείο, ενώ οι μέγιστες τιμές της είναι κοντά στην επιφάνεια επαφής περιαιχενίου-μετάλλου. Σε ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Cho et al (50), μελετώντας στο FLUENT, την FSW φερριτικού ανοξειδωτού χάλυβα 409 (πάχος πλάκας 12 mm). Έδειξαν επίσης ότι υψηλές διατμητικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται γύρω από το εργαλείο λόγω της ανάδευσης, ενώ το ιξώδες μειώνεται απότομα γύρω από το εργαλείο, όπου υπάρχει ροή. Παρόμοιας φύσης ήταν και η μελέτη των Shi et al (51), οι οποίοι μελέτησαν τη μεταφορά θερμότητας και τη ροή υλικού σε πλάκα κράματος αλουμινίου 2024 πάχους 6 mm. Η μελέτη τους, δεν περιορίστηκε στο στάδιο της προώθησης του εργαλείου, αλλά αφορούσε στο σύνολο της διεργασίας.

Ειδικά τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει πολλές μελέτες με σκοπό τη σύνδεση του θερμοκρασιακού πεδίου και της ροής υλικού με το μηχανισμό δημιουργίας διαφόρων τύπων σφαλμάτων. Μία από αυτές ήταν αυτή των Tongne et al (52), η οποία αφορά σε διδιάστατη μοντελοποίηση συγκόλλησης σε πλάκες κράματος αλουμινίου 6082 πάχους 6 mm, με τριγωνικό πείρο. Οι ερευνητές εργάστηκαν σε ABAQUS με τη μεθοδολογία Coupled Eulerian Lagrangian. Μία ακόμα μελέτη ίδιας φύσης ήταν αυτή των Zhu et al (53) πάνω στο κράμα 2024 (πάχος πλάκας 6 mm) στο FLUENT. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι λόγω της περιορισμένης δύναμης τριβής πίσω από τον πείρο και κοντά στη βάση του, η ταχύτητα του υλικού μειώνεται σημαντικά καθιστώντας αδύνατη τη ροή από την RS προς την AS κατά μήκος της επιφάνειας του πείρου ώστε να δημιουργηθεί ισχυρή ένωση. Αυτό εντείνει τη δημιουργία ελαττωμάτων τύπου wormhole defects (σωληνοειδή κενά ή ελαττώματα τύπου τούνελ).

Αξίζει, τέλος, να αναφερθούν κάποιες διαφορετικές προσεγγίσεις της ροϊκής μοντελοποίησης της FSW. Οι Hoogs et al (54), μελέτησαν το φαινόμενο της ροής γύρω από το εργαλείο, θεωρώντας τη διεργασία ως ένα σύνθετο σύστημα σωληνώσεων με αντλίες και βαλβίδες. Θεώρησαν το εργαλείο ως αντλία υλικού και τη γραμμή της συγκόλλησης ως δεξαμενή τραπεζοειδούς

σχήματος και μελέτησαν τη στάθμη του αλουμινίου μέσα σε αυτή την δεξαμενή. Τα αποτελέσματα είχαν απόκλιση σε κάθε περίπτωση μικρότερη του 8% σε σχέση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Οι Cheon et al (55) στηρίχθηκαν στη μέθοδο FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) που στηρίζεται σε πεπερασμένες διαφορές και ενδείκνυται για κυρτές επιφάνειες για τη μοντελοποίηση της FSW σε πλάκες κράματος 5052 πάχους 4.8 mm, στο λογισμικό FLOW3D. Έγινε μελέτη σε όλη τη χρονική διάρκεια της βύθισης και προώθησης του εργαλείου και μελέτησαν το χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο θερμοκρασιών και τη χρονική μεταβολή της στρεπτικής ροπής του εργαλείου χωρίς να μελετούν την έκταση της ροής.

Κεφάλαιο 5

Το λογισμικό ANSYS CFX

(56)

Η πλατφόρμα ANSYS προσφέρει μια πληθώρα προγραμμάτων για αναλύσεις που καλύπτουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Τρία από αυτά τα προγράμματα προσφέρονται για ανάλυση Υπολογιστικής Υδροδυναμικής: το Fluent, το CFX και το Polyflow. Τα μοντέλα αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο CFX. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια στοιχεία του μαθηματικού και υπολογιστικού του υποβάθρου που έχουν χρησιμοποιηθεί στο υπολογιστικό μέρος.

5.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις

Για ένα μοντέλο CFD, οι εξισώσεις που επιλύονται εντός του CFX Solver είναι η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις ορμής:

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0 \quad (32)$$

Εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (33)$$

Όπου ο τανυστής των τάσεων τ :

$$\tau = \mu(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \vec{U}) \quad (34)$$

5.2 Υπόλοιπα (Residuals)

Ο επιλυτής του CFX (CFX Solver) υπολογίζει τη λύση σε διάφορες εξισώσεις, δεδομένων των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και μοντέλων για το υπό μελέτη πρόβλημα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Σε κάθε στάδιο υπολογισμών, κάθε εξίσωση δε θα ικανοποιείται επακριβώς και θα υπάρχει ένα υπόλοιπο (Residual) που εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των δύο μελών της εξίσωσης σε κάθε σημείο του χώρου του μοντέλου. Εάν η λύση είναι ακριβής, τότε το υπόλοιπο είναι μηδέν, που σημαίνει ότι η καθεμία σχετική εξίσωση πεπερασμένων όγκων ικανοποιείται ακριβώς. Ωστόσο, επειδή αυτές οι εξισώσεις μοντελοποιούν το φαινόμενο κατά προσέγγιση, αυτό δε σημαίνει

ότι η λύση ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα. Εάν η λύση συγκλίνει, τότε τα υπόλοιπα θα μειώνονται με κάθε επανάληψη (timestep).

Η τάξη μεγέθους των Residuals, σχετίζεται με την φύση του ίδιου του προβλήματος. Για παράδειγμα, αν η τιμή ενός Residual είναι 0.0005 kg/s, δεν είναι σαφές αν είναι μεγάλη ή μικρή τιμή. Επί παραδείγματι, εάν το πρόβλημα αφορά σε ροές μέσω ενός στοιχείου (element) της τάξης των 0.5 kg/s, τότε η λύση ικανοποιείται με ακρίβεια χιλιοστού, που είναι μια αρκετά λογική και άρα αποδεκτή λύση και σε αυτή την περίπτωση το υπόλοιπο θεωρείται μικρό. Αν όμως το πρόβλημα αφορά σε ροές 0.0001 kg/s ανά στοιχείο, τότε το υπόλοιπο είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με τη ροή οπότε δεν είναι αποδεκτή η λύση.

Βάσει των παραπάνω κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ενιαίας κλίμακας για την τιμή των υπολοίπων. Για αυτό το λόγο ο επιλυτής κανονικοποιεί τις τιμές αυτών. Η κανονικοποίηση περιλαμβάνει την διαίρεση με το εύρος της λύσης οπότε αν η γραμμική επίλυση αποκλίνει τότε το διάστημα στο οποίο είναι η λύση είναι πολύ μεγάλο οπότε δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Τα μη κανονικοποιημένα υπόλοιπα κανονικοποιούνται για παρατηρησιμότητα της λύσης και για έλεγχο αν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης.

Συνοπτικά η διαδικασία κανονικοποίησης, έχει ως εξής:

$$[\tilde{r}_\varphi] = \frac{[r_\varphi]}{a_p \Delta\varphi} \quad (35)$$

όπου r_φ είναι η μη κανονικοποιημένη ανισορροπία εντός όγκου ελέγχου, το a_p είναι αντιπροσωπευτικός συντελεστής του όγκου ελέγχου, και $\Delta\varphi$ είναι ένα αντιπροσωπευτικό εύρος της μεταβλητής εντός του τομέα (domain). Η ακριβής διαδικασία υπολογισμού των a_p και $\Delta\varphi$ είναι αρκετά περίπλοκη και ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας και για αυτό παραλείπεται. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αναφερθούν κάποιες βασικές ιδιότητες των συντελεστών αυτών:

1. Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα είναι ανεξάρτητα της αρχικής εκτίμησης
2. Ο συντελεστής a_p είναι ο κεντρικός συντελεστής του διακριτοποιημένου όγκου ελέγχου.
3. Για στατικές μοντελοποιήσεις (steady state simulations) το χρονικό βήμα (time step) δεν συμπεριλαμβάνεται στην διαδικασία κανονικοποίησης και έτσι εξασφαλίζεται ότι τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα είναι ανεξάρτητα του χρονικού βήματος. Σε χρονικά μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις (transient

simulations) τα μεταβατικά φαινόμενα συμπεριλαμβάνονται στο συντελεστή a_p .

Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Τα υπόλοιπα MAX (Maximum Residuals) και τα υπόλοιπα RMS (Root Mean Square Residuals). Τα MAX είναι συνήθως 10 φορές μεγαλύτερα από τα RMS Residuals, αν και κάποιες φορές είναι πολύ μεγαλύτερα, σε περιπτώσεις ασταθούς ροής. Για να γίνει έλεγχος των κριτηρίων σύγκλισης επιλέγεται ένας από τους δύο τύπους. Τα κριτήρια σύγκλισης για τον τύπο RMS Residual είναι ως εξής

Πίνακας 7 Κριτήρια σύγκλισης των RMS Residuals

$RMS > 10^{-4}$	Επαρκής σύγκλιση για ποιοτική κατανόηση της ροής
$10^{-5} < RMS < 10^{-4}$	Σύγκλιση επαρκής για κάποιες εφαρμογές, αλλά όχι η αυστηρότερη
$10^{-6} < RMS < 10^{-5}$	Επαρκής σύγκλιση για τις περισσότερες εφαρμογές
$RMS < 10^{-6}$	Πολύ αυστηρή σύγκλιση, συνήθως απαιτείται για πολύ λεπτές γεωμετρίες. Συχνά δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί τόσο αυστηρή σύγκλιση.

Το προεπιλεγμένο από τον επιλυτή κριτήριο σύγκλισης είναι $RMS < 10^{-4}$. Τα παραπάνω όρια ισχύουν για τον τύπο MAX αν πολλαπλασιαστούν επί 10.

5.3 Ισορροπία του μοντέλου

Για να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο είναι ισορροπημένο, μπορεί επιπλέον να μπει σαν περιορισμός για τη σύγκλιση ένα κριτήριο ισορροπίας (Global Balance). Το κριτήριο ισορροπίας εκφράζεται ως η μέγιστη ανισορροπία, που πρέπει να είναι κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή είναι η ποσοστιαία ανισορροπία (με προεπιλεγμένη τιμή 1%). Σε προβλήματα υδροδυναμικής η ανισορροπία πρέπει να είναι μικρότερη από 1% για να θεωρηθεί η λύση συγκλίνουσα. Σε περίπτωση επιβολής αυτού του περιορισμού στη σύγκλιση, ο επιλυτής θα σταματήσει πριν τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (που ο χρήστης έχει καθορίσει) όταν και μόνο όταν τα κριτήρια σύγκλισης των υπολοίπων ικανοποιούνται μαζί με τα κριτήρια ανισορροπίας.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 6

Κατασκευή Γεωμετρίας

Τα δοκίμια προς συγκόλληση είναι δύο πλάκες 100 mmx 200 mm με πάχος 6 mm. Κατά την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου, θεωρήθηκε γεωμετρία εργαλείου ίδια με αυτή στη διάταξη συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.



Εικόνα 22 Η μεταποιημένη φρέζα - μηχανή συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης είναι ως εξής:

Πίνακας 8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διάταξης FSW στο ENT

Τεμάχιο	Σχήμα	Μήκος (mm)	Πλάτος(mm)	Ύψος (mm)
Βάση Στήριξης	Ορθογώνιο παρ/πεδο	300	250	100
		Ακτίνα βάσης (mm)		Ύψος(mm)
Άτρακτος Στήριξης	Κύλινδρος	34.5		60
Περιαυχένιο	Κύλινδρος	11.5		45
Πείρος	Κύλινδρος	3.25		5.8

Ωστόσο, στη ροϊκή μοντελοποίηση, η βάση στήριξης των πλακών και η άτρακτος στήριξης του εργαλείου δεν επηρεάζουν τη ροή, για αυτό και θα παραλειφθούν. Όσον αφορά στο περιαιχένιο και τον πείρο, σημασία έχουν μόνο οι περιοχές επαφής τους με την πλάκα. Για αυτό το λόγο, έχουν παραλειφθεί οι όγκοι των σχημάτων και έχουν διατηρηθεί μόνο οι επιφάνειες επαφής με το μέταλλο, για οικονομία επεξεργαστικού χρόνου. Για την επιρροή του περιαιχενίου έχει θεωρηθεί πάνω στην πλάκα η περιοχή επαφής του, δηλαδή ένας κυκλικός δίσκος με εξωτερική ακτίνα, ίση με αυτή του περιαιχενίου και εσωτερική αυτή του πείρου. Για την επιρροή του πείρου, έχει αφαιρεθεί από την πλάκα ο όγκος του πείρου στη θέση στην οποία έχει εισχωρήσει, δημιουργώντας μία οπή. Τα τοιχώματά της οπής που ανοίχθηκε στη γεωμετρία της πλάκας είναι τα σημεία στα οποία το μέταλλο έρχεται σε επαφή με τον πείρο και στα οποία θα τεθούν στη συνέχεια οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες. Συνεπώς, η γεωμετρία που εν τέλει θα σχεδιαστεί στο μοντέλο είναι διαφορετική από την πραγματική και συνοψίζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9 Γεωμετρία σχημάτων μοντέλου

Τεμάχιο	Σχήμα	Διαστάσεις		
		Μήκος (mm)	Πλάτος(mm)	Ύψος (mm)
Πλάκες	Ορθογώνιο παρ/πεδο	200	200	6
		Εσ. Ακτίνα (mm)	Εξ.Ακτίνα. (mm)	---
Επιφάνεια επαφής περαιαιχενίου-πλακών	Κυκλικός δακτύλιος	3.25	11.5	
		Ακτίνα Βάσης (mm)		Ύψος (mm)
Επιφάνεια επαφής πείρου-πλακών	Κύλινδρος	3.25		5.8

Η κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου έγινε με σκοπό τη δημιουργία εξαεδρικών στοιχείων (έναντι τετραεδρικών) κατά τη διακριτοποίηση, διότι είναι πιο αποδοτικά ως προς την επεξεργαστική τους ισχύ. Παρ' όλο που τα εξαεδρικά στοιχεία είναι πιο αποδοτικά, έχουν κάποιες προϋποθέσεις ως προς την υπό διακριτοποίηση γεωμετρία, σε αντίθεση με τα τετραεδρικά στοιχεία που είναι πιο ευέλικτα ως προς τη διακριτοποίηση αλλά έχουν πιο χρονοβόρα επίλυση. Για να δημιουργηθούν εξαεδρικά στοιχεία στο εργαλείο διακριτοποίησης του Workbench (Meshing Tool), απαιτείται το εν λόγω σώμα να έχει προκύψει από σάρωση (sweep) δισδιάστατης επιφάνειας (επιφάνεια

σάρωσης) κατά μήκος καθορισμένης καμπύλης, να είναι δηλαδή “sweeprable body”. Σε άλλη περίπτωση τα στοιχεία που δημιουργούνται είναι τετραεδρικά.

Με αυτήν την αρχή, στο εργαλείο κατασκευής γεωμετρίας (ANSYS Space Claim™), η πλάκα χωρίστηκε σε πέντε τομείς, καθένας εκ των οποίων ήταν σώμα από σάρωση.

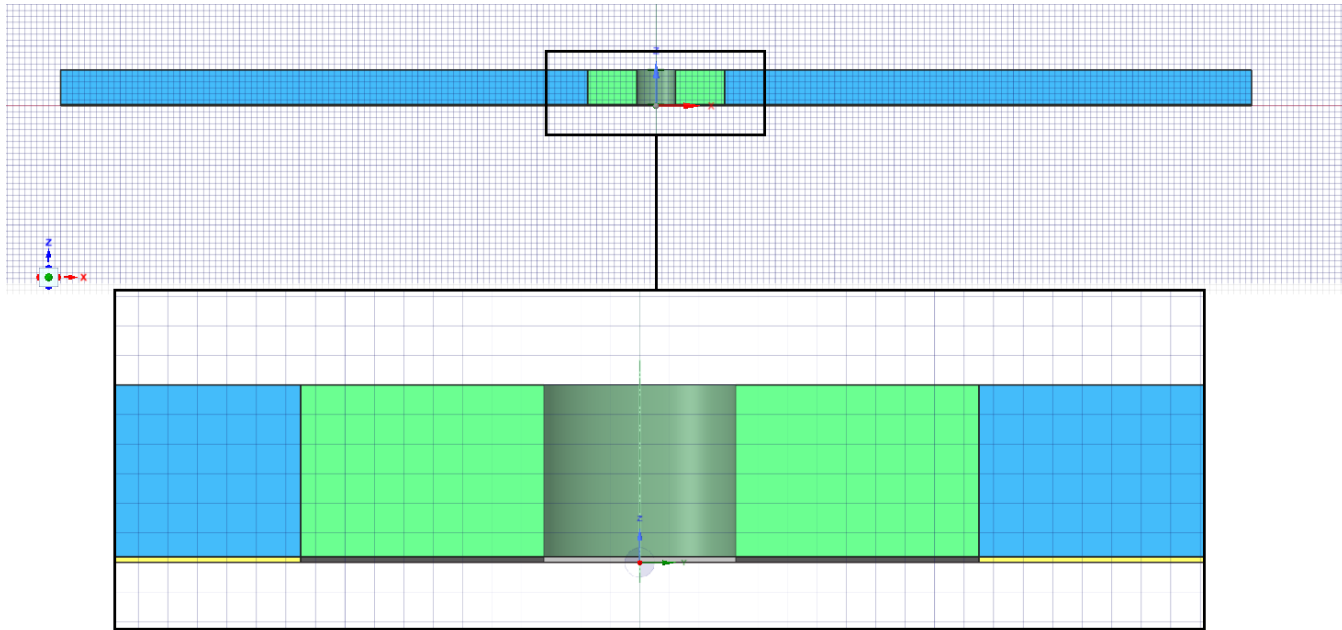
Τέλος, ενεργοποιήθηκε η επιλογή “Shared Topology” για τους τομείς της πλάκας, ώστε να υπάρχει συνέχεια του πλέγματος στα σύνορα μεταξύ των τομέων. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι με την εισαγωγή του πλέγματος στο CFX, το πλέγμα των πέντε αυτών τομέων θα είναι ενιαίο και όχι πέντε ανεξάρτητα και άρα τα πέντε πλέγματα θα συναποτελούν την πλάκα.

