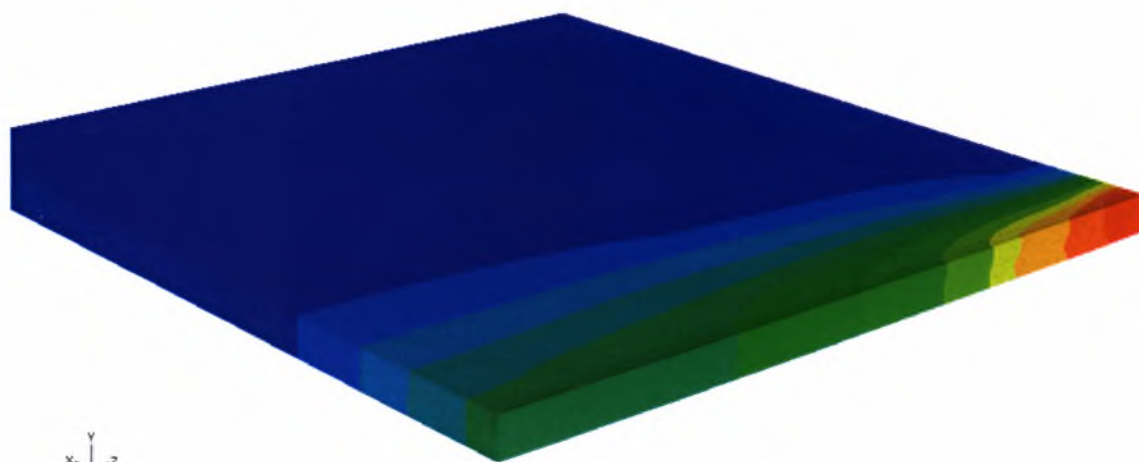




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024  
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ LASER CO<sub>2</sub>  
ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΚΑΙ  
ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Μ. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗ**

**Επιβλέπων Καθηγητής : Ν. ΑΡΑΒΑΣ**

**Βόλος, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2010**



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

Αριθ. Εισ.: 8351/1  
Ημερ. Εισ.: 14-04-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
669.967 22  
ΦΡΑ

© 2010 Φραγκιαδάκη Ευαγγελία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών 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 Δρ. Αράβας Νικόλαος  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

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

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξιος  
Λέκτορας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
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 τον καθηγητή του τμήματος του Π.Θ. Χαιδεμενόπουλο Γρηγόριο και την συνεργάτιδα του Τμήματος Μηχανολόγων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας Dr. Άννα Ζερβάκη για την βοήθεια τους, τις συμβουλές τους και κυρίως για το ενδιαφέρον τους.

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.

Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου και τις φίλες μου 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

Η Θερμομηχανική και ειδικότερα η μελέτη των παραμενουσών τάσεων κατά την συγκόλληση κράματος αλουμινίου με laser CO<sub>2</sub>, είναι το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας.

Για την ανάπτυξη της εργασίας έγινε προσομοίωση συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων κατασκευασμένα από κράμα αλουμίνιο Al 2024. Τα κράματα αλουμινίου, λόγω των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τους, είναι σήμερα από τα βασικά δομικά υλικά σε κατασκευαστικές δραστηριότητες. Οι συγκολλήσεις με δέσμη laser (Laser Beam Welding, LBW) έχουν γίνει πλέον κοινή πρακτική στις γραμμές. Αποτελεί σημαντικό βήμα για την παραγωγή μεταλλικών κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης. Στις μέρες μας η μέθοδος αυτή, αναπτύσσεται ραγδαία και τείνει να αντικαταστήσει πολλές από τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

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. Δεδομένου ότι η εύστοχη και ταχεία «πρόβλεψη» αποτελεί σήμερα το ζητούμενο στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική βιομηχανία, το μοντέλο αυτό αποσκοπεί στο να «προβλέψει» τη θερμική και μηχανική απόκριση των προς συγκόλληση ελασμάτων πριν την πραγματοποίηση των ίδιων των συγκολλήσεων.

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

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	8
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ</b> .....	14
2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	14
2.2 ΥΛΙΚΟ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ : ΑΙ 2024.....	15
2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	15
2.2.2 ΥΛΙΚΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΑΙ 2024 .....	19
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER CO <sub>2</sub> .....	21
2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	21
2.3.2 ΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ</b> .....	32
3.1. ΓΕΝΙΚΑ .....	32
3.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	32
3.2.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑ- ΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	33
3.2.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	35
3.2.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛ- ΛΗΣΕΙΣ.....	35
3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ .....	37
3.3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	39
3.3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ .....	39
3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	40
3.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	41
3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	41
3.4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑ- ΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	42
3.5 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΟΛ- ΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ .....	43
3.5.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΛΟΓΩ	

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ .....	43
3.5.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ .....	45
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	47
3.6.1 ΥΛΙΚΟ .....	47
3.6.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	47
3.6.3 ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ .....	49
3.6.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	50
3.6.5 ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	51
3.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	51
3.8 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	53
3.8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ     ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....</b>	<b>57</b>
4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	57
4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ .....	61
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	64
4.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ $\underline{\Delta E L T M X = 3000}$ .....	64
4.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ $\underline{\Delta E L T M X = 3000}$ .....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....</b>	<b>69</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>94</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>98</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>99</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1:</b> (α) Ελάσματα (β) Μοντέλο κατασκευής 3D.....	14
<b>Σχήμα 2.2:</b> Διαδικασία παραγωγής της ακτίνας Laser.....	22
<b>Σχήμα 2.3:</b> Διάταξη συγκόλλησης με δέσμη Laser.....	22
<b>Σχήμα 2.4:</b> Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης σε σχέση με την προστιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια.....	25
<b>Σχήμα 2.5:</b> Γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης με Laser του τύπου (α) με αγωγή και (β) με σχηματισμό «μαύρης οπής».....	27
<b>Σχήμα 2.6:</b> Προφίλ συγκόλλησης με Laser (α) Συγκόλληση με Laser μέσω αγωγής (β) Συγκόλληση με Laser με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης.....	27
<b>Σχήμα 2.7:</b> Ισόθερμες κατά τη διαδικασία συγκόλλησης με Laser με αγωγή.....	28
<b>Σχήμα 2.8:</b> Φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας κατά την διεργασία συγκόλλησης με Laser με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης.....	29
<b>Σχήμα 3.1:</b> Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων.....	36
<b>Σχήμα 3.2:</b> Μεθοδολογίες για την ανάλυση παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις.....	41
<b>Σχήμα 3.3:</b> Τυπική κατανομή παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση κατά συμβολή.....	44
<b>Σχήμα 3.4:</b> Τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές διατομές.....	46
<b>Σχήμα 3.5:</b> Κατανομή παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή μηκών.....	48
<b>Σχήμα 3.6:</b> Επίδραση του μήκους συγκόλλησης στη μέγιστη παραμένουσα τάση.....	49
<b>Σχήμα 3.7:</b> Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους.....	50
<b>Σχήμα 3.8:</b> Σχηματικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων.....	52
<b>Σχήμα 3.9:</b> Βασικοί τύποι παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση.....	55
<b>Σχήμα 4.1:</b> (α) Σχηματική παράσταση των ελασμάτων και της λίμνης συγκόλλησης (β) Σχηματική παράσταση του ελάσματος προσομοίωσης.....	58
<b>Σχήμα 4.2:</b> (α) Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων 3-D κατά άξονα x και y (πρόσοψη) (β) Μεγέθυνση περιοχής.....	59
<b>Σχήμα 4.3:</b> (α) Μήκος στοιχείων στον άξονα z (β) Διακριτοποίηση κατά άξονα z (πλάγια όψη).....	60
<b>Σχήμα 4.4:</b> Συνοριακές συνθήκες.....	61
<b>Σχήμα 4.5:</b> Επιφάνεια πρόσπτωσης της ακτίνας Laser.....	61
<b>Σχήμα 4.6:</b> Μεγέθυνση της επιφάνειας σχήματος 4.4.....	62
<b>Σχήμα 4.7:</b> Κατανομή Gauss της ακτίνας Laser.....	62
<b>Σχήμα 4.8:</b> Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=0.2\text{sec}$ .....	65
<b>Σχήμα 4.9:</b> Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=1.8\text{sec}$ .....	66
<b>Σχήμα 4.10:</b> Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=4\text{sec}$ .....	66
<b>Σχήμα 4.11:</b> Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=10\text{sec}$ .....	66
<b>Σχήμα 4.12:</b> Θερμικοί κύκλοι κόμβων 10022, 500022 και 990022.....	67
<b>Σχήμα 4.13:</b> Θέση κόμβων στον κάνναβο.....	67
<b>Σχήμα 4.14:</b> : Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για $t=0.2\text{sec}$ (DELTMX=300).....	68
<b>Σχήμα 4.15:</b> Θερμικός κύκλος κόμβου 10022.....	68

