



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

# Αριθμητική προσομοίωση συγκολλήσεων τόξου

Διπλωματική Εργασία

ΜΠΑΤΙΧΗ ΝΑΝΤΕΡ

**Επιβλέπων :** Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

# Αριθμητική προσομοίωση συγκολλήσεων τόξου

## Διπλωματική Εργασία

ΜΠΑΤΙΧΗ ΝΑΝΤΕΡ

**Επιβλέπων :** Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Χριστόφορος Βοσνιάκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

.....

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....

Νάντερ Μ. Μπατίχη

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Μπορείτε να:

Μοιραστείτε — αντιγράψετε και αναδιανέμετε το υλικό με κάθε μέσο και τρόπο

Προσαρμόστε — αναμείξτε, τροποποιήστε και δημιουργήστε πάνω στο υλικό

Υπό τους ακόλουθους όρους:

Αναφορά Δημιουργού — Θα πρέπει να καταχωρίσετε αναφορά στο δημιουργό , με σύνδεσμο της άδειας, και με αναφορά αν έχουν γίνει αλλαγές . Μπορείτε να το κάνετε αυτό με οποιονδήποτε εύλογο τρόπο, αλλά όχι με τρόπο που να υπονοεί ότι ο δημιουργός αποδέχεται το έργο σας ή τη χρήση που εσείς κάνετε.

Μη Εμπορική Χρήση — Δε μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το υλικό για εμπορικούς σκοπούς.

Δεν υπάρχουν πρόσθετοι περιορισμοί — Δε μπορείτε να εφαρμόσετε νομικούς όρους ή τεχνολογικά μέτρα που να περιορίζουν νομικά τους άλλους από το να κάνουν ο,τιδήποτε επιτρέπει η άδεια.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	10
1.2.1. ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΞΟΥ (ARC WELDING) .....	10
1.2.2. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ .....	12
1.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ .....	13
1.3.1.ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	13
1.3.2 ΑΓΩΓΗ.....	14
1.3.3. ΣΥΝΑΓΩΓΗ .....	14
1.3.4. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	15
1.3.5. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	15
1.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΞΟΥ .....	16
1.4.1 ΤΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ROSENTHAL.....	16
1.4.2.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ GAUSS.....	17
1.5 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ .....	19
1.5.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ.....	19
1.5.2. ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ.....	20
1.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ .....	23
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	25
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	27
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ANSYS MECHANICAL APDL 17.0 .....	27
4.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	29
4.1.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	29
4.1.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	29
4.1.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (MESHING).....	30
4.1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ (ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ).....	31
4.1.5 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ -ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	33
4.1.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (TIME STEPS,DO-LOOPS) .....	35
4.1.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ OCTAVE.....	35
4.1.8 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	36
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	36

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	40
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	40
4.2.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	40
4.2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (TIME STEPS, DO-LOOPS).....	41
4.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	41
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	46
5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....	46
5.2 ΥΛΙΚΑ.....	47
5.3 ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ.....	47
5.4 ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	48
5.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ.....	49
5.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	51
5.6.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ .....	51
5.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ.....	53
5.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....	54
5.7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ.....	54
5.7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ .....	56
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	62



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω :

- τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γιώργο Βοσνιάκο για την άριστη συνεργασία μας και την άμεση ανταπόκριση στα θέματα που προέκυψαν μέχρι το πέρας αυτής της εργασίας.
- τον καθηγητή κ. Σταύρο Χιονόπουλο και το προσωπικό των Ναυπηγείων Ελευσίνας για όλη τη βοήθεια κατά τον σχεδιασμό και την πραγματοποίηση του πειράματος,
- τον κ. Θανάση Μαρκουλή από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ για τη παροχή των μετρητικών οργάνων LVDT και τις χρήσιμες συμβουλές σχετικά με τις μετρήσεις.
- τον Δρ<sup>α</sup> Εμμανουήλ Σταθάτο για τις πολύτιμες γνώσεις του και τη βοήθεια που μου παρείχε σχετικά με το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS APDL.
- τον Δρ<sup>α</sup> Γιώργο Παπαζέτη για την αμέριστη βοήθεια κατά την αρχή της πορείας μου στο παρόν θέμα.
- τον κ. Νίκο Μελισσά και τον κ. Κώστα Κερασιώτη από το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ για την αμέριστη βοήθεια τους στη διεξαγωγή του πειράματος.
- Τα παιδιά από την αίθουσα 11 των κτιρίων Χημικών Μηχανικών για τη διαχρονική στήριξη και αλληλεγγύη τους.
- Το Νίκο Αποστολλέλη ,ή Μαστρονίκο , που μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ στη ναυπηγική βιομηχανία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και όλες/ους τις/τους φίλες/ους μου, που μου στάθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της ενδιαφέρουσας αλλά και δύσκολης πορείας.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αριθμητική προσομοίωση της συγκόλλησης τόξου, μιας διαδεδομένης κατεργασίας σύνδεσης κατά την οποία συνυπάρχουν θερμικά και μηχανικά φαινόμενα.

Παρουσιάζεται η αναλυτική μελέτη συγκόλλησης τόξου μιας τυπικής γεωμετρίας μεταλλικών ελασμάτων στο περιβάλλον προσομοίωσης μηχανολογικών εφαρμογών ANSYS. Για να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη μελέτη αναπτύχθηκε προγραμματιστική ρουτίνα με κατάλληλη χρήση και συνδυασμό των προσφερόμενων από το περιβάλλον προσομοίωσης αριθμητικών μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης των συνδυασμένων θερμικών και μηχανικών φαινομένων της συγκόλλησης τόξου αποτέλεσε και την κυριότερη συνεισφορά της εργασίας.

Οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού καταγράφηκαν σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία και εισήχθησαν στο μοντέλο της αριθμητικής προσομοίωσης. Επιπλέον, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό / μαθηματικό περιβάλλον λογισμικού ανοιχτού κώδικα Octave μοντέλο προσέγγισης της θερμικής πηγής συγκόλλησης τόξου βασισμένο στη Gaussian κατανομή. Εν συνεχεία, η βαθμίδα θερμοκρασίας της θερμικής πηγής αποτέλεσε πεδίο εισόδου για την προσέγγιση της χρονοεξελισσόμενης διάδοσης της θερμότητας, όπως αυτή ορίζεται από τις σχετικές μερικές διαφορικές εξισώσεις στο περιβάλλον προσομοίωσης και εφαρμόστηκε στη γεωμετρία του μελετώμενου μεταλλικού ελάσματος. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα σχεδιασμού του θερμομηχανικού μοντέλου, δηλαδή η κατασκευή του πλέγματος διακριτοποίησης, η επιλογή παραμέτρων υλικών, η αρχικοποίηση, η κατασκευή της δέσμης θερμικού φορτίου, η επιβολή συντοριακών συνθηκών και φορτίων, τα κριτήρια σύγκλισης του μοντέλου και η εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων.

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές δοκιμές γραμμικής συγκόλλησης τόξου λεπτών ελασμάτων St70 με αυτόματη μηχανή συγκόλλησης τύπου MIG και μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες και οι μετατοπίσεις λόγω παραμορφώσεων.

Εν κατακλείδι συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του αριθμητικού και του πειραματικού μοντέλου και υπολογίστηκε η μεταξύ τους απόκλιση στην τάξη του 10%.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκόλληση τόξου είναι μία πολύ διαδεδομένη μηχανουργική κατεργασία .Η εξέλιξη στο κλάδο των υπολογιστών και της υλοποίησης αριθμητικών μεθόδων οδήγησαν στον πιο ακριβή σχεδιασμό και μελέτη των συγκολλήσεων μεταλλικών κατασκευών.

Η επίλυση του φαινομένου της συγκόλλησης, σε υπολογιστικό περιβάλλον αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα αφού περιλαμβάνει μη μόνιμη χρονική συνθήκη, μη γραμμικές αλλαγές στις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων, καθώς και έντονες θερμικές και μηχανικές μεταβολές. Η αναπαράσταση της θερμοκρασιακής κατανομής προσδιορίζει κατ' αρχήν τη ρεαλιστική απεικόνιση του φαινομένου.

Το πεδίο λύσεων των τάσεων –παραμορφώσεων και ο αριθμητικός τους προσδιορισμός ,σε περιβάλλον προσομοίωσης, είναι ίσως η πιο κρίσιμης σημασίας πληροφορία που μας ενδιαφέρει σε ένα τέτοιο μοντέλου. Αυτή καθορίζει τη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής ,καθώς και ενδεχόμενη αστοχία υλικού μετά από δεδομένο κύκλο φορτίσεων.

Η υπολογιστική μελέτη της συγκόλλησης τόξου, όσο και άλλων μηχανουργικών κατεργασιών, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, συμβάλλει στην έρευνα και την ανάπτυξη σύνθετων μηχανολογικών εφαρμογών με μειωμένο κόστος. Ακόμη μας προσφέρει τη δυνατότητα να εξετάσουμε τις αλλαγές στη μηχανική συμπεριφοράς της κατασκευής μεταβάλλοντας τις παραμέτρους που επιδρούν σε αυτό, προσφέροντας ένα ευρύ πεδίο δυνατών λύσεων στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

### 1.2.1. ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΞΟΥ (ARC WELDING)

Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους συγκολλήσεων τόξου είναι η συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (SMAW) η οποία είναι γνωστή επίσης ως χειροκίνητη συγκόλληση τόξου (MMA) η απλά συγκόλληση με ηλεκτρόδιο (stick welding). Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου χρησιμοποιείται ένα αναλώσιμο ηλεκτρόδιο που υπό την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος, εναλλασσόμενου ή συνεχούς, τήκεται και δημιουργεί το λουτρό (λίμνη) συγκόλλησης. Το υλικό του ηλεκτροδίου είναι φτιαγμένο από υλικό συμβατό με το μέταλλο του τεμαχίου συγκόλλησης, γνωστό και ως μέταλλο βάσης, και είναι επενδυμένο με μια πάστα (flux) που προστατεύει την προς συγκόλληση περιοχή από την οξείδωση παράγοντας κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου συμπεριφέρεται σαν υλικό εναπόθεσης αφού κατά τη τήξη του και τη δημιουργία του λουτρού ενώνεται με το μέταλλο βάσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη, αφού απαιτεί μειωμένου κόστους εξοπλισμό και βασική τεχνική κατάρτιση. Τη συναντάμε συχνότατα σε μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών όπως στις ναυπηγοεπισκευαστικές εργασίες και γενικά στον κατασκευαστικό τομέα.

Μια ακόμη συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο (GMAW) γνωστή και ως MIG (Metal Inert Gas - αδρανές αέριο ) ή MAG (Metal Active Gas - ενεργό αέριο) και είναι μια ημιαυτόματη μέθοδος. Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων είναι ότι στη MIG χρησιμοποιούνται για προστασία αδρανή αέρια (Ar, He) και χρησιμοποιείται κυρίως στη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου και άλλων μη σιδηρούχων κραμάτων, ενώ στη MAG χρησιμοποιούνται ενεργά αέρια και είναι πιο συνηθισμένη για χάλυβες. Σε αυτή τη διαδικασία υπάρχει ένα τηκόμενο σύρμα που συμπεριφέρεται ως ηλεκτρόδιο και ως υλικό εναπόθεσης ταυτόχρονα και προστατεύεται κατά τη τήξη του από τα αέρια που αναφέραμε. Συνήθως οι συνθήκες συγκόλλησης σ' αυτή τη μέθοδο περιλαμβάνουν σταθερή τάση και σταθερή ισχύ ενώ το ρεύμα μπορεί να επιλεγθεί είτε συνεχές είτε εναλλασσόμενο, ανάλογα με την εφαρμογή. Το καταναλισκόμενο σύρμα μας βοηθάει να πετύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης σε σχέση με το επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο. Οι εφαρμογές της GMAW περιλαμβάνουν την αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την ναυπηγική. Ωστόσο, λόγω του πιο περίπλοκου εξοπλισμού η ευελιξία και η ευκολία της μεθόδου είναι μειωμένη σε σύγκριση με την SMAW.

Η συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου (Submerged Arc Welding-SAW) είναι αυτοματοποιημένη μέθοδος υψηλής παραγωγικότητας. Η θερμότητα τήξης παράγεται από ηλεκτρικό τόξο, που δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου. Το ηλεκτρικό τόξο και η λίμνη συγκόλλησης προστατεύονται από στρώμα τηγμένης σκωρίας και ένα στρώμα άτηκτου κοκκώδους συλλιπάσματος (σκόνη βόρακα-flux). Το ηλεκτρόδιο είναι αναλυσκόμενο σε μορφή σύρματος και προσφέρει το αναγκαίο πρόσθετο υλικό για το γέμισμα της ραφής συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή στη βιομηχανία κυρίως σε μεγάλες κατασκευές.

Η συγκόλληση GTAW-TIG είναι μία χειρονακτική μέθοδος κατά τη οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός μη-αναλυσκόμενου ηλεκτροδίου από βολφράμιο και του προς συγκόλληση μετάλλου. Τελευταία, υπάρχει η δυνατότητα αυτοματοποίησης της μέσω ρομπότ. Η συγκόλληση αυτή προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου, ενώ στη λίμνη που σχηματίζεται εναποτίθεται, αν απαιτείται, επιπλέον συγκολλητικό υλικό που προέρχεται από μία ράβδο. Θεωρείται η πλέον κατάλληλη μέθοδος για τη συγκόλληση λεπτού πάχους ελασμάτων και χαρακτηρίζεται από πολύ σταθερό ηλεκτρικό τόξο και υψηλής ποιότητας κολλήσεις, ωστόσο απαιτεί δεξιότητες και οι ταχύτητες που μπορούν να αναπτυχθούν είναι σχετικά μικρές. Μπορεί να επιλεγθεί για τη συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων αλλά θεωρείται η πλέον κατάλληλη για τη κόλληση ανοξείδωτου χάλυβα και ελαφρών μετάλλων. Βρίσκει συχνή εφαρμογή σε συγκολλήσεις που απαιτούν ακρίβεια, όπως ποδήλατα, αεροσκάφη και ναυπηγικές εργασίες.

Μία ακόμη μέθοδος παρόμοια με την GTAW είναι η συγκόλληση με πλάσμα, κατά την οποία χρησιμοποιείται επίσης μη-αναλυσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου, αλλά το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται σε περιβάλλον πλάσμα. Το τόξο εδώ είναι πολύ πιο συγκεντρωμένο από την GTAW κάνοντας τον έλεγχο της εγκάρσιας κίνησης σημαντικό και δημιουργώντας ανάγκη για

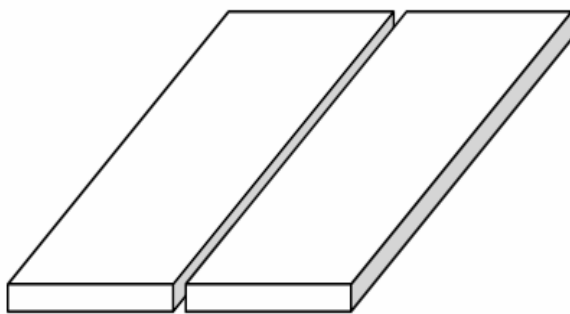
μια πιο μηχανοποιημένη διαδικασία. Λόγω της σταθερής έντασης του ρεύματος η εφαρμογή είναι κατάλληλη για μεγάλο εύρος πάχους συγκόλλησης ενώ είναι και πολύ πιο γρήγορη από την GTAW.

Η επιλογή τελικά της καταλληλότερης μεθόδου συγκόλλησης, πέρα από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναφέραμε προηγουμένως, σχετίζεται με τις απαιτήσεις της σύνδεσης, τον εξοπλισμό που διατίθεται, την κατάρτιση των τεχνικών σε σχέση με τη συγκεκριμένη μέθοδο και τελικά το συνολικό κόστος που δημιουργείται καθώς συζητάμε τη μετάβαση από μία μέθοδο σε μία άλλη.

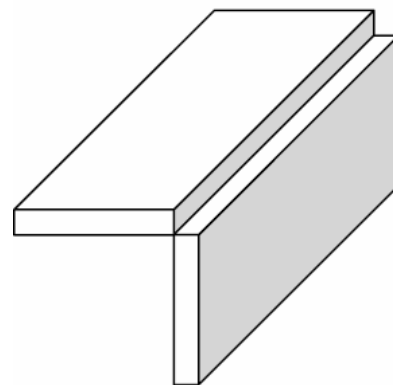
### 1.2.2. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Η συγκολλημένη κατασκευή προκύπτει από τη σύνδεση δύο ή περισσότερων μεταλλικών μερών. Η σχετική θέση στην οποία αυτά βρίσκονται ορίζει και τον τρόπο σύνδεσης τους. Τα μέρη αυτά μπορεί να έχουν τη μορφή ελάσματος, σωλήνα, χυτού κ.ά. Οι βασικές μορφές σύνδεσης της συγκόλλησης είναι οι εξής:

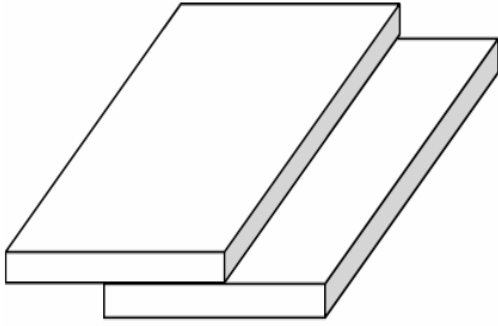
- 1.Σύνδεση συμβολής (butt joint): σύνδεση μεταξύ μερών τα οποία είναι τοποθετημένα κατά προσέγγιση στο ίδιο επίπεδο, Σχ 1.1.
- 2.Γωνιακή σύνδεση (corner joint): σύνδεση των μερών που σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$  σε μορφή Γ, Σχ. 1.2
3. Σύνδεση με επικάλυψη(lap joint): σύνδεση δύο επικαλυπτόμενων μερών, Σχ.1.3
- 4.Αυχενική σύνδεση (T joint): σύνδεση δύο μερών τοποθετημένων σε γωνία T, Σχ.1.4
- 5.Σύνδεση ακμών (edge joint) : παράλληλη σύνδεση μεταξύ των παράλληλων ακμών, Σχ.1.5



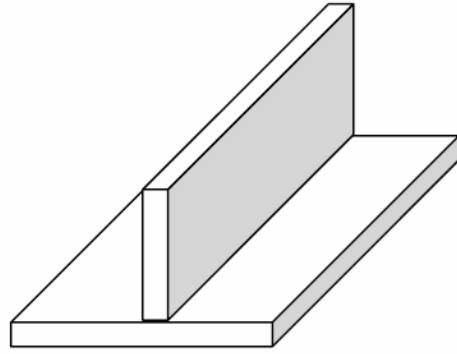
Σχήμα 1.1:Σύνδεση συμβολής



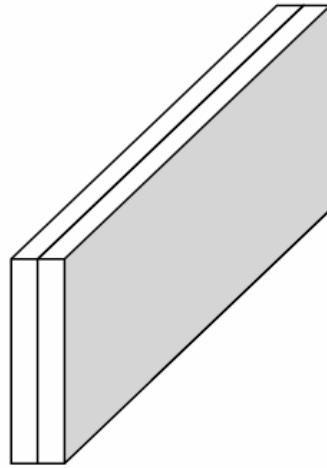
Σχήμα 1.2:Γωνιακή σύνδεση



Σχήμα 1.3:Σύνδεση με επικάλυψη



Σχήμα 1.4:Αυχενική σύνδεση T



Σχήμα 1.5:Σύνδεση ακμών

### 1.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

#### 1.3.1.ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης πραγματοποιούνται απότομες μεταβολές θερμότητας λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της και της γρήγορης ψύξης που ακολουθεί μετά. Ακόμη, η κατανομή θερμοκρασίας έχει έντονη εξάρτηση από το χρόνο και τη θέση που βρίσκεται η πηγή θερμότητας ενώ ταυτόχρονα οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού αλλάζουν με τις μεταβολές της θερμοκρασίας, πραγματοποιείται τήξη και αλλαγές φάσης του υλικού. Όλα αυτά μαρτυρούν τον τύπο του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας που είναι μη γραμμικός και χρονικά μεταβαλλόμενος.

Λόγω της τοπικής θέρμανσης τα μέρη της συγκολλημένης κατασκευής αναπτύσσουν διαφορετικές θερμοκρασίες στην έκταση της. Τελικά, έχουμε φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας τέτοια μέσα στην κατασκευή όσο και μεταξύ αυτής και του περιβάλλοντος. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 βασικές ενότητες:

### 1.3.2 ΑΓΩΓΗ

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο περιοχές με μεγαλύτερη μοριακή κινητική ενέργεια μεταφέρουν θερμότητα σε περιοχές με μικρότερη μοριακή ενέργεια μέσω μοριακών συγκρούσεων.

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή δίνεται απ' την παρακάτω εξίσωση του Fourier.

$$q'' = -k\nabla T \quad (1.1)$$

Όπου  $q''$  είναι η ροή θερμότητας,  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού,  $T$  η θερμοκρασία και  $\nabla = (\frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz})$ .

Η εξίσωση διατήρησης ενέργειας, σε διαφορική μορφή, περιγράφεται ως:

$$c\rho \frac{\nabla T}{\nabla t} = \frac{d}{dx}(k_x \frac{dT}{dx}) + \frac{d}{dy}(k_y \frac{dT}{dy}) + \frac{d}{dz}(k_z \frac{dT}{dz}) + \dot{Q} \quad (1.2)$$

όπου,  $c$  η ειδική θερμότητα,  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού,  $\dot{Q}$  η θερμότητα που παράγεται σε μια στοιχειώδη περιοχή και  $t$  ο χρόνος.

Εάν υποθέσουμε πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $k$  παραμένει σταθερός, τότε η Εξ. (1.2), μετασχηματίζεται στη μορφή:

$$\frac{\nabla T}{\nabla t} = \alpha \left( \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) + \dot{Q} \quad (1.3)$$

Όπου  $\alpha$  η θερμοδιαχυτότητα του υλικού ( $\alpha = \frac{k}{c\rho}$ )

Στη διαφορική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με αγωγή (1.3), υποθέτουμε στατική, ιστροπική συμπεριφορά στερεού και σταθερή αγωγιμότητα  $k$ . Η λύση της εξίσωσης έχει ισχυρή εξάρτηση από τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες.

### 1.3.3. ΣΥΝΑΓΩΓΗ

Όταν άγεται θερμότητα σε στατικό ρευστό προκαλείται ογκομετρική διαστολή. Το διεσταλμένο ρευστό, υπό την επίδραση των δυναμικών πιέσεων που οφείλονται στην επίδραση της βαρύτητας, πλέει και μετατοπίζεται μεταφέροντας με αυτόν τον τρόπο θερμότητα. Η κίνηση του ρευστού και η μεταφορά θερμότητας στα, αρχικά, στατικά ρευστά, αποκαλείται ελεύθερη συναγωγή.

Οι οριακές συνθήκες για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, έχουν ως αιτία δύο φαινόμενα, την συναγωγή και την ακτινοβολία. Η πρώτη προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_h'' = h_f \cdot (T - T_\infty) \quad (1.4)$$

όπου,  $h_f$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,  $T$  η θερμοκρασία του σώματος και  $T_\infty$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### 1.3.4. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Όλα τα υλικά ακτινοβολούν θερμική ενέργεια σε ποσότητα που εξαρτάται απ' τη θερμοκρασία τους, μέσω φωτονίων στο υπέρυθρο και ορατό πεδίο συχνοτήτων, του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όταν το θερμοκρασιακό πεδίο είναι ομοιόμορφο, οι ροές της ακτινοβολίας βρίσκονται σε ισορροπία και δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμικής ενέργειας. Η ισορροπία διαταράσσεται όταν υπάρχουν διαφορές στο θερμοκρασιακό πεδίο και τότε θερμική ενέργεια μεταφέρεται από τις επιφάνειες με υψηλότερες θερμοκρασίες προς αυτές με τις χαμηλότερες.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολίας, είναι η ακόλουθη:

$$q_{rad}'' = \sigma \varepsilon \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (1.5)$$

όπου,  $\varepsilon$  η διαχυτότητα,  $\sigma$  η σταθερά Stefan-Boltzmann,  $T$  η θερμοκρασία του σώματος και  $T_\infty$ , η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### 1.3.5. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στα μέταλλα οι θερμοδυναμικές και μηχανικές ιδιότητες έχουν υψηλή εξάρτηση απ' τη θερμοκρασία. Στις συγκολλήσεις μεταλλικών ελασμάτων, ειδικά όπου οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι ραγδαίες και απότομες αυτές οι ιδιότητες αλλάζουν συνεχώς κατά το πέρας της διαδικασίας. Η ειδική θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα, το μέτρο ελαστικότητας, η τάση διαρροής κ.α. ενδεικτικά, είναι κάποια απ' τα μεγέθη τα οποία όταν πραγματοποιούμε προσομοίωση συγκόλλησης πρέπει να γνωρίζουμε.

Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να προσδιορίσουν το βαθμό εξάρτησης των μεταβλητών ιδιοτήτων των μετάλλων απ' τη θερμοκρασία. Οι X.K. Zhu, Y.J. Chao μετέβαλλαν παραμετρικά τη θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμότητα, την πυκνότητα κ.α. και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα πειραματικά προσδιόρισαν την επίδραση αυτών των μεταβολών στο μη-μόνιμο θερμοκρασιακό πεδίο. Οι Biswas, Mandal<sup>1</sup> μελέτησαν μια μέθοδο επίλυσης, τη μέθοδο μέσων πλαστικών παραμορφώσεων, κατά την οποία εξήγαγαν συμπεράσματα για μεγαλύτερες κατασκευές από την θερμο-μηχανική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, υποσύνολου τους. Για τις διάφορες τιμές των θερμο-μηχανικών ιδιοτήτων ενός μαγνημιούχου χάλυβα (Πιν:1.1) υπολόγιζαν τις αντίστοιχες παραμορφώσεις που προκαλούνταν και στο τέλος υπολόγιζαν τον μέσο όρο αυτών.

Temperature/°C	Thermal conductivity/ W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Specific heat/J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Thermal expansion coefficient/ × 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Young modulus/GPa	Poisson ratio
0	51.9	450	10	200	0.2786
100	51.1	499.2	11	200	0.3095
300	46.1	565.5	12	200	0.331
450	41.05	630.5	13	150	0.338
550	37.5	705.5	14	110	0.3575
600	35.6	773.3	14	88	0.3738
720	30.64	1080.4	14	20	0.3738
800	26	931	14	20	0.4238
1450	29.45	437.93	15	2	0.4738
1510	29.7	400	15	0.2	0.499
1580	29.7	735.25	15	0.00002	0.499
3500	42.2	400	15.5	0.00002	0.499

ΠΙΝΑΚΑΣ: 1.1 Ιδιότητες υλικών χάλυβα C-Mn (Biswas<sup>1</sup> et al. 2007)

## 1.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΞΟΥ

### 1.4.1 ΤΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ROSENTHAL

Το πρόβλημα της μετάδοσης θερμότητας αλλά και της προσομοίωσης συγκολλήσεων έχει απασχολήσει την ερευνητική κοινότητα αρκετές δεκαετίες. Ο Rosenthal (1941) ήταν ένας από τους πρώτους ερευνητές που ανέπτυξε αναλυτικές λύσεις για τη διάδοση ροής θερμότητας στις συγκολλήσεις, βασιζόμενος στην μετάδοση θερμότητας με αγωγή για τη πρόβλεψη των διαστάσεων της λίμνης συγκόλλησης, σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες περιπτώσεις. Χρησιμοποιώντας την μερική διαφορική εξίσωση του Fourier για τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, πρότεινε ένα κινούμενο σύστημα συντεταγμένων για την επίλυση σημειακών και γραμμικών πηγών θερμότητας προσδιορίζοντας επιτυχώς ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων στις συγκολλήσεις μετάλλων. Οι αναλυτικές λύσεις στη ροή θερμότητας μας επέτρεψαν για πρώτη φορά να μελετήσουμε τη διαδικασία της συγκόλλησης σε σχέση με τις παραμέτρους που την ορίζουν όπως η ένταση του ρεύματος, η τάση, η ταχύτητα συγκόλλησης και η γεωμετρία της κατασκευής. Οσον αφορά το πάχος, το σχήμα και τις διαστάσεις της συγκόλλησης, καθώς και την μέθοδο μετάδοσης θερμότητας, ο Rosenthal διέκρινε τις θερμικές πηγές σε 3 τύπους: σημειακού, γραμμικού και επιφανειακού.

Στη περίπτωση επιφανειακής συγκόλλησης σε ένα σημείο ημι-άπειρου ελάσματος μεγάλου πάχους, όπου υπάρχει μετάδοση θερμότητας και στις 3 διευθύνσεις, η πηγή θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί σημειακή. Το θερμοκρασιακό πεδίο στη διάρκεια στιγμιαίου χρονικού διαστήματος συγκεντρωμένο σε ένα σημείο μπορεί να περιγραφεί απ' την παρακάτω εξίσωση.



$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} \frac{e^{-\frac{u}{2a}R}}{R} \quad (1.6)$$

Όπου  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , η απόσταση απ'τη σημειακή πηγή,  $w$  η σχετική ταχύτητα του κινούμενου συστήματος συντεταγμένων,  $u$  η ταχύτητα συγκόλλησης,  $T_0$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $a$  η διαχυτότητα του υλικού,  $Q = V\eta$ , η θερμική ενέργεια του τόξου της σημειακής θερμικής πηγής και  $\eta$  συντελεστής απόδοσης.

Η δεύτερη περίπτωση είναι η συγκόλληση σε λεπτό έλασμα απείρου πλάτους, όπου θεωρούμε ότι η πηγή είναι γραμμική κατά το πάχος  $H$  του ελάσματος και η ένταση της είναι η ακόλουθη:

$$q = \frac{Q}{H} \quad (1.7)$$

Η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σ' αυτή τη περίπτωση είναι η ακόλουθη:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{u}{2a}w} K_0\left(\frac{u}{2a}r\right) \quad (1.8)$$

Όπου  $r = \sqrt{w^2 + y^2}$

Και  $K_0(\eta)$  η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους και μηδενικής τάξης.

Όταν πραγματοποιούμε συγκόλληση συμβολής (butt weld) σε ράβδους, το θερμοκρασιακό πεδίο κατανέμεται ομοιόμορφα στο τμήμα της ράβδου που εφαρμόζεται η θερμική πηγή και ισοδυναμεί με την εφαρμογή θερμικής πηγής σε μια μικρή επιφάνεια με σταθερή θερμοκρασία. Η θερμική πηγή σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται επιφανειακή και η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου είναι η ακόλουθη:

$$T = \frac{Q}{c\rho A(4\pi at)^{1/2}} e^{-\frac{R^2}{4at}} \quad (1.9)$$

Όπου  $c$  η ειδική θερμότητα,  $\rho$  η πυκνότητα,  $A$  η επιφάνεια,  $t$  ο χρόνος,  $R$  η απόσταση από την επιφάνεια της θερμικής πηγής.

Οι αναλυτικές λύσεις του Rosenthal βασίστηκαν στη συγκεντρωμένη θερμική πηγή, ωστόσο δεν λαμβάνουν υπόψη τις αλλαγές στις ιδιότητες των υλικών, τις αλλαγές φάσεις του υλικού και τη λανθάνουσα θερμότητα. Παρόλα αυτά, είναι κοινώς αποδεκτό ότι παρέχουν ακρίβεια για χαμηλές θερμοκρασίες και γι' αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών συγκόλλησης.

#### 1.4.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ GAUSS

Ο Friedman<sup>2</sup> (1975) εξέλιξε τη δουλειά του Rosenthal και πρότεινε τη περιγραφή της θερμικής πηγής όχι ως σημείο αλλά ως κατανομή στο χώρο με βάση το μοντέλο του Gauss.

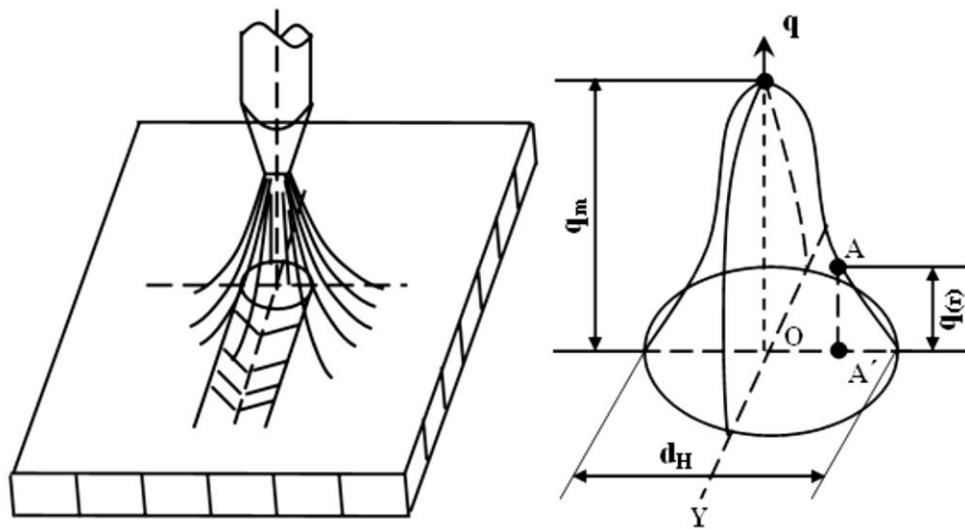
Συγκεκριμένα, υπέθεσε πως το 95% της θερμικής ενέργειας συγκεντρώνεται μέσα στην

‘καμπάνα’ της κατανομής με κέντρο το σημείο που περνάει η πηγή και ακτίνα την ακτίνα του τόξου.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούμε πως το φορτίο μπορεί να εφαρμόζεται είτε επιφανειακά (προσπερνώντας τη διάσταση του πάχους του ελάσματος), είτε ογκομετρικά. Η εξίσωση της συγκεκριμένης πηγής θερμότητας είναι η ακόλουθη, ενώ στο Σχ. 1.6 φαίνεται η κατανομή της στο χώρο.

$$q(r) = q_{max} e^{\left(\frac{-3r^2}{R^2}\right)} = \frac{3Q}{\pi R^2} e^{\left(\frac{-3r^2}{R^2}\right)} \quad (1.10)$$

όπου  $q(r)$  η ροή θερμότητας σε απόσταση  $r$  απ’ το κέντρο του θερμικού τόξου,  $R$  η ακτίνα του θερμικού τόξου,  $q_{max}$  η μέγιστη θερμική ροή για  $r=0$  στο κέντρο της θερμικής πηγής.



Σχ.1.6:Κατανομή κατά Gauss της θερμικής πηγής

Για τις πιο συνήθεις περιπτώσεις συγκολλήσεων τόξου, όπως οι MMA, GMAW, GTAW η μοντελοποίηση αυτή αποδίδει αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία, αυτή η προσέγγιση επιλέχθηκε για την αναπαράσταση της θερμικής πηγής στο υπολογιστικό περιβάλλον.

Εξέλιξη του μοντέλου κατανομής θερμικής πηγής Gauss, αποτελούν το ημι-ελλειψοειδές μοντέλο του Goldak<sup>3</sup> και το διπλό ελλειψοειδές μοντέλο του Goldak<sup>4</sup>, στα οποία έχουν ληφθεί υπόψη περισσότερες διαστάσεις της λίμνης συγκόλλησης και αναπαριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κίνηση της πραγματικής πηγής.

## 1.5 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

Στις συγκολλήσεις τόξου λαμβάνουν χώρα σημαντικά μηχανικά φαινόμενα, τα οποία χαρακτηρίζουν την καταλληλότητα, το χρόνο ζωής και τις προδιαγραφές της συγκολλημένης κατασκευής. Το υλικό αποκτά ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις, καθώς θερμαίνεται και ψύχεται ενώ η περιοχή γύρω και μέσα στη ραφή παραλαμβάνει πολύ μεγάλες θερμικές τάσεις που δημιουργούν ανομοιογενείς κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων στη συνολική έκταση της κατασκευής. Οι παραμένουσες τάσεις, οι τάσεις που διαμορφώνονται μετά το πέρας και κατά τη διάρκεια της ψύξης, δημιουργούν επιπλέον πολυπλοκότητες στη πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των συγκολλημένων ελασμάτων.

### 1.5.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

Γενικά οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

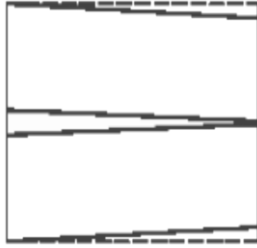
- Η εγκάρσια συστολή (transverse shrinkage), που αφορά συστολή σε μία διεύθυνση κάθετη στον άξονα συγκόλλησης (Σχ. 1.7)
- Η επίπεδη περιστροφή (rotational distortion), που σχετίζεται με την εγκάρσια συστολή και αφορά περιστροφή στο επίπεδο του ελάσματος (Σχ. 1.8.)
- Η γωνιακή μεταβολή (angular change), που αφορά περιστροφή γύρω από τον άξονα συγκόλλησης και προκαλείται από την ανομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή κατά το πάχος του ελάσματος (Σχ. 1.9).
- Η διαμήκης συστολή (longitudinal shrinkage), που αφορά συστολή κατά το μήκος του άξονα συγκόλλησης (Σχ. 1.10)
- Η διαμήκης καμπτική παραμόρφωση (longitudinal bending distortion), που αφορά κάμψη σε ένα επίπεδο κάθετο στο έλασμα και διέρχεται από τον άξονα συγκόλλησης. Προκαλείται από την ανομοιόμορφη κατανομή της διαμήκους συστολής κατά τον άξονα συγκόλλησης (Σχ. 1.11)
- Ο λυγισμός (buckling distortion) που προκαλείται από τις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις, ιδιαίτερα στα λεπτά ελάσματα.(Σχ.1.12)



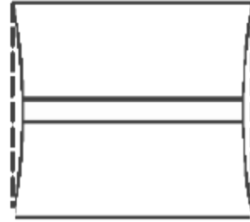
Σχ.1.7:Εγκάρσια συστολή



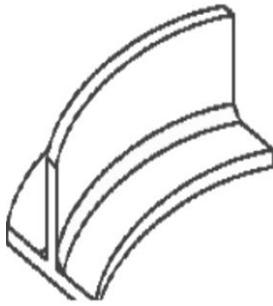
Σχ.1.8:Επίπεδη περιστροφή



Σχ.1.9:Γωνιακή μεταβολή



Σχ.1.10:Διαμήκης συστολή



Σχ.1.11:Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση



Σχ.1.12: Λυγισμός

### 1.5.2. ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

Κατά την εξέλιξη των θερμικών φαινομένων προκύπτουν αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης. Το μέτρο ελαστικότητας, οι τάσεις διαρροής, το μέτρο του Poisson είναι κάποιες από τις πιο βασικές. Οι μεταβολές αυτές κάνουν την πρόβλεψη των τελικών παραμορφώσεων ένα περίπλοκο θέμα.

Στην ελαστική περιοχή, η συνολική παραμόρφωση προσδιορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_T \quad (1.11)$$

Όπου  $d\varepsilon_e$  η ελαστική παραμόρφωση,  $d\varepsilon_T$  η παραμόρφωση που οφείλεται στην θερμοκρασία. Ο πίνακας ελαστικότητας  $[D]_e$  (που εξαρτάται από τις αλλαγές του μέτρου ελαστικότητας και του μέτρου Poisson) μεταβάλλεται με τις αλλαγές στο θερμοκρασιακό πεδίο, οπότε,

$$[d\varepsilon_e] = d\{[D]_e^{-1}[\sigma]\} = [D]_e^{-1}\{d\sigma\} + \frac{d[D]_e^{-1}}{dT}\{\sigma\}dT \quad (1.12)$$

$d\varepsilon_T$  είναι η διαφορική αύξηση του όρου  $\{\alpha_0 T\}$ , όπου  $\alpha_0$  είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής στην την αρχική θερμοκρασία, οπότε:

$$[d\varepsilon_T] = \{\alpha_0 dT + T d\alpha_0\} = \{\alpha_0 + \frac{d\alpha_0}{dT} T\}dT = \{\alpha_0 dT\} \quad (1.13)$$

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής μεταβάλλεται και αυτός με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{d\alpha_0}{dT} T \quad (1.14)$$

αντικαθιστώντας τις εξ. (1.12) ,(1.13) στην (1.11) έχουμε:

$$\{d\sigma\} = [D_e]\{d\varepsilon\} - [D_e]\left(\{\alpha\} + \frac{d[D]_e^{-1}}{dT}\{\sigma\}\right)dT \quad (1.15)$$

ή πιο απλά

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (1.16)$$

όπου,  $[D] = [D_e]$ ,  $\{C\} = [D_e]\left(\{\alpha\} + \frac{d[D]_e^{-1}}{dT}\{\sigma\}\right)$  είναι πίνακες σχετικοί με τη θερμοκρασία

Η εξ. (1.15) μας δίνει τη στοιχειώδη αύξηση τάσης σε σχέση με τη στοιχειώδη παραμόρφωση, στην ελαστική περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη τις θερμικά εξαρτώμενες ιδιότητες του υλικού.

Στην πλαστική περιοχή, υποθέτουμε ότι το υλικό αρχίζει να διαρρέει όταν συνάρτηση διαρροής  $f(\sigma_x, \dots)$  φτάσει την τιμή της  $f_0(\sigma_y, T, K)$  που είναι:

$$f = f_0(\sigma_y(T), K(\varepsilon_p)) \quad (1.17)$$

όπου  $T$  η θερμοκρασία,  $K$  ο συντελεστής εργοσκληρύνησης.

Σε διαφορική μορφή είναι:

$$df = df_0 \quad (1.18)$$

Η συνολική στοιχειώδης αύξηση της παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή υπολογίζεται ως:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon\}_p + \{d\varepsilon\}_e + \{d\varepsilon\}_T \quad (1.19)$$

όπου  $\{d\varepsilon\}_p$ , η στοιχειώδης αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης

Σύμφωνα με το νόμο διαρροής, έχουμε:

$$\{d\varepsilon\}_p = \xi \left\{ \frac{df}{d\sigma} \right\} \quad (1.20)$$

Από τις προηγούμενες εξισώσεις ,μπορούμε να λύσουμε ως προς  $\xi$ :

$$\xi = \left[ \left\{ \frac{df}{d\sigma} \right\}^T [D_e] \{d\varepsilon\} - \left\{ \frac{df}{d\sigma} \right\}^T [D_e] \left( \{\alpha\} + \frac{d[D]_e^{-1}}{dT} \{\sigma\} \right) dT - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT \right] / S$$

$$S = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} [D_e] \{d\varepsilon\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} + \frac{\partial f_0}{\partial K} \left\{ \frac{\partial K}{\partial \varepsilon_p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (1.21)$$

Οπότε, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μετασχηματίζεται στη παρακάτω μορφή:

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\varepsilon\} - \left( [D_{ep}]\{\alpha\} + [D_{ep}] \frac{d[D]_e^{-1}}{dT} \{\sigma\} \right) - [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \sigma} \right\} / S \right) dT \quad (1.22)$$

όπου ο όρος  $[D_{ep}]$  είναι ο συνδυασμένος ελαστο-πλαστικός πίνακας

$$[D_{ep}] = [D_e] - [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e] / S \quad (1.23)$$

Αν

$$[D] = [D_e], \quad \{C\} = \{C\}_{ep} = [D_{ep}] \{\alpha\} + \left[ D_{ep} \frac{d[D]_e^{-1}}{dT} \{\sigma\} \right] - [D_e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \sigma} \right\} / S$$

Τότε έχουμε τη μετασηματισμένη μορφή της εξ. (1.16):

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\} - \{C\} dT \quad (1.16)$$

Όπου στην ελαστική περιοχή είναι  $[D] = [D_e]$ ,  $\{C\} = \{C\}_e$ , και στην πλαστική περιοχή έχουμε  $[D] = [D_{ep}]$ ,  $\{C\} = \{C\}_{ep}$

Αν υποθέσουμε ένα μονάχα στοιχείο από τη συνολική κατασκευή, τότε αυτό θα έχει θερμοκρασία  $T$ , στοιχειώδη δύναμη  $\{F\}^e$ , στοιχειώδη μετατόπιση  $\{\delta\}$ , παραμόρφωση  $\{\varepsilon\}$  και τάση  $\{\sigma\}$  σε χρόνο  $t$  και  $\{F + dF\}^e, \{\delta + d\delta\}, \{\varepsilon + d\varepsilon\}$  και  $\{\sigma + d\sigma\}$  σε χρόνο  $t+dt$ . Με την εφαρμογή της αρχής των ελάχιστων μετατοπίσεων έχουμε:

$$\begin{aligned} \{d\sigma\}^T \{F + dF\}^e &= \iint_{\Delta V} \{d\sigma\}^T [B]^T (\{\sigma\} + [D] \{d\varepsilon\} - [C] \{dT\}) dV \\ &= \{d\sigma\}^T \iint_{\Delta V} [B]^T (\{\sigma\} + [D] \{d\varepsilon\} - [C] \{dT\}) dV \end{aligned} \quad (1.24)$$

Όπου  $[B]$  είναι ο λεγόμενος γεωμετρικός πίνακας και σχετίζεται με τη γεωμετρία του στοιχείου.

Εφόσον η κατασκευή βρίσκεται σε ισοροπία τη στιγμή  $t$  τότε έχουμε:

$$\{dF\}^e = \iint_{\Delta V}^e [B]^T \{\sigma\} dT \quad (1.25)$$

Και αν αντικαταστήσουμε τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων τότε:

$$\{dF\}^e = \iint_{\Delta V}^e [B]^T ([D] \{d\varepsilon\} - \{C\} dT) dV \quad (1.26)$$

ή διαφορετικά:

$$\{dF\}^e + \{dR\}^e = [K]^e \{d\delta\} \quad (1.27)$$

όπου η ισοδύναμη στοιχειώδης δύναμη της αρχικής παραμόρφωσης είναι  $\{dR\}^e = \iint_{\Delta V}^e [B]^T \{C\} dT dV$  και το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου είναι  $[K]^e = \iint_{\Delta V}^e [B]^T ([D] [B]) dV$ .

Αν αντικαταστήσουμε τα  $\{C\}$ ,  $[D]$  από την εξ. (1.16) στην εξ. (1.27), η ισοδύναμη στοιχειώδης δύναμη και το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου μπορούν να εφαρμοστούν στον συνολικό

μητρώο ακαμψίας και τη στήλη με τα διανύσματα δύναμης και να ιδωθούν ως ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων έτσι ώστε να λύσουμε το πρόβλημα των μετατοπίσεων της κατασκευής.

$$[K]\{d\delta\} = \{dF\}$$

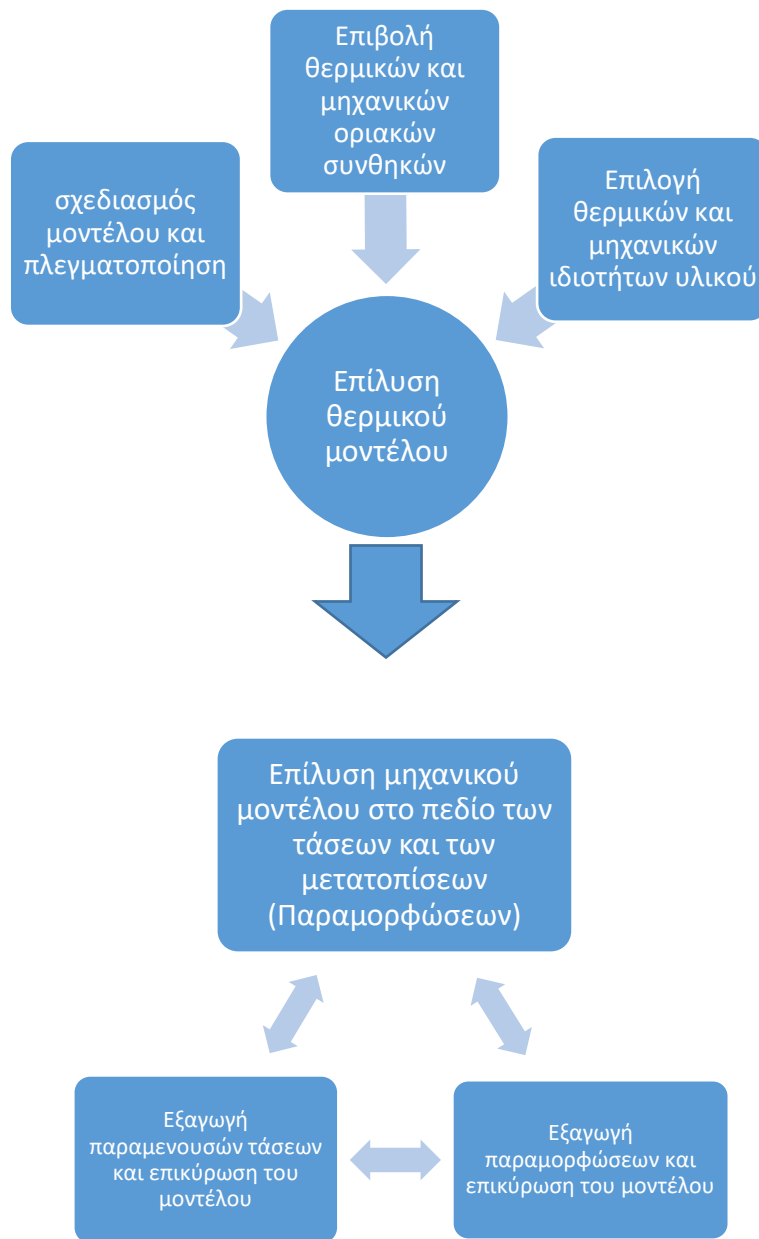
όπου  $[K] = \Sigma[K]^e$ ,  $\{dF\} = \Sigma(\{dF\}^e + \{dR\}^e)$ . Στην πραγματικότητα στις συγκολλήσεις ελασμάτων το άθροισμα δυνάμεων  $\Sigma(\{dF\}^e)$  βρίσκεται κοντά στο μηδέν.