Ο Πίνακας 10 αφορά στους τομείς της γεωμετρίας του μοντέλου, οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 23, την Εικόνα 24 και την Εικόνα 25

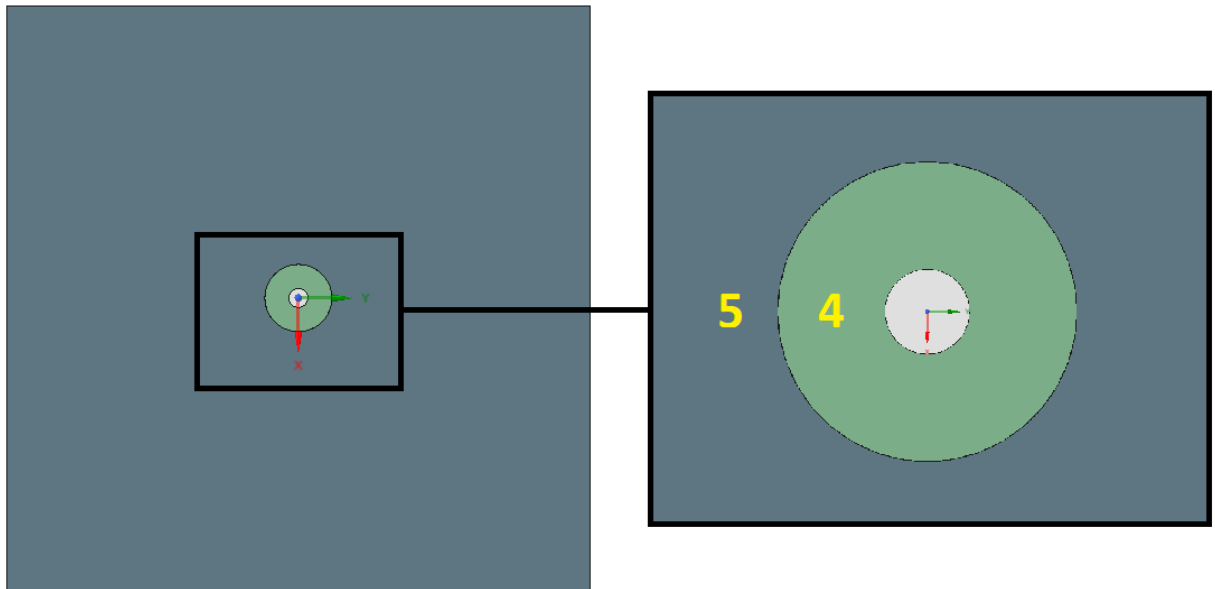
Πίνακας 10 Τομείς της γεωμετρίας του μοντέλου

Χρώμα	Τομέας	Περιγραφή Γεωμετρίας
Κίτρινο	1	Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με μήκος και πλάτος ίδια με της πλάκας και καθ' ύψος εκτείνεται από τη βάση της πλάκας έως την κατακόρυφη θέση της βάσης του πείρου με αφαίρεση κυλινδρικού κομματιού ίδιου πάχους και ακτίνας ίσης με αυτής του περιαιχηνίου.
Μαύρο	2	Κοίλος κύλινδρος με εξωτερική ακτίνα ίση με αυτή του περιαιχηνίου, εσωτερική ίση με αυτή του πείρου και καθ' ύψος εκτείνεται από τη βάση της πλάκας έως την βάση του πείρου
Γκρι	3	Κυλινδρικός όγκος της πλάκας κάτω από τον πείρο
Μπλε	4	Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με μήκος και πλάτος ίδια με της πλάκας και καθ' ύψος εκτείνεται από το κάτω άκρου του πείρου έως την άνω επιφάνεια της πλάκας με αφαίρεση κυλινδρικού κομματιού ίδιου πάχους και ακτίνας αυτής του περιαιχηνίου
Πράσινο	5	Κοίλος κύλινδρος με εξωτερική ακτίνα ίση με αυτή του περιαιχηνίου, εσωτερική ίση με αυτή του πείρου και καθ' ύψος εκτείνεται από τη βάση της πλάκας έως την βάση του πείρου

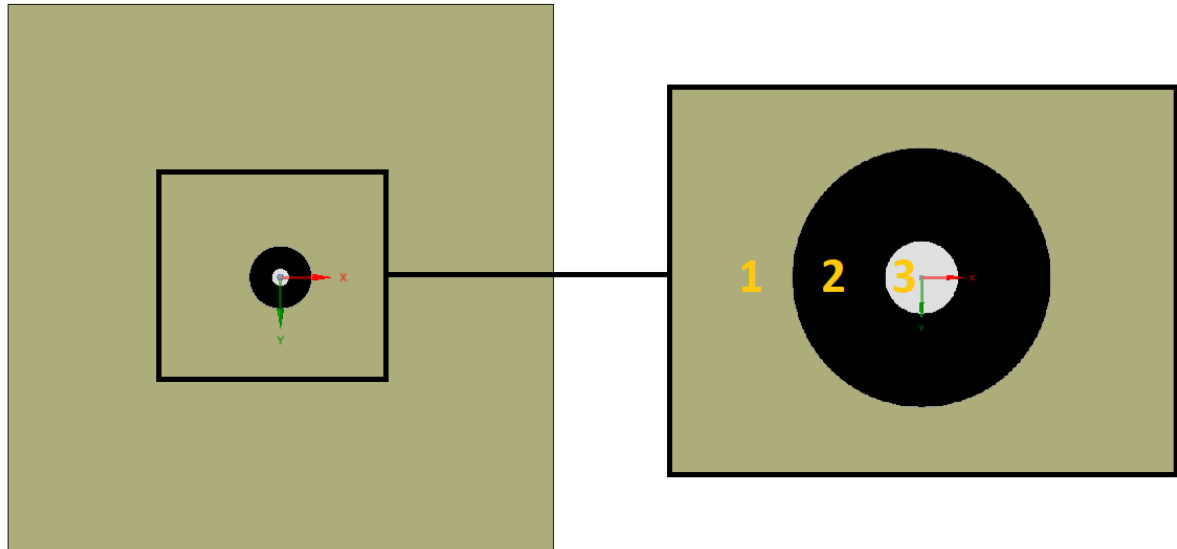
Παρακάτω παρατίθεται η γεωμετρία και ο χωρισμός σε τομείς (τα χρώματα είναι αυτά που αναφέρονται στον Πίνακα 10). Όπως φαίνεται, ο άξονας του εργαλείου διέρχεται από την αρχή του συστήματος αναφοράς (0,0,0).



Εικόνα 23 Μέση Τομή και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου



Εικόνα 24 Άνω Όψη και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου (επισημαίνονται οι τομείς 4 και 5)



Εικόνα 25 Κάτω Όψη και μεγέθυνση στην περιοχή του εργαλείου (επισημαίνονται οι τομείς 1,2 και 3)

Κεφάλαιο 7

Διακριτοποίηση (Meshing) του μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διακριτοποίηση γίνεται με σκοπό τη δημιουργία εξαεδρικών στοιχείων. Για τον χωρισμό της γεωμετρίας σε στοιχεία ακολουθήθηκαν δύο αρχές. Η μία από αυτές ήταν ότι, πρώτα καθορίστηκε ο αριθμός των στοιχείων σε συγκεκριμένες επιφάνειες κάποιων τομέων, και ύστερα, το πλέγμα των επιφανειών αυτών λειτούργησε ως “οδηγός” για την δημιουργία του πλέγματος του όγκου του τομέα, με χρήση της μεθόδου “Sweep Meshing”. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο σε sweepable σώματα και χρησιμοποιεί ως οδηγό το πλέγμα στην επιφάνεια σάρωσης. Ο χρήστης καθορίζει και το βήμα (number of divisions) κατά την κατεύθυνση σάρωσης, που σε όλες τις περιπτώσεις είναι ο κατακόρυφος άξονας z. Οι επιφάνειες-οδηγοί ήταν σε συγκεκριμένους τομείς και όχι σε όλους.

Η άλλη αρχή αφορά στη σειρά διακριτοποίησης. Το εργαλείο διακριτοποίησης, δημιουργεί στοιχεία σε κάθε τομέα με συγκεκριμένη σειρά και όχι σε όλους τους τομείς παράλληλα. Η σειρά αυτή καθορίστηκε από το χρήστη και είναι διαφορετική της προεπιλεγμένης. Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος Sweep χρησιμοποιεί ως «οδηγό» την επιφάνεια σάρωσης για τη δημιουργία του πλέγματος του τομέα. Έγινε ιδιαίτερη επεξεργασία στο πλέγμα των άνω επιφανειών των τομέων 4 και 5 το οποίο μέσω της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του πλέγματος των τομέων αυτών. Στο σύνορο των τομέων 4 και 2 και των τομέων 5 και 1, πλέον, υπάρχει πλέγμα. Με μια δεύτερη εντολή Sweep πλέον οι τομείς 1,2 και 3 αποκτούν πλέγμα, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός το πλέγμα στα σύνορα με τους άλλους τομείς. Έτσι λοιπόν φαίνεται η σημασία της σωστής σειράς διακριτοποίησης των τομέων. Εάν χρησιμοποιούσαμε την προεπιλεγμένη, θα υπήρχε σε γειτονικούς τομείς ανεξάρτητη δημιουργία πλέγματος η οποία θα παρουσίαζε ασυνέχεια στα σύνορα, παρ’ όλο που έχει επιλεγεί η «Shared Topology» κατά την κατασκευή. Για να υπερπηδηθεί αυτή η ασυνέχεια και να τηρείται η Shared Topology, το πρόγραμμα θα δημιουργούσε αυτόματα τετραεδρικά στοιχεία (και όχι τα επιθυμητά εξαεδρικά), τα οποία είναι πιο ευέλικτα ως προς τη γεωμετρία, αλλά οδηγούν σε πιο χρονοβόρα επεξεργασία.

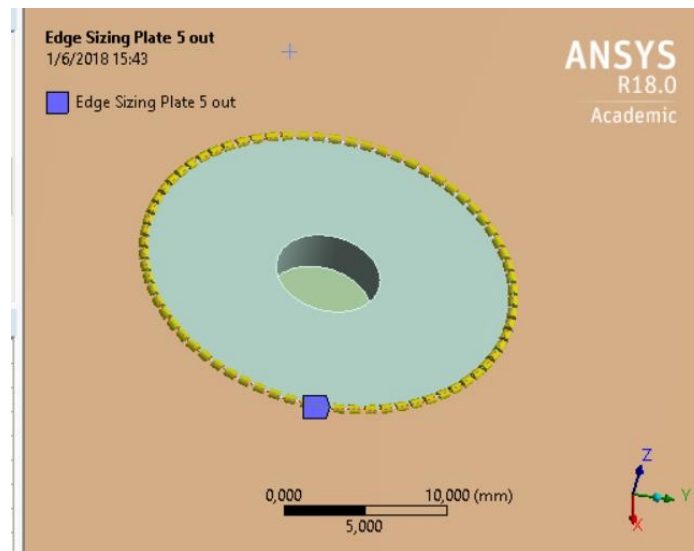
Τέλος, για να υπάρχει ομαλή αλλαγή μεγέθους των στοιχείων στα σύνορα μεταξύ τομέων, χρησιμοποιήθηκε ο περιορισμός “Inflation”, δηλαδή σταδιακή μεγέθυνση των στοιχείων για συγκεκριμένο αριθμό στρωμάτων με έναρξη από συγκεκριμένη ακμή. Ο ρυθμός μεγέθυνσης ανά στρώμα που επιλέχθηκε ήταν ο προεπιλεγμένος 1.3 και η ακμή και ο αριθμός των στρωμάτων καθορίζονται από το χρήστη.

Λόγω των παραπάνω, ορίστηκαν τα εξής (σε παρένθεση αναφέρονται τα ονόματα που δόθηκαν εντός του προγράμματος)

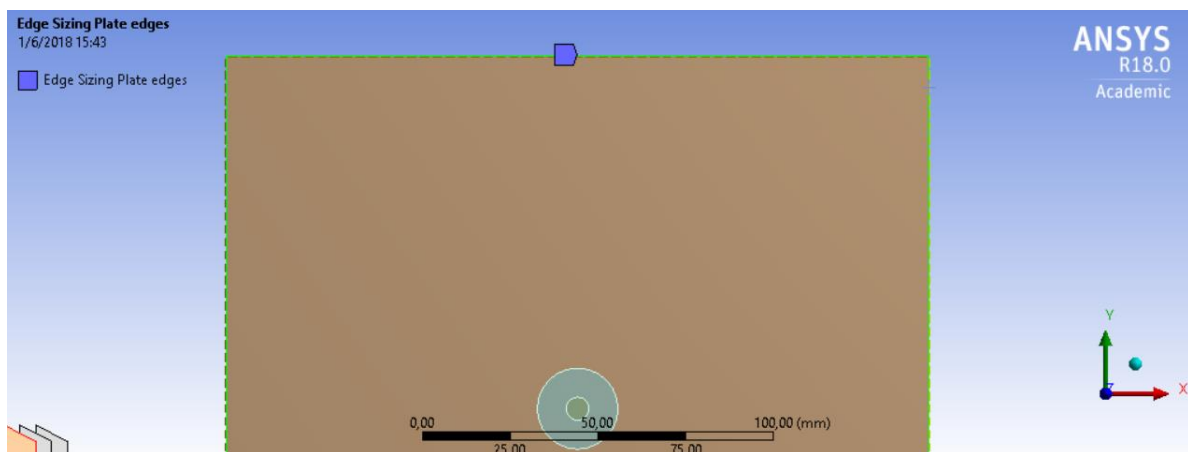
1. Αριθμός διαιρέσεων στην εσωτερική ακμή της άνω επιφάνειας του τομέα 5 (Edge Sizing Plate 5 in)



2. Αριθμός διαιρέσεων στην εξωτερική ακμή της άνω επιφάνειας του τομέα 5 (Edge Sizing Plate 5 out)



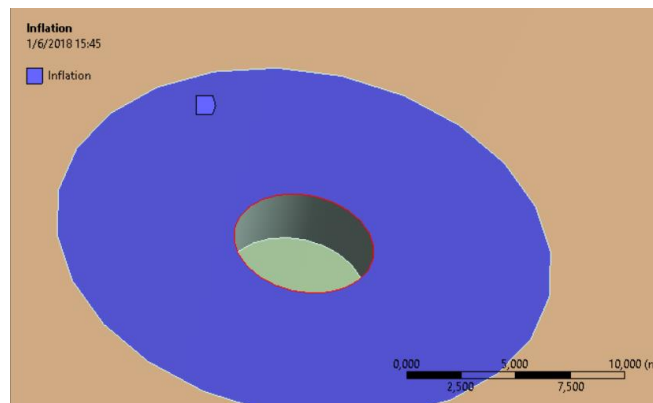
3. Αριθμός διαιρέσεων στις ακμές των πάνω επιφανειών της πλάκας - τομέας 4 (Edge Sizing Plate Edges)-Με πράσινο επισημαίνονται οι ακμές όπου επιβάλλεται ο περιορισμός



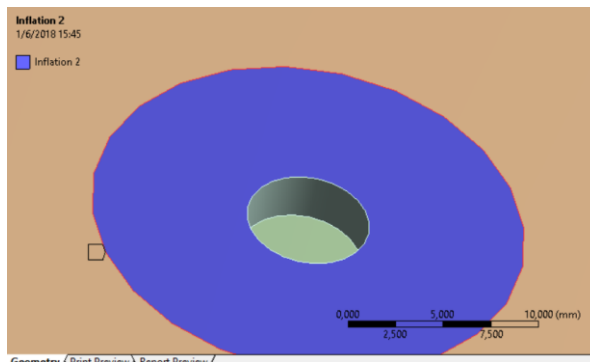
4. Αριθμός διαιρέσεων στις κατακόρυφες ακμές του τομέα 1-Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η ακμή όπου επιβάλλεται ο περιορισμός



5. Μεγέθυνση στοιχείων με έναρξη από την εσωτερική ακμή της άνω επιφάνειας του τομέα 5 (Inflation 1) - Παράμετρος είναι για πόσα στρώματα στοιχείων θα γίνεται η μεγέθυνση Με μπλε χρώμα επισημαίνεται η επιφάνεια όπου επιβάλλεται η μεγέθυνση στοιχείων(άνω επιφάνεια τομέα 5) και με κόκκινο χρώμα, η ακμή από την οποία ξεκινάει η μεγέθυνση

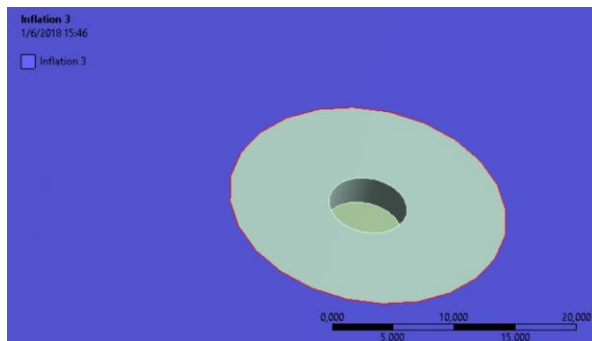


6. Μεγέθυνση στοιχείων με έναρξη από την εξωτερική ακμή της άνω επιφάνειας του τομέα 5 και κατεύθυνση προς το κέντρο (Inflation 2)- Παράμετρος είναι ο αριθμός των στρωμάτων της μεγέθυνσης Με μπλε χρώμα επισημαίνεται η επιφάνεια όπου επιβάλλεται η μεγέθυνση στοιχείων(άνω επιφάνεια τομέα 5) και με κόκκινο χρώμα, η ακμή από την οποία ξεκινάει η μεγέθυνση

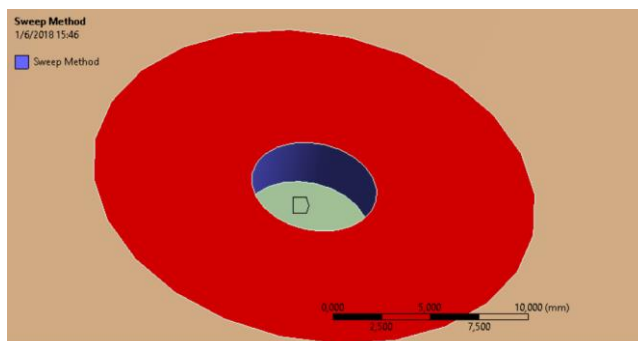


7. Μεγέθυνση στοιχείων με έναρξη από την εξωτερική ακμή της άνω επιφάνειας του τομέα 5 και κατεύθυνση προς τα άκρα της πλάκας- Παράμετρος είναι ο αριθμός των στρωμάτων της μεγέθυνσης

Με μπλε χρώμα επισημαίνεται η επιφάνεια όπου επιβάλλεται η μεγέθυνση στοιχείων(άνω επιφάνεια τομέα 4) και με κόκκινο χρώμα, η ακμή από την οποία ξεκινάει η μεγέθυνση



8. Sweep Method στον τομέα 5 με οδηγό την άνω επιφάνεια (Sweep Method)-Παράμετρος είναι ο αριθμός των διαιρέσεων κατά μήκος της διεύθυνσης σάρωσης -Με μπλε χρώμα επισημαίνεται το σώμα (τομέας 5) στο οποίο επιβάλλεται η διαίρεση και με κόκκινο χρώμα, η επιφάνεια η οποία χρησιμοποιείται ως οδηγός

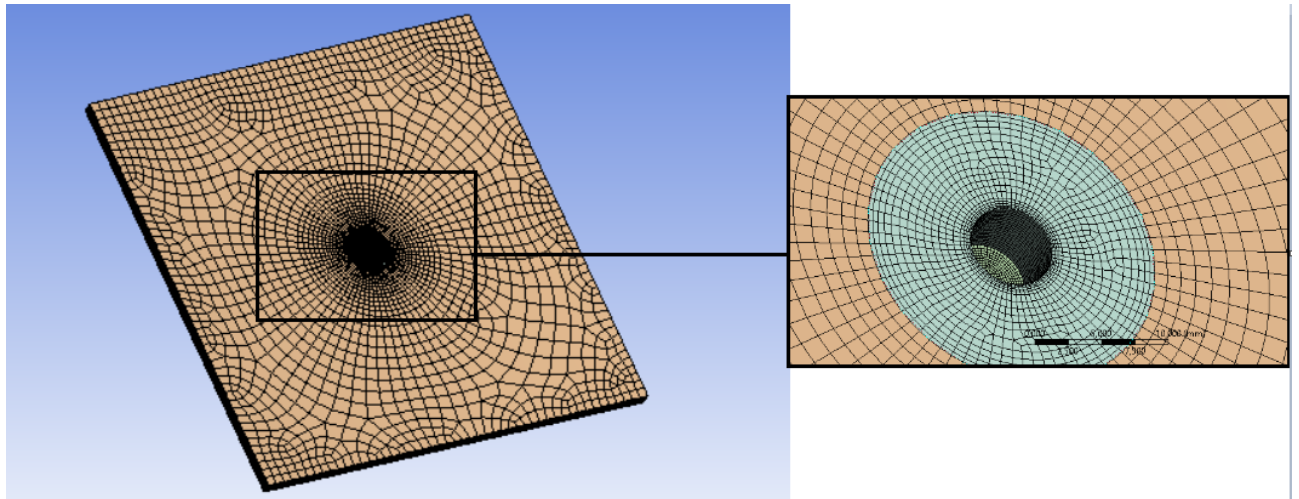


9. SweepMethod στους τομείς 1,2,3 με οδηγούς τις άνω επιφάνειές τους- Παράμετρος είναι ο αριθμός των διαιρέσεων κατά μήκος της διεύθυνσης σάρωσης (λόγω του πολύ μικρού πάχους της ζώνης δεν είναι ευδιάκριτες οι λεπτομέρειες, για αυτό και παραλείπεται η εικόνα)

Έπειτα, βάσει των παραπάνω, καθορίστηκε η σειρά με την οποία θα γίνει η διακριτοποίηση.

1. Τομέας 5
2. Τομέας 4
3. Τομέας 3
4. Τομέας 2
5. Τομέας 1

Εν τέλει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας είναι ως εξής



Εικόνα 26 Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας

Παρατηρούμε ότι το πλέγμα είναι πιο πυκνό κοντά στο εργαλείο και αραιώνει προς τα άκρα της πλάκας. Επίσης βλέπουμε ότι μεταξύ των τομέων, υπάρχει, όπως ήταν αναμενόμενο, συνέχεια στο πλέγμα.

Το μοντέλο έτρεξε σε 219.095 στοιχεία (215.437 nodes) και ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε το CFX για την επίλυση του μοντέλου ήταν 18 λεπτά και 57.35 δευτερόλεπτα. Τα κριτήρια σύγκλισης που τέθηκαν ήταν $RMS < 10^{-5}$ και Imbalance $< 1\%$, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 8

Ανάπτυξη Ροϊκού Μοντέλου

8.1 Εισαγωγή

Το ροϊκό μοντέλο αναπτύχθηκε με την μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) στο πρόγραμμα CFX του ANSYS Workbench. Λόγω ομοιομορφίας και κοινών ιδιοτήτων κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης, καθώς και λόγω της σταθερής ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου, θεωρείται ότι το στάδιο προώθησης του εργαλείου δεν περιλαμβάνει μη μόνιμα, χρονικά εξαρτώμενα, φαινόμενα. Συνεπώς, μπορούμε να επιλέξουμε στατική ανάλυση (steady-state). Στη στατική ανάλυση, αντί για την πρόσω και περιστροφική κίνηση του εργαλείου, τέθηκαν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, τόσο στις επιφάνειες επαφής του εργαλείου όσο και στα τοιχώματα των πλακών.