<b><u>Σχήμα 5.1:</u></b> Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D .....	69
<b><u>Σχήμα 5.2:</u></b> Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=0.2\text{sec}$ .....	71
<b><u>Σχήμα 5.3:</u></b> Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=1.8\text{sec}$ .....	71
<b><u>Σχήμα 5.4:</u></b> Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=4\text{sec}$ .....	72
<b><u>Σχήμα 5.5:</u></b> Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=10\text{sec}$ .....	72
<b><u>Σχήμα 5.6:</u></b> Τάσεις κατά von Mises συναρτήσει του χρόνου ( $\text{DELTMX}=3000$ ).....	73
<b><u>Σχήμα 5.7:</u></b> Ισοΰψεις της πίεσης για $t=0.2\text{sec}$ .....	74
<b><u>Σχήμα 5.8:</u></b> Ισοΰψεις της πίεσης για $t=1.8\text{sec}$ .....	74
<b><u>Σχήμα 5.9:</u></b> Ισοΰψεις της πίεσης για $t=4\text{sec}$ .....	75
<b><u>Σχήμα 5.10:</u></b> Ισοΰψεις της πίεσης για $t=10\text{sec}$ .....	75
<b><u>Σχήμα 5.11:</u></b> Πίεση συναρτήσει του χρόνου σε τρεις κόμβους στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης .....	76
<b><u>Σχήμα 5.12:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{11}$ για $t=0.2\text{sec}$ .....	77
<b><u>Σχήμα 5.13:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{11}$ για $t=1.8\text{sec}$ .....	77
<b><u>Σχήμα 5.14:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{11}$ για $t=4\text{sec}$ .....	78
<b><u>Σχήμα 5.15:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{11}$ για $t=10\text{sec}$ .....	78
<b><u>Σχήμα 5.16:</u></b> Τάσεις $\sigma_{11}$ συναρτήσει του χρόνου για τρεις κόμβους στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης .....	79
<b><u>Σχήμα 5.17:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{33}$ για $t=0.2\text{sec}$ .....	80
<b><u>Σχήμα 5.18:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{33}$ για $t=1.8\text{sec}$ .....	80
<b><u>Σχήμα 5.19:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{33}$ για $t=4\text{sec}$ .....	81
<b><u>Σχήμα 5.20:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{33}$ για $t=10\text{sec}$ .....	81
<b><u>Σχήμα 5.21:</u></b> Τάσεις $\sigma_{33}$ συναρτήσει του χρόνου για κόμβους στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης ( $\text{DELTMX}=3000^{\circ}\text{C}$ ) .....	82
<b><u>Σχήμα 5.22:</u></b> Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=0.2\text{sec}$ .....	83
<b><u>Σχήμα 5.23:</u></b> Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=1.8\text{sec}$ .....	83
<b><u>Σχήμα 5.24:</u></b> Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=4\text{sec}$ .....	84
<b><u>Σχήμα 5.25:</u></b> Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=10\text{sec}$ .....	84
<b><u>Σχήμα 5.26:</u></b> Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης .....	85
<b><u>Σχήμα 5.27:</u></b> Τομή AA' δοκιμίου.....	85
<b><u>Σχήμα 5.28:</u></b> Κομμάτι δοκιμίου που μελετήθηκε.....	86
<b><u>Σχήμα 5.29:</u></b> Τμήματα $x_1, x_2, x_3$ «κομμένου» ελάσματος.....	86
<b><u>Σχήμα 5.30:</u></b> Ισοΰψεις της θερμοκρασίας για $t=10\text{sec}$ .....	87
<b><u>Σχήμα 5.31:</u></b> Θερμικός κύκλος συναρτήσει $x_i$ .....	87
<b><u>Σχήμα 5.32:</u></b> Ισοΰψεις της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για $t=10\text{sec}$ .....	88
<b><u>Σχήμα 5.33:</u></b> Τάσεις κατά von Mises συναρτήσει $x_i$ .....	88
<b><u>Σχήμα 5.34:</u></b> Ισοΰψεις της πίεσης για $t=10\text{sec}$ .....	89
<b><u>Σχήμα 5.35:</u></b> Πίεση συναρτήσει $x_i$ .....	89
<b><u>Σχήμα 5.36:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{11}$ για $t=10\text{sec}$ .....	90
<b><u>Σχήμα 5.37:</u></b> Τάσεις $\sigma_{11}$ συναρτήσει $x_i$ .....	90
<b><u>Σχήμα 5.38:</u></b> Ισοΰψεις τάσεως $\sigma_{33}$ για $t=10\text{sec}$ .....	91
<b><u>Σχήμα 5.39:</u></b> Τάσεις $\sigma_{33}$ συναρτήσει $x_i$ .....	91
<b><u>Σχήμα 5.40:</u></b> Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για $t=10\text{sec}$ .....	92
<b><u>Σχήμα 5.41:</u></b> Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει $x$ .....	92
<b><u>Σχήμα 5.42:</u></b> Τάσεις $\sigma_{33}$ συναρτήσει του άξονα $x$ .....	93
<b><u>Σχήμα 5.43:</u></b> Τάσεις $\sigma_{11}$ συναρτήσει του άξονα $z$ .....	93

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 2.1</u> : Χαρακτηριστικά προβλήματα συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου	18
<u>Πίνακας 2.2</u> : Χημική σύσταση Al 2024.....	19
<u>Πίνακας 2.3</u> : Παράμετροι συγκόλλησης με Laser CO <sub>2</sub> .....	31

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

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 ανομοιομορφη 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.

Η μέθοδος της συγκόλλησης αποτελεί μια από τις πιο βασικές και διαδεδομένες τεχνικές συναρμολόγησης των κατασκευαστικών μερών μηχανολογικών κατασκευών. Η συγκόλληση με Laser έδωσε νέες προοπτικές για την βελτιστοποίηση της ποιότητας των συγκολλούμενων κατασκευών, αλλά και στη μείωση του χρόνου παραγωγής. Παράλληλα, η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης, τόσο σε εφαρμογές με κλασικά συγκολλούμενα υλικά (π.χ. συγκόλληση χαλύβων στην ναυπηγική), όσο και σε νέες εφαρμογές με υλικά που συγκολλούνται δύσκολα ή μέχρι πρότινος δεν είναι δυνατή η συγκόλληση τους (π.χ. συγκόλληση αεροπορικών κραμάτων αλουμινίου των σειρών 6XXX αλλά και 2XXX.)

Η τεχνική της συγκόλλησης με Laser προτάθηκε για πρώτη φορά το έτος 1964 από τους Fairbanks και Adams [1]. Έπειτα, ακολούθησε ένας αριθμός εργασιών σχετικά με την τεχνική της συγκόλλησης με Laser και τα προτερήματα της τεχνικής αυτής, έναντι των τεχνικών τόξου. Κατά την διεργασία της συγκόλλησης με Laser, από την

στιγμή πρόσπτωσης της δέσμης Laser μέχρι την ψύξη των συγκολλούμενων μερών , μια σειρά φαινομένων λαμβάνουν χώρα. Με την πρόσπτωση της δέσμης Laser στα προς συγκόλληση μέρη, ένα ποσοστό της ενέργειας που παράγεται από αυτή, χάνεται προς το περιβάλλον ενώ ένα άλλο απορροφάται από το υλικό. Η ενέργεια που απορροφάται, είναι η αιτία της δημιουργίας της ‘ μαύρης οπής’, η οποία με τη σειρά της διανέμει την ενέργεια απορρόφησης με την μορφή θερμότητας στο υλικό. Η θερμοκρασιακή μεταβολή στο υλικό προκαλεί μεταβολή και στις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως επίσης και μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς στη μικροδομή του. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια μελέτης της τεχνικής συγκόλλησης με Laser και της θεωρητικής προσέγγισης των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διεργασία αυτή, χρησιμοποιώντας αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα. Η θεωρητική προσέγγιση της επίδρασης της συγκόλλησης στα κατασκευαστικά στοιχεία με την χρήση αναλυτικών μοντέλων [2-4], έχει περιορισμένες δυνατότητες, αφού εκτός του ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν έχουν την ικανότητα πρόβλεψης στην τρίτη διάσταση, δεν μπορούν να συμπεριλάβουν την πλήρη συμπεριφορά του υλικού, όπως είναι η αλλαγή των μεταλλουργικών φάσεων.

Η προσομοίωση της διαδικασίας συγκόλλησης με αριθμητικά μοντέλα, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, δίνει την δυνατότητα αντιμετώπισης σύνθετων προβλημάτων και κατασκευαστικών στοιχείων πολύπλοκης γεωμετρίας. Τα αριθμητικά μοντέλα δυο διαστάσεων που αναπτύχθηκαν [5,6], δεν θεωρούνται ικανά να προσομοιώσουν με ακρίβεια τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διεργασία της συγκόλλησης, αφού η δυνατότητα τους περιορίζεται στον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων μόνο στο επίπεδο της συγκόλλησης, ενώ δεν γίνεται θεώρηση μεταλλουργικών μετασχηματισμών. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα, όπου οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έγιναν πιο ισχυροί, επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων τριών διαστάσεων [7-36]. Τέτοια μοντέλα που προσομοιώνουν την διεργασία συγκόλλησης με τόξο έχουν αναπτυχθεί αρκετά όπως φαίνονται και στις εργασίες [13-36], καθώς και για άλλες εφαρμογές του Laser όπως είναι η μορφοποίηση [37,38].

