

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υπολογιστική και πειραματική μελέτη της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση (FSW) για το αεροναυπηγικό κράμα αλουμινίου AA2024, σχετικά με τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, τις παραμένουσες τάσεις (ΠΤ) και τις στρεβλώσεις που προκύπτουν. Αρχικά αναπτύχθηκε αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας FSW με την χρήση του εμπορικού κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS Mechanical APDL, και στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν τέσσερεις συγκολλήσεις, σε αεροναυπηγικό κράμα αλουμινίου AA2024, με σκοπό την μελέτη των πραγματικών συγκολλήσεων και την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις υπολογιστικές.

## ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ), που στοχεύει στην θερμομηχανική προσομοίωση της διεργασίας FSW, καθώς και η μελέτη των τεσσάρων συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για την υπολογιστική προσομοίωση επιλέχθηκε η μεθοδολογία της μετακινούμενης θερμικής πηγής (MHS), όπου η αναπτυσσόμενη θερμότητα και η πίεση του εργαλείου εισάγονται σαν εξωτερικό θερμικό φορτίο από αναλυτικές σχέσεις. Για την προσομοίωση της ανάδευσης του υλικού, το υλικό θεωρήθηκε ρευστό με πολύ υψηλό ιξώδες. Οι αναλυτικές αυτές σχέσεις, λόγω τριβής και ανάδευσης, φαίνονται παρακάτω.

$$Q_T = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega_A \sigma_{κατ} \mu_F (R_T^3 - R_A^3) (1 + \tan \theta)$$

$$Q_{A1} = (1 - \delta) 2 \pi \omega_A \sigma_{κατ} \mu_F R_A^2 H_A$$

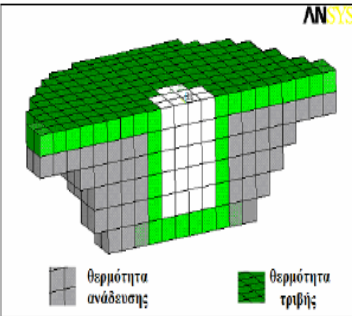
$$Q_{A2} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega_A \sigma_{κατ} \mu_F R_A^3$$

$$Q_{αναδευσης} = \beta \left[ 8 \pi \mu \frac{\delta \omega_A R_A}{(R_{KPI\Sigma} - R_A)^2} \frac{R_A^4 (1-n)^2}{r^3} \frac{1}{n^2} \frac{1}{(1-n)^2} \left( \frac{n^2}{n^2-1} \frac{r}{R_A} + \frac{R_A}{r} \frac{1}{1-n^2} \right)^{-1} \right]$$

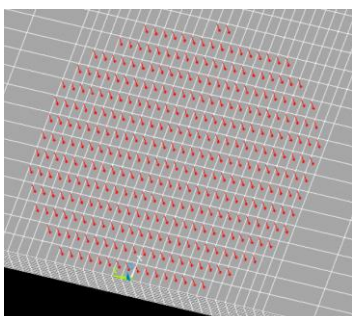
- $Q_T$  η θερμότητα λόγω τριβής με την επιφάνεια του τριβέα
- $Q_{A1}$  η θερμότητα λόγω τριβής με την επιφάνεια του κυλίνδρου της ακίδας ανάμιξης
- $Q_{A2}$  η θερμότητα λόγω τριβής με την κάτω επιφάνεια της ακίδας ανάμιξης
- $Q_{αναδευσης}$  η θερμότητα λόγω ανάδευσης του υλικού

Ο συντελεστής “δ” ο οποίος ονομάζεται συντελεστής ολίσθησης περιγράφει την κατάσταση επαφής μεταξύ υλικού-περιστρεφόμενου εργαλείου και ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας περιστροφής του υλικού προς την ταχύτητα περιστροφής της ακίδας ανάμιξης.