## 1.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ

Οι θερμικές και οι μηχανικές ιδιότητες, είναι μη γραμμικές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης. Κατά την θέρμανση και τη ψύξη του ελάσματος το υλικό υπόκειται σε αλλαγές φάσης, τήκεται όταν το ηλεκτρόδιο εφαρμόσει θερμικό φορτίο και στερεοποιείται πάλι μετά από κάποια ώρα. Τα όρια διαρροής του υλικού διαφέρουν σημαντικά κατά τη διάρκεια του φαινομένου και όταν επανέλθουν στην αρχική θερμοκρασία τους παρατηρούμε συγκέντρωση τάσεων γύρω και μέσα στη ζώνη τήξης. Ακόμη, αναπτύσσονται μετατοπίσεις λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στις επιφάνειες του ελάσματος και του τρόπου συγκράτησης.

Στο Σχ. 1.13 βλέπουμε την αλληλουχία των βημάτων όταν σχεδιάζουμε ένα θερμομηχανικό μοντέλο προσομοίωσης συγκόλλησης τόξου. Οι εισοδοί του μηχανικού μοντέλου είναι η έξοδος των θερμοκρασιών της επίλυσης του θερμικού μοντέλου. Εκτός των θερμικών παραμορφώσεων, η είσοδος του υλικού στη πλαστική περιοχή, κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας, συνεισφέρει σημαντικά στη διαμόρφωση των τελικών μετατοπίσεων και των παραμενουσών τάσεων. Αν έχουμε μία μη ρεαλιστική απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου, αυτό θα αποτυπωθεί με βεβαιότητα στο μηχανικό μέρος. Μία πτυχή, που στη παρούσα μελέτη δεν έχει εξεταστεί, είναι η επίδραση των μεταλλουργικών φαινομένων και της μικροδομής του υλικού. Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υλικού, η θερμική αγωγιμότητα και η θερμοχωρητικότητα του επηρεάζονται σημαντικά από τη σύσταση του και τη μικροδομή του. Οι αλλαγές φάσης έχουν αντίκτυπο στο ποσό της λανθάνουσας θερμότητας που αποδίδεται, όπως και στις ογκομετρικές μεταβολές που προκύπτουν.

Η μέθοδος επίλυσης που έχουμε επιλέξει στη παρούσα μελέτη διακρίνεται σε δύο βασικά μέρη, όπως φαίνεται και στο Σχ.1.13, το θερμικό και το μηχανικό. Στην πραγματικότητα, τα δύο αυτά πεδία εξελίσσονται ταυτόχρονα στη διαδικασία της συγκόλλησης αλλά αυτή η μέθοδος διαχωρισμού αφ ενός απλουστεύει το πρόβλημα, αφ ετέρου μας διευκολύνει να εντοπίζουμε πιο εύκολα τις αιτίες σφαλμάτων στο υπολογιστικό περιβάλλον, αφού η έντονη αλληλεξάρτηση των θερμικών μηχανικών και ιδιοτήτων μικροδομής του υλικού δημιουργεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα.



Σχ.1.13: Διάγραμμα ροής του θερμο-μηχανικού μοντέλου προσομοίωσης



## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η προσομοίωση συγκολλήσεων ελασμάτων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έχει απασχολήσει την ερευνητική κοινότητα εδώ και αρκετές δεκαετίες. Πρωτοπόρος ήταν ο Rosenthal (1946) που ανέπτυξε τις ομώνυμες αναλυτικές λύσεις περιγραφής της ροής θερμότητας με αγωγή και κατάφερε να υπολογίσει προσεγγιστικά τις διαστάσεις της λίμνης συγκόλλησης για δύο και τρεις διαστάσεις. Η μελέτη του κατέστησε για πρώτη φορά δυνατόν να εξετάσουμε τον βαθμό επίδρασης παραμέτρων όπως η ταχύτητα, η ένταση του ρεύματος και η γεωμετρία της κατασκευής.

Η πρώτη προσπάθεια για αριθμητική προσομοίωση των φαινομένων που εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έγινε από τον Friedman<sup>2</sup>, ο οποίος ανέπτυξε ένα θερμο-μηχανικό μοντέλο, με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών κατανομών και της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων. Υπολογιστικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, που λάμβαναν υπόψη την ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού αναπτύχθηκαν από τους Muraki, Bryan, Masubuchi<sup>5</sup> με στόχο τον προσδιορισμό των θερμικών παραμορφώσεων και της κίνησης του μετάλλου. Στη συνέχεια οι Parazoglou, Masubuchi<sup>6</sup> ανέπτυξαν μια τεχνική στην οποία περιέγραφαν τις κατανομές των θερμοκρασιών, των θερμικών παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων με πεπερασμένα στοιχεία, συμπεριλαμβάνοντας και τις αλλαγές φάσης του υλικού. Πιο πρόσφατα οι Islam, Buijk<sup>7</sup> ανέπτυξαν ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία και γενετικούς αλγορίθμους για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται μετά τη συγκόλληση.

Ίσως ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που απασχόλησαν τους ερευνητές ήταν η μοντελοποίηση της θερμικής πηγής και συγκεκριμένα οι παράμετροι που καθορίζουν το ποσό θερμότητας που αποδίδεται στη συγκολλητή κατασκευή από το ηλεκτρικό τόξο. Ο Goldak<sup>4</sup> ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο για θερμική πηγή συγκόλλησης, βασιζόμενος σε Gaussian κατανομή της θερμικής ισχύος. Υπέθεσε διπλή ελλειψοειδή κατανομή της θερμικής πηγής με στόχο τον προσδιορισμό του μεγέθους και του σχήματος της πηγής, καθώς και την κατανομή αυτής κατά το πάχος του ελάσματος, με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο Paulo Roberto de Freitas Teixeira<sup>8</sup> εξέτασε παραμετρικά την εφαρμογή Gaussian κατανομής θερμικής πηγής για συγκόλληση τύπου TIG εξετάζοντας την επίδραση του πάχους των ελασμάτων και της ακτίνας του τόξου. Ο Hashemzadeh<sup>9</sup> έκανε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ τριών διαφορετικών μοντέλων θερμικής πηγής, της επιφανειακής Gaussian κατανομής, του ημι-ελλειψοειδούς μοντέλου του Goldak και του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου του Goldak σε συγκολλήσεις τόξου με αέριο (GMAW) και σε συγκόλληση με laser σε λεπτό έλασμα ανοξείδωτου χάλυβα 304. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ρεαλιστικά για τα δύο μοντέλα του Goldak σε συγκολλήσεις τύπου laser και GMAW.

Πολλοί ερευνητές εστίασαν σε μεθόδους ελέγχου των παραμενουσών τάσεων και των παραμορφώσεων. Ο Michaleris<sup>10</sup> εξέτασε μία τεχνική ελαχιστοποίησης των παραμορφώσεων, προσεγγίζοντας ξεχωριστά τη θερμική και τη μηχανική μελέτη. Κατασκεύασε ένα διδιάστατο θερμικό μοντέλο του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στο τρισδιάστατο μηχανικό μοντέλο και εστίασε ιδιαίτερα στον έλεγχο των παραμορφώσεων λόγω λυγισμού. Ο Tso Liang Te<sup>11</sup> εξέτασε την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων και γωνιακών παραμορφώσεων σε γωνιακές συγκολλήσεις (T joint) με πεπερασμένα στοιχεία. Εξέτασε ως προς το πάχος της φλάντζας και το βαθμό διείδυσης του ηλεκτροδίου, την ανάπτυξη των τάσεων και των παραμορφώσεων ενώ χρησιμοποίησε την τεχνική element birth and death για να αναπαραστήσει το ρυθμό εναπόθεσης υλικού στην εξέλιξη του χρόνου. Ο Bai-Qiao Chen<sup>12</sup> εξέτασε πειραματικά και αριθμητικά το θερμοκρασιακό πεδίο και το πεδίο των παραμορφώσεων σε συγκόλληση συμβολής λεπτών ελασμάτων χάλυβα St37. Εξέτασε παραμετρικά το βαθμό επίδρασης του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και δοκίμασε διαφορετικού μεγέθους πλέγματα των οποίων τα αποτελέσματα και σύγκρινε. Ο W Jiang<sup>13</sup> εξέτασε την συγκόλληση, σε πολλαπλά πάσα, χαλύβδινης πλάκας και τις παραμορφώσεις που προέκυπταν. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρήκαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Ο D. Tikhomirov<sup>14</sup> ανέπτυξε μία μέθοδο ελέγχου των παραμορφώσεων σε βιομηχανικό επίπεδο, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, βελτιστοποιώντας παραμετρικά την κατασκευή στο στάδιο του σχεδιασμού. Ο Ranjbar<sup>15</sup> ανέπτυξε ένα θερμο-μηχανικό μοντέλο για τον έλεγχο της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού, του θερμοκρασιακού πεδίου και των παραμενουσών τάσεων σε σημειακή συγκόλληση αντίστασης (resistance spot welding). επαλήθευσε το αριθμητικό μοντέλο ως προς το πειραματικό με χρήση ακτίνων X και τα αποτελέσματα του ήταν ικανοποιητικά.

Ο Zaeh<sup>16</sup> εξέτασε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων τη βελτιστοποίηση ελαφρών κατασκευών αλουμινίου. Συγκεκριμένα προέβλεψε μέσω προσομοίωσης συγκόλλησης τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding) τις μηχανικές ιδιότητες καθώς και τη διαστατική ακρίβεια της συγκολλημένης κατασκευής.

Ο Lingdren<sup>17 18 19</sup> εξέδωσε μία ανάλυση τριών μερών που ασχολήθηκε με τη καταγραφή μεγάλου τμήματος της ερευνητικής δουλειάς που έχει γίνει γύρω από το θέμα της προσομοίωσης συγκολλήσεων. Στο πρώτο μέρος ανέλυσε την μετάβαση από την πιο απλή δυσδιάστατη γεωμετρία συγκολλήσεων σε πιο περίπλοκες αλλά ρεαλιστικές τρισδιάστατες απεικονίσεις και τις σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ του θερμικού, του μηχανικού και του μεταλλουργικού πεδίου και της μικροδομής του υλικού. Στο δεύτερο μέρος ασχολήθηκε με την εξέλιξη στη μοντελοποίηση του υλικού συγκόλλησης και συνέχισε με την ανάλυση των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου και στην ελαστο-πλαστική περιοχή. Στο τρίτο μέρος, εξετάζει μεθόδους αριθμητικής βελτιστοποίησης της προσομοίωσης συγκόλλησης μετάλλων και αναλύει τους τρόπους επαλήθευσης των αποτελεσμάτων με το πραγματικό μοντέλο.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σήμερα, για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής αυξημένης πολυπλοκότητας απόρροια είτε της υφιστάμενης γεωμετρίας είτε των ιδιοτήτων του μέσου, καταφεύγουμε στη χρήση αριθμητικών-υπολογιστικών μεθόδων. Μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια εξέλιξη των μητρώϊκων μεθόδων που έγινε από επιστήμονες όπως ο Αργύρης I., ο Clough, ο Ritz και άλλοι. Οι βασικές ιδέες διαμορφώθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 40, από εξελίξεις στην δομική ανάλυση αεροσκαφών. Αρχικά ο Hrenikoff χρησιμοποίησε τη “Μέθοδο των δικτυωμάτων”, αργότερα ο Turner δημιούργησε μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το 1960. Οι μαθηματικές βάσεις για την σημερινή μορφή της μεθόδου μπήκαν την δεκαετία του 70. Πλέον αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων στην επιστήμη του μηχανικού. Οι εφαρμογές της εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, κ.α. Με την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των συστημάτων CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα και απλά.

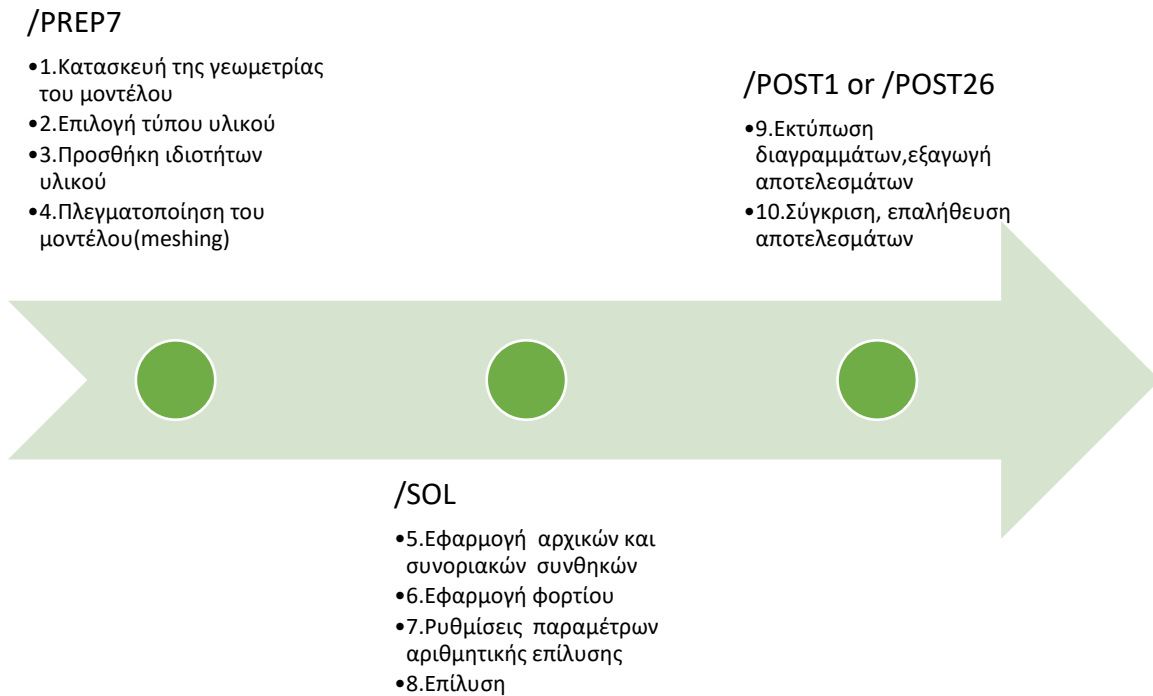
Με αυτή τη μέθοδο, μια πολύπλοκη περιοχή διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements), πχ τετραπλεύρου ή τριγώνου κλπ, και όλα μαζί συνθέτουν ένα πλέγμα, στους κόμβους του οποίου υπολογίζονται οι προσεγγιστικές τιμές των μεγεθών του πεδίου. Ο χώρος στον οποίο εκτείνεται το πεδίο θεωρείται ότι απαρτίζεται από πολλά μικρά στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων. Οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους του συστήματος προκύπτουν, συνήθως, μέσα από διαδικασίες ελαχιστοποίησης κάποιων ενεργειακών συναρτησιακών εκφράσεων, που περιλαμβάνουν τα ζητούμενα μεγέθη. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αριθμητική επίλυση τόσο σε μόνιμες, όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις.

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των Η/Υ οδήγησε στη δημιουργία εμπορικών πακέτων λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων τα οποία παρέχουν ευελιξία στη χρήση της μεθόδου λόγω του φιλικού προς τον χρήστη περιβάλλοντος και της ποικιλίας των εργαλείων για την κατασκευή της γεωμετρίας και την εκτέλεση της προσομοίωσης. Διαδεδομένα είναι το ANSYS<sup>TM</sup> και η εξέλιξη του FEMLAB<sup>TM</sup>, το COMSOL<sup>TM</sup> κλπ.

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ANSYS MECHANICAL APDL 17.0

Για την προσομοίωση της επίπεδης συγκόλλησης τόξου χρησιμοποιήσαμε το πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS MECHANICAL APDL 17.0. Στο πρόβλημα μας συντάχθηκε κώδικας APDL, η δομή του οποίου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.

Αρχικά κατασκευάζεται η γεωμετρία του μοντέλου, επιλέγεται ο τύπος υλικού και προσδιορίζονται οι ιδιότητες του (μηχανικές θερμικές κτλ) και έπειτα κατασκευάζεται το πλέγμα της γεωμετρίας που ορίζει το πρόβλημα μας με πεπερασμένα στοιχεία. Αυτά τα βήματα στο ANSYS υλοποιούνται στον προ-επεξεργαστή (PREP7). Στη συνέχεια εισάγουμε αρχικές και συνοριακές συνθήκες, προσδιορίζουμε τις φορτίσεις και επιλέγουμε τις παραμέτρους αριθμητικής επίλυσης. Αυτά τα βήματα πραγματοποιούνται στον επεξεργαστή SOLUTION (SOL). Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος τα αποτελέσματα εμποτεύονται με διαγράμματα και ακόμη με την επιλογή animation που μπορούμε να οπτικοποιήσουμε την εξέλιξη των φαινομένων στο χρόνο και στην συνέχεια εξάγονται για περαιτέρω ανάλυση. Τα τελευταία βήματα πραγματοποιούνται σε έναν απ' τους δύο μετα-επεξεργαστές του προγράμματος (POST1 ή POST26). Τέλος τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αρχικές εκτιμήσεις, μαθηματικά μοντέλα ή πειραματικές μετρήσεις και ελέγχεται η εγκυρότητα και η ακρίβεια τους. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχ. 3.1) βλέπουμε την ακολουθία των βημάτων που περιγράφηκαν, συνοπτικά.



Σχ.3.1 Διάγραμμα ροής βημάτων προσομοίωσης στο ANSYS 17

## 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

### 4.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο σχεδιασμός και η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης αποτελεί ένα θέμα με μεγάλη πολυπλοκότητα. Είναι ένα μη γραμμικό χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα που απαιτεί κατάλληλη σύνδεση του θερμικού και του ελαστο-πλαστικού πεδίου. Ο σχεδιασμός του μοντέλου απαιτεί εφαρμογή συνθήκης συμμετρίας, έτσι ώστε να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων και ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης. Η πλεγματοποίηση με διαφορετικού μεγέθους στοιχεία μας βοηθάει να εξάγουμε πιο ακριβείς λύσεις στη ζώνη τήξης και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Η επιλογή της μοντελοποίησης του υλικού και των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του πρέπει να είναι κατάλληλη να περιγράψει τη συμπεριφορά του για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Ο ακριβής σχεδιασμός και η εφαρμογή της δέσμης του τόξου είναι ακόμα ένα πολύ σημαντικό θέμα, στο θερμικό μέρος και η επιβολή κατάλληλων αρχικών και συνοριακών συνθηκών καθορίζουν την αναπαράσταση ενός ρεαλιστικού μοντέλου.

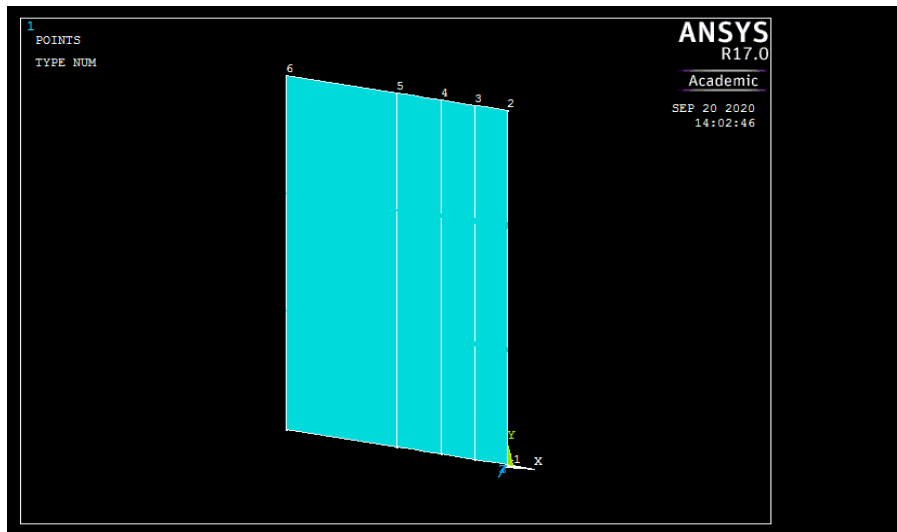
#### 4.1.2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Ο σχεδιασμός της κατασκευής διαμορφώθηκε, ορίζοντας παραμετρικά, το μήκος, το πλάτος και το πάχος, έτσι ώστε να μπορέσουμε να δοκιμάσουμε διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας. Εφ' όσον υπάρχει συμμετρία στη κατασκευή επιλέξαμε τη μοντελοποίηση του ενός προς συγκόλληση ελάσματος αντί των δύο. Οι διαστάσεις του ελάσματος που επιλέξαμε ήταν 200 x 100 x 2 mm.

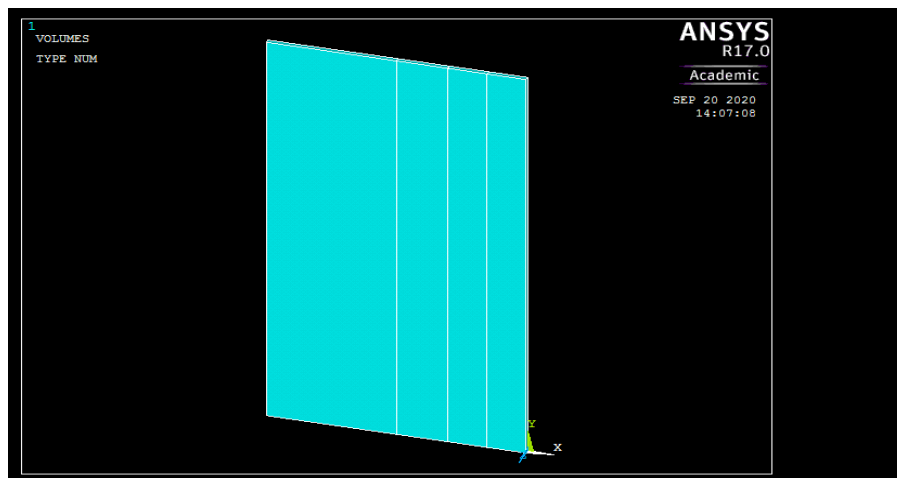
Αρχικά ορίσαμε σημεία στο χώρο (Σχ. 4.1) τα οποία με τη σειρά τους όριζαν τις επιφάνειες (Σχ. 4.2) και τους τελικούς όγκους (Σχ. 4.3), τα όρια των οποίων επιλέχθηκαν με βάση τις αλλαγές των μεγεθών στο πλέγμα της κατασκευής.