Για τις συγκολλήσεις με Laser όμως, τα τριδιάστατα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί είναι περιορισμένα και παρουσιάζονται στις εργασίες [7-12]. Στα μέχρι σήμερα αναπτυχθέντα μοντέλα για την προσομοίωση της διεργασίας συγκόλλησης με Laser, πολλοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία της συγκόλλησης, όπως είναι οι αλλαγές των ιδιοτήτων του υλικού με τη θερμοκρασία, οι μεταλλουργικές

αλλαγές και οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές προσπαθούν να αναπτύξουν τεχνικές οι οποίες εφαρμοσμένες στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θα επιτευχθεί ο υπολογισμός των παραμορφώσεων μεγάλων διαστάσεων κατασκευαστικών στοιχείων πολύπλοκης γεωμετρίας και πολλαπλών ραφών συγκόλλησης, σε μικρό υπολογιστικό χρόνο. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες έχουν στόχο την ελάττωση του υπολογιστικού χρόνου [15,63-66] και την προσομοίωση μεγάλων κατασκευαστικών στοιχείων. Οι τεχνικές αυτές έχουν εφαρμοστεί στην περίπτωση της συγκόλλησης με τόξο, ενώ κάποια εφαρμογή τους στην προσομοίωση της συγκόλλησης με Laser, χρησιμοποιώντας τη θεωρία της 'μαύρης οπής' και την αλλαγή των μεταλλουργικών φάσεων, δεν έχει αναφερθεί.

Στις μέχρι σήμερα λοιπόν έρευνες, τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό των στρεβλώσεων λόγω συγκόλλησης με Laser πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων είναι ελλιπή, αφού δεν μπόρεσαν να συνδυάσουν την προσομοίωση της διεργασίας συγκόλλησης με Laser, παίρνοντας υπόψη τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεργασία αυτή, με την ανάπτυξη μιας τεχνικής η οποία θα δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλων διαστάσεων κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης και πολλαπλών ραφών συγκόλλησης.

Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε ένα τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό τον υπολογισμό των παραμορφώσεων πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων μεγάλων διαστάσεων και υψηλής ολοκλήρωσης που συγκολλούνται με Laser, και το οποίο προσομοιώνει τριδιάστατα την διεργασία συγκόλλησης με Laser, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα ικανοποιητικό υπολογιστικό χρόνο.

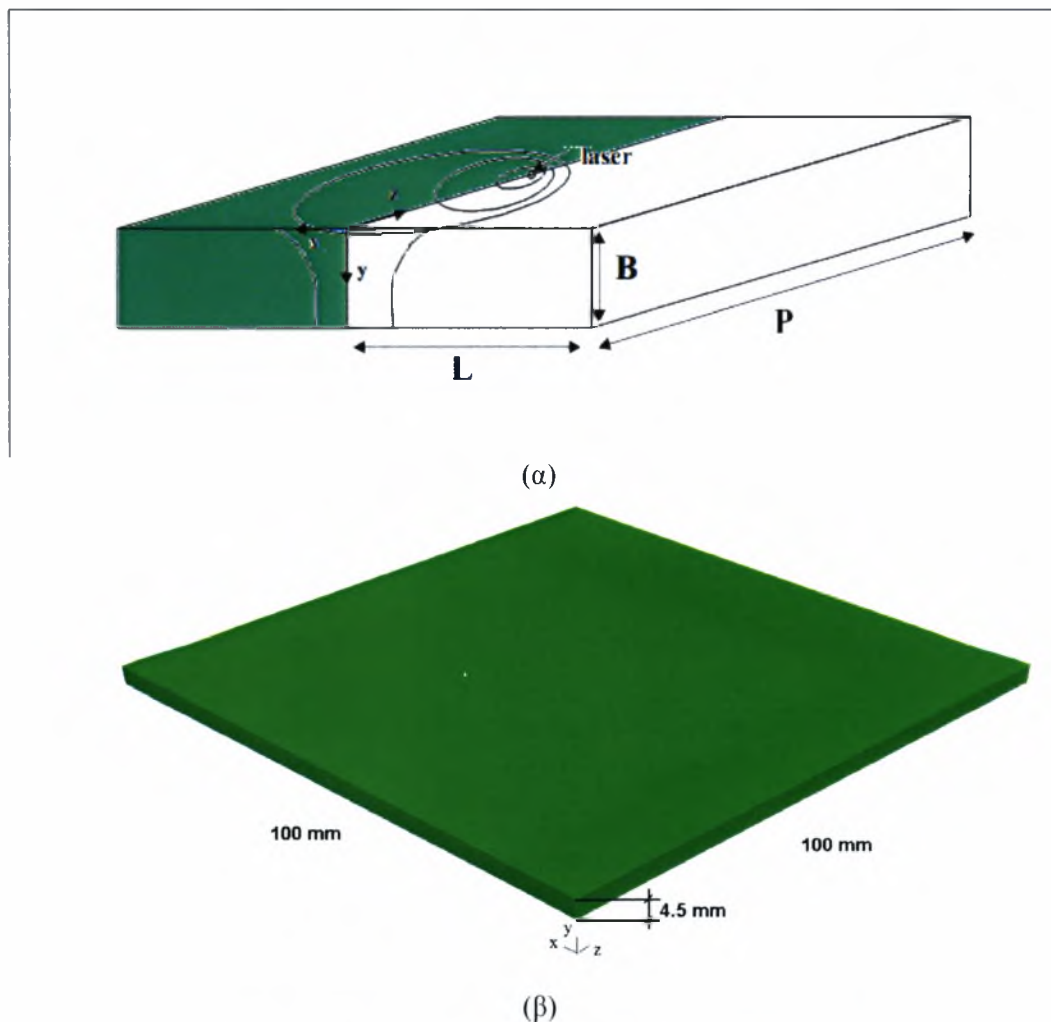
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η προσομοίωση αφορά συγκόλληση δύο όμοιων ελασμάτων μήκους  $L$  100 mm και πλάτους  $P$  100 mm με πάχος  $B$  4,5 mm. Τα ελάσματα συγκολλήθηκαν με Laser  $CO_2$  και η σύνδεση μεταξύ των δύο μελών πραγματοποιήθηκε κατά συμβολή. Η συγκόλληση διήρκτησε περίπου τέσσερα δευτερόλεπτα και η μοντελοποίηση της αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Λόγω συμμετρίας του προβλήματος, μοντελοποιήθηκε η συγκόλληση στο ένα ελάσμα. Αντίστοιχες αναμένονται και οι παραμορφώσεις και στο άλλο μισό του προβλήματος.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γεωμετρία των δοκιμίων και ο τρόπος που συγκολλήθηκαν.



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

## 2.2 ΥΛΙΚΟ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ : ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΙ 2024

### 2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

«Ασπρο σαν το ασήμι και ελαφρό σαν το γυαλί», γράφει ο Ιούλιος Βερν στο έργο του «από τη Γή στη Σελήνη». Το Αλουμίνιο (Al) είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το Οξυγόνο και το Ψυρίτιο που συναντάται στον φλοιό της γης. Προέρχεται από το ορυκτό Βωξίτης που μετά από την εξόρυξή του μετατρέπεται σε Αλουμίνα και στην συνέχεια με ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο Αλουμίνιο. Το έχουν ονομάσει «θαυματοουργό μέταλλο» λόγω του εξαιρετικά μεγάλου εύρους δυνατοτήτων, φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων που επιδεικνύουν τα τόσα κράματα του. Ιδιαίτερα σήμερα, που η προσπάθεια εξοικονόμησης πλούτου παραγωγικών πόρων και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν τον κύριο στόχο της σύγχρονης κοινωνίας, πρέπει ιδιαίτερα να τονιστεί η δυνατότητα ανακύκλωσης του αλουμινίου. Το αλουμίνιο, όπου και σε όποια μορφή και αν ευρίσκεται, μετά την χρήση των προϊόντων συλλέγεται και επαναχυτεύεται για την δημιουργία μετάλλου με ιδιότητες εφάμιλλες αυτών του πρωτόχυτου.

Το αλουμίνιο είναι ελαφρύ καθώς έχει χαμηλό ειδικό βάρος, μόλις το 1/3 εκείνου του σιδήρου. Είναι ένα ελάχιστα μαγνητικό, όλκιμο και ελατό μέταλλο με υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντανάκλαστικότητα. Έχει σημείο τήξης 660 °C και η πυκνότητα του στους 20° C είναι 2.7 gr/cm<sup>3</sup> μόλις το 1/3 από αυτή του χάλυβα. Το μέτρο ελαστικότητας του είναι 7.2 GPa.

Επιπλέον, το αλουμίνιο διατηρεί την όλκιμότητά του και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να ψαθυροποιείται γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για εφαρμογές σε περιβάλλον με χαμηλές θερμοκρασίες (υπό του μηδενός). Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό μέταλλο και οξειδώνεται παρουσία οξυγόνου. Παράλληλα και σε άμεση επαφή με αυτό όμως, δημιουργεί ένα παθητικό στρώμα οξειδίου, το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, που το προστατεύει από περαιτέρω οξείδωση. Αυτή η ιδιότητα του, το κάνει τόσο δημοφιλές στη δόμηση, στη ναυπηγική και στη γενικότερη βιομηχανία κατασκευής μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητα, τραίνα και αεροπλάνα)



Η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι αρκετά υψηλή πράγμα το οποίο το καθιστά ένα από τα προτιμητέα υλικά για μια τεράστια ποικιλία χρήσεων που σχετίζονται με μεταφορά θερμότητας και ηλεκτρισμού. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το αλουμίνιο είναι μη-τοξικό είναι αδιαπέραστο για διάφορα περιβαλλοντικά μέσα και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται και από τη βιομηχανία τροφίμων.

Τέλος, η καλή ανακλαστικότητα του αλουμινίου σε ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας (περίπου 80%) , το κάνει ιδανικό υλικό για τη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές φωτισμού.