### Εξομοίωση θερμικής πηγής



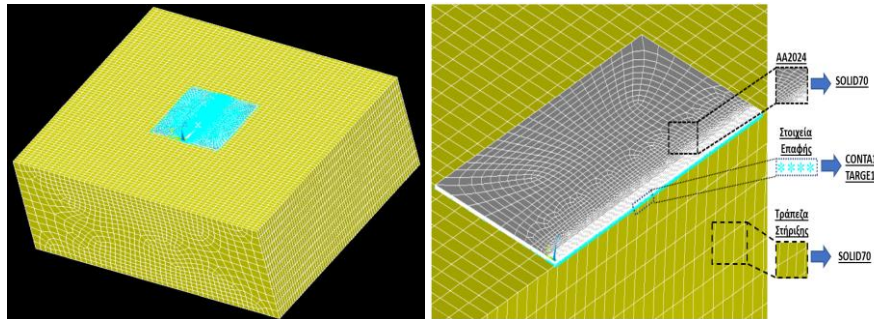
### Εξομοίωση πίεσης εργαλείου



# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ AA2024

## ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ



### Επίλυση θερμικού μοντέλου

→ Εξίσωση μετάδοσης θερμότητας

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_{total} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{dT}{dz} \right)$$

### Επίλυση μηχανικού μοντέλου

→ Αρχή ισορροπίας των δυνάμεων στους κόμβους

$$\rho \ddot{u} + c_d \dot{u} + k_s u = f_b$$

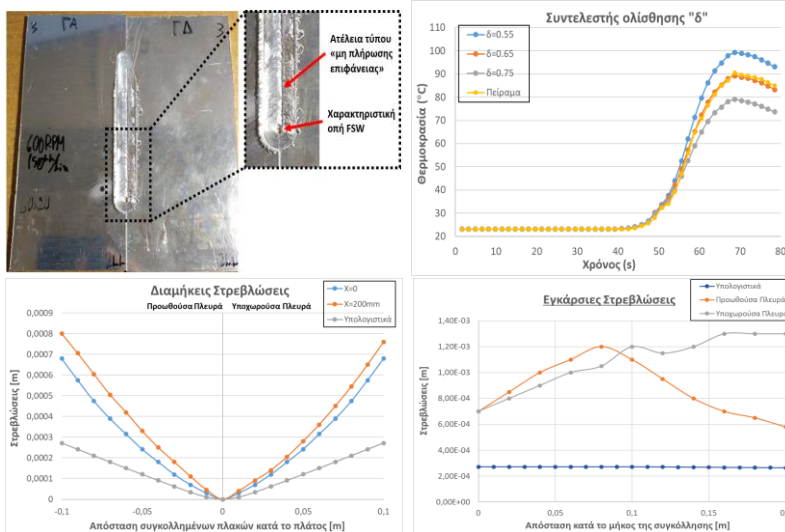
$$M \ddot{u} + C_d \dot{u} + K_s u = F_b$$

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

- Ταχύτητα περιστροφής 235 RPM, ταχύτητα πρόωσης 235 mm/min, πάχος 2mm, κατακόρυφο αξονικό φορτίο 6KN & γωνία κλίσης εργαλείου 0°

Ανεπιτυχής συγκόλλησης λόγω χαμηλής παραγόμενης θερμότητας και εμφάνιση των ατελειών «μη πλήρωσης της επιφάνειας» και «τούνελ».

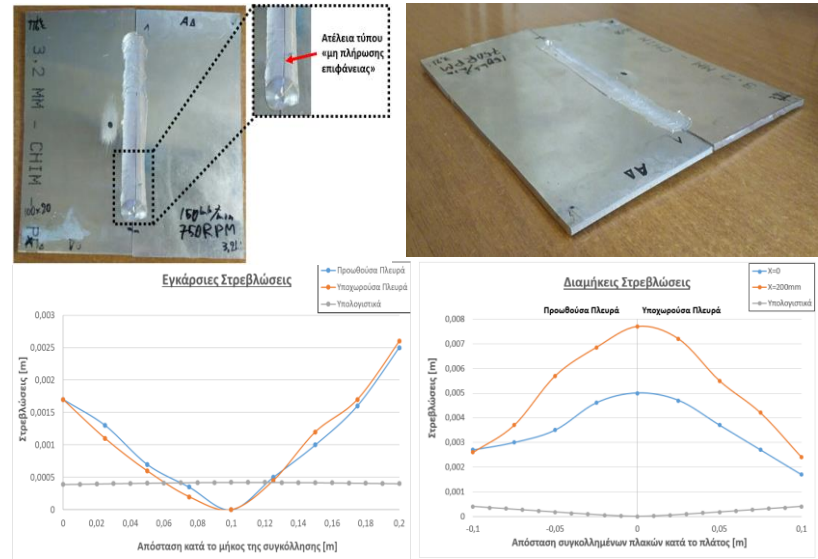
- Ταχύτητα περιστροφής 600 RPM, ταχύτητα πρόωσης 150 mm/min, πάχος 2mm κατακόρυφο αξονικό φορτίο 6KN & γωνία κλίσης εργαλείου 0°



