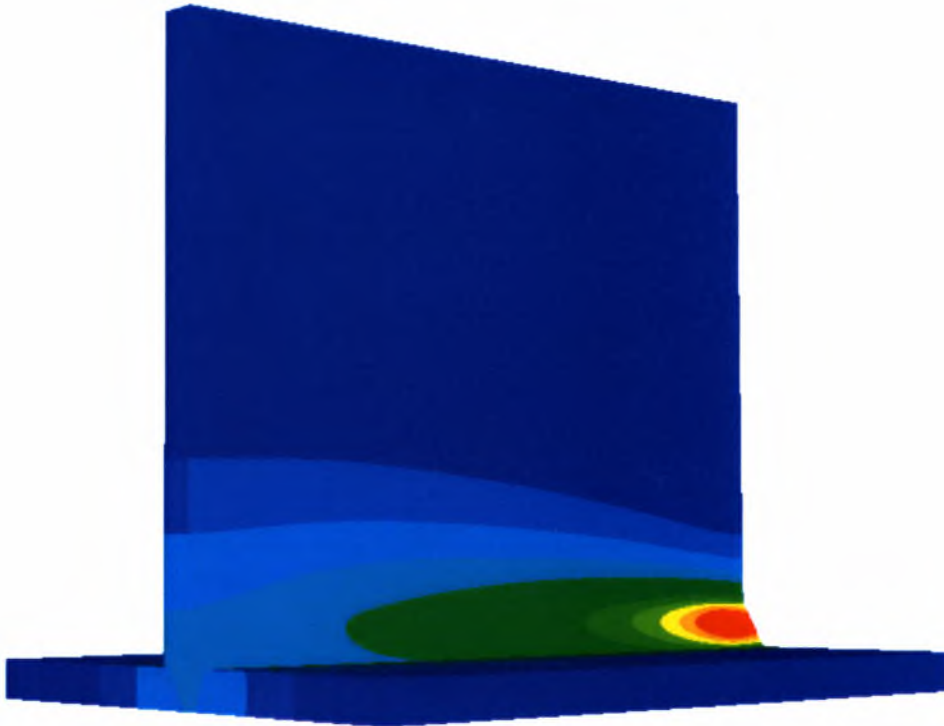




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΧΑΛΥΒΑ St52 ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
MIG-GMAW
ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕ-
ΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Μ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗ

Επιβλέπων Καθηγητής : Ν. ΑΡΑΒΑΣ

Βόλος, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6716/1
Ημερ. Εισ.: 06-11-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2008
ΦΡΑ

© 2008 Φραγκιαδάκη Ευαγγελία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αράβας Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Χαιδεμενόπουλος Γρηγόρης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξιος
Λέκτορας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πα-
νεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας της πτυχιακή μου εργασία, θέλω να ευχαριστήσω πρώτον από όλους τον επιβλέποντα της εργασίας μου, καθηγητή του Π.Θ Νικόλαο Αράβα, για την υποστήριξη του, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του με την οποία με περιέβαλε από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ επίσης την συνεργάτιδα του Τμήματος Μηχανολόγων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας Dr. Άννα Ζερβάκη για την βοήθεια της, τις συμβουλές της και κυρίως για το ενδιαφέρον της.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λεωνίδα Σπύρου για τον χρόνο που αφιέρωσε σε αυτή μου την προσπάθεια, βοηθώντας με να ξεπεράσω τις δυσκολίες της διαδρομής καθώς και την Σωτηρία Χουλιάρá για την πολύτιμη βοήθεια της.

Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου και ιδιαίτερα τους Κλειώ, Μαίρη, Ναντια, Ειρήνη, Παναγιώτη, Λάμπρο, Γιώργο, Μανώλη, Σταυρό, Σάκη και Κώστα που ήταν μαζί μου τόσο στις καλές όσο και στις δύσκολες στιγμές. Τους ευχαριστώ για την εμπύχωση και για την συμπαράσταση τους.

Ευχαριστώ πολύ τον Γιώργο που ήταν δίπλα μου, σημαντικό στήριγμα κατά την διάρκεια και ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Τέλος, αλλά με ιδιαίτερη για μένα σημασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Μιχάλη και Ειρήνη και τα αδέρφια μου Γιώργο, Πέπη και Παρή. Τους αφιερώνω αυτή τη εργασία, ως το ελάχιστο αντίτιμο για την φροντίδα, την αγάπη και την συμπαράσταση τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά στην περιοχή της θερμομηχανικής και ειδικότερα τη μελέτη των παραμενουσών τάσεων της χαλύβδινης κατασκευής κατά τη διάρκεια συγκόλλησης με αναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αδρανούς αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW-MIG).

Για την ανάπτυξη της εργασίας υιοθετείται η τεχνολογία της συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων από χάλυβα St-52. Το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία όσον αφορά τους μετασχηματισμούς δομής κατά τη διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας, ενώ η κατεργασία των συγκολλήσεων συνδυάζει το μέγιστο εύρος θερμοκρασιών συμπεριλαμβάνοντας σε μια φάση κατεργασίας τη θέρμανση, την ψύξη και την στερεοποίηση. Παράλληλα, η ευαισθησία των συγκολλήσεων όσον αφορά στις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της κατεργασίας καθιστά την υιοθέτηση τους ένα ολοκληρωμένο αντικείμενο μελέτης.

Η πτυχιακή εργασία χρησιμοποιεί ως βασικό αποδεικτικό εργαλείο τον αριθμητικό υπολογισμό με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα ABAQUS. Κατασκευάστηκε τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης. Το μοντέλο αυτό αποσκοπεί στο να «προβλέψει» τη θερμική και μηχανική απόκριση των προς συγκόλληση ελασμάτων πριν την πραγματοποίηση των ίδιων των συγκολλήσεων, δεδομένου ότι η εύστοχη και ταχεία «πρόβλεψη» αποτελεί σήμερα το ζητούμενο στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική βιομηχανία.

Εν κατακλείδι παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σχολιάζονται και προτείνεται βελτιωμένα μοντέλα για μελλοντικές έρευνες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	13
2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	13
2.2 ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ : ΧΑΛΥΒΑΣ ST-52.....	14
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ	14
2.2.2 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ.....	17
2.2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	17
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ MIG – GMAW	20
2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
2.3.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ MIG.....	21
2.3.3 ΣΥΡΜΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	26
3.1. ΓΕΝΙΚΑ	26
3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	26
3.2.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑ- ΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	27
3.2.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	29
3.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛ- ΛΗΣΕΙΣ	30
3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	32
3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	32
3.3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑ- ΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	34
3.4 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΟΛ - ΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.....	34
3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	35
3.5.1 ΥΛΙΚΟ	35
3.5.2 ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ	36

3.5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	37
3.5.4 ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	37
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	
ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ	
ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	41
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗ	41
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	46
4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΡΙΩΝ	
ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (3D).....	48
4.2.1.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ	53
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: (α) Ελάσματα (β)Μοντέλο κατασκευής τριδιάστατο 3D.....	14
Σχήμα 2.2 : Διάγραμμα φάσεων χαλύβων Fe – C	16
Σχήμα 2.3: Θερμική αγωγιμότητα λ , πυκνότητα ρ , θερμοχωρητικότητα c συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον χάλυβα St52.....	18
Σχήμα 2.4: Μέτρο ελαστικότητας E , λόγος Poisson ν , συντελεστής εκπομπής α συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον χάλυβα St52	18
Σχήμα 2.5: Όριο διαρροής σ_y συναρτήσει της θερμοκρασίας για χάλυβα St52.....	19
Σχήμα 2.6: Τάση συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες για το χάλυβα St52	19
Σχήμα 2.7 : Διάταξη Μεθόδου GMAW/MIG	21
Σχήμα 2.8 : Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG	22
Σχήμα 2.9 : Επίδραση της πολικότητας στη μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG.....	23
Σχήμα 3.1: Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων	31
Σχήμα 3.2: Μεθοδολογίες για την ανάλυση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις	32
Σχήμα 3.3 : Τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές διατομές	35
Σχήμα3.4 : Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους	36
Σχήμα 3.5: Σχηματικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων.....	38
Σχήμα 4.1: Ειδική θερμότητα και λανθάνουσα θερμότητα τήξης.....	44
Σχήμα 4.2 : Σχηματική παράσταση των ελασμάτων και της λίμνης συγκόλλησης.	49
Σχήμα 4.3 : Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων 3-D.....	50
Σχήμα 4.4α : Διακριτοποίηση κατά άξονα z(κάτοψη)	50
Σχήμα 4.4β : Διακριτοποίηση κατά άξονα z (πλάγια όψη)	51
Σχήμα 4.5 : Διακριτοποίηση στο x-y επίπεδο.....	52
Σχήμα 4.6 : Στοιχεία μοντέλου προσομοίωσης 3-D	53
Σχήμα 4.7: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=1\text{sec}$	55
Σχήμα 4.8: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=12\text{sec}$	55
Σχήμα 4.9α: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=22\text{sec}$	56
Σχήμα 4.9β: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=25\text{sec}$	56
Σχήμα 4.10: Θερμικοί κύκλοι κόμβων 1231, 19231 και 36231.	57
Σχήμα 4.11: Θέση κόμβων στον κάνναβο.....	57
Σχήμα 5.1α : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D	58
Σχήμα 5.1β : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D.....	59
Σχήμα 5.1γ : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D.....	59
Σχήμα 5.2 : Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=1.002\text{sec}$	60
Σχήμα 5.3 : Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=12\text{sec}$	61

<u>Σχήμα 5.4α</u> : Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=22\text{sec}$	61
<u>Σχήμα 5.4β</u> : Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=25\text{sec}$	62
<u>Σχήμα 5.5</u> : Τάσεις κατά von Mises συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 1231.....	62
<u>Σχήμα 5.6</u> : Τάσεις κατά Von Mises συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 19231.....	63
<u>Σχήμα 5.7</u> : Τάσεις κατά Von Mises συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 36231.....	63
<u>Σχήμα 5.8</u> : Ισοΰψεις της πίεσης για $t=1.002\text{sec}$	64
<u>Σχήμα 5.9</u> : Ισοΰψεις της πίεσης για $t=12\text{sec}$	65
<u>Σχήμα 5.10α</u> : Ισοΰψεις της πίεσης για $t=22\text{sec}$	65
<u>Σχήμα 5.10β</u> : Ισοΰψεις της πίεσης για $t=25\text{sec}$	66
<u>Σχήμα 5.11</u> : Πίεση συναρτήσεϊ του χρόνου στον κόμβο 1231.	66
<u>Σχήμα 5.12</u> : Πίεση συναρτήσεϊ του χρόνου στον κόμβο 19231.	67
<u>Σχήμα 5.13</u> : Πίεση συναρτήσεϊ του χρόνου στον κόμβο 36231.	67
<u>Σχήμα 5.14α</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec}$	68
<u>Σχήμα 5.14β</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec}$	69
<u>Σχήμα 5.14γ</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec}$	69
<u>Σχήμα 5.15α</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$	70
<u>Σχήμα 5.15β</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$	70
<u>Σχήμα 5.15γ</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$	71
<u>Σχήμα 5.16α₁</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=22\text{sec}$	71
<u>Σχήμα 5.16α₂</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=22\text{sec}$	72
<u>Σχήμα 5.16α₃</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=22\text{sec}$	72
<u>Σχήμα 5.16β₁</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=25\text{sec}$	73
<u>Σχήμα 5.16β₂</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=25\text{sec}$	73
<u>Σχήμα 5.16β₃</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=25\text{sec}$	74
<u>Σχήμα 5.17</u> : Τάσεις σ_{11} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 1231.	74
<u>Σχήμα 5.18</u> : Τάσεις σ_{11} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 19231.	75
<u>Σχήμα 5.19</u> : Τάσεις σ_{11} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 36231.	75
<u>Σχήμα 5.20α</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$	76
<u>Σχήμα 5.20β</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$	77
<u>Σχήμα 5.20γ</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$	77
<u>Σχήμα 5.21α</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$	78
<u>Σχήμα 5.21β</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$	78
<u>Σχήμα 5.21γ</u> : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$	79
<u>Σχήμα 5.22α₁</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$	79
<u>Σχήμα 5.22α₂</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$	80
<u>Σχήμα 5.22α₃</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$	80
<u>Σχήμα 5.22β₁</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$	81
<u>Σχήμα 5.22β₂</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$	81
<u>Σχήμα 5.22β₃</u> : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$	82
<u>Σχήμα 5.23</u> : Τάσεις σ_{33} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 1231.	82
<u>Σχήμα 5.24</u> : Τάσεις σ_{33} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 19231.	83
<u>Σχήμα 5.25</u> : Τάσεις σ_{33} συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 36231.	83
<u>Σχήμα 5.26</u> : Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=1.002\text{sec}$	84
<u>Σχήμα 5.27</u> : Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=12\text{sec}$	85
<u>Σχήμα 5.28α</u> : Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=22\text{sec}$	85
<u>Σχήμα 5.28β</u> : Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=25\text{sec}$	86
<u>Σχήμα 5.29</u> Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 1231.	87
<u>Σχήμα 5.30</u> : Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσεϊ του χρόνου για κόμβο 19231.	87

Σχήμα 5.31: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 36231.....88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 2.1</u> : Χημική σύσταση χάλυβα St52.....	17
<u>Πίνακας 2.2</u> : Λεπτομέρειες συγκόλλησης.....	23
<u>Πίνακας 2.3</u> : Χημική σύσταση σύρματος ESAB AUTOROD 12.50.....	24
<u>Πίνακας 2.4</u> : Παράμετροι σύρματος ESAB AUTOROD 12.50.....	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

Στην επιστημονική περιοχή των συγκολλήσεων μπορεί κανείς να αναφέρει πληθώρα μελετών και δημοσιεύσεων που αφορούν κυρίως στη φύση της συγκόλλησης και στην εφαρμογή της στην περιοχή της ναυπηγικής τεχνολογίας.

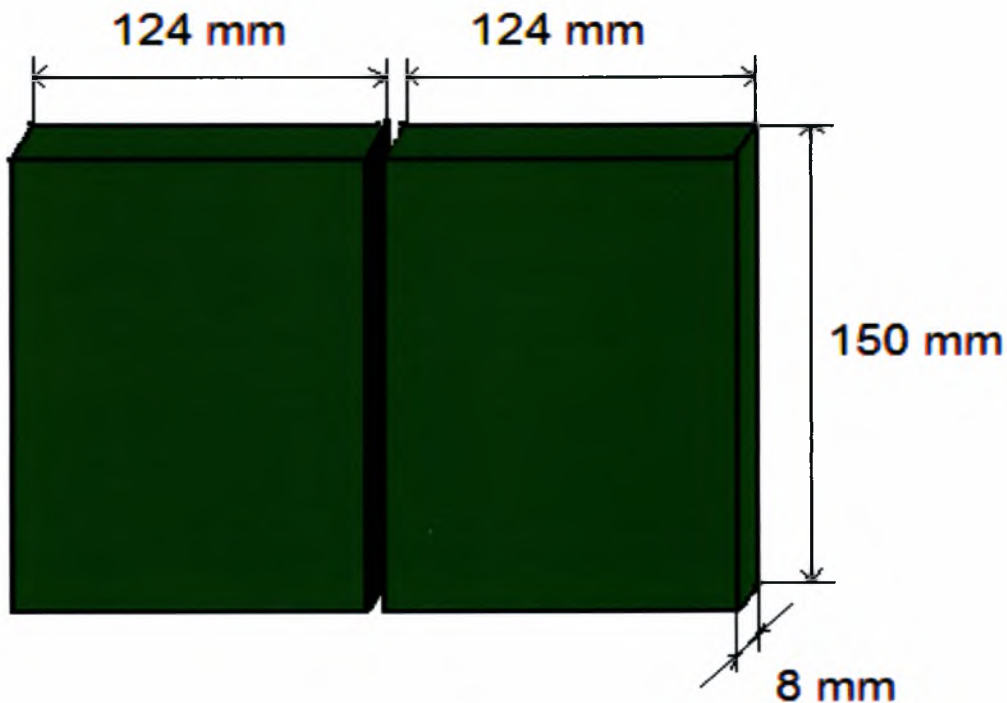
Η διαδικασία της συγκόλλησης εμπεριέχει φαινόμενα που κυρίως σχετίζονται ανομοιόμορφη θερμοκρασιακή φόρτιση των προς κατεργασία τεμαχίων. Περιοχές του μετάλλου κοντά στο μέταλλο συγκόλλησης θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και εν συνέχεια αποψύχονται άγοντας τη θερμότητα στο υπόλοιπο τεμάχιο. Η τοπική αυτή θέρμανση, συνοδευόμενη από ψύξη, προκαλεί γεωμετρικές μεταβολές (αλλαγή σχήματος τεμαχίων), που με τη σειρά τους, παράγουν μεταβατικές και μόνιμες παραμορφώσεις στα προς συγκόλληση τεμάχια.

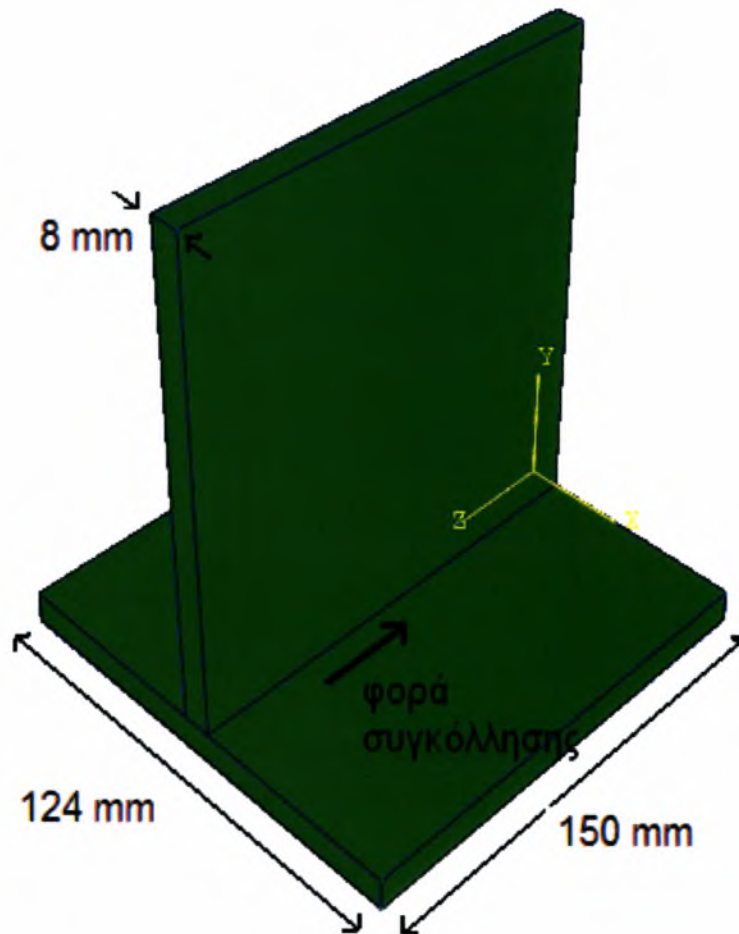
Οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις της κατασκευής κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, είναι αλληλένδετα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Οι παραμορφώσεις που προκαλούνται κατά τη θέρμανση των τεμαχίων είναι κατά κύριο λόγο πλαστικής φύσεως, που έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων, που σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της κατασκευής, προκαλούν σε αυτήν αλλαγή και μόνιμες μετατοπίσεις. Οι αλλαγές αυτές της γεωμετρίας των συγκολλητών τεμαχίων, δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα στη σύνθεση της τελικής κατασκευής από τα επιμέρους συγκολλητά τεμάχια με άμεση συνέπεια να μειώνουν σημαντικά την ποιότητα τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του θερμοκρασιακού πεδίου και των παραμενουσών τάσεων κατά την συγκόλληση χαλύβδινων ελασμάτων με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο της συγκόλλησης έχει σχήμα ανάποδου T (ταυ) και αποτελείται από δύο όμοια χαλύβδινα ελάσματα πλάτους 124mm, μήκους 150mm και πάχους 8mm όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.1. Τα ελάσματα συγκολλήθηκαν με την μέθοδο συγκόλλησης GMAW-MIG. Η συγκόλληση διήρκησε περίπου 22 δευτερόλεπτα και η μοντελοποίηση της αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.





Σχήμα 2.1: (α) Ελάσματα (β) Μοντέλο κατασκευής τριδιάστατο 3D

2.2 ΥΛΙΚΟ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ : ΧΑΛΥΒΑΣ St52

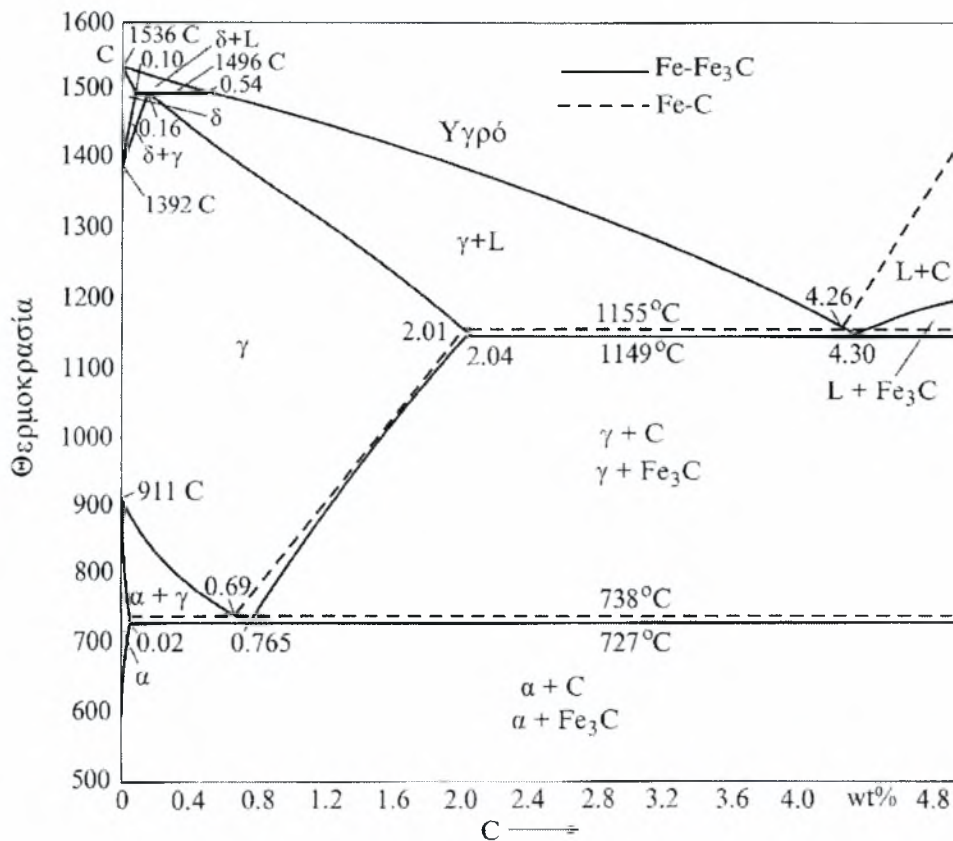
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Σήμερα οι χάλυβες αποτελούν πάνω από το 80% των βιομηχανικών κραμάτων. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες επιτρέπουν το σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών, που οδηγεί σ' ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικής συμπεριφοράς. Επίσης οφείλεται στο χαμηλό κόστος και τη σχετική ευκολία παραγωγής χαλύβων σε μεγάλες ποσότητες με ακριβής προδιαγραφές.

Ο σίδηρος σχηματίζει στερεά διαλύματα παρεμβολής και αντικαταστάσεως. Ο άνθρακας είναι το σημαντικότερο στοιχείο παρεμβολής, αφού η περιεκτικότητα σε άνθρακα ενός χάλυβα επηρεάζει τόσο τη θερμοδυναμική και κινητική των μετασχηματισμών όσο και τις μηχανικές ιδιότητες. Τα κραματικά στοιχεία αντικαταστάσεως συμπεριφέρονται ως σταθεροποιητές της ωστενιτικής ή της φερριτικής φάσεως ή ως καρβιδιογόνα στοιχεία. Επίσης επηρεάζουν την κινητική των μετασχηματισμών, αφού απαιτείται η διάχυση τους για την πραγματοποίηση ενός μετασχηματισμού. Η μεγαλύτερη ποικιλία μικροδομών στους χάλυβες σχηματίζεται κατά το μετασχηματισμό του ωστενίτη, όταν αυτός ψύχεται. Έτσι ανάλογα με την θερμοκρασία μετασχηματισμού ή το ρυθμό ψύξεως είναι δυνατόν να σχηματιστεί προευνυκτοειδής φερρίτης, περλίτης, μπαινίτης ή μαρτενσίτης.

Η εμβαπτότητα ενός χάλυβα είναι η ικανότητα σχηματισμού μαρτενσίτη κατά τη βαφή. Η προσθήκη κραματικών στοιχείων σε ένα χάλυβα αυξάνει την εμβαπτότητα του. Επειδή ο μαρτενσίτης που προκύπτει από την βαφή είναι μεν σκληρός αλλά ταυτόχρονα ψαθυρός, τη βαφή ακολουθεί μια θερμική κατεργασία που ονομάζεται επαναφορά. Με την επαναφορά προσδίδεται στο χάλυβα ολκιμότητα έναντι μικρής σχετικά μειώσεως της σκληρότητας. Σε χάλυβες, που περιέχουν σημαντικό ποσοστό καρβιδιογόνων στοιχείων η δευτερογενής σκλήρυνση κατά την επαναφορά επιφέρει ένα βέλτιστο συνδυασμό σκληρότητας και δυσθραυστότητας.

Στον Σχήμα 2.2 φαίνεται το διάγραμμα φάσεων των χαλύβων.



Σχήμα 2.2 : Διάγραμμα φάσεων Fe - C

Για τον προσδιορισμό της θερμομηχανικής, απαιτείται εν γένει η επίλυση της πρώτης ύλης, ο προσδιορισμός δηλαδή των φυσικών, μηχανικών και μεταλλογραφικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη υλικού.

Για τη μελέτη του πιο πάνω προβλήματος θα υιοθετηθεί, όπως προαναφέρθηκε η περίπτωση συγκόλλησης ελασμάτων χάλυβα St-52 που στην βιβλιογραφία μπορεί να βρεθεί και με τον συμβολισμό S355J2G3, St 52-3, St52-3G. Το υλικό αυτό επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει ευρύ φάσμα μετασχηματισμών, είναι υπό συνθήκες συγκολλησιμο και αποτελεί υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή στοιχείων μηχανών που λειτουργούν υπό την επίδραση θερμικής και μηχανικής καταπόνησης.

Εν γένει, ο ενδιαφέρον εστιάζεται στον προσδιορισμό των πιο κάτω παραμέτρων :

- Χημική σύσταση
- Φυσικές ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας
- Μηχανικές ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας

2.2.2 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Η χημική σύσταση του χάλυβα St52 παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1 :

Στοιχεία		Περιεκτικότητα (wt%)	
		min	max
C	άνθρακας	0	0.20
Mn	μαγνήσιο	0	1.60
S	θείο	0	0.035
Si	πυρίτιο	0	0.55
P	φωσφορος	0	0.035
Al	αλουμίνιο	0.002	0

Πίνακας 2.1 : Χημική σύσταση χάλυβα St52

2.2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι θερμικές, μηχανικές αλλά και γενικές ιδιότητες που ενδιαφέρουν την μελέτη είναι οι εξής :

Θερμικές ιδιότητες :

- Θερμική αγωγιμότητα k ή λ [$J m^{-1} s^{-1} ^\circ C^{-1}$] (thermal conductivity)
- Θερμοχωρητικότητα c [$J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$] (specific heat capacity)
- Συντελεστής συναγωγής (ή συντελεστής μεταφοράς θερμότητας) h [$W m^{-2} ^\circ C^{-1}$] (heat transfer coefficient)
- Συντελεστής εκπομπής ϵ [αδιάστατος] (emissivity)
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξεως U_{latent} [$J kg^{-1}$] (latent heat)
- Θερμοκρασία liquidus $T_{liquidus}$ [$^\circ C$]
- Θερμοκρασία solidus $T_{solidus}$ [$^\circ C$]

Ελαστικές μηχανικές ιδιότητες :

- Μέτρο ελαστικότητας E [$N m^{-2}$] (elastic modulus)
- Λόγος Poisson ν [αδιάστατος] (Poisson's ratio)
- Συντελεστής θερμικής διαστολής α [$^\circ C^{-1}$] (thermal expansion coefficient)

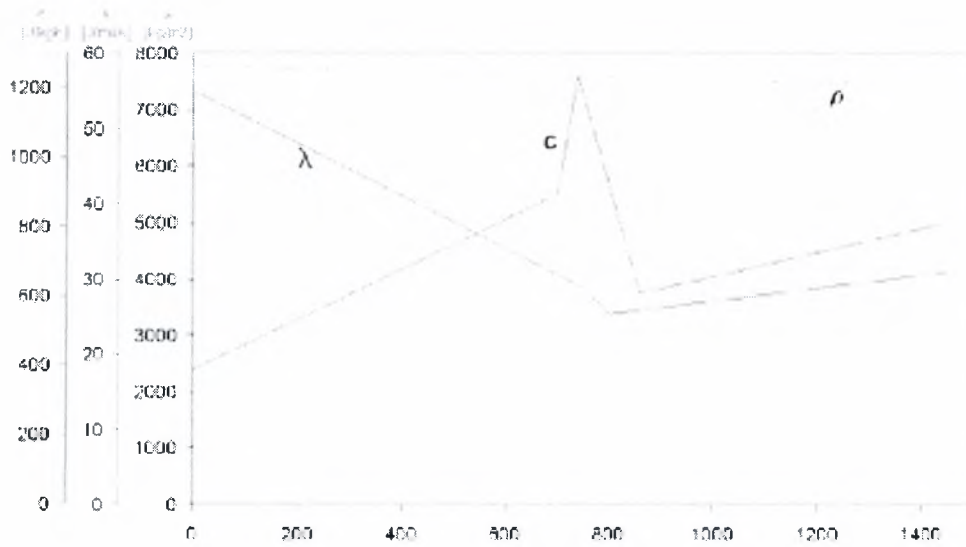
Μη-ελαστικές μηχανικές ιδιότητες :

- Όριο διαρροής σ_y [$N m^{-2}$] (yield stress)
- Καμπύλη σ - ϵ^p στην πλαστική περιοχή

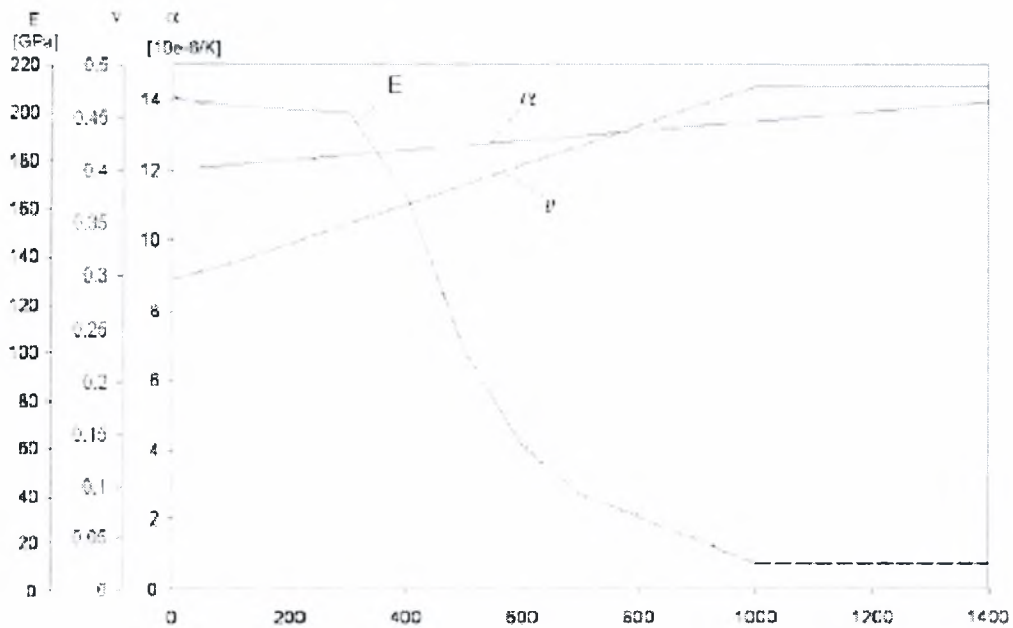
Γενικές ιδιότητες :

- Πυκνότητα ρ [$kg m^{-3}$] (density)

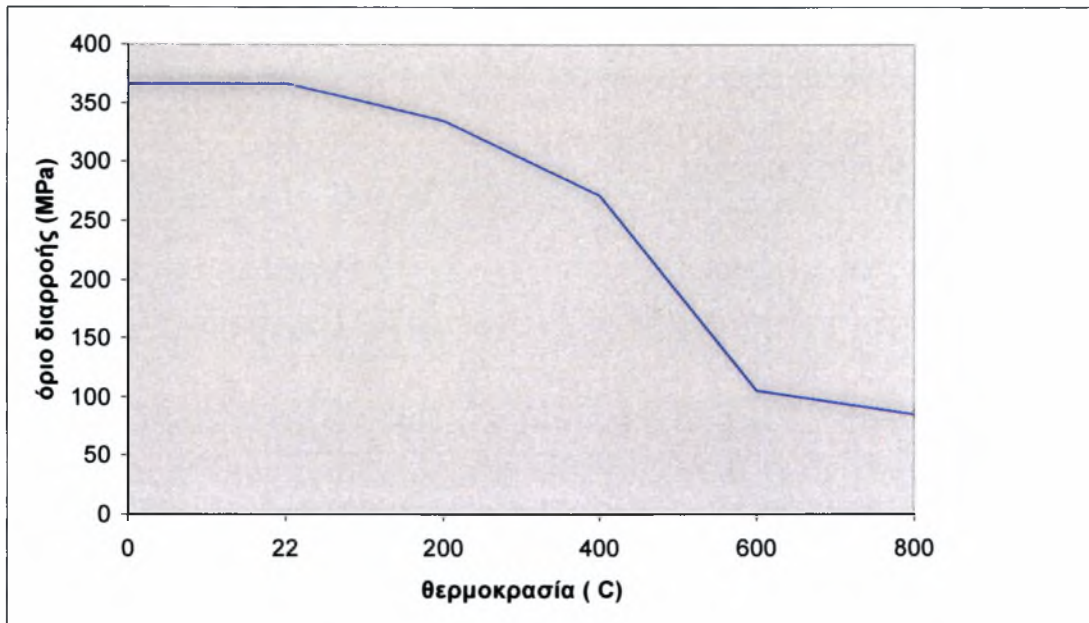
Η μεταβολή των ανωτέρω ιδιοτήτων με την θερμοκρασία παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3, 2.4 και 2.5.