8.2 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Το μέταλλο βάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το κράμα αλουμινίου 6082 με σύσταση που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 11 Σύσταση του κράματος αλουμινίου 6082

Στοιχείο	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others Each Total	Al
%	0.7-1.3	0.50	0.10	0.40-1.0	0.6-1.2	0.25	0.20	0.10	0.05-0.15	Remainder

Αρχικά ορίστηκε το υλικό το οποίο είναι το αλουμίνιο. Εφ' όσον η ανάλυση θεωρεί το αλουμίνιο ως ρευστό πολύ υψηλού ιξώδους, ορίσαμε ένα νέο ρευστό με πυκνότητα αυτή του αλουμινίου και για το ιξώδες του επιλέχθηκε "Bird Carreau" κάτω από το μενού "Non Newtonian Model". Οι παράμετροι που ζητούνται από το χρήστη είναι αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω για το μοντέλο Carreau, δηλαδή ιξώδες σε μηδενική διάτμηση μ_0 [Pa s], ιξώδες σε άπειρη διάτμηση μ_∞ [Pa s], χρονική σταθερά λ [s] και ο αδιάστατος δείκτης ροής n . Η πυκνότητα του αλουμινίου για διάφορες θερμοκρασίες έχει τυπικές τιμές:

Πίνακας 12 Πυκνότητα του αλουμινίου για διάφορες θερμοκρασίες

Θερμοκρασία (Κ)	Πυκνότητα (kg/m ³)
253	2673.9
353	2642.7
453	2629.4
553	2611.5
653	2589.3
753	2567.0
853	2549.2

8.3 Domains και Boundaries

Προτού οριστούν οι συνοριακές συνθήκες, πρέπει να οριστούν “Domains” και “Boundaries”. Εν προκειμένω, οι 5 τομείς συναποτελούν ένα “Domain”. Οι μεταφράσεις των όρων είναι “τομέας” και “σύνορο” αντίστοιχα, αλλά για αποφυγή σύγχυσης με τους τομείς που ορίστηκαν στη γεωμετρία και τα σύνορα αυτών θα χρησιμοποιούνται εφεξής οι αγγλικοί όροι.

Το Domain της πλάκας ορίστηκε ως ρευστό (Fluid Domain), στο οποίο ως υλικό καθορίστηκε το αλουμίνιο, όπως ορίστηκε παραπάνω. Για το Domain αυτό ορίστηκε σταθερή θερμοκρασία 500 °C, μια μέση θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Επίσης η ροή εντός του Domain ορίζεται ως “Laminar”.

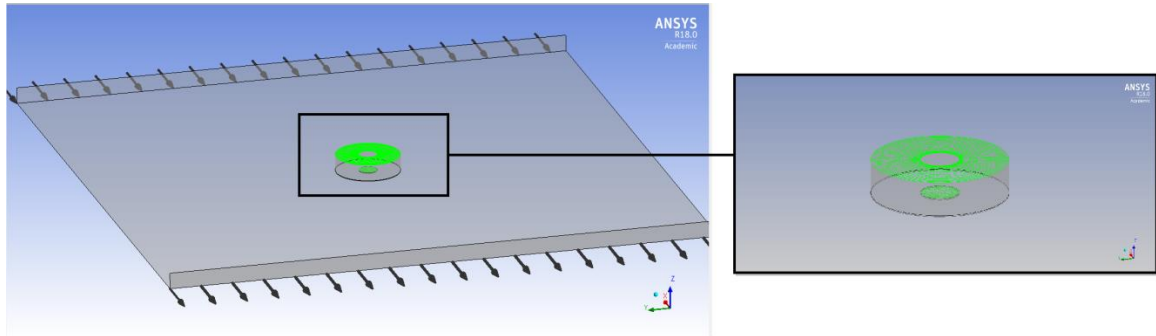
Τα Boundaries που ορίστηκαν ήταν:

- το άκρο εισόδου της ροής (Inlet)
- το άκρο εξόδου της ροής (Outlet)
- η επιφάνεια επαφής με την παράπλευρη επιφάνεια του πείρου (PinSide)
- η επιφάνεια επαφής με τη βάση του πείρου (Pin Bottom)
- η επιφάνεια επαφής με τη βάση του περιαιχενίου (Shoulder)
- τα λοιπά τοιχώματά της πλάκας (Walls)

8.4 Συνοριακές Συνθήκες

Στη βάση του πείρου και τη βάση του περιαιχενίου (Pin Bottom και Shoulder) τέθηκε η συνθήκη “Rotating Wall” με γωνιακή ταχύτητα $\delta\omega$. Όπου δ ο

αδιάστατος συντελεστής ολίσθησης που εκφράζει την προσκόλληση του μετάλλου στο εργαλείο ($0 < \delta < 1$) και ω η γωνιακή ταχύτητα του εργαλείου [rad/s] με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού (counter-clockwise). Η περιστροφή γίνεται περί τον άξονα z.

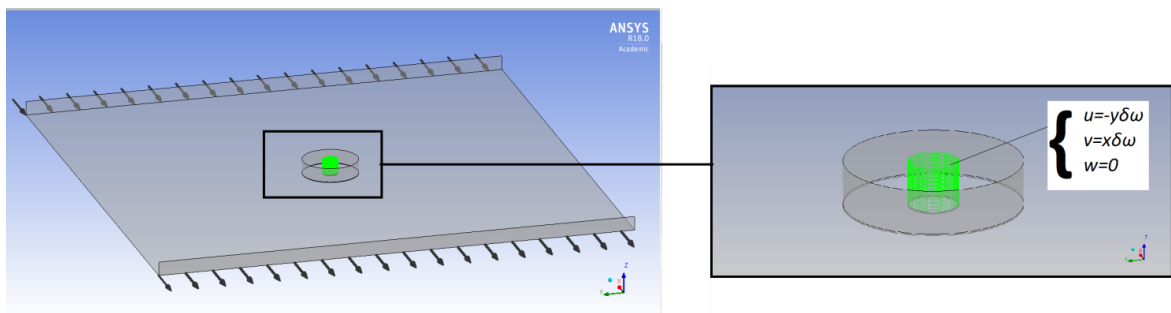


Εικόνα 27 Συνοριακές συνθήκες στο περιαυχένιο και τη βάση του πείρου
 Στην παράπλευρη επιφάνεια του πείρου, αρχικά τέθηκε η ίδια συνθήκη “Rotating Wall”, αλλά κατά την εφαρμογή του μοντέλου στον εργαλείο επίλυσης παρουσιάστηκαν προβλήματα σύγκλισης. Για αυτόν το λόγο τέθηκε εκεί ξεχωριστή σχέση για τις συνιστώσες (u,v,w) του διανύσματος της ταχύτητας (\vec{u}). Συγκεκριμένα:

$$u = -\gamma\delta\omega \quad (36i)$$

$$v = \chi\delta\omega \quad (36ii)$$

$$w = 0 \quad (36iii)$$



Εικόνα 28 Συνοριακές συνθήκες στην παράπλευρη επιφάνεια του πείρου

Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε περιστροφή του εργαλείου με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού και το διάνυσμα της ταχύτητας σε οποιοδήποτε σημείο επαφής έχει εφαπτόμενη ταχύτητα ίση με $\delta\omega r$, όπου r η

ακτινική θέση

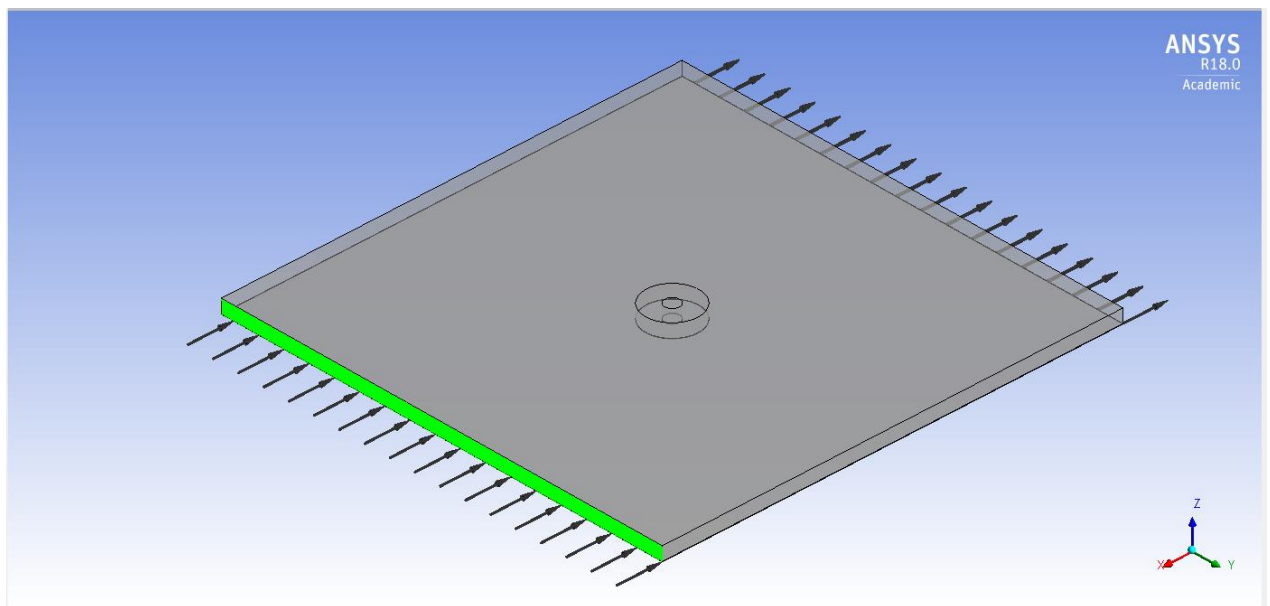
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Στο άκρο εισόδου της ροής (Inlet) ορίστηκε ταχύτητα μέσω των συνιστωσών της:

$$u = -u_{WELD} \quad (37i)$$

$$v = 0 \quad (37ii)$$

$$w = 0 \quad (37iii)$$



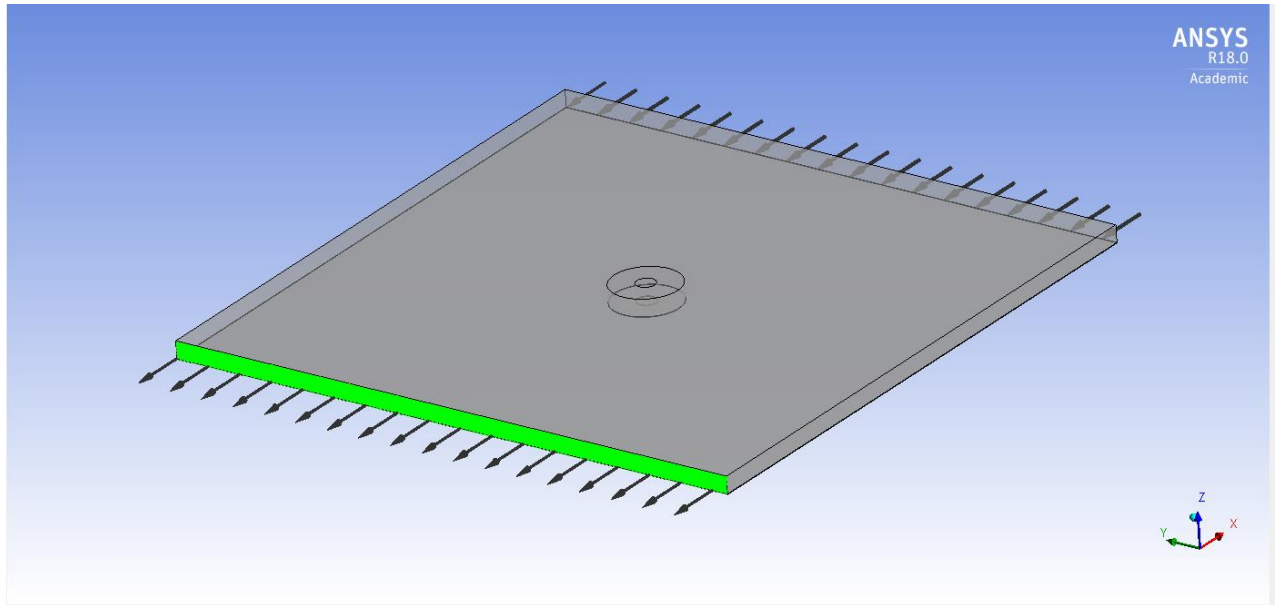
Εικόνα 29 Είσοδος ροής

Στο άκρο εξόδου της ροής, είθισται να τίθεται συνθήκη πίεσης (1 atm), αλλά με τέτοιου είδους συνθήκη παρουσιάζοταν πρόβλημα ανισορροπίας της λύσης που δεν κατέληγε σε σύγκλιση. Για αυτό ορίστηκε και στο άκρο εξόδου ταχύτητα μέσω των συνιστωσών της:

$$u = -u_{WELD} \quad (38i)$$

$$v = 0 \quad (38ii)$$

$$w = 0 \quad (38iii)$$



Εικόνα 30 Έξοδος ροής

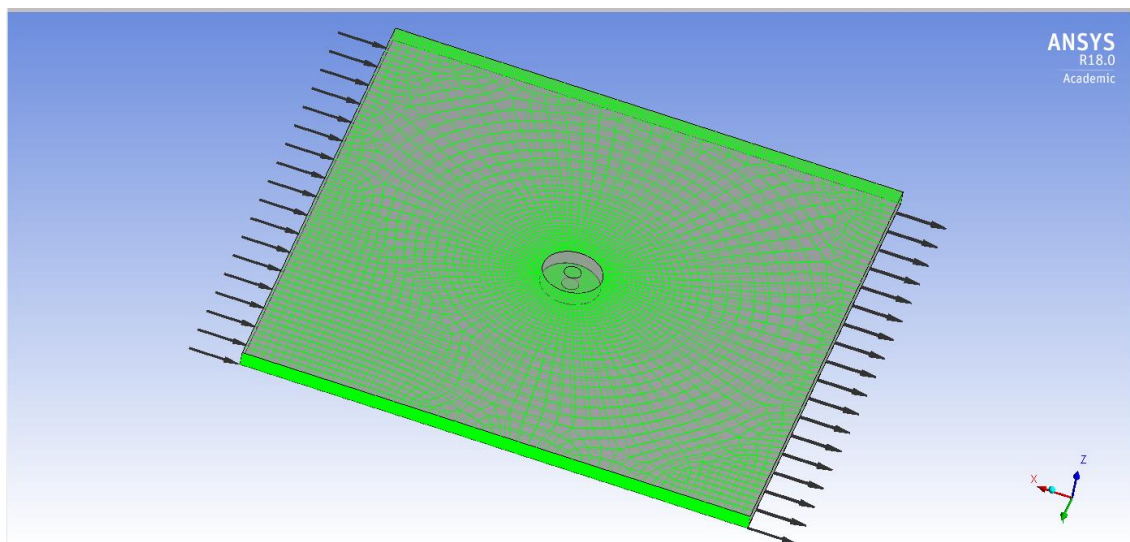
Τα υπόλοιπα τοιχώματα ορίστηκαν ως κινούμενα (Moving Walls) και η ταχύτητά τους ορίστηκε μέσω των συνιστωσών της:

$$u = -u_{WELD} \quad (39i)$$

$$v = 0 \quad (39ii)$$

$$w = 0 \quad (39iii)$$

Έτσι εισάγεται στο μοντέλο η πληροφορία ότι και τα υπόλοιπα τοιχώματα ρέουν με ίδια ταχύτητα με το εισερχόμενο ρευστό.



Εικόνα 31 Τοιχώματα της πλάκας

Η υ- συνιστώσα της ταχύτητας έχει σε όλες τις επιφάνειες της πλάκας, μέτρο ίσο με την ταχύτητα προώθησης του εργαλείου, αλλά με αντίθετη φορά από αυτή που έχει στην πραγματικότητα η κατεύθυνση συγκόλλησης. Αυτό γίνεται, ώστε να μπορεί να αντιληφθεί το πρόγραμμα την πρόσω κίνηση του εργαλείου.

Βάσει των παραπάνω συνοριακών συνθηκών, η διεύθυνση συγκόλλησης ταυτίζεται με τον άξονα x ενώ η προωθούμενη πλευρά (AS) είναι στα θετικά y και η υποχωρούσα (RS) στα αρνητικά y .

8.5 Παράμετροι συγκόλλησης

Η συγκόλληση προσομοιώθηκε με ταχύτητα πρόωσης 75 mm/ min και περιστροφική ταχύτητα εργαλείου 750 RPM. Για την επιλογή του συντελεστή προσκόλλησης και των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου του ιξώδους γίνεται ανάλυση στο κεφάλαιο 9.

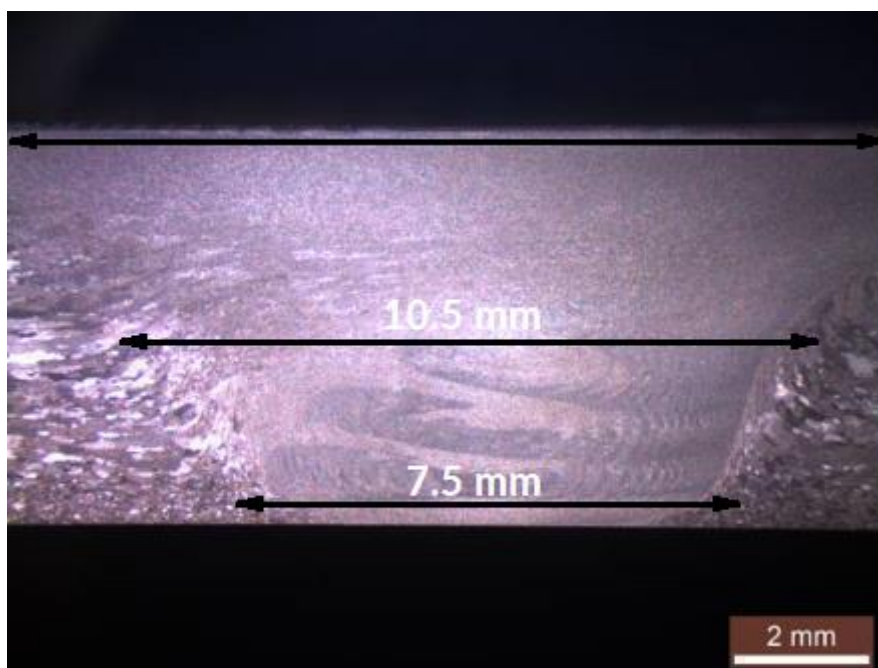
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Κεφάλαιο 9

Αποτελέσματα Ροϊκού Μοντέλου

9.1 Πείραμα Αναφοράς

Προτού αναλυθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου, παρατίθενται πειραματικά αποτελέσματα, με τα οποία θα γίνει σύγκριση.



Εικόνα 32 Πείραμα αναφοράς

Η έκταση της περιοχής ανάδευσης που περιλαμβάνει δύο ζώνες (Stir Zone και TMAZ) μετρήθηκε ως εξής:

Πίνακας 13 Διαστάσεις ροής σε τρεις κατακόρυφες θέσεις της πλάκας

Θέση	Πλάτος περιοχής ανάδευσης [mm]
Πάνω επιφάνεια	23.6
Μέσοπάχους	10.5
Κάτω επιφάνεια	7.5

Στην παρούσα εικόνα, δε φαίνεται η πλήρης έκταση της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης στο πάνω μέρος της πλάκας, για αυτό λήφθηκε ως αναφορά η τιμή από άλλο πείραμα με ίδιο εργαλείο (57). Επίσης από πειράματα που έχουν γίνει με ίδιο εργαλείο (διαμέτρου 23 mm) (59), προκύπτει

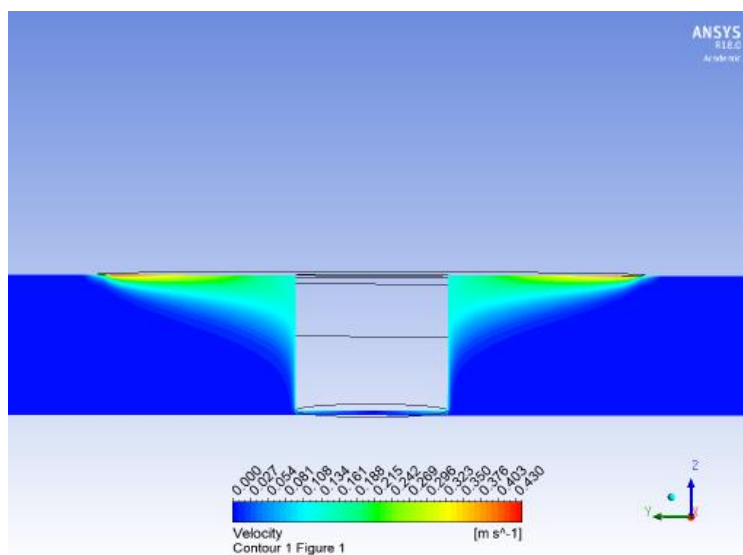
ότι στο πάνω μέρος της πλάκας η ροή έχει πλάτος περίπου ίσο με τη διάμετρο του περιαιχενίου. Για αυτό το λόγο θεωρούμε ως αναφορά τα 23.6 mm για το πάνω μέρος της πλάκας.