Το αλουμίνιο κατηγοριοποιείται σε τρεις βασικές ομάδες: το εμπορικά καθαρό, το ελατό και το χυτό. Οι διάφοροι παραγωγοί αλουμινίου προκειμένου να έχουν κοινή γλώσσα επικοινωνίας για τα προϊόντα του αλουμινίου έχουν συμφωνήσει στις παρακάτω οχτώ σειρές συμβολισμού. Με βάση το κυρίαρχο κραματικό στοιχείο κατηγοριοποιούνται ως εξής :

Σειρά **1XXX** : Προϊόντα αλουμινίου με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο  $\geq 99$  %

Σειρά **2XXX** : Κράματα αλουμινίου και Χαλκού

Σειρά **3XXX** : Κράματα αλουμινίου και Μαγγανίου

Σειρά **4XXX** : Κράματα αλουμινίου και Πυριτίου

Σειρά **5XXX** : Κράματα αλουμινίου και Μαγνησίου

Σειρά **6XXX** : Κράματα αλουμινίου και Μαγνησίου - Πυριτίου

Σειρά **7XXX** : Κράματα αλουμινίου και Ψευδαργύρου

Σειρά **8XXX** : Άλλα κραματικά στοιχεία

Το δεύτερο ψηφίο στον τετραψήφιο συμβολισμό βρίσκεται μεταξύ του 0 και του 9. Το ψηφίο 0 φανερώνει ότι δεν υπάρχει κάποιος ειδικός έλεγχος των κραματικών στοιχείων. Το ψηφία μεταξύ του 1 και του 9 προσδιορίζουν κάποιο τύπο ειδικού ελέγχου, που βασίζονται στον παραγωγό του αλουμινίου. Τα δύο τελευταία ψηφία, στη σειρά 1xxx προσδιορίζουν το ελάχιστο ποσοστό αλουμινίου, που δεν βρίσκεται υπό ειδικό έλεγχο, ενώ στις υπόλοιπες σειρές είναι απλώς κάποιοι σειριακοί αριθμοί.

Μετά τον τετραψήφιο αριθμό, ανάλογα με την επεξεργασία του αλουμινίου, το κράμα προσδιορίζεται με κάποια σύμβολα που περιγράφουν τη διεργασία που ακολουθήθηκε κατά την παρασκευή του. Κάποια από τα βασικά αυτά σύμβολα είναι:

- F : δηλώνει ότι το κράμα διατηρείται όπως παράχθηκε
- O : σημαίνει ανοπτημένο
- H : σημαίνει ψυχρά διαμορφωμένο. Μετά την διαμόρφωση, μπορεί να ακολουθηθεί θερμική επεξεργασία για ανόπτηση του κράματος. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την το είδος της ανόπτησης.

Το πρώτο ψηφίο δηλώνει:

1 : Δεν έχει ακολουθήσει θερμική κατεργασία

2 : Έχει ακολουθήσει μερική ανόπτηση

3 : Έχει ακολουθήσει ανόπτηση

Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει:

0: ανοπτημένο

1 : 1/8 σκλήρυνση

2 : 1/4 σκλήρυνση

3 : 3/8 σκλήρυνση

4 : 1/2 σκλήρυνση

5 : 5/8 σκλήρυνση

6 : 3/7 σκλήρυνση

7 : 7/8 σκλήρυνση

8 : Πλήρης σκλήρυνση

9 : Αυξημένη σκλήρυνση

- W : εκφράζει το θερμικά επεξεργασμένο με κατεργασία διαλυτοποίησης.
- T : που δηλώνει το θερμικά επεξεργασμένο κράμα. Το T ακολουθείται πάντα από ένα ή περισσότερα ψηφία, που φανερώνουν βασικές θερμικές διαδικασίες.

Αυτά είναι:

3: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, φυσική γήρανση

4: Διαλυτοποίηση, φυσική

5: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση

6: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση

8: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, τεχνητή γήρανση

9: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση

10: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση

Τα χυτά κράματα αλουμινίου έχουν ως κύρια κραματικά συστατικά τον χαλκό, το πυρίτιο, το μαγνήσιο, τον ψευδάργυρο, το νικέλιο, το μαγγάνιο, το χρώμιο και το βηρύλλιο. Χρησιμοποιείται διαφορετικό σύστημα αρίθμησης για τα κράματα αυτά [43, 44, 45].

Επίσης γίνεται διαχωρισμός των κραμάτων αλουμινίου με βάση το αν επιδέχονται ή όχι θερμική κατεργασία.

#### Κράματα που επιδέχονται θερμική κατεργασία

Ελατά κράματα τα οποία αυξάνουν την αντοχή τους μέσω θερμικής κατεργασίας, στα οποία ανήκουν οι σειρές 2xxx (Al-Cu, Al-Cu-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si) και 7xxx (Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu). Τα κράματα αυτά αναπτύσσουν τη μέγιστη αντοχή τους μέσω της κατεργασίας της γήρανσης και μπορούν να ταξινομηθούν σε 2 κατηγορίες : αυτά που έχουν μέτρια αντοχή και είναι εύκολα συγκολλησίμα (Al-Mg-Si και Al-Zn-Mg), και κράματα με υψηλή αντοχή τα οποία έχουν σχεδιαστεί κυρίως για κατασκευές αεροναυπηγικής (Al-Cu, Al-Cu-Mg και Al-Zn-Mg-Cu), και είναι κράματα με περιορισμένη συγκολλησιμότητα.

#### Κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ελατά κράματα που δεν ανταποκρίνονται σε ισχυροποίηση με γήρανση, δηλαδή κράματα που ανήκουν στις σειρές 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx. Η ισχυροποίηση αναπτύσσεται με εργοσκλήρυνση (strain-hardening) κατά την ψυχρή κατεργασία (Al-Mn), ισχυροποίηση στερεού διαλύματος (solid solution-hardening) (Al-Mg) ή μαζί (Al-Mn-Mg).

Τέλος η συμπεριφορά του αλουμινίου κατά την συγκόλληση καθορίζεται από το χαμηλό σημείο τήξεως 660 °C, την ένωση του με το οξυγόνο (σχηματισμός οξειδίου) και της μεγάλης του θερμοαγωγιμότητας.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά, χαρακτηριστικά προβλήματα που συναντώνται στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.

Υλικό	Χημική σύσταση		Προβλήματα Συγκόλλησης
	Κύρια στοιχεία	Ιχνοστοιχεία	
Κράματα Al-Mg (σειρά 5xxx)	Mg:1-5%	Si, Fe, Mn	Ρωγμάτωση στερεοποίησης Μείωση αντοχής στη ΘΕΖ
Κράματα Al-Mg-Si (σειρά 6xxx)	Mg:0.5-1.3% Si:0.4-1.4% Cu: 0.2-0.9%	Mn, Cr, Fe	Θερμορωγμές Ρωγμάτωση στερεοποίησης Μείωση αντοχής στη ΘΕΖ
Κράματα Al-Zn-Mg (σειρά 7xxx)	Mg:0.5-4% Zn:2-8%	Cu, Cr, Mn, Fe	Θερμορωγμές Ρωγμάτωση στερεοποίησης Ελαττωμένη αντοχή σε εργοδιάβρωση στη ΘΕΖ

**Πίνακας 2.1:** Χαρακτηριστικά προβλήματα συγκολλήσεων κραμάτων αλουμινίου [46]

## 2.2.2 ΥΛΙΚΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ : Al 2024

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το Αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησής του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματικών στοιχείων (π.χ. χαλκός, μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, ψευδάργυρος κτλ.), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Τα κράματα αλουμινίου είναι εύκολα διαμορφώσιμα με διάφορες μεθόδους όπως έλαση και χύτευση και είναι εύκολα επεξεργάσιμα.

Το κράμα αλουμινίου που επιλέχθηκε στην συγκεκριμένη εργασία είναι το αεροναυπηγικό Al 2024. Ανήκει στη σειρά **2XXX**, είναι συνεπώς κράμα αλουμινίου – χαλκού. Τα κράματα της σειράς αυτής αποκτούν μηχανικές αντοχές υψηλότερες από αυτές του μέσου χάλυβα. Ήταν το πρώτο κράμα Al-Cu-Mg με όριο διαρροής που πλησίασε τα 50000 psi και αντικατέστησε γενικά το κράμα 2017-T4, κυρίαρχο της σειράς 2XXX στα αεροσκάφη και κυρίως στα πτερύγια και στην άτρακτο αυτών. Τα κράματα της σειράς αυτής χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, βιομηχανία όπλων κτλ. Έχοντας καλή αντίσταση στην κόπωση, ειδικά τα δοκίμια με μεγαλύτερο

πάχος, το κράμα αλουμινίου 2024 χρησιμοποιείται σε πολλές αεροδιαστημικές δοκίμεις.