Σχήμα 2.3 : Θερμική αγωγιμότητα λ , πυκνότητα ρ , θερμοχωρητικότητα c συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον χάλυβα St52

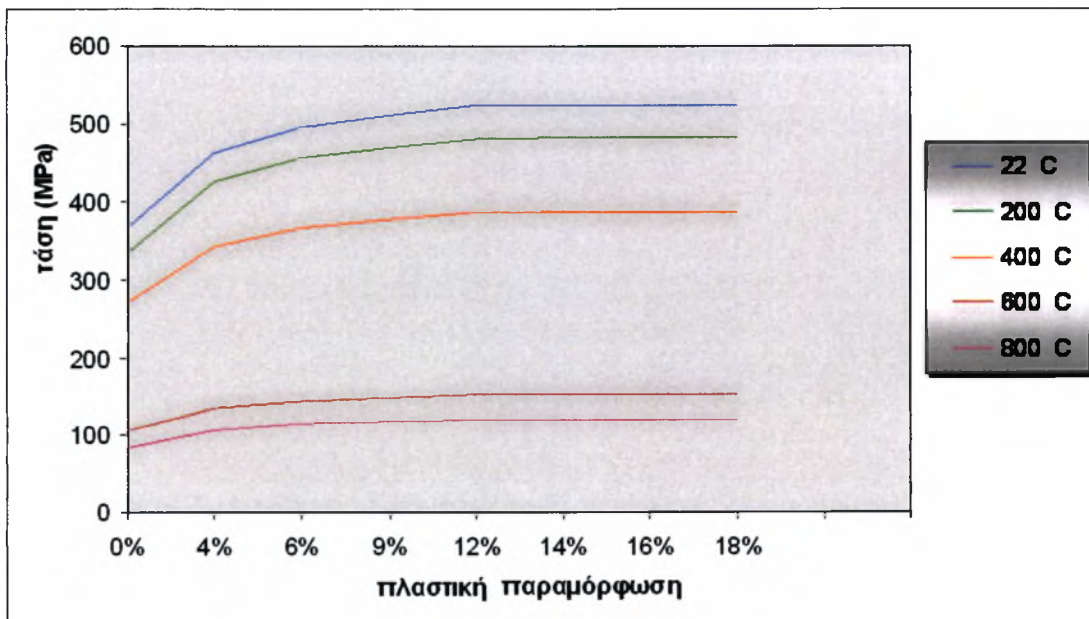


Σχήμα 2.4 : Μέτρο ελαστικότητας E , λόγος Poisson ν , συντελεστής θερμικής διαστολής α συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον χάλυβα St52.



Σχήμα 2.5 : Όριο διαρροής σ_y συναρτήσει της θερμοκρασίας για χάλυβα St52

Οι καμπύλες τάσης–πλαστικής παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 : Τάση συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες για το χάλυβα St52

2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ MIG – GMAW

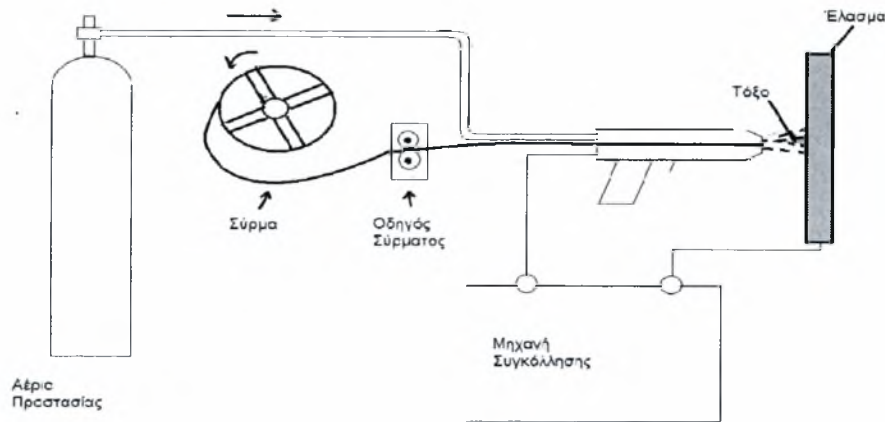
2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκόλληση MIG/GMAW είναι μία μέθοδος κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση μετάλλου ενώ ταυτόχρονα η λίμνη συγκόλλησης προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Η συγκόλληση MIG (Metal Inert Gas) αναφέρεται και ως συγκόλληση GMAW (Gas Metal Arc Welding).

Το αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο έχει την μορφή μεταλλικού σύρματος και έχει συνήθως σύσταση παραπλήσια με αυτήν του βασικού μετάλλου. Τόσο το σύρμα συγκόλλησης (που διατίθεται σε συσκευασία κουλούρας) όσο και το προστατευτικό αέριο, διοχετεύονται μέσα από τον πυρσό συγκόλλησης. Στο Σχ.2.7 φαίνεται η βασική διάταξη για την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης MIG. Στην MIG το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο και παρέχει το απαραίτητο συμπληρωματικό υλικό συγκόλλησης.

Η συνεχής ροή συγκολλητικού υλικού κατά την συγκόλληση MIG επιτρέπει την επίτευξη υψηλών ρυθμών εναπόθεσης ραφών και προσδίδει στην μέθοδο αυτή υψηλή παραγωγικότητα, τουλάχιστον 4-5 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που επιτυγχάνεται με την μέθοδο TIG. Παράλληλα, η μεταφορά μετάλλου μέσω της στήλης του ηλεκτρικού τόξου επιτρέπει την επίτευξη υψηλού ρυθμού εισαγωγής θερμότητας, που εν μέρει οφείλεται στο υπέρθερμο τηγμένο μέταλλο που μεταφέρεται από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης.

Η ποιότητα των συγκολλήσεων MIG εξαρτάται από διάφορους παράγοντες κυριότεροι των οποίων είναι η καθαρότητα του βασικού μετάλλου, το είδος του προστατευτικού αερίου και ο μηχανισμός της μεταφοράς μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Αυτός με την σειρά του εξαρτάται από τις συνθήκες συγκόλλησης (τάση και ένταση ρεύματος, πολικότητα). Πιο κάτω θα δούμε συνοπτικά τους παράγοντες αυτούς.



Σχήμα 2.7 : Διάταξη Μεθόδου GMAW/MIG

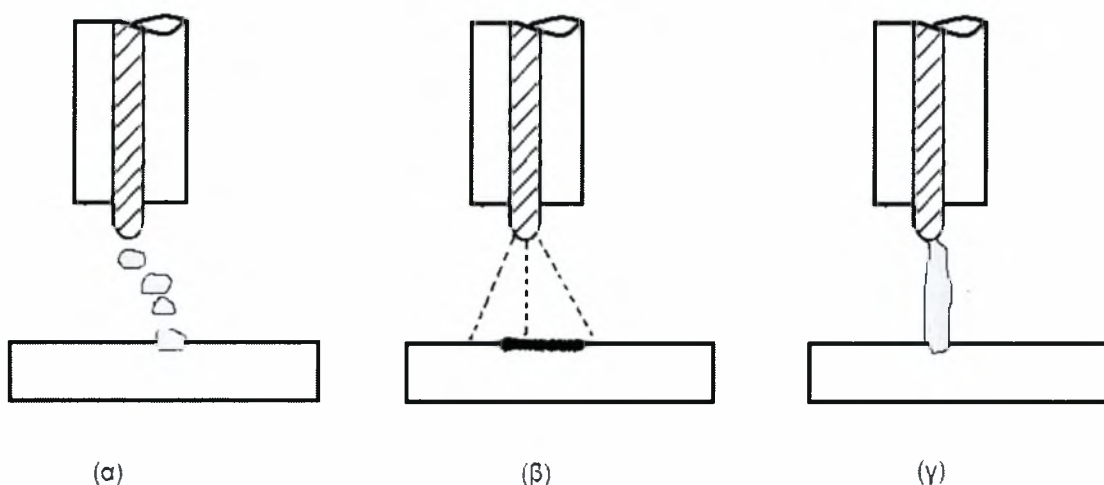
2.3.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ MIG

Η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης πραγματοποιείται με τρεις μηχανισμούς, ανάλογα με την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος που επιβάλλεται στο ηλεκτρικό τόξο. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- Μεταφορά με σταγόνες
- Μεταφορά με ψεκασμό (σπρέι)
- Μεταφορά μέσω βραχυκυκλώματος σύρματος/βασικού μετάλλου

Για την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης MIG είναι αναγκαία η επίτευξη μιας ικανής πυκνότητας ρεύματος ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Για μια δεδομένη ελάχιστη πυκνότητα ρεύματος, που εξαρτάται από την διάμετρο του σύρματος, η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με την μορφή σχετικά μεγάλων σταγόνων (Σχ.2.8α), που αποκολλώνται από την άκρη του σύρματος συγκόλλησης. Με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος σχηματίζεται ένα σπρέι, αποτελούμενο από μικροσκοπικά σταγονίδια μετάλλου (Σχ.2.8β). Το σπρέι αυτό έχει κωνική μορφή από το άκρο του σύρματος προς το μέταλλο βάσης και στην ουσία το υλικό συγκόλλησης ψεκάζεται προς την λίμνη συγκόλλησης. Ο τρίτος μηχανισμός μεταφοράς μετάλλου δεν πραγματοποιείται με μεταφορά σταγονιδίων μέσω του τόξου αλλά με περιοδική επαφή του ηλεκτροδίου (σύρματος) με το προς συγκόλλ-

ληση μέταλλο, με ρυθμό μεγαλύτερο από 100 επαφές/sec και ονομάζεται μεταφοράς μετάλλου μέσω βραχυκυκλώματος (Σχ.2.8γ). Κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος, τηγμένα τμήματα του σύρματος αποσπώνται και ενσωματώνονται στην λίμνη συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως με σύρματα μικρής διαμέτρου για συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο σχετικά μικρός ρυθμός εισαγωγής θερμότητας, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις παραμορφώσεις και τις μεταλλουργικές μεταβολές.

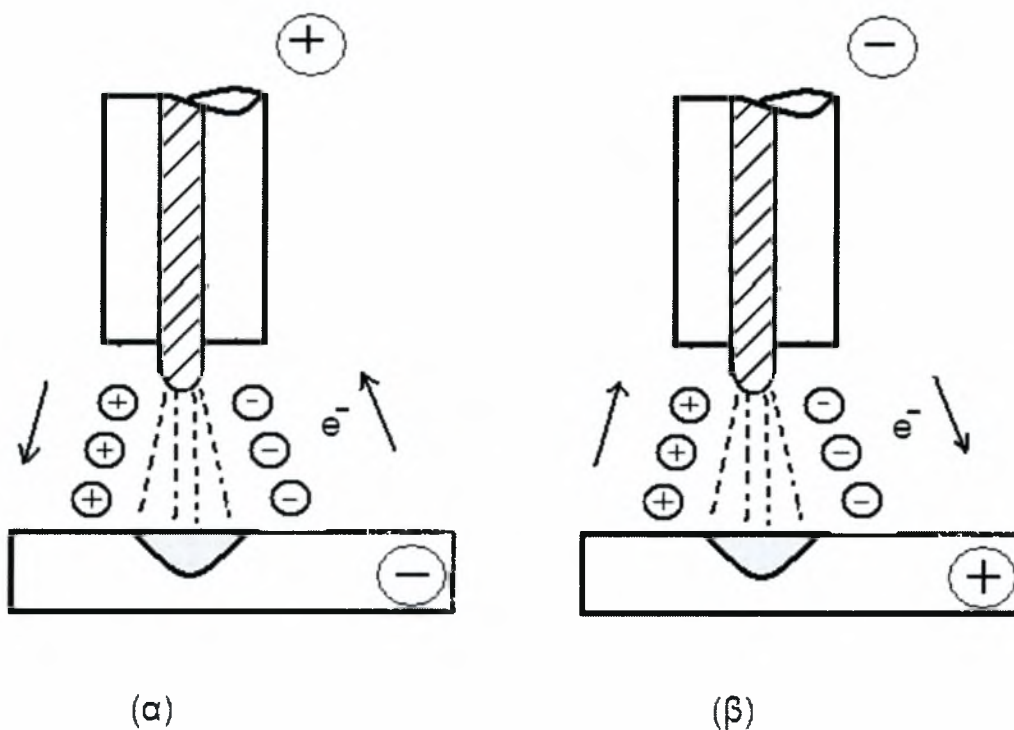


Σχήμα 2.8 : Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG
 (α) Μεταφορά με σταγόνες, (β) Μεταφορά με σπρέι, (γ) Μεταφορά με βραχυκύκλωμα

Η υψηλή παραγωγικότητα στις συγκολλήσεις MIG επιτυγχάνεται κυρίως όταν η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με σπρέι. Μεγάλο ρόλο στην μεταφορά μετάλλου με σπρέι παίζει η πολικότητα της συγκόλλησης. Η μεγάλη πλειοψηφία των συγκολλήσεων MIG για τα περισσότερα μέταλλα πραγματοποιείται με Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Θετικό (ΣΡΗΘ/DCEP). Στην περίπτωση αυτή (Σχ.2.9α), τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο (σύρμα) προκαλώντας την θέρμανση και την τήξη του. Παράλληλα, μέσα στο τόξο, τα θετικά ιόντα του αερίου οδεύουν προς την συγκόλληση. Κατά την κίνησή τους αυτή, τα ιόντα αερίου προκαλούν την επιτάχυνση των σταγόνων μετάλλου που οδεύουν προς την συγκόλληση, με αποτέλεσμα η συγκόλληση να πραγματοποιείται με μεγάλη διείσδυση. Παράλληλα, τα ιόντα αερίου προκαλούν και τον καθαρισμό της επιφάνειας του μετάλλου βάσης. Στην αντίθετη περίπτωση (Σχ.2.9β), όταν η πολικότητα είναι Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Αρνητικό (ΣΡΗΑ/DCEN), τα ιόντα αερίου οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο. Εκεί παρεμποδίζουν την ροή μετάλλου και τον σχηματισμό σπρέι, καθώς συγκρατούν τις σταγόνες στο

άκρο του σύρματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγάλων σταγόνων, οι οποίες οδεύουν προς την συγκόλληση με μικρή ταχύτητα. Έτσι στην περίπτωση αυτή η διείσδυση είναι μικρή.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι κατά την συγκόλληση MIG χρησιμοποιείται η αντίθετη πολικότητα απ' ό τι στη συγκόλληση TIG. Στην MIG χρησιμοποιείται κυρίως η πολικότητα ΣΡΗΘ ενώ στην TIG χρησιμοποιείται η πολικότητα ΣΡΗΑ.



Σχήμα 2.9 : Επίδραση της πολικότητας στη μεταφορά μετάλλου
(α) ΣΡΗΘ, (β) ΣΡΗΑ

Στην παρούσα μελέτη η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με τον μηχανισμό της μεταφοράς με ψεκασμό (σπρέι) και με Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Θετικό (ΣΡΗΘ/DCSP). Λεπτομέρειες για την συγκόλληση φαίνονται στο πίνακα 2.2

Ηλεκτρική τάση (V)	Ηλεκτρικό ρεύμα (A)	Ταχύτητα συγκόλλησης (mm/s)
30	300	6.8

Πίνακας 2.2 : Λεπτομέρειες συγκόλλησης

2.3.3 ΣΥΡΜΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η επιλογή ενός σύρματος συγκόλλησης για την μέθοδο MIG εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, κυριότεροι των οποίων είναι οι εξής:

- Η επίτευξη παρόμοιας χημικής σύστασης μεταξύ μετάλλου συγκόλλησης και βασικού μετάλλου
- Έλεγχος μεταλλουργικών χαρακτηριστικών της συγκόλλησης (π.χ. μέγεθος κόκκου και μικροδιαφορισμός στο μέταλλο συγκόλλησης)
- Αποξείδωση του μετάλλου συγκόλλησης
- Σταθερότητα ηλεκτρικού τόξου και μεταφοράς μετάλλου

Όπως είπαμε και πιο πάνω, το σύρμα συγκόλλησης παρέχεται με τη μορφή κουλούρας. Ένα ερώτημα που τίθεται συχνά είναι ποιος είναι ο ρυθμός εναπόθεσης για δεδομένη διάμετρο σύρματος και ρεύμα συγκόλλησης. Οι κατασκευαστές συνήθως παρέχουν αυτές τις πληροφορίες με την μορφή διαγραμμάτων. Για την αποξείδωση του μετάλλου συγκόλλησης χρησιμοποιούνται κραματικά στοιχεία, όπως τα Si, Al και Ti, ενώ για την αποθείωση χρησιμοποιείται το Mn. Στο εμπόριο διατίθεται μία μεγάλη ποικιλία συρμάτων συγκόλλησης για την συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων.

Το σύρμα συγκόλλησης που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη μελέτη έχει όνομα ESAB AUTOROD 12.50. Είναι κράμα άνθρακα - μαγνησίου – πυριτίου με όριο διαρροής 440 MPa και με χημική σύσταση :

C	Si	Mn
0.08	0.9	1.5

Πίνακας 2.3 : Χημική σύσταση σύρματος ESAB AUTOROD 12.50

Η σύρμα διατίθεται στις παρακάτω διαμέτρους με τις αντίστοιχες παραμέτρους

Διάμετρος (mm)	Ρεύμα Συγκόλλησης (A)	Τάση Συγκόλλησης (V)
0.6	30-100	15-20
0.8	60-200	18-24
0.9	80-300	18-26
1.2	120-380	18-32
1.4	150-420	22-36
1.6	225-550	28-38

Πίνακας 2.4 : Παράμετροι σύρματος ESAB AUTOROD 12.50

Για την συγκόλληση επιλέχθηκε η διάμετρος των 1.2 mm δεδομένου ότι το ρεύμα είναι 300A και η τάση 30V.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων τήξης με ηλεκτρικό τόξο, τα προς συγκόλληση τεμάχια θερμαίνονται τοπικά, με αποτέλεσμα η θερμοκρασιακή κατανομή τους να μην είναι ομοιόμορφη και να μεταβάλλεται με την πρόοδο της συγκόλλησης. Συνέπεια της ανομοιόμορφης αυτής κατανομής θερμοκρασιών είναι η δημιουργία θερμικών παραμορφώσεων πολύπλοκης κατανομής, τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης όσο και στο βασικό μέταλλο. Το μέγεθος των παραμορφώσεων αυτών είναι τέτοιο που το υλικό διαρρέει πλαστικά στην περιοχή του μετάλλου συγκόλλησης. Έτσι, όταν πλέον τα συγκολλημένα τεμάχια ψυχθούν και αποκτήσουν τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, δεν επανέρχονται σε μηδενική εντατική κατάσταση. Οι τάσεις που παραμένουν καλούνται παραμένουσες τάσεις (residual stresses).

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με το φαινόμενο των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται θέματα σχετικά με τη φύση, παραγωγή, μέτρηση, υπολογισμό και κατανομή των παραμενουσών τάσεων.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι, για τους οποίους είναι σημαντική η γνώση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις. Όλοι σχετίζονται με την επίδραση που έχουν οι παραμένουσες τάσεις στη συμπεριφορά των συγκολλητών κατασκευών υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Για παράδειγμα, η παρουσία των παραμενουσών τάσεων μειώνει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού συγκολλητών κατασκευών. Ακόμα, οι παραμένουσες τάσεις έχουν δυσμενή επίδραση στη δυσθραυστότητα και τη συμπεριφορά σε κόπωση και σε διαβρωτικό περιβάλλον.

3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Παραμένουσες τάσεις σε μεταλλικές κατασκευές μπορούν να δημιουργηθούν για διαφορετικούς λόγους κατά τη διάρκεια της ανέγερσής τους, όπως:

- (α) Κατά τη διάρκεια εξέλασης, χύτευσης κλπ.
- (β) Κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης μεταλλικών τεμαχίων με διαδικασίες κάμψης, τórνευσης, κοπής με ψαλίδι, λείανσης με τρόχιση, κλπ.
- (γ) Κατά τη διάρκεια διαδικασιών ανέγερσης, όπως είναι οι συγκολλήσεις.

Η χρήση θερμικών κατεργασιών κατά τη διάρκεια της ανέγερσης επηρεάζει, επίσης, τις παραμένουσες τάσεις. Έτσι, για παράδειγμα, η βαφή (quenching) δημιουργεί παραμένουσες τάσεις ενώ οι θερμικές κατεργασίες ανακούφισης τάσεων (stress relieving) τις μειώνει.

Με βάση το μηχανισμό δημιουργίας τους, οι παραμένουσες τάσεις διακρίνονται:

- (α) Σε εκείνες που οφείλονται σε κακή συναρμογή (structural mismatching).
- (β) Σε εκείνες που οφείλονται σε ανομοιόμορφες κατανομές μη ελαστικών παραμορφώσεων, π.χ. πλαστικών. Αυτή η κατηγορία αφορά την παρούσα μελέτη και αναλύεται παρακάτω.

3.2.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Όταν ένα υλικό θερμαίνεται ομοιόμορφα, τότε διαστέλλεται ομοιόμορφα και έτσι δεν δημιουργούνται τάσεις. Όταν, όμως, το υλικό θερμαίνεται με ανομοιόμορφο τρόπο, τότε δημιουργούνται θερμικές τάσεις. Παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται, ακόμα, όταν υπάρχουν μη ελαστικές παραμορφώσεις ανομοιόμορφα κατανεμημένες στο υλικό.

Στα παρακάτω γίνεται μια σύντομη έκθεση των βασικών σχέσεων που ισχύουν στην περίπτωση διδιάστατης (επίπεδης) εντατικής κατάστασης ($\sigma_2=0$):

- (α) Οι παραμορφώσεις θεωρείται ότι συνίστανται από ελαστικά και μη ελαστικά μέρη:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_x' + \varepsilon_x'' \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_y' + \varepsilon_y'' \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}' + \gamma_{xy}'' \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ = συνιστώσες της ολικής παραμόρφωσης

$\varepsilon_x', \varepsilon_y', \gamma_{xy}'$ = συνιστώσες της ελαστικής παραμόρφωσης

$\varepsilon_x'', \varepsilon_y'', \gamma_{xy}''$ = συνιστώσες της μη ελαστικής παραμόρφωσης

Η μη ελαστική παραμόρφωση μπορεί να είναι θερμική, πλαστική, κλπ. Για παράδειγμα, στην περίπτωση θερμικής παραμόρφωσης έχουμε:

$$\varepsilon_x'' = \varepsilon_y'' = a \cdot \Delta\theta, \quad \gamma_{xy}'' = 0 \quad (3.2)$$

όπου a είναι ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής και $\Delta\theta$ η θερμοκρασιακή διαφορά.

(β) Οι σχέσεις τάσης-ελαστικής παραμόρφωσης δίνονται από το γνωστό νόμο του Hooke:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x' &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\ \varepsilon_y' &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\ \gamma_{xy}' &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, G το μέτρο διάτμησης και ν ο λόγος του Poisson.

(γ) Οι τάσεις πρέπει να πληρούν τις εξισώσεις ισορροπίας:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

όπου υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν μαζικές δυνάμεις (body forces).

(δ) Οι ολικές παραμορφώσεις πρέπει να πληρούν τη συνθήκη συμβιβαστού:

$$\left(\frac{\partial^2\varepsilon_x'}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_y'}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\gamma_{xy}'}{\partial_x\partial_y}\right) + \left(\frac{\partial^2\varepsilon_x''}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_y''}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\gamma_{xy}''}{\partial_x\partial_y}\right) = 0 \quad (3.5)$$

Οι πιο πάνω εξισώσεις δείχνουν ότι παραμένουσες τάσεις είναι δυνατό να υπάρχουν σε ένα υλικό, όταν το R , που καλείται «παράμετρος μη συμβιβαστού» (incompatibility), και που δίνεται από τη σχέση

$$R = -\left(\frac{\partial^2\varepsilon_x''}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_y''}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\gamma_{xy}''}{\partial_x\partial_y}\right) \quad (3.6)$$

παίρνει μη μηδενική τιμή.

Έτσι, για παράδειγμα, όταν η κατανομή των μη ελαστικών παραμορφώσεων δίνεται από τις γραμμικές σχέσεις

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^* &= a + bx + dv \\ \varepsilon_y^* &= e + fx + qv \\ \gamma_{xy}^* &= k + lx + mv\end{aligned}\quad (3.7)$$

τότε $R=0$, και επομένως δεν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις στο υλικό.

Από μαθηματικές αναλύσεις που έχουν γίνει με βάση τις παραπάνω σχέσεις, έχουν προκύψει τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(1) Οι παραμένουσες τάσεις σε ένα σώμα δεν μπορούν να υπολογιστούν με μέτρηση των διαφορών τάσεων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια επιβολής εξωτερικών φορτίων στο σώμα.

(2) Οι παραμένουσες τάσεις σ_x , σ_y και τ_{xy} μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις (3.3), εάν είναι γνωστή η κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων ε_x^* , ε_y^* και γ_{xy}^* . Οι μη ελαστικές, όμως, παραμορφώσεις ε_x^{**} , ε_y^{**} και γ_{xy}^{**} που προκάλεσαν τις παραμένουσες τάσεις, δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν αν δεν είναι γνωστή όλη η διαδικασία δημιουργίας των παραμενουσών τάσεων.

3.2.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Δεδομένου ότι οι παραμένουσες τάσεις υπάρχουν και χωρίς την επιβολή εξωτερικών φορτίσεων, η συνισταμένη δύναμη και η συνισταμένη ροπή των τάσεων αυτών πρέπει να είναι μηδέν για κάθε τομή:

$$\int \sigma \cdot dA = 0 \quad \text{και} \quad \int dM = 0 \quad (3.8)$$

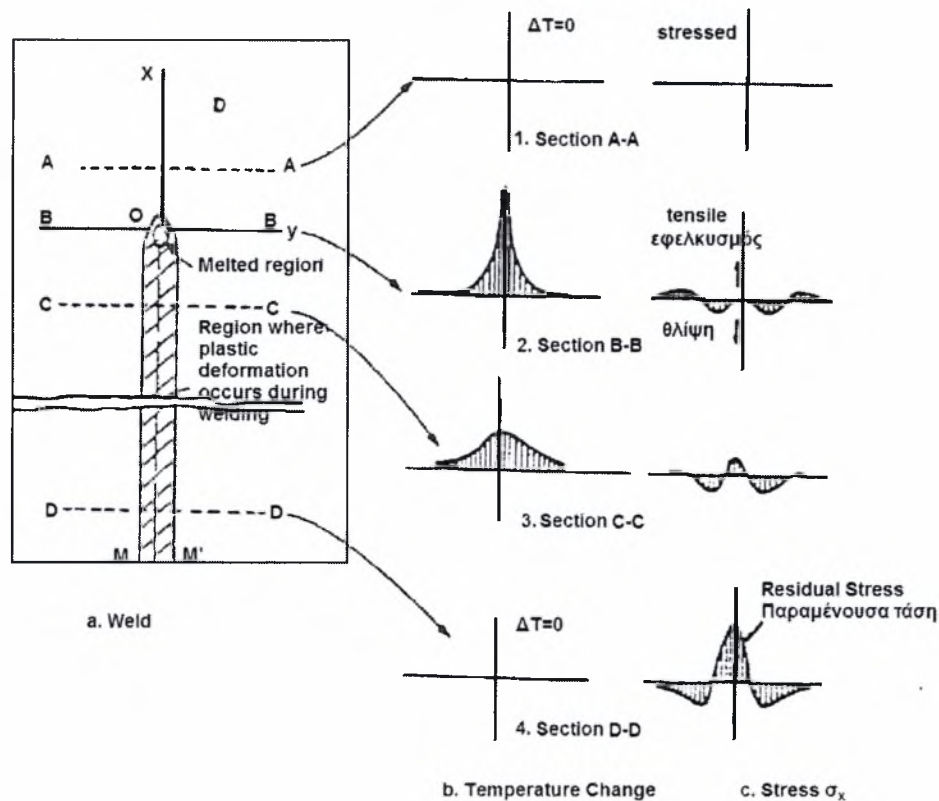
Με βάση τις συνθήκες αυτές, είναι δυνατός ο έλεγχος της ορθότητας αποτελεσμάτων κατανομών παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται είτε από πειραματικές μετρήσεις είτε από μαθηματικούς υπολογισμούς.

3.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Το Σχήμα 3.1 παριστάνει σχηματικά τις μεταβολές θερμοκρασιών και τάσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων. Η συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται στην απόθεση μιας στρώσης συγκόλλησης στην επιφάνεια ενός ελάσματος (bead-on-plate weld) κατά μήκος του άξονα x . Το τόξο συγκόλλησης κινείται με ταχύτητα u και, τη χρονική στιγμή που παρίσταται στο σχήμα, καταλαμβάνει τη θέση 0 .

Το Σχήμα 3.1β δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του ελάσματος κατά μήκος διαφόρων εγκάρσιων τομών. Στην τομή A-A, που βρίσκεται αρκετά μπροστά από το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή λόγω συγκόλλησης είναι πρακτικά μηδέν. Στην τομή B-B, που διασχίζει το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή είναι απότομη και η κατανομή της ανομοιόμορφη. Στην τομή C-C, που βρίσκεται σε κάποια απόσταση πίσω από το τόξο, η θερμοκρασιακή κατανομή γίνεται λιγότερο ανομοιόμορφη. Τέλος, στην τομή D-D, που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση πίσω από το τόξο, η θερμοκρασιακή μεταβολή της συγκόλλησης έχει πάλι εκμηδενιστεί.

Το Σχήμα 3.1γ δείχνει την κατανομή των τάσεων σ_x στις ίδιες εγκάρσιες τομές. Σημειώνεται, ότι στην πραγματικότητα αναπτύσσονται και τάσεις σ_y και τ_{xy} , που, όμως, δεν εμφανίζονται στο σχήμα.



Σχήμα 3.1 : Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων

Στην τομή A-A, οι θερμικές τάσεις λόγω της συγκόλλησης είναι αμελητέες. Η κατανομή των τάσεων στην τομή B-B φαίνεται στο Σχήμα 3.1γ-2. Επειδή το τηγμένο μέταλλο δε μπορεί να συγκρατήσει φορτία, η τάση στην περιοχή αυτή είναι σχεδόν μηδενική. Σε περιοχές που γειτονεύουν με το τηγμένο μέταλλο οι τάσεις είναι θλιπτικές, επειδή η διαστολή του μετάλλου εκεί εμποδίζεται από το υπόλοιπο υλικό που έχει χαμηλότερη θερμοκρασία. Επειδή στις περιοχές αυτές η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, και επομένως η τάση διαρροής του υλικού πολύ χαμηλή, οι αναπτυσσόμενες θερμικές τάσεις έχουν μέγιστη τιμή ίση προς το όριο διαρροής στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Το μέγεθος των θλιπτικών τάσεων φτάνει ένα μέγιστο όσο η απόσταση από τη συγκόλληση αυξάνεται, δηλαδή όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Καθώς απομακρυνόμαστε, όμως, από τη συγκόλληση, οι τάσεις μετατρέπονται σε εφελκυστικές για λόγους ισορροπίας.

Οι τάσεις στην τομή C-C έχουν την κατανομή που δείχνει το Σχήμα 3.1γ-3. Επειδή το μέταλλο συγκόλλησης και η περιοχή του βασικού μετάλλου που γειτονεύει με αυτό έχουν αρχίσει να ψύχονται, τείνουν να συσταλούν. Η συστολή, όμως, αυτή εμποδίζε-

ται από τη μάζα του υπόλοιπου υλικού που βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της θέρμανσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων. Καθώς η απόσταση από τη συγκόλληση αυξάνεται, οι τάσεις μετατρέπονται σε θλιπτικές και, κατόπιν, πάλι σε εφελκυστικές.

