

Ανάλυση Παραμενουσών Τάσεων & Θερμικών Παραμορφώσεων σε συγκόλληση FSW λεπτής πλάκας Αλουμινίου



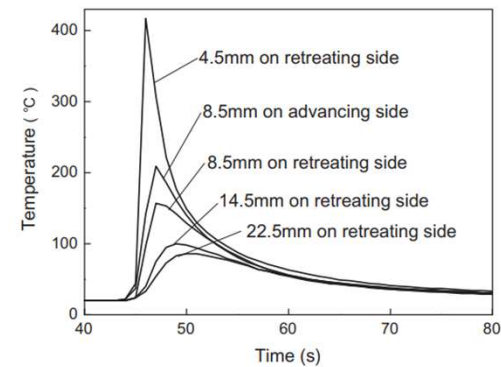
UNIVERSITY
of the
PELOPONNESE

Θεόδωρος Πολίτης
21016

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

Εισαγωγή στο Φυσικό Πρόβλημα

- ▶ Η FSW παράγει έντονη τοπική θερμότητα τριβής (~420 °C).
- ▶ Δημιουργία μεγάλων θερμικών διαβαθμίσεων λόγω των Advancing και Retreating πλευρών.



Αλυσίδα φαινομένων:

Θερμικό
Φορτίο



Παραμένουσες
Τάσεις



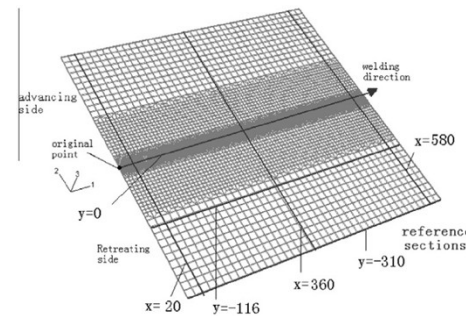
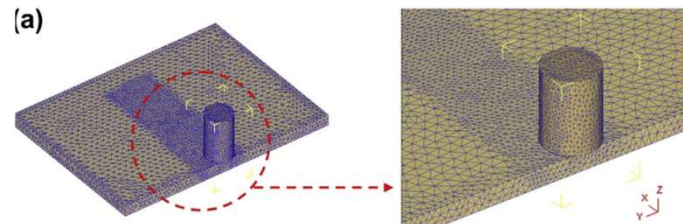
Γεωμετρική
Παραμόρφωση

Μεθοδολογία Ανάλυσης (Overview)

- ▶ Η προσέγγιση είναι πολλαπλή για μέγιστη αξιοπιστία αποτελεσμάτων.
- ▶ Βήμα 1: Θερμομηχανική & Ελαστοπλαστική Προσομοίωση (FEM) για πρόβλεψη.
 - ✓ Η ακριβής πρόβλεψη του πεδίου των τάσεων σε όλο το βάθος της πλάκας.
 - ✓ Η κατανόηση του πώς κατανέμονται οι τάσεις (Εφελκυστικές / Θλιπτικές) που ευθύνονται για τις παραμορφώσεις.
- ▶ Βήμα 2: Πειραματική Επαλήθευση με Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο (NDT) και Συμβατικές Μεθόδους.
 - ✓ Η επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου με μη καταστρεπτικές μεθόδους.

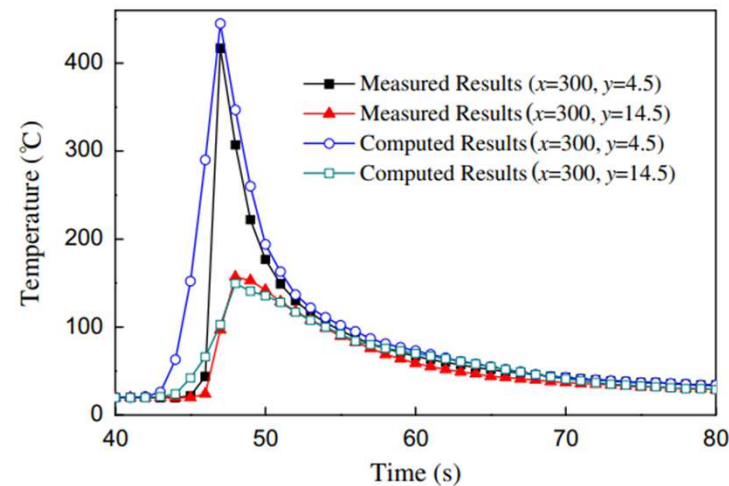
Μοντελοποίηση FEM (Mesh & Geometry)