### Ιδιότητες Al 2024

Για την ακριβή πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων και της θερμοκρασιακής κατανομής της κατασκευής, είναι απαραίτητη η χρήση στους υπολογισμούς, των πραγματικών τιμών των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του υλικού. Αυτό επιτεύχθηκε, προσαρμόζοντας στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τις αλλαγές των τιμών των ιδιοτήτων του υλικού που συγκολλάτε. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν βρέθηκαν στην βιβλιογραφία διαγράμματα μεταβολής των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με τη θερμοκρασία, παρά μόνο οι τιμές αυτών στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η χημική σύσταση του κράματος είναι:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al 2024	0.50%	0.50%	4.35%	0.64%	1.5%	0.10%	0.25%	0.15%

**Πίνακας 2.2** : Χημική σύσταση Al 2024

Οι **θερμικές, μηχανικές** αλλά και **γενικές ιδιότητες** που ενδιαφέρουν την μελέτη δίνονται παρακάτω:

	<b>Θερμικές ιδιότητες</b>
Θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity)	$K = 120 [ W / (m \text{ } ^\circ C) ]$
Θερμοχωρητικότητα (specific heat capacity)	$c = 875 [ J / (kg \text{ } ^\circ C) ]$ στους $20 \text{ } ^\circ C$
Συντελεστής συναγωγής (ή συντελεστής μεταφοράς θερμότητας) (heat transfer coefficient)	$h = 25 [ W / (m^2 \text{ } ^\circ C) ]$
Συντελεστής εκπομπής (emissivity)	$\epsilon = 0,1 [ \text{αδιάστατος} ]$
Λανθάνουσα θερμότητα τήξεως (latent heat)	$U_{\text{latent}} = 396211 [ J / kg ]$
Θερμοκρασία liquidus	$T_{\text{liquidus}} = 638 [ \text{ } ^\circ C ]$
Θερμοκρασία solidus	$T_{\text{solidus}} = 502 [ \text{ } ^\circ C ]$

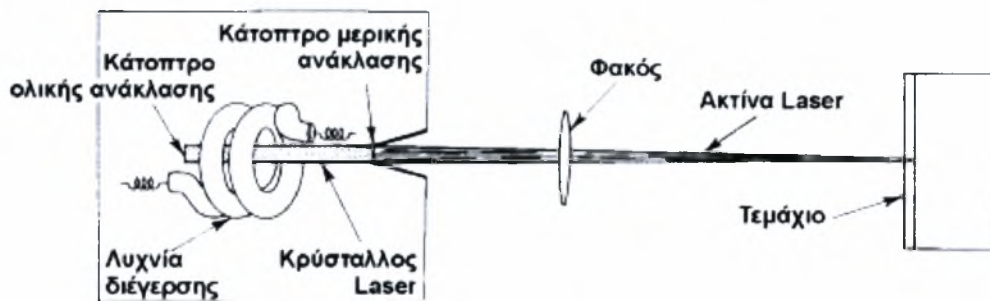
	<u>Ελαστικές μηχανικές ιδιότητες</u>
Μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus)	$E = 72,4 [ \text{GPa} ]$
Λόγος Poisson (Poisson's ratio)	$\nu = 0,33 [ \text{αδιάστατο} ]$
Συντελεστής θερμικής διαστολής (thermal expansion coefficient)	$\alpha = 23,2 \times 10^{-6} [ \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} ]$
	<u>Μη-ελαστικές μηχανικές ιδιότητες</u>
Όριο διαρροής (yield stress)	$\sigma_y = 324 [ \text{MPa} ]$
	<u>Γενικές ιδιότητες :</u>
Πυκνότητα (mass density)	$\rho = 2780 [ \text{kg m}^{-3} ]$

## 2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ : LASER CO<sub>2</sub>

### 2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

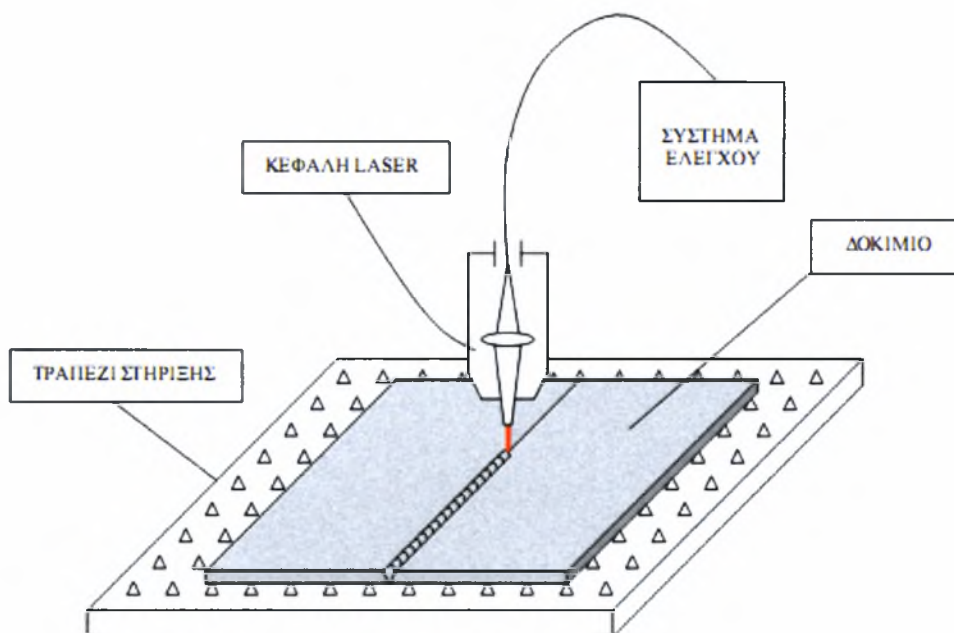
Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια οι παραγωγικές διεργασίες που χρησιμοποιούν δέσμες laser, βρίσκουν εφαρμογή ολοένα και περισσότερο στην βιομηχανική πρακτική, συμπληρώνοντας ή και αντικαθιστώντας αντίστοιχες παραδοσιακές – συμβατικές παραγωγικές διαδικασίες. Η συγκόλληση με laser (Laser Welding) αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές και τεχνολογικά ενδιαφέρουσες διεργασίες και πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1950.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί για την τήξη του μετάλλου την ακτίνα που παράγεται από το laser CO<sub>2</sub>. Το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται σε μείγμα με He, N<sub>2</sub> με αναλογίες CO<sub>2</sub> 4.5%, N<sub>2</sub> 13.5%, He 82% περίπου. Τα αέρια αυτά λαμβάνονται συνήθως από φιάλες πεπιεσμένων αερίων και αναμειγνύονται πριν από την είσοδο τους στην κοιλότητα του laser. Η κοιλότητα αυτή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της, ψύχεται εξωτερικά από κλειστό κύκλωμα απιονισμένου νερού. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται μέσω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, όταν η δέσμη ακτινών Laser προσπίπτει πάνω στα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής της ακτίνας Laser.



**Σχήμα 2.2** : Διαδικασία παραγωγής της ακτίνας Laser

Οι διατάξεις Laser που χρησιμοποιούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι πολλές. Η γενική όμως διάταξη παραμένει η ίδια και φαίνεται στο σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3** : Διάταξη συγκόλλησης με δέσμη Laser [39]

Τα βασικότερα μέρη της διάταξης είναι το τραπέζι στήριξης των κομματιών συγκόλλησης, η κεφαλή του Laser και το σύστημα ελέγχου. Τα προς συγκόλληση κομμάτια τοποθετούνται πάνω στο τραπέζι στήριξης. Η κεφαλή του Laser, η οποία συνδέεται με το σύστημα ελέγχου, έχει την δυνατότητα να μετατοπίζεται σε τρεις διευθύνσεις ως προς το τραπέζι στήριξης και οι οποίες καθορίζονται από έναν πίνακα ελέγχου. Κοντά στην έξοδο της δέσμης του Laser από την κεφαλή, βρίσκεται ένα ακροφύσιο το οποίο διοχετεύει το αδρανές αέριο. Η ροή του αδρανούς αερίου ελέγχεται και αυτή

από τον πίνακα ελέγχου. Ο πίνακας ελέγχου δίνει την δυνατότητα κίνησης της κεφαλής, καθορίζοντας έτσι την διαδρομή που θα ακολουθήσει η δέσμη του Laser για να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκόλληση. Επίσης ο πίνακας ελέγχου ρυθμίζει και το σημείο εστίασης της δέσμης ως προς το κομμάτι συγκόλλησης, την ταχύτητα κίνησης της κεφαλής, καθώς και την ισχύς του Laser. Οι ρυθμίσεις που αφορούν την κίνηση της κεφαλής του Laser και το σημείο εστίασης, ορίζονται με βάση ενός συστήματος συντεταγμένων. Ο πίνακας ελέγχου στα πιο εξελιγμένα συστήματα αντικαθίσταται από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος μπορεί ταυτόχρονα να δώσει τα χαρακτηριστικά κίνησης και συγκόλλησης σε περισσότερα από ένα σύστημα τράπεζας-κεφαλής, πετυχαίνοντας στον ίδιο χρόνο περισσότερες από μια ραφές συγκόλλησης. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών οδηγούν στην αυτοματοποίηση της τεχνικής της συγκόλλησης με Laser, κάνοντας όλο και περισσότερο μη απαραίτητη την επέμβαση χειριστή.

Βασικό χαρακτηριστικό της συγκόλλησης με δέσμη Laser είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Η υψηλή αυτή πυκνότητα ενέργειας οφείλεται κατά κύριο λόγο στην συνοχή της δέσμης του Laser, η οποία με την σειρά της δύναται να εστιασθεί σε πολύ μικρά σημεία, με διάμετρο ως και μερικά  $\mu\text{m}$ , αρκεί βέβαια η ακρίβεια επαφής των υλικών προς συνένωση να είναι μεγάλη. Αυτό είναι και το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου, δηλαδή η ικανότητα περιορισμού της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας του Laser σε μια μικρή περιοχή παράγοντας μια υψηλής έντασης θερμική πηγή, και έπειτα πολύ γρήγορη σάρωση αυτής της θερμικής πηγής. Έτσι σε τόσο υψηλές τιμές της πυκνότητας ενέργειας, σχεδόν όλα τα υλικά τήκονται και συγκολλούνται, με την βασική προϋπόθεση βέβαια ότι μπορούν να απορροφήσουν την προσπίπτουσα ενέργεια.