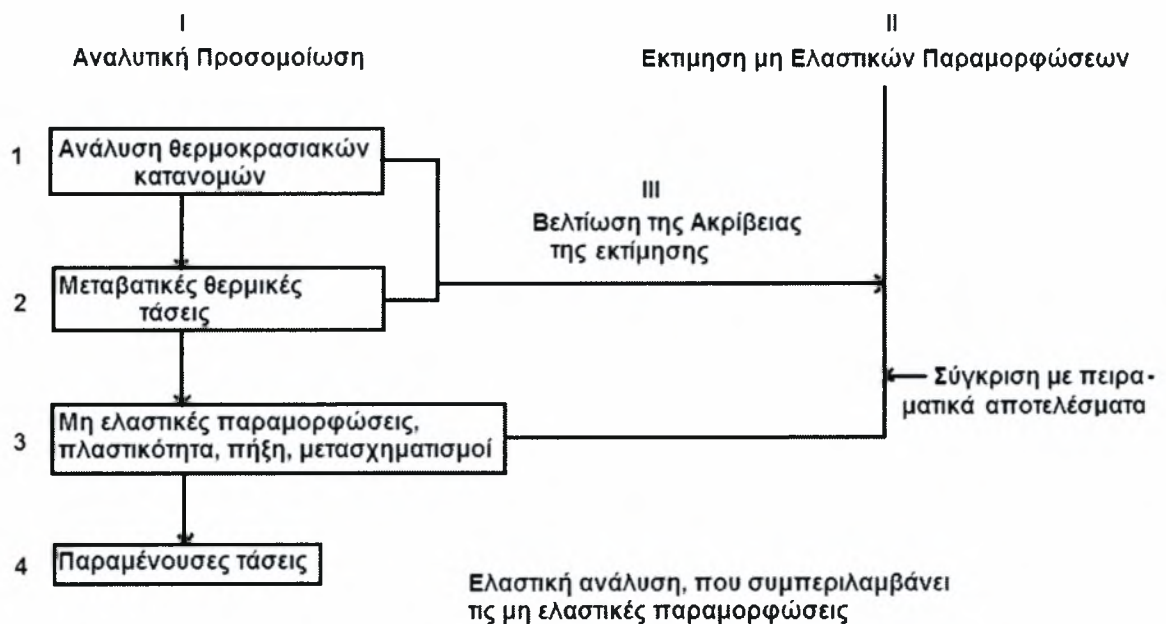
Το Σχήμα 3.1γ-4 δείχνει την κατανομή των τάσεων στην τομή D-D. Υψηλές εφελκυστικές τάσεις παρατηρούνται στην περιοχή γύρω από τη συγκόλληση, ενώ θλιπτικές τάσεις παρατηρούνται σε απομακρυσμένες περιοχές. Η κατανομή αυτή είναι η συνηθισμένη κατανομή παραμενουσών τάσεων που δημιουργείται σε συγκολλήσεις.

Η διαγραμμισμένη ζώνη MM' του Σχήματος 3.1α δείχνει την περιοχή όπου αναπτύχθηκαν πλαστικές παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

3.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Το Σχήμα 3.2 δείχνει διάφορους τρόπους που μπορούν να εφαρμοστούν για τον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές. Η πρώτη μέθοδος, καλούμενη «αναλυτική προσομοίωση», εξετάζει τι συμβαίνει πραγματικά κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.



Σχήμα 3.2 Μεθοδολογίες για την ανάλυση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις. Αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας (προσδιορισμός της κατανομής θερμοκρασιών)

Βήμα 2: Προσδιορισμός των μεταβατικών θερμικών τάσεων.

Βήμα 3: Προσδιορισμός των μη ελαστικών (μη συμβιβαστών) παραμορφώσεων, που δημιουργούνται λόγω πλαστικής διαρροής, στερεοποίησης (πήξης) του μετάλλου συγκόλλησης και μετασχηματισμών φάσης.

Βήμα 4: Υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων.

Από τα παραπάνω, το τρίτο βήμα είναι το σημαντικότερο. Εάν οι μεταβατικές θερμικές τάσεις είναι τελείως ελαστικές και εάν δεν δημιουργούνται μη συμβιβαστές (incompatible) παραμορφώσεις, τότε δεν θα υπάρχουν παραμένουσες τάσεις. Ο προσδιορισμός, όμως, των μη συμβιβαστών παραμορφώσεων είναι αρκετά πολύπλοκος. Θεωρώντας τον, όμως, σαν δυνατό (είτε με αναλυτικό είτε με άλλο τρόπο), το πρόβλημα του προσδιορισμού των παραμενουσών τάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως πρόβλημα θερμικής ελαστικότητας που συμπεριλαμβάνει και μη συμβιβαστές παραμορφώσεις.

Η αναλυτική προσομοίωση αποτελεί προφανώς την πιο ορθόδοξη προσέγγιση του προβλήματος. Μερικές φορές, όμως, η πολυπλοκότητα του προβλήματος, και ιδιαίτερα το τρίτο βήμα υπολογισμών, καθιστά μη πρακτική την εφαρμογή της. Στις περιπτώσεις αυτές είναι δυνατή η χρησιμοποίηση μιας άλλης μεθοδολογίας που παρακάμπτει τα δύο πρώτα βήματα και έτσι αποφεύγει τη διενέργεια πολύπλοκων υπολογισμών της θεωρίας της πλαστικότητας. Σε αντιδιαστολή με την πρώτη μέθοδο, η δεύτερη μπορεί να προσδιορίσει τις παραμένουσες τάσεις ακόμα και σε πολύπλοκες συγκολλητές κατασκευές. Έχει, όμως, το βασικό μειονέκτημα της δυσκολίας ακριβούς εκτίμησης της κατανομής των μη συμβιβαστών παραμορφώσεων.

Μια τρίτη μεθοδολογία έχει προταθεί, που συνδυάζει τις προηγούμενες. Κατ' αυτήν γίνεται χρήση αναλυτικής προσομοίωσης με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης που έγινε για την κατανομή των μη συμβιβαστών παραμορφώσεων.

Από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω, εκείνη που χρησιμοποιείται περισσότερο σήμερα και που δίνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα είναι η αναλυτική προσομοίωση, αυτή που ακολουθείται και σε αυτή την μελέτη.

3.3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η απλούστερη εφαρμογή της αναλυτικής προσομοίωσης για τον προσδιορισμό παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις είναι η καλούμενη μονοδιάστατη ανάλυση.

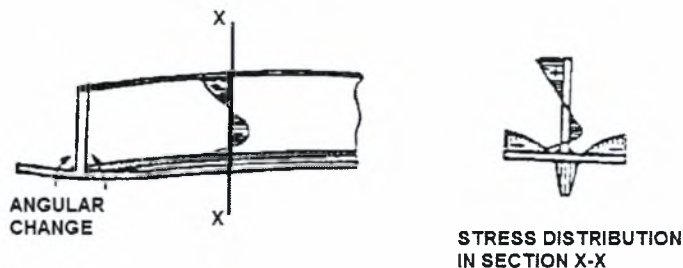
Η μονοδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιεί αναλυτικές λύσεις και μπορεί εύκολα να κωδικοποιηθεί σε πρόγραμμα Η/Υ. Μπορεί να λάβει υπόψη της τη μεταβολή των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με τη θερμοκρασία, την επίδραση περισσοτέρων της μια στρώσης συγκόλλησης (multipass effect).

Επειδή όμως η μονοδιάστατη ανάλυση δεν μπορεί να καλύψει με ακρίβεια όλες τις περιπτώσεις συγκολλήσεων, έχουν αναπτυχθεί και αριθμητικές μέθοδοι αναλυτικής προσομοίωσης που στηρίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως είναι και το ABAQUS. Λόγω του μεγάλου κόστους εφαρμογής των μεθόδων αυτών, οι περισσότερες περιορίζονται στην επίλυση διδιάστατων προβλημάτων, κάνοντας διάφορες παραδοχές.

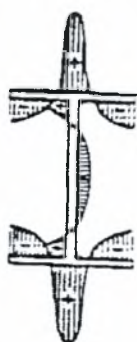
3.4 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Σε περιπτώσεις που η απαιτούμενη ροπή αντίστασης διατομής δεν μπορεί να καλυφθεί με εξελασμένες διατομές του εμπορίου. Παρουσιάζεται η ανάγκη κατασκευής σύνθετων διατομών με συγκόλληση ελασμάτων. Το Σχήμα 3.3 δείχνει τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε τέτοιες σύνθετες διατομές (built-up shapes). Το Σχήμα 3.3α παρουσιάζει τις παραμένουσες τάσεις και την παραμόρφωση που αναπτύσσονται σε συγκολλητές διατομές σχήματος T. Εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις παράλληλες προς τον άξονα συγκόλλησης και υψηλής έντασης δημιουργούνται σε περιοχές κοντά στην συγκόλληση σε τομές μακριά από τα άκρα της δοκού. Το δεξιό Σχήμα του 3.3α δείχνει την κατανομή των παραμενουσών τάσεων, των παράλληλων προς την συγκόλληση, στην τομή X-X. Οι τάσεις στο πέλμα (flange) της δοκού είναι εφελκυστικές κοντά στη συγκόλληση και θλιπτικές μακριά από αυτή. Οι εφελκυστικές τάσεις κοντά στο πάνω άκρο του κορμού (web) οφείλονται στη διαμήκη καμπτική παραμόρφωση, που δημιουργείται λόγω της διαμήκου συστολής της συγκόλλησης.

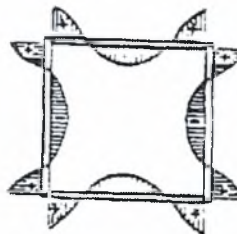
Τα Σχήματα 3.3β και γ δείχνουν τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε διατομή Η (διπλού Τ) και σε κοίλη δοκό αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις οι παραμένουσες τάσεις οι παράλληλες προς τον άξονα της συγκόλλησης είναι εφελκυστικές στις περιοχές των συγκολλήσεων και θλιπτικές μακριά από αυτές.



α. Παραμένουσες τάσεις και παραμόρφωση σε συγκόλληση διατομής Τ



β. Διατομή Η



γ. Κοίλη δοκός

Σχήμα 3.3 : Τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές διατομές

3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

3.5.1 ΥΛΙΚΟ

Το μέγεθος και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές από διάφορα υλικά έχουν μελετηθεί πειραματικά και αναλυτικά από πολλούς ερευνητές σε όλο τον κόσμο, που κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι βασικές παράμετροι που παίζουν ρόλο είναι :

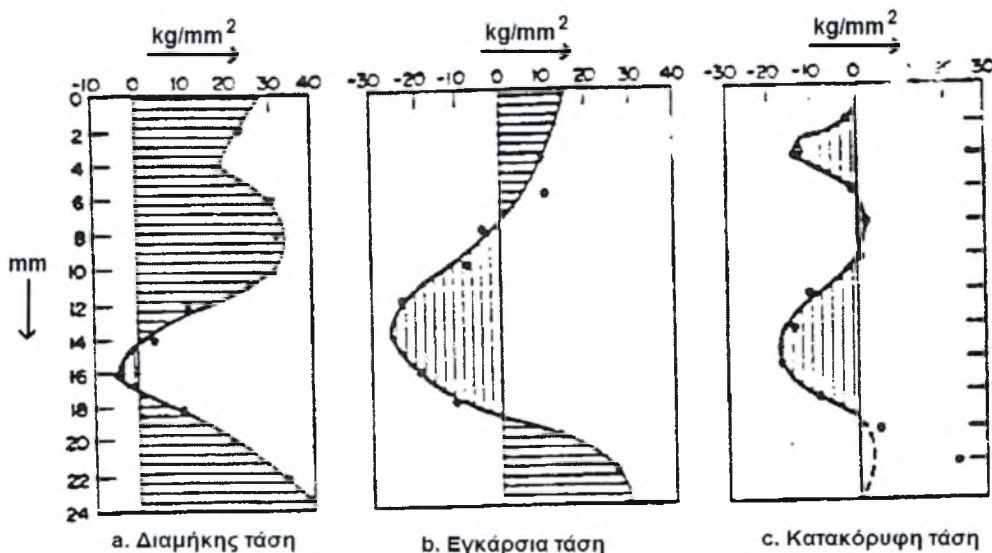
- Η θερμοκρασιακή κατανομή.
- Τα χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής του υλικού.
- Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες.

Διατυπώθηκε, ακόμα ότι στα περισσότερα υλικά, συμπεριλαμβανομένου του κοινού χάλυβα και των κραμάτων αλουμινίου, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμένουσας τάσης είναι ίση με το διαρροής του υλικού

Στην περίπτωση όμως των χαλύβων αντοχής δεν υπάρχει σύμπτωση απόψεων ως προς το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων. Ενώ στους περισσότερους αναλυτικούς υπολογισμούς οι μέγιστες τάσεις φαίνεται να πλησιάζουν το όριο διαρροής, πληθώρα πειραματικών μετρήσεων δείχνουν ότι οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες του ορίου διαρροής.

3.5.2 ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Στην περίπτωση συγκόλλησης ελασμάτων πάχους μεγαλύτερου των 25mm δεν είναι δυνατό να αγνοηθούν ούτε η ύπαρξη της παραμένουσας τάσης κατά την διεύθυνση του πάχους, σ_z ούτε η κατανομή των άλλων τάσεων σ_x και σ_y κατά το πάχος.



Σημια3.4 : Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους

Το σχήμα δείχνει την κατανομή κατά την διεύθυνση του πάχους των παραμενουσών τάσεων στο μέταλλο συγκόλλησης σε ραφή κατά συμβολή δοκιμίων από μαλακό χάλυβα πάχους 25 mm, και διαστάσεων 500 mm x 500 mm. Η συγκόλληση έγινε ταυτόχρονα και από τις δύο πλευρές για να αποφευχθούν παραμορφώσεις.

Όπως φαίνονται στα σχήματα α β, οι διαμήκεις και οι εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές κοντά στις δυο επιφάνειες του ελάσματος. Οι θλιπτικές τά-

σεις στο εσωτερικό της συγκόλλησης δημιουργήθηκαν κατά πάσα πιθανότητα κατά τη διάρκεια των στρώσεων στην πάνω και κάτω επιφάνεια.

Το σχήμα γ δείχνει την κατανομή των κατακόρυφων τάσεων σ_z . Η σ_z είναι, όπως πρέπει, μηδέν στις δύο επιφάνειες. Στο εσωτερικό της συγκόλλησης μετρήθηκαν θλιπτικές τάσεις.

3.5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Γενικά, πιστεύεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων για τις διάφορες μεθόδους συγκόλλησης (με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, GMAW, GTAW, βυθισμένο τόξο κ.τ.λ.)

3.5.4 ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Για την συγκόλληση ραφών κατά συμβολή μεγάλου μήκους, έχουν προταθεί διάφορες ακολουθίες συγκόλλησης (welding sequence) με σκοπό τη μείωση των παραμενουσών τάσεων και της παραμόρφωσης.

Διάφοροι ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης στις παραμένουσες τάσεις. Σε μια από αυτές μελετήθηκαν συγκολλήσεις τύπου εγκοπής και κυκλικής διατομής και τα αποτελέσματα μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

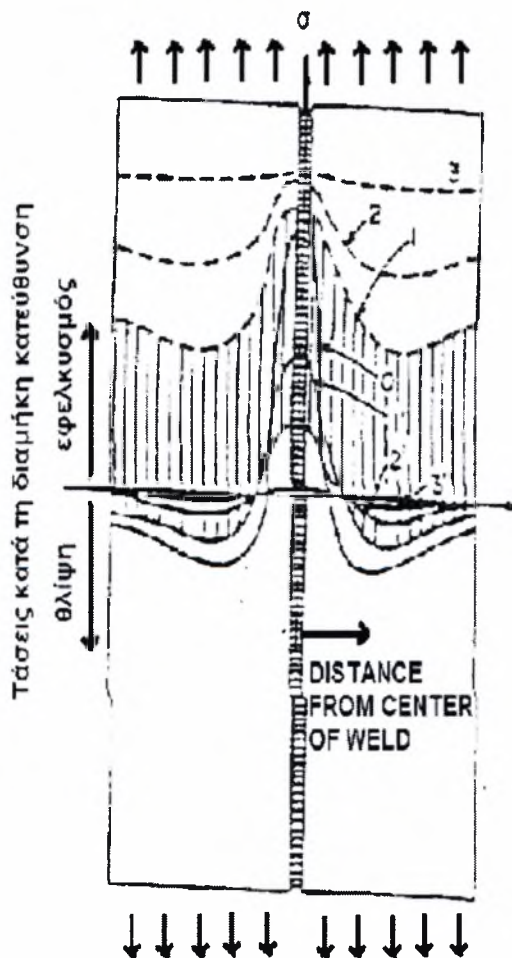
(α) Η επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης στις παραμένουσες τάσεις κατά μήκος της συγκόλλησης είναι αμελητέα. Σε όλες τις περιπτώσεις μετρήθηκαν εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις υψηλής έντασης στο μέταλλο συγκόλλησης.

(β) Αλλαγή της ακολουθίας συγκόλλησης επέφερε σημαντικές μεταβολές στην εγκάρσια συστολή, στη συνολική ενέργεια παραμόρφωσης που παράγεται σε ραφές υπό περιορισμό και στις τάσεις αντίδρασης στο εσωτερικό έλασμα στην περίπτωση συγκολλήσεων κυκλικής μορφής. Γενικά, η ακολουθία κατά τομείς προκαλεί μικρότερες τιμές στις παραπάνω αναφερόμενες ποσότητες.

3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκαν η φύση, το μέγεθος και η κατανομή των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές. Αναφέρθηκαν ακόμα διάφοροι πειραματικοί και αναλυτικοί μέθοδοι προσδιορισμού τους. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης της επίδρασης των παραμενουσών τάσεων στη μηχανική συμπεριφορά συγκολλητών κατασκευών.

Γενικά πιστεύεται ότι, με την πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων, οι παραμένουσες τάσεις τείνουν να ανακατανομηθούν, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αιχμών στην κατανομή τους. Το Σχήμα 3.5 δείχνει πως αυτό είναι δυνατό στην περίπτωση διαμήκους συγκόλλησης κατά συμβολή, που υπόκειται σε εξωτερική ομοιόμορφη εφελκυστική εντατική κατάσταση. Η καμπύλη 0 δείχνει την κατανομή των παραμενουσών τάσεων μετά τη συγκόλληση.



Επεξήγηση Διαφόρων Καμπυλών

0: Παραμένουσες τάσεις μετά τη συγκόλληση

1: Κατανομή τάσεων για $\sigma = \sigma_1$

2: Κατανομή τάσεων για $\sigma = \sigma_2 > \sigma_1$

3: Κατανομή τάσεων για $\sigma = \sigma_3 > \sigma_2$

1': Κατανομή παραμενουσών τάσεων μετά την εφαρμογή της $\sigma = \sigma_1$

και την απομάκρυνσή της

2': Όπως η 1' αλλά για $\sigma = \sigma_2$

3': Όπως η 1' αλλά για $\sigma = \sigma_3$

Σχήμα 3.5 Σχηματικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων.

Μετά την εφαρμογή της ομοιόμορφης εφελκυστικής τάσης $\sigma = \sigma_1$, η κατανομή των τάσεων θα είναι όπως δείχνει η καμπύλη 1. Οι τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης φτάνουν το όριο διαρροής, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση τάσεων παρατηρείται σε περιοχές μακριά από τη συγκόλληση. Η καμπύλη 2 δείχνει την κατανομή τάσεων όταν το εξωτερικό φορτίο αυξηθεί σε σ_2 . Καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη τάση, η κατανομή των τάσεων γίνεται πιο ομαλή, δηλαδή η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στην ολική κατανομή τάσεων μειώνεται.

Όταν η εξωτερική τάση φτάσει κάποια τιμή, παρατηρείται διαρροή ολόκληρης της διατομής. Η κατανομή τάσεων στην περιοχή αυτή παριστάνεται από την καμπύλη 3. Από το σημείο αυτό και μετά, η επίδραση των παραμενουσών τάσεων εξαφανίζεται.

Η επόμενη ερώτηση αναφέρεται στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων μετά την άρση της εφαρμογής των εξωτερικών εφελκυστικών φορτίων. Οι καμπύλες 1', 2' και 3' δείχνουν τις κατανομές αυτές για εξωτερικές τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 αντίστοιχα.

Σε σύγκριση με την αρχική κατανομή παραμενουσών τάσεων (καμπύλη 0), οι κατανομές μετά την εφαρμογή και απομάκρυνση εξωτερικών τάσεων είναι πιο ομαλές. Καθώς αυξάνεται η τιμή της εξωτερικής τάσης, τόσο πιο ομαλή (ομοιόμορφη) γίνεται η κατανομή παραμενουσών τάσεων.

Από τα παραπάνω, είναι δυνατό να αναφερθούν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμενουσών τάσεων:

- (1) Οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν σημαντικά μόνο τα φαινόμενα εκείνα που συμβαίνουν υπό την επίδραση χαμηλών εξωτερικών τάσεων, όπως την ψαθυρή θραύση (brittle fracture) και τη ρηγμάτωση υπό τάση σε διαβρωτικό περιβάλλον (stress corrosion cracking).
- (2) Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων μειώνεται με αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων.
- (3) Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων στη συμπεριφορά συγκολλητών κατασκευών είναι αμελητέα όταν οι εξωτερικά επιβαλλόμενες τάσεις προκαλούν γενική πλαστική διαρροή του υλικού.
- (4) Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων μειώνεται μετά από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.

Τέλος, σημειώνεται, ότι η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων μειώνει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού συγκολλητών κατασκευών, κάτι που οφείλεται στην παρουσία θλιπτικών τάσεων σε μεγάλο τμήμα της κατανομής των παραμενουσών τάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Γίνεται αντιληπτό ότι η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων (μικροσκληρότητα) στην περιοχή της λίμνης συγκόλλησης και στη θερμοεπηραζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) συνδέεται άμεσα με τις μεταβολές στη θερμοκρασία που υφίσταται κάθε σημείο του υλικού. Όπως προαναφέρθηκε η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που προσδίδει το ηλεκτρόδιο απορροφάται από ένα επιφανειακό στρώμα του υλικού και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που μεταδίδεται με αγωγή στο εσωτερικό του κράματος.

Ο προσδιορισμός του θερμοκρασιακού πεδίου $T(x,y,z,t)$ μπορεί να γίνει υπολογιστικά, είτε με πειραματικές μετρήσεις. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.3, καθώς και το λεπτό πάχος των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, καθιστούν το πείραμα μέτρησης με θερμοστοιχεία ή οπτικές μεθόδους (π.χ. CCD camera) εξαιρετικά δύσκολο τόσο από άποψη κόστους όσο και από άποψη χρόνου. Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία απαντώνται σχετικά λίγες αναφορές στο θέμα αυτό.

Ο υπολογισμός του πεδίου των θερμοκρασιών, είναι ιδιαίτερα χρήσιμος αφού δίδεται η δυνατότητα ποσοτικής ανάλυσης των μεταβολών της μικροδομής τις οποίες θα υποστεί το υπό συγκόλληση υλικό καθώς και του προσδιορισμού της έκτασης που θα λάβουν αυτές οι μεταβολές μέσα στο υλικό (π.χ. διαστάσεις λίμνης συγκόλλησης, διαστάσεις θερμοεπηραζόμενης ζώνης). Επιπρόσθετα με την γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου καθίσταται εφικτός ο βέλτιστος σχεδιασμός και η επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, (ισχύς δέσμης, διάμετρος δέσμης, ταχύτητα συγκόλλησης κ.τ.λ.) ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά από την κατεργασία αποτελέσματα.

Ο θερμικός κύκλος που αναπτύσσεται σε κάθε σημείο της ΘΕΖ, χαρακτηρίζεται από την μέγιστη θερμοκρασία T_{max} , το ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας, το ρυθμό ψύξης καθώς και την χρονική διάρκεια. Οι μεταβλητές αυτές είναι συνάρτηση της θέσης που ευρίσκεται το σημείο σε σχέση με τη δέσμη του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια η θερμοκρασία είναι συνάρτηση των συντεταγμένων του σημείου στο χώρο (x,y,z) και του χρόνου (t) , δηλαδή υπάρχει μια σχέση η της μορφής :

$$T = f(x, y, z, t) \quad (4.1)$$

Ο προσδιορισμός της παραπάνω σχέσης επιβάλλει την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το μεταβατικό πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε ισότροπο και ομοιογενές στερεό υλικό, κινούμενο με ορισμένη ταχύτητα ως προς τη θερμική πηγή (αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο) και η οποία δίδεται από την παρακάτω :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (4.2)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, k η θερμική αγωγιμότητα σε $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, ρ η πυκνότητα του υλικού σε kg/m^3 , c_p η ειδική θερμότητα σε $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ και \dot{Q} ο ρυθμός παραγωγής εσωτερικής ενέργειας στη μονάδα του όγκου σε W/m^3 .

Στην περιγραφή του προβλήματος μετάδοσης θερμότητας δεν έχει συμπεριληφθεί η μετάδοση λόγω συναγωγής. Ο λόγος είναι ότι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στη ροή του υγρού μετάλλου στη λίμνη συγκόλλησης όπου υπερισχύει η φυσική συναγωγή σε μικρούς αριθμούς Reynolds, ο όρος της μετάδοσης της θερμότητας λόγω συναγωγής είναι αμελητέος. Η προσπάθεια εστιάστηκε στον υπολογισμό των θερμικών κύκλων στη ΘΕΖ, θεωρώντας το πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας ως ένα πρόβλημα μετάδοσης με αγωγή.

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας και συναγωγής από την επιφάνεια του υλικού και περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις :

Απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής από την επιφάνεια του ελάσματος:

$$-Q_c^s = h(T - T_0) \quad (4.3)$$

όπου: h συντελεστής συναγωγής (ή συντελεστής μεταφοράς θερμότητας) και T_0 η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Απώλειες θερμότητας Q_r^s λόγω ακτινοβολίας από την επιφάνεια του ελάσματος:

$$-Q_r^s = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (4.4)$$

όπου ϵ είναι ο αδιάστατος συντελεστής εκπομπής και σ η σταθερά Stefan-Boltzman για ακτινοβολία ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Η θερμότητα η οποία καταναλώνεται για την τήξη του υλικού που βρίσκεται μέσα στη λίμνη συγκόλλησης, είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (L). Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφοροι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Ο συχνότερα αναφερόμενος είναι αυτός που εισάγει στο πρόβλημα τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης μέσω του ορισμού της ισοδύναμης ειδικής θερμότητας.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.1 είναι φανερό ότι για ένα υλικό που ευρίσκεται σε μια θερμοκρασία T_r η λανθάνουσα θερμότητα τήξης L αντιστοιχεί σε ισόθερμη μεταβολή στην ενθαλπία οπότε μπορεί να γραφεί η ακόλουθη σχέση :

$$H(T) = \int_{T_r}^T c_s(T) dT, \quad (T < T_s) \quad (4.5)$$

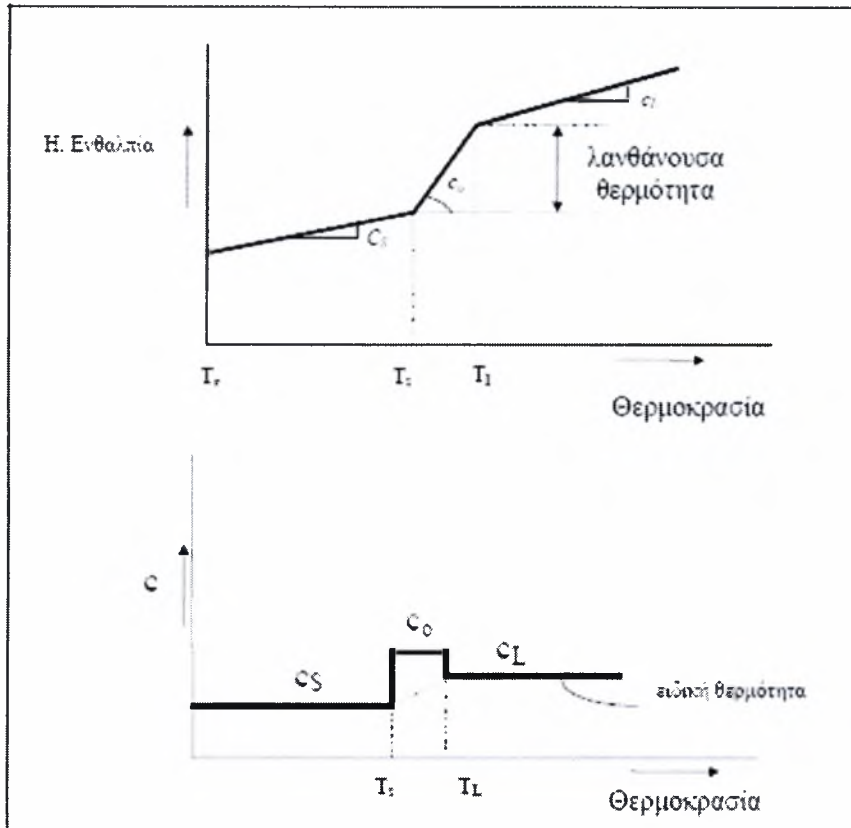
$$H(T) = \int_{T_r}^{T_s} c_s(T) dT + \int_{T_s}^T c_o(T) dT \quad (T_s < T < T_L) \quad (4.6)$$

όπου $H(T)$ είναι η ενθαλπία, c_s η ειδική θερμότητα του στερεού και το c_o ορίζεται ως:

$$c_o = \frac{L}{T_L - T_s} \quad (4.7)$$

όπου T_s και T_L οι θερμοκρασίες solidus και liquidus αντίστοιχα. Η ισοδύναμη ειδική θερμότητα ορίζεται ως:

$$c_{eff}(T) = c_s(T) + \frac{L}{T_L - T_s} \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.1: Ειδική θερμότητα και λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις είναι έντονα μη γραμμικό τόσο εξαιτίας της ύπαρξης λανθάνουσας θερμότητας τήξης, όσο και εξαιτίας της μεταβολής των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικού από τη θερμοκρασία.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας περιλαμβάνουν αναλυτικές λύσεις, αριθμητικές λύσεις καθώς και ημιποσοτικά μοντέλα.

Οι αναλυτικές λύσεις έχουν το πλεονέκτημα ότι καταλήγουν σε σχετικά απλές και εύκολες στη χρήση τους εξισώσεις οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα της ευκολότερης κατανόησης της φυσικής του προβλήματος και την περιγραφή του θερμοκρασιακού κύκλου. Παρόλο που τα αναλυτικά μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία εμπεριέχουν σοβαρές απλουστεύσεις (π.χ. αγνοείται η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, και οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών θεωρούνται σταθερές ή στην καλύτερη περίπτωση ως έχουσες γραμμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία) εντούτοις πολλοί ερευνητές

τα χρησιμοποιούν προκειμένου να αποκτήσουν μια πρώτη ποιοτική προσέγγιση του θερμικού κύκλου της συγκόλλησης.

Ο Rosenthal έχει δημοσιεύσει μια από τις πρώτες αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης για κινούμενη σημειακή πηγή πάνω στην επιφάνεια άπειρης πλάκας, αγνοώντας τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, και θεωρώντας σταθερές τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού. Η ακρίβεια της λύσης δεν είναι ικανοποιητική για περιοχές οι οποίες ευρίσκονται κοντά στο κέντρο της δέσμης. Ο Rosenthal επίσης έδωσε τη λύση για γραμμική πηγή η οποία εκτείνεται κατά το πάχος του υλικού με τον άξονά της κάθετο στην πάνω και κάτω επιφάνεια του ελάσματος. Στα παραπάνω πλαίσια και άλλοι ερευνητές παρουσίασαν αναλυτικές λύσεις με τις οποίες είναι δυνατόν να προβλεφτούν τα όρια της ζώνης τήξης καθώς και το θερμοκρασιακό πεδίο σε συγκεκριμένα σημεία του υλικού.

Οι παραπάνω απλές αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή αγνοούν τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης και χρησιμοποιούν σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες. Πολλοί λίγες αναλυτικές λύσεις έχουν δημοσιευτεί οι οποίες να λαμβάνουν υπόψη τους τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

Οι αριθμητικές λύσεις με πεπερασμένες διαφορές και πεπερασμένα στοιχεία, συνεπικουρούμενες από την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια έχουν βρει εκτεταμένη εφαρμογή σε προβλήματα επίλυσης του θερμοκρασιακού πεδίου των συγκολλήσεων με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι λύσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια έχουν επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές μεθόδους που προαναφέρθηκαν και λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο την ακριβή μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών από τη θερμοκρασία όσο και την επίδραση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης.

Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής διατριβής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω έναντι των αναλυτικών λύσεων. Χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο ABAQUS.

Στην ανάλυση που έγινε ελήφθη υπόψη η ακριβής εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων από τη θερμοκρασία. Επιπρόσθετα ελήφθη υπόψη η λανθάνουσα θερμότητα τήξης με την εισαγωγή της ισοδύναμης ειδικής θερμότητας όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του Κεφαλαίου.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια κατά το δυνατόν πληρέστερη ανάλυση των συγκολλησεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία τριδιάστατου μοντέλου (3-D).

Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο αυτό καθώς και το πλαίσιο χρησιμοποίησης του καθενός από αυτά. Γίνεται η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, και ο τρόπος κατασκευής των καννάβων. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στον τρόπο με τον οποίο προσημειώθηκε το ηλεκτρόδιο σαν κινούμενη πηγή θερμότητας με πεπερασμένες χωρικές διαστάσεις καθώς και σε θέματα που αφορούν το χειρισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικού, οι οποίες υπεισέρχονται στην επίλυση του προβλήματος.