- ▶ Χρήση προσαρμοστικού πλέγματος (Adaptive Meshing) στην κρίσιμη ζώνη συγκόλλησης.
- ▶ Μοντελοποίηση της θερμικής πηγής (Torque based heat input).
- ▶ Εισαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



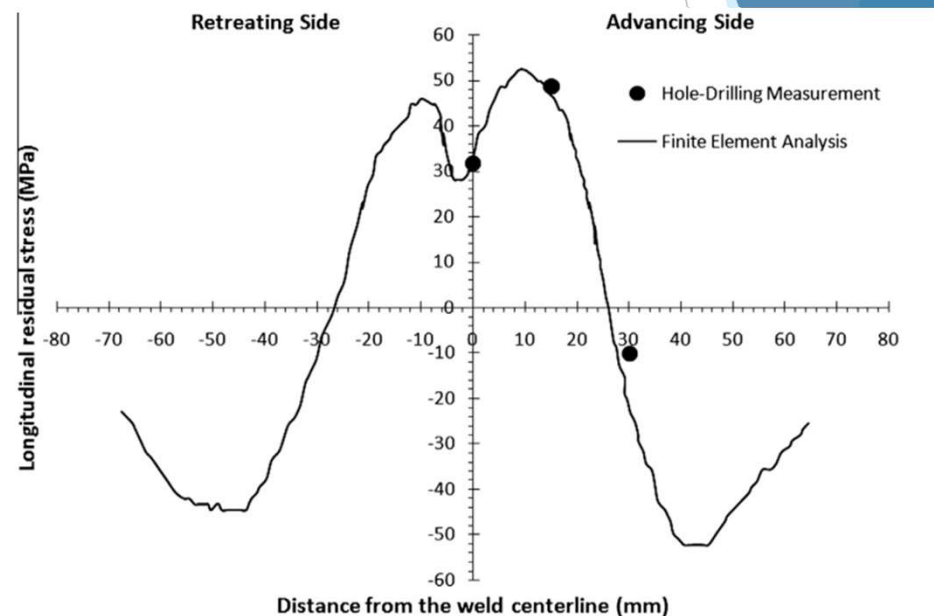
Θερμική Ανάλυση & Ασυμμετρία

- ▶ Η κατανομή θερμότητας δεν είναι συμμετρική γύρω από το εργαλείο.
- ▶ Η Πλευρά Προήγησης (Advancing Side) αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες.
- ▶ Η ακρίβεια της θερμικής πρόβλεψης καθορίζει την ακρίβεια των τάσεων.



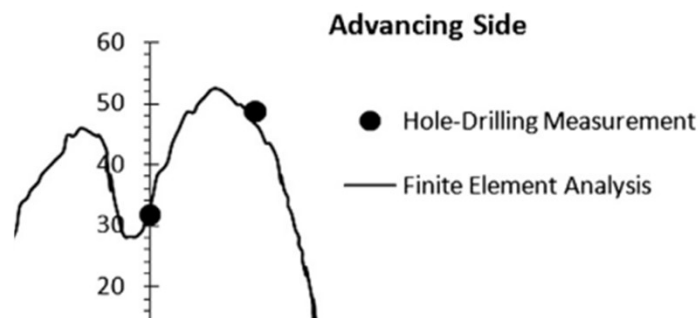
Κατανομή Τάσεων - Το σχήμα "M"

- ▶ Παρατήρηση: Οι διαμήκειες τάσεις (Longitudinal Stresses) ακολουθούν σχήμα "M" κατά πλάτος της συγκόλλησης.
- ▶ Ζώνη Ανάδευσης (Weld Zone): Κυριαρχούν Εφελκυστικές Τάσεις (τείνουν να συρρικνώσουν το μέταλλο).
- ▶ Ζώνη Βάσης: Κυριαρχούν Θλιπτικές Τάσεις (αντιστέκονται στη συρρίκνωση).