Σχ.4.1 Ορισμός σημείων



Σχ.4.2 Ορισμός επιφανειών

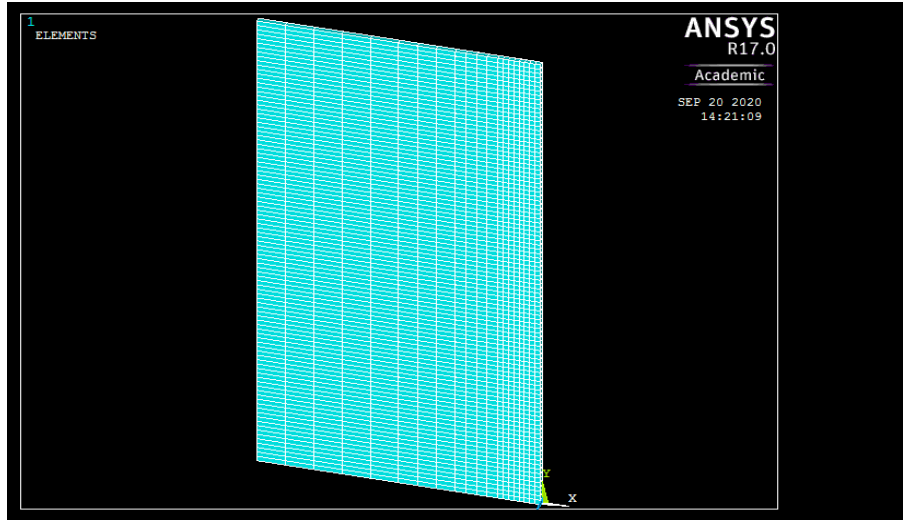


Σχ.4.3 Ορισμός όγκων

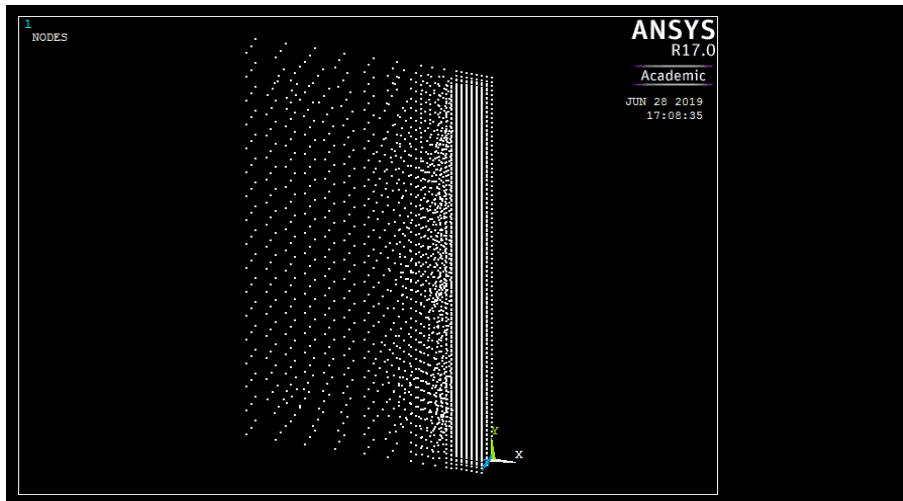
#### 4.1.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (MESHING)

Η κατασκευή του πλέγματος ορίστηκε στους 4 όγκους με διαφορετικό μέγεθος στοιχείων. Αυτό συνέβη διότι οι περιοχές που μας ενδιαφέρει η ακρίβεια μέτρησης θερμοκρασίας και μετατοπίσεων, βρίσκονται κοντά στη ζώνη τήξης και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Ο αριθμός των στοιχείων, βέβαια, επηρεάζει και το συνολικό υπολογιστικό κόστος, οπότε το μέγεθος των στοιχείων επιλέχθηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να συμπεριλαμβάνει αυτόν τον παράγοντα. Στη ζώνη τήξης το μέγεθος των στοιχείων ήταν 2 mm στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη επιλέχθηκαν στοιχεία 4 mm ενώ στις αμέσως επόμενες περιοχές επιλέχθηκαν αντίστοιχα στοιχεία μεγέθους 8, 10 mm (Σχ. 4.4 ,4.5). Η ύπαρξη διαφορετικών μεγεθών στοιχείων του πλέγματος απαιτεί εφαρμογή συνθηκών περιορισμού μεταξύ των όγκων. Σε διαφορετική

περίπτωση προκύπτει απόκλιση των φορτίων που εφαρμόζονται στους κοινούς κόμβους των 2 όγκων.



Σχ.4.5 Πλεγματοποίηση όγκων



Σχ.4.6 Πλεγματοποίηση στοιχείων

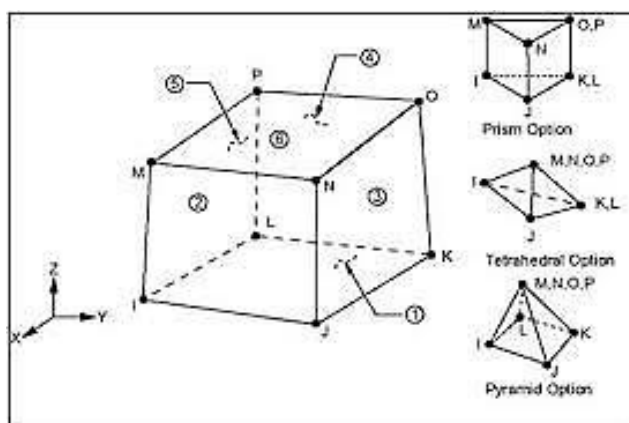
#### 4.1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΛΙΚΩΝ (ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ)

Κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης το υλικό αλλάζει φάσεις, οι δε θερμικές και μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται με τρόπο μη γραμμικό. Αυτές οι μεταβολές πρέπει να είναι γνωστές σε ένα μοντέλο προσομοίωσης προκειμένου να επιτύχουμε ακρίβεια. Το υλικό που επιλέχθηκε για τη διενέργεια του πειράματος ήταν ο κοινός χάλυβας St70 και οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα (Πιν. 4.1).

Θερμοκρασία (°C)	Θερμική αγωγιμότητα $W m^{-1} K^{-1}$	Πυκνότητα $kg/m^3$	Ειδική θερμότητα $J kg^{-1} K^{-1}$	Συντελεστής θερμικής διαστολής $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ C$	Μέτρο Ελαστικότητας (Young) $\times 10^{11} Pa$	Λόγος Poisson
0	45.9	7900	444	12	2.04	0.3
200	43.4	7830	503	12.8	2	0.32
600	33.6	7660	692	13.3	1.46	0.36
800	28.7	7560	837	14	1	0.36
1200	28.6	7370	860	14.4	0.18	0.42
1500	29.5	7320	863	15	0.08	0.46

Πιν. 4.1 Θερμικές και μηχανικές ιδιότητες St70

Ο τύπος στοιχείου που επιλέχθηκε από την βιβλιοθήκη του ANSYS ήταν το Solid70. Το υλικό αυτό αποτελείται από 8 κόμβους και έχει ένα βαθμό ελευθερίας σε κάθε κόμβο που παραλαμβάνει θερμοκρασία. Είναι κατάλληλο για την εφαρμογή θερμικών φορτίων (θερμική ροή, συναγωγή, ακτινοβολία) και μπορεί να επιλεγεί για στατική ή χρονικά μεταβαλλόμενη μελέτη. Οι «επιλογές» (options) που προσφέρει, εκτός των άλλων, είναι κατάλληλες για θερμο-μηχανική μελέτη αφού μέσω της εντολής ETCHG μετατρέπεται στο ισοδύναμο του SOLID185, στοιχείο που διαθέτει 1 βαθμό ελευθερίας και παραλαμβάνει μηχανικά φορτία (μετατοπίσεις, ταχύτητες, δυνάμεις). Η γεωμετρία του καθορίζεται από το χρήστη μέσω της εντολής KEYOPT και εξαρτάται από το είδος πλεγματοποίησης (Σχ. 4.7).



Σχ.4.7 Γεωμετρία στοιχείου SOLID70



Μια πολύ σημαντική πτυχή στο σχεδιασμό των ιδιοτήτων του υλικού στη συγκόλληση είναι ο προσδιορισμός του ελαστο-πλαστικού μοντέλου. Το υλικό περνάει από την ελαστική στη πλαστική περιοχή και αποκτά μόνιμες μηχανικές παραμορφώσεις ενώ σε κάθε θερμοκρασιακή αλλαγή αποκτά διαφορετικές τάσεις διαρροής κατά τις αλλαγές φάσεων. Η επιλογή του μοντέλου μηχανικής συμπεριφοράς που πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν η δι-γραμμική ιστροπική σκλήρυνση. Σε αυτή τη μοντελοποίηση κάνουμε την υπόθεση ότι η σκλήρυνση αναπτύσσεται ιστροπικά ενώ το υλικό ακολουθεί τα κριτήρια διαρροής κατά von Mises. Αυτή η επιλογή είναι κατάλληλη για περιπτώσεις με μεγάλες παραμορφώσεις ενώ συνδυαστικά με άλλα κριτήρια μηχανικών παραμορφώσεων μπορεί να περιγράψει σωστά πιο περίπλοκες μηχανικές μελέτες.

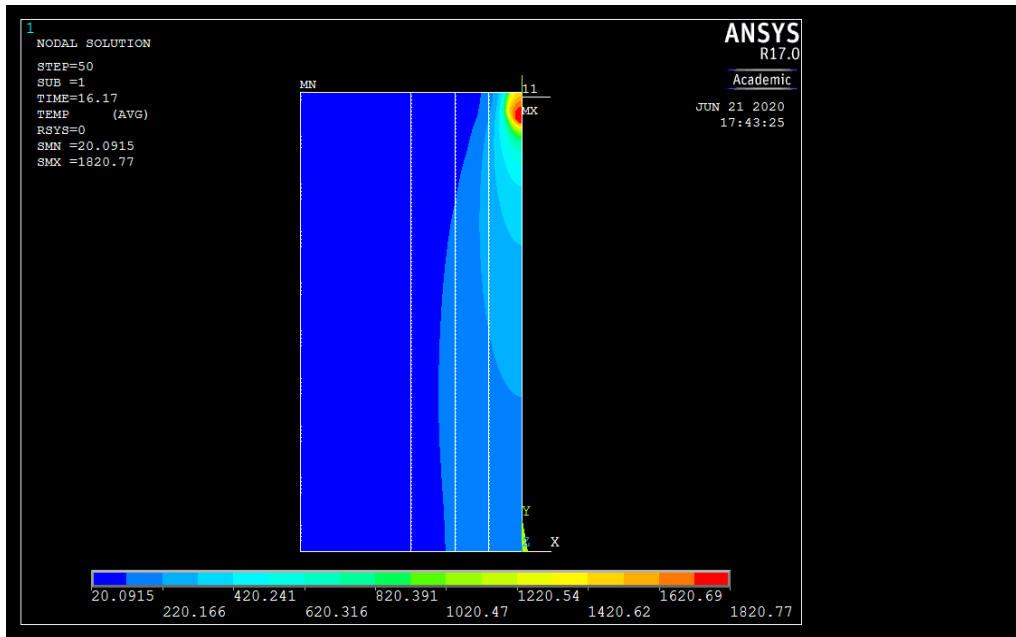
#### **4.1.5 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ -ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

##### *ΚΙΝΟΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΗΓΗ*

Στη μελέτη που πραγματοποιήσαμε το τόξο θερμικού φορτίου αναπαραστάθηκε ως επιφανειακή φόρτιση που κινούνταν πάνω στη γραμμή συγκόλλησης, τομή των επιφανειών εφαρμογής, με συγκεκριμένη ταχύτητα. Η κινούμενη θερμική πηγή ακολούθησε ακτινική κατανομή κατά Gauss, με ακτίνα  $r=4\text{mm}$ , ενώ η ένταση της θερμότητας υποθέσαμε ότι διατηρούνταν σταθερή και είχε τιμή  $Q=7000\text{W}$ .

Η επιλογή αυτής της μοντελοποίησης στηρίχθηκε στην ελαχιστοποίηση των μεταβλητών που απαιτούνται σε σχέση με πιο ρεαλιστικές απεικονίσεις, όπως αυτή του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου του Goldak, που όμως απαιτεί αρκετά στοιχεία σχετικά με τη γεωμετρία της ραφής συγκόλλησης και πιο περίπλοκους αριθμητικούς υπολογισμούς. Ένας άλλος παράγοντας για την επιλογή αυτής της κατανομής είναι ο στόχος της παρούσας μελέτης, ο οποίος ήταν ο πληρέστερος προσδιορισμός των παραμορφώσεων-μετατοπίσεων της συγκολλημένης κατασκευής, με όσο δυνατόν πιο απλοποιημένα αριθμητικά μοντέλα και ελαχιστοποιημένο υπολογιστικό κόστος.

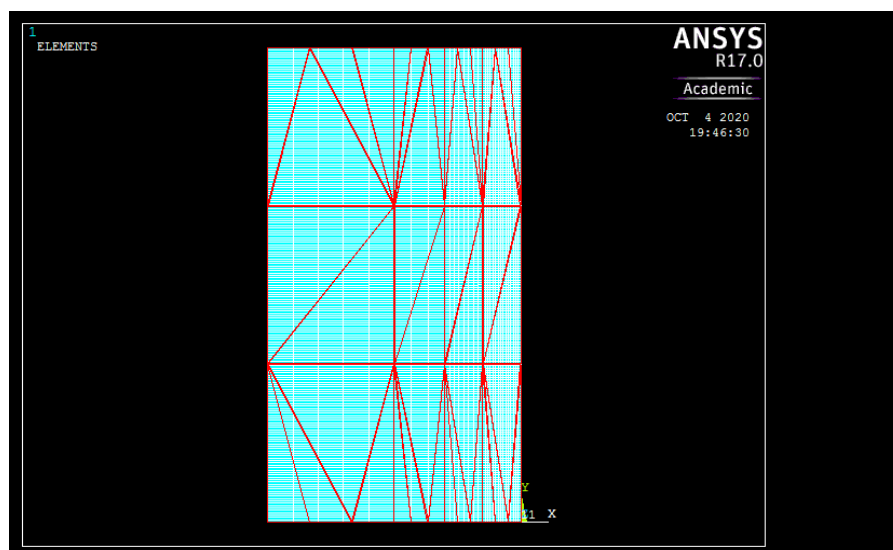
Στο Σχ.4.8 μπορούμε να παρατηρήσουμε την κατανομή των ισόθερμων καμπυλών συνολικά στο έλασμα μας τη στιγμή που ολοκληρώνεται η συγκόλληση. Η μέγιστη θερμοκρασία αναπτύσσεται στο κέντρο της δέσμης και έχει τιμή  $T_{\max}=1820,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ η ελάχιστη τοποθετείται στην πιο μακρινή επιφάνεια του ελάσματος και έχει τιμή  $T_{\min}=20,0915\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Σχ.4.8 Κατανομή των ισόθερμων καμπύλων θερμοκρασίας στο έλασμα,  $t=50s$

#### ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στο ANSYS το φαινόμενο της συναγωγής νοείται ως επιφανειακή φόρτιση η οποία εφαρμόζεται στις εξωτερικές πλευρές του ελάσματος, ορίζοντας ένα συγκεκριμένο συντελεστή συναγωγής για δεδομένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η εφαρμογή θερμικής πηγής και συναγωγής στην ίδια επιφάνεια είναι αδύνατη. Στη δική μας περίπτωση σε όλες τις επιφάνειες, εκτός αυτής που παρέλαβε το φορτίο της κινούμενης θερμικής πηγής, εφαρμόστηκε συνθήκη συναγωγής (Σχ.4.9). Επιλέξαμε συντελεστή μεταφοράς θερμότητας συναγωγής  $30W/(m^2 K)$  για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{περ.}=20^{\circ}C$ .



Σχ.4.9 Εισαγωγή συνοριακής συνθήκης συναγωγής

## ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΛΕΙΦΘΗΚΑΝ-ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ ελασμάτων και τραπεζιού θεωρήθηκε αμελητέα. Φαινόμενα μεταφοράς μάζας, μεταξύ ελάσματος και υλικού συγκόλλησης καθώς και μεταλλουργικές αλλαγές φάσης του ελάσματος δεν υποτέθηκαν στη μελέτη μας. Το φαινόμενο των απωλειών λόγω έκλυσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας δεν λήφθηκε υπόψη.

### 4.1.6 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (TIME STEPS,DO-LOOPS)

Η στρατηγική με την οποία επιλύσαμε το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα της συγκόλλησης ήταν η διακριτοποίηση των χρονικών βημάτων με τη μέθοδο αριθμητικής επίλυσης Newton-Raphson και η εφαρμογή βρόγχων επανάληψης για N=50 χρονικά βήματα. Κατασκευάσαμε ένα πίνακα διαστάσεων 50x2, μέσα στον οποίο εγγράφηκε η τροχιά της κινούμενης θερμικής πηγής ορίζοντας θέση και χρονικό βήμα εφαρμογής. Η διακριτοποίηση των χρονικών βημάτων οριστικοποιήθηκε με κριτήριο τη σύγκλιση τόσο της θερμικής όσο και της μηχανικής αριθμητικής επίλυσης. Για την προσομοίωση της ψύξης επιλέχθηκε ένα βήμα με συγκεκριμένο αριθμό χρονικών υποδιαιρέσεων.

Η ρύθμιση για τη μεταφορά της τιμής του φορτίου από το ένα χρονικό υπο-βήμα (substep) στο επόμενο έγινε με χρήση γραμμικής παρεμβολής. Αυτή η ρύθμιση υλοποιήθηκε με την εντολή KBC.

### 4.1.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΕΣΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ OCTAVE

Ο ορισμός του θερμικού ακτινικού φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη κατασκευή υπο-ρουτίνας στο πρόγραμμα OCTAVE που συντάχθηκε με τον παρακάτω τρόπο:

```
function Qr = Hflux(R, Q_centre)
N = 1000000*R+1;
Qr = zeros(N,2);
for i = 1:N
radius = (i-1)*0.000001;
Qr(i,1) = radius;
Qr(i,2) = (3 * Q_centre / (pi * R * R)) * exp(-(3*radius*radius) / (R*R));
end
```

Ορίσαμε παραμετρικά τη κατανομή κατά Gauss του θερμικού φορτίου ως προς την ένταση της πηγής στο κέντρο του κύκλου και την ακτίνα του, για N αριθμό βημάτων. Ο πίνακας των τιμών που προέκυψαν από την εκτέλεση της ρουτίνας χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο βρόγχο χρονικών επαναλήψεων του ANSYS. Η παραμετροποίηση της πηγής βοήθησε στην παρατήρηση των μεταβολών στο θερμοκρασιακό πεδίο σε συνάρτηση με την ένταση της πηγής και την ακτίνα της δέσμης.

#### 4.1.8 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατά την επίλυση του θερμικού μοντέλου, για κάθε χρονικό βήμα, αποθηκεύσαμε τις θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στους κόμβους μέσω της εντολής LSWRITE με σκοπό να τις χρησιμοποιήσουμε ως είσοδο στο 2<sup>ο</sup> κομμάτι της μελέτης μας. Η χρονική στρατηγική που ακολουθούμε στο μηχανικό μέρος πρέπει να χει ταυτόσημα χρονικά βήματα και παραμέτρους με τις επιλογές του θερμικού.

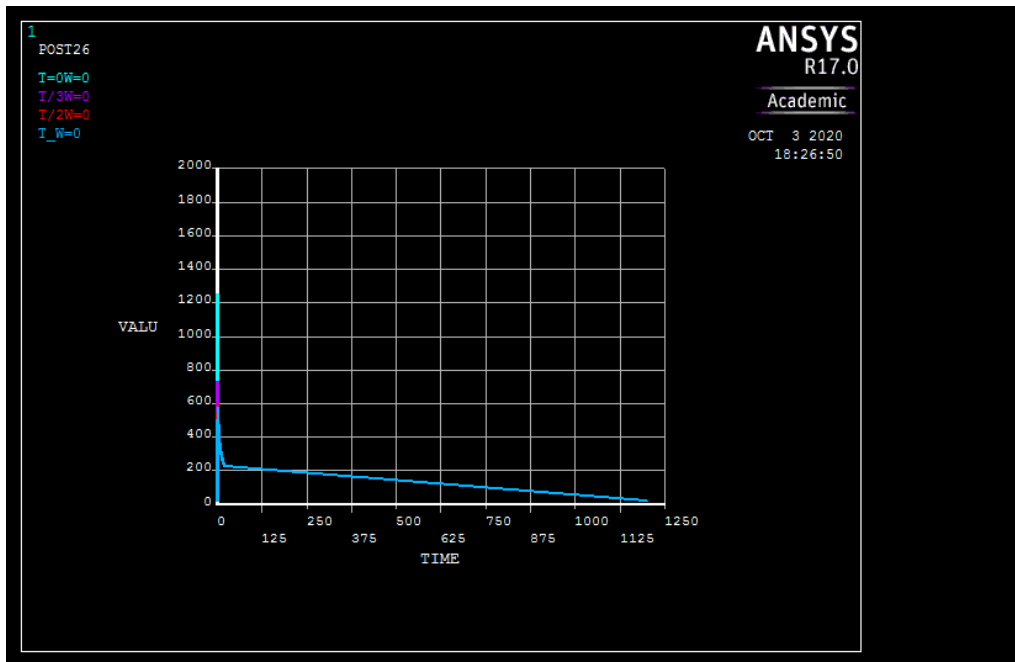
#### 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Πραγματοποιήσαμε θερμική μελέτη για συνθήκες συγκόλλησης  $u=10\text{mm/s}$ ,  $Q=7000\text{W}$ ,  $r=4\text{mm}$ . Η πλεγματοποίηση των όγκων πραγματοποιήθηκε με στοιχεία μεγέθους 1,2,8,10 mm, αντίστοιχα για τους όγκους 1,2,3,4. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος υποτέθηκε  $20^\circ\text{C}$ . Οι παρατηρήσεις που προέκυψαν μας οδήγησαν να κατανοήσουμε σε ποιες περιοχές του ελάσματος λαμβάνουμε πιο ακριβείς προσεγγίσεις των θερμοκρασιακών κατανομών και σε ποιες όχι. Επιλέχθηκαν 4 ομάδες κόμβων με συντεταγμένες ως εξής:

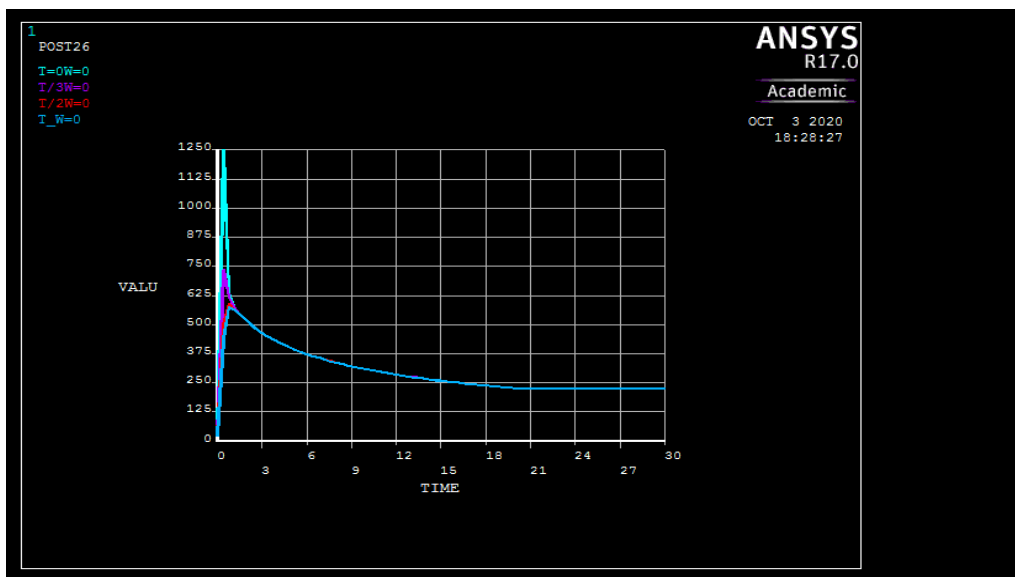
- *GROUP1*:  $(0,0),(t/3,0),(t/2,0),(t,0)$
- *GROUP2*:  $(0,w/4),(t/2,w/4),(t,w/4)$
- *GROUP3*:  $(0,w/2),(t,w/2)$
- *GROUP4*:  $(0,w),(t,w)$

όπου  $w$  το πλάτος του ελάσματος μετρούμενο από τη ραφή συγκόλλησης,  $t$  το πάχος του ελάσματος μετρούμενο από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του. Το μήκος του άξονα συγκόλλησης που βρίσκονται τα σημεία είναι  $y=0$ .