Το ιδιαίτερα χρήσιμο αποτέλεσμα από τα πεπερασμένα στοιχεία ήταν ο προσδιορισμός του θερμικού κύκλου (T,t) που υφίσταται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας κάθε σημείο του ελάσματος με συγκεκριμένες συντεταγμένες (x,y,z). Η ακριβής περιγραφή του θερμικού κύκλου (ρυθμός θέρμανσης, ρυθμός ψύξης, μέγιστη θερμοκρασία και χρονική διάρκεια) απετέλεσε κύριο δεδομένο εισόδου στα μοντέλα της υπολογιστικής κινητικής που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, αφού οι μεταβολές που συμβαίνουν στη μικροδομή του κράματος στη ΘΕΖ, συνδέονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του θερμικού κύκλου.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μετάδοση θερμότητας κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης του χάλυβα πραγματοποιείται όπως προαναφέρθηκε με αγωγή και στη γενική περίπτωση είναι πρόβλημα τριών διαστάσεων. Για λόγους απλούστευσης όμως καθώς και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου η χωρική διάσταση του προβλήματος μπορεί να περιοριστεί κατά μια ή δύο διαστάσεις. Να αντιμετωπιστεί δηλαδή σαν μονοδιάστατο (1-D) ή δισδιάστατο (2-D) πρόβλημα. Αυτό μπορεί να καθοριστεί από τη σχέση διαστάσεων θερμικής πηγής – συγκολλούμενου ελάσματος καθώς και από τη σχέση της ταχύτητας με-

τάδοσης της θερμότητας στο υλικό σε σχέση με την ταχύτητα μετακίνησης του ηλεκτροδίου.

Όταν για παράδειγμα το πάχος του ελάσματος είναι μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος της πηγής και η ταχύτητα κίνησης της πηγής είναι μεγάλη, μπορεί να θεωρηθεί ότι η θερμότητα μεταφέρεται μόνο προς την κάθετη προς την επιφάνεια κατεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα ανάγεται σε 1 διάσταση (1-D). Όταν οι διαστάσεις του σώματος αρχίζουν να γίνονται συγκρίσιμες με τις διαστάσεις της πηγής η θεώρηση του 1-D παύει να ισχύει.

Στην περίπτωση αυτή είναι χρήσιμος ο ορισμός της χαρακτηριστικής απόστασης διάχυσης της θερμότητας δ :

$$\delta = 2\sqrt{\lambda t} \quad (4.9)$$

όπου λ η θερμική διαχυτότητα του υλικού που δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = k/\rho c_p \quad (4.10)$$

όπου k η θερμική αγωγιμότητα, ρ η πυκνότητα και c_p η ειδική θερμότητα.

Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι, όταν $b/r_\delta \ll 1$ (r_δ είναι η ακτίνα της δέσμης του ηλεκτροδίου) θεωρείται μετάδοση θερμότητας μόνο ως προς το κάθετο ως προς την κίνηση της δέσμης επίπεδο (2-D), ενώ όταν ισχύει $b/r_\delta \gg 1$ θεωρείται μετάδοση θερμότητας σε όλο το χώρο (3-D).

Με άλλα λόγια όταν η ακτίνα της δέσμης του ηλεκτροδίου είναι μεγαλύτερη από χαρακτηριστική απόσταση διάχυσης της θερμότητας, η θερμότητα δεν «προλαβαίνει» να διαχυθεί προς την κατεύθυνση κίνησης της δέσμης και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί η μετάδοση θερμότητας προς την κατεύθυνση αυτή (2-D). Στην αντίθετη περίπτωση η εξίσωση επιλύεται λαμβάνοντας υπόψη μετάδοση θερμότητας και στις τρεις διαστάσεις του χώρου.

Για τη μελέτη της συγκόλλησης χάλυβα St-52 την μέθοδο MIG, το στερεό σώμα στο οποίο έλαβε χώρα η ανάλυση μεταφοράς θερμότητας με πεπερασμένα στοιχεία θεωρήθηκε σαν πλάκα πεπερασμένων διαστάσεων. Η δέσμη του ηλεκτροδίου προσημειώθηκε ως ένα επιφανειακά κατανομημένο θερμικό φορτίο κυκλικής διατομής α-

κτίνας γ_b κινούμενο με ταχύτητα u ως προς το έλασμα. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων που ακολουθήθηκε ήταν μεταβατική (transient) για το μοντέλο 3-D.

4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (3-D)

Η εξίσωση μμετάδοσης θερμότητας που πρέπει να επιλυθεί στην περίπτωση αυτή έχει τη μορφή :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.11)$$

Η αρχική θερμοκρασία σε όλα τα σημεία του καννάβου είναι

$$T(x,y,z,0) = 22 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.12)$$

Οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν στο εξωτερικό όριο του καννάβου (Ω) για τους κόμβους οι οποίοι δεν είναι στην περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης και αφορούν απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας:

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = h(T - T_0) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (4.13)$$

όπου $\mathbf{q} = -k \nabla T$, \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην εξωτερική επιφάνεια και προς τα έξω και T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου είναι

$$h = 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} = 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}},$$

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4} = 5.669 \times 10^{-14} \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4},$$

$$\varepsilon = 0.1,$$

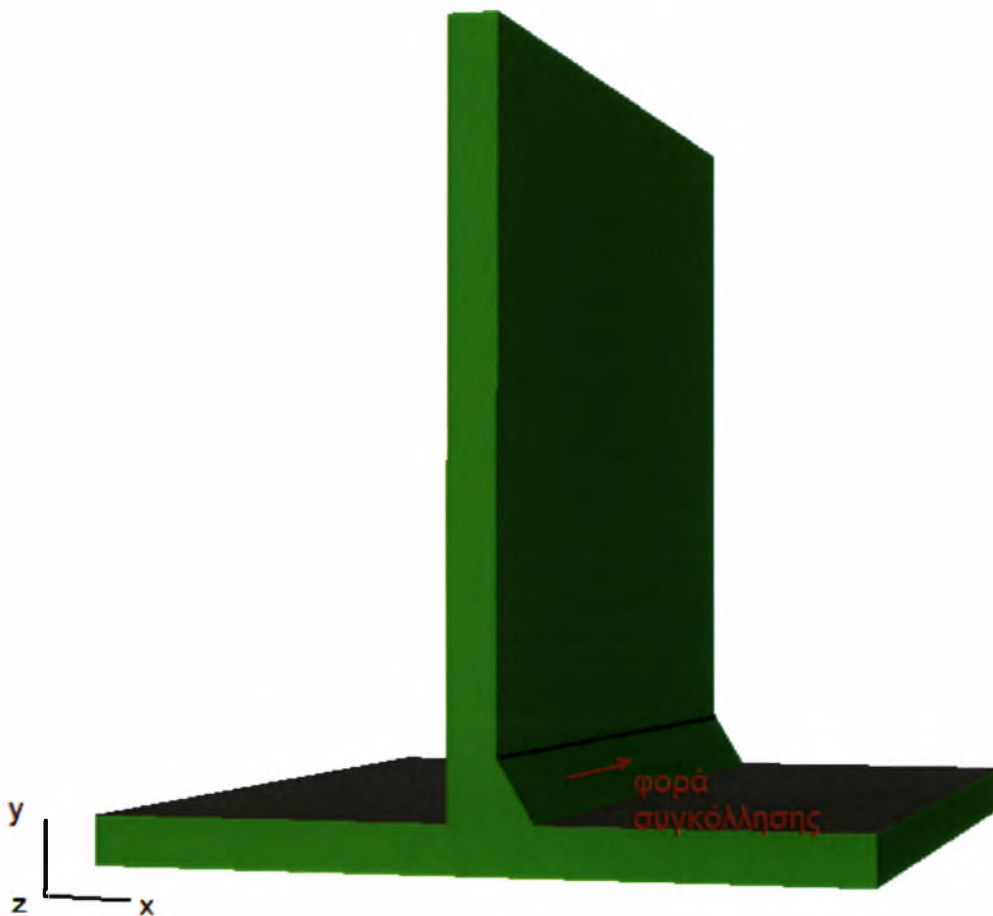
$$U_{latent} = 270 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}},$$

$$T_{solidus} = 1440 \text{ } ^\circ\text{C},$$

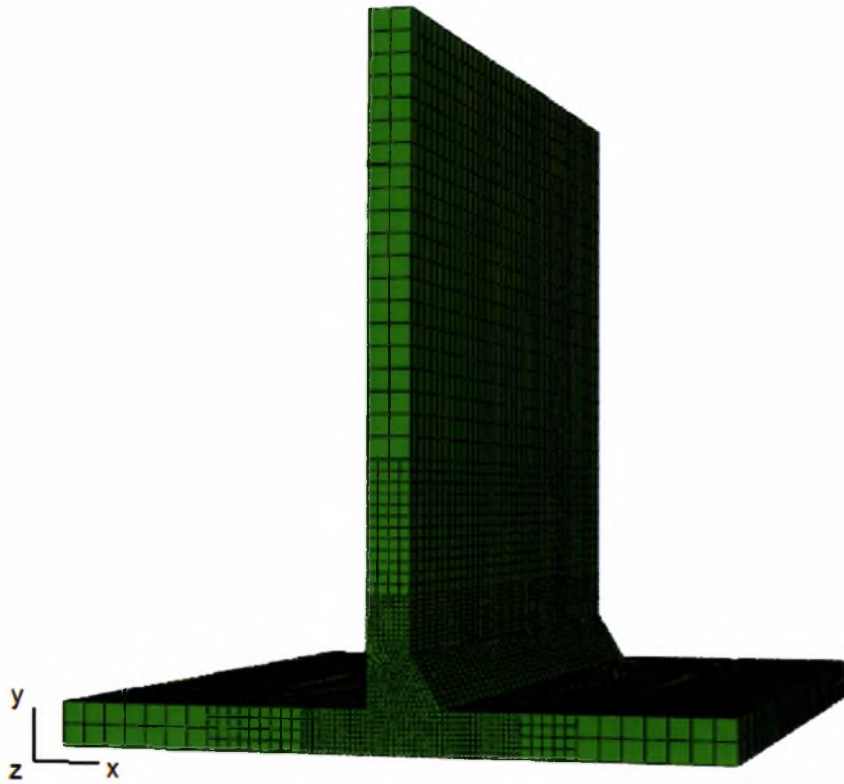
$$T_{\text{liquidus}} = 1505 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Οι ποσότητες k , c_p και ρ που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

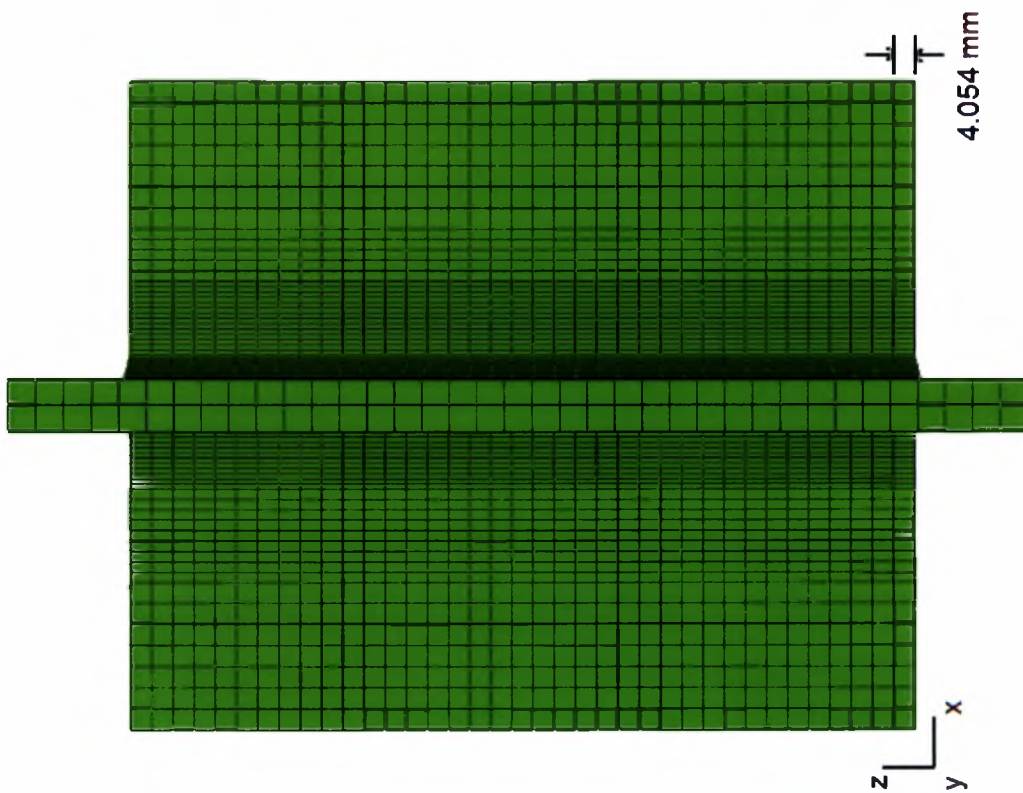
Η σχηματική παράσταση της περιοχής που μοντελοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Για το τριδιάστατο μοντέλο κατασκευάστηκε ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων που φαίνεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4.



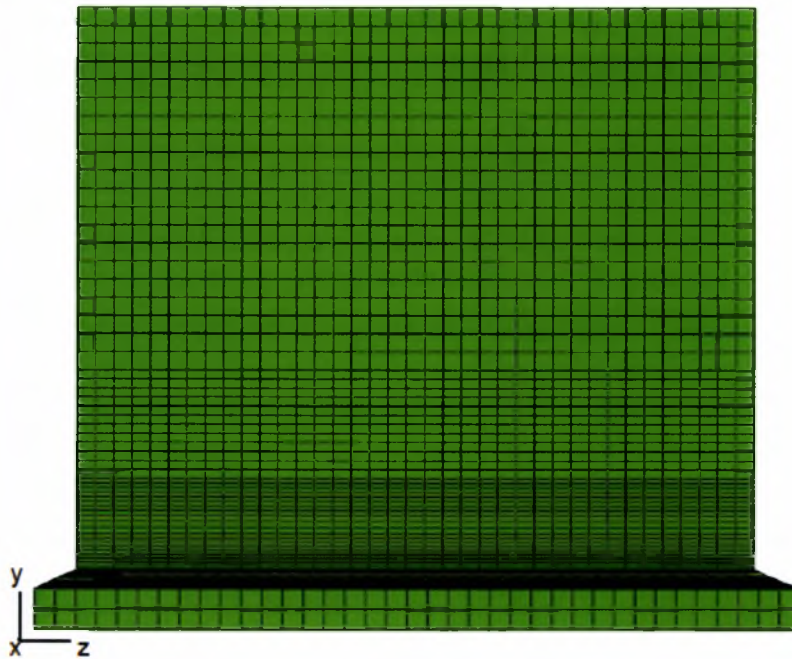
Σχήμα 4.2 : Σχηματική παράσταση των ελασμάτων και της λίμνης συγκόλλησης.



Σχήμα 4.3 : Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων 3-D



Σχήμα 4.4α : Διαφοροποίηση κατά άξονα z (κάτοψη)



Σχήμα 4.4β : Διακριτοποίηση κατά άξονα z (πλάγια όψη)

Ο κάρναβος αποτελείται από 37.851 κόμβους και 26.788 στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα ισοπαραμετρικά 8-κομβικά στοιχεία. Πιο κάτω αναλύεται ακριβέστερα η διακριτοποίηση των στοιχείων.

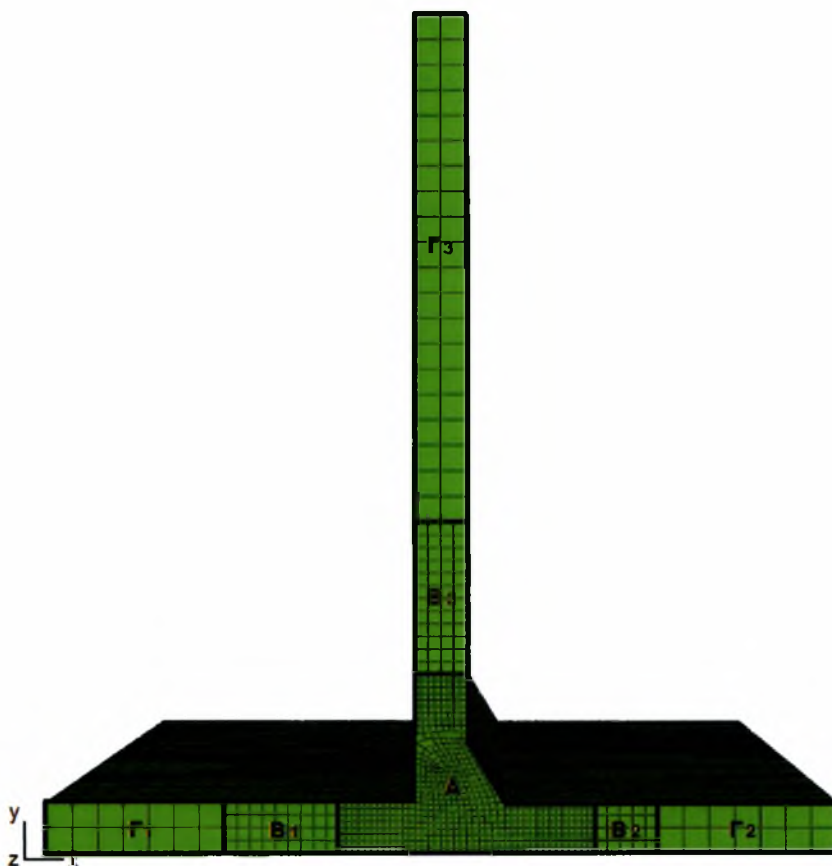
Η διακριτοποίηση κατά τον άξονα z είναι ομοιόμορφη και έγινε ανά 4,054 mm όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.3 και 4.4.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται αναλυτικότερα η διακριτοποίηση στο x-y επίπεδο. Διακρίνονται μια περιοχή με μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων (περιοχή A) και δυο ομάδες περιοχών με μικρότερη πυκνότητα στοιχείων (ομάδες B και Γ).

Η **περιοχή A**, με την μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων (διακριτοποίηση ανά 1 mm) περιλαμβάνει την περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης του τόξου καθώς και την θερμοεπιρραζόμενη ζώνη. Αποτελείται από 552 συνολικά στοιχεία.

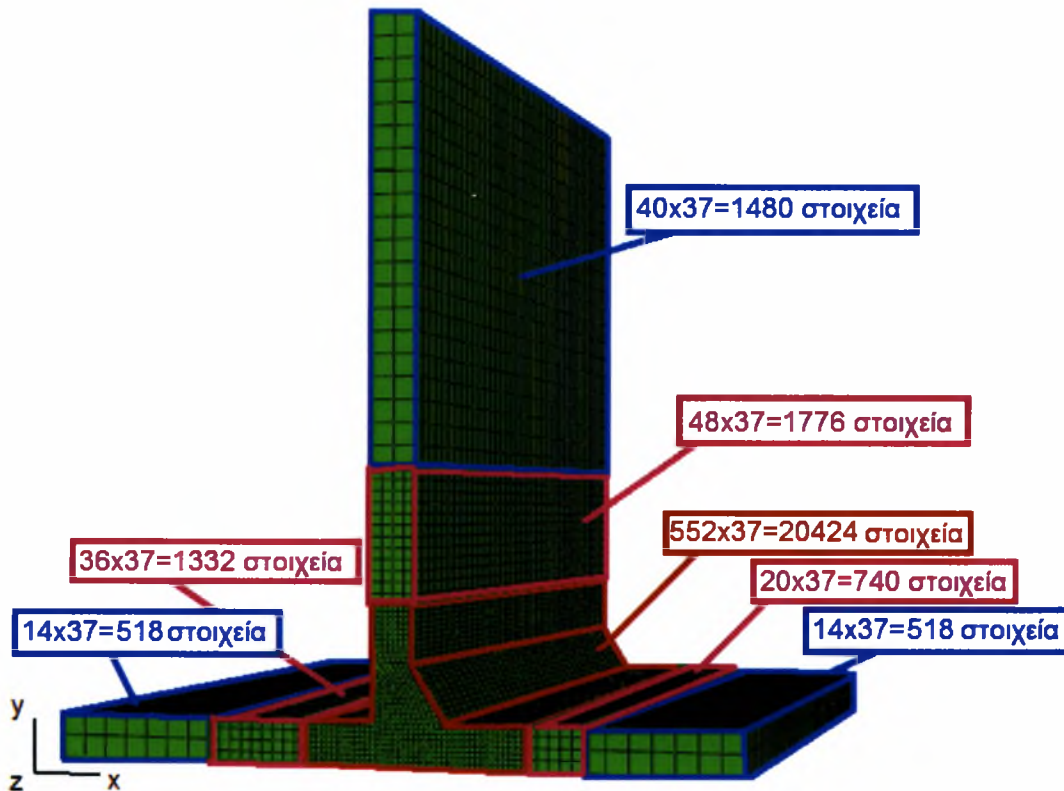
Στην **ομάδα B** ο κάρναβος είναι αραιότερος (διακριτοποίηση ανά 2 mm). Η περιοχή **B₁** έχει μήκος $x=18$ mm και αποτελείται από 36 στοιχεία. Η περιοχή **B₂** έχει μήκος $x=10$ mm και αποτελείται από 20 στοιχεία. Και η περιοχή **B₃** έχει ύψος $y=24$ mm και αποτελείται από 48 στοιχεία. Τέλος στην **ομάδα Γ** ο κάρναβος είναι ακόμα πιο αραιός (διακριτοποίηση ανά 4 mm). Η περιοχή **Γ₁** έχει μήκος $x=28$ mm και αποτελείται από 14 στοιχεία. Η περιοχή **Γ₂** έχει μήκος επίσης $x=28$ mm και αποτελείται από 14 στοιχεία. Και η περιοχή **Γ₃** έχει ύψος $y=80$ mm και αποτελείται από 40 στοιχεία. Η

αρίθμηση των στοιχείων μέχρι αυτό το σημείο δεν περιλαμβάνει την μέτρηση και κατά τον άξονα z.



Σχήμα 4.5 : Διακριτοποίηση στο x-y επίπεδο.

Ο αριθμός των στοιχείων σε κάθε περιοχή παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 : Στοιχεία μοντέλου προσομοίωσης 3-D

Η ανομοιόμορφη διακριτοποίηση επιλέχτηκε προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα ακριβέστερης ανάλυσης στα στοιχεία πρόσπτωσης της δέσμης του τόξου. Η δέσμη του τόξου αντιμετωπίστηκε ως επιφανειακά κατανεμημένο φορτίο με κυκλική διατομή. Αναλυτικότερα:

4.2.2.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Η δέσμη του ηλεκτροδίου που αποτελεί τη θερμική πηγή του συγκεκριμένου προβλήματος μεταφοράς θερμότητας προσομοιώθηκε ως ένα επιφανειακά κατανεμημένο θερμικό φορτίο το οποίο εφαρμόζεται στην κεκλιμένη επιφάνεια του Σχήματος 4.6.

Συγκεκριμένα, το κέντρο της θερμικής πηγής κινείται με ταχύτητα $v = 6.8 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ και η παρεχόμενη θερμική ισχύς της πηγής προσδιορίζεται από τη σχέση

$$q(r) = \begin{cases} q_{\max} e^{-cr^2} & \text{εάν } r \leq r_{\text{cut}}, \\ 0 & \text{εάν } r > r_{\text{cut}}, \end{cases} \quad (4.14)$$

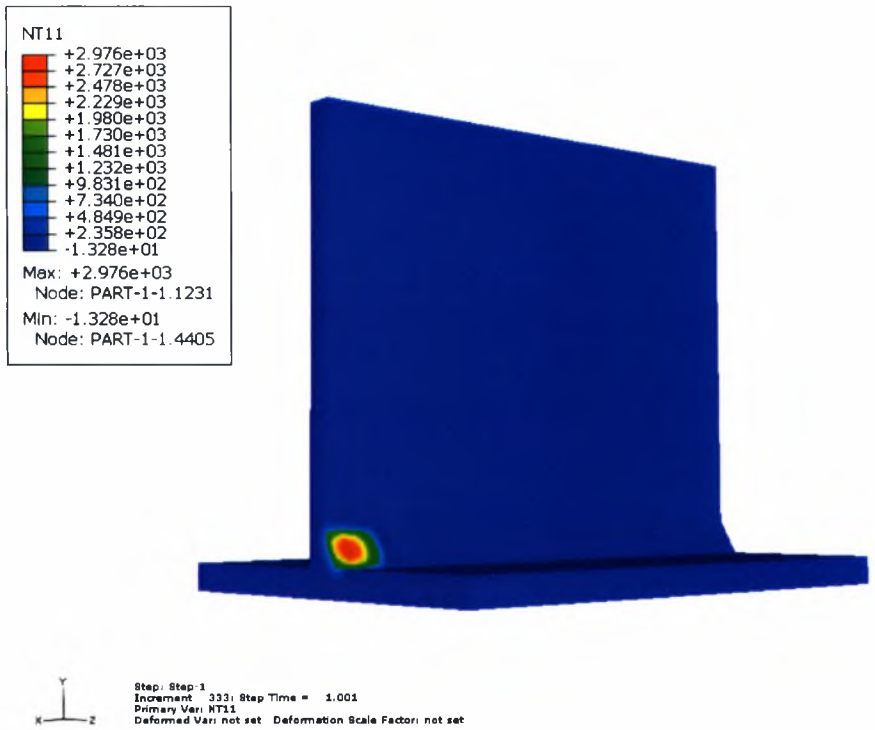
όπου r είναι η απόσταση ενός σημείου στην κεκλιμένη επιφάνεια από το κέντρο της πηγής, $q_{\max} = \eta \frac{VI}{\pi r_b^2}$, $r_{cut} = 2r_b$, $r_b = 2.4 \text{ mm}$, $V = 30 \text{ Volt}$, $I = 300 \text{ Amber}$, $\eta = 0.75$ και $c = 1 \text{ m}^{-2}$.

Το θερμικό φορτίο εφαρμόζεται στην κεκλιμένη επιφάνεια του καννάβου μέσω της “user subroutine” DFLUX του ABAQUS.

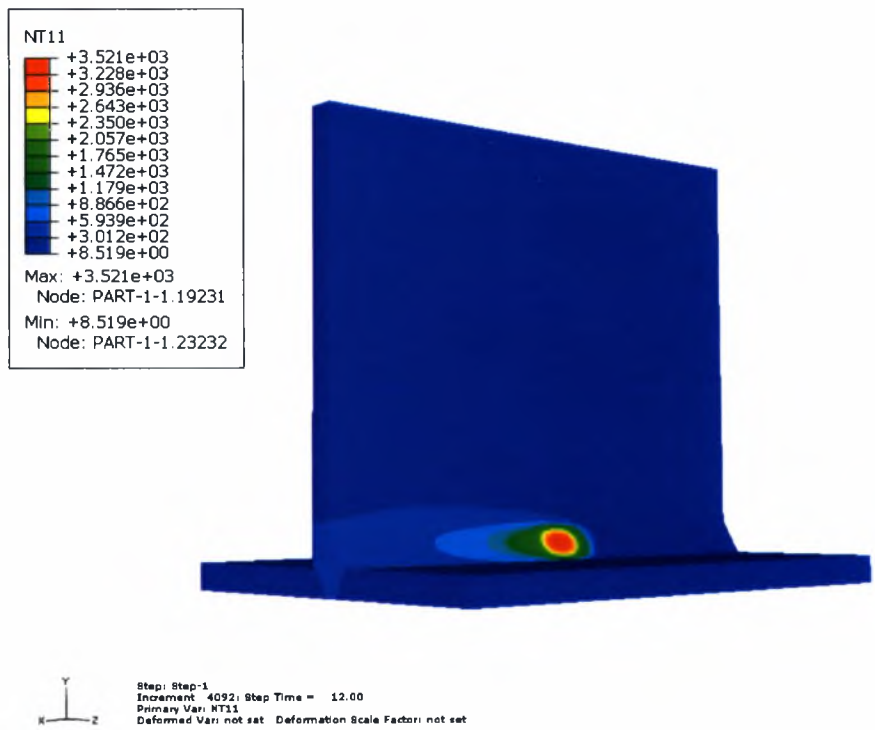
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων πεπερασμένων στοιχείων στο θερμοκρασιακό πρόβλημα δίδονται στα Σχήματα 4.7, 4.8, 4.9α και 4.9β όπου παρουσιάζονται ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, για διαφορετική χρονική στιγμή t . Οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες παρουσιάζουν την εξέλιξη του θερμοκρασιακού πεδίου σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης.

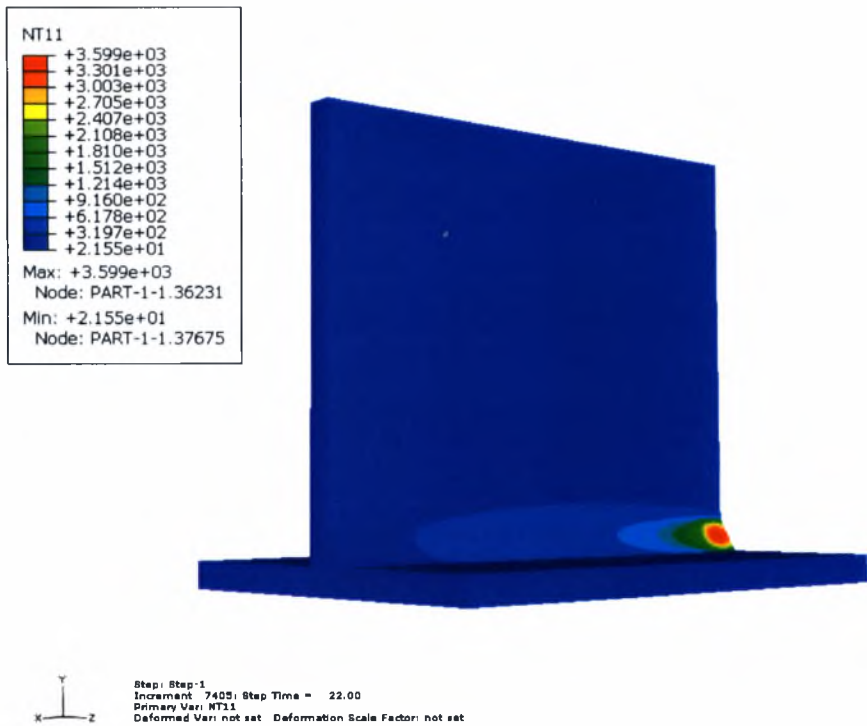
Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται θερμικοί κύκλοι σε κόμβους που ευρίσκονται στην πάνω επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης στην αρχή, στη μέση και στο τέλος (κόμβοι 1231,19231,36231 αντίστοιχα) όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.11. Παρατηρούμε ότι ο θερμοκρασιακός κύκλος κάθε κόμβου της λίμνης συγκόλλησης έχει άμεση σχέση με την θέση του σημείου ως προς τη δέσμη του τόξου του ηλεκτροδίου και την ακτινοβολούμενη επιφάνεια του ελάσματος. Όσο πιο κοντά είναι ως προς την δέσμη τόσο μεγαλύτερη μέγιστη θερμοκρασία αντιμετωπίζει και οι θερμοκρασιακές κλίσεις είναι εντονότερες. Σε όλα τα αποτελέσματα οι θερμοκρασίες είναι σε $^{\circ}\text{C}$ και ο χρόνος σε sec.



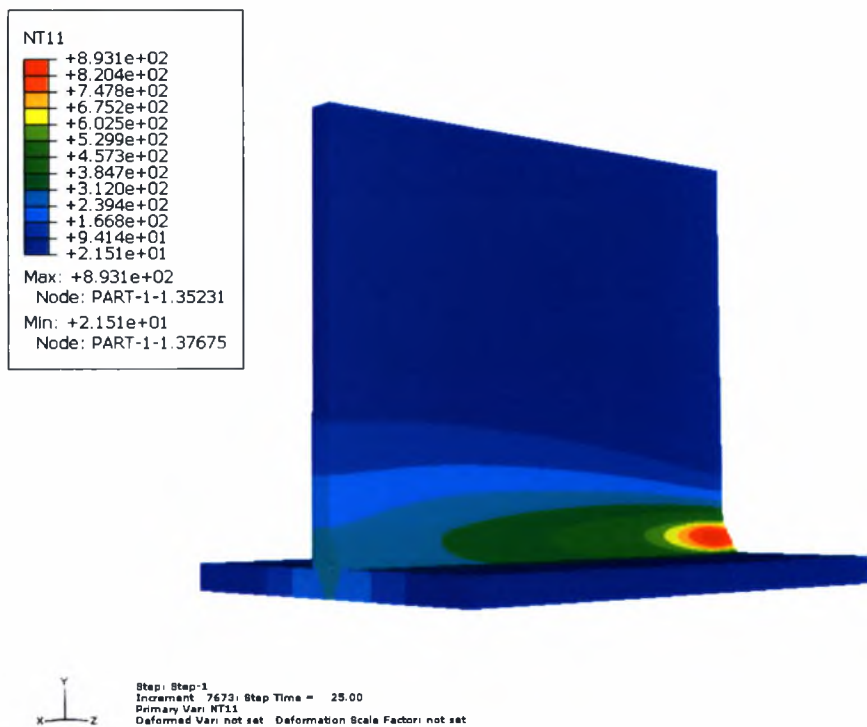
Σχήμα 4.7: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=1\text{sec}$.