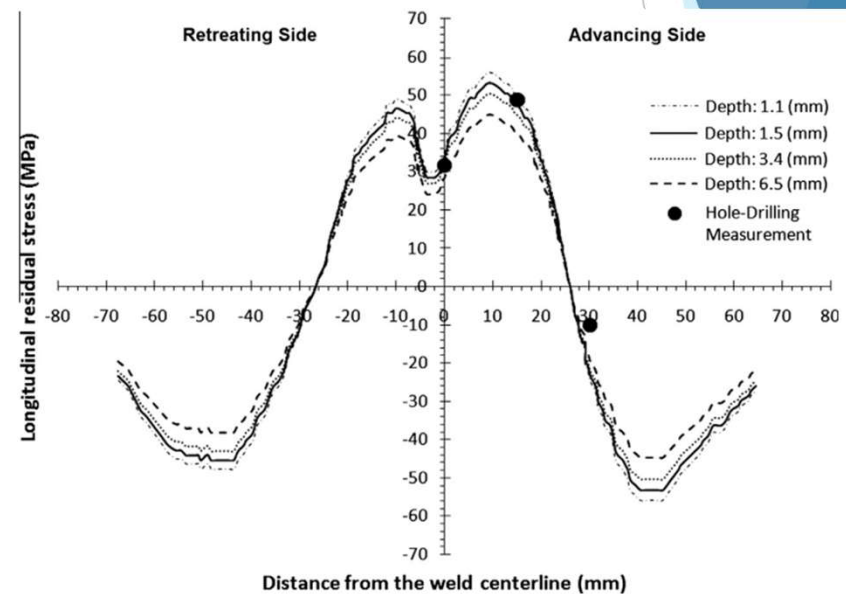
Ανάλυση Ασυμμετρίας Τάσεων

- ▶ Η κορυφή της τάσης (Peak Stress) δεν είναι στο κέντρο, αλλά μετατοπισμένη στην Advancing Side.
- ▶ Αιτία: Η μεγαλύτερη πλαστική ροή και θερμική φόρτιση σε εκείνη την πλευρά.
- ▶ Συνέπεια: Η παραμόρφωση τείνει να είναι πιο έντονη προς τη μία πλευρά της πλάκας.



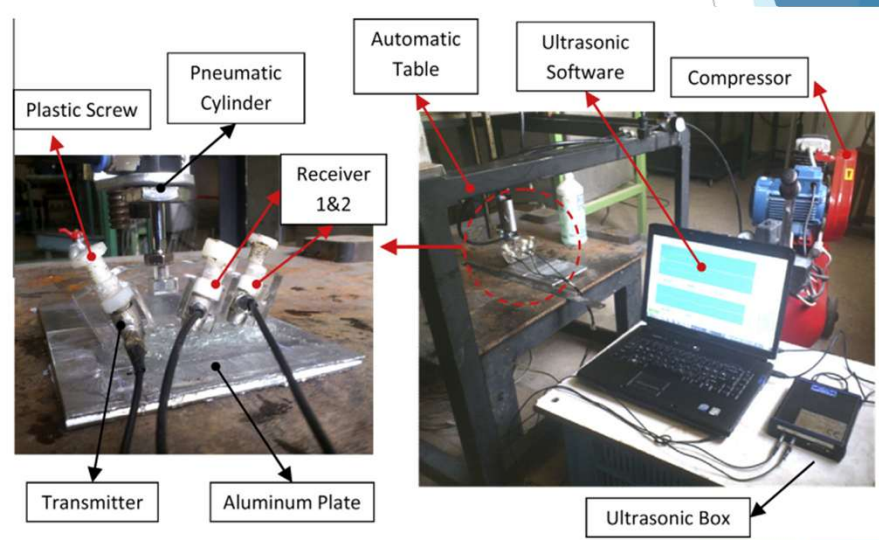
Ομοιογένεια Τάσεων ως προς το Βάθος

- ▶ Μετρήθηκαν τάσεις σε 4 βάθη:
(1.1mm, 1.5mm, 3.4mm, 6.5mm).
- ▶ Αποτέλεσμα: Οι τάσεις είναι σχεδόν ίδιες σε όλο το πάχος (Διαφορά < 20 MPa).
- ▶ Συμπέρασμα: Η δύναμη παραμόρφωσης είναι συμπαγής και επηρεάζει όλη τη μάζα του υλικού.