9.2 Διερεύνηση ως προς το συντελεστή ολίσθησης και τις παραμέτρους του ιξώδους

9.2.1 Συντελεστής Ολίσθησης

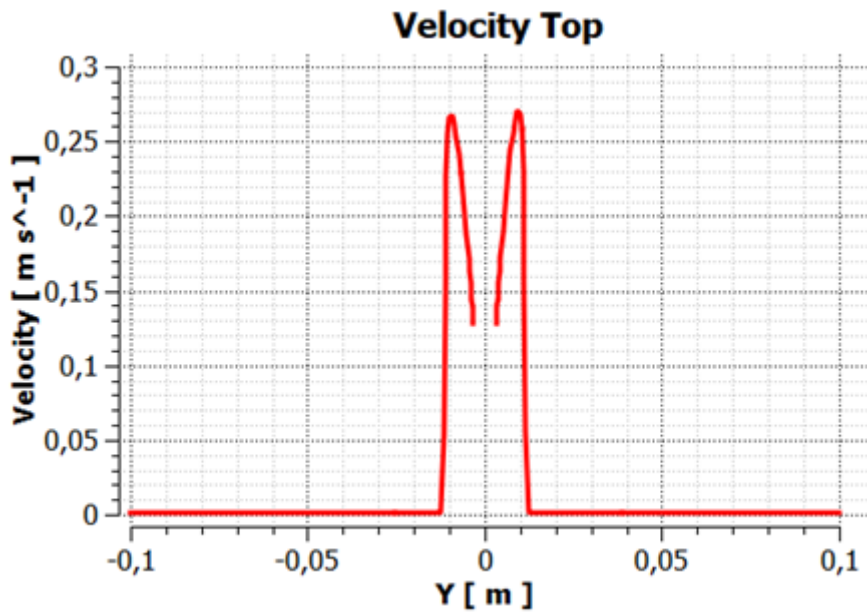
Ο συνήθης συντελεστής ολίσθησης για ροϊκές μοντελοποιήσεις της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι 0.5. Ωστόσο, στο υπό μελέτη μοντέλο ο συντελεστής αυτός οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη ροϊκή ακτίνα από την πειραματικά αναμενόμενη στο μέσο της πλάκας.

Συγκεκριμένα το προφίλ της ροής διαμορφώνεται ως εξής:

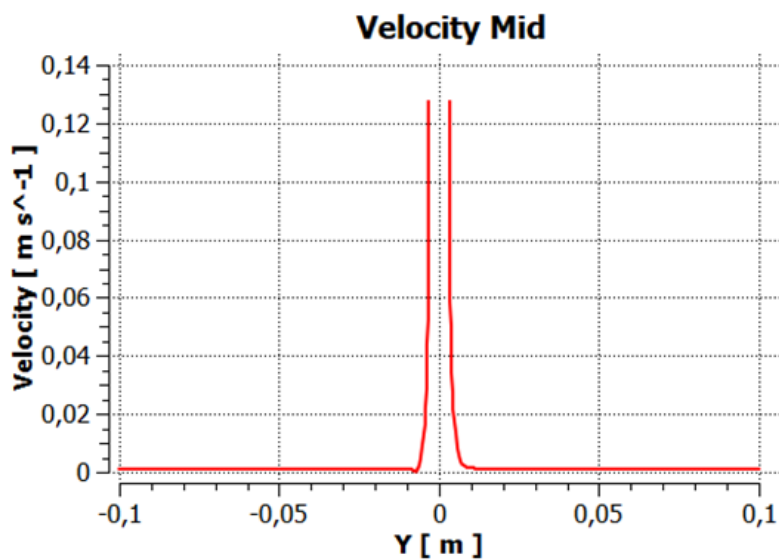


Εικόνα 33 Προφίλ ροής για συντελεστή ολίσθησης $\delta=0.5$ (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)

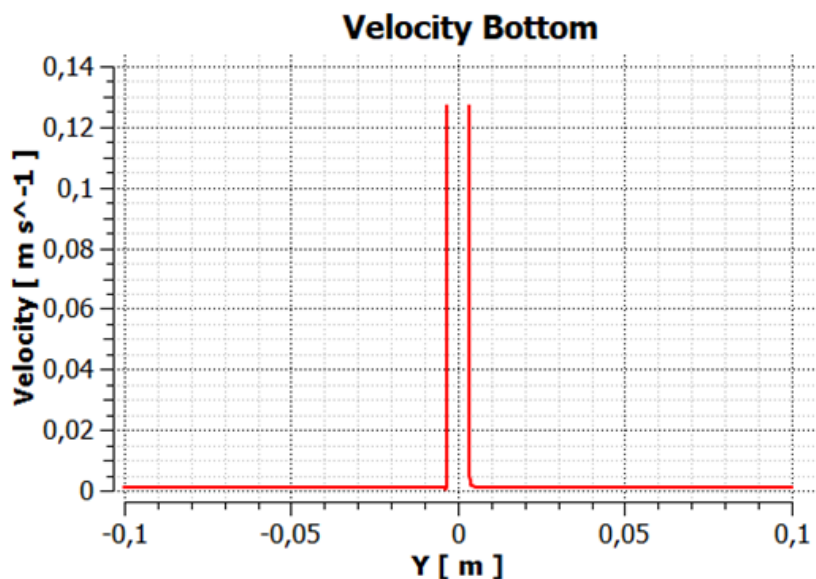
Η ταχύτητα λαμβάνει τις εξής τιμές στις 3 υπό μελέτη θέσεις της πλάκας:



Εικόνα 34 Ταχύτητα στο πάνω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 35 Ταχύτητα στο μέσο του πάχους της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 36 Ταχύτητα στο κάτω μέρος της πλάκας (AS: $y>0$, RS: $y<0$)

Η ροϊκή ακτίνα έχει τις εξής διαστάσεις, όπως μετρήθηκε από τα παραπάνω διαγράμματα:

Πίνακας 14 Ροϊκή ακτίνα μοντέλου και πειράματος για $\delta=0.5$

Θέση	Ροϊκή ακτίνα στη Retreating Side [mm]	Ροϊκή ακτίνα στην Advancing Side [mm]	Συνολική έκταση ροής [mm]	Πειραματική έκταση ροής [mm]
Πάνω μέρος	12.3	12.3	24.6	23.6
Μέσο πάχους	7.2	9.8	17.0	10.5
Κάτω μέρος	3.6	4.1	7.7	7.5

Μετά από δοκιμές προκύπτει ο βέλτιστος συντελεστής προσκόλλησης:

$$\delta = 0.13 \quad (40)$$

9.2.2 Μελέτη παραμέτρων ιξώδους

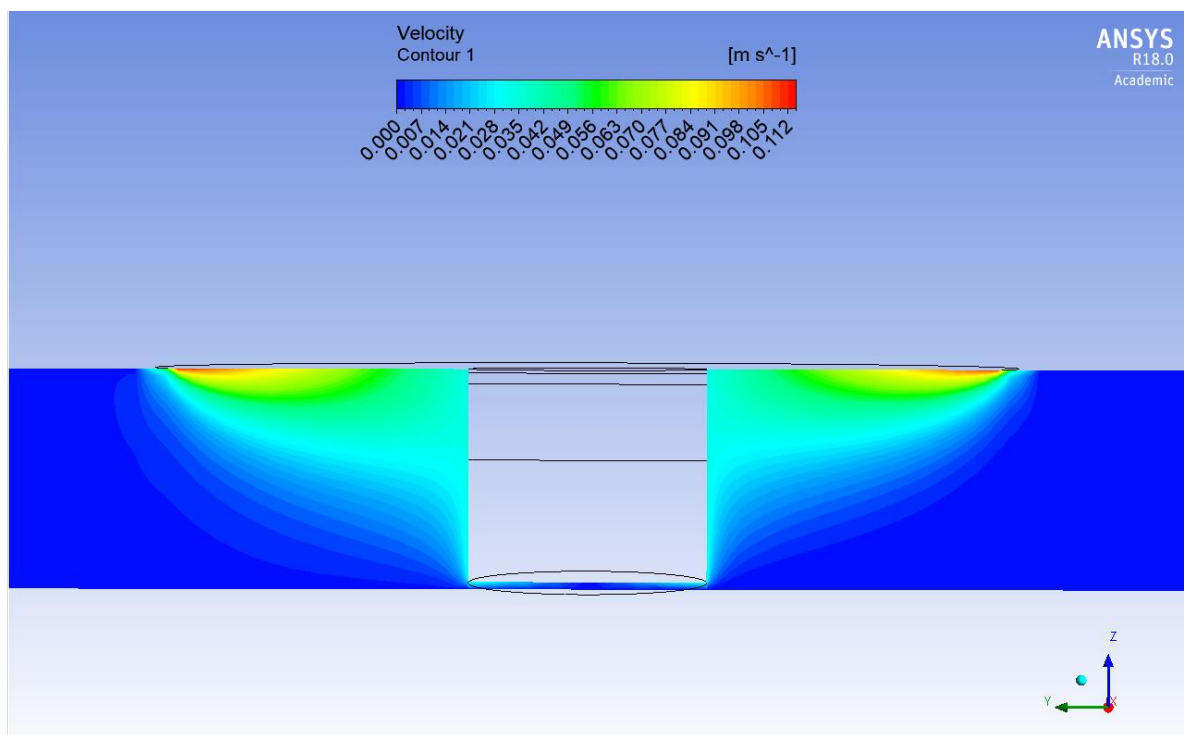
Υπενθυμίζεται το μοντέλο Carreau για το ιξώδες:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\dot{\gamma}\lambda)^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (41)$$

Οι παράμετροι για το ιξώδες σε μηδενική (μ_0) και άπειρη (μ_{∞}) διάτμηση δεν έχει νόημα να αλλαχθούν, εφ' όσον εμείς τους έχουμε δώσει πολύ μεγάλη και μηδενική τιμή, αντίστοιχα ώστε να οριοθετηθεί το ιξώδες. Αντίθετα, τίθενται υπό μελέτη στο παρόν εδάφιο οι παράμετροι λ (χρονική σταθερά) και n (Power Law Index), διότι αυτές αφορούν στον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το

ιξώδες εντός των ορίων. Οι τιμές που είθισται να λαμβάνονται είναι $\lambda=10$ s και $n=0.2(36)$.

Βλέπουμε ότι για αυτές τις τιμές η μορφή της ροής είναι τελείως διαφορετική από την αναμενόμενη, για αυτό και δεν έχει νόημα η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.



Εικόνα 37 Προφίλ ροής για $\lambda=20sn=0.2$ (AS: $\gamma>0$, RS: $\gamma<0$)

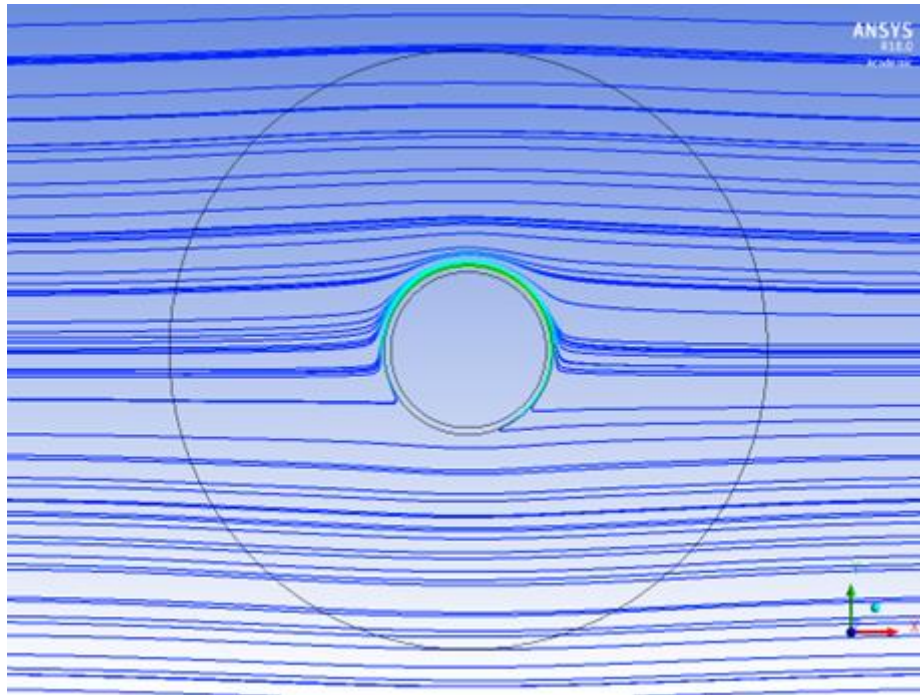
Κατόπιν δοκιμών, οι βέλτιστες τιμές που προέκυψαν είναι

$$\lambda = 20 \text{ s} \quad (42i)$$

$$n = 10^{-7} \quad (42ii)$$

9.3 Μελέτη επίδρασης του πείρου

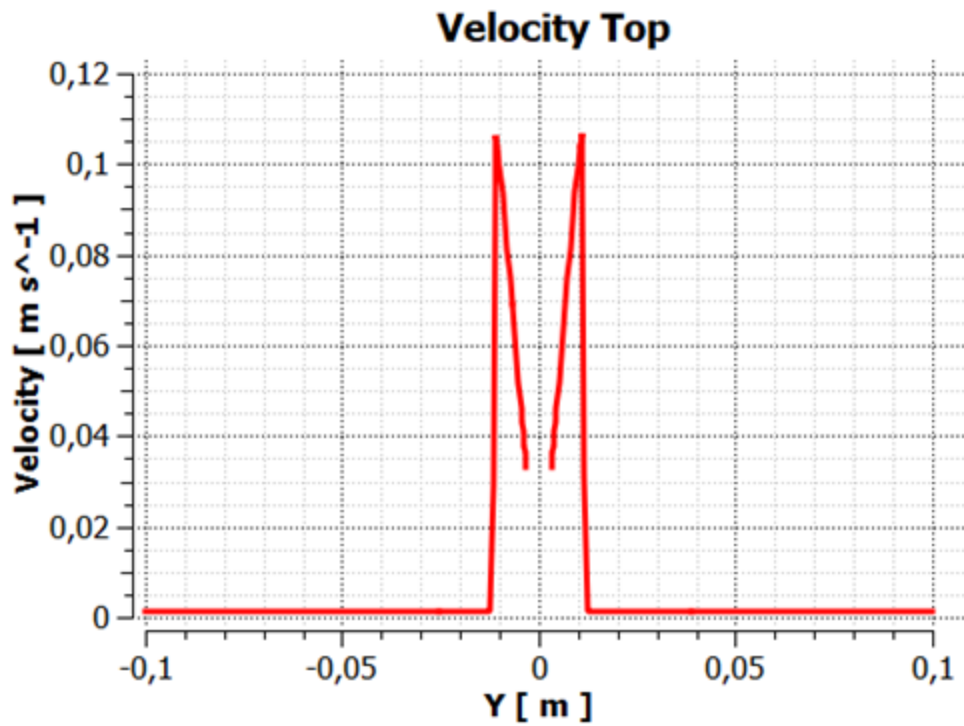
Θέτοντας $\delta=0$ για το περιαιχένιο και κρατώντας σταθερά $\delta=0.13$ για τον πείρο μελετάμε την επίδραση του πείρου στη ροή και ουσιαστικά μηδενίζουμε την επίδραση του περιαιχενίου. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας. Παρατηρείται ότι η επίδραση του πείρου είναι πάρα πολύ μικρή, με τη ροϊκή ακτίνα να εκτείνεται λίγο πέρα από τα σύνορά του. Παρατίθεται για σύγκριση και το μέγεθος του περιαιχενίου.



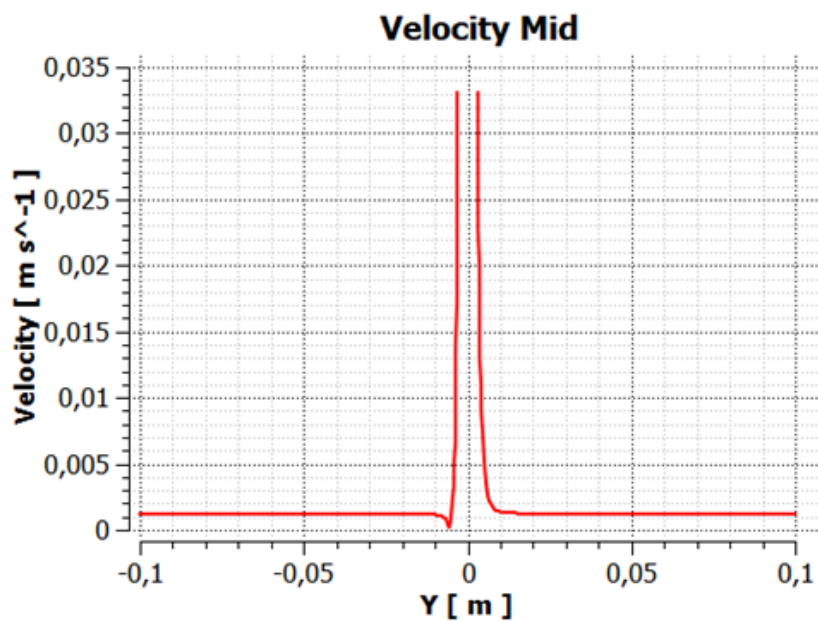
Εικόνα 38 Ροϊκές γραμμές στο μέσο του πάχους της πλάκας υπό την επίδραση μόνο του πείρου χωρίς το περιαυχένιο (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

9.4 Συνδυασμένη επίδραση πείρου και περιαυχενίου (τελικό μοντέλο)

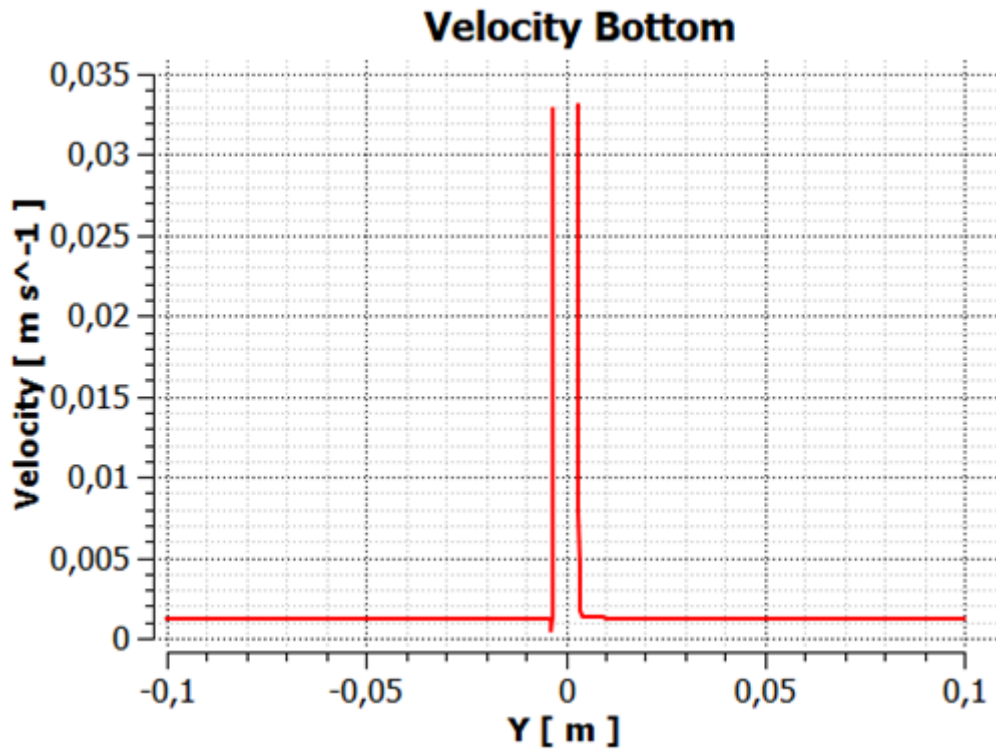
Από το μοντέλο που αναπτύχθηκε, μελετήθηκαν οι τιμές των ταχυτήτων στο πάνω μέρος της πλάκας, στο μέσο του πάχους και στο κάτω μέρος της.