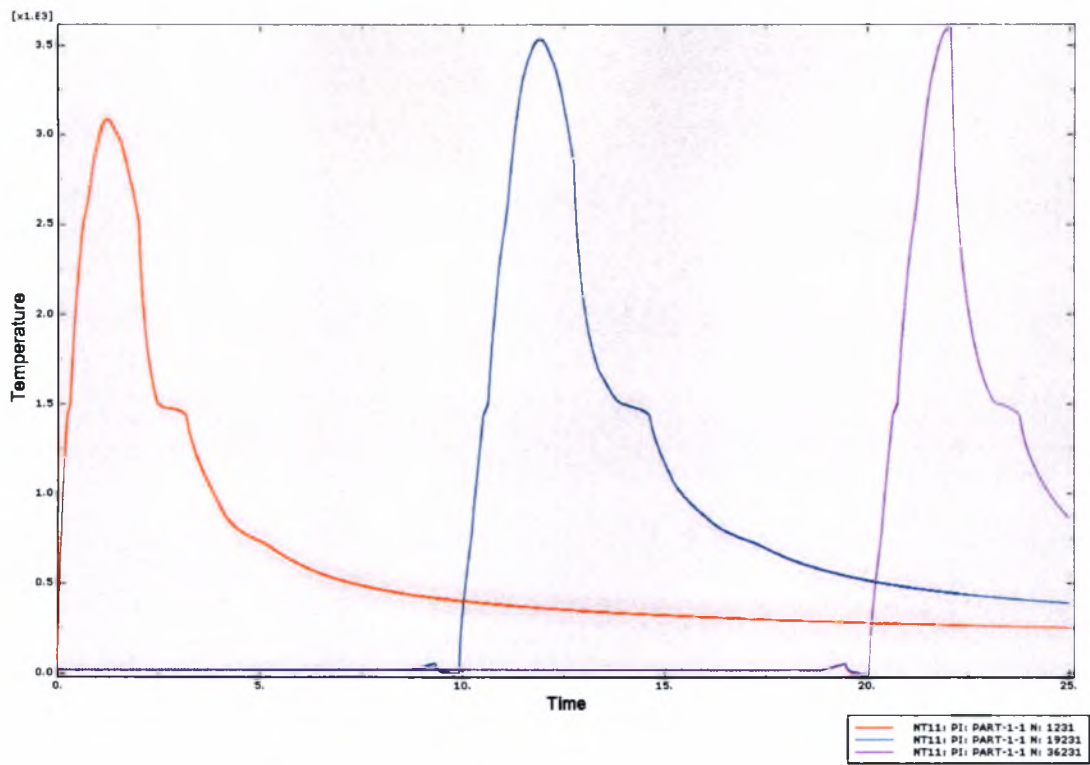
Σχήμα 4.8: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=12\text{sec}$.



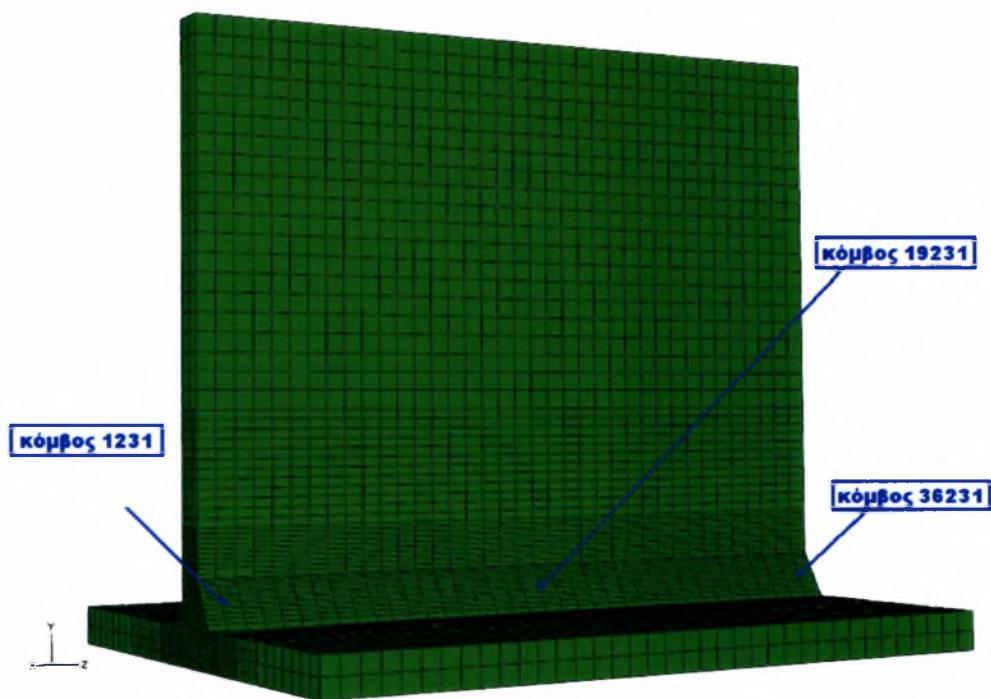
Σχήμα 4.9α: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=22\text{sec}$.



Σχήμα 4.9β: Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=25\text{sec}$.



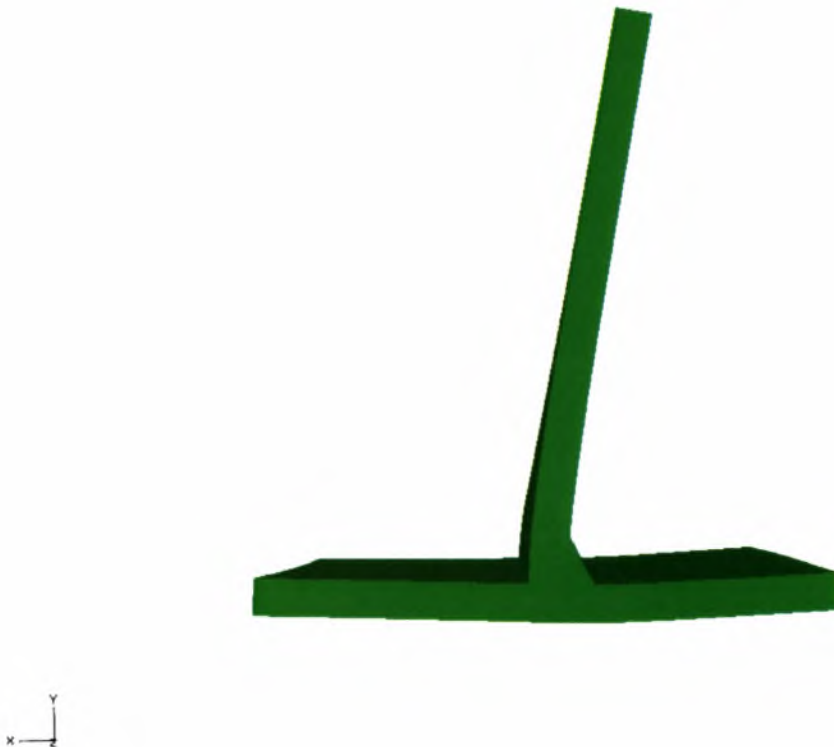
Σχήμα 4.10: Θερμικοί κύκλοι κόμβων 1231, 19231 και 36231.



Σχήμα 4.11: Θέση κόμβων στον κάνναβο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η «ιστορία» του θερμοκρασιακού πεδίου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιείται κατόπιν ως input για την ανάλυση των τάσεων. Οι μηχανικές ιδιότητες E (μέτρο ελαστικότητας), ν (λόγος Poisson), α (συντελεστής θερμικής διαστολής), σ_0 (όριο διαρροής) και η καμπύλη $\sigma - \varepsilon^p$ που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.4, 2.5 και 2.6. Η τελική παραμόρφωση των ελασμάτων φαίνεται στα σχήματα 5.1α, 5.1β και 5.1γ. Τα σχήματα είναι σε κλίμακα 10 για να φανεί καλύτερα η παραμόρφωση.



Σχήμα 5.1α : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D



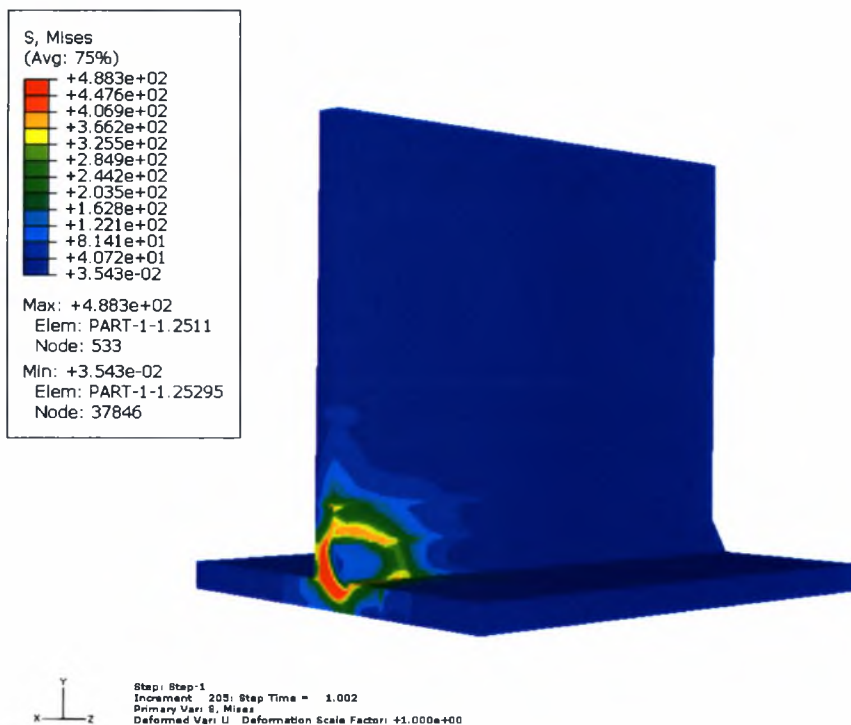
Σχήμα 5.1β : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D



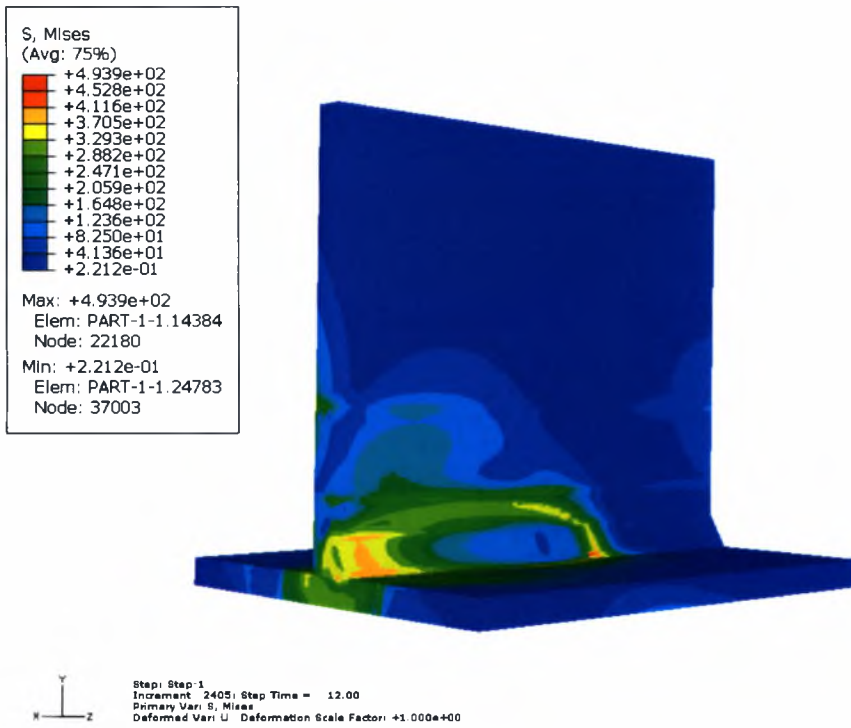
Σχήμα 5.1γ : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων πεπερασμένων στοιχείων στο πρόβλημα τάσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.2, 5.3, 5.4α και 5.4β. Οι καμπύλες παρουσιάζουν την εξέλιξη των ισούψων της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης. Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν οι τάσεις είναι σε MPa.

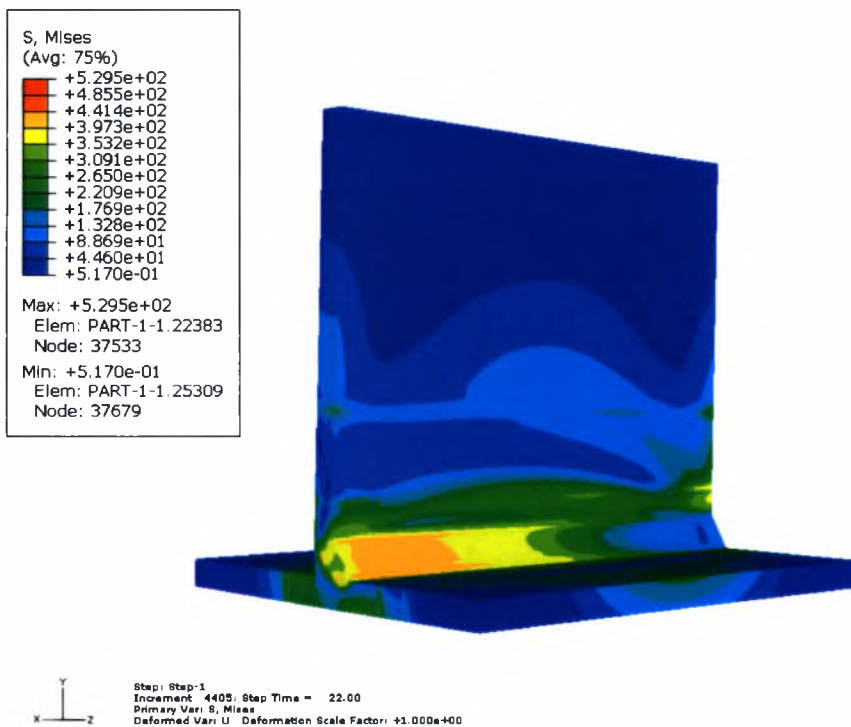
Στα Σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7 φαίνεται πως μεταβάλλονται οι τάσεις κατά von Mises στους κόμβους 1231, 19231 και 36231 κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης. Οι κόμβοι που επιλέχθηκαν είναι ίδιοι με την ανάλυση στο θερμοκρασιακό πρόβλημα και φαίνονται στο Σχήμα 4.13.



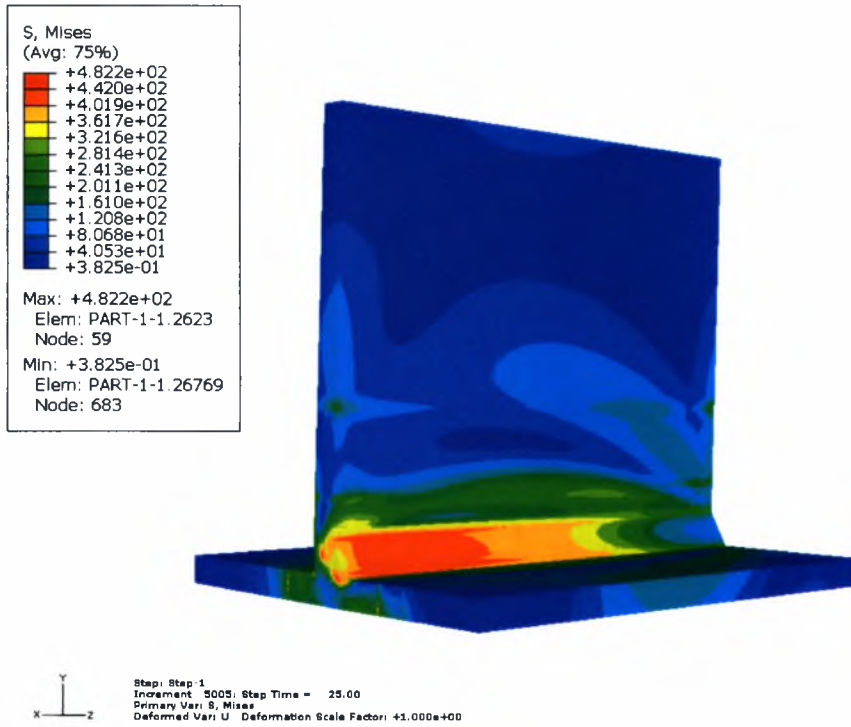
Σχήμα 5.2: Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=1.002\text{sec}$.



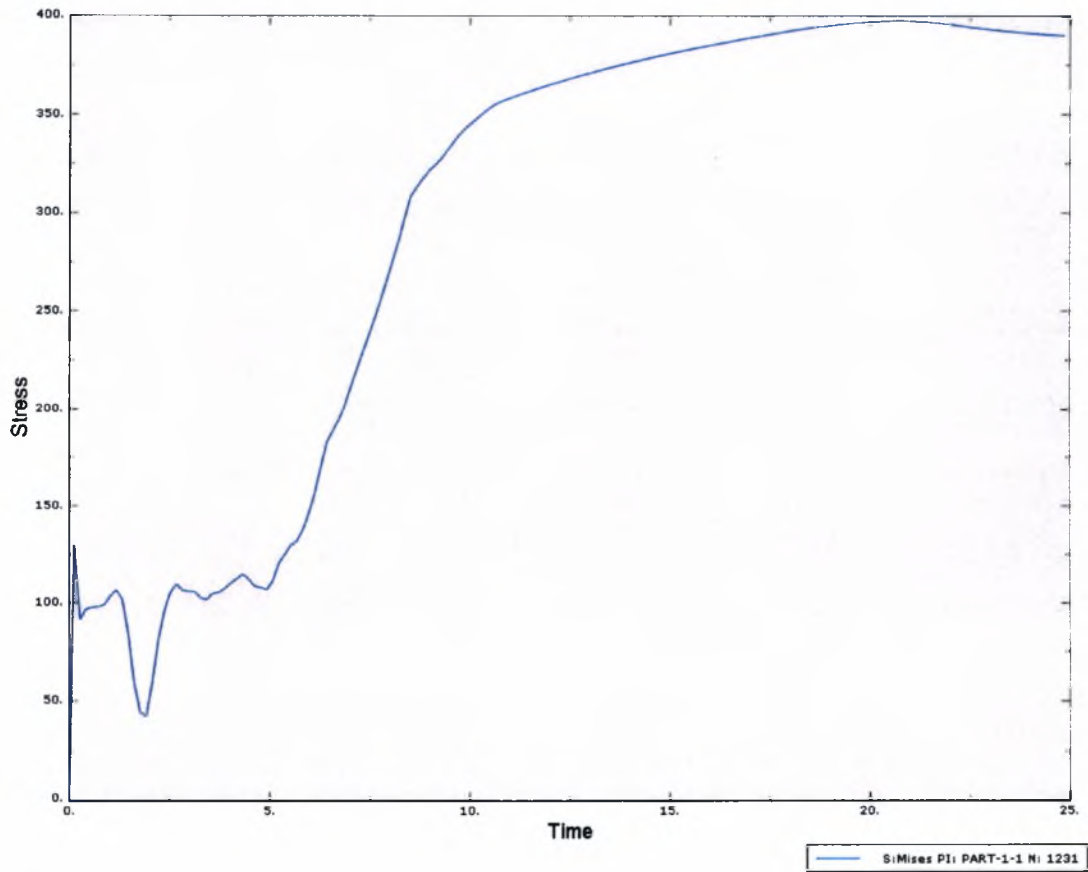
Σχήμα 5.3 : Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=12\text{sec}$.



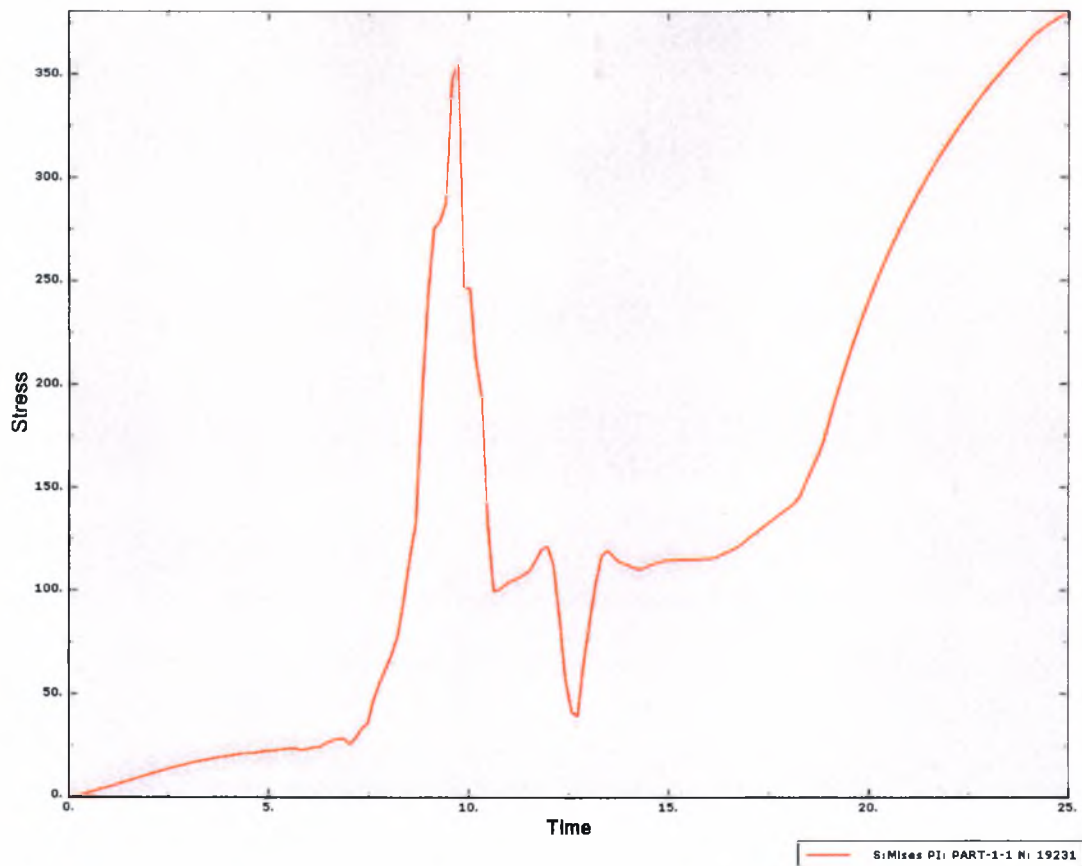
Σχήμα 5.4α : Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=22\text{sec}$.



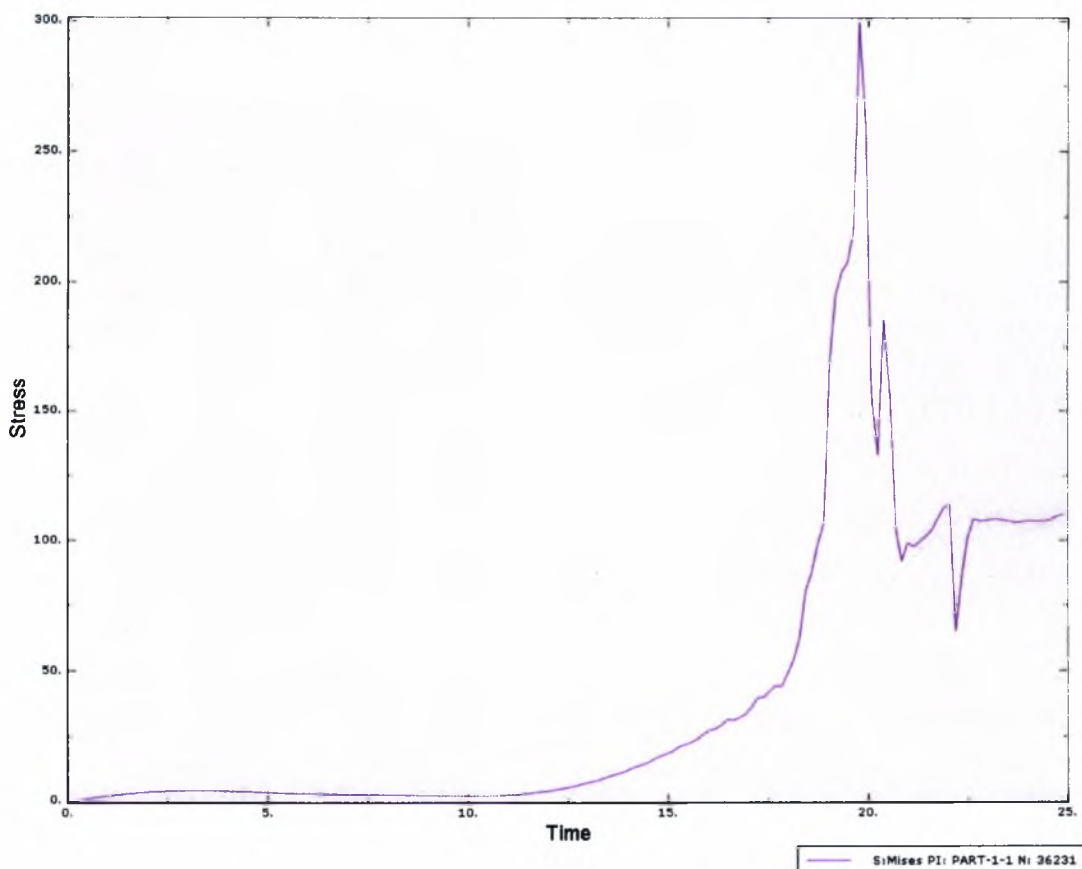
Σχήμα 5.4β : Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=25\text{sec}$.



Σχήμα 5.5: Τάσεις κατά von Mises συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 1231



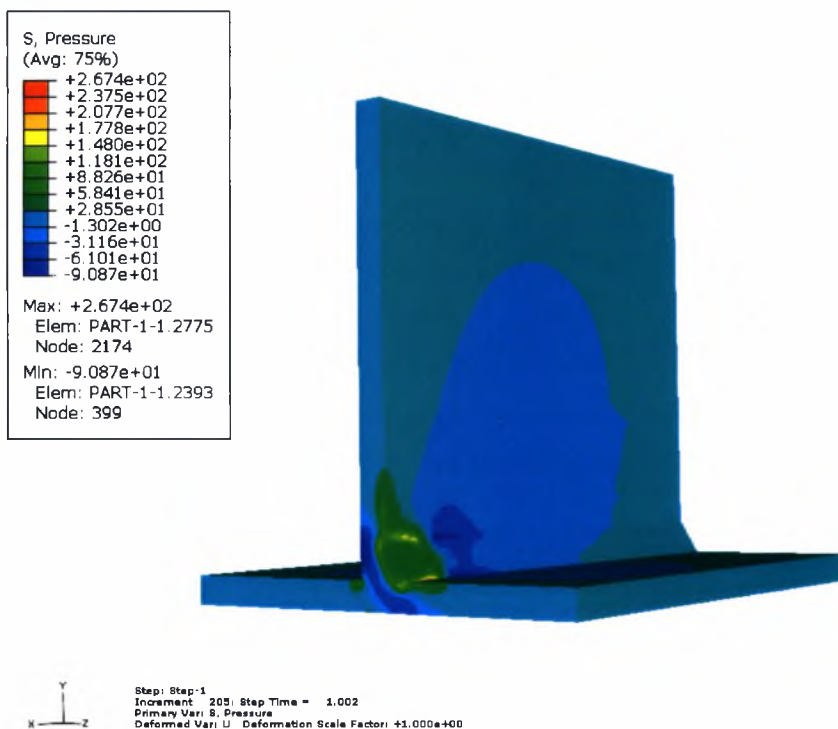
Σχήμα 5.6: Τάσεις κατά Von Mises συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 19231.



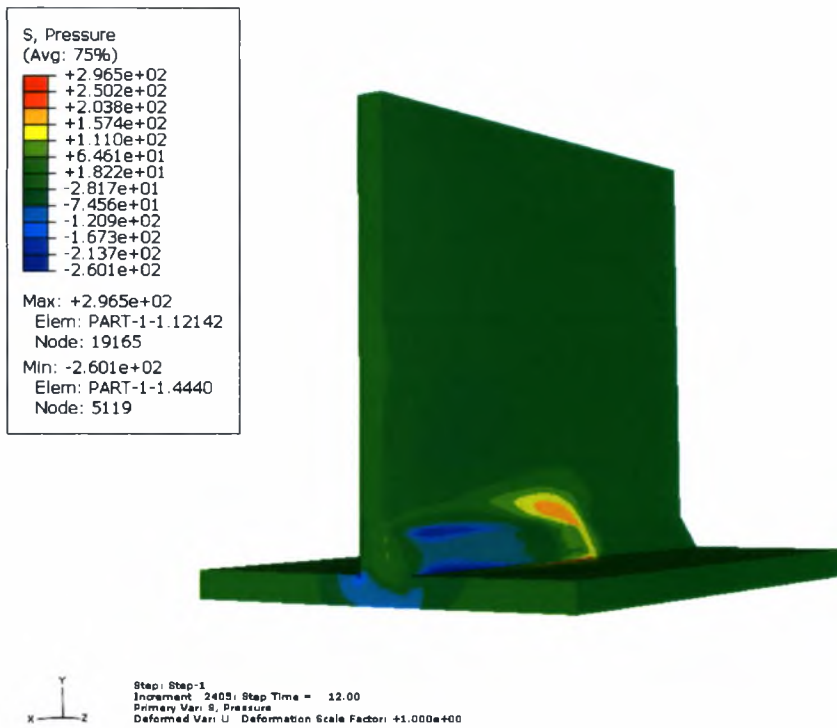
Σχήμα 5.7: Τάσεις κατά Von Mises συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 36231.

Στα Σχήματα 5.8, 5.9, 5.10α και 5.10β παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

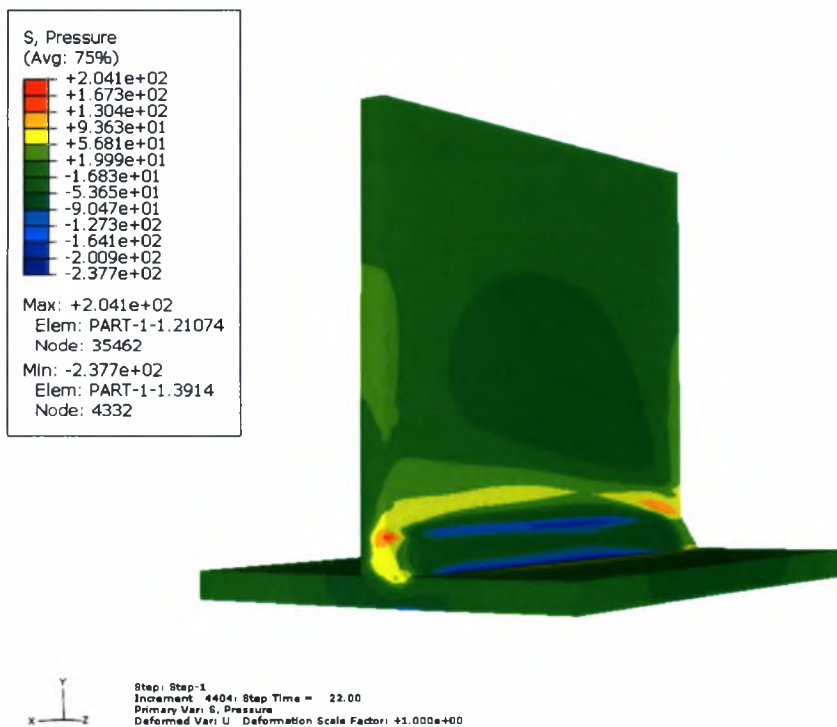
Στα Σχήματα 5.11, 5.12 και 5.13 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης στους κόμβους 1231, 19231 και 36231 κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης.



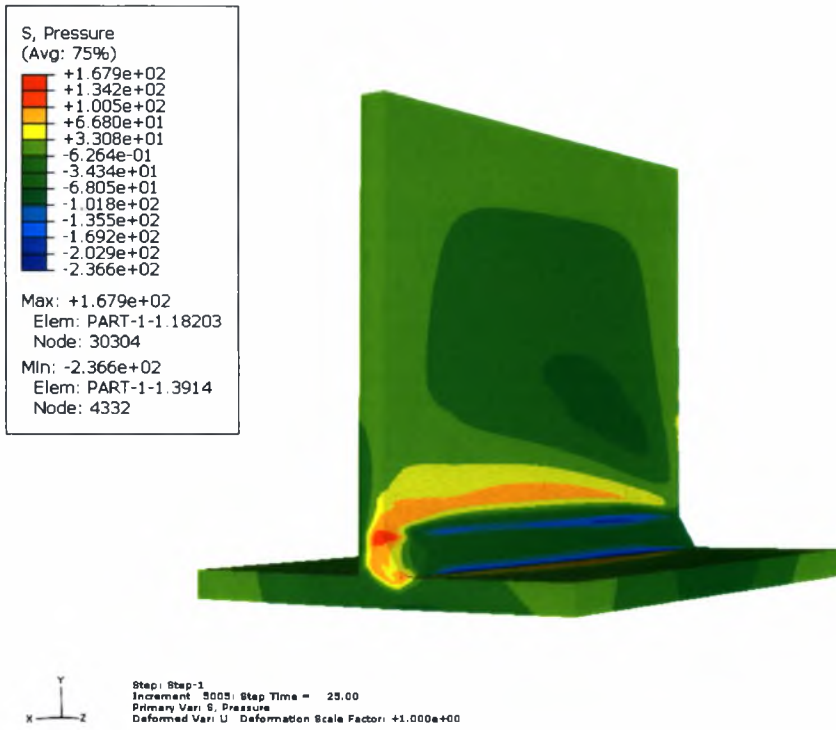
Σχήμα 5.8: Ισοψείς της πίεσης για $t=1.002\text{sec}$.