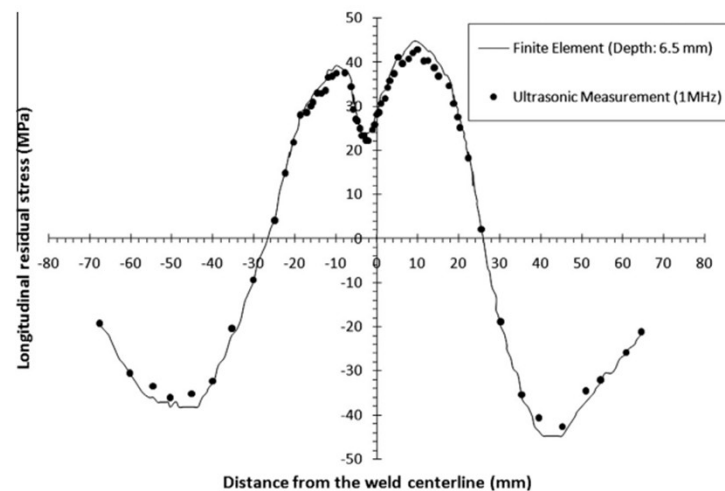
Επαλήθευση: Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος (NDT)

- ▶ Τεχνική: Χρήση υπερήχων Lcr (Low Creep waves).
- ▶ Η ταχύτητα του ήχου αλλάζει ανάλογα με το αν το υλικό είναι σε εφελκυσμό ή θλίψη (Ακουστικοελαστικότητα).
- ▶ Δυνατότητα σάρωσης σε διαφορετικά βάθη αλλάζοντας τη συχνότητα.



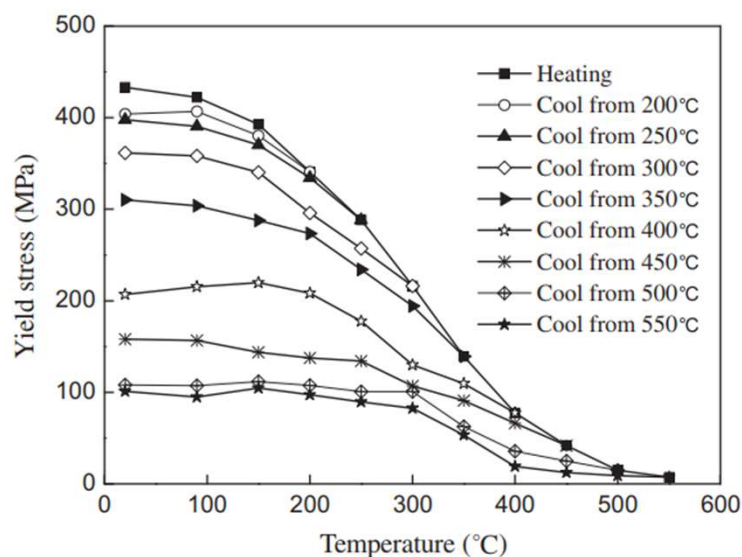
Αποτελέσματα Υπέρηχων

- ▶ Ακρίβεια: Τα πειραματικά σημεία ("τελείες" στα διαγράμματα) επιβεβαιώνουν πλήρως τις καμπύλες του FEM.
- ▶ Σύγκριση:
 - ▶ Στον πυρήνα (1 MHz / 6.5mm βάθος), η απόκλιση είναι ελάχιστη: ± 4 MPa.
 - ▶ Στην επιφάνεια (5 MHz / 1.1mm βάθος), η απόκλιση είναι: ± 10 MPa.