Εικόνα 39 Ταχύτητες στο πάνω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

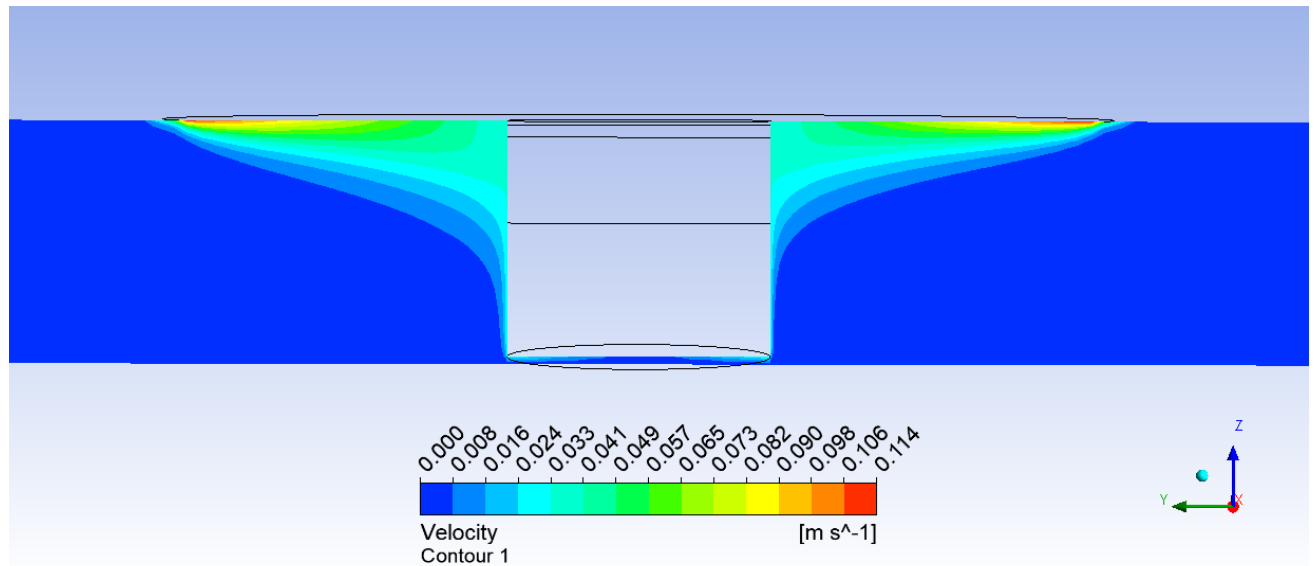


Εικόνα 40 Ταχύτητες στο μέσο του πάχους της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 41 Ταχύτητες στο κάτω μέρος της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

Ενώ συνολικά, το προφίλ της ροής διαμορφώθηκε ως έξης:



Εικόνα 42 Προφίλ ροής με τις σωστές παραμέτρους (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

Από τα παραπάνω η ροϊκή ακτίνα μετρήθηκε για τις τρεις αυτές περιοχές ως εξής:

Πίνακας 15 Ροϊκή ακτίνα μοντέλου σε τρεις διαφορετικές θέσεις της πλάκας

Θέση	Ροϊκή ακτίνα στη Retreating Side [mm]	Ροϊκή ακτίνα στην Advancing Side [mm]	Συνολική έκταση ροής [mm]
Πάνω μέρος	12.3	12.4	24.7
Μέσο πάχους	5.2	6.0	11.2
Κάτω μέρος	3.4	4.2	7.6

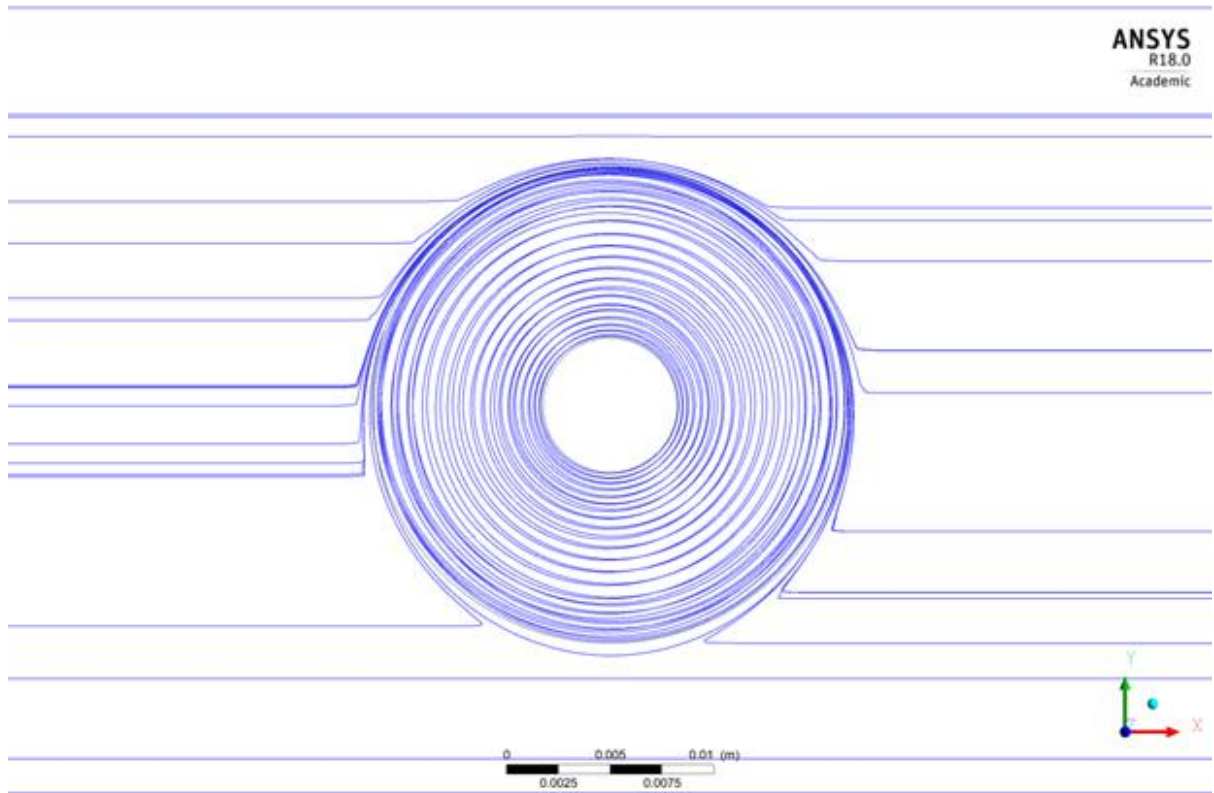
Την εγκυρότητα των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορούμε να την επιβεβαιώσουμε συγκρίνοντας τα με αντίστοιχα πειραματικά, τα οποία προέκυψαν κατά τη συγκόλληση ιδίων διαστάσεων πλακών AA6082 με ίδιων διαστάσεων εργαλείο, όπως παρατίθεται στην Εικόνα 32 στην ενότητα 9.1 .

Πίνακας 16 Σύγκριση ροϊκής ακτίνας μοντέλου και πειράματος

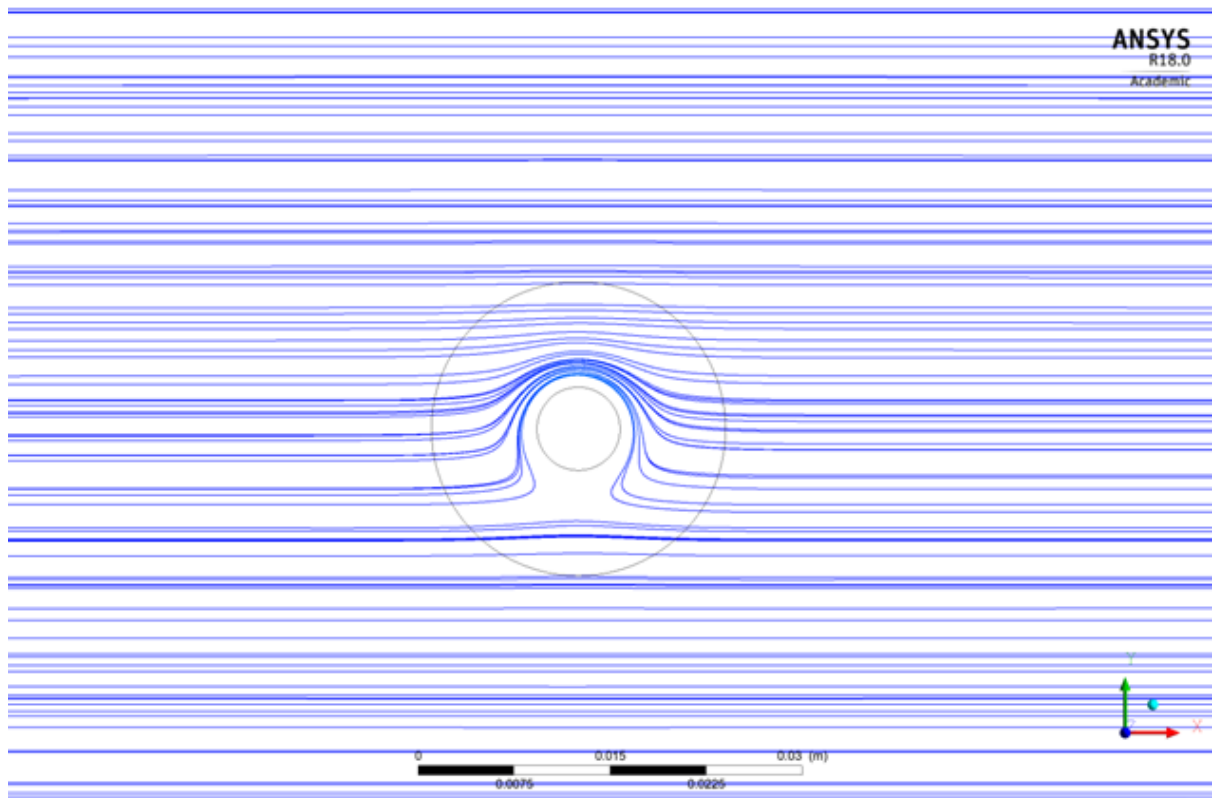
Θέση	Αποτελέσματα Μοντέλου [mm]	Πειραματικά αποτελέσματα [mm]
Πάνω μέρος	24.7	23.6
Μέσο πάχους	11.2	10.5
Κάτω μέρος	7.6	7.5

9.5 Μελέτη της ροής

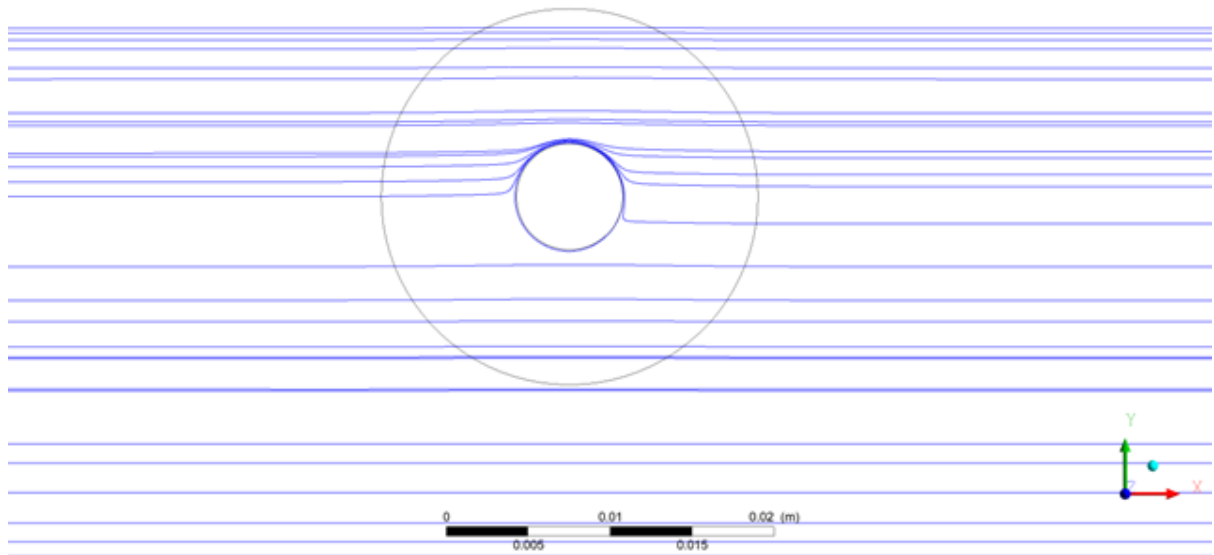
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι γραμμές ροής στην περιοχή του εργαλείου για τρεις διαφορετικές θέσεις (πάνω επιφάνεια, μέσο πάχους, κάτω επιφάνεια) της πλάκας. Οι γραμμές ροής έχουν αρχή στην είσοδο (Inlet) και τερματίζουν στην έξοδο (Outlet), αλλά όπως φαίνεται είναι σχεδόν ευθείες και δεν παρουσιάζουν κάποια μεταβολή, για αυτό γίνεται εστίαση στην περιοχή του εργαλείου που λαμβάνουν χώρα τα υπό μελέτη φαινόμενα. Οι κυκλικές γραμμές ροής δείχνουν την περιστροφή του υλικού γύρω από τον πείρο. Όπως είναι ήδη γνωστό από την μέτρηση της ροϊκής ακτίνας, η ακτίνα περιστροφής μειώνεται από το πάνω μέρος της πλάκας μέχρι την επιφάνεια στήριξης, διότι στα ανώτερα στρώματα είναι πολύ μεγαλύτερη η επίδραση του περιαιχενίου σε σχέση με τα χαμηλότερα. Είναι, επίσης, εμφανής η διαφορά στις ροϊκές γραμμές μεταξύ προωθούμενης ($y > 0$) και υποχωρούσας πλευράς ($y < 0$).



Εικόνα 43 Γραμμές ροής στην άνω επιφάνεια της πλάκας (AS: $y>0$, RS: $y<0$)

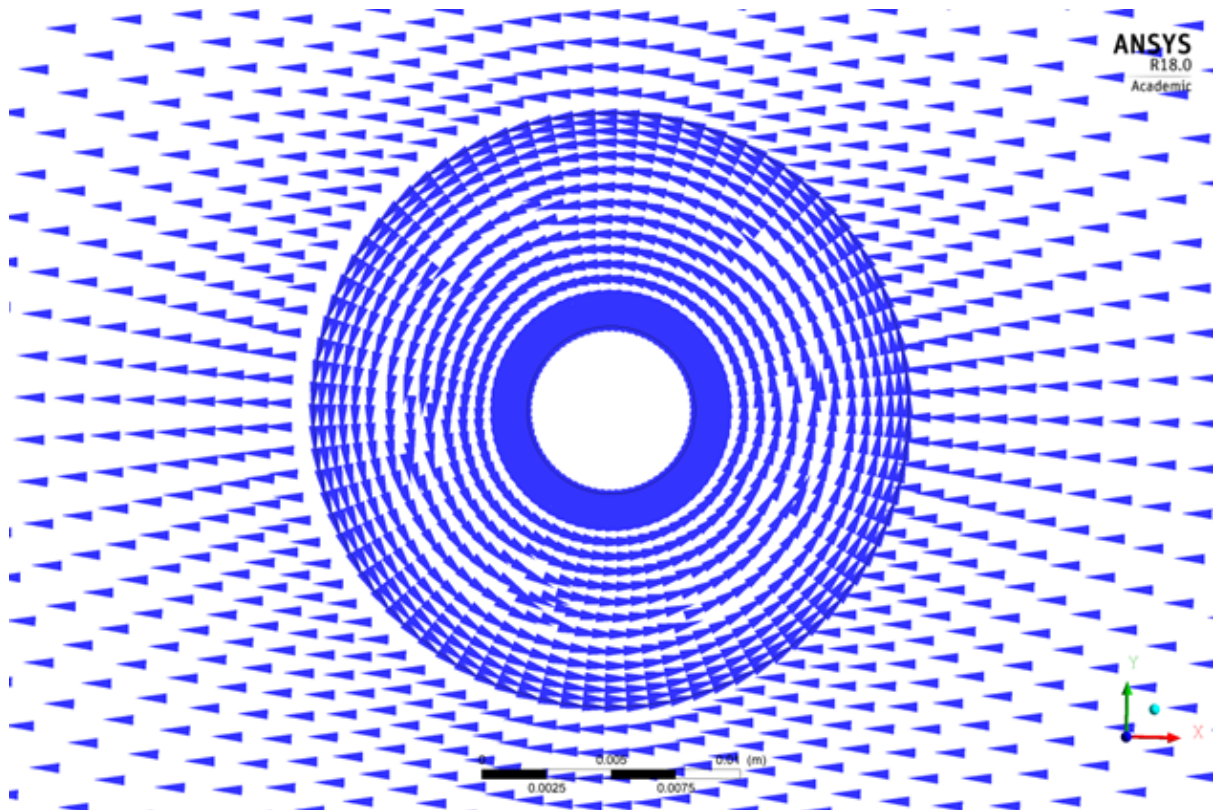


Εικόνα 44 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους (επιλέχθηκε πιο πυκνή παράσταση γραμμών ροής για καλύτερη ανάδειξη του φαινομένου) (AS: $y>0$, RS: $y<0$)

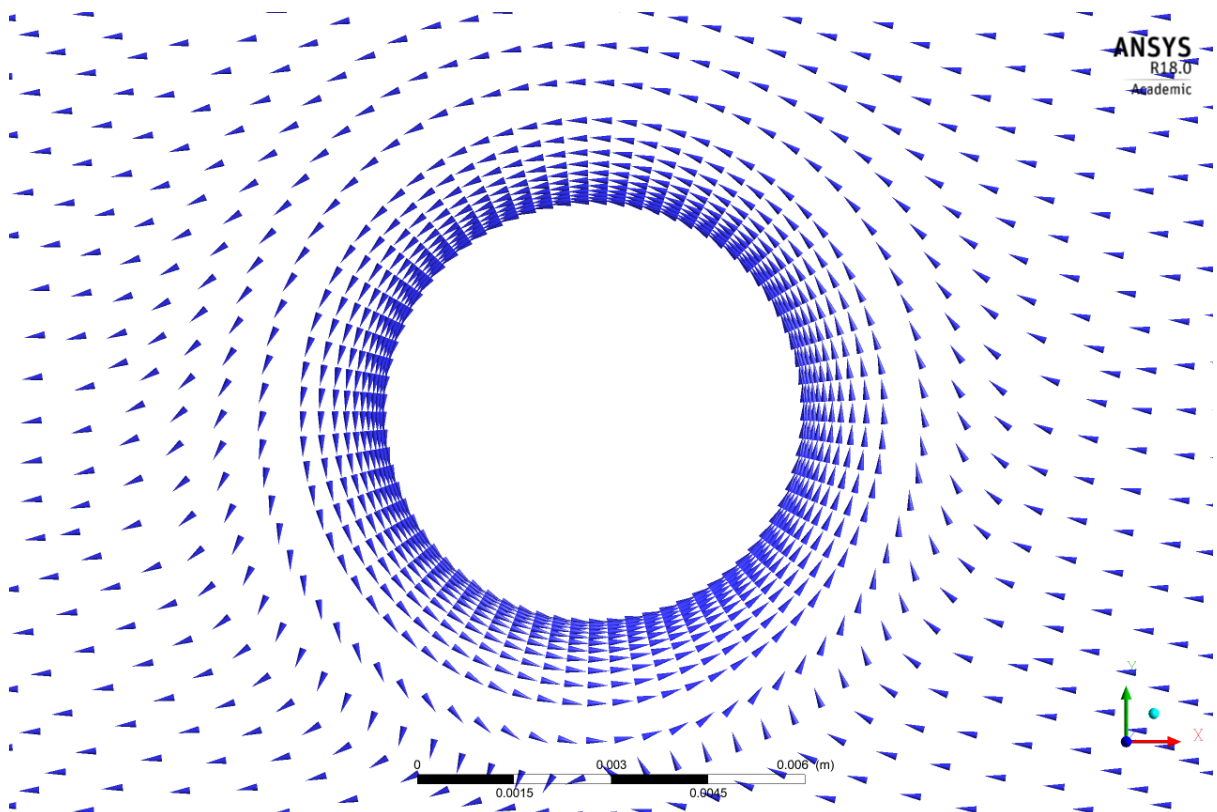


Εικόνα 45 Γραμμές ροής στην κάτω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

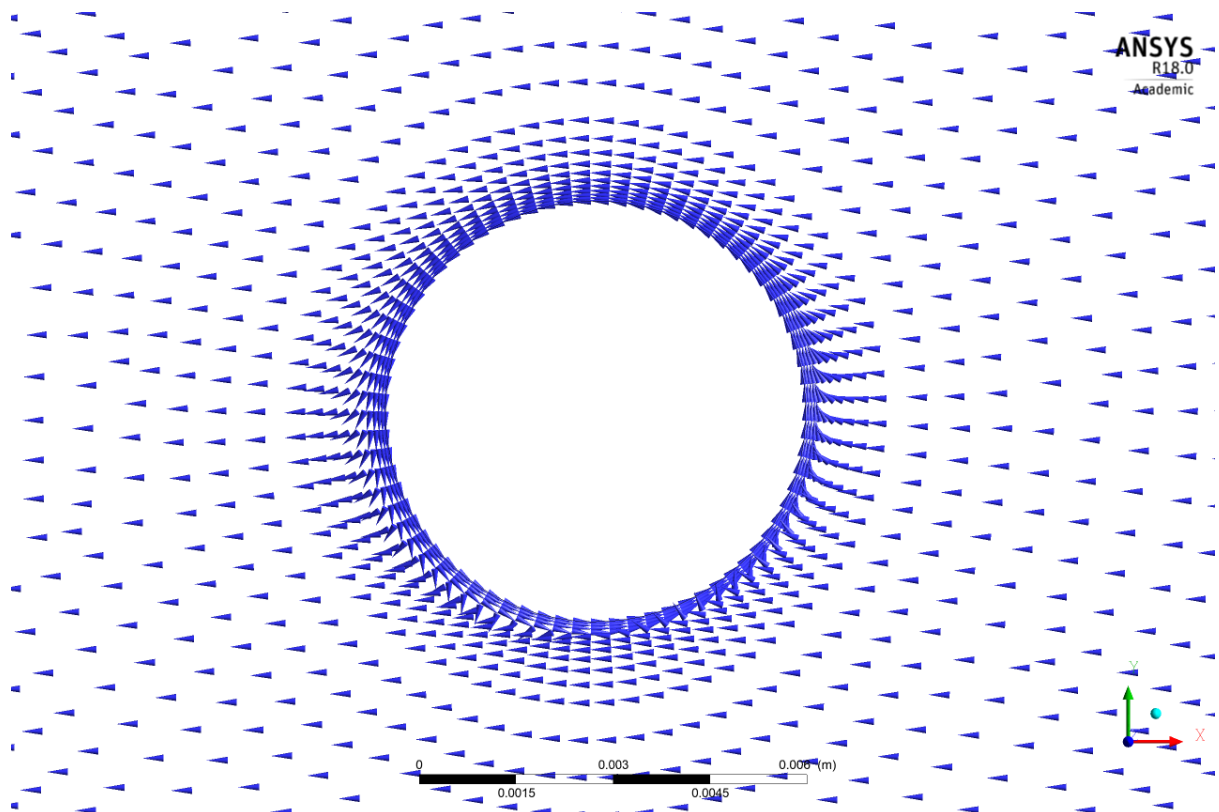
Αν απεικονίσουμε τη ροή μέσω των διανυσμάτων της ταχύτητας, παρουσιάζεται σαφώς ότι στην προωθούμενη πλευρά η κίνηση των μορίων είναι ομόρροπη με την ταχύτητα της ροής. Αντίστοιχα, στην υποχωρούσα φαίνεται η αντίρροπη κίνηση των σωματιδίων σε σχέση με την κίνηση της υπόλοιπης ροής. Επιπλέον φαίνεται και στις τρεις περιπτώσεις η κυκλική ροή γύρω από το εργαλείο προτού εναποτεθεί το υλικό στο πίσω μέρος του εργαλείου.