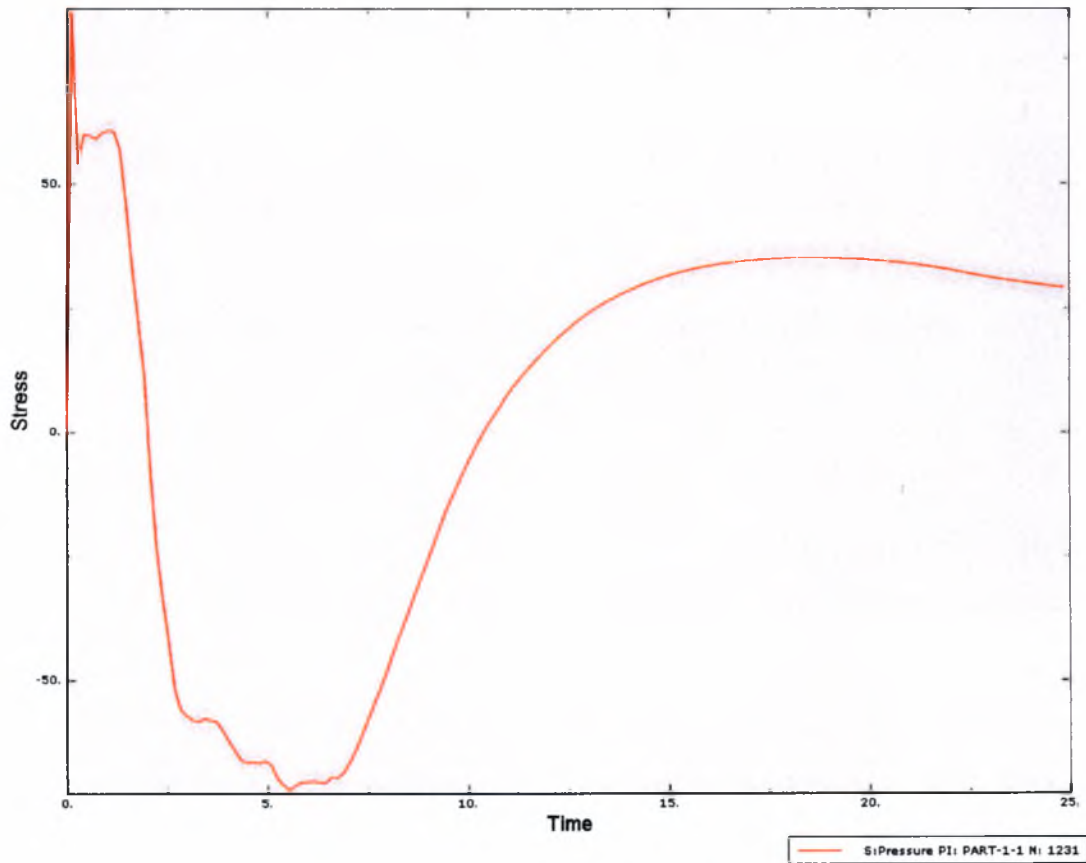
Σχήμα 5.9 : Ισοϋψείς της πίεσης για $t=12\text{sec}$.



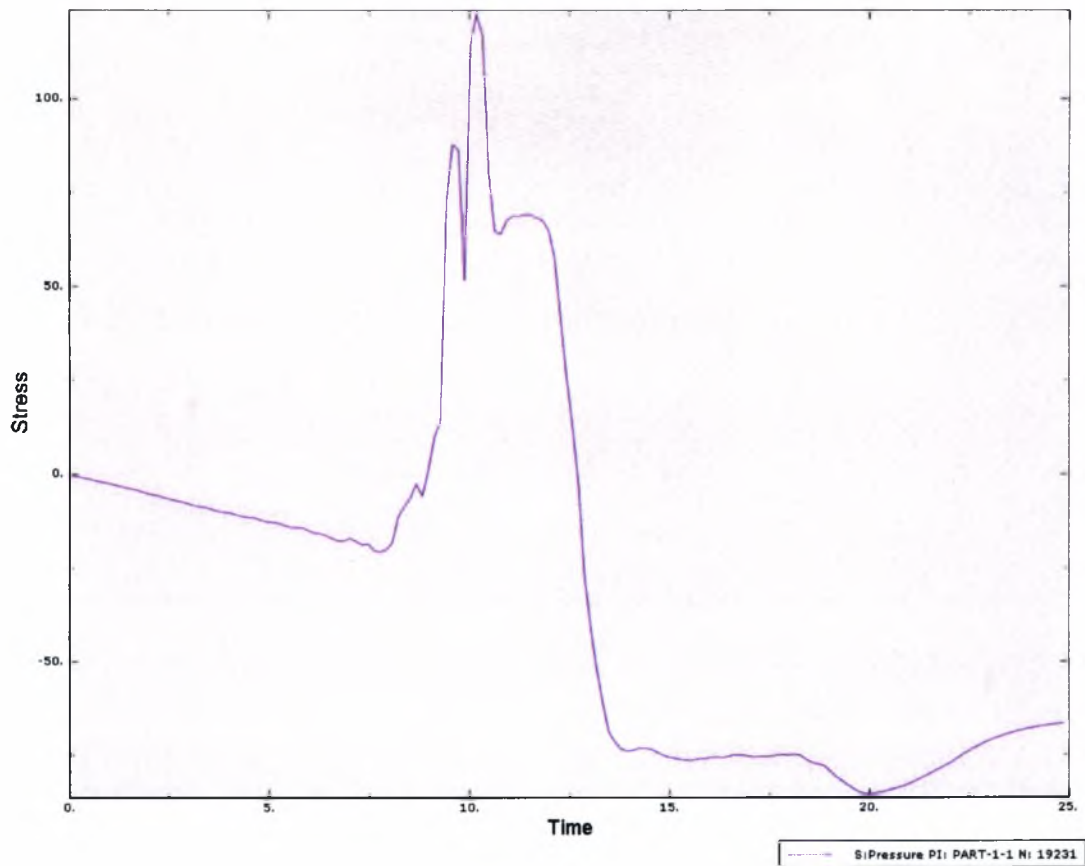
Σχήμα 5.10α: Ισοϋψείς της πίεσης για $t=22\text{sec}$.



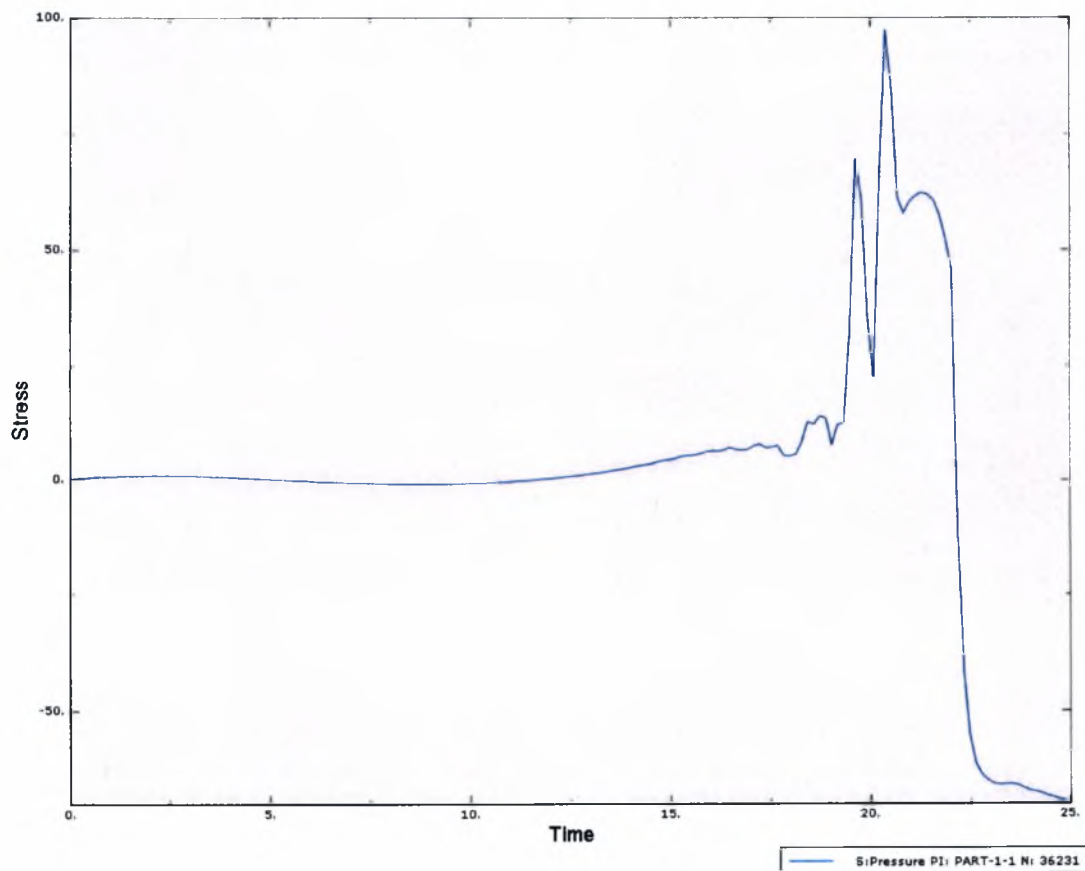
Σχήμα 5.10β: Ισοϋψείς της πίεσης για $t=25\text{sec}$.



Σχήμα 5.11: Πίεση συναρτήσει του χρόνου στον κόμβο 1231.



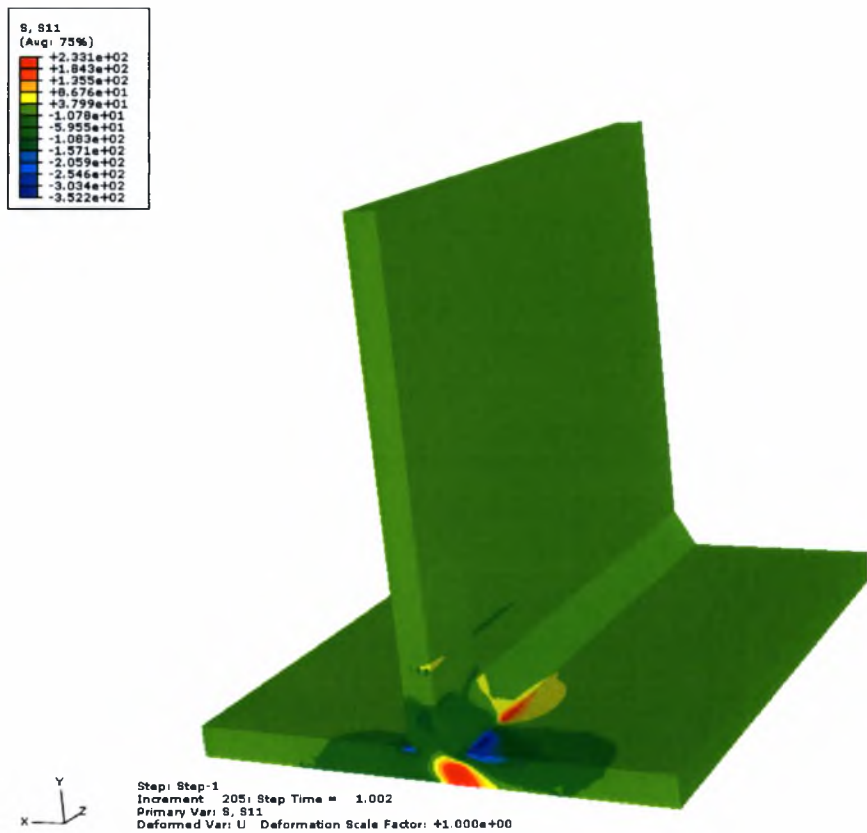
Σχήμα 5.12: Πίεση συναρτήσει του χρόνου στον κόμβο 19231.



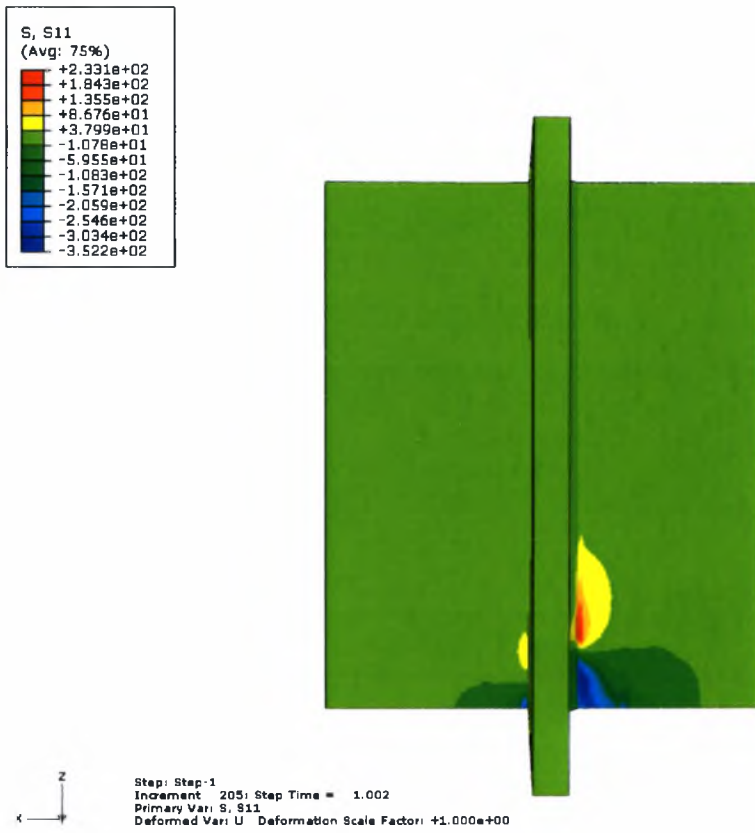
Σχήμα 5.13: Πίεση συναρτήσει του χρόνου στον κόμβο 36231.

Στα Σχήματα 5.14α, 5.14β, 5.14γ, 5.15α, 5.15β, 5.15γ, 5.16α₁, 5.16α₂, 5.16α₃ και 5.16β₁, 5.16β₂, 5.16β₃ παρουσιάζεται η εξέλιξη της τάσης σ_{11} (τάσεις κατά τον άξονα x) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

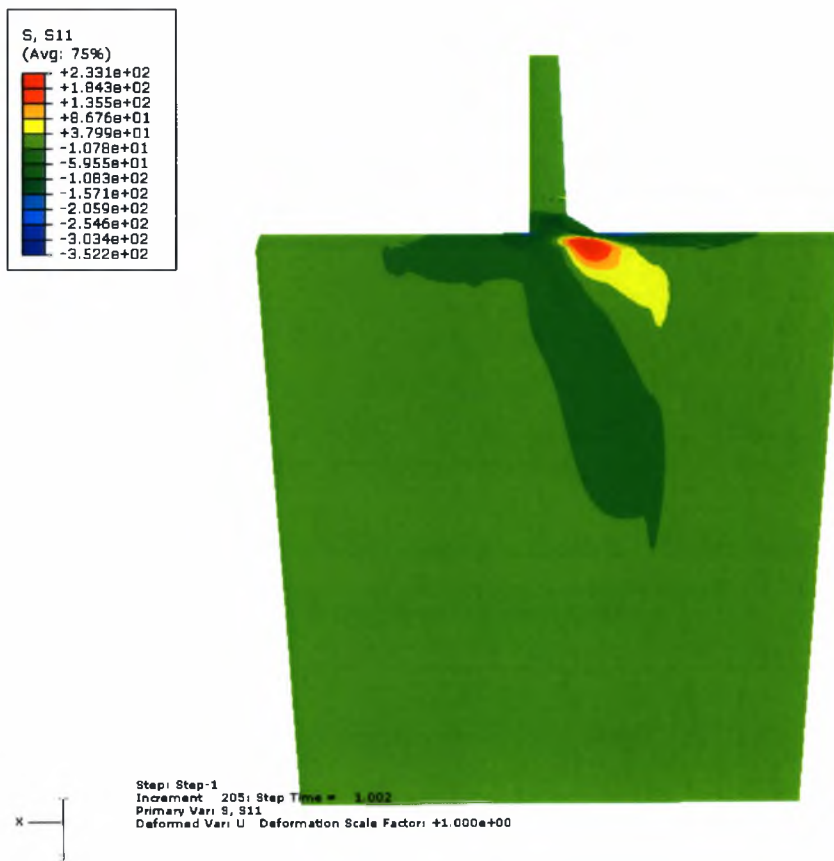
Στα Σχήματα 5.17, 5.18 και 5.19 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων αυτών στους κόμβους 1231, 19231 και 36231 κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης.



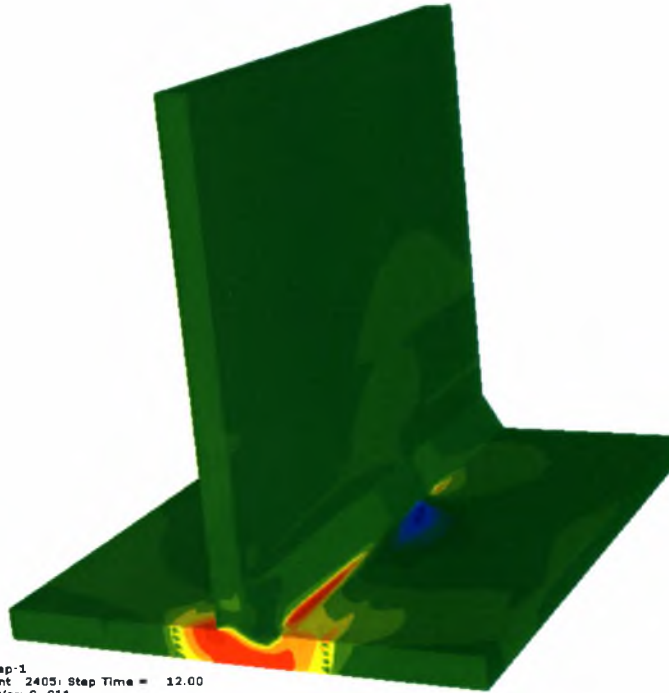
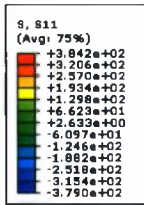
Σχήμα 5.14α : Ισοϋψείς τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec}$.



Σχήμα 5.14β : Ισοψείς τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec.}$

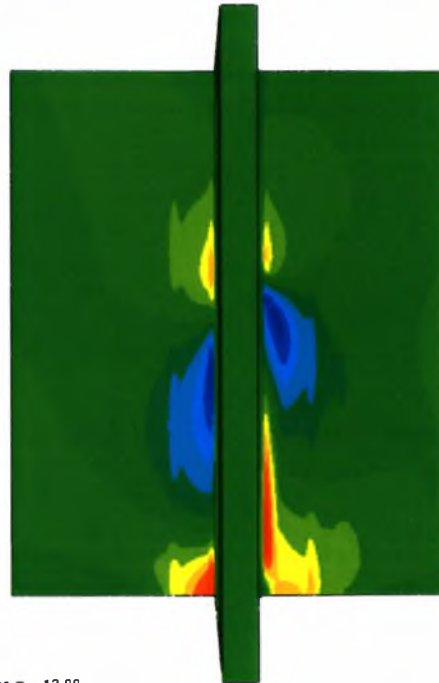
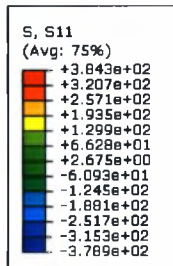


Σχήμα 5.14γ : Ισοψείς τάσεως σ_{11} για $t=1.002\text{sec.}$



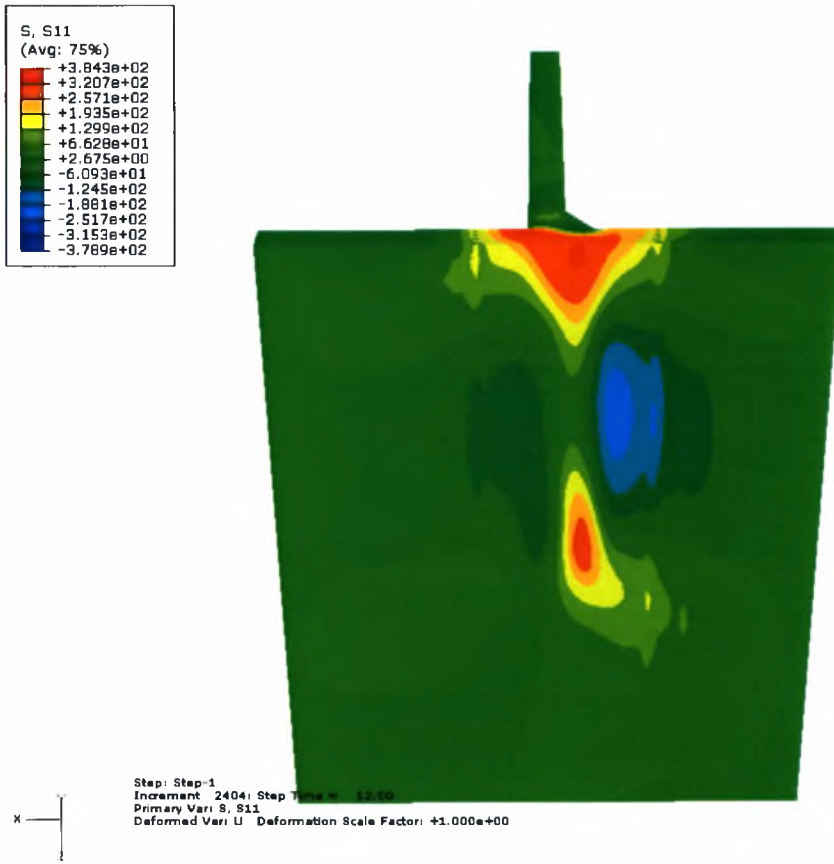
Step: Step-1
Increment: 2405; Step Time = 12.00
Primary Vari: S, S11
Deformed Vari: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Σχήμα 5.15α : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$.

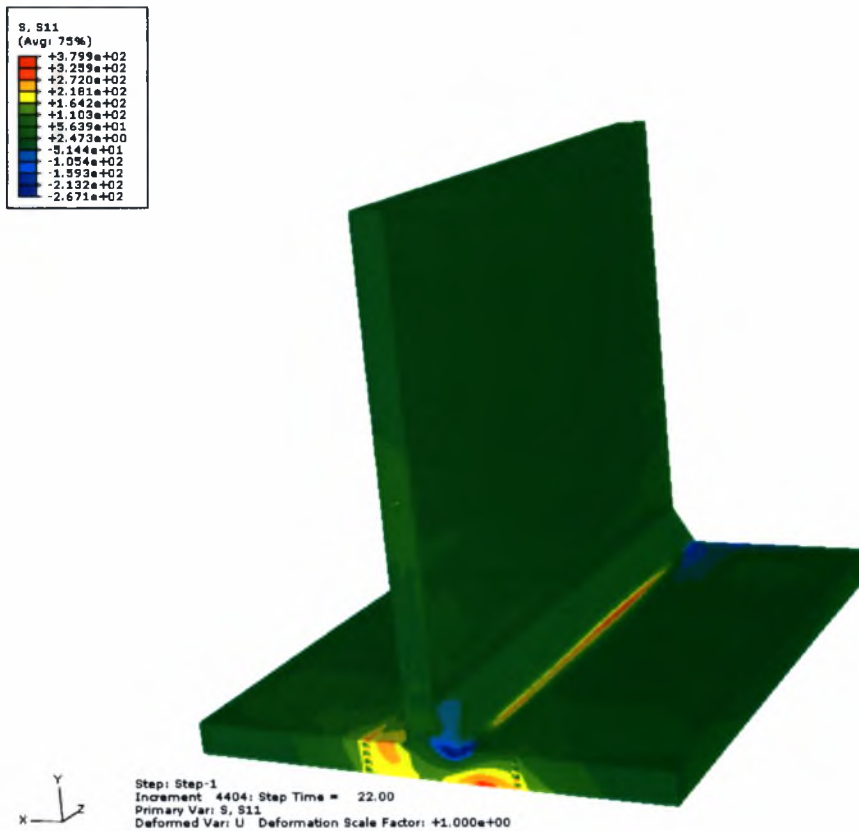


Step: Step-1
Increment: 2404; Step Time = 12.00
Primary Vari: S, S11
Deformed Vari: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00

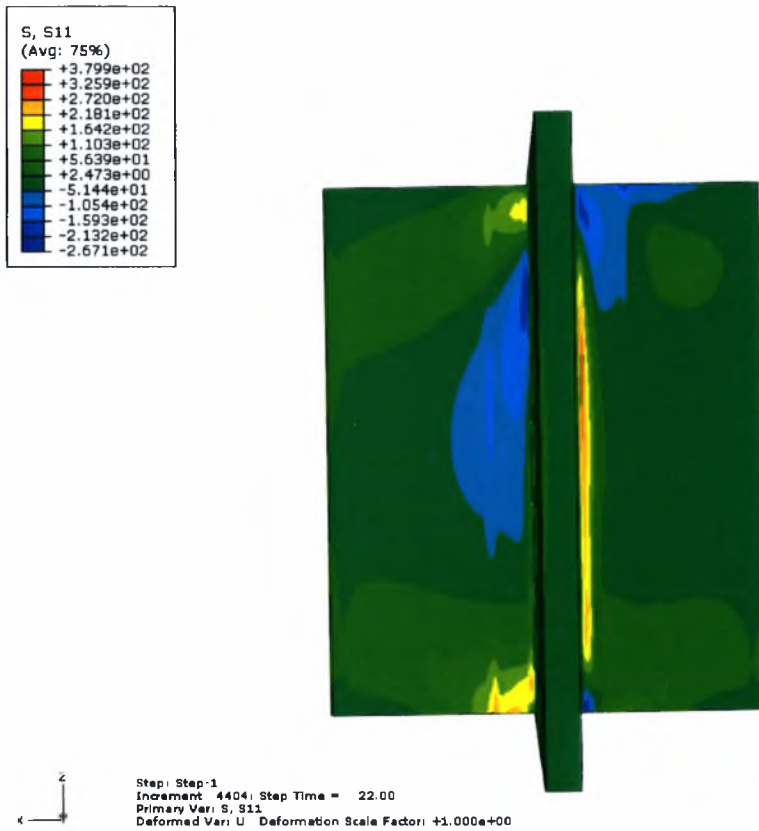
Σχήμα 5.15β : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$.



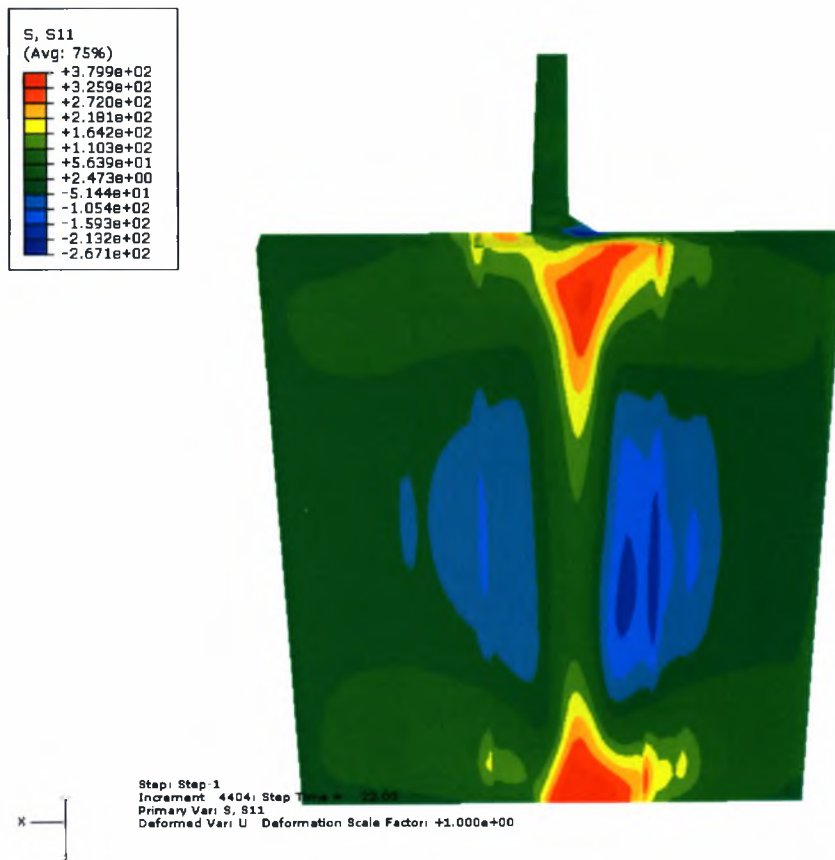
Σχήμα 5.15γ : Ισοϋψείς της τάσεως σ_{11} για $t=12\text{sec}$.



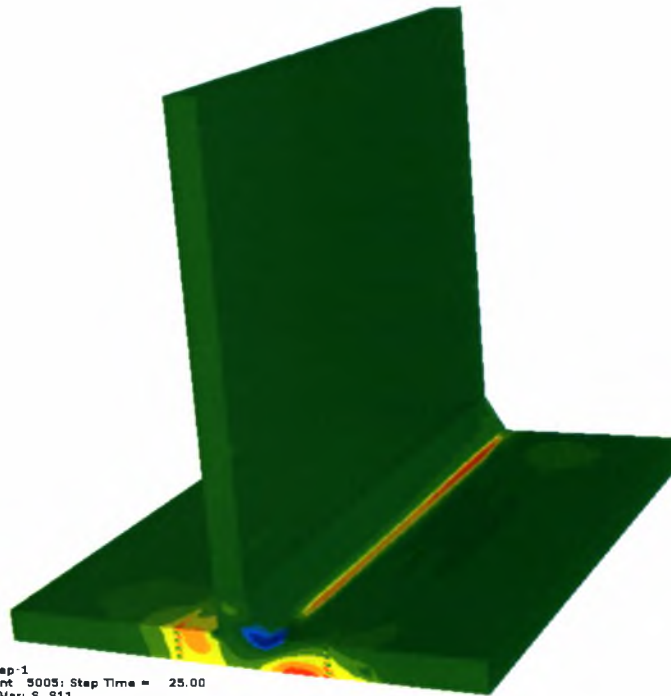
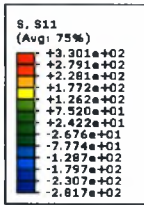
Σχήμα 5.16α : Ισοϋψείς τάσεως σ_{11} για για $t=22\text{sec}$.



Σχήμα 5.16α₂ : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=22\text{sec}$.

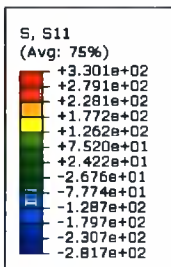


Σχήμα 5.16α₃ : Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για για $t=22\text{sec}$.



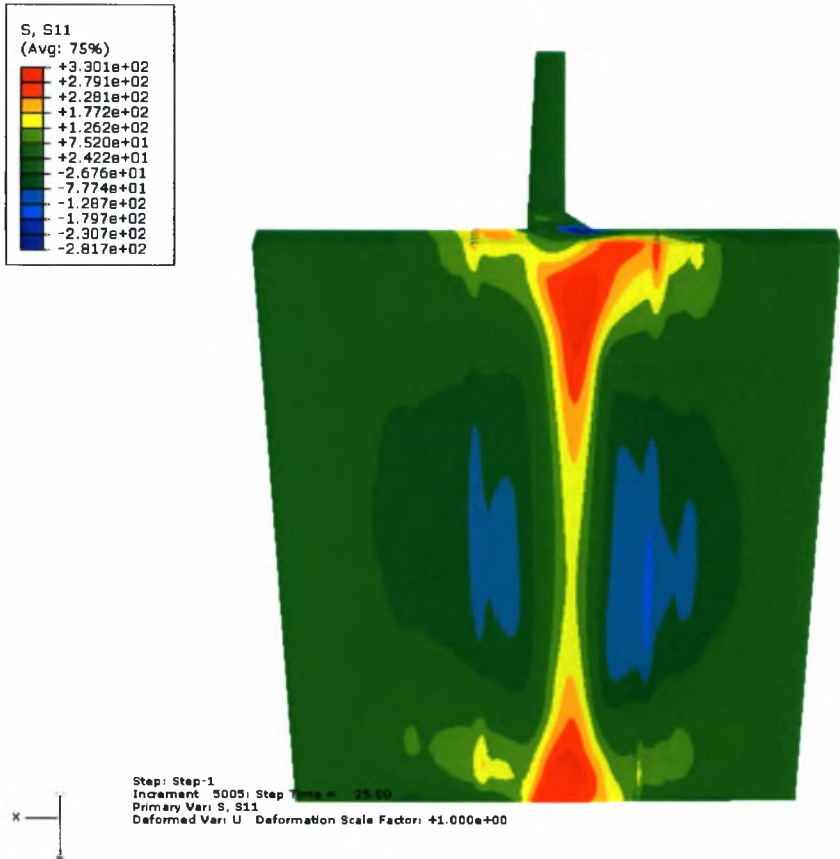
Step: Step-1
 Increment 5005; Step Time = 25.00
 Primary Vari: S, S11
 Deformed Vari: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Σχήμα 5.16β₁ : Ισοϋψείς τάσεως σ_{11} για $t=25\text{sec}$.