Στα Διαγ. 4.1, 4.2 βλέπουμε τη κατανομή των θερμοκρασιών κατά το πάχος του ελάσματος αφότου έχει περάσει η θερμική πηγή. Σε χρονικό διάστημα 3s η θερμοκρασία έχει πέσει σχεδόν  $900^\circ\text{C}$ , διακύμανση η οποία αναπαριστά την απότομη θέρμανση και ψύξη που πραγματοποιούνται στο φαινόμενο της συγκόλλησης. Οι κόμβοι αυτοί βρίσκονται μέσα στη ζώνη τήξης οπότε υποδεικνύουν το μέγεθος των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσα στην ακτινική Gaussiana κατανομή του θερμικού φορτίου.



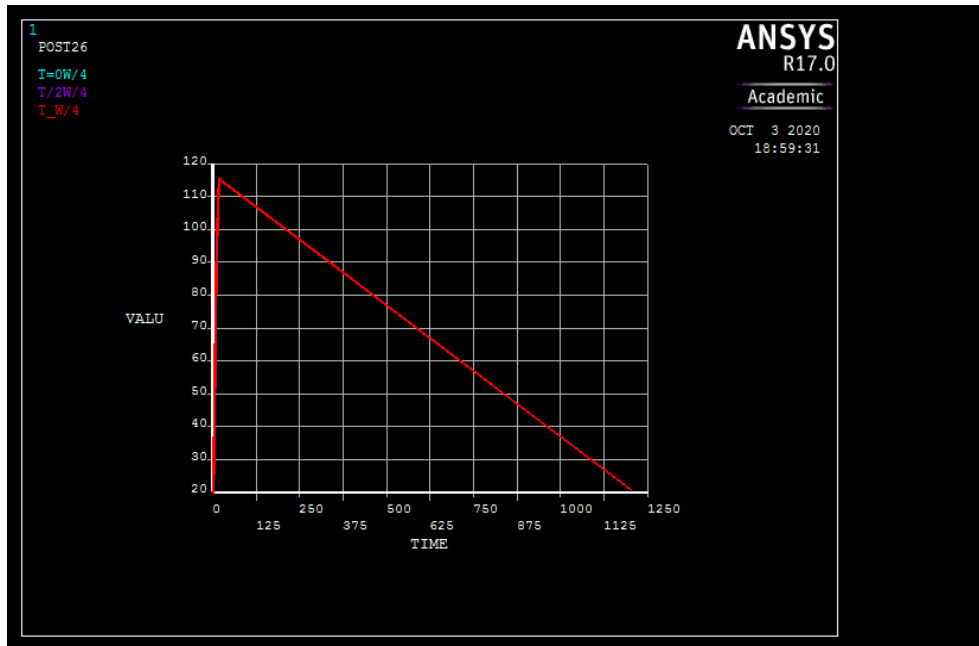
Διαγ.4.1 Κατανομή θερμοκρασιών 1<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $tol=1200s$



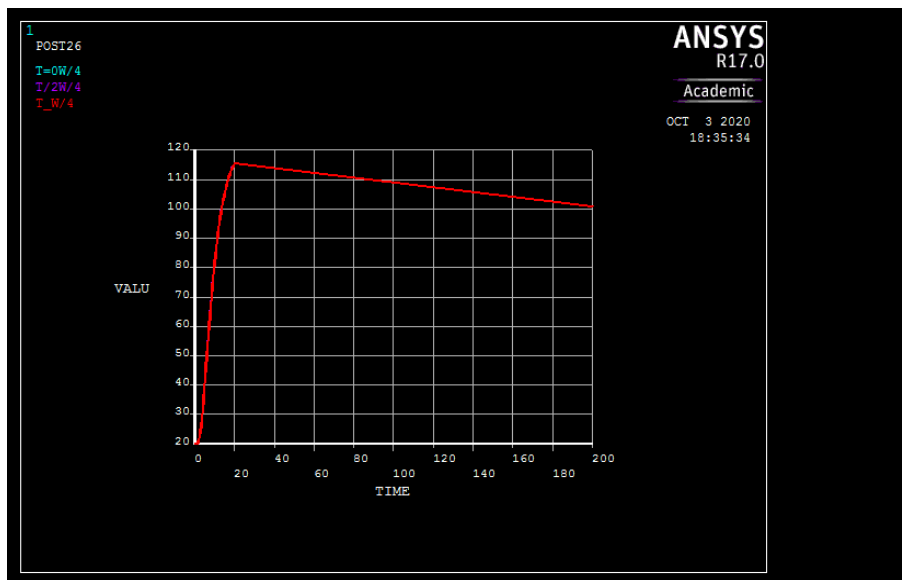
Διαγ.4.2 Κατανομή θερμοκρασιών 1<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $tol=30s$

Όσο απομακρυνόμαστε από την ραφή τα θερμικά φορτία εξασθενούν, βλ. Διαγ. 4.3 και 4.4. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για  $x=-0.025mm$  απόσταση από τη γραμμή συγκόλλησης οι θερμοκρασίες των 3 επιλεγμένων κόμβων, κατά το πάχος του ελάσματος, ταυτίζονται ως προς τις τιμές και τους ρυθμούς ψύξης αυτών. Η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφεται είναι, περίπου, 115 °C. Παρατηρούμε πως η κλίση της καμπύλης μεταβάλλεται πιο ομαλά, σε σχέση με αυτή κόμβων που τοποθετούνται μέσα στη ζώνη τήξης ή την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη,

γεγονός που αιτιολογείται από την μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά ως προς αυτή του περιβάλλοντος, που αναπτύσσεται σε πιο απομακρυσμένους κόμβους.



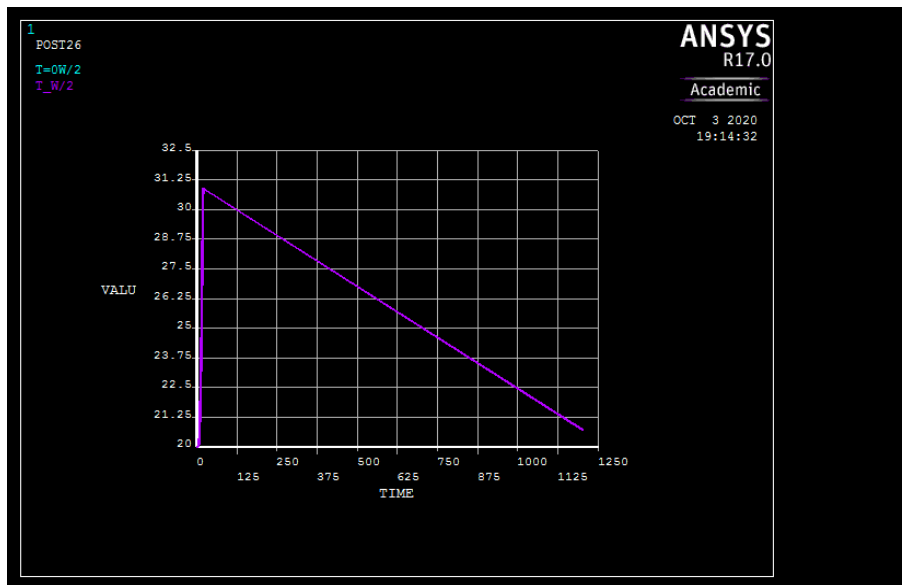
Διαγ.4.3 Κατανομή θερμοκρασιών 2<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $tol=1200s$



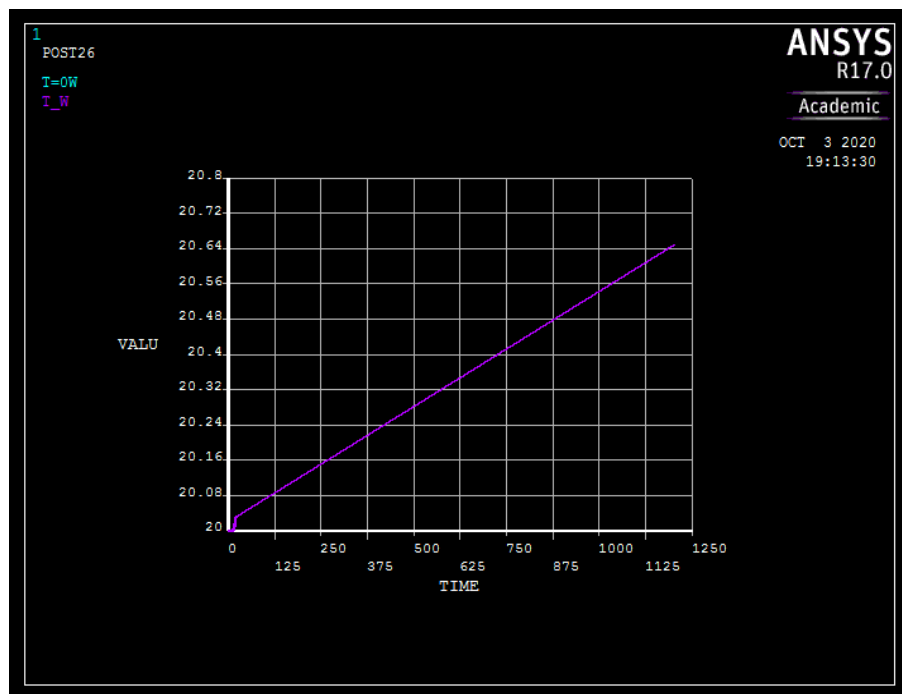
Διαγ.4.4 Κατανομή θερμοκρασιών 2<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $tol=200s$

Στο Διαγ. 4.5 βλέπουμε πως διαμορφώνονται οι καμπύλες της ομάδας κόμβων που βρίσκονται στο μέσο του πλάτους του ελάσματος. Η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι εμφανώς ασθενέστερη σε σχέση με τους προηγούμενους κόμβους και οφείλεται στο μεγαλύτερο μέγεθος των στοιχείων που επιλέχθηκαν και στην εφαρμογή της συγκεκριμένης θερμικής πηγής. Στο υπολογιστικό περιβάλλον είναι σύνηθες, επιφάνειες που βρίσκονται μακριά από

την περιοχή ενδιαφέροντος, να λαμβάνονται ακόμα και ως αδιαβατικές. Στο Διαγ. 4.6 που επιλέχθηκαν 2 κόμβοι στην έκταση του συνολικού πλάτους( $x=w$ ) η παραπάνω υπόθεση επικυρώνεται πλήρως, αφού η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι ελάχιστη, της τάξης των  $0,64^{\circ}\text{C}$ .



Διαγ.4.5 Κατανομή θερμοκρασιών 3<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$



Διαγ.4.6 Κατανομή θερμοκρασιών 4<sup>ης</sup> ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$

## 4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

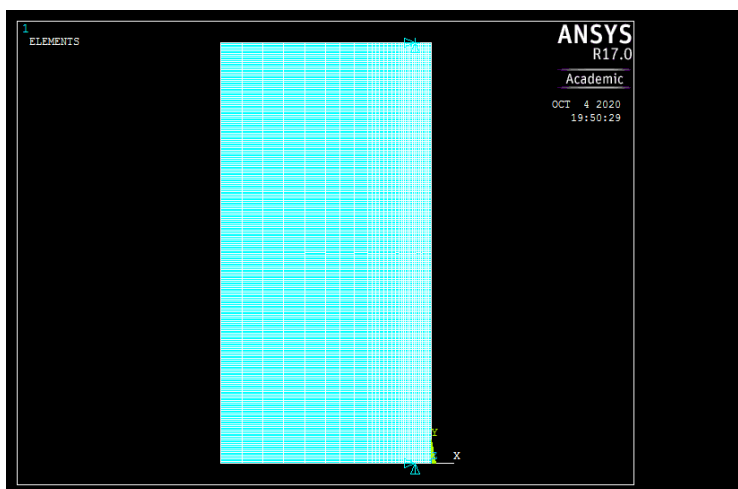
Στο μηχανικό μέρος, εισάγουμε τα αποτελέσματα του θερμοκρασιακού πεδίου και επιβάλλουμε οριακές συνθήκες και περιορισμούς μετατόπισης έτσι ώστε να αποφύγουμε την ελεύθερη κίνηση του στερεού. Ο προσεκτικός σχεδιασμός του πλέγματος ορίζει την ακρίβεια των τελικών τάσεων και παραμορφώσεων. Η επιλογή κατάλληλων χρονικών βημάτων και οι ρυθμίσεις επίλυσης του φορτίου καθορίζουν την τελική σύγκλιση του μοντέλου και το υπολογιστικό κόστος.

### 4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Κατά την εισαγωγή των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού επιλέξαμε να εισάγουμε και τις μηχανικές ιδιότητες του. Αυτές ήταν το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η πυκνότητα και οι τάσεις διαρροής, όλα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η γεωμετρία και η πλεγματοποίηση του ελάσματος προσδιορίστηκαν και αυτά στο προηγούμενο κομμάτι της μελέτης μας, ενώ επαναλαμβάνουμε το «δέσιμο» των όγκων μέσω της επιβολής περιορισμών στα διαφορετικού μεγέθους πεπερασμένα στοιχεία. Μέσω της εντολής LDREAD εισάγουμε τις κατανομές θερμοκρασιών για κάθε χρονικό βήμα όπως διαμορφώθηκε πρωτύτερα.

### 4.2.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν στη μηχανική μελέτη ήταν δέσμευση μετατοπίσεων σε επιφάνειες και κόμβους. Συγκεκριμένα η πλευρά που είναι κάθετη στη διεύθυνση της συγκόλλησης και στην οποία βρίσκεται το σημείο  $(x,y,z)=(0,0,0)$  δεσμεύτηκε ως προς την μετατόπιση κατά την γραμμή συγκόλλησης, δηλαδή  $U_y=0$  και κατά την έννοια του πλάτους  $U_x=0$ . Η επιφάνεια που βρίσκεται ακριβώς απέναντι της προηγούμενης και στην οποία ανήκει το σημείο  $(x,y,z)=(0,0.2,0)$  πακτώθηκε και στις 3 διευθύνσεις, δηλαδή  $U_x=U_y=U_z=0$  (Σχ.4.10).



Σχ.4.10 Επιβολή περιορισμών μετατόπισης σε απέναντι επιφάνειες



### 4.2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ (TIME STEPS, DO-LOOPS)

Οι παράμετροι επίλυσης του μη-μόνιμου μηχανικού προβλήματος ορίστηκαν ,όπως στο θερμικό κομμάτι, για τροχιά με  $N=50$  χρονικά βήματα, ενώ η διακριτοποίηση των υπο-βημάτων (substeps) χρειάστηκε να εξεταστεί ενδελεχώς αφού η σύγκλιση ήταν πιο δύσκολο να πραγματοποιηθεί στη μηχανική μελέτη. Αυτή η συνθήκη μας ανάγκασε να επιστρέψουμε στο αρχικό θερμικό κομμάτι του κώδικα και να επαναλαμβάνουμε τη μελέτη για αυξημένο αριθμό χρονικών υπο-βημάτων, κατάλληλα για επίτευξη σύγκλισης στο μηχανικό μέρος. Εκτός από τις χρονικές παραμέτρους έπρεπε να προσδιορίσουμε και τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονταν τα φορτία χρονικά από το ένα υπο-βήμα στο επόμενο. Αυτό έγινε με γραμμική παρεμβολή μέσω της εντολής KBC.

Για να επιτευχθεί σύγκλιση στη μελέτη μας χρειάστηκε να αλλάξουμε τον αλγόριθμο αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων .Η μέθοδος που επιλέχθηκε ήταν η ατελής παραγοντοποίηση του Cholesky, επίλυση κατάλληλη για ill-conditioned πίνακες ,δηλαδή πίνακες που περιέχουν πολλές καταστάσεις και για μια μικρή αλλαγή στην είσοδο τους προκαλείται μεγάλο σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα. Η αλλαγή του solver πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής eqslv.

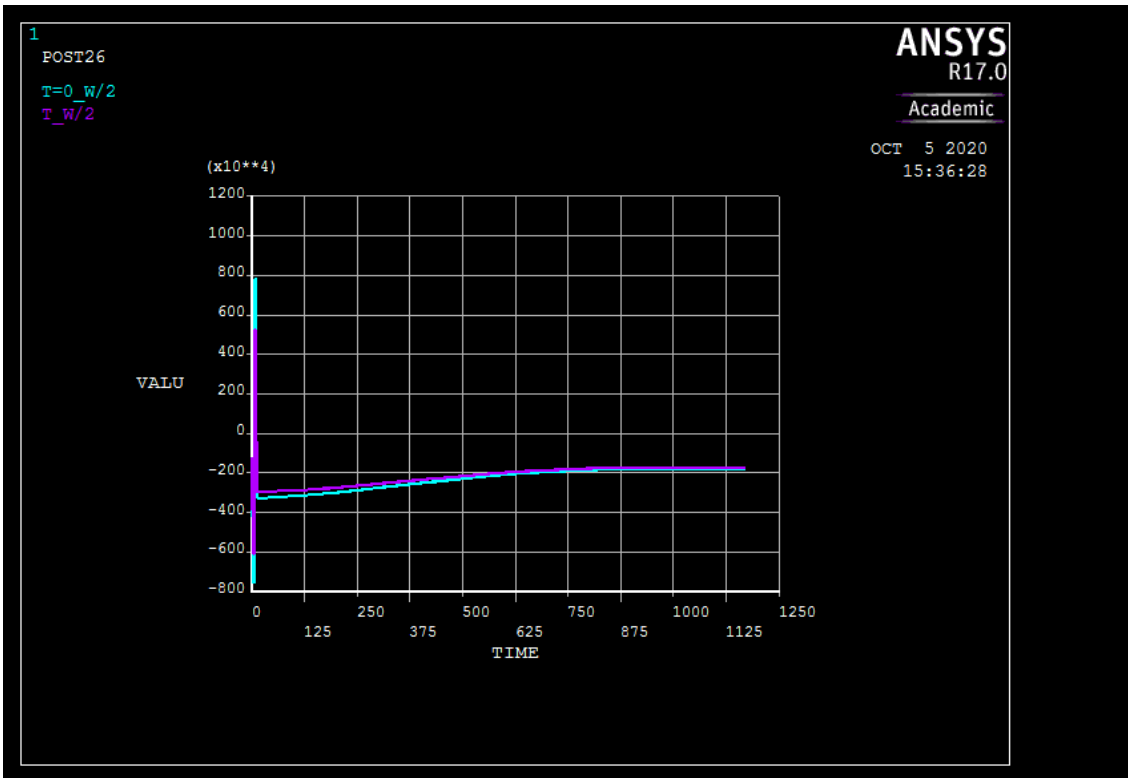
Τέλος για να προχωρήσουμε σε επίλυση έπρεπε να επιλέξουμε την εντολή ανάλυσης με μικρές εκτροπές (NLGEOM). Αυτή η επιλογή, στην ουσία, υπολογίζει τις αλλαγές γεωμετρίας, όταν η μήτρα «ακαμψίας» (stiffness matrix) μεταβάλλεται σε μια μόνιμη ή μη –μόνιμη, μη –γραμμική κατάσταση.

### 4.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

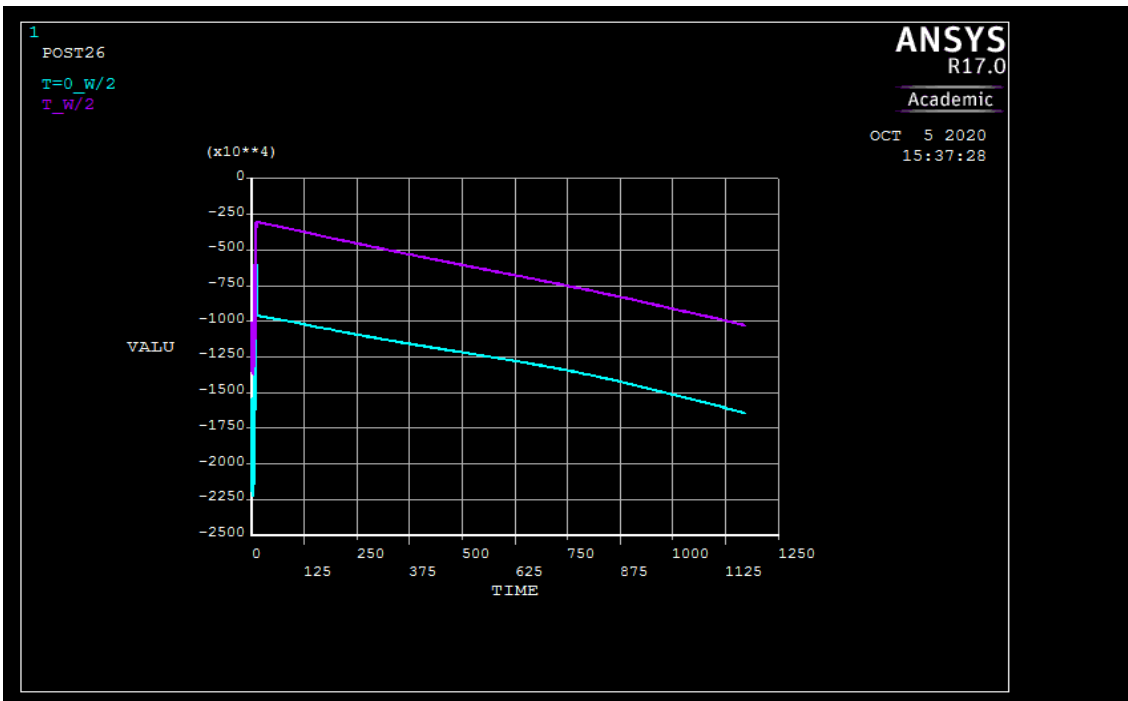
Επιλέξαμε να εξετάσουμε την 3<sup>η</sup> ομάδα κόμβων ως προς τα αποτελέσματα των τριών κυρίων τάσεων και των τελικών τους τιμών, καθώς και των μετατοπίσεων τους στις τρεις κύριες διευθύνσεις. Αυτοί οι κόμβοι όπως είπαμε βρίσκονται στις παρακάτω θέσεις αντίστοιχα :

- $z=0, x=-w/2, y=0$
- $z=t, x=-w/2, y=0$

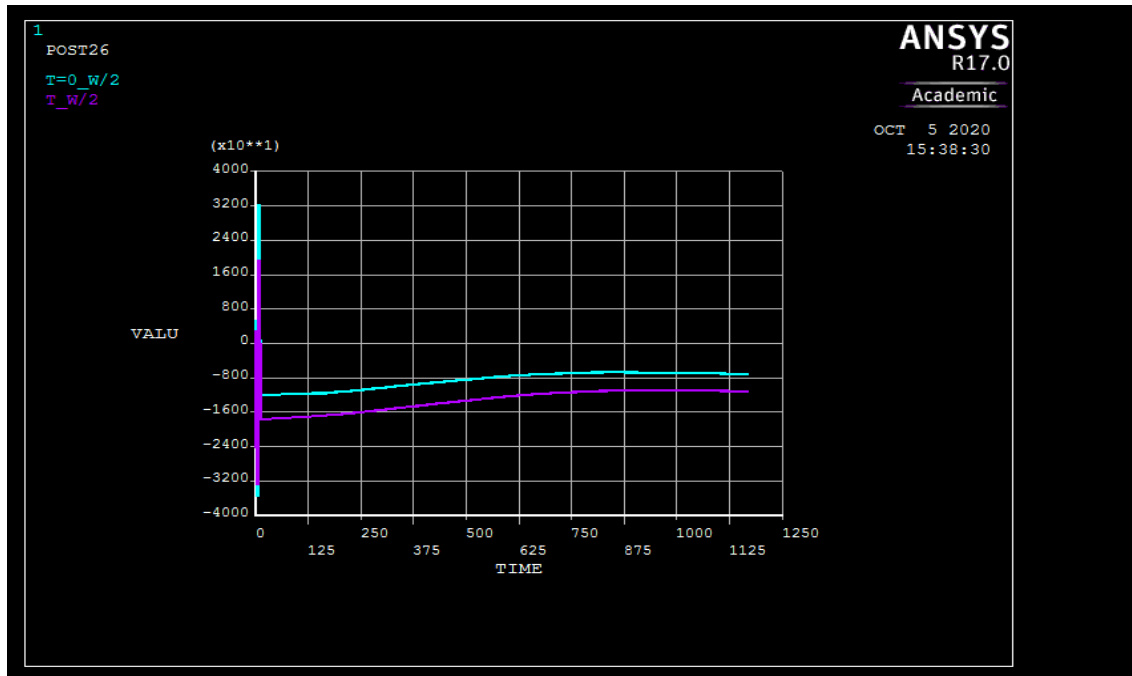
Στους συγκεκριμένους κόμβους μπορούμε να παρατηρήσουμε πως οι παραμένουσες τελικές τάσεις είναι σε όλες τις διευθύνσεις τους είναι θλιπτικές ενώ το μέτρο τους προκύπτει αρκετά μικρό. Η θέση στην οποία είναι τοποθετημένοι αυτοί οι κόμβοι ,το μέσον του ελάσματος δηλαδή, προβλέπεται από τη θεωρία να αναπαριστά τα χαρακτηριστικά που βλέπουμε στ μελέτη μας, καθώς οι μέγιστες τάσεις που παρατηρούμε τιμές κοντά στο όριο διαρροής του υλικού βρίσκονται κοντά στη ζώνη συγκόλλησης και είναι εφελκυστικές.