Εικόνα 46 Διανύσματα ταχυτήτων στην άνω επιφάνεια της πλάκας (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



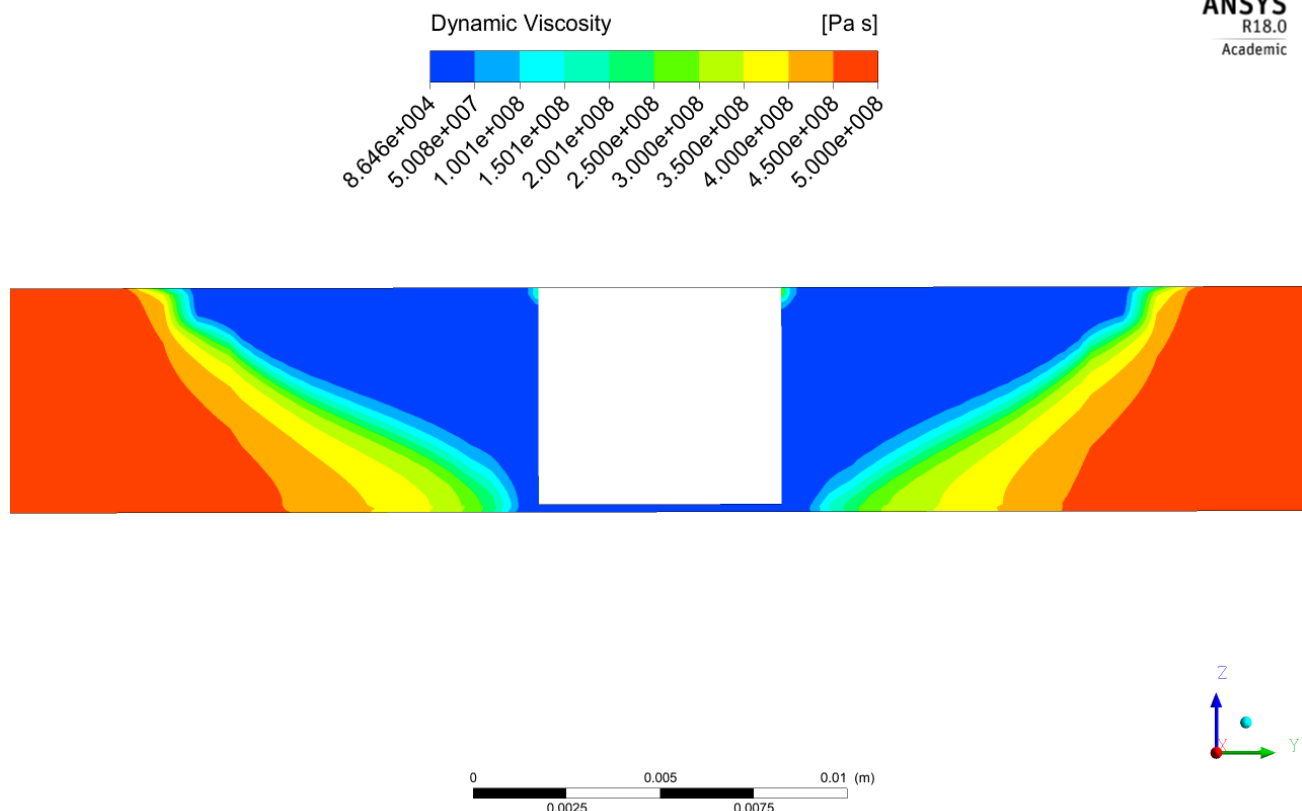
Εικόνα 47 Διανύσματα ταχυτήτων στο μέσο του πάχους (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 48 Διανύσματα ταχυτήτων στην κάτω επιφάνεια της πλάκας
(AS: $y>0$, RS: $y<0$)

9.6 Κατανομή του ιξώδους

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το ιξώδες μοντελοποιήθηκε με βάση το μοντέλο Carreau και η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων εξηγείται στο εδάφιο 9.3.2. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε την κατανομή που ακολουθεί το ιξώδες σε εγκάρσια τομή γύρω από το εργαλείο της συγκόλλησης.

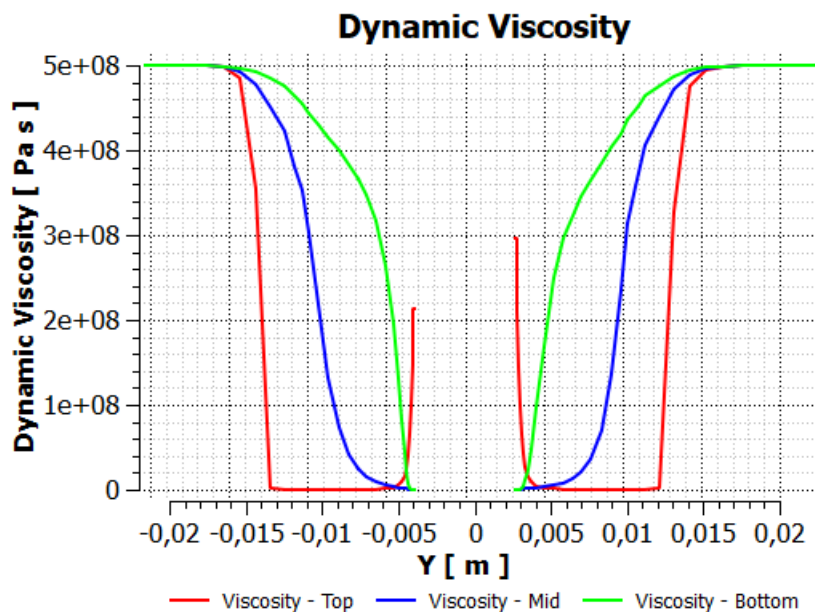


Εικόνα 49 Κατανομή δυναμικού ιξώδους στην περιοχή του εργαλείου
(AS: $y > 0$, RS: $y < 0$)

Παρατηρείται ότι σε περιοχές κοντά στο εργαλείο, το ιξώδες είναι χαμηλό, κάτι που είναι αναμενόμενο, δεδομένης της ύπαρξης ροής. Επίσης υπάρχει μια απότομη μεταβολή στο ιξώδες (κατά τρεις τάξεις μεγέθους από 8.646×10^4 Pa s σε 5.008×10^7 Pa s). Η ζώνη χαμηλού ιξώδους είναι η ζώνη στην οποία υπάρχει πλαστικοποίηση του υλικού, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει ανακρυστάλλωση. Στην περιοχή υψηλού ιξώδους (μεγαλύτερο από 5.008×10^7 Pa s) λαμβάνουν χώρα παραμορφώσεις που οφείλονται στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Ωστόσο, δε μπορούμε να οριοθετήσουμε αυστηρά την Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη στο παραπάνω μοντέλο διότι κάτι τέτοιο θα απαιτούσε, εκτός από τον προσδιορισμό της ροής και ακριβή προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου.

Είναι εμφανές ότι το πλάτος της ζώνης χαμηλού ιξώδους μειώνεται όσο κατευθυνόμαστε στα χαμηλότερα στρώματα της πλάκας. Λαμβάνοντας δειγματοληπτικά τις τιμές του ιξώδους σε εγκάρσια τομή της περιοχής του εργαλείου ($-20 \text{ mm} < y < 20 \text{ mm}$), από τρία διαφορετικά ύψη (άνω επιφάνεια, μέσο πάχος, κάτω επιφάνεια) προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα που δείχνει την εμφανή μείωση πλάτους της ζώνης χαμηλού ιξώδους, όσο κατευθυνόμαστε προς τα χαμηλότερα στρώματα. Παρατηρούμε ότι η ζώνη

χαμηλού ιξώδους είναι περίπου ίση με τη μετρούμενη ροϊκή ακτίνα στις αντίστοιχες θέσεις.



Εικόνα 50 Κατανομή του ιξώδους σε τρεις διαφορετικές κατακόρυφες θέσεις της πλάκας (AS: $y>0$, RS: $y<0$)

Η καθ' ύψος αλλαγή στο ιξώδες είναι αναμενόμενη διότι σε περιοχές κοντά στο περιαυχένιο υπάρχει μεγαλύτερη διάδοση θερμότητας άρα και περισσότερη πλαστικοποίηση. Αν και εδώ έχουμε κάνει θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας (ίση με μια μέση θερμοκρασία), η ποιοτική κατανομή του ιξώδους είναι αρκετά ικανοποιητική.

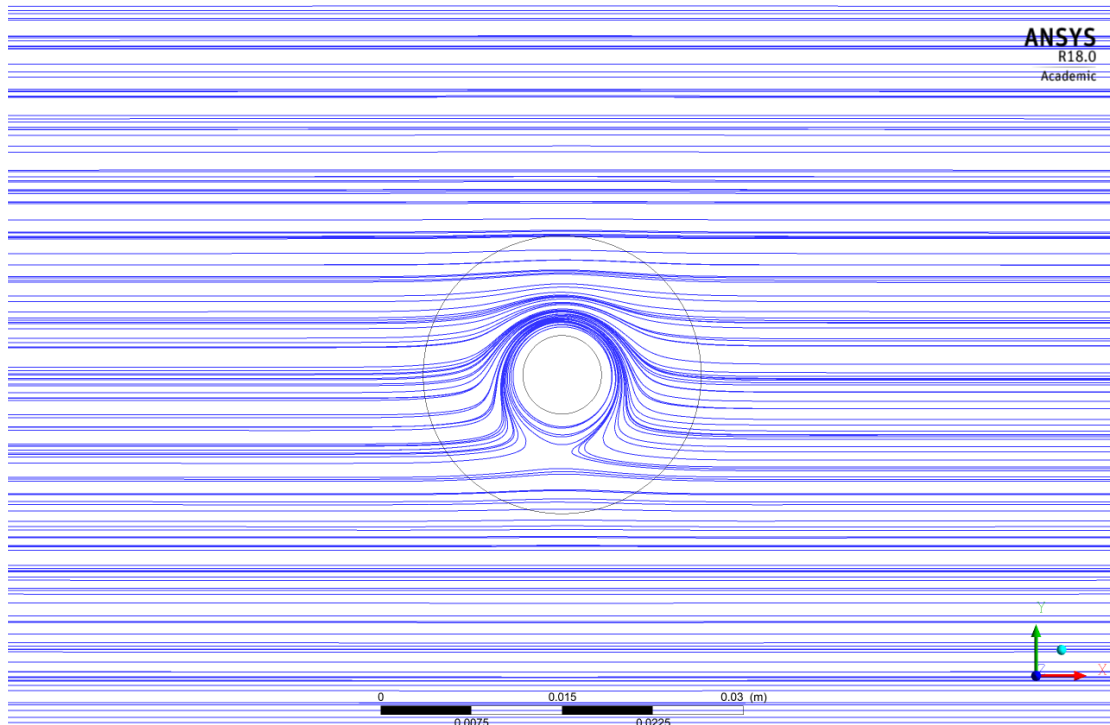
Κεφάλαιο 10

Μελέτη επίδρασης παραμέτρων συγκόλλησης

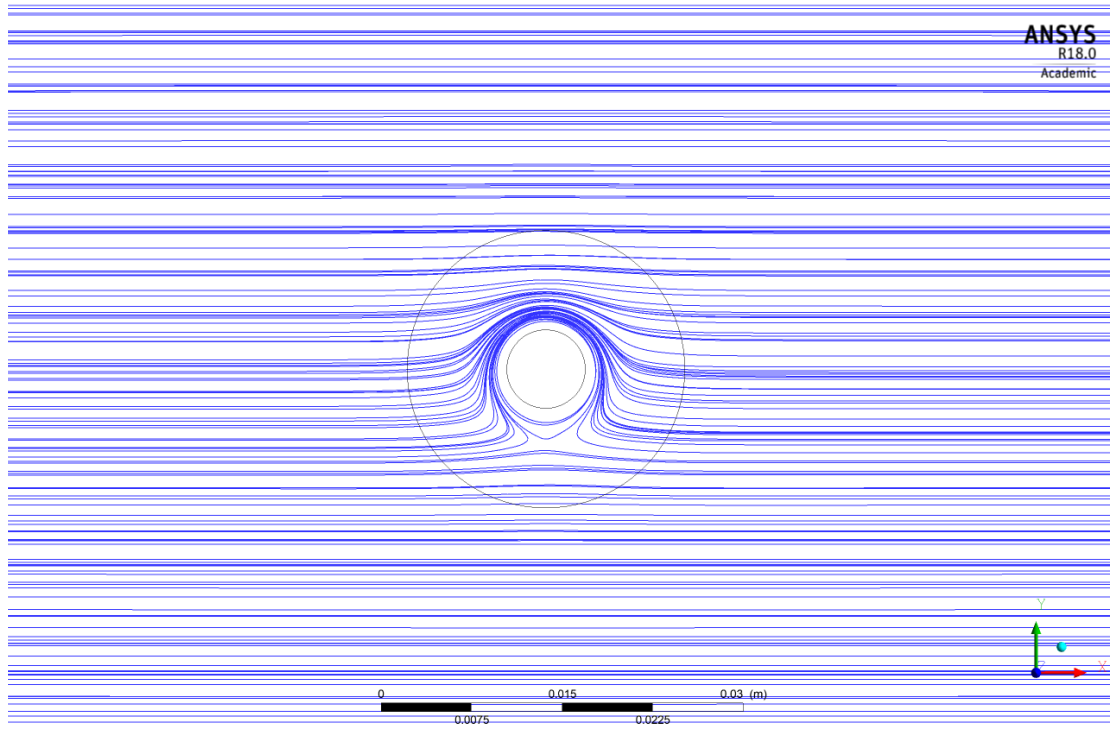
10.1 Ταχύτητα πρόωσης

Στο ήδη υπάρχον μοντέλο, με ίδια γεωμετρία και ίδια περιστροφική ταχύτητα (750 RPM), έγινε μεταβολή στην παράμετρο της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου (u_{weld}), όπως αυτή ορίστηκε στο εδάφιο 8.4. Οι διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης του εργαλείου που μελετήθηκαν ήταν 47.5, 60, 118 mm/min. Παρατηρούμε ότι, δεν υπάρχει ιδιαίτερη μεταβολή στην ποιότητα των ροϊκών γραμμών ούτε διαφορά στη ροϊκή ακτίνα για τις διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης. Στα διαγράμματα της ταχύτητας βέβαια, παρατηρούμε ότι η καμπύλη της ταχύτητας για μεγάλες αποστάσεις από τον άξονα του εργαλείου φτάνει σε ένα πλατώ διαφορετικής τιμής, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού έχουμε δώσει για τις ανάγκες της μοντελοποίησης ταχύτητα στη ροή μέτρου ίσο με αυτό της ταχύτητας πρόωσης οπότε η ελάχιστη τιμή που θα παίρνει θα είναι περίπου ίδια με αυτή.

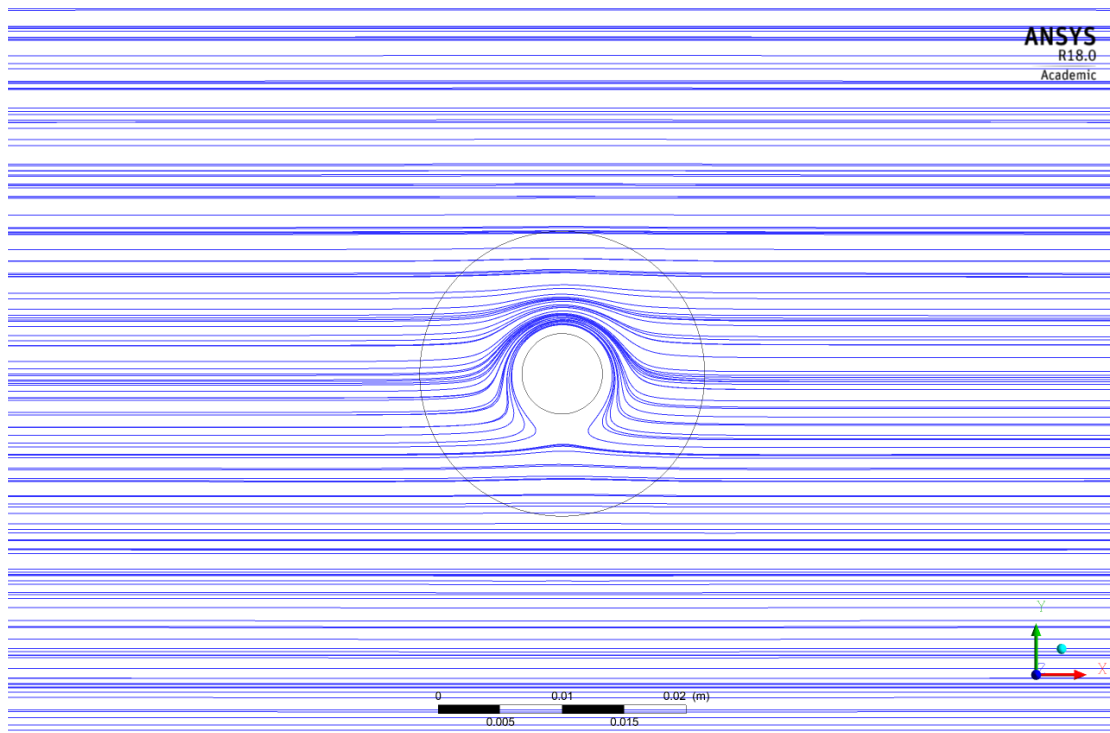
Παρακάτω παρατίθενται οι ροϊκές γραμμές και τα διαγράμματα της ταχύτητας για το μέσο του πάχους της πλάκας.