Τα παραπάνω τεχνολογικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης με Laser, έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση βασικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της μεθόδου αυτής, όπως μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία [1,5-6].

**Πλεονεκτήματα** της μεθόδου είναι:



- Υψηλή πυκνότητα ενέργειας με κατάλληλη εστίαση της δέσμης. Επάγει στην επιφάνεια συγκεντρωμένη «καθαρή ενέργεια» της τάξεως  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> σε χρόνο μικροδευτερολέπτων.
- Πολύ μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη λόγω της εστίασης της δέσμης σε πολύ μικρή περιοχή. Έτσι μπορούν να συγκολληθούν υλικά ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Πολύ στενή ραφή συγκόλλησης, με αποτέλεσμα μικρότερες παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις.
- Υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής.
- Υψηλός συντελεστής απόδοσης της συγκόλλησης ως προς την αντοχή της ραφής συγκόλλησης.
- Δεν χρειάζονται ηλεκτρόδια ούτε πρόσθεση υλικού (αυτογενής συγκόλληση).
- Αμελητέα 'μόλυνση' της συγκόλλησης, με την χρησιμοποίηση κατάλληλου προστατευτικού αερίου (αδρανούς).
- Γρήγορο και απότομο σταμάτημα και ξεκίνημα, σε αντίθεση με τις μεθόδους τόξου.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Πραγματοποίηση της συγκόλλησης στην ατμόσφαιρα, έναντι της μεθόδου με δέσμη ηλεκτρονίων όπου απαιτείται η παρουσία κενού αέρος.
- Δεν παράγονται επικίνδυνες ακτίνες για την υγεία, σε αντίθεση με την μέθοδο δέσμης ηλεκτρονίων.
- Ικανότητα συγκόλλησης σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις από το υλικό.

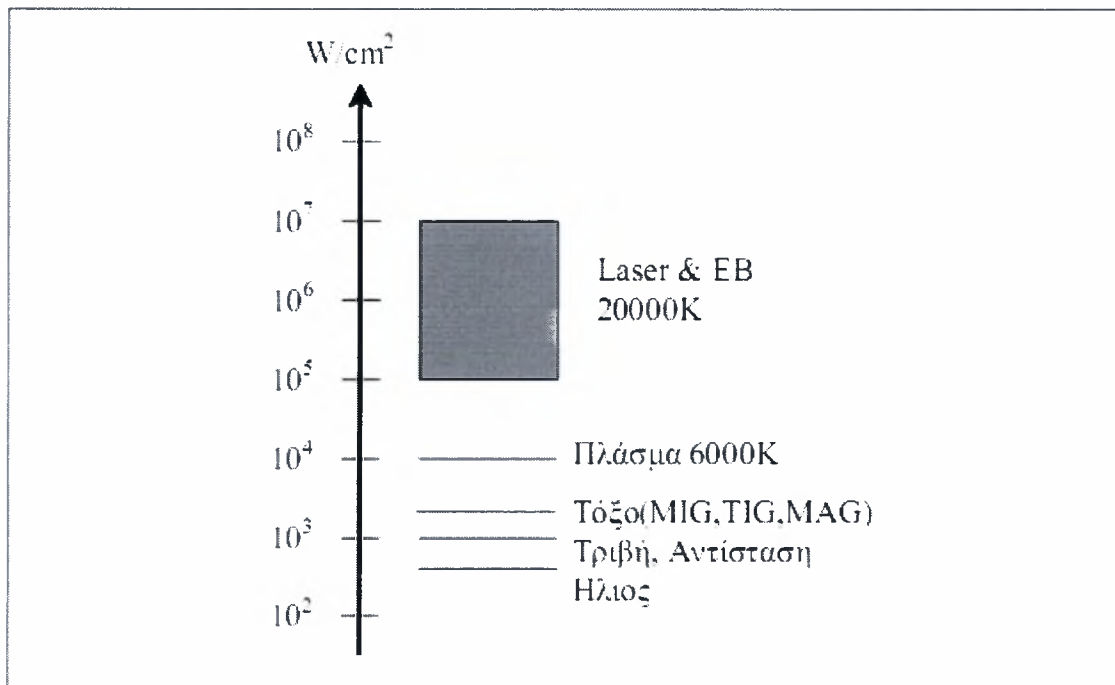
**Μειονεκτήματα** της μεθόδου είναι:

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού, το οποίο βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αντισταθμιστεί τόσο από την υψηλή ποιότητα των παραγόμενων κατασκευών, όσο και από την αυξημένη ταχύτητα παραγωγής. Έτσι η μέθοδος ενδείκνυται για μεγάλο όγκο παραγωγής, ενώ συγκρινόμενη με την μέθοδο δέσμης ηλεκτρονίων είναι πιο οικονομική επειδή δεν απαιτείται η ύπαρξη κενού.

- Δυσκολία στην συγκόλληση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας, διότι δεν μπορούν να απορροφήσουν την προσδιδόμενη πυκνότητα ενέργειας.
- Μικρό βάθος διείσδυσης σε χαμηλές πυκνότητες ενέργειας.

Αναλύοντας τα παραπάνω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδο του Laser, προσέφερε πολλά στον τομέα της συγκόλλησης των μετάλλων ανοίγοντας ταυτόχρονα νέους δρόμους προς την έρευνα και την εξέλιξη της μεθόδου. Συνδέσεις που ίσως απαιτούν πρόσβαση από περισσότερες από μια διεύθυνση, μπορούν πλέον να συγκολληθούν από μια πλευρά μόνο. Αυτή η ευελιξία προσφέρει πολλές νέες δυνατότητες για τον σχεδιασμό συνδέσεων ιδιαίτερα για στοιχεία που συνδέονται σε δύσκολα προσβάσιμες επιφάνειες.

Επιπλέον στο σχήμα 2.4 φαίνεται συγκριτικά οι μέθοδοι συγκόλλησης, απο πλευράς διαθέσιμων εντάσεων.



**Σχήμα 2.4** : Σύγκριση μεθόδων συγκόλλησης σε σχέση με την προσδιδόμενη ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια. [46]

Παρατηρείται ότι οι συμβατικές μέθοδοι βρίσκονται δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερα, ενώ μόνο η δέσμη Ηλεκτρονίων (EB) μπορεί να συγκριθεί με το laser. Η δέσμη Ηλεκτρονίων όμως είναι αρκετά δαπανηρότερη και αντιοικονομική στην εφαρμογή της, κυρίως λόγω της απαίτησης δημιουργίας κενού κατά την συγκόλληση. [46].

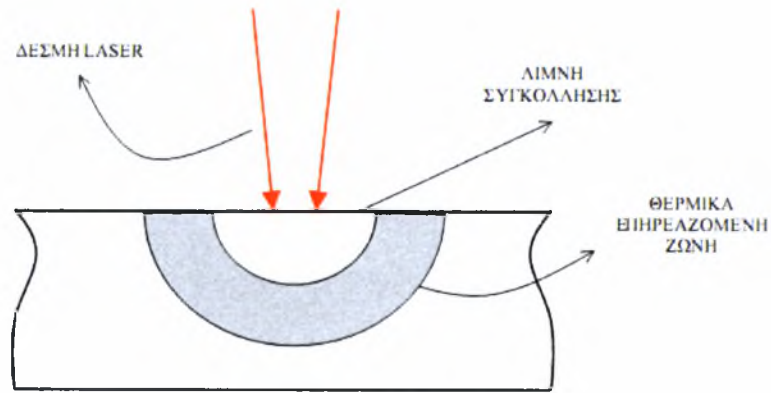
### 2.3.2 ΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά την συγκόλληση με Laser τα προς συγκόλληση μέρη τοποθετούνται πάνω στην τράπεζα στήριξης στην επιθυμητή διάταξη, και στη συνέχεια η κεφαλή του Laser (πηγή Laser) καθοδηγούμενη από το σύστημα ελέγχου, κινείται στην προκαθορισμένη διαδρομή όπου θα δημιουργηθεί η ραφή συγκόλλησης. Όπως είναι γνωστό, κατά την διάρκεια πρόσπτωσης της δέσμης Laser σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται και χάνεται στο περιβάλλον, ενώ ένα άλλο απορροφάται από το υλικό. Η αναρροφώμενη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο υλικό με πολύπλοκους μηχανισμούς. Απλουστευμένα μπορούμε να πούμε ότι, τα φωτόνια της δέσμης του Laser, διεγείρουν τα άτομα του υλικού, τα οποία μεταπίπτουν σε ενεργειακά διεγερμένες καταστάσεις. Αυτά τα άτομα έχουν την τάση να επιστρέψουν στα χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα, εκπέμποντας ενέργεια - θερμότητα. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ανάλογα με την πυκνότητα ισχύος-ενέργειας που παραλαμβάνει το υλικό, διακρίνουμε δυο κυρίως μηχανισμούς:

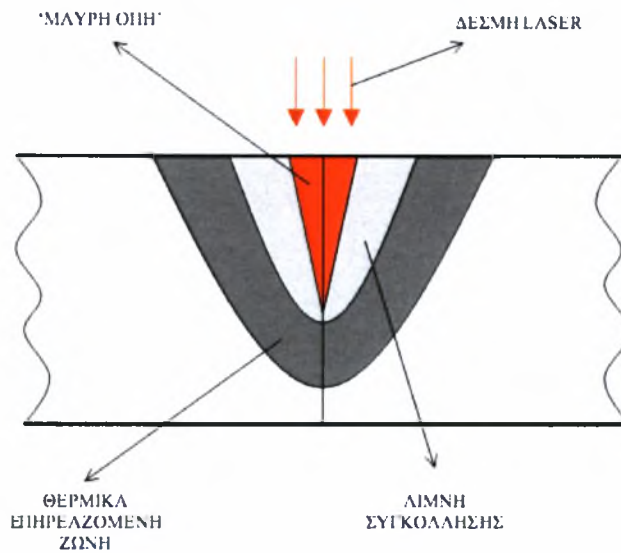
- α) Τον μηχανισμό με αγωγή (Conduction)
- β) Τον μηχανισμό με την δημιουργία 'Μαύρης οπής' (Keyhole).