Διαγ.4.6 Κατανομή τάσεων στον άξονα x της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$



Διαγ.4.7 Κατανομή τάσεων στον άξονα y της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$

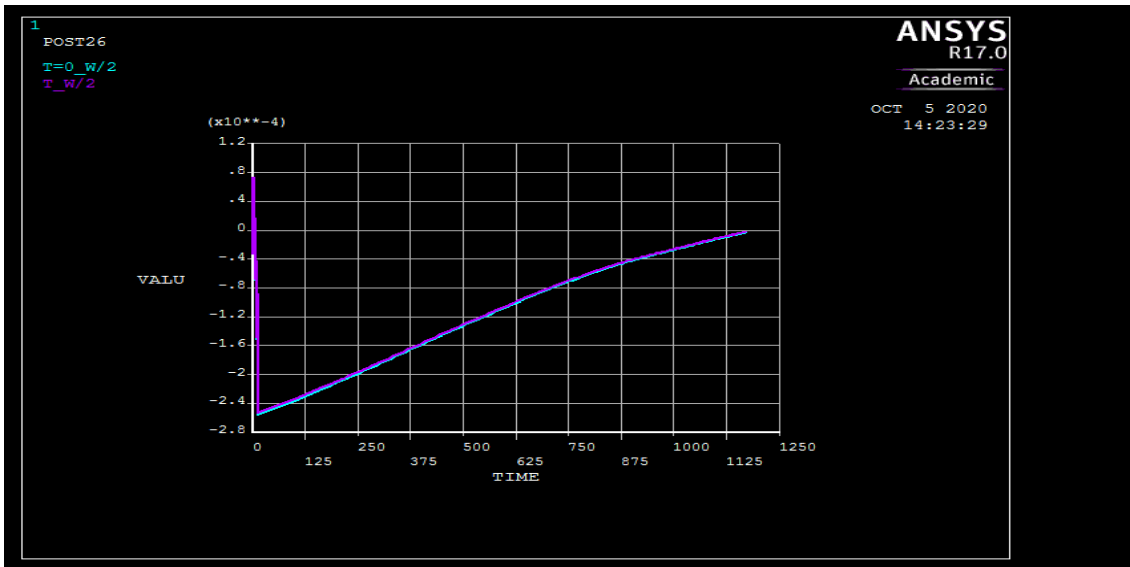


Διαγ.4.8 Κατανομή τάσεων στον άξονα z της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$

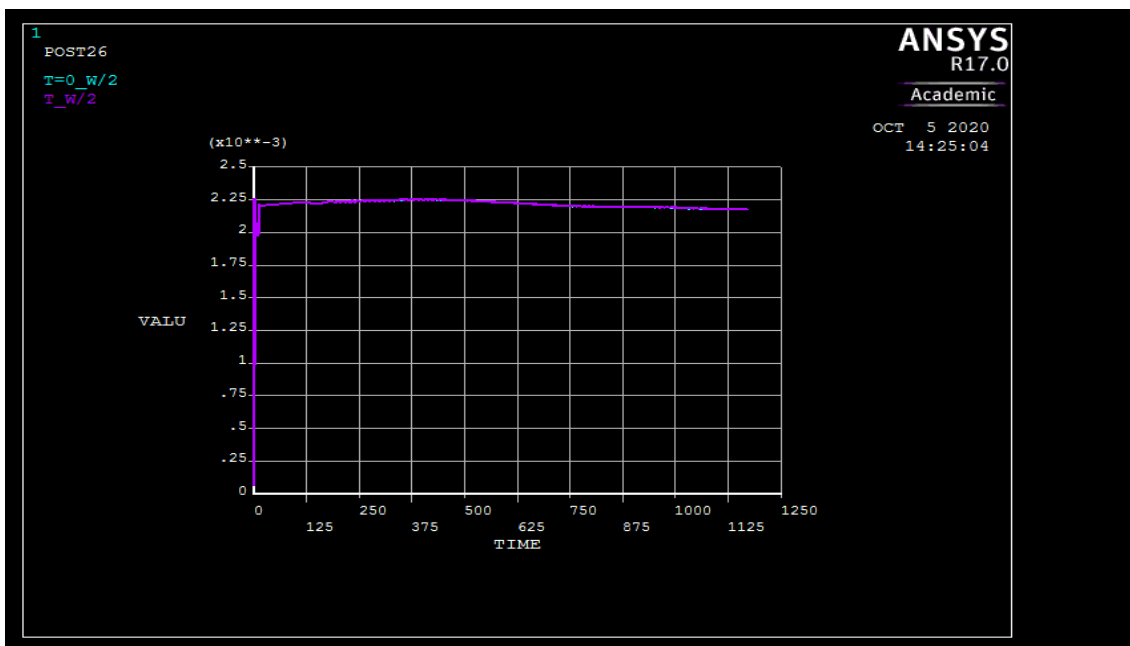
Ένας άλλος παράγοντας που διαμορφώνει τόσο τις τάσεις, όσο και τις μετατοπίσεις της κατασκευής είναι ο τρόπος στήριξης. Στη περίπτωση μας έχουμε χρησιμοποιήσει μια πακτωμένη επιφάνεια στην μία άκρη του ελάσματος και μια αρθρωμένη στην ακριβώς απέναντι πλευρά από την πρώτη. Ο τρόπος συγκράτησης, τελικά, καθορίζει, σε εξαιρετικό βαθμό, το μέτρο και τη φορά των παραμένουσων τάσεων και υποδεικνύει την καταλληλότητα της τελικής κατασκευής.

Εξετάσαμε ακόμα την εξέλιξη των μετατοπίσεων στις 3 διευθύνσεις και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

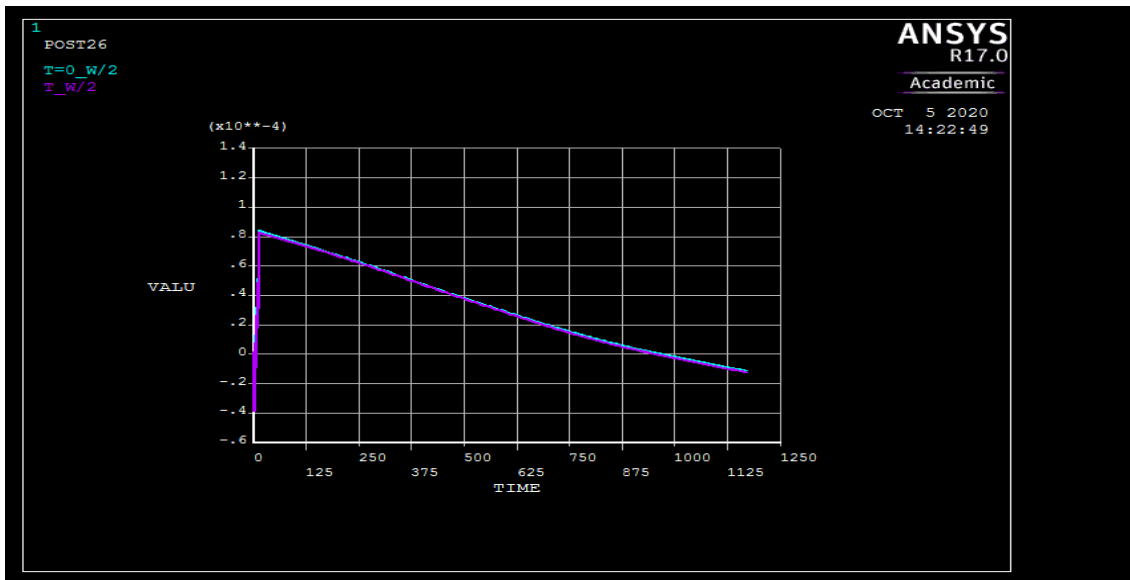
Οι τελικές μετατοπίσεις που προκύπτουν κατά την έννοια των  $x, y$  αξόνων είναι πολύ μικρές, της τάξεως  $10^{-2}$  mm και μικρότερες. Αυτό εξηγείται από την εφαρμογή περιορισμών μετατόπισης στις 2 διευθύνσεις. Στον άξονα z όμως παρατηρούμε τελική μετατόπιση 2.20mm η οποία προκύπτει απ' το γεγονός ότι είναι ο άξονας με τους περισσότερους βαθμούς ελευθερίας.



Διαγ.4.8 Κατανομή μετατοπίσεων στον άξονα x της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$



Διαγ.4.9 Κατανομή μετατοπίσεων στον άξονα y της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$



Διαγ.4.10 Κατανομή μετατοπίσεων στον άξονα z της 3ης ομάδας κόμβων για  $t_{ολ}=1200s$

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το πείραμα έλαβε χώρα στα ναυπηγεία της Ελευσίνας. Μεταφέραμε τον εργαστηριακό εξοπλισμό και έγιναν όλες οι απαραίτητες προετοιμασίες για τη διεξαγωγή και καταγραφή των μετρήσεων του πειράματος.

### 5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με αυτόματη μηχανή KEMPER PROMIG 2000 στην οποία έγινε ρύθμιση έντασης ρεύματος (180A), τάσης (29,4V) και ταχύτητας (1m/min). Η επιλογή αυτόματης συγκόλλησης ελαχιστοποίησε τις ατέλειες που θα προέκυπταν σε χειρωνακτική περίπτωση αφού εγγυάται τη σταθερότητα της ταχύτητας και της έντασης του τόξου. Η πειραματική διάταξη αποτελούνταν από τα εξής στοιχεία, βλ. Εικ. 5.1:

- 2 αισθητήρες γραμμικής μετατόπισης (Linear Variable Differential Transformer - LVDT) με το μετασχηματιστή τους
- Μεταλλική κατασκευή για τη συγκράτηση των αισθητήρων γραμμικής μετατόπισης
- 2 πολύμετρα για τη καταγραφή των μετατοπίσεων, βλ. Εικ. 5.2
- 3 θερμοστοιχεία τύπου K
- Κάρτα μετατροπής των θερμοκρασιών των θερμοστοιχείων σε ηλεκτρικό σήμα
- Φορητό υπολογιστή για τη καταγραφή των θερμοκρασιών από την κάρτα
- 2 Ψηφιακές κάμερες για τη βιντεοσκόπηση των μετρήσεων
- Μεταλλική κατασκευή συγκράτησης του ενός δοκιμίου συγκόλλησης



Εικ.5.1 Άποψη της πειραματικής διάταξης



Εικ.5.2 Στιγμιότυπο καταγραφής μετρήσεων

## 5.2 ΥΛΙΚΑ

Τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 200 X 100 X 2 mm. Το υλικό των δοκιμών συγκόλλησης ήταν χάλυβες St70, συνήθης σε ναυπηγικές και άλλες εφαρμογές. Οι ακμές των 2 ελασμάτων διαμορφώθηκαν( κατάλληλα ) με την μέθοδο της λοξοτομής για την καλύτερη υποδοχή του τμήματος κόλλησης.

Τα σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν τα θερμοστοιχεία κατεργάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ο ακροδέκτης αυτών να πακτώνεται για να καταγράφεται με όσο το δυνατόν ακριβέστερο τρόπο η θερμοκρασία τους.

## 5.3 ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Το ένα έλασμα ήταν πλήρως πακτωμένο με τη βοήθεια μεταλλικής κατασκευής ενώ το δεύτερο ήταν ελεύθερο κατά την κάθετη διεύθυνση στη γραμμή συγκόλλησης. Ο περιορισμός της κίνησης στις άλλες δύο διευθύνσεις επιτεύχθηκε με 2 μικρά ελάσματα 25X25 mm .Το πρώτο από αυτά δημιουργούσε άρθρωση αφήνοντας ελεύθερη τη κίνηση στον κάθετο στην συγκόλληση άξονα. Το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε ως γείωση και δέσμευε την κίνηση ως προς την διεύθυνση της συγκόλλησης, λειτούργησε δηλαδή ως κύλιση.( Ένας δεύτερος τρόπος συγκράτησης που χρησιμοποιήθηκε ) Συμπληρωματικά για την καλύτερη ευθυγράμμιση των ελασμάτων τοποθετήθηκε μεταλλική βάση στο κάτω μέρος τους που είχε κολληθεί με αλουμινοταινία, κατάλληλη για υψηλές θερμοκρασίες, βλ. Εικ. 5.3.



Εικ.5.3 Συγκράτηση βάσης με αλουμινοταινία

#### 5.4 ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στη διάταξη του πειράματος είχαμε 3 θερμοστοιχεία τύπου K τα οποία κατέγραφαν τάση ανάλογη της θερμοκρασίας, βλ. Εικ. 5.4 και τη μετέδιδαν στη κάρτα ψηφιακής μετατροπής Advantech μοντέλο USB-4718 8 καναλιών θερμοστοιχείων, βλ. Εικ. 5.5, που με τη σειρά της οδηγούσε τα αποτελέσματα σε πρόγραμμα Η/Υ. Τα θερμοστοιχεία τύπου K έχουν εύρος θερμοκρασιών από  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$  με όρια σφάλματος  $\pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ή  $0.4\%$ . Η μέγιστη συνεχής θερμοκρασία που μπορούν να καταγράψουν είναι περίπου  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Εικ.5.4 Θερμοστοιχείο τύπου K



Εικ.5.5 Κάρτα μετατροπής για Η/Υ



Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στις διαμορφωμένες οπές στην επιφάνεια του ελάσματος και συγκρατήθηκαν με ειδική θερμομονωτική ταινία. Οι θέσεις των θερμοστοιχείων απείχαν από τη ραφή συγκόλλησης 20, 40, 60mm αντίστοιχα στο μέσον του ελάσματος, βλ. Εικ. 5.6.



Εικ.5.6 Οπές τοποθέτησης των θερμοστοιχείων

## 5.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Κατά τη διάρκεια των 2 δοκιμών οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι δύο αισθητήρες LVDT ήταν διαφορετικές. Στην 1<sup>η</sup> δοκιμή οι θέσεις φαίνονται στην Εικ.5.7.



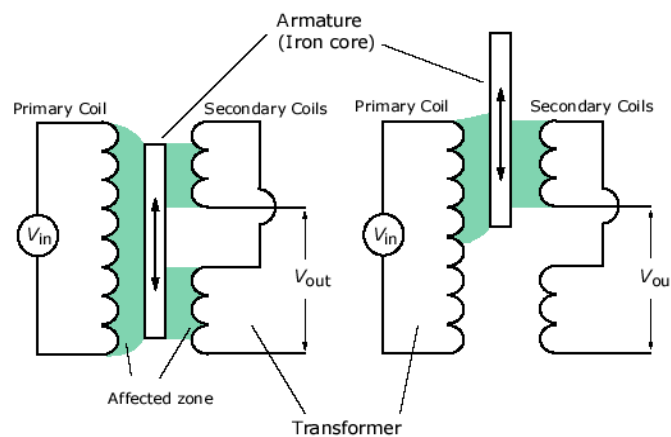
Εικ.5.7: Τοποθέτηση LVDT στο έλασμα (1<sup>η</sup> δοκιμή)

Κατά τη 2<sup>η</sup> δοκιμή, απ' την οποία τελικά ελήφθησαν οι μετρήσεις, οι αισθητήρες είχαν τοποθετηθεί στο ελεύθερο έλασμα στις θέσεις:

- LVDT1:  $x=-60\text{mm}$ ,  $y=20\text{mm}$
- LVDT2:  $x=-60\text{mm}$ ,  $y=110\text{mm}$

όπου  $x$  η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης και  $y$  η διεύθυνση αυτής.

Για τη μέτρηση των μετατοπίσεων χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες τύπου LVDT. Αυτός ο αισθητήρας λειτουργεί ως ένας ανέπαφος μετασχηματιστής που μετατρέπει την ευθύγραμμη κίνηση ενός αντικειμένου, στο οποίο συνδέεται μηχανικά, σε ένα αναλογικό σήμα (Σχ.5.1). Ένας σπλισμός κινείται ανάμεσα σε 2 τυλίγματα, το πρωτεύον και το δευτερεύον, τα οποία αντιστοιχούν σε μια τιμή της τάσης εισόδου του ενισχυτή και σε μία τάση εξόδου



Σχ.5.1 Οπλισμός και τυλίγματα πηνίου αισθητήρα LVDT

Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες ήταν του οίκου APPLIED MEASUREMENTS LTD μοντέλο AML/ED+/-50mm/s (Εικ.5.1) με ενισχυτές ιδιο-κατασκευασμένους (Εικ. 5.8). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει ακρίβεια καταγραφής έως  $\pm 10^{-4}$  mm, ωστόσο επειδή οι τιμές καταγράφονταν σε σύνηθες πολύμετρο (MASTECH με ακρίβεια 0,001 V) η ακρίβεια έπεφτε στα  $\pm 0,2\text{mm}$ . Για το μοντέλο αυτό δεν υπάρχει γνωστή εξίσωση μετασχηματισμού τάσης-μετατόπισης, συνεπώς έπρεπε να γίνει βαθμονόμηση. Αυτή πραγματοποιήθηκε με ένα μικρόμετρο υψηλής ακρίβειας Mitutoyo. Η μετρητική διάταξη μικρομέτρου-LVDT-Ενισχυτή σήματος-Πολυμέτρου παρουσιάζεται στην Εικ. 5.8.

Ελήφθησαν 11 μετρήσεις τάσης του πολυμέτρου και αντίστοιχες ενδείξεις του μικρομέτρου ακριβείας, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Μικρόμετρο (mm)	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
LVDT (V)	1,274	1,299	1,324	1,349	1,374	1,399	1,424	1,450	1,475	1,500	1,525

Η συνάρτηση μεταφοράς ορίστηκε από τον μέσο όρο των 11 μετρήσεων ως  $\bar{x} = 0,05 \text{ V/mm}$



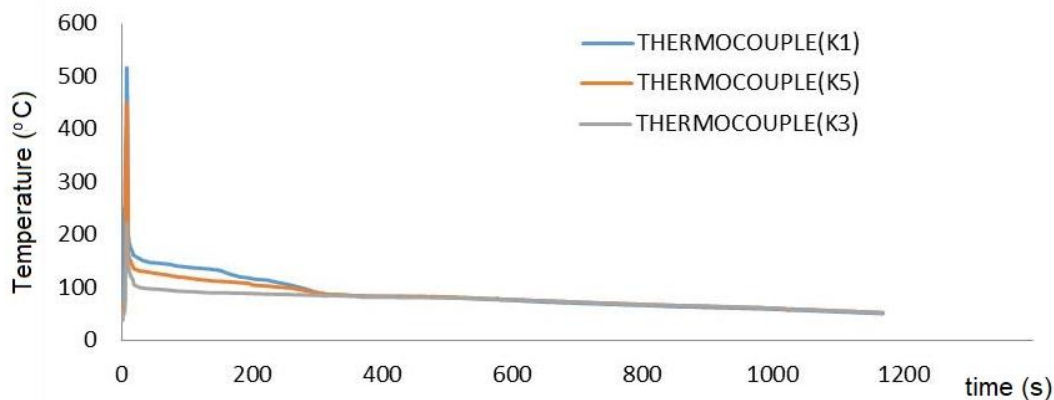
Εικ: 5.8 Διάταξη Μικρόμετρο-LVDT-Ενισχυτής σήματος-Πολύμετρο

## 5.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

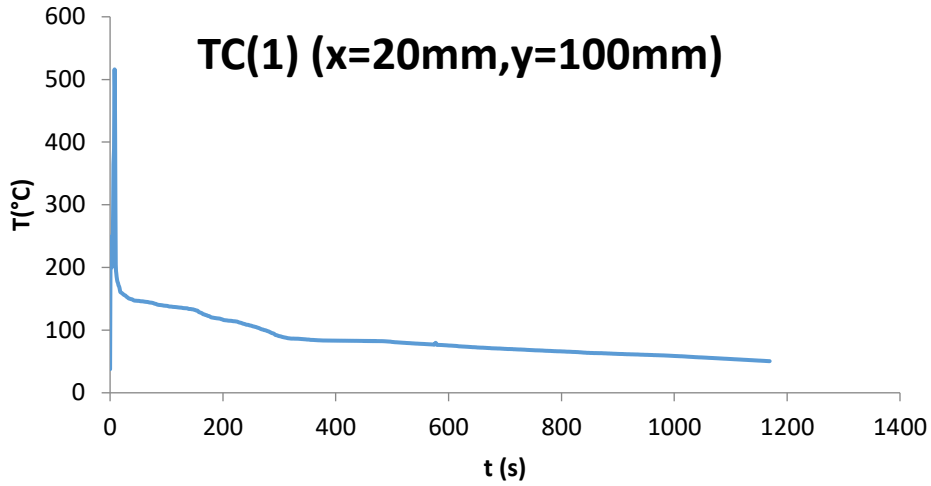
Το συνολικό μήκος συγκόλλησης ήταν  $L_{\text{weld}}=225\text{mm}$ , αφού η κόλληση πέρασε πρώτα από το έλασμα στήριξης μήκους  $L_{\text{στηρ}}=25\text{mm}$ , προκειμένου το τόξο στο μήκος συγκόλλησης των δοκιμίων να διατηρεί σταθερή τιμή ισχύος. Η καταγραφή των αποτελεσμάτων εκκίνησε σε  $t=1.5\text{s}$  όταν το τόξο πέρασε από την αρχή του ελάσματος ( $x=0, y=0, z=2\text{mm}$ ). Το βήμα δειγματοληψίας ήταν 1 s για διάρκεια 8 s έως το πέρας της συγκόλλησης. Από αυτό το σημείο και έπειτα το χρονικό βήμα διαμορφώθηκε στα 2 s για την καταγραφή των καμπύλων ψύξης των δοκιμίων. Η συνολική διάρκεια καταγραφής ήταν  $t_{\text{ολ}}=1169\text{ s}$ .