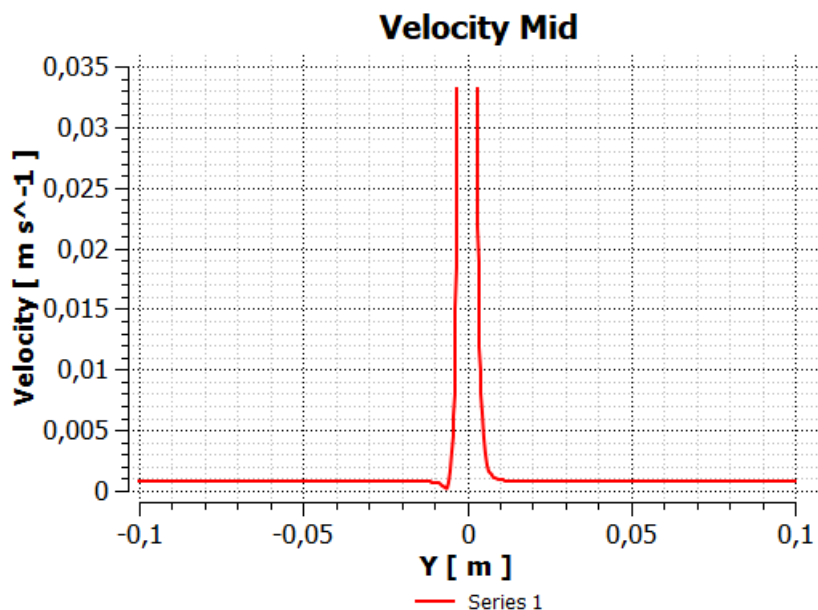
Εικόνα 51 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 47.5 mm/ min (AS: $y>0$, RS: $y<0$)



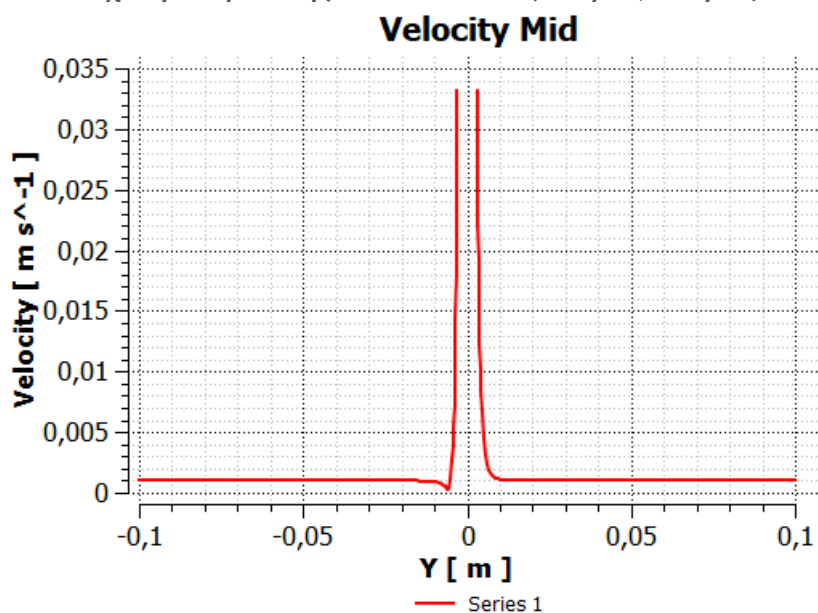
Εικόνα 52 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 60 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



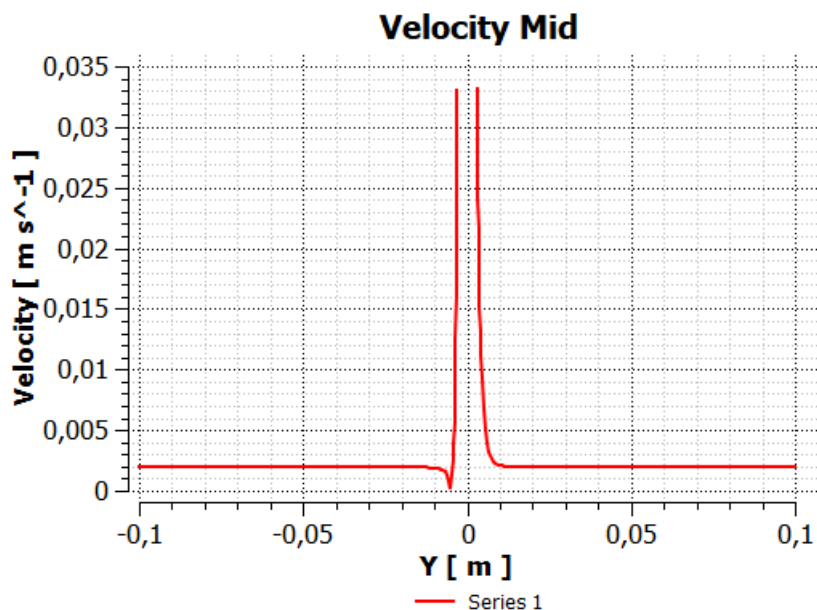
Εικόνα 53 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 118 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 54 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 47.5 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



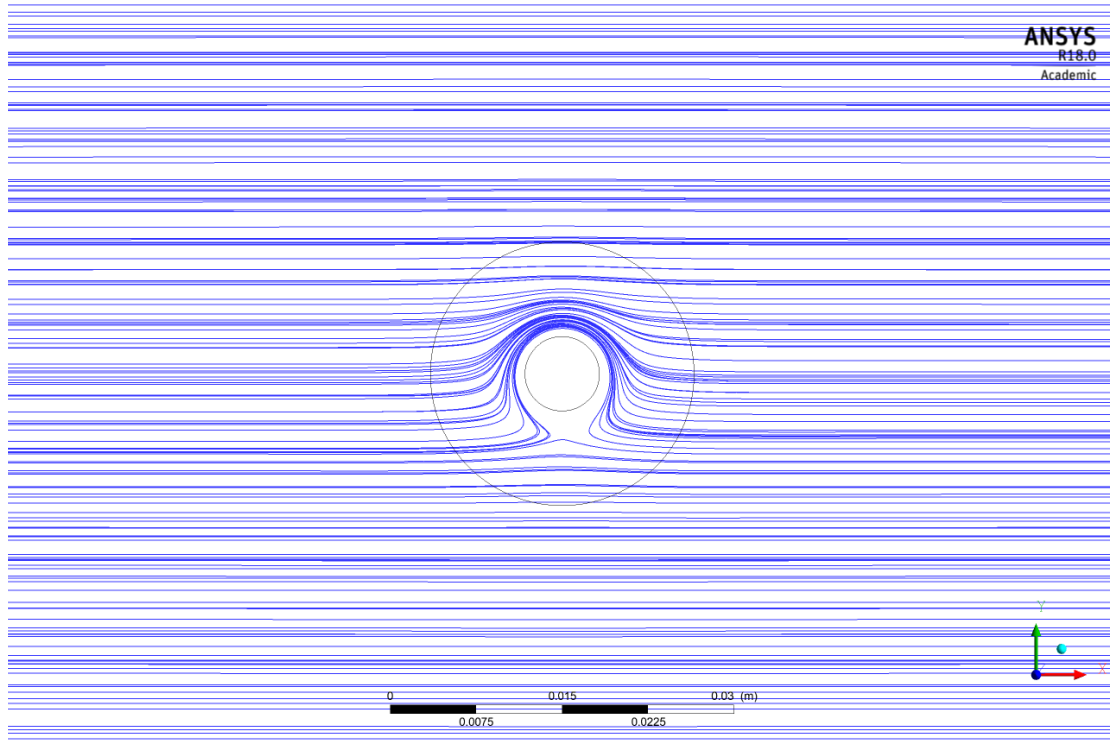
Εικόνα 55 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 60 mm/ min (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



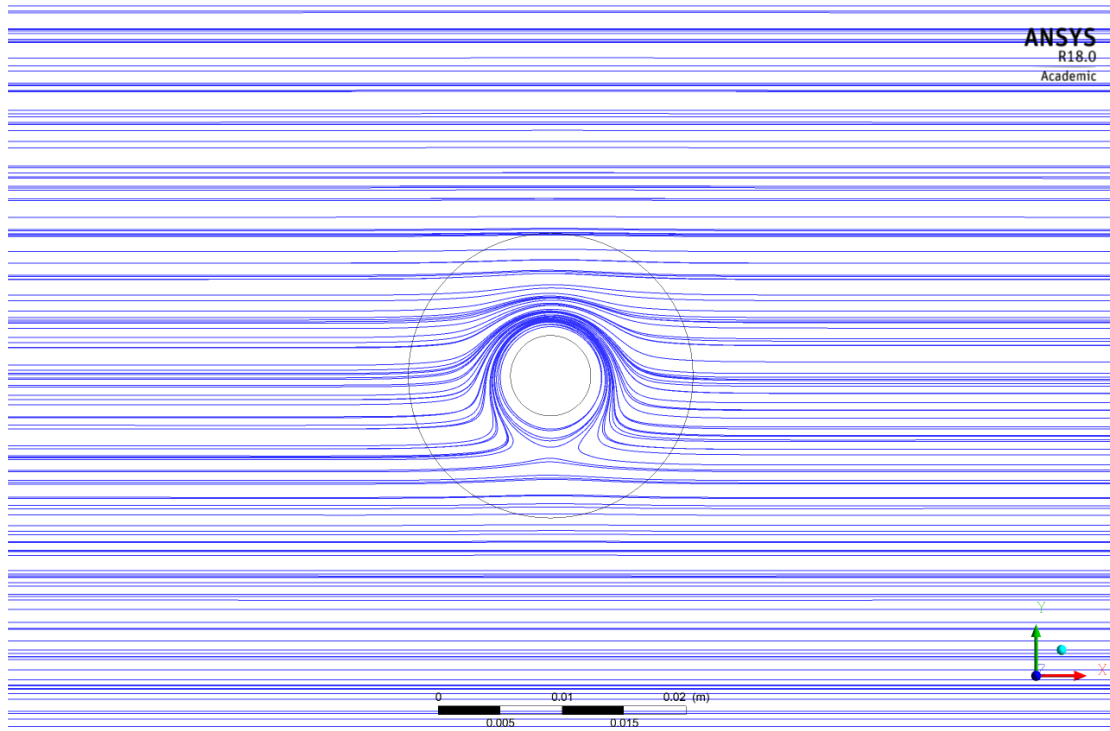
Εικόνα 56 Διάγραμμα της ταχύτητας στο μέσο του πάχους της πλάκας για ταχύτητα πρόωσης 118 mm/ min (AS: $y > 0$, RS: $y < 0$)

10.2 Περιστροφική ταχύτητα εργαλείου

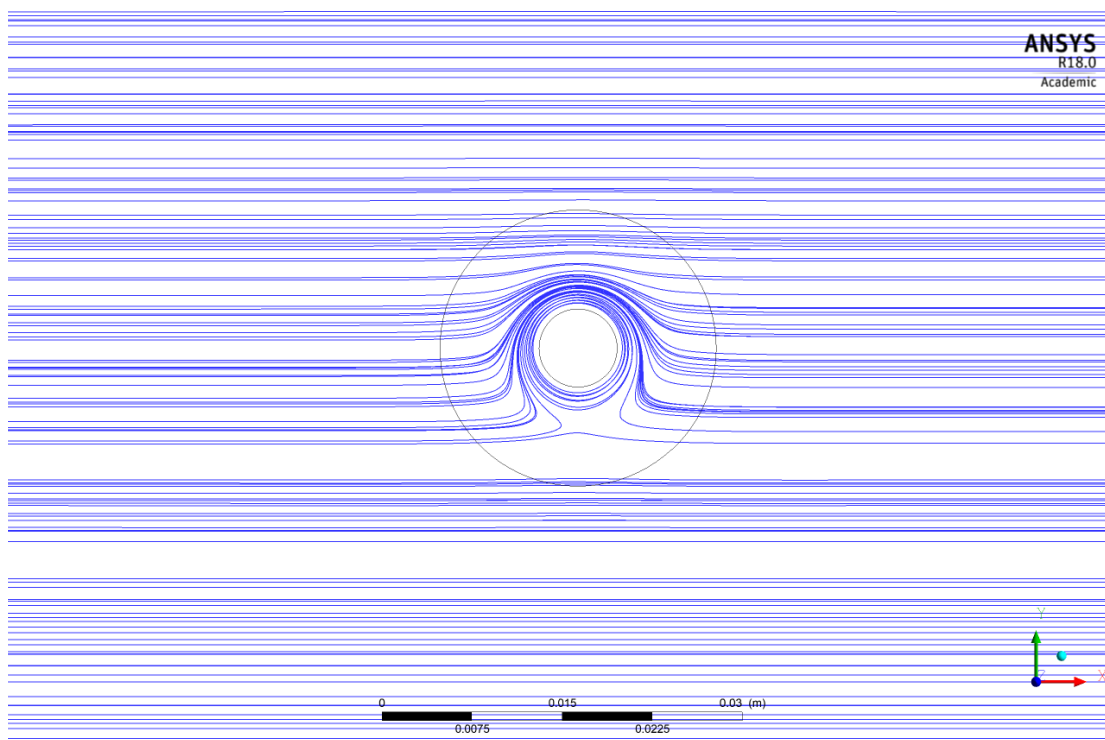
Η δεύτερη υπό μελέτη παράμετρος ήταν η περιστροφική ταχύτητα του εργαλείου, θεωρώντας ταχύτητα πρόωσης ίδια με του αρχικού μοντέλου (75 mm/ min). Οι διαφορετικές περιστροφικές ταχύτητες του εργαλείου που μελετήθηκαν ήταν 475, 1180 και 1500 RPM. Παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η ροϊκή ακτίνα αυξάνεται. Αυτό φαίνεται καθαρά τόσο στις γραμμές ροής που εμφανίζουν κυκλική κίνηση για μεγάλη ακτίνα. Για μικρότερες περιστροφικές ταχύτητες, θα ήταν αναμενόμενο η ροϊκή ακτίνα να είναι μικρότερη. Ωστόσο βλέπουμε ότι για 475 RPM η ροϊκή ακτίνα είναι συγκρίσιμη με τις 1180 RPM. Η αδυναμία αυτή του μοντέλου οφείλεται ενδεχομένως, στον τρόπο που εξ αρχής ορίστηκε το ιξώδες. Όπως αναλύεται στο εδάφιο 8.3, έχουμε θεωρήσει σταθερή θερμοκρασία και το ιξώδες εξαρτάται μόνον από τη διατμητική παραμόρφωση και όχι από την θερμοκρασία. Ωστόσο, για μικρότερες περιστροφικές ταχύτητες υπάρχει μικρότερη πρόσδοση θερμότητας οπότε η ζώνη χαμηλότερου ιξώδους, είναι μικρότερη από αυτή που προσδιορίστηκε στο μοντέλο. Η υπερεκτίμηση, δηλαδή, της ροϊκής ακτίνας σε αυτή την περίπτωση οφείλεται στο ότι έχει γίνει υποεκτίμηση του πραγματικού ιξώδους, αφού το μοντέλο είναι ροϊκό και όχι θερμοροϊκό.



Εικόνα 57 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 475 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 58 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 1180 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

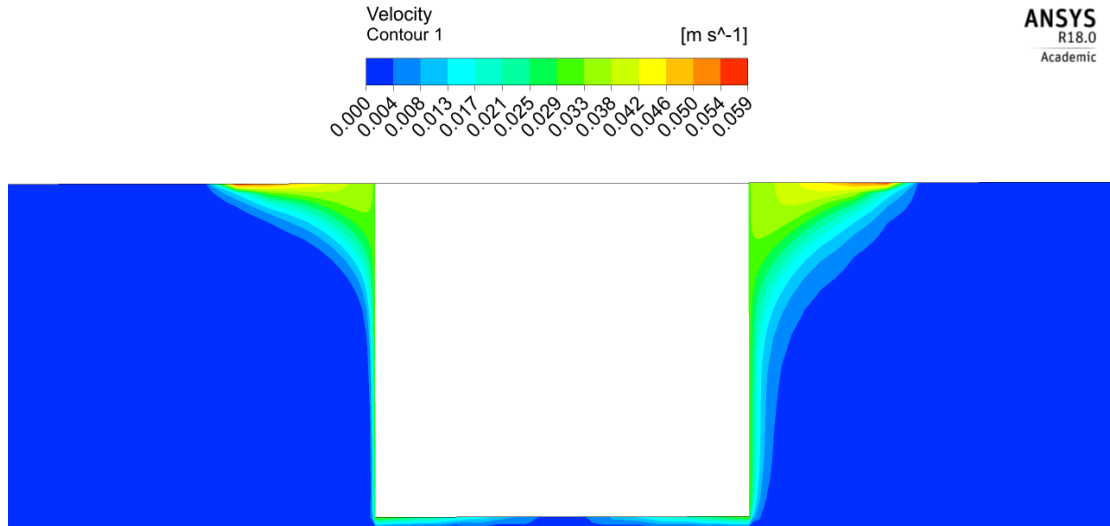


Εικόνα 59 Γραμμές ροής στο μέσο του πάχους της πλάκας για περιστροφική ταχύτητα 1500 RPM (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

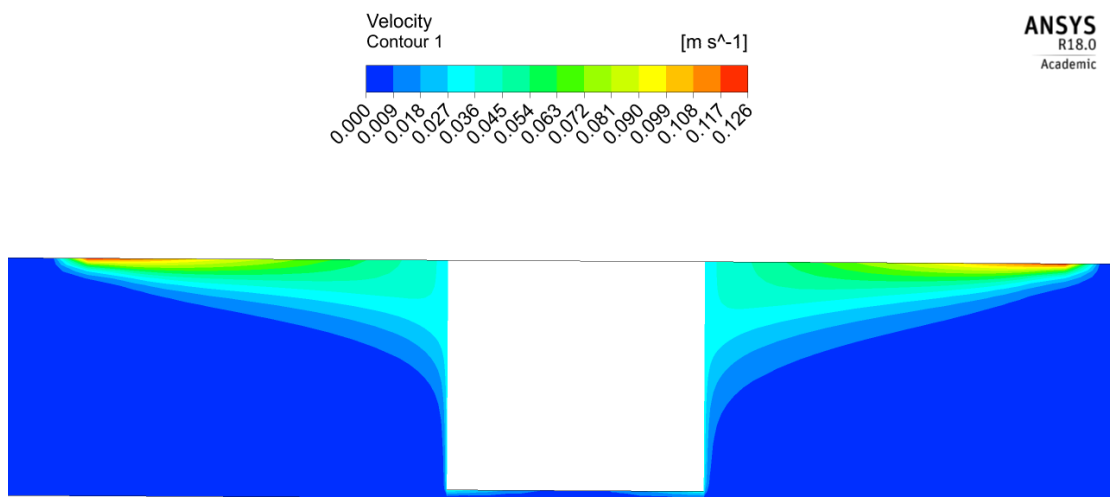
10.3 Μελέτη διαφορετικής διαμέτρου περιαυχενίου

Καινοτομία της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη της διεργασίας της συγκόλλησης τριβής με ανάδευση υπό διαφορετικές διαμέτρους περιαυχενίου. Το αρχικό μοντέλο είχε διάμετρο περιαυχενίου 23 mm. Οι υπό μελέτη διαμέτροι ήταν 11.5 mm και 26 mm.

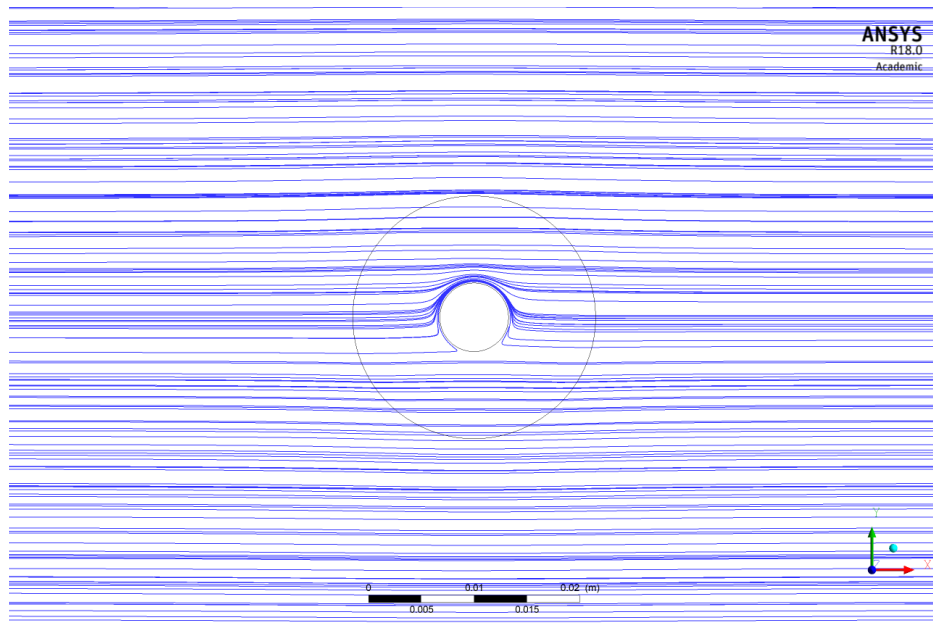
Οι γεωμετρικές παράμετροι (μεταξύ αυτών και οι διαστάσεις του εργαλείου) έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην έκταση της ροής από άλλες παραμέτρους συγκόλλησης (58), των οποίων η επίδραση μελετήθηκε στα εδάφια 10.1 και 10.2. Αυτό είναι εμφανές πρωτίστως στο προφίλ της ροής. Παρατηρείται ότι το μέγεθος του flow arm για το περιαυχένιο μικρότερης διαμέτρου είναι πολύ περιορισμένο σε σχέση με του αρχικού μοντέλου, ενώ είναι πιο διευρυμένο για το περιαυχένιο μεγαλύτερης διαμέτρου. Δευτερευόντως, αυτό φαίνεται και στη ροϊκή ακτίνα στις τρεις υπό μελέτη κατακόρυφες θέσεις της πλάκας (άνω επιφάνεια, μέσο του πάχους, ύψος πείρου). Παρατηρούμε ότι όσο κατευθυνόμαστε προς τα χαμηλότερα στρώματα της πλάκας, είναι ασθενέστερη η επίδραση του περιαυχενίου.