Ο μηχανισμός συγκόλλησης με αγωγή, παρατηρείται κυρίως στις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης με τόξο και λαμβάνει χώρα σε συγκόλλησης με Laser χαμηλής πυκνότητας ισχύος. Απεναντίας ο μηχανισμός με δημιουργία 'μαύρης οπής', παρατηρείται στις συγκολλήσεις με Laser υψηλής πυκνότητας ισχύος και σε συγκολλήσεις με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron beam).

Η συγκόλληση με σχηματισμό «μαύρης οπής», χαρακτηρίζεται από μια παράλληλη και στενή ζώνη τήξης με τον λόγο βάθος/πλάτος τήξης να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3 και 10. Αντίθετα στη συγκόλληση με αγωγή, ο αντίστοιχος λόγος είναι μικρότερος της μονάδας. Οι γεωμετρίες των λιμνών συγκόλλησης των δυο μεθόδων φαίνονται στα σχήματα 2.5α) και 2.5β).



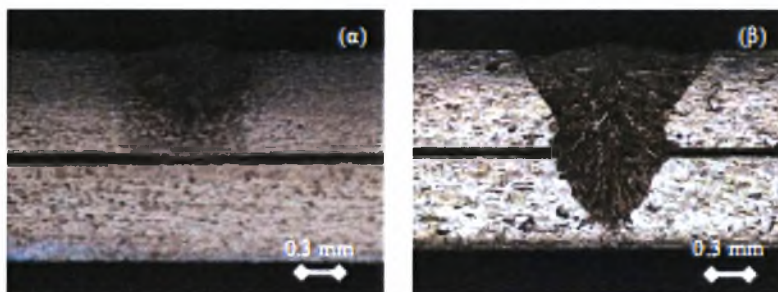
(α)



(β)

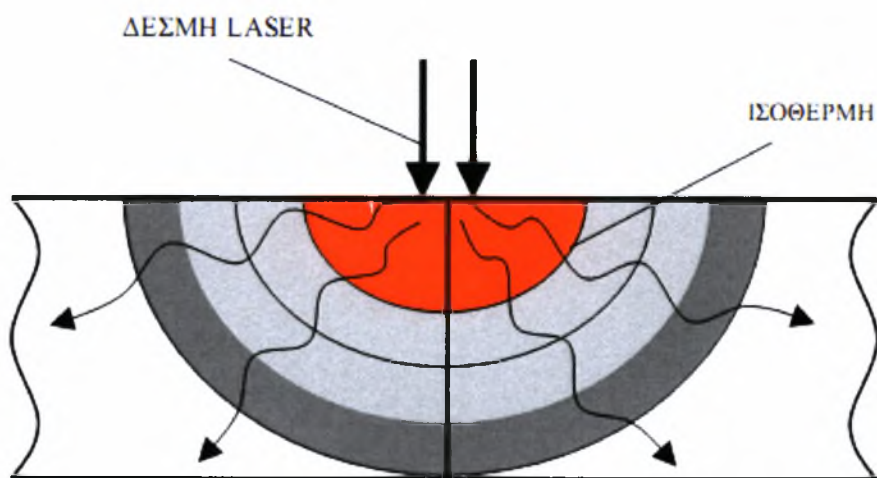
**Σχήμα 2.5:** Γεωμετρία της λίμνης συγκόλλησης με Laser του τύπου (α) με αγωγή και (β) με σχηματισμό «μαύρης οπής» [39]

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η μορφή της περιοχής τήξης που προκύπτει με τους δύο μηχανισμούς συγκόλλησης.



**Σχήμα 2.6:** Προφίλ συγκόλλησης με laser (α) Συγκόλληση με laser μέσω αγωγής, (β) Συγκόλληση με laser με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης [47]

Σε μια συγκόλληση με Laser ο μηχανισμός της αγωγής λαμβάνει χώρα, όταν η πυκνότητα ισχύος κυμαίνεται περίπου στα  $10^5 \text{ W/cm}^2$ . Η ενέργεια της δέσμης του Laser απορροφάται από το υλικό κοντά στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Το υλικό αυτό θερμαίνεται ξεπερνώντας την θερμοκρασία τήξης, και η θερμότητα ενέργεια μεταδίδεται με αγωγή στο υπόλοιπο υλικό του δοκιμίου. Οι ισόθερμες στερεοποίησης αποκτούν έτσι μια ελλειπτική μορφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.7** : Ισόθερμες κατά τη διαδικασία συγκόλλησης με Laser με αγωγή [39]

Η συγκόλληση με αγωγή προσφέρει μικρή αναταραχή στο σύστημα (μικρή ενεργειακή μετάπτωση των ατόμων του υλικού), διότι η ακτινοβολία του Laser δεν διεισδύει στο υλικό που συγκολλείται. Ως αποτέλεσμα, οι συγκολλήσεις με αγωγή είναι λιγότερο ευαίσθητες στην παγίδευση αερίου κατά την διαδικασία της συγκόλλησης.

Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή επιδρά σημαντικά στην μορφοποίηση της λίμνης συγκόλλησης, η οποία εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό Prandtl του υλικού ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του κινηματικού ιξώδους προς τη μοριακή διάχυση. Για υλικά με μικρούς αριθμούς Prandtl ( $Pr = 0.02$ ), η λίμνη συγκόλλησης έχει σχεδόν ημισφαιρική μορφή και επίπεδη επιφάνεια, ενώ για τους χάλυβες (υψηλότερες τιμές  $Pr = 0.1$ ) δημιουργείται ένα υπόσκαμμα οπότε η λίμνη γίνεται πιο ρηχή.

Η μετάβαση από τον μηχανισμό συγκόλλησης με αγωγή στον μηχανισμό συγκόλλησης με σχηματισμό «μαύρης οπής», εξαρτάται από την μέγιστη ένταση του Laser και την διάρκεια του παλμού του κύματος του Laser που εφαρμόζεται στο κομμάτι επεξεργασίας, δηλαδή από την πυκνότητα ισχύος του Laser. Κατά τη διάρκεια μιας συ-

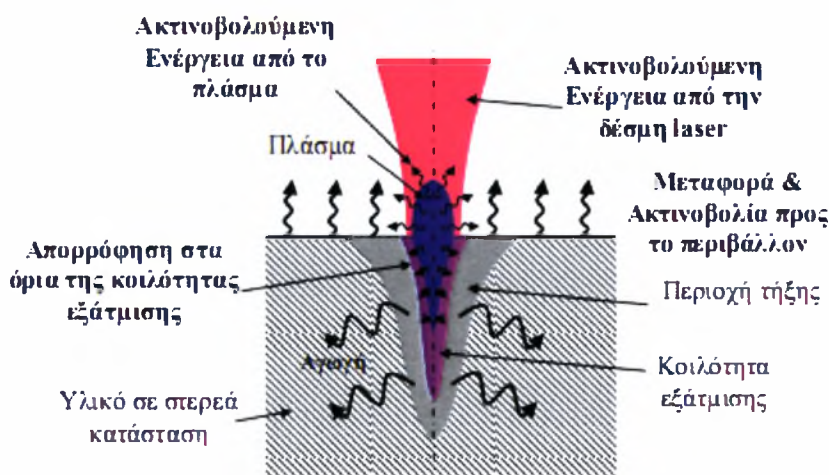
γκόλλησης μπορεί αρχικά να εμφανιστεί ο μηχανισμός της αγωγής και έπειτα να αλλάξει σε συγκόλληση με σχηματισμό «μαύρης οπής».

Όταν η πυκνότητα ισχύος λάβει τιμές μεγαλύτερες από  $10^6 \text{ W/cm}^2$  και με την προϋπόθεση ότι η ισχύς του Laser είναι μεγαλύτερη από 1 kW, τότε σχηματίζεται η «μαύρη οπή».

Σε τόσο υψηλές πυκνότητες ισχύος το υλικό πλησιάζει στην θερμοκρασία εξάτμισης και λόγω των ατμών δημιουργείται μια οπή της οποίας η διάμετρος είναι περίπου όμοια με αυτήν της προσπίπτουσας δέσμης του Laser. Η οπή αυτή περικλείει τους ατμούς του εξατμιζόμενου υλικού, ενώ περιβάλλεται από το τηγμένο υγρό μέταλλο.