### 5.6.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ

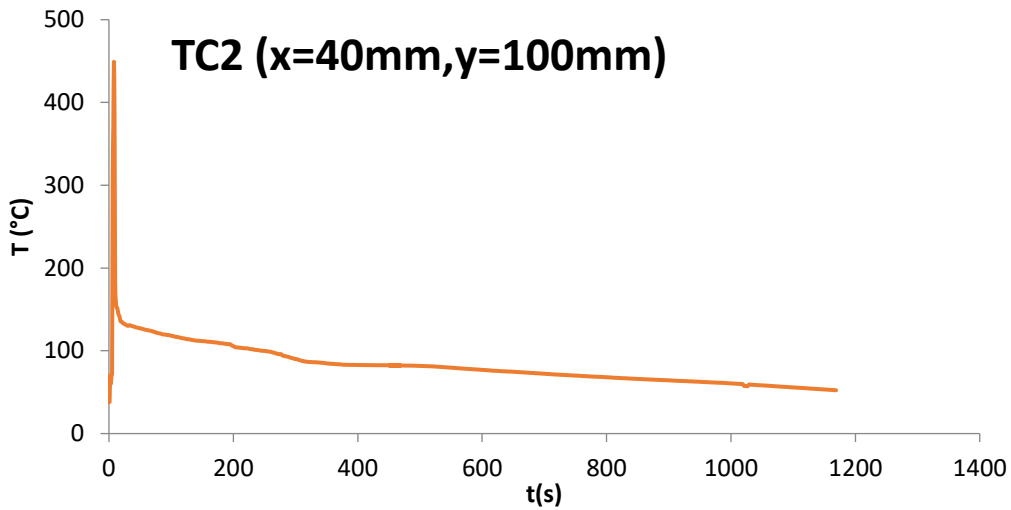
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η καμπύλη θερμοκρασίας- χρόνου για τα 3 θερμοστοιχεία. Θεωρήθηκε γ ο άξονας της γραμμής συγκόλλησης x ο άξονας κατά το πλάτος των δοκιμίων και z η διεύθυνση κατά το πάχος.



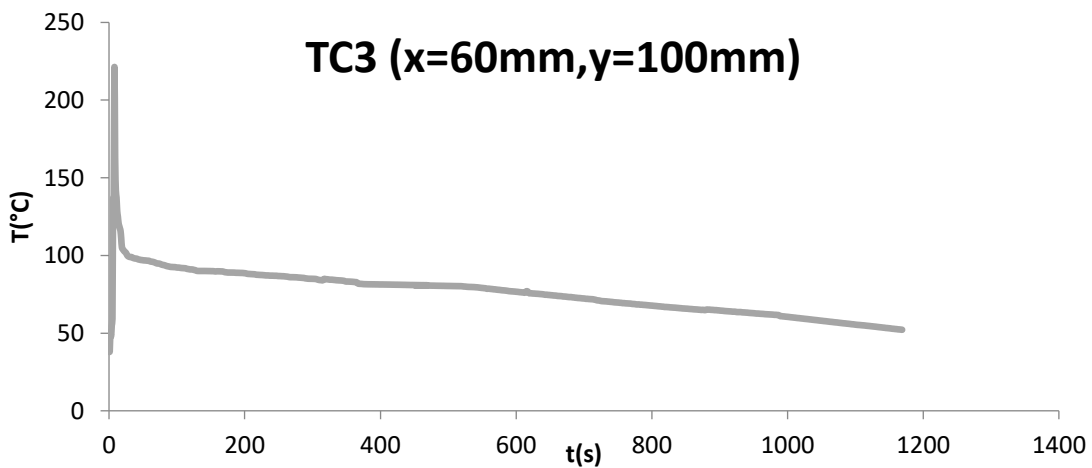
ΔΙΑΓΡ.5.1 Κατανομή θερμοκρασίας συνολικά για τα 3 θερμοστοιχεία



ΔΙΑΓΡ.5.2 Κατανομή θερμοκρασίας θερμοστοιχείου TC(1)



ΔΙΑΓΡ.5.3 Κατανομή θερμοκρασίας θερμοστοιχείου TC(2)



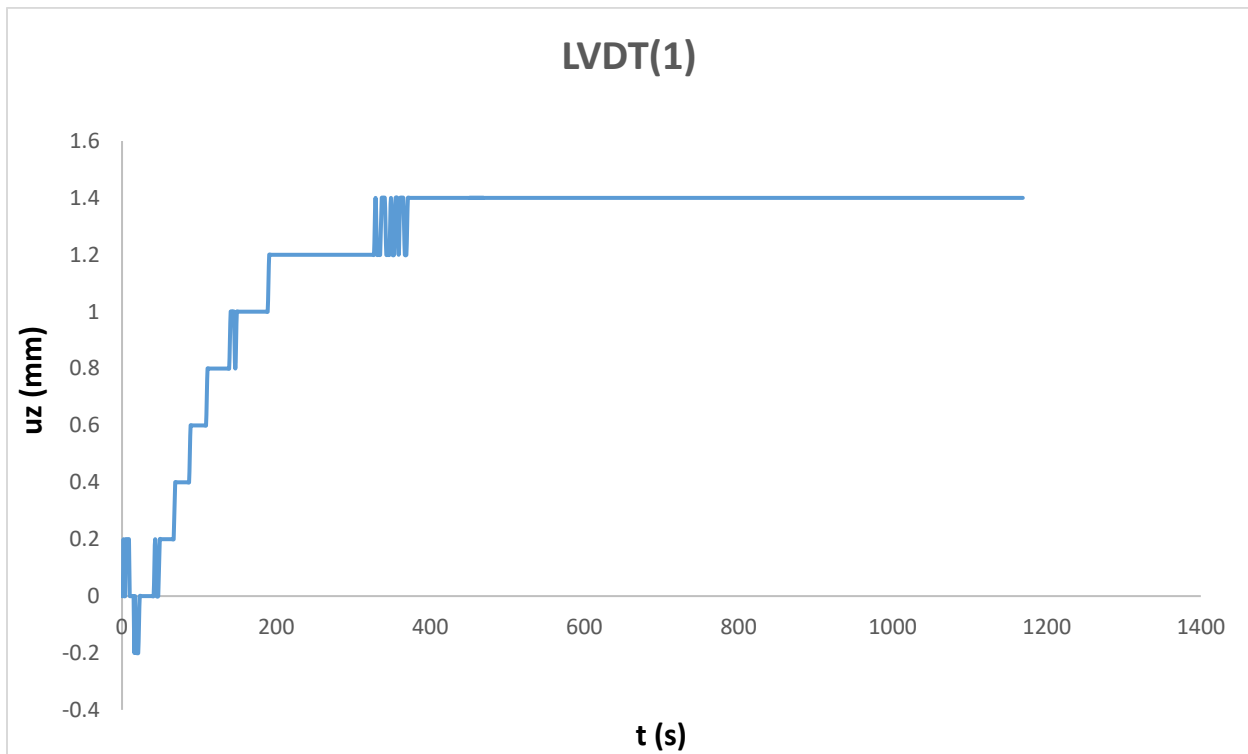
ΔΙΑΓΡ.5.4 Κατανομή θερμοκρασίας θερμοστοιχείου TC(3)

Από τα δεδομένα των μετρήσεων και την αναπαράστασή τους στα διαγράμματα παρατηρούμε πως σε λιγότερο από 20 s η καταγράφόμενη θερμοκρασία έχει αυξομειωθεί κατά 500 °C, στο κοντινότερο στη ζώνη τήξης θερμοστοιχείο ενώ η αυξομείωση είναι σημαντική και στα υπόλοιπα δύο, 400°C και 200 °C, αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτό το διάστημα η θερμική πηγή κινείται στο μέσον του ελάσματος  $\gamma=100\text{mm}$ , εκεί δηλαδή που είναι τοποθετημένα και τα θερμοστοιχεία. Έπειτα το έλασμα ψύχεται έως ότου φτάσει σε θερμοκρασία κοντινή στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

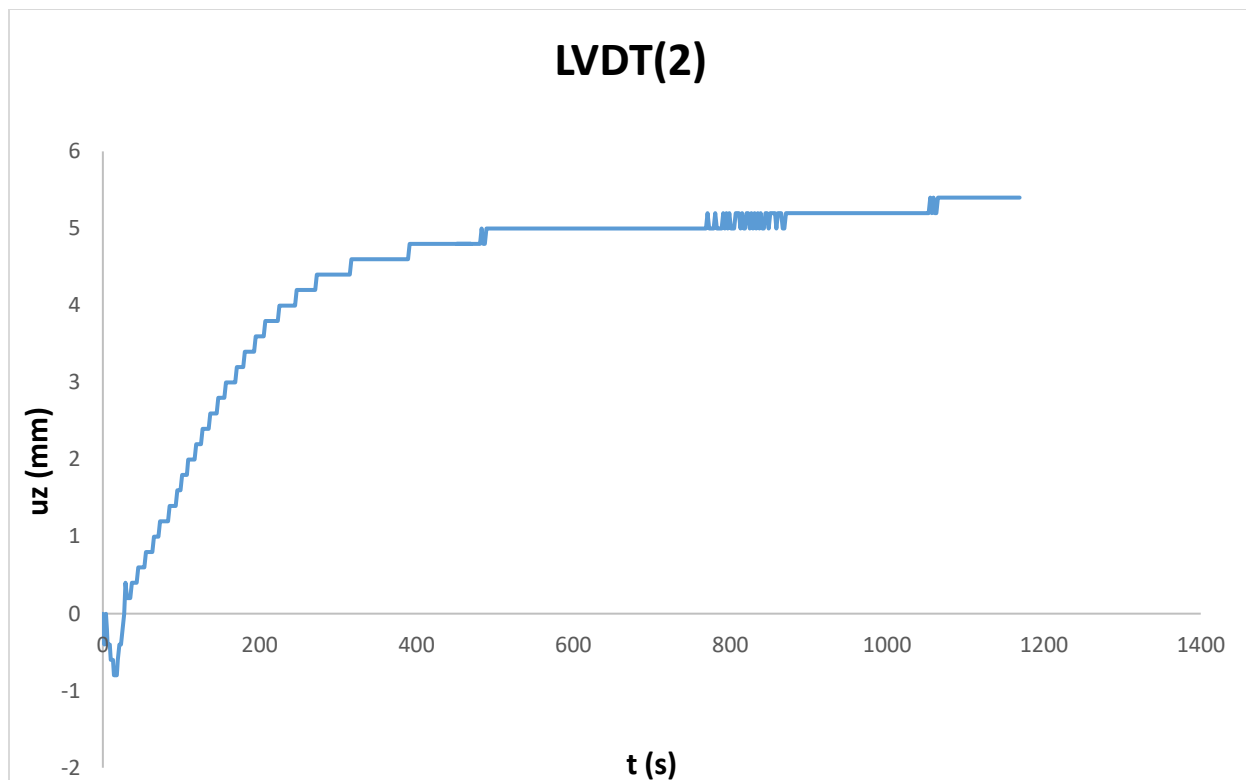
### 5.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ

Οι κατανομές των 2 μετρητικών οργάνων για συνολικό χρόνο καταγραφής  $t_{\text{ολ}}=1169\text{s}$  εμφανίζονται στα παρακάτω διαγράμματα (5.4, 5.5).

Μπορούμε να παρατηρήσουμε την εξέλιξη των μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της ψύξης του ελάσματος έως ότου καταλήξουν στις τελικές και μόνιμες τους τιμές.



ΔΙΑΓΡ. 5.5 Καμπύλη μετατόπισης LVDT1 ( $x=-60, y=20\text{mm}$ )



ΔΙΑΓΡ. 5.6 Καμπύλη μετατόπισης LVDT2( $x=-60,y=110mm$ )

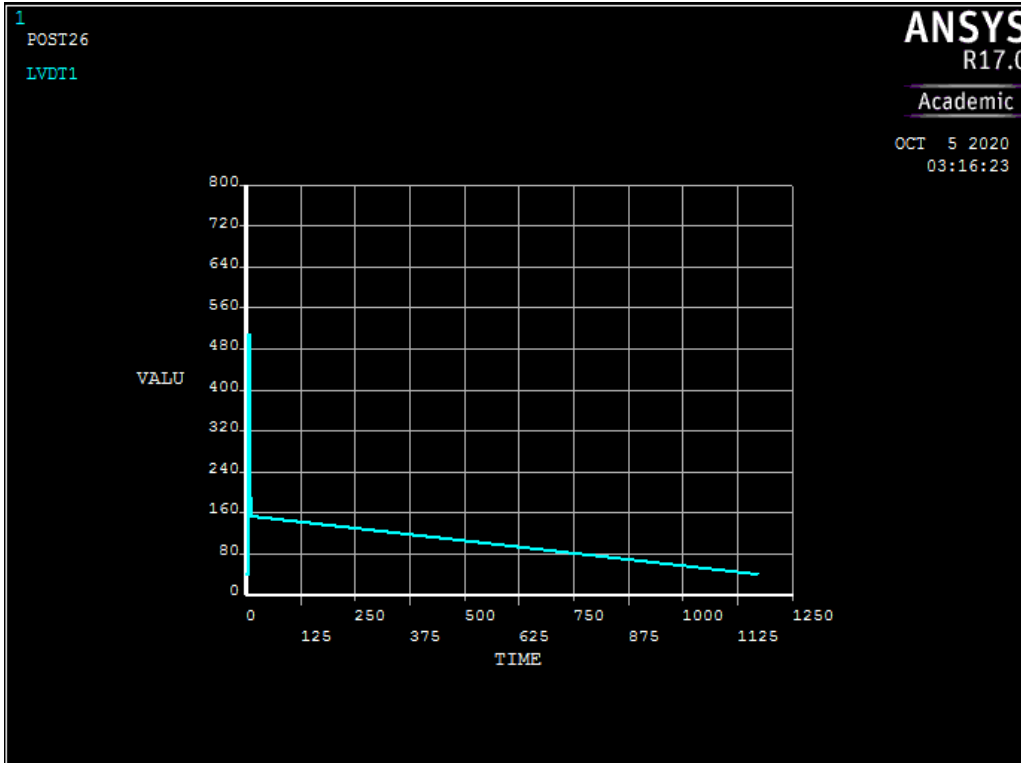
## 5.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στη κατασκευή της προσομοίωσης, προσπαθήσαμε η επιλογή παραμέτρων να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πειραματικές συνθήκες. Έτσι η ένταση του ρεύματος ήταν 180 A, η τάση 29,4 V και η ταχύτητα  $1 \text{ m/min} = 16.66 \text{ mm/s}$ . Στην ρύθμιση της θερμικής πηγής επιλέξαμε τελικά να μην πολλαπλασιάσουμε το θερμικό φορτίο με το συντελεστή απόδοσης γιατί από προηγούμενες απόπειρες παρατηρήσαμε ότι λαμβάνονταν καμπύλες χαμηλότερων θερμοκρασιών.

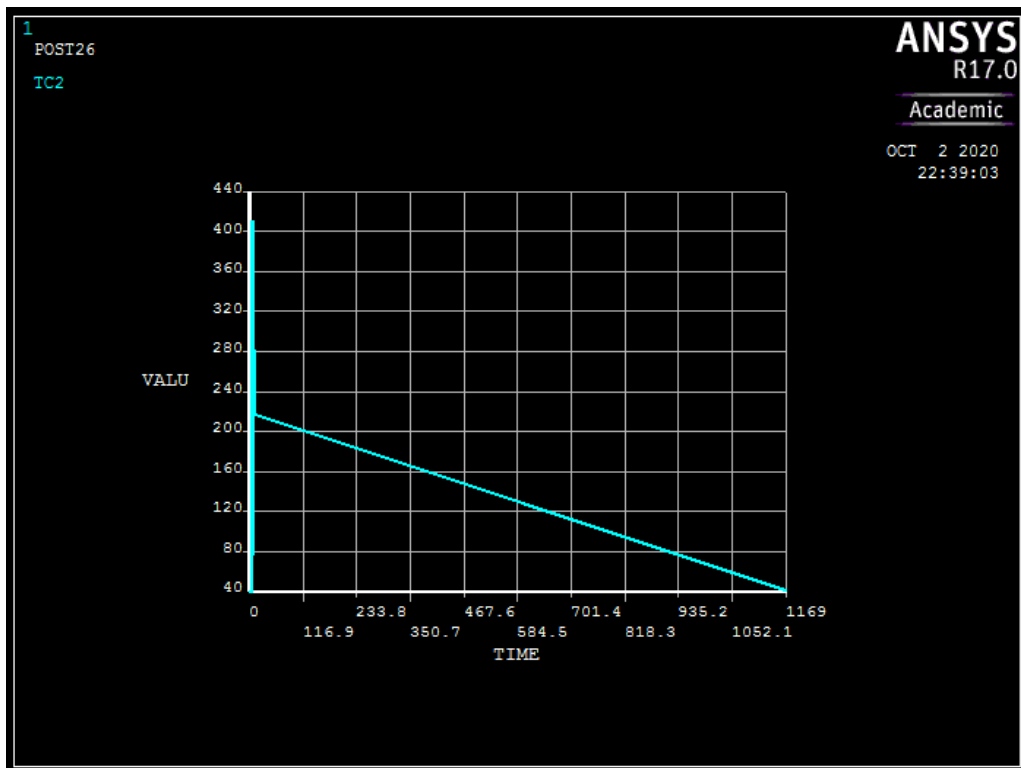
### 5.7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ

Τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για τα τρία θερμοστοιχεία όπως προέκυψαν από την προσομοίωση δίνονται στη συνέχεια (ΔΙΑΓΡ. 5.7, 5.8, 5.9).

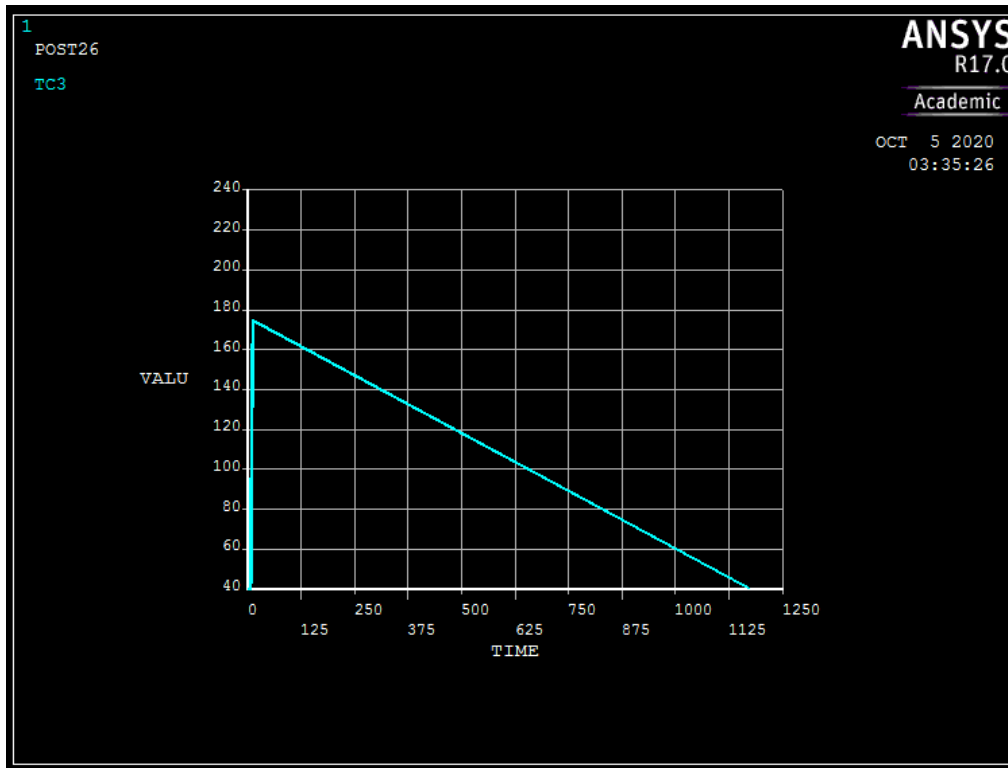
Αν συγκρίνουμε τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας με το χρόνο από το πείραμα και την προσομοίωση για τα θερμοστοιχεία TC1 και TC2, δηλ. τα ζεύγη ΔΙΑΓΡ. 5.2-5.7, ΔΙΑΓΡ. 5.3-5.8, αντίστοιχα, διαπιστώνουμε ότι οι αντίστοιχες καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή. Στην περίπτωση του θερμοστοιχείου TC3 (ΔΙΑΓΡ. 5.4-5.9) υπάρχει διαφορά στη μορφή των καμπυλών.



ΔΙΑΓΡ.5.7 Καταγραφή θερμοκρασίας χρόνου θερμοστοιχείου TC(1)



ΔΙΑΓΡ.5.8 Κατανομή θερμοκρασίας θερμοστοιχείου TC(2)



ΔΙΑΓΡ.5.9 Κατανομή θερμοκρασίας θερμοστοιχείου TC(3)

Για να γίνει σύγκριση, καταγράφονται τρία χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών στο παρακάτω Πίνακα. Τα σημεία αφορούν τη μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε ( $T_{max}$ ), την ενδιάμεση θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο τέλος της συγκόλλησης ( $T_{int}$ ) καθώς και τη θερμοκρασία κατά την ψύξη στη χρονική στιγμή 1000 sec ( $T_{1000}$ ).

	$T_{max}$			$T_{int}$			$T_{1000}$		
	sim	exp	σφάλμα(%)	sim	exp	σφάλμα(%)	sim	exp	σφάλμα(%)
TC1	510	515	0,97%	222	200	-9,03%	60	60	0,00%
TC2	415	450	7,78%	215	170	-20,33%	55	70	21,43%
TC3	175	225	22,22%	175	140	-20,00%	60	65	7,69%

Πιν. 5.1 Σύγκριση θερμοκρασίας στην προσομοίωση (sim) και στο πείραμα (exp)

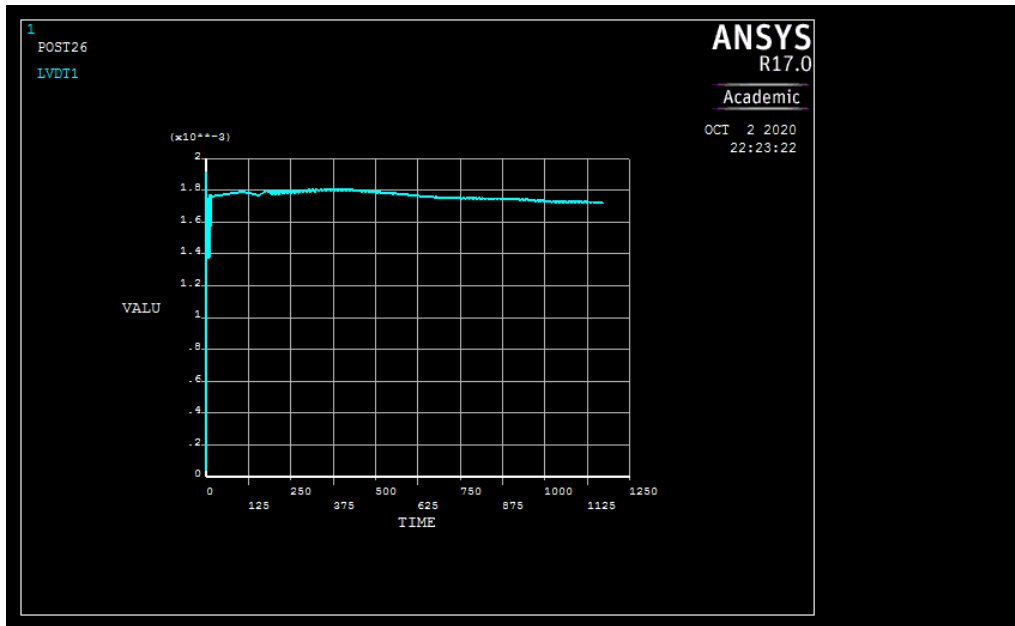
Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από το TC1 προς το TC3 μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες όπως η μη ακριβής αντιπροσώπευση της θερμικής πηγής από την κατανομή κατά Gauss, η μειωμένη πυκνότητα πλέγματος κλπ. Γενικά όμως η συμφωνία αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων θεωρείται αποδεκτή.