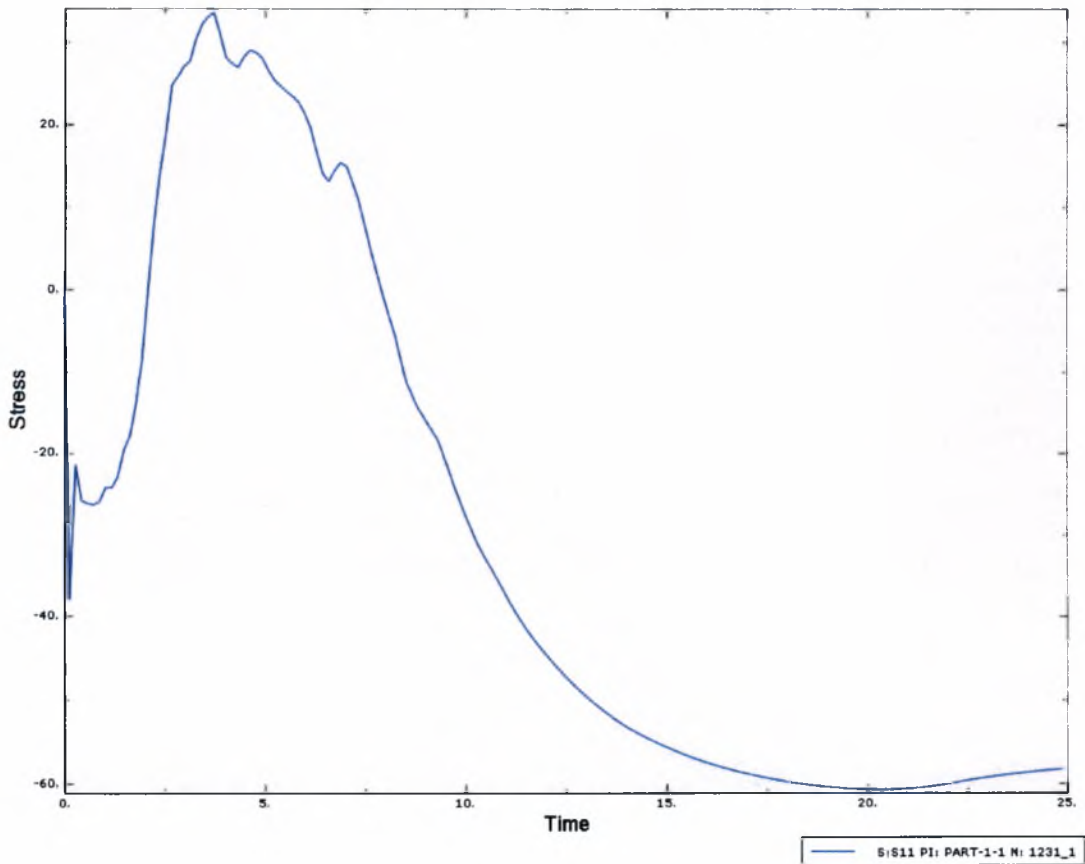


Step: Step-1
 Increment 5005; Step Time = 25.00
 Primary Vari: S, S11
 Deformed Vari: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

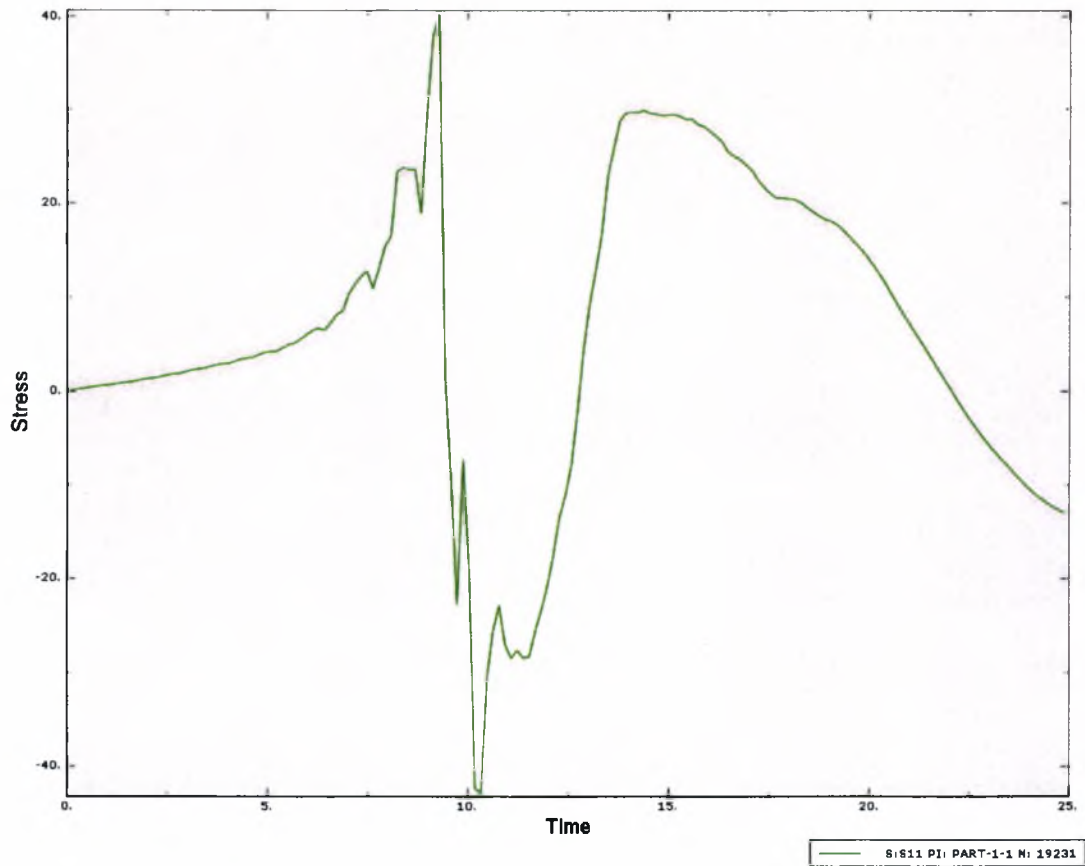
Σχήμα 5.16β₂ : Ισοϋψείς τάσεως σ_{11} για για $t=25\text{sec}$.



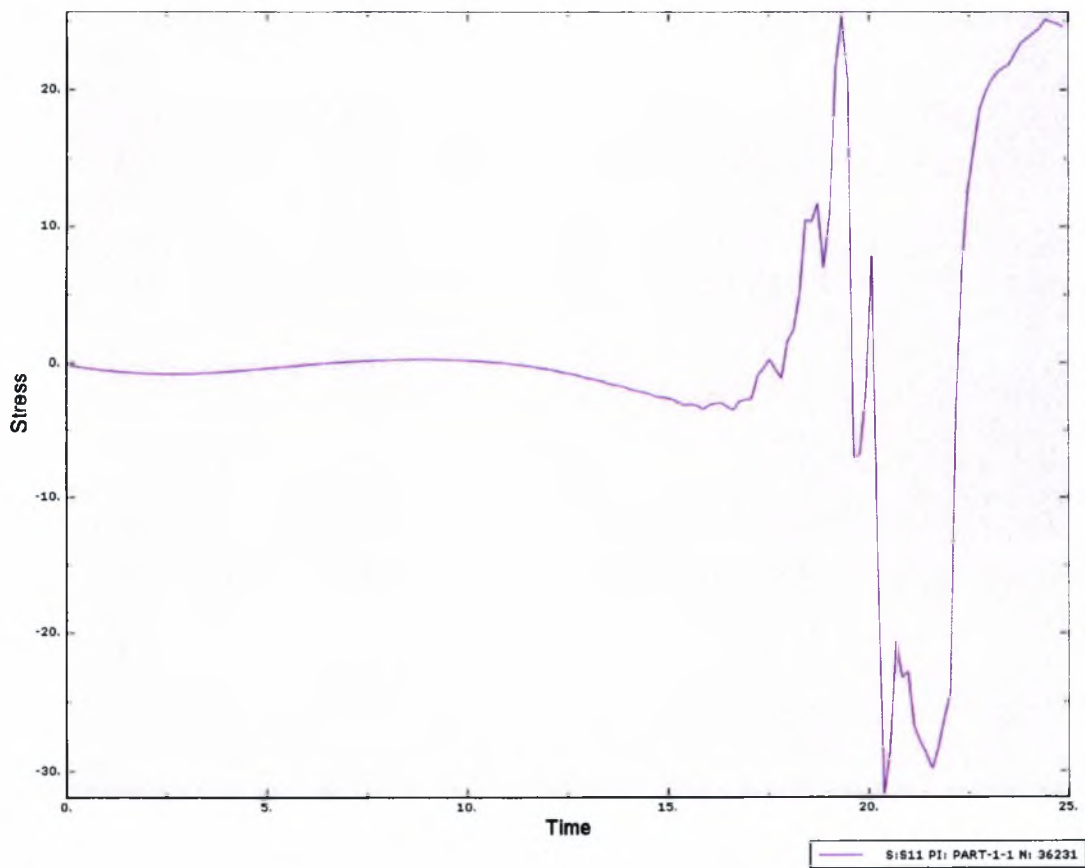
Σχήμα 5.16β: Ισοΰψεις τάσεως σ_{11} για $t=25\text{sec}$.



Σχήμα 5.17: Τάσεις σ_{11} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 1231



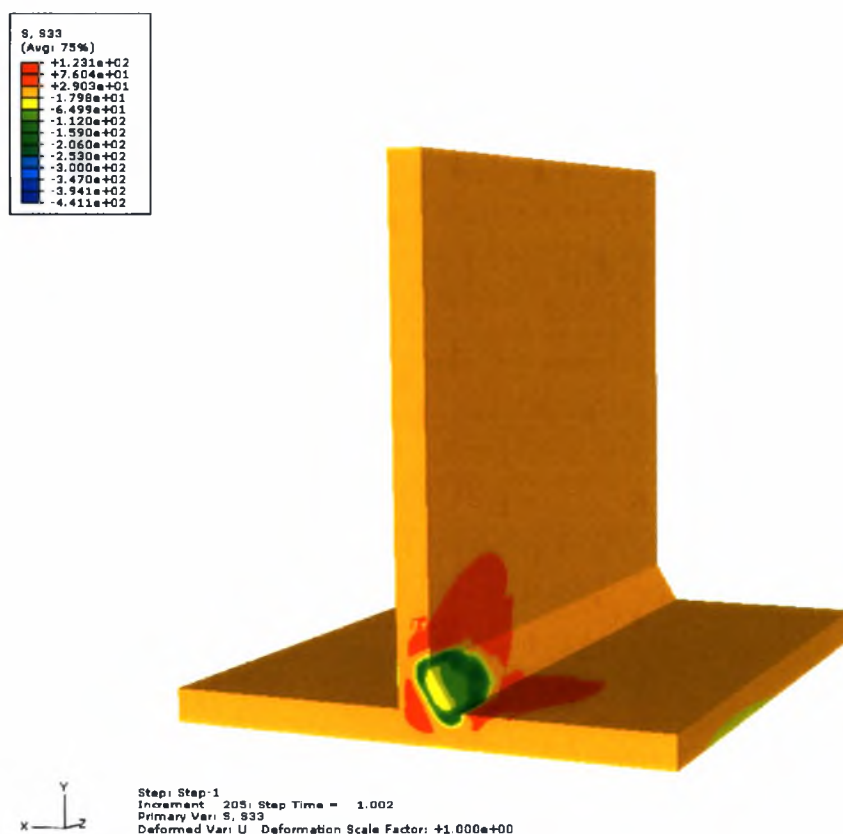
Σχήμα 5.18: Τάσεις σ_{11} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 19231.



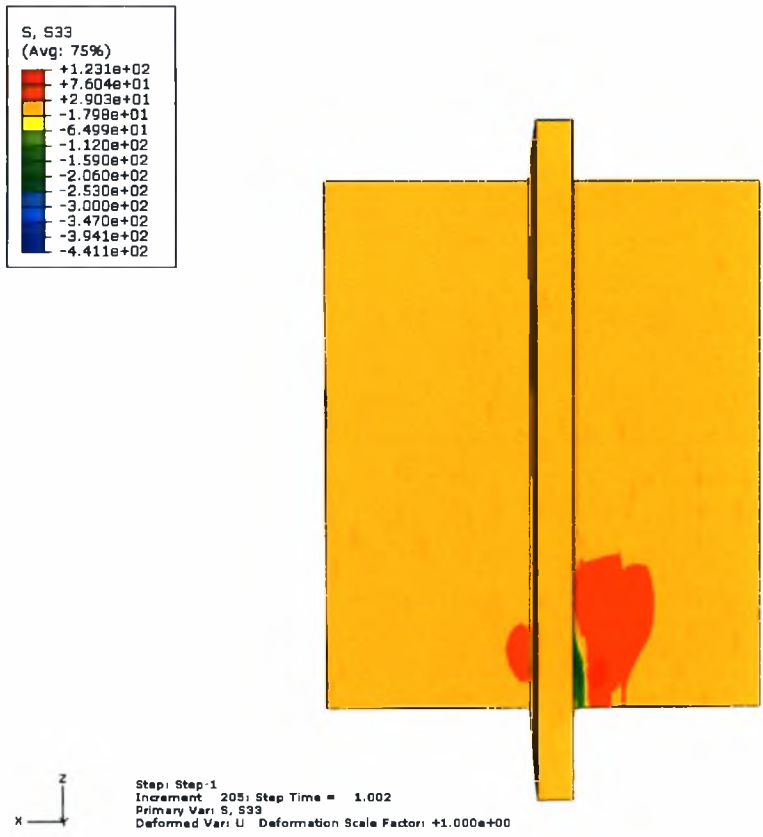
Σχήμα 5.19: Τάσεις σ_{11} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 36231.

Στα Σχήματα 5.20α, 5.20β, 5.20γ, 5.21α, 5.21β, 5.21γ, 5.22α₁, 5.22α₂, 5.22α₃ και 5.22β₁, 5.22β₂, 5.22β₃ παρουσιάζεται η εξέλιξη της τάσης σ_{11} (τάσεις κατά τον άξονα x) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

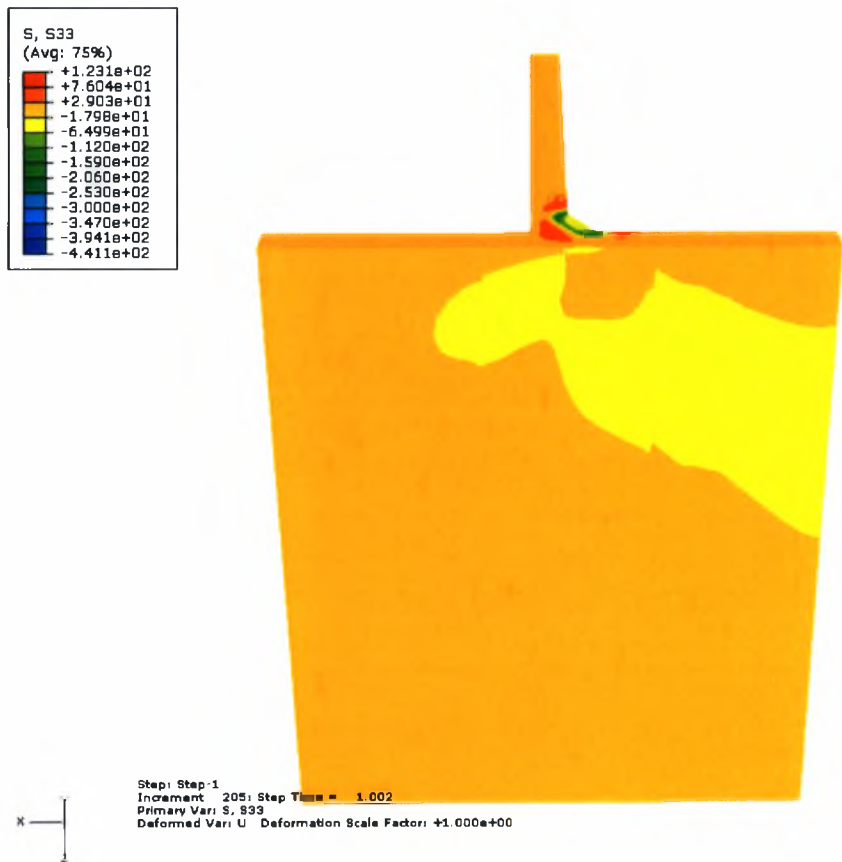
Στα Σχήματα 5.23, 5.24 και 5.25 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων αυτών στους κόμβους 1231, 19231 και 36231 κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης.



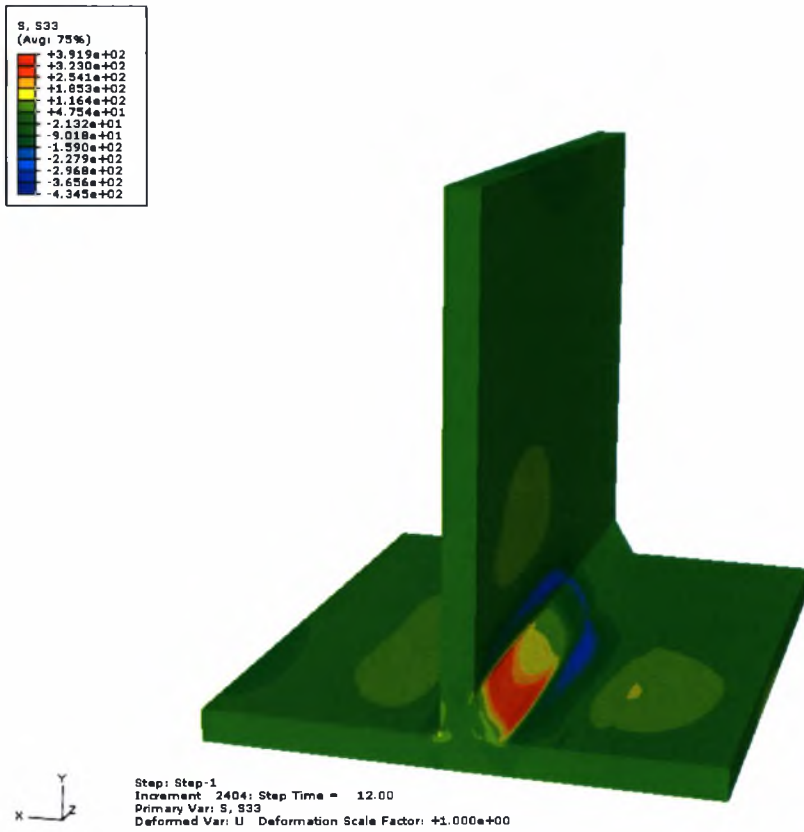
Σχήμα 5.20α : Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$.



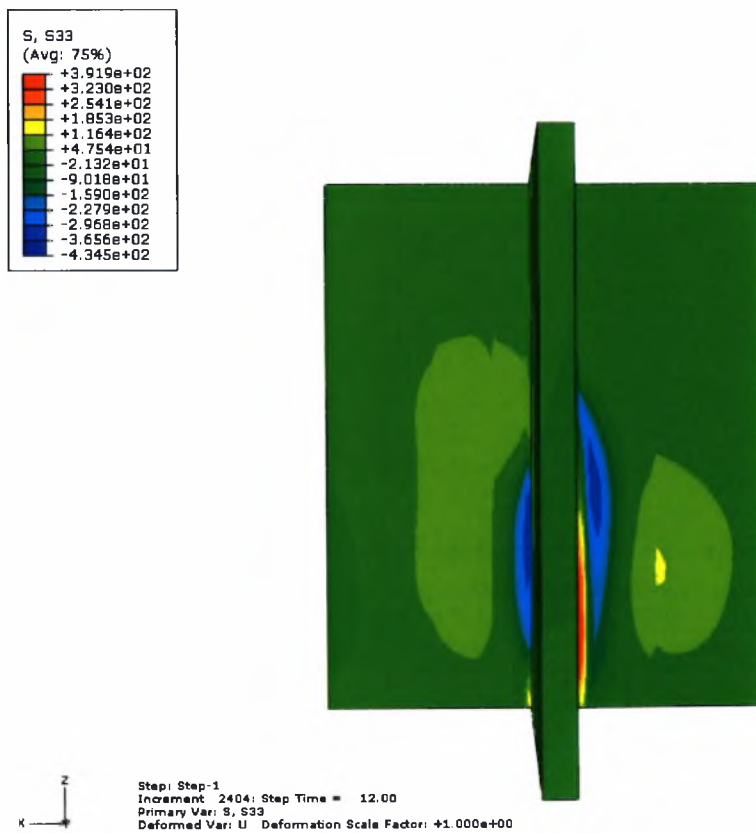
Σχήμα 5.20β : Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$.



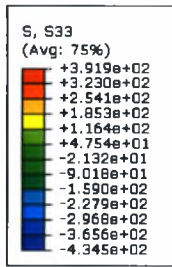
Σχήμα 5.20γ : Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=1.002\text{sec}$.



Σχήμα 5.21α : Ισοψείς της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$.

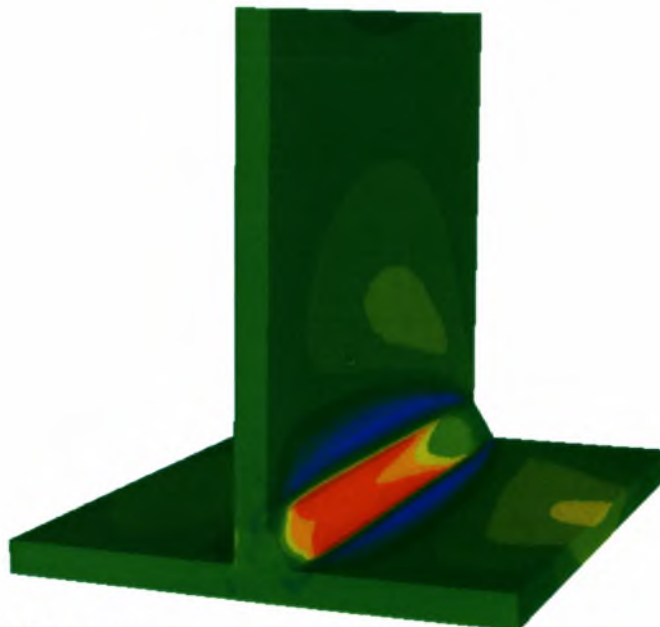
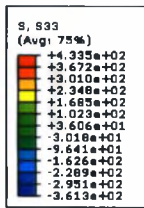


Σχήμα 5.21β : Ισοψείς της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$.



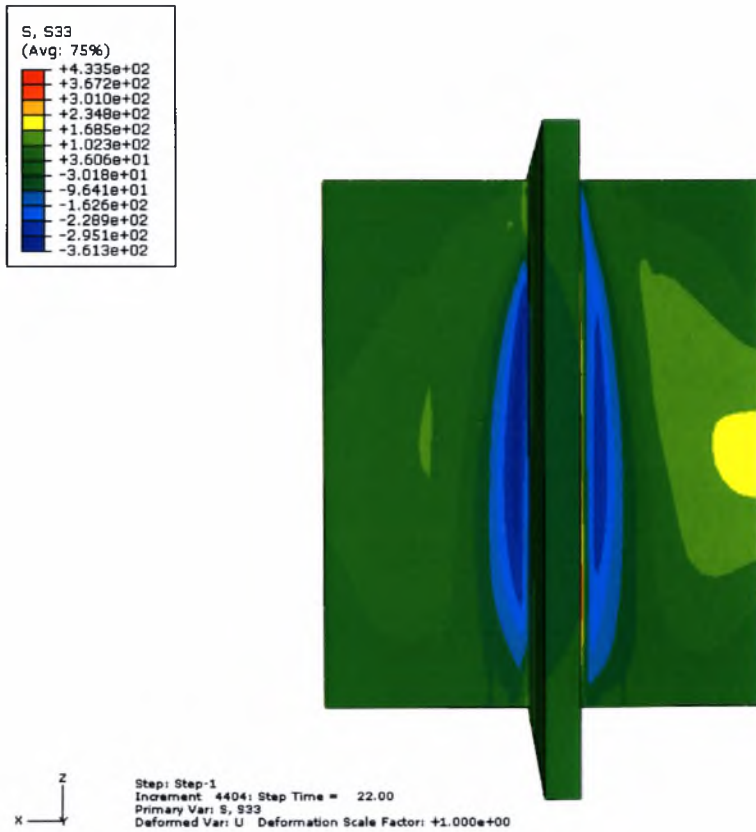
Step: Step-1
Increment: 2404; Step Time = 12.00
Primary Vari: S, S33
Deformed Vari: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Σχήμα 5.21γ : Ισοΰψεις της τάσεως σ_{33} για $t=12\text{sec}$.

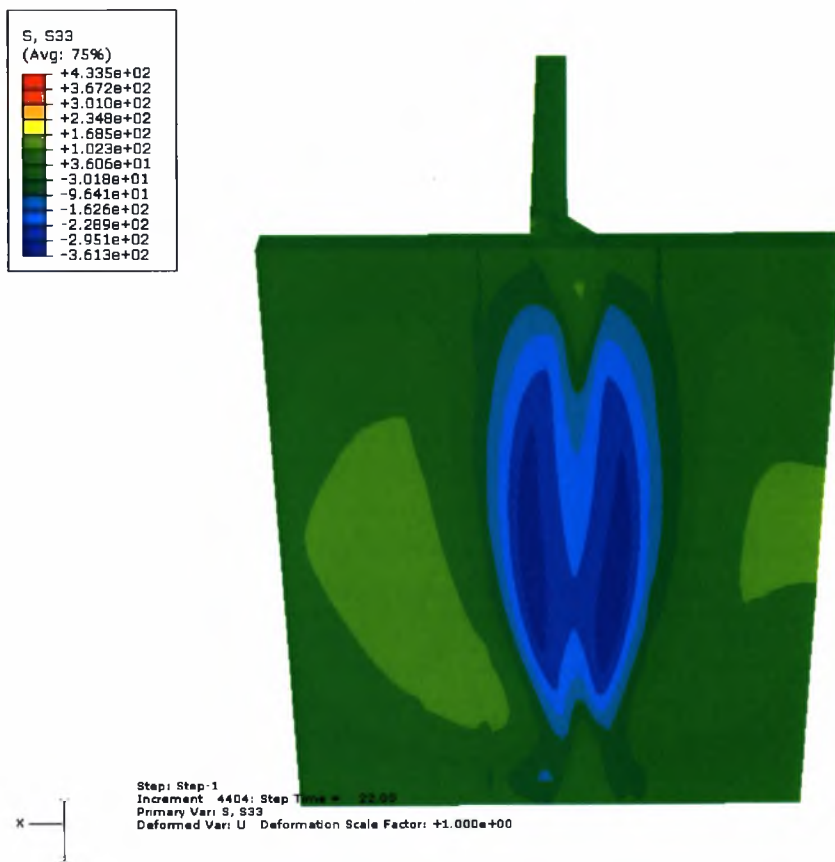


Step: Step-1
Increment: 4404; Step Time = 22.00
Primary Vari: S, S33
Deformed Vari: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

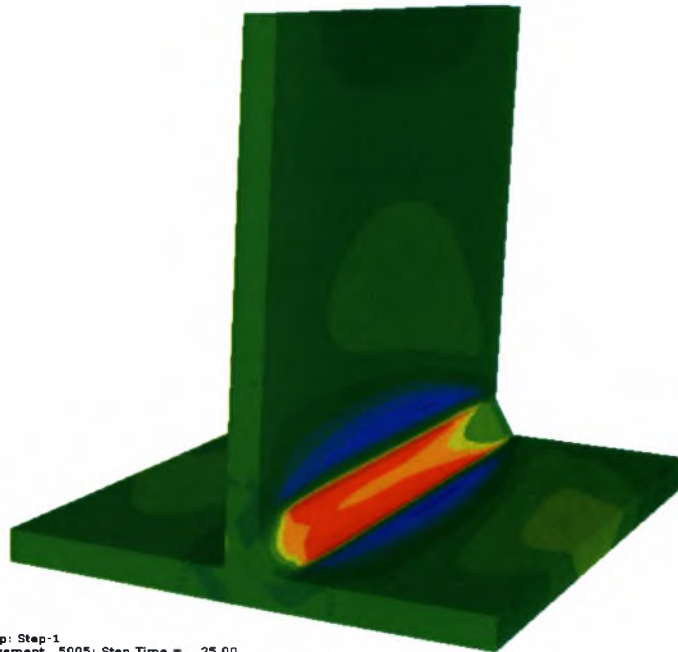
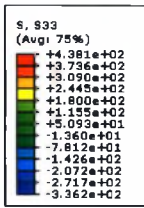
Σχήμα 5.22α₁ : Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$.



Σχήμα 5.22α₂: Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$.

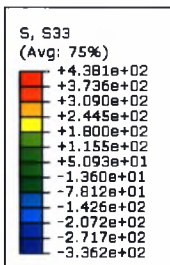


Σχήμα 5.22α₃: Ισοΰψεις τάσεως σ_{33} για $t=22\text{sec}$.



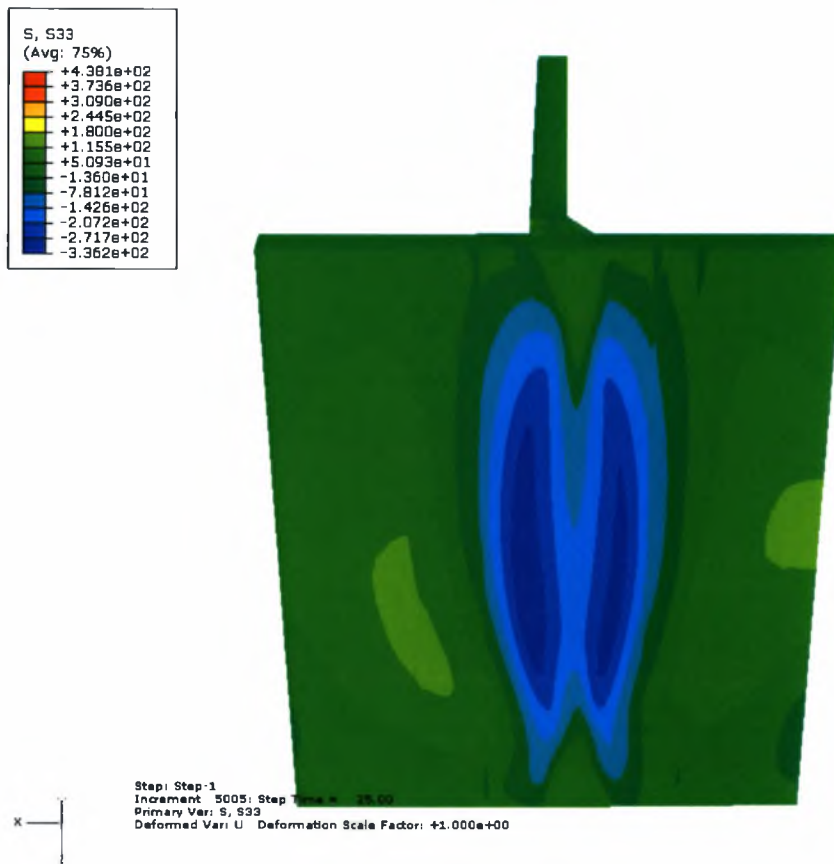
Step: Step-1
 Increment: 5005; Step Time = 25.00
 Primary Var: S, S33
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Σχήμα 5.22β₁ : Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$.

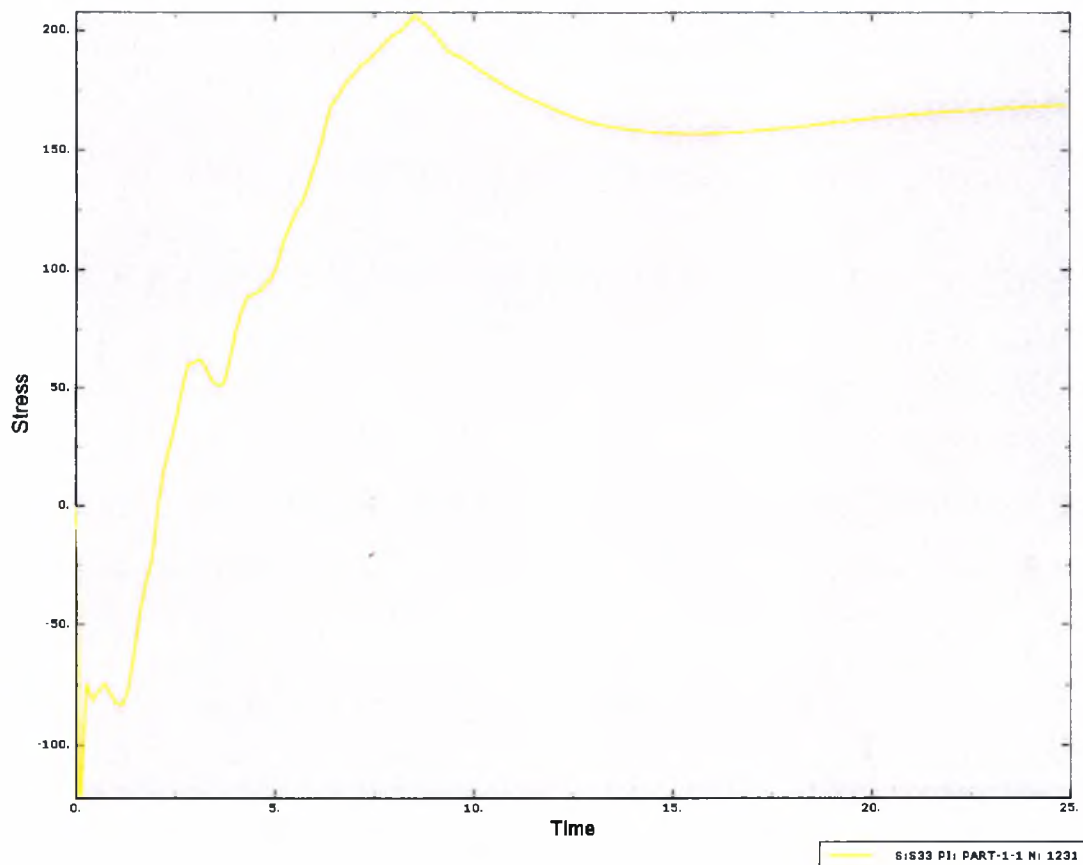


Step: Step-1
 Increment: 5005; Step Time = 25.00
 Primary Var: S, S33
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

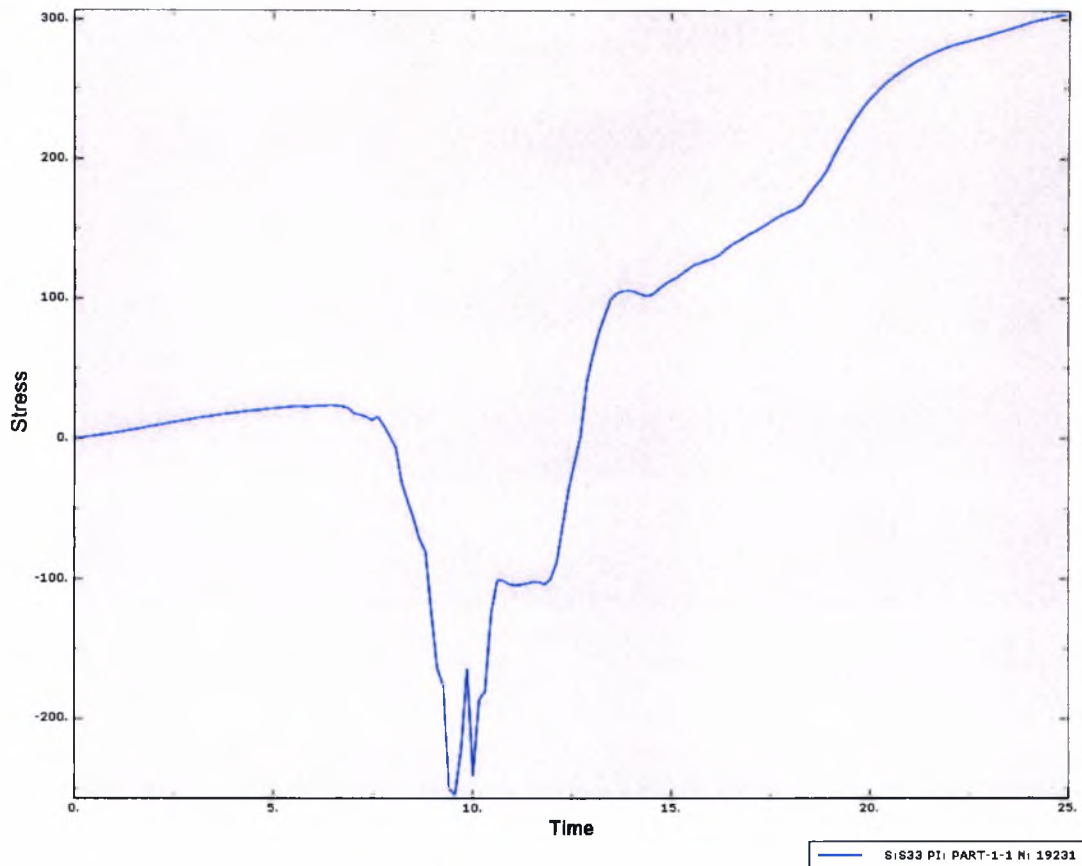
Σχήμα 5.22β₂ : Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$.