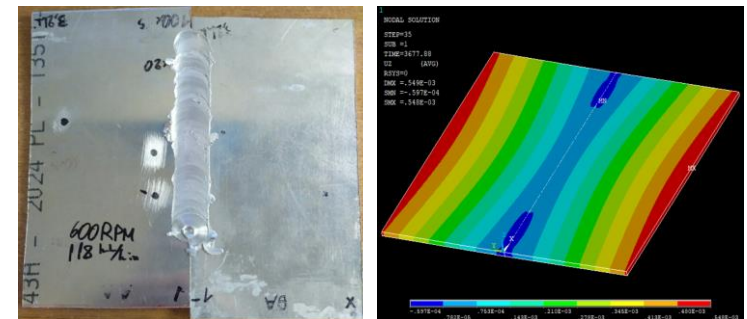
Πολύ καλή πρόβλεψη του θερμοκρασιακού ιστορικού με καλιμπράρισμα του συντελεστή ολίσθησης “δ” και αποκλίσεις στην πρόβλεψη των διαμηκών και εγκάρσιων στρεβλώσεων λόγω του διαφορετικού βαθμού σύσφιξης του συστήματος συγκράτησης.

- Ταχύτητα περιστροφής 750 RPM, ταχύτητα πρόωσης 150 mm/min, πάχος 3.2mm, κατακόρυφο αξονικό φορτίο 6KN & γωνία κλίσης εργαλείου 3°

Αποκλίσεις της πρόβλεψης των στρεβλώσεων λόγω της ανάπτυξης ΠΤ μεγαλύτερων από την κρίσιμη αντοχή λυγισμού της συγκόλλησης. Παρατηρούνται μεγαλύτερες στρεβλώσεις στη θέση x=200mm λόγω του μικρότερου βαθμού σύσφιξης του συστήματος συγκράτησης.



- Ταχύτητα περιστροφής 600 RPM, ταχύτητα πρόωσης 118 mm/min, πάχος 3.2mm, κατακόρυφο αξονικό φορτίο 6KN & γωνία κλίσης εργαλείου 3°



Η ατέλεια «μη πλήρωσης της επιφάνειας» δεν εμφανίζεται λόγω της κατάλληλης επιλογής των παραμέτρων συγκόλλησης και επομένως της καλύτερης ανάδευσης των δύο υλικών. Οι στρεβλώσεις που αναπτύσσονται υπολογιστικά έχουν όπως περιμέναμε το σχήμα «ανάποδης σέλας» σε αντίθεση με την συγκόλληση που προκύπτει το σχήμα «σέλας».

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το αναπτυσσόμενο μοντέλο προσομοίωσης προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια το θερμοκρασιακό ιστορικό.
- Επιλογή υψηλής ταχύτητας περιστροφής και χαμηλής ταχύτητας πρόωσης για επιτυχή ανάδευση του υλικού και αποφυγή ατελειών:
  - «μη πλήρωσης της επιφάνειας» και
  - «τούνελ»
- Στις συγκολλήσεις των πλακών πάχους 3.2mm οι στρεβλώσεις είχαν σχήμα «σέλας», λόγω της ανάπτυξης μεγαλύτερων ΠΤ από την κρίσιμη αντοχή λυγισμού της συγκόλλησης.
- Ο βαθμός σύσφιξης των προς συγκόλληση πλακών είναι κρίσιμος παράγοντας για τον έλεγχο των στρεβλώσεων.