### 5.7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ

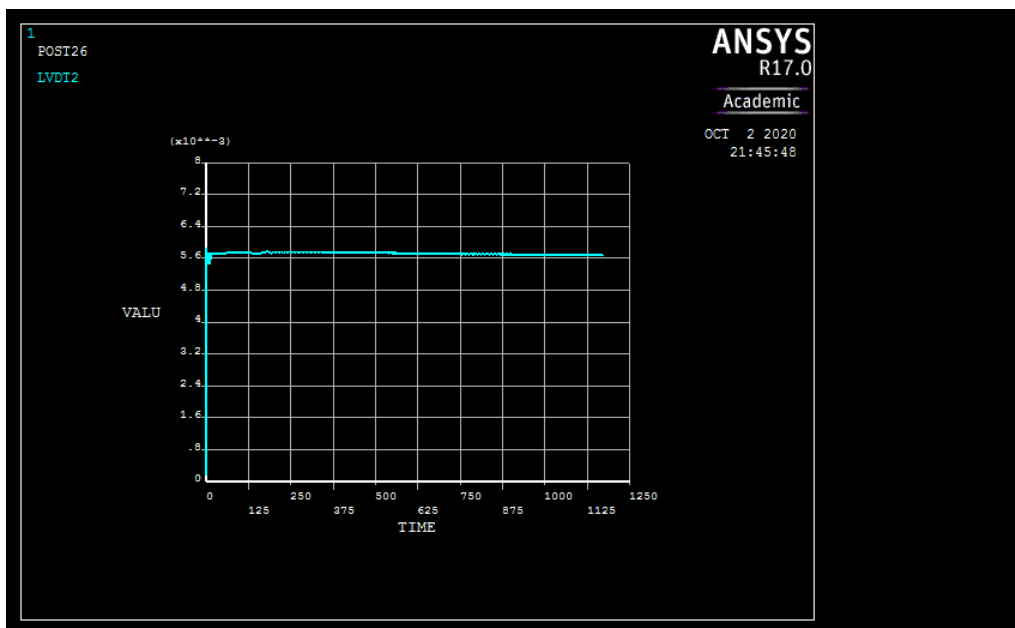
Στο μηχανικό μέρος της προσομοίωσης εξετάστηκε ενδελεχώς η πιο ακριβής επιλογή οριακών συνθηκών. Οι μετατοπίσεις κατά την ενοια της γραμμής συγκόλλησης(Uy) δεσμεύτηκαν στις επιφάνειες που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα στήριξης. Στην πλευρά του ελάσματος



στήριξης που λειτούργησε και ως γείωση της κατασκευής, δεσμεύτηκε και η μετατόπιση κατά την έννοια του πλάτους ( $U_x$ ), ενώ επιλέχθηκε ένας κόμβος στην βάση του ελάσματος, στον οποίο δεσμεύσαμε τη κίνηση στον άξονα z ( $U_z=0$ ) για να αποφύγουμε την ελεύθερη κίνηση στερεού. Οι καμπύλες μετατόπισης που προέκυψαν από την προσομοίωση δίνονται στα διαγράμματα 5.10 και 5.11.



Διαγ. 5.10 Καμπύλη μετατόπισης LVDT1( $x=-60,y=20mm$ )



Διαγ. 5.11 Καμπύλη μετατόπισης LVDT2( $x=-60,y=110mm$ )

Και στις δύο περιπτώσεις το πείραμα δείχνει στο αρχικό στάδιο, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αρνητική μετατόπιση ίση περίπου με το 15% της τελικής θετικής μετατόπισης που εμφανίζεται στη συνέχεια. Η προσομοίωση, αντίθετα, δεν προβλέπει αυτό το πρώτο στάδιο.

Όσο αφορά την τελική τιμή μετατόπισης η προσομοίωση προβλέπει ( 1.75 και 5.65 mm για τα LVDT1 και LVDT2 αντίστοιχα, ενώ το πείραμα 1.45 και 5.5 ) 1.801 και 5.7 mm για τα LVDT1 και LVDT2 αντίστοιχα, ενώ το πείραμα 1.45 και 5.5 αντίστοιχα, δηλαδή σχετικό σφάλμα 19.5% (Διαγ.5.5,5.10 ) και 3.57% (Διαγ.5.6,5.11 ).

Το σφάλμα οφείλεται τόσο στη ρύθμιση παραμέτρων επίλυσης του μηχανικού φορτίου στην προσομοίωση ,όσο και στην αδυναμία να προσομοιώσουμε ακριβώς τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Επιπλέον υπεισέρχονται σφάλματα τοποθέτησης / ευθυγράμμισης του LVDT. Δεδομένων των απλοποιήσεων στην αριθμητική προσομοίωση, αλλά και στην στήριξη των δοκιμών στο πείραμα, τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται αποδεκτά.

## 6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αριθμητική υλοποίηση προσομοίωσης συγκόλλησης ελασμάτων, σίγουρα, δεν είναι μία απλή υπόθεση. Περιλαμβάνει μη-μόνιμα φαινόμενα, μη γραμμικές ιδιότητες υλικού εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία, αλλαγές φάσης καθώς και άλλα μεταλλουργικά φαινόμενα. Η μελέτη που πραγματοποιήσαμε σε αυτή την εργασία υπέθεσε αρκετές απλοποιήσεις όσο αφορά το σύνολο των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε μία συγκόλληση, γεγονός που είχε αντίκτυπο στη συμφωνία αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η προσομοίωση της θερμικής πηγής είναι ένα από τα σοβαρότερα θέματα μιας τέτοιας μελέτης. Η επιλογή της Gauss-ιανής κατανομής θερμοκρασίας απλοποίησε τη μελέτη ως προς τα δεδομένα γεωμετρίας της ραφής συγκόλλησης αλλά σίγουρα οδήγησε a priori στη παραδοχή ότι τα σφάλματα θα είναι μεγαλύτερα σε σχέση με πιο εξελιγμένα μοντέλα θερμικών πηγών.

Η μεταβολή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια κατασκευής του μοντέλου, είχε ελάχιστη επίπτωση στην διαμόρφωση θερμοκρασιακών κατανομών και για αυτό δεν εξετάστηκε περαιτέρω η συνεισφορά του. Η μεταφορά θερμότητας διά ακτινοβολίας δεν εξετάστηκε, γεγονός που μειώνει την ακρίβεια της μελέτης.

Στο τμήμα της μηχανικής μελέτης τη μεγαλύτερη βαρύτητα έχουν οι καμπύλες τάσης διαρροής σε συνάρτηση με το χρόνο και η υπόθεση για την ελαστο –πλαστική συμπεριφορά του μοντέλου. Η διγραμμική ισοτροπική σκλήρυνση, που επιλέχθηκε, προσπάθησε να προσεγγίσει τις ασυνέχειες που προκύπτουν στο υλικό κατά τη θέρμανση και τη ψύξη του, ωστόσο δεν αναπαράστησε πλήρως τη μηχανική συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου γεγονός που οδήγησε σε αποκλίσεις.

Ο τρόπος στήριξης και οι βαθμοί ελευθερίας της κατασκευής, όπως είναι λογικό, επιδρούν καταλυτικά στη διαμόρφωση του πεδίου τάσεων –παραμορφώσεων, όσο και στη γεωμετρία της κατανομής αυτών. Απαιτήθηκαν αρκετές δοκιμές μέχρι να επιτύχουμε αποδεκτή αναπαράσταση των στηρίξεων και σύγκλιση της αριθμητικής υλοποίησης, στον ίδιο χρόνο.

Τέλος, το μέγεθος και ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που εκλέχθηκαν έπαιξαν πολύ σοβαρό ρόλο στην εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Η επιβολή συμμετρίας σίγουρα έκανε το μοντέλο πολύ πιο ελαφρύ, από πλευρά υπολογιστικού κόστους, όμως τα τεχνικά όρια του υπολογιστή(επεξεργαστής Intel–Core i7-4510U CPU 2.00GHz,μνήμη RAM 7,9GB) και η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου (ενδεικτικά μελέτη με πυκνή πλεγματοποίηση και αυξημένη χρονική διακριτοποίηση διήρκησε 7,5 ώρες) , οδήγησαν στο να μειώσουμε τα στοιχεία και συνεπώς την τελική ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Σε συνέχεια της παρούσας μελέτης θα μπορούσε να επικυρωθεί ένα μελλοντικό υπολογιστικό μοντέλο μέσω μέτρησης των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο διάνοιξης οπών.Θα μπορούσε ακόμη να

πραγματοποιηθούν συγκριτικοί υπολογισμοί ,θερμοκρασιακών κατανομών , με διαφορετικές μοντελοποιήσεις της θερμικής πηγής .Ακόμα ένα πεδίο που προσφέρεται μελέτης είναι οι αριθμητικοί μέθοδοι επίλυσης όπως και οι εξελιγμένες αλγοριθμικές προσεγγίσεις για τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού το οποίο λαμβάνει θερμο-μηχανικά φορτία ,όπως συμβαίνει στη περίπτωση της συγκόλλησης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Biswas P, Mandal NR, Das S. Prediction of welding deformations of large stiffened panels using average plastic strain method. *Sci Technol Weld Join*. 2011;16(3):227-231. doi:10.1179/1362171811Y.0000000004
2. Friedman E. Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method. 1975;(75).
3. Goldak JA, Akhlaghi M. *Computational Welding Mechanics*.; 2005. doi:10.1007/b101137
4. JOHN GOLDAK, ADITYA CHAKRAVARTI MB. A NEW Finite Model for Welding Heat Sources. 2018;52(1):1-7. doi:10.1080/21681805.2017.1363816
5. Muraki, Bryan JJ, Masubuchi K. Analysis of Thermal Stresses and Local Movement During Welding Part II Comparison of Experimental Data. 2016;4(4):85-91.
6. Papazoglou VJ, Masubuchi K. Numerical analysis of thermal stresses during welding including phase transformation effects. *J Press Vessel Technol Trans ASME*. 1982;104(3):198-203. doi:10.1115/1.3264204
7. Islam M, Buijk A, Rais-Rohani M, Motoyama K. Simulation-based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures. *Finite Elem Anal Des*. 2014;84:54-64. doi:10.1016/j.finel.2014.02.003
8. Roberto de Freitas Teixeira P, Bezerra de Araújo D, Antônio Bragança da Cunha L. Study of the Gaussian Distribution Heat Source Model Applied To Numerical Thermal Simulations of Tig Welding Processes Estudo Do Modelo De Fonte De Calor De Distribuição Gaussiana Na Aplicação De Simulações Térmicas Numéricas Dos Processos De Soldagem Tig. 2014;23(1):115-122.
9. Hashemzadeh M, Chen B, Soares CG. Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources - Proceedings of IMAM 2013, 15th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean. *Dev Marit Transp Exploit Sea Resour - Proc IMAM 2013, 15th Int Congr Int Marit Assoc Mediterr*. 2014;1(2010):329-335.
10. Michaleris P, Debicari A. Prediction of welding distortion. *Weld J (Miami, Fla)*. 1997;76(12):172-s.

11. Teng TL, Fung CP, Chang PH, Yang WC. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *Int J Press Vessel Pip.* 2001;78(8):523-538. doi:10.1016/S0308-0161(01)00074-6
12. Chen BQ, Hashemzadeh M, Guedes Soares C. Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014;72(5-8):1121-1131. doi:10.1007/s00170-014-5740-8
13. Jiang W, Yahiaoui K, Hall FR, Laoui T. Finite Element Simulation of Multipass Welding: Full Three-Dimensional Versus Generalized Plane Strain or Axisymmetric Models. *J Strain Anal Eng Des.* 2005;40(6):587-597. doi:10.1243/030932405X16061
14. Tikhomirov D, Rietman B, Kose K, Makkink M. Computing welding distortion: Comparison of different industrially applicable methods. *Adv Mater Res.* 2005;6-8:195-202. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.195
15. Nodeh IR, Serajzadeh S, Kokabi AH. Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification. *J Mater Process Technol.* 2008;205(1-3):60-69. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.104
16. Zaeh MF, Schober A. Approach for Modelling Process Effects during Friction Stir Welding of Composite Extruded Profiles. *Adv Mater Res.* 2008;43:105-110. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.43.105
17. Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding part 1: Increased complexity. *J Therm Stress.* 2001;24(2):141-192. doi:10.1080/01495730150500442
18. Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. part 2: Improved material modeling. *J Therm Stress.* 2001;24(3):195-231. doi:10.1080/014957301300006380
19. Lindgren LE. Finite element modeling and simulation of welding. Part 3: Efficiency and integration. *J Therm Stress.* 2001;24(4):305-334. doi:10.1080/01495730151078117

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```

FILNAME,fullweld1,0
/PREP7      ! Weldments defined
parameters
*SET,L,2E-1      ! Weldment length
*SET,W,2E-1      ! Weldment width
*SET,H,20E-4     ! Weldment height
!*
ET,1, SOLID70
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPTEMP,2,200
MPTEMP,3,600
MPTEMP,4,800
MPTEMP,5,1200
MPTEMP,6,1500
MPDATA,KXX,1,,45.9
MPDATA,KXX,1,,43.4
MPDATA,KXX,1,,33.6
MPDATA,KXX,1,,28.7
MPDATA,KXX,1,,28.6
MPDATA,KXX,1,,29.5
MPDATA,DENS,1,,7900
MPDATA,DENS,1,,7830
MPDATA,DENS,1,,7660
MPDATA,DENS,1,,7560
MPDATA,DENS,1,,7370
MPDATA,DENS,1,,7320
MPDATA,C,1,,444
MPDATA,C,1,,503
MPDATA,C,1,,692
MPDATA,C,1,,837
MPDATA,C,1,,860
MPDATA,C,1,,863
MPDATA,EX,1,,2.04E11
MPDATA,EX,1,,2E11
MPDATA,EX,1,,1.46E11
MPDATA,EX,1,,1E11
MPDATA,EX,1,,0.18E11
MPDATA,EX,1,,0.08E11
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPDATA,PRXY,1,,0.32
MPDATA,PRXY,1,,0.36
MPDATA,PRXY,1,,0.36

MPDATA,PRXY,1,,0.42
MPDATA,PRXY,1,,0.46
UIMP,1,REFT,,,20
MPDATA,ALPX,1,,1.2e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.28e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.33e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.4e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.44e-5
MPDATA,ALPX,1,,1.5e-5
TB,BISO,1,6,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,300e6,2.04E10,,,,
TBTEMP,200
TBDATA,,274e6,2E10,,,,
TBTEMP,600
TBDATA,,120e6,1.46E10,,,,
TBTEMP,800
TBDATA,,10E6,1E10,,,,
TBTEMP,1200
TBDATA,,4E6,0.18E10,,,,
TBTEMP,1500
TBDATA,,2E6,0.18E10,,,
K,1,0,0,0
K,2,0,L,0
K,3,-W/2*0.15,L,0
K,4,-W/2*0.3,L,0
K,5,-W/2*0.5,L,0
K,6,-W/2,L,0
K,7,-W/2,0,0
K,8,-W/2*0.5,0,0
K,9,-W/2*0.3,0,0
K,10,-W/2*0.15,0,0
K,11,0,0,H
! Face by establishing key points
A,1,2,3,10
A,10,3,4,9
A,9,4,5,8
A,8,5,6,7
VOFFST,1,H, ,
VOFFST,2,H, ,
VOFFST,3,H, ,
VOFFST,4,H, ,
Mesh

```

ESIZE,0.0020	*SET,TRAJ(3,1), 0.012
VMESH,1	*SET,TRAJ(4,1), 0.016
ESIZE,0.004	*SET,TRAJ(5,1), 0.02
VMESH,2	*SET,TRAJ(6,1), 0.024
ESIZE,0.008	*SET,TRAJ(7,1), 0.028
VMESH,3	*SET,TRAJ(8,1), 0.032
ESIZE,0.01	*SET,TRAJ(9,1), 0.036
VMESH,4	*SET,TRAJ(10,1), 0.04
vsel,s,volu,,1	*SET,TRAJ(11,1), 0.044
eslv	*SET,TRAJ(12,1), 0.048
nsle	*SET,TRAJ(13,1), 0.052
nsl,r,loc,x,-1.5000E-02	*SET,TRAJ(14,1), 0.056
vsel,s,volu,,2	*SET,TRAJ(15,1), 0.06
eslv	*SET,TRAJ(16,1), 0.064
esel,r,cent,x,-1.5000E-02,-0.30000E-01	*SET,TRAJ(17,1), 0.068
ceintf,,all	*SET,TRAJ(18,1), 0.072
vsel,s,volu,,2	*SET,TRAJ(19,1), 0.076
eslv	*SET,TRAJ(20,1), 0.08
nsle	*SET,TRAJ(21,1), 0.084
nsl,r,loc,x,-0.3000E-01	*SET,TRAJ(22,1), 0.088
vsel,s,volu,,3	*SET,TRAJ(23,1), 0.092
eslv	*SET,TRAJ(24,1), 0.096
esel,r,cent,x,-0.3000E-01,-0.50000E-01	*SET,TRAJ(25,1), 0.1
cent,,all	*SET,TRAJ(26,1), 0.104
vsel,s,volu,,3	*SET,TRAJ(27,1), 0.108
eslv	*SET,TRAJ(28,1), 0.112
nsle	*SET,TRAJ(29,1), 0.116
nsl,r,loc,x,-0.5000E-01	*SET,TRAJ(30,1), 0.12
vsel,s,volu,,4	*SET,TRAJ(31,1), 0.124
eslv	*SET,TRAJ(32,1), 0.128
esel,r,cent,x,-0.5000E-01,-1E-01	*SET,TRAJ(33,1), 0.132
ceintf,,all	*SET,TRAJ(34,1), 0.136
FINISH	*SET,TRAJ(35,1), 0.14
/SOL	*SET,TRAJ(36,1), 0.144
!* ANTYPE,4	*SET,TRAJ(37,1), 0.148
!* TRNOPT,FULL	*SET,TRAJ(38,1), 0.152
! Complete set method	*SET,TRAJ(39,1), 0.156
LUMPM,0	*SET,TRAJ(40,1), 0.16
local,11,1,0,0,0	*SET,TRAJ(41,1), 0.164
*DIM,test,TABLE,4001,1,,,,,11	*SET,TRAJ(42,1), 0.168
*TREAD,test,q5292r4,txt,,	*SET,TRAJ(43,1), 0.172
csys,0	*SET,TRAJ(44,1), 0.176
local,11,1,0,0,0	*SET,TRAJ(45,1), 0.18
*dim,traj,ARRAY,50,2,,,,,11	*SET,TRAJ(46,1), 0.184
*SET,TRAJ(1,1), 0.004	*SET,TRAJ(47,1), 0.188
*SET,TRAJ(2,1), 0.008	*SET,TRAJ(48,1), 0.192
	*SET,TRAJ(49,1), 0.196
	*SET,TRAJ(50,1), 0.2

```

*SET,TRAJ(1,2), 0.25
*SET,TRAJ(2,2), 0.5
*SET,TRAJ(3,2), 0.75
*SET,TRAJ(4,2), 1
*SET,TRAJ(5,2), 1.25
*SET,TRAJ(6,2), 1.5
*SET,TRAJ(7,2), 1.75
*SET,TRAJ(8,2), 2
*SET,TRAJ(9,2), 2.25
*SET,TRAJ(10,2), 2.5
*SET,TRAJ(11,2), 2.75
*SET,TRAJ(12,2), 3
*SET,TRAJ(13,2), 3.25
*SET,TRAJ(14,2), 3.5
*SET,TRAJ(15,2), 3.75
*SET,TRAJ(16,2), 4
*SET,TRAJ(17,2), 4.25
*SET,TRAJ(18,2), 4.5
*SET,TRAJ(19,2), 4.75
*SET,TRAJ(20,2), 5
*SET,TRAJ(21,2), 5.25
*SET,TRAJ(22,2), 5.5
*SET,TRAJ(23,2), 5.75
*SET,TRAJ(24,2), 6
*SET,TRAJ(25,2), 6.25
*SET,TRAJ(26,2), 6.5
*SET,TRAJ(27,2), 6.75
*SET,TRAJ(28,2), 7
*SET,TRAJ(29,2), 7.25
*SET,TRAJ(30,2), 7.5
*SET,TRAJ(31,2), 7.75
*SET,TRAJ(32,2), 8
*SET,TRAJ(33,2), 8.25
*SET,TRAJ(34,2), 8.5
*SET,TRAJ(35,2), 8.75
*SET,TRAJ(36,2), 9
*SET,TRAJ(37,2), 9.25
*SET,TRAJ(38,2), 9.5
*SET,TRAJ(39,2), 9.75
*SET,TRAJ(40,2), 10
*SET,TRAJ(41,2), 10.25
*SET,TRAJ(42,2), 10.5
*SET,TRAJ(43,2), 10.75
*SET,TRAJ(44,2), 11
*SET,TRAJ(45,2), 11.25
*SET,TRAJ(46,2), 11.5
*SET,TRAJ(47,2), 11.75
*SET,TRAJ(48,2), 12

*SET,TRAJ(49,2), 12.25
*SET,TRAJ(50,2), 12.5
csys,0
time,1e-6
deltim,1e-6,1e-6,1e-6
TUNIF,40, ! Define the initial temperature
allsel
solve
lswrite,1
*do,i,1,50,1 !how many loadsteps
time,traj(i,2) !time at the end of current load
step
deltim,traj(i,2)/24,traj(i,2)/60,traj(i,2),on !time-
step options
sfedele,all,all,all !delete previous loads
TUNIF,40, ! Define the initial temperature
! Define convective heat transfer boundary
SFA,15,1,CONV,25,40
SFA,20,1,CONV,25,40
SFA,9,1,CONV,25,40
SFA,14,1,CONV,25,40
SFA,19,1,CONV,25,40
SFA,24,1,CONV,25,40
SFA,23,1,CONV,25,40
SFA,7,1,CONV,25,40
SFA,12,1,CONV,25,40
SFA,17,1,CONV,25,40
SFA,22,1,CONV,25,40
SFA,1,1,CONV,25,40
SFA,2,1,CONV,25,40
SFA,3,1,CONV,25,40
SFA,4,1,CONV,25,40
SFA,10,1,CONV,25,40
! Laser Heat FLux
local,11,1,0,traj(i,1),0 !create local polar
coordinate system
nsel,s,loc,z,20E-4 !select nodes on the top
esln !select top elements, the ones "touching"
previously selected nodes
esel,r,cent,x,1e-6,4e-3
csys,0 !go back to global coordinate system
sfe,all,6,hflux,,%test% !apply beam as surface
load
allsel
solve
TSRES,ERASE
LSWRITE,i+1,
*enddo

```



```

sfedele,all,all,all !delete previous loads
SFA,15,1,CONV,25,40
SFA,20,1,CONV,25,40
SFA,9,1,CONV,25,40
SFA,14,1,CONV,25,40
SFA,19,1,CONV,25,40
SFA,24,1,CONV,25,40
SFA,23,1,CONV,25,40
SFA,7,1,CONV,25,40
SFA,12,1,CONV,25,40
SFA,17,1,CONV,25,40
SFA,22,1,CONV,25,40
SFA,1,1,CONV,25,40
SFA,2,1,CONV,25,40
SFA,3,1,CONV,25,40
SFA,4,1,CONV,25,40
SFA,10,1,CONV,25,40
TIME,1169
AUTOTS,1
DELTIM,100, ,1169
KBC,0
ALLSEL
SOLVE
TSRES,ERASE
LSWRITE,52
FINISH
/PREP7
ETCHG,TTS
keyopt,1,2,2
SFADELE,ALL,,conv
SFEDELE,ALL,,HFLUX
vsel,s,volu,,1
eslv
nsle
nsel,r,loc,x,-1.5000E-02
vsel,s,volu,,2
eslv
esel,r,cent,x,-1.5000E-02,-0.3000E-01
ceintf,,all
vsel,s,volu,,2
eslv
nsle
nsel,r,loc,x,-0.3000E-01
vsel,s,volu,,3
eslv
esel,r,cent,x,-0.3000E-01,-0.5000E-01
ceintf,,all
vsel,s,volu,,3

```

```

eslv
nsle
nsel,r,loc,x,-0.5000E-01
vsel,s,volu,,4
eslv
esel,r,cent,x,-0.5000E-01,-1E-01
ceintf,,all
allsel
Finish          ! Thermal conversion to structural
analysis
/SOL
ANTYPE,4
eqslv,iccg
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
NLGEOM,0
kbc,0
NROPT,FULL, ,OFF
! Define thermal stress calculation reference
temperature
TREF,40,
d,2,uz,0
da,9,uy,,
da,7,uy,,
da,7,ux,,
time,1e-6
deltim,.25e-6,.25e-6,1e-6,on !time-step options
LDREAD,TEMP,1,,, , 'fullweld1','rth','
! solve
*DO,j,1,50
time,traj(j,2) !time at the end of current load
step
deltim,traj(j,2)/24,traj(j,2)/60,traj(j,2),on !time-
step options
KBC,0
LDREAD,TEMP,j+1,,, , 'fullweld1','rth','
OUTRES,ALL,ALL,
allsel
SOLVE
*ENDDO
TIME,1169
AUTOTS,1
DELTIM,100, ,1169
KBC,0
LDREAD,TEMP,52,,, , 'fullweld1','rth','
ALLSEL
SOLVE
FINISH

```