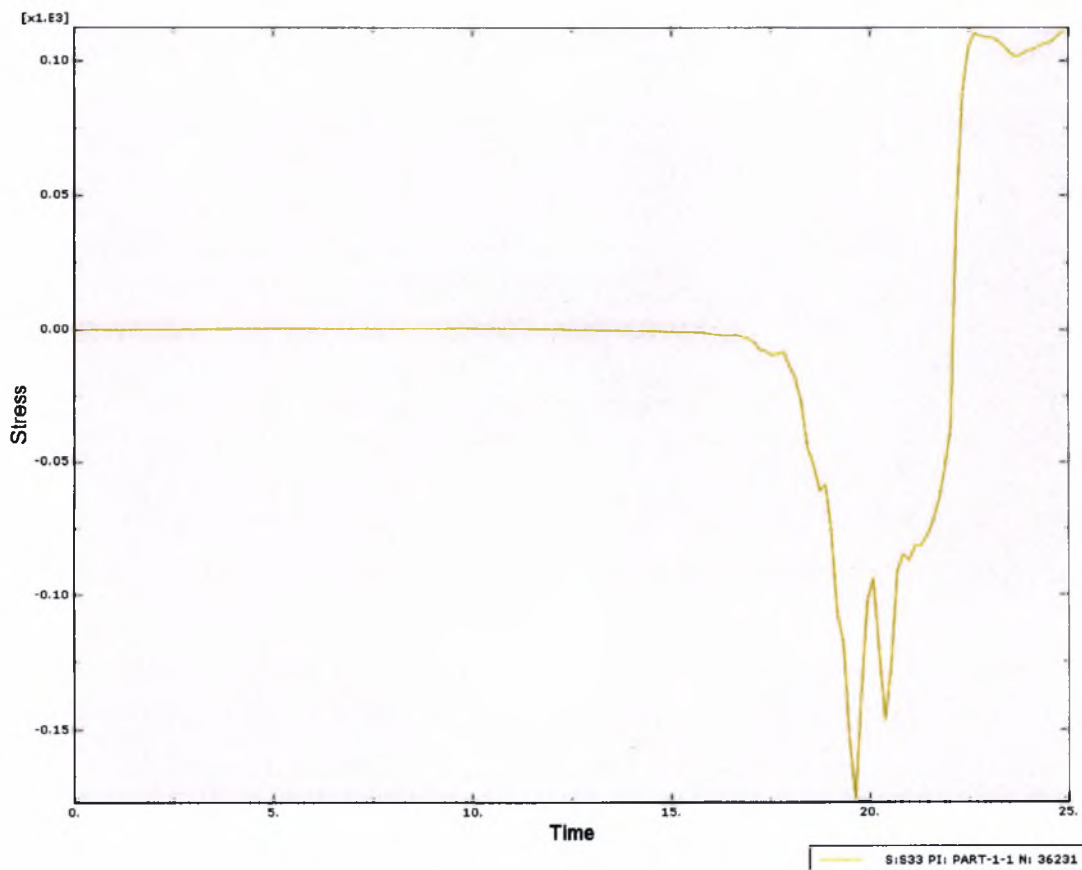
Σχήμα 5.22β: Ισοϋψείς τάσεως σ_{33} για $t=25\text{sec}$.



Σχήμα 5.23: Τάσεις σ_{33} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 1231.



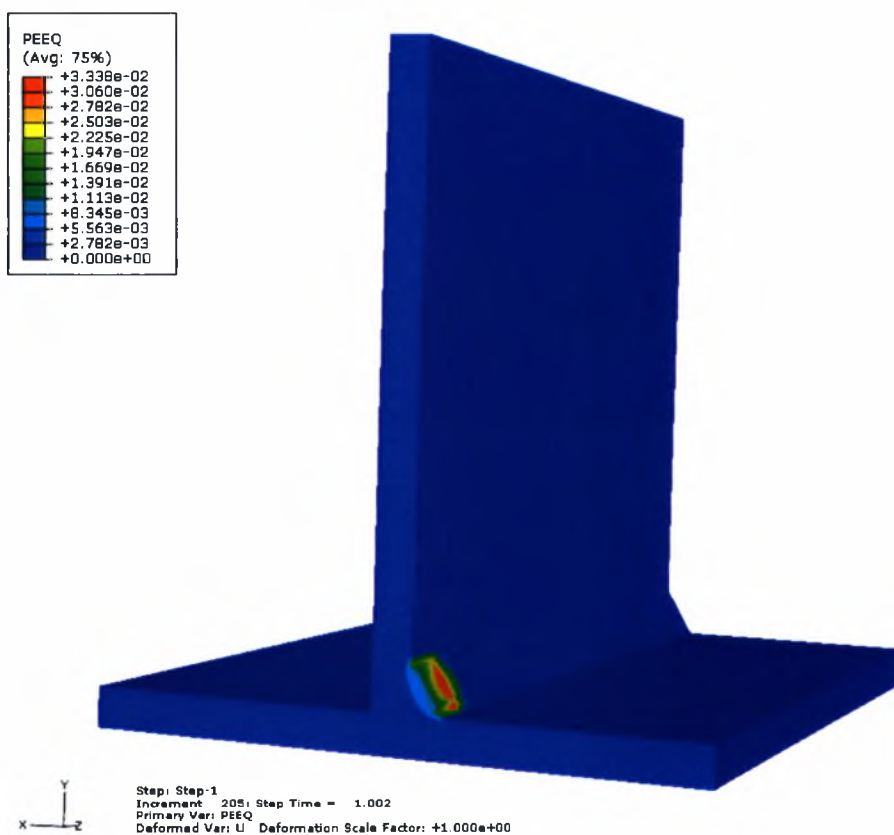
Σχήμα 5.24: Τάσεις σ_{33} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 19231.



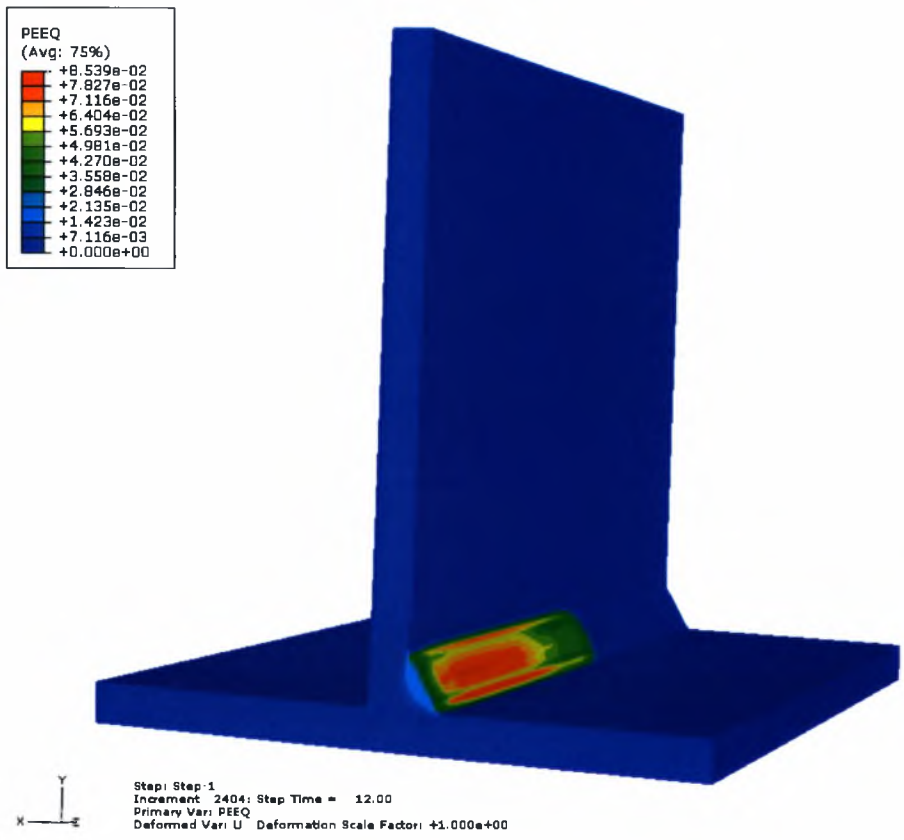
Σχήμα 5.25: Τάσεις σ_{33} συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 36231.

Στα Σχήματα 5.26, 5.27, 5.28α και 5.28β παρουσιάζονται οι ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

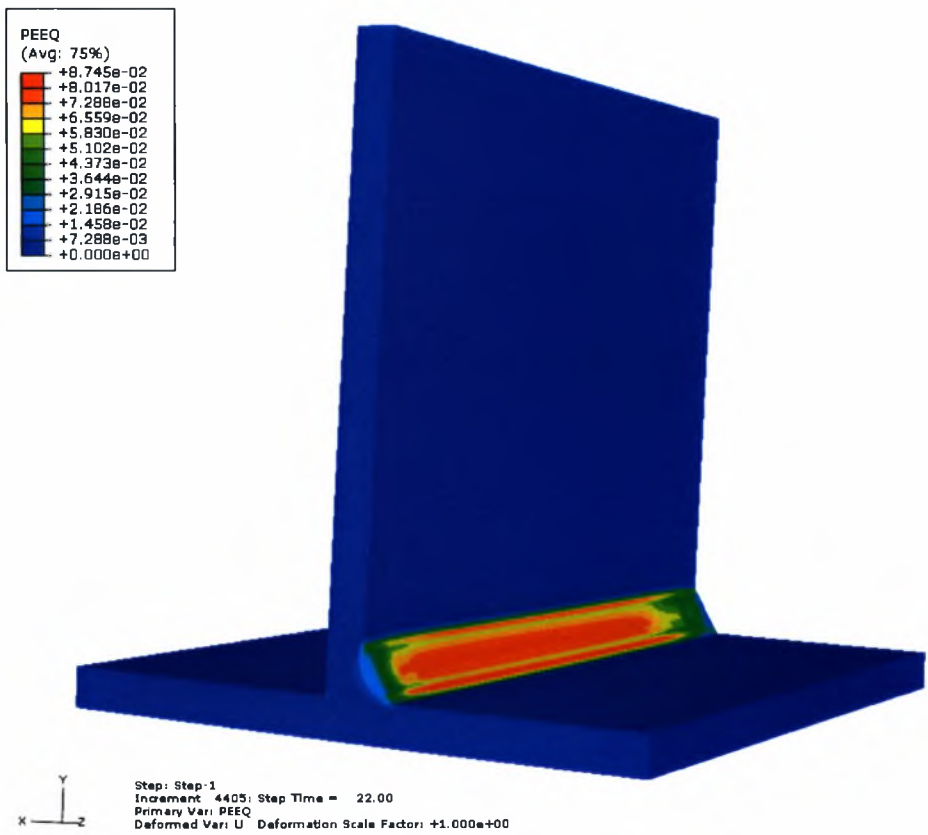
Στα Σχήματα 5.29, 5.30 και 5.31 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων αυτών στους κόμβους 1231, 19231 και 36231 κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης.



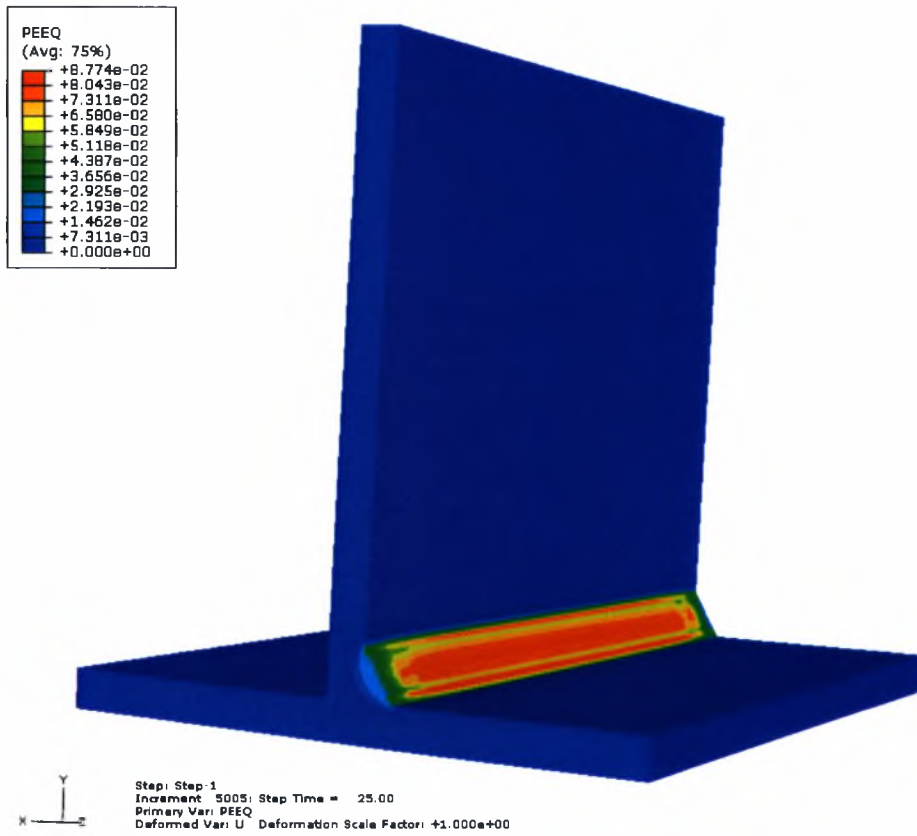
Σχήμα 5.26: Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=1.002\text{sec}$.



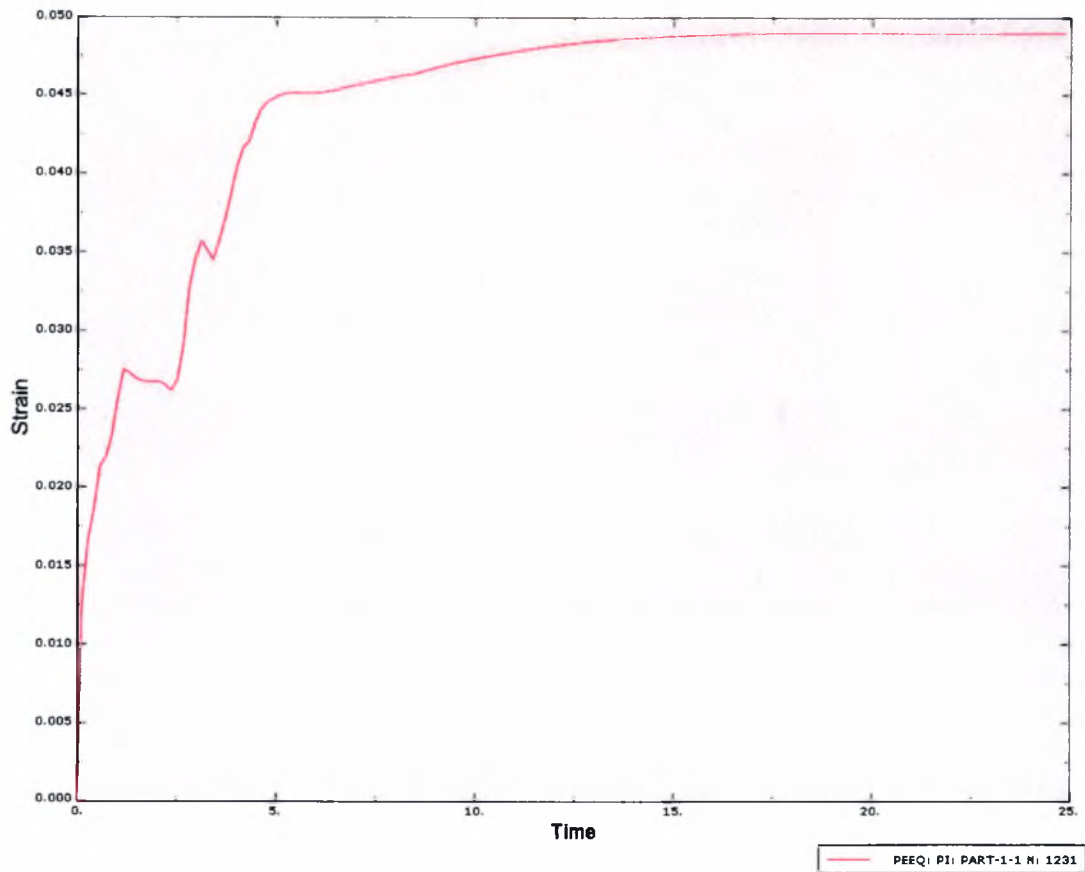
Σχήμα 5.27 : Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=12\text{sec}$.



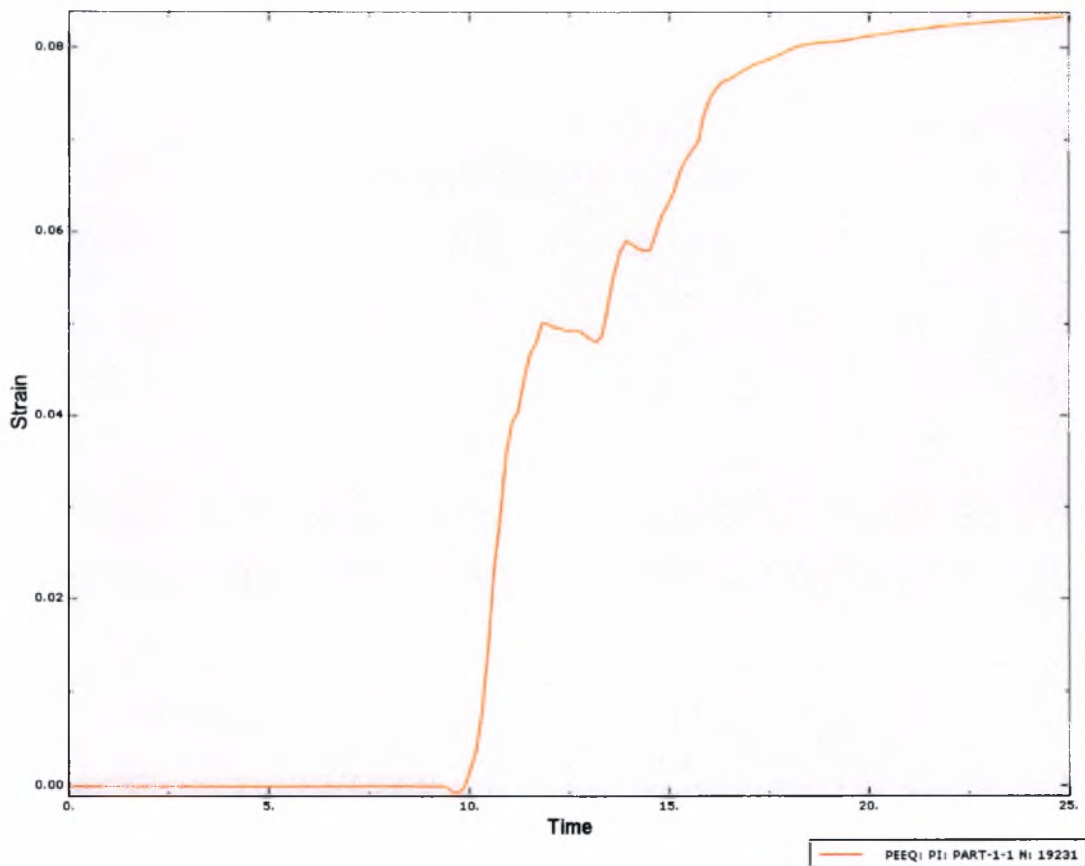
Σχήμα 5.28α : Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=22\text{sec}$.



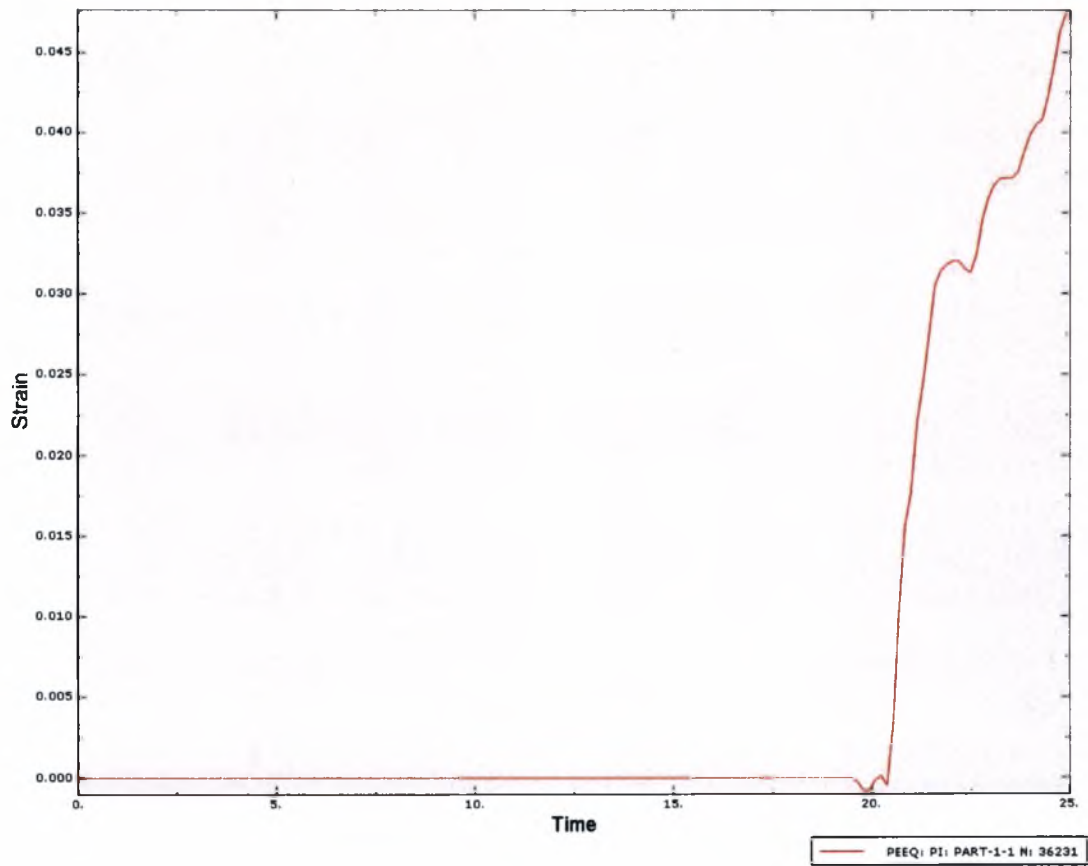
Σχήμα 5.28β: Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=25\text{sec}$.



Σχήμα 5.29 Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 1231



Σχήμα 5.30 : Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 19231.



Σχήμα 5.31: : Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβο 36231

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βασικότερο συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι είναι δυνατόν με την εφαρμογή της υπολογιστικής μηχανικής να πραγματοποιηθεί μία σχετικά ακριβής προσομοίωση της διαμόρφωσης της λίμνης συγκόλλησης των συγκολλήσεων MIG καθώς και των παραμενουσών τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτήν. Αυτό στην πράξη σημαίνει ότι για δεδομένες συνθήκες συγκόλλησης, είναι δυνατό να γίνει μία ικανοποιητική πρόβλεψη για το προφίλ της λίμνης συγκόλλησης. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία γιατί ανοίγει το δρόμο για τον ουσιαστικό έλεγχο και σχεδιασμό των συγκολλήσεων MIG στους χάλυβες και την επακόλουθη διεύρυνση των εφαρμογών της συγκόλλησης στις διάφορες κατασκευές.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των θερμοκρασιακών κατανομών στην λίμνη συγκόλλησης παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κοντά βρίσκεται η δέσμη του τόξου της συγκόλλησης σε κάποιον κόμβο τόσο πιο μεγάλη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό τον κόμβο. Συγκεκριμένα η θερμοκρασία αυτή είναι της τάξεως των 3500 βαθμών Κελσίου.

Παρατηρείται ότι για $t=22\text{sec}$, όταν δηλαδή η δέσμη βρίσκεται στο τέλος της συγκόλλησης η θερμοκρασία στον κόμβο 19231 που έχει θέση στη μέση της λίμνης συγκόλλησης είναι περίπου στους $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ όταν η δέσμη βρισκόταν κοντά στο κόμβο (δηλαδή για $t=12\text{sec}$), ο κόμβος είχε θερμοκρασία $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η ψύξη, λοιπόν είναι πολύ απότομη, αφού, σε διαφορά 10 sec η θερμοκρασία του κόμβου έπεσε $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η απότομη αυτή θερμοκρασιακή κατανομή είναι εμφανέστατη στο σχήμα 4.10, όπου διακρίνονται οι απότομες κλίσεις των καμπυλών.

Στις ισοϋψείς των τάσεων κατά von Mises παρατηρείται ότι οι τάσεις ξεπερνάνε το όριο διαρροής. Όπου αυτό συμβαίνει, υπάρχει πλαστική παραμόρφωση. Από την «ιστορία» των κόμβων φαίνεται ότι όταν η δέσμη βρίσκεται πάνω και κοντά στον κόμβο η τάση αυξάνεται απότομα.

Στη χρονική στιγμή $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (όταν η συγκόλληση έχει τελειώσει), οι τάσεις είναι μεγάλες στην αρχή και στην μέση της λίμνης συγκόλλησης (σχήμα 5.4α) και ξεπερνάν το όριο διαρροής του υλικού, που σημαίνει ότι εκεί η πλαστική παραμόρφωση αναμένεται να είναι μεγαλύτερη. Εντονότερα φαίνεται και στο σχήμα 5.4β για $t=25\text{sec}$, 3 sec μετά το τέλος της συγκόλλησης.

Συγκεκριμένα στο κόμβο **1231** (βρίσκεται στην αρχή της λίμνης συγκόλλησης) για $t=25\text{sec}$ η θερμοκρασία είναι περίπου $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το όριο διαρροής του υλικού για την συγκεκριμένη θερμοκρασία (σχήμα 2.5) είναι περίπου 320 MPa , ενώ η τάση κατά von Mises είναι περίπου 400 MPa . Στο κόμβο **19231** (βρίσκεται στη μέση της λίμνης συγκόλλησης) για $t=25\text{sec}$ η θερμοκρασία είναι περίπου $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το όριο διαρροής του υλικού για την συγκεκριμένη θερμοκρασία (σχήμα 2.5) είναι περίπου 200 MPa , ενώ η τάση κατά von Mises είναι περίπου 400 MPa . Ενώ στο κόμβο **36231** (βρίσκεται στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης) για $t=25\text{sec}$ η θερμοκρασία είναι περίπου $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το όριο διαρροής του υλικού για την συγκεκριμένη θερμοκρασία (σχήμα 2.5) είναι περίπου 100 MPa , ενώ η τάση κατά von Mises είναι περίπου 120 MPa .

Από τα αποτελέσματα των τάσεων σ_{11} και σ_{33} παρατηρείται ό,τι είναι γνωστό και από την θεωρία, δηλαδή γύρω από την λίμνη συγκόλλησης, στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις ενώ στην λίμνη της συγκόλλησης εφελκυστικές. Καθώς φαίνονται επίσης και οι εναλλαγές από εφελκυστικές σε θλιπτικές και το ανάποδο. Είναι έντονες, στα σχήματα με τις «ιστορίες των κόμβων, οι απότομες κλίσεις των καμπυλών όταν η δέσμη βρίσκεται κοντά στον κάθε κόμβο.

Στα αποτελέσματα της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, από τα σχήματα 5.29, 5.30, 5.31 («ιστορίες» των κόμβων) παρατηρείται ότι στον κόμβο **19231** η πλαστική παραμόρφωση για $t=25\text{sec}$, όπως φαινόταν και από τα αποτελέσματα των τάσεων κατά von Mises, είναι μεγαλύτερη από ότι στο κόμβο **36231**. Στον κόμβο **19231** είναι $0,08$ ενώ στον κόμβο **36231** είναι $0,045$.

Συμπερασματικά, από το θερμικό πρόβλημα φάνηκε ότι η συγκόλληση χαρακτηρίζεται από απότομη ψύξη η οποία δημιουργεί θερμοκρασιακή ανομοιομορφία. Αποτέλεσμα αυτής της ανομοιομορφίας αυτής είναι η ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων, όπως φάνηκε από την ανάλυση των τάσεων, και η ανάπτυξη πλαστικής παραμόρφωσης. Η πλαστική παραμόρφωση είναι εντονότερη στο κομμάτι της λίμνης συγκόλλησης που έχει ψυχθεί, ενώ εκεί όπου η πτώση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη, παρατηρείται και μικρότερη πλαστική παραμόρφωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από την προσομοίωση της συγκόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων St52 προέκυψαν πολλά ερωτήματα, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε συγκολλήσεις συμβολής αλλά και σε συγκολλήσεις με γωνιακή σύνδεση δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της πτυχιακής αφορούσαν συγκολλήσεις με σύνδεση T
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιώντας άλλου μεθόδους συγκόλλησης όπως TIG και laser.
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιώντας δυο συγκολλητές. και σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Προσομοίωση των μετασχηματισμών φάσεων που συμβαίνουν στη λίμνη συγκόλλησης κατά τη στερεοποίηση και πρόβλεψη των αντίστοιχων παραμενουσών τάσεων αλλά και της σκληρότητας.
- Συνδυασμό των παραπάνω προτάσεων.
- Επέκταση της ίδιας εργασίας με αλλαγή στην διακριτοποίηση των στοιχείων και πραγματοποίηση πειραμάτων με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων αλλά και εμβάθυνση της.
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε κράματα αλουμινίου δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από τις βιομηχανίες για την εισαγωγή των συγκολλήσεων των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου, στην κατασκευή των αεροσκαφών, των πλοίων και πληθώρα άλλων κατασκευών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Φυσική Μεταλλουργία (Θεμελιώδης Αρχές), Βόλος 2000, **Γ.Ν.Χαιδεμενοπουλος**, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας.
2. Επιστήμη Και Τεχνική Συγκολλήσεων (Σημειώσεις), Αθηνά 1989, **Βας.Ι. Παπαζογλου**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
3. **Asm Handbook** (Volume 1), Properties And Selection Irons, Steels And High-Performance Alloys.
4. The Finite Element Method In Engineering, **S.S.Rao**, Professor Of Mechanical Engineering San Diego State University, San Diego, Usa And Indian Institute Of Technology, Kanpur, India.
5. Abaqus Keywords Manual Version 6.2.
6. Abaqus /Explicit User's Manual Version 6.3.
7. Διδακτορική Διατριβή Με Θέμα: Συγκολλήσεις Κραμάτων Αλουμινίου Με Laser: Πειραματική Μελέτη Και Προσομοίωση Της Διαμόρφωσης Μικροδομής Της ΘΕΖ, **Ζερβακη Άννα**, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος.
8. Διδακτορική Διατριβή Με Θέμα: Θερμομηχανική Ανάλυση Και Πειραματική Διερεύνηση Συγκολλήσεων Χαλύβων Με Μετασχηματισμούς Φάσεις, Εφαρμογή Στο Χάλυβα **Ck45**, **Δ. Γ. Καραλη**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
9. Διατριβή Με Θέμα : Computer Simulation Of Residual Stress And Ddistortion Of Thick Plates In Multi-Electrode Submerged Arc Welding. Their Mitigation Techniques **By Artem Pilipenko**, Department Of Machine Design And Materials Technology Norwegian University Of Science And Technology N-7491 Trondheim, Norway, Trondheim July 2001
10. Διαδικτυακός Χώρος, Www.Google.Com.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



00400009 1655