Μηχανισμός Παραμόρφωσης (Buckling)

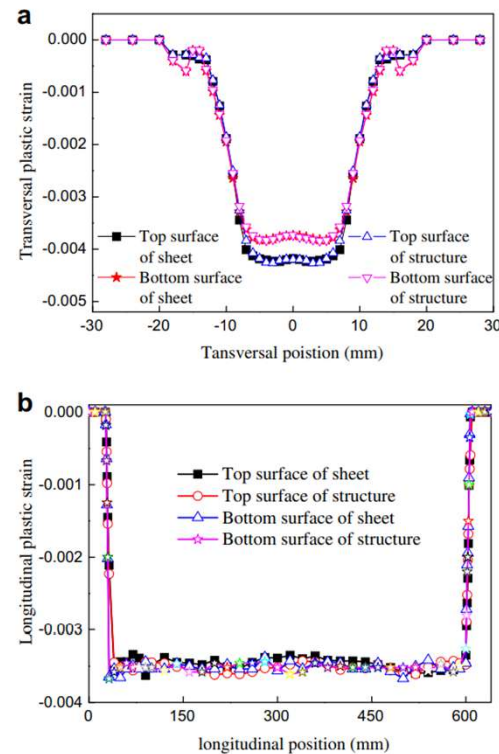
- ▶ Πώς περνάμε από την Τάση στην Παραμόρφωση;
- ▶ Στους 300-400 °C, το Όριο Διαρροής (Yield Stress) του αλουμινίου καταρρέει.
- ▶ Οι θλιπτικές τάσεις στα άκρα βρίσκουν "μαλακό" υλικό και προκαλούν Λυγισμό (Buckling).



Κατανομή Πλαστικής Παραμόρφωσης

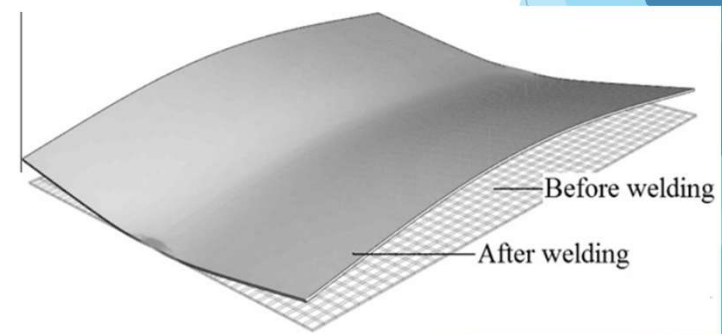
- ▶ Η μόνιμη παραμόρφωση συγκεντρώνεται στη ζώνη συγκόλλησης.
- ▶ Συσχέτιση με το προφίλ "M":

Οι περιοχές μέγιστης τάσης είναι οι περιοχές μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης.
- ▶ Αυτή η μόνιμη αλλαγή διαστάσεων "τραβάει" όλη την πλάκα.



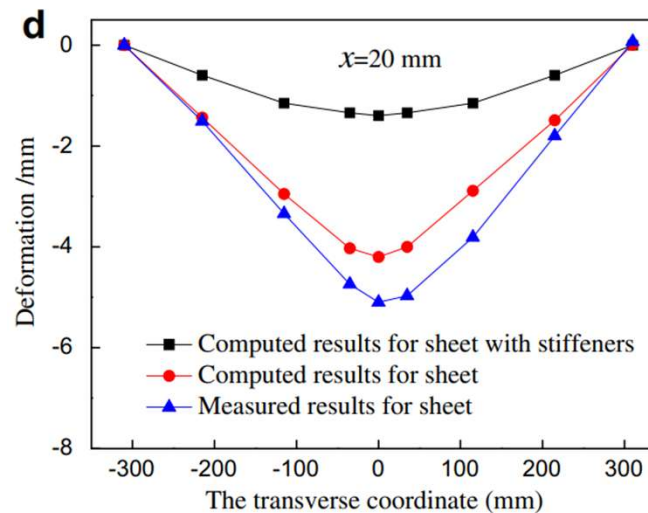
Η Μορφή της Παραμόρφωση

- ▶ Η τελική μορφή είναι "Αντι-σαγματική".
Εγκάρσια: Κοίλο σχήμα (Concave).
Διαμήκης: Κυρτό σχήμα (Convex).
- ▶ Το μοντέλο FEM αναπαράγει ακριβώς την πραγματικότητα.