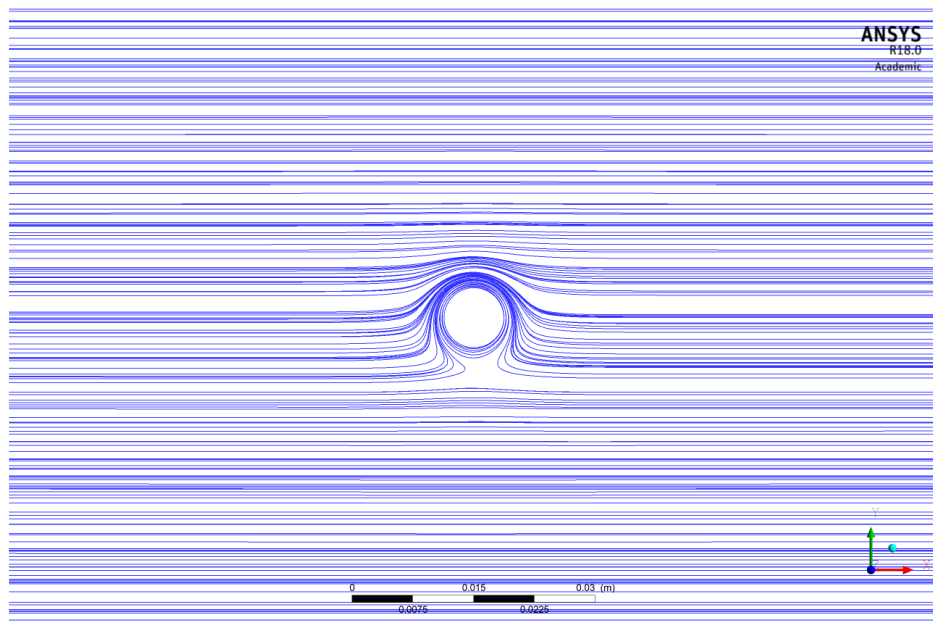
Εικόνα 60 Προφίλ ροής περιαυχενίου 11.5mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 61 Προφίλ ροής περιαυχενίου 26mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 62 Ροϊκές γραμμές στο μέσο πάχος για το μικρό περιαιχένιο – παρατίθεται για σύγκριση το περιαιχένιο των 23 mm (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)



Εικόνα 63 Ροϊκές γραμμές στο μέσο πάχος για το μεγάλο περιαιχένιο (AS: $\gamma > 0$, RS: $\gamma < 0$)

Συγκριτικά, παρατίθεται η έκταση της ροής για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διαμέτρου περιαιχενίου, σε τρία διαφορετικά ύψη κατά το πάχος, όπου φαίνεται η σημασία της διαμέτρου του περιαιχενίου στα υψηλότερα στρώματα της πλάκας.

Πίνακας 17 Ροϊκή ακτίνα σε τρεις θέσεις κατά το πάχος για διαφορετικές διαμέτρους του περιουχενίου.

Θέση	Περιουχένιο 11,5mm			Περιουχένιο 23mm			Περιουχένιο 26mm		
	RS [mm]	AS [mm]	Total [mm]	RS [mm]	AS [mm]	Total [mm]	RS [mm]	AS [mm]	Total [mm]
Άνω επιφάνεια	6.2	6.8	13.0	12.3	12.4	24.7	13.3	13.3	26.6
Μέσο Πάχους	3.5	5.5	9.0	5.2	6.0	11.2	6.4	9.0	15.4
Κάτω επιφάνεια	3.4	4.2	7.6	3.4	4.2	7.6	3.5	4.2	7.7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός του μοντέλου που καταστρώθηκε, ήταν η ροϊκή μοντελοποίηση της μετωπικής συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση σε πλάκες κράματος αλουμινίου 6082. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν αυτή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Στο πλαίσιο αυτό, το αλουμίνιο θεωρήθηκε ως ρευστό υψηλού ιξώδους, το οποίο μεταβάλλεται βάσει του μοντέλου Carreau. Μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης και της περιστροφικής ταχύτητας στην ακτίνα της ροής, καθώς και η επίδραση της διαμέτρου του περιαιχενίου.

Κατόπιν δοκιμών, ο βέλτιστος συντελεστής ολίσθησης υπολογίστηκε $\delta=0.13$. Ο προτεινόμενος από τη βιβλιογραφία συντελεστής $\delta=0.5$ οδηγούσε σε υπερεκτίμηση της ροϊκής ακτίνας. Μελετώντας τη σημασία του πείρου για την παραγόμενη ροϊκή ακτίνα, συμπεραίνουμε ότι είναι πολύ μικρή η επίδρασή του και χωρίς το περιαιχένιο δε μπορεί να πλαστικοποιηθεί επαρκώς το υλικό. Εξετάζοντας τη συνδυασμένη επιρροή του περιαιχενίου και του πείρου, δηλαδή όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα, η εκτιμώμενη από το μοντέλο ροϊκή ακτίνα πλησιάζει πολύ τα πειραματικά δεδομένα. Παρατηρήθηκε ότι η ροϊκή ακτίνα είναι μέγιστη κοντά στο περιαιχένιο και μειώνεται όσο κατευθυνόμαστε προς τα χαμηλότερα στρώματα της πλάκας. Επίσης, είναι εμφανής η διαφορά στην ποιότητα των ροϊκών γραμμών μεταξύ προωθούμενης και υποχωρούσας πλευράς. Η διαφορά αυτή στη ροή φαίνεται ακόμα περισσότερο παριστώντας τη ροή με διανύσματα. Επίσης η ροϊκή ακτίνα ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη στην προωθούμενη πλευρά σε σχέση με την υποχωρούσα.

Ως προς το ιξώδες, είναι αξιοσημείωτη η απότομη αλλαγή κατά 3 τάξεις μεγέθους, η οποία δείχνει ότι εκεί πρακτικά δεν υπάρχει ροή. Παραμορφώσεις και μεταλλουργικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε εκείνη την περιοχή, οφείλονται μόνο στην παραγόμενη από το εργαλείο θερμότητα και την αντίστοιχη αύξηση θερμοκρασιών. Εντούτοις, τα δεδομένα αυτά δεν επαρκούν ώστε να οριοθετηθεί η θερμικά επηρεασμένη ζώνη σε σχέση με τη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, διότι απαιτείται εκτός άλλων και η πλήρης γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου.

Εξετάζοντας την αλλαγή της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη μεταβολή στην ποιότητα των ροϊκών γραμμών και τη ροϊκή ακτίνα. Αντίθετα, από τη μελέτη των διαφορετικών περιστροφικών ταχυτήτων του εργαλείου παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες περιστροφικές ταχύτητες αυξάνεται η ροϊκή ακτίνα. Σε μικρότερες

περιστροφικές ταχύτητες, βέβαια, το μοντέλο παρουσιάζει αδυναμία στην εκτίμηση της ροϊκής ακτίνας, διότι την υπερεκτιμά. Κάτι τέτοιο οφείλεται στο ότι το μοντέλο δεν έχει λάβει υπόψιν την εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία, παρά μόνον από το ρυθμό διατμητικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η ζώνη που υπάρχει πλαστικοποίηση άρα και ροή.

Τέλος, από την μελέτη επίδρασης της διαμέτρου περιαιχενίου, φαίνεται πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του εργαλείου στη ροή. Παρατηρήθηκε για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, ότι στα ανώτερα στρώματα της πλάκας, η επίδραση του περιαιχενίου είναι ιδιαίτερα έντονη, για αυτό και βλέπουμε ότι η ροϊκή ακτίνα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την ακτίνα του περιαιχενίου σε κάθε περίπτωση. Όσο όμως κατευθυνόμαστε προς τα χαμηλότερα στρώματα της πλάκας, η επίδραση του περιαιχενίου εξασθενεί. Τα τρία μοντέλα είχαν ίδιες διαστάσεις πείρου και η μετρούμενη ροϊκή ακτίνα στο ύψος της κάτω επιφάνειας του πείρου ήταν περίπου ίδια για τις τρεις περιπτώσεις.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η συγκόλληση τριβής με ανάδευση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, ως συγκόλληση στερεάς κατάστασης κάτι που υποδεικνύει και η ποικιλία προσεγγίσεων στη μοντελοποίησή της. Η μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής παρά τα πλεονεκτήματά της, έχει κάποιες αδυναμίες οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με τον προσδιορισμό των θερμοκρασιών και των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Το ANSYS CFX, ως λογισμικό CFD, έχει τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το βασικό πρόβλημά του είναι η αδυναμία του να συνδυάσει με τη μέγιστη επιτυχία την μηχανική του ρευστού με τη μηχανική παραμορφώσιμου στερεού για τον πλήρη προσδιορισμό του ροϊκού και θερμοκρασιακού πεδίου. Ήδη, μελέτες έχουν δείξει ότι το περιβάλλον ABAQUS είναι ικανό για την υπερπήδηση τέτοιων εμποδίων. Ωστόσο, το λογισμικό ANSYS AIM, ένα πρόγραμμα που κατασκευάστηκε από την ANSYS Inc μόλις το 2015, προσφέρει την δυνατότητα πολλών κλάδων της φυσικής στο ίδιο πρόβλημα (Multiphysics) σε συνδυασμό με το φιλικότερο περιβάλλον προς τον χρήστη (user friendly). Αν και έχει αυξημένες απαιτήσεις σε εξοπλισμό (hardware) σε σχέση με το μέσο προσωπικό υπολογιστή, φαίνεται πολλά υποσχόμενο.

Με δεδομένη τη χρήση αρκετά δυνατών, υπολογιστικά, λογισμικών όπως λόγου χάρη τα παραπάνω, προτείνεται η εφαρμογή θερμομηχανικών μοντέλων για την πρόβλεψη της ακριβούς μορφής της συγκόλλησης για την εκτίμηση των κενών και άλλων σφαλμάτων που δημιουργούνται ή για τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων. Επίσης, προτείνεται η κατασκευή μοντέλων για συγκολλήσεις τριβής με ανάδευση με επικάλυψη όπου παρατηρούνται επιπλέον φαινόμενα σε σχέση με τις μετωπικές.

Βιβλιογραφία

1. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Χρυσουλάκης Ι., Παντελής Δ., Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008
2. Ναυπηγική Τεχνολογία (Σημειώσεις), Β.Παπάζογλου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995
3. Experimental investigation on the stability of aluminium alloy 6082 circular tubes in axial compression., Yujin Wang, Feng Fan, Shibin Lin. 89, 2015, *Thin-Walled Structures*, pg. 54-66.
4. A Mesh-Free Solid-Mechanics Approach for Simulating the Friction Stir-Welding Process. [επιμ.] Mahadir Ishak. *Joining Technologies*. ,Fraser, Kirk, St-Georges, Lyne Kiss, Laszlo I, s.l. : InTech, 2016, 3.
5. Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *International Materials Reviews*. **P L Theadgill, A J Leonard, H R Shercliff & P J Withers**. 2009, Vol. 54, 2, pg. 49-93
6. *Aluminum 2001 Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions, TMS*. **W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith**, in: **S.K. Das, J.G. Kaufman, T.J. Lienert**. 2001, σ. 213.
7. *Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy*. **K. Elangovan, V. Balasubramanian**. 200, 2008, *Journal of materials processing technology*, σσ. 163-175.
8. *Advanced Engineering Materials*, **W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner**. 5, 2003, σ. 485
9. *Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research*. **W.M. Thomas, R.E. Dolby, S.A. David, T. DebRoy, J.C. Lippold, H.B. Smartt, J.M. Vitek (Eds.)**. Pine Mountain, GA : s.n., 2003. ASM International.
10. *Effect of Tool Rotational Speed on Temperature and Impact Strength of Friction Stir Welded Joint of Two Dissimilar Aluminum Alloys*. **Umasankar Das, Vijay Toppo**. 5, 2018, *Materials Today: Proceedings*, σσ. 6170 - 6175.
11. *Effect of process parameters on microstructure and mechanical behaviors of friction stir linear welded aluminum to magnesium*. **H.M. Rao, B. Ghaffari, W. Yuan, J.B. Jordon, H. Badarinarayan**. 651, 2016, *Materials Science & Engineering A*, σσ. 27-36.
12. *Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminium alloy and steel friction stir welds*. **Jingming Tang, Yifu Shen**. 29, 2017, *Journal of Manufacturing Processes*, σσ. 29-40.
13. *TWI Bull.* **P. L. Threadgill**., , 28., 1997, σσ. 30-33.
14. Επιστήμη και Τεχνολογία Συγκολλήσεων, **Δ.Ι. Παντελής, Β.Ι. Παπάζογλου, Γ.Ν. Χαιδεμενόπουλος**, Εκδόσεις Α. Τζιόλα και Υιοι Α.Ε. Θεσσαλονίκη, 2017
15. **C. Z. Zhou, X. Q. Yang and G. H. Luan**. *Scr. Mater.*,. 2006., Τόμ. 54, σσ. 1515-1520.
16. *Proceedings of 1st Int. Symp. on 'Friction Stir Welding'*. **J.Pryzdatek**. Thousand Oaks, CA, USA : TWI, 1999.

17. Friction Stir Welding. s.l., **Haver, Wim Van** : Research Center of the Belgian Welding Institute (BWI)
18. *Proceedings of 1st Int. Symp. on 'Friction Stir Welding'*,. **H. Hori, S. Makita and H. Hino**:. Thousand Oaks, CA : TWI, 1999.
19. *Viscous Fluid Flow*, **Frank M. White**, Singapore : McGraw-Hill International Editions, 1991.
20. *Modeling of the heat flow phenomena in friction stir welding of aluminum alloys*. **O. Frigaard, O. Grong, O.T. Midling**. 1998. Proc. 7th Int. Conf. on "Joints in aluminum"
21. *Thermal and thermo-mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6*. **Y.J. Chao, X. Qi**. 1998, J of Mat Proc and Manufacturing Science., σσ. 215-2337.
22. *Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel*. **X.K. Zhu, Y.J. Chao**. 146, 2004, Journal of Materials Processing Technology, σσ. 263-272
23. *Analytic modeling of microstructure development in friction stir welding*. **M.J. Russel, H.R. Sheercliff**. Thousands Oaks, CA, USA : s.n., June 14-16 1999. Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding.
24. *Thermomechanical FE Modeling of Friction Stir Welding*. **Q.Y. Shi, T. Dickerson, H.R. Shercliff**. Park City, UT, TWI : s.n., 2003. Proc. Fourth Int. Symp. on Friction Stir Welding
25. *An analytical model for the heat generation in friction stir welding*. **H.N.B. Schmidt, J. Hattel, J. Wert**. 2004, Modelling Sim. Mat. Sci. Eng., Τόμ. 12, σσ. 143-157
26. *Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties*. **R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia**. 53, 2008, Progress in Materials Science, σσ. 980-1023
27. *Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel*. **R. Nandan, G.G. Roy, T.J. Lienert, T. Debroy**. 55, 2007, Acta Materialia, σσ. 853 - 855.
28. *On the Effect of Different Material Constitutive Equations in Modeling Friction Stir Welding*. **M. Nourani, A. S. Milani, S. Yannacopoulos**. 1, 2014, International Journal of Advances in Engineering & Technology, , Τόμ. 7, σσ. 1-20.
29. *Hot workability*. **C.M. Sellars, W.J.McG. Tegart**. 17, 1972, Int. Met. Rev., σσ. 1-24.
30. *Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminum alloys at elevated temperatures*. **T. Sheppard, D.S. Wright**. 6, 1979, Met. Technol., σσ. 215-223
31. *Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool during Friction Stir Welding*. **H. Atharifar, D. Lin, R. Kovacevic**. 18, 2009, J. Mat. ENg. Perform., σσ. 339-350
32. *Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process using both Lagrangian and Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation*. **L. Fourment, S. Guerdoux, M. Miles, T. Nelson**. 1999. 1st International Symposium on Friction Stir Welding

33. *ALE Formulation for the Numerical Simulation of Friction Stir Welding.* **Fourment, S. Guerdoux and L.** Barcelona : s.n., 2005. VIII International Conference on Computational Plasticity
34. *ALE Formulation for the Numerical Simulation of Friction Stir Welding.* **Guerdoux, Simon & Fourment, Lionel.** 2005. 8th International Conference on Computational Plasticity CIMNE UPC
35. *A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding.* **S. Guerdoux, L. Fourment.** 17, 2009, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng
36. *Coupled thermomechanical analysis of friction stir welding process using simplified models.* **P. Dong, F. Lu, J.K. Hong & Z. Cao.** 5, 2001, Science and Technology of Welding and Joining, Τόμ. 6
37. *Using coupled Eulerian Lagrangian formulation for accurate modeling of the friction stir welding process.* **Kun Li, Firas Jarrar, Jamal Sheikh-Ahmad, Fahrettin Ozturk.** 207, 2017, Procedia Engineering, σσ. 574-579
38. *Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes.* **Fadi Al-Badour, Nesar Merah, Abdelrahman Shuaib, Abdelaziz Bazoune.** 213, 2013, Journal of Materials Processing Technology, σσ. 1433-1439
39. *An experimentally validated 3D model for friction stir welding.* **Bendzsak, G., North, T., Smith, C.** 2000. Proceedings of the Second International Symposium on Friction Stir Welding
40. *3 Dimensional Flow and Thermal Modelling of the Friction Stir Welding.* **Colegrove, P. A.** 2000, 2nd International Symposium on Friction Stir Welding
41. *3 dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process.* **P.A. Colegrove, M. Painter, D. Graham, T. Miller.** TWI, Gothenburb : s.n., 2000. Proceedings of the 2nd International Symposium on Friction Stir Welding
42. *3 Dimensional CFD Modelling of flow round a threaded friction stir welding profile.* **P.A. Colegrove, H.R. Shercliff.** 169, 2005, J. Mater. Process. Technology, σσ. 320-327
43. *Computational modeling of heat transfer and visco-plastic flow in friction stir welding,* **Nandan, Rituraj.** (PhD Dissertation) Old Main, PA, USA : The Pennsylvania State University , 2008.
44. *Recent advances in Friction Stir Welding Process weldment structure and properties.* **R. Nandan, T. Debroy, H.K.D.H. Bhadeshia.** 53, 2008, Progress in Mat. Science, σσ. 980-1023
45. *3D modeling of material flow in friction stir welding under different process parameters.* **H.W. Zhang, Z. Zhang, J.T. Chen.** 183, 2007, Journal of Materials Processing Technology, σσ. 62-70
46. *A model of material flow during friction stir welding.* **Carter Hamiltona, Stanisław Dymek, Marek Blicharski.** 59, 2008, Materials Characterization, σσ. 1206-1214
47. *A simple and robust moving mesh technique for the finite element simulation of Friction Stir Welding.* **E. Feulvarch J.-C. Roux, J.M. Bergheau.** 246, 2013, Journal of Computational and Applied Mathematics, σσ. 269-277.

48. *Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry.* **S.D. Ji, Q.Y. Shi, L.G. Zhang, A.L. Zou , S.S. Gao, L.V. Zan.** 63, 2012, Computational Materials Science, σσ. 218-226
49. *Computational fluid dynamics studies on heat generation during friction stir welding of aluminum alloy.* **Gao-qiang Chen, Qing-yu Shi, Yu-jia Li, Yan-jun Sun, Qi-lei Dai, Jin-yao Jia, Yu-can Zhu, Jian-jun Wu.** 79, 2013, σσ. 540-546.
50. *Three-dimensional numerical and experimental investigation on friction stir welding processes of ferritic stainless steel.* **Hoon-Hwe Cho, Sung-Tae Hong, Jae-Hun Roh, Hyun-Sik Choi, Suk Hoon Kang, Russell J. Steel, Heung Nam Han.** 61, 2013, Acta Materialia, σσ. 2649-2661
51. *Transient model of heat transfer and material flow at different stages of friction stir welding process.* **L.Shi, C.S. Wu.** 25, 2017, Journal of Manufacturing Processes, σσ. 323-339
52. *On material flow in Friction Stir Welded Al alloys.* **A. Tongnea, C. Desrayaud, M. Jahazi, E. Feulvarch,.** 239, 2017, Journal of Materials Processing Technology, σσ. 284-296
53. *Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction.* **Yucan Zhu, Gaoqiang Chen, Qilong Chen, Gong Zhang, Qingyu Shi.** 108, 2016, Materials and Design, σσ. 400-410
54. *A phenomenologically based material flow model for friction stir welding.* **E. Hoyos, D. López , H. Alvarez.** 111, 2016, Materials and Design, σσ. 321-330
55. *A study on transient flow characteristic in friction stir welding with real time interface tracking by direct surface calculation.* **Jason Cheon, Jin-Young Yoon, Cheolhee Kim, Suck-Joo Na.** 2018, Journal of Materials Processing Tech., Τόμ. 255, σσ. 621-634
56. *ANSYS CFX Theory Guide,* ANSYS Inc.
57. *Μελέτη της Συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση ομοίων και ανομοίων κραμάτων αλουμινίου με έμφαση στην επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες,* **Δανιόλος Νικόλαος** (Διδακτορική Διατριβή), Αθήνα 2017
58. *Θερμομηχανική Προσομοίωση των Προηγμένων Διεργασιών Συγκόλλησης με Τριβή – Ανάμιξη και με Ακτίνα Λείζερ,* **Μωραΐτης Γεράσιμος** (Διδακτορική Διατριβή), Πάτρα 2009
59. *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering.* **S.K. Chionopoulos, CH.I. Sarafoglou, D.I. Pantelis, V.J. Papazoglou.** Chalkidiki, Greece : s.n., 2008.