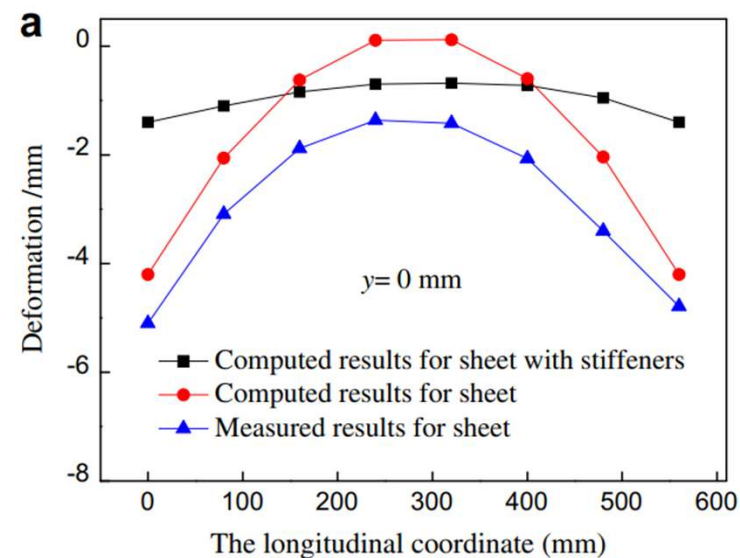
Ποσοτική Ανάλυση: Εγκάρσια Βύθιση

- ▶ Ανάλυση της βύθισης (deflection) κατά το πλάτος της πλάκας.
Μέγιστη τιμή: ~5.0 mm στα άκρα.
- ▶ Η πρόβλεψη του μοντέλου (κόκκινη γραμμή) ακολουθεί πιστά το πείραμα (μπλε τρίγωνα).



Ποσοτική Ανάλυση: Διαμήκης Βύθιση

- ▶ Ανάλυση της βύθισης κατά το μήκος.
Μέγιστη τιμή: ~3.5 mm στο κέντρο.
- ▶ Η διαμήκης παραμόρφωση οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο του λυγισμού (Buckling).



Συμπεράσματα

- ▶ **Η Ρίζα του Προβλήματος:** Η ασύμμετρη θερμική φόρτιση δημιουργεί κορυφώσεις εφελκυστικών τάσεων (~50 MPa) στην Advancing Side, οι οποίες λειτουργούν ως ο "μοχλός" της παραμόρφωσης.
- ▶ **Ο Μηχανισμός Παραμόρφωσης:** Η τελική γεωμετρία ("Αντισαγματική") δεν είναι τυχαία. Προκύπτει επειδή οι θλιπτικές τάσεις στα άκρα ξεπερνούν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (buckling) του θερμικά καταπονημένου υλικού.
- ▶ **Η Αξία της Μεθοδολογίας:** Αποδείξαμε ότι το υπολογιστικό μοντέλο (FEM) ταυτίζεται με τις μετρήσεις Υπερήχων (ΜΚΕ). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε πλέον να προβλέπουμε την παραμόρφωση με ακρίβεια χιλιοστού, χωρίς να καταστρέφουμε πανάκριβα δοκίμια.

Βιβλιογραφία

- ▶ Sadeghi, S., Najafabadi, M. A., Javadi, Y., & Mohammadisefat, M. (2013). Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates. *Materials & Design*, 52, 870-880.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.032>
- ▶ Yan, D., Wu, A., Silvanus, J., & Shi, Q. (2011). Predicting residual distortion of aluminum alloy stiffened sheet after friction stir welding by numerical simulation. *Materials & Design*, 32(4), 2284-2291.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.032>

Τέλος Παρουσίασης

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!