Ανάλογα με τις παραμέτρους της διεργασίας για δεδομένο πάχος υλικού, ο σχηματισμός της οπής μπορεί να είναι μερικός ή καθ' όλο το πάχος των υπό συνένωση ελασμάτων. Καθώς η δέσμη laser μετακινείται σε σχέση με τα προς συνένωση ελάσματα, το τμήμα το οποίο περιβάλλει την οπή, στερεοποιείται σχηματίζοντας την επιθυμητή συγκόλληση. Η οπή, λόγω της γεωμετρίας της, επιτρέπει στη δέσμη να εισχωρήσει στο εσωτερικό του υλικού προσδίδοντας της ενέργεια στο υλικό σε μεγαλύτερο βάθος. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη περίπτωση συγκόλλησης με Laser επιτυγχάνει λόγους του βάθους συγκόλλησης προς το πάχος συγκόλλησης, που υπερβαίνουν την μονάδα.

Η μορφή της περιοχής τήξης που προκύπτει προσομοιάζει με αυτή που παρουσιάζεται το σχήμα 2.8



**Σχήμα 2.8:** Φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας κατά την διεργασία συγκόλλησης με Laser με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης. [47]

Η συγκόλληση με Laser με την δημιουργία «μαύρης οπής» (Keyhole) παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από βιομηχανική και ερευνητική άποψη, δεδομένου ότι παρέχει μεγάλο βάθος συγκόλλησης και περιλαμβάνει αρκετά πιο σύνθετα φυσικά φαινόμενα, τα οποία συνδέονται με τον μηχανισμό της δημιουργίας της «μαύρης τρύπας». Τέτοιου είδους φαινόμενα περιλαμβάνουν της διπλή αλλαγή φάσης του υλικού, το ιονισμό του μεταλλικού ατμού και του βοηθητικού αερίου με αποτέλεσμα την ανάπτυση πλάσματος (inverse braking radiation), την μετάδοση ενέργειας στα όρια την οπής από την ακτινοβολία του Laser, καθώς και την ακτινοβολία του πλάσματος, την αγωγή θερμότητας στο υλικό και στο πλάσμα και τέλος απώλειες θερμότητας από το υλικό κατά την διάρκεια της διεργασίας μέσω μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά και ακτινοβολία προς το περιβάλλον.

Βασικές παραμέτρους της διεργασίας αποτελούν : η ισχύς της δέσμης laser, η ταχύτητα μετακίνησης της δέσμης ή ο χρόνος αλληλεπίδρασης με το υλικό (για την περίπτωση των σημειακών συγκολλήσεων με laser), οι εστιακές συνθήκες, το είδος, η πίεση και η ανευθυνότητα του βοηθητικού αερίου.

Η μορφή της «μαύρη οπής» κατά την διάρκεια της συγκόλλησης εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα της κατεργασίας. Έτσι όσο αυξάνει η ταχύτητα, τόσο η γωνία των ισόθερων στερεοποίησης μειώνεται και στενεύει η ραφή της συγκόλλησης. Το σημαντικότερο ίσως εμπόδιο στην δημιουργία της “μαύρη οπής” αποτελεί η απορροφητικότητα του υλικού και η επιφανειακή του κατάσταση. Λειασμένες επιφάνειες και υλικά υψηλής ανακλαστικότητας, επιδρούν αρνητικά στην δημιουργία της «μαύρη οπής». Αντίθετα σε μια τραχιά επιφάνεια που μπορεί να έχει προκύψει από κάποια κατεργασία (π.χ. αμμοβολή), η απορροφητικότητα του υλικού αυξάνει αρκετά.

Στο σημείο αυτό επισημάνεται ότι τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά τη συγκόλληση με Laser εξαιτίας του υψηλού συντελεστή ανακλαστικότητας καθώς και της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας. Τα μειονεκτήματα όμως αυτά είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν με διάφορες μεθόδους και κυρίως με κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ώστε να αυξηθεί η απορροφητικότητα [46].

Η παράμετροι της συγκόλλησης στην παρούσα εργασία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

<b>Παράμετροι συγκόλλησης</b>	
Διάμετρος δέσμης	0.6 mm
Ισχύς	3818 W
Ταχύτητα συγκόλλησης	1.6 m/min = 26,7 mm/sec

**Πίνακας 2.3** : Παράμετροι συγκόλλησης με Laser CO<sub>2</sub>



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**

### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων, 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 μπορεί 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 ( $\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0$ ):

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

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \varepsilon'_{xx} + \varepsilon''_{xx} \\ \varepsilon_{yy} &= \varepsilon'_{yy} + \varepsilon''_{yy} \\ \varepsilon_{xy} &= \varepsilon'_{xy} + \varepsilon''_{xy}\end{aligned}\tag{3.1}$$

όπου  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\gamma_{xy}$  είναι οι συνιστώσες της ολικής παραμόρφωσης,  $\varepsilon'_{ij}$  το ελαστικό μέρος και  $\varepsilon''_{ij}$  το μη-ελαστικό μέρος που μπορεί να είναι θερμικό, πλαστικό, κτλ. Για παράδειγμα, στην περίπτωση θερμικής παραμόρφωσης έχουμε:

$$\varepsilon''_{xx} = \varepsilon''_{yy} = \varepsilon''_{zz} = \alpha \Delta T, \quad \gamma''_{xy} = 0\tag{3.2}$$

όπου  $\alpha$  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:

$$\varepsilon''_{xx} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}), \quad \varepsilon''_{yy} = \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}), \quad \gamma''_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G} \quad (3.3)$$

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 ισοροπίας:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0, \quad (3.4)$$

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

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

$$\left( \frac{\partial^2 \varepsilon'_{xx}}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varepsilon'_{yy}}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \gamma'_{xy}}{\partial x \partial y} \right) + \left( \frac{\partial^2 \varepsilon''_{xx}}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varepsilon''_{yy}}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (3.5)$$

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

$$R = - \left( \frac{\partial^2 \varepsilon''_{xx}}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varepsilon''_{yy}}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \gamma''_{xy}}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.6)$$

παίρνει μη μηδενική τιμή.

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

$$\begin{aligned} \varepsilon''_{xx} &= a + b x + d y \\ \varepsilon''_{yy} &= e + f x + g y \\ \gamma''_{xy} &= k + l x + m y \end{aligned} \quad (3.7)$$

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 διαφόρων τάσεων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια επιβολής εξωτερικών φορτίων στο σώμα.

(2) Οι παραμένουσες τάσεις  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  και  $\sigma_{xy}$  μπορεί να υπολογιστούν από τις σχέσεις (3.3), εάν είναι γνωστή η κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων  $\epsilon'_{xx}$ ,  $\epsilon'_{yy}$ ,  $\gamma'_{xy}$ . Οι μη ελαστικές, όμως, παραμορφώσεις  $\epsilon''_{xx}$ ,  $\epsilon''_{yy}$ ,  $\gamma''_{xy}$  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:

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

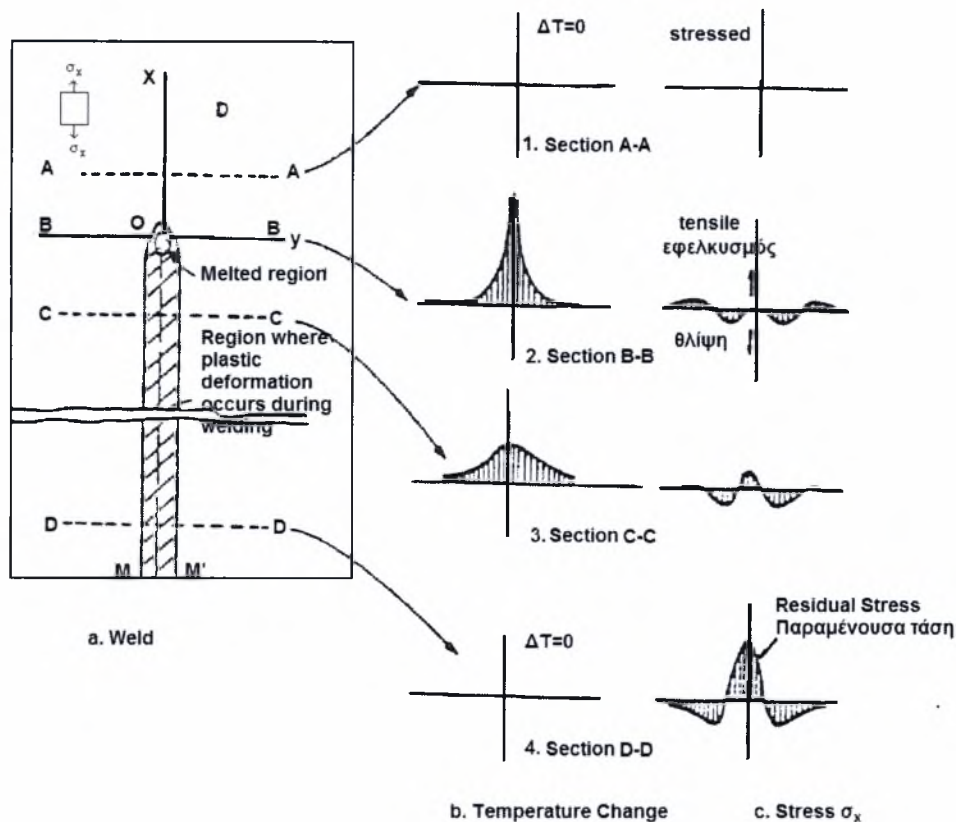
Με βάση τις συνθήκες αυτές, είναι δυνατός ο έλεγχος της ορθότητας αποτελεσμάτων κατανομών παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται είτε από πειραματικές μετρήσεις είτε από μαθηματικούς υπολογισμούς.

### 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  $\sigma_x$  στις ίδιες εγκάρσιες τομές. Σημειώνεται, ότι στην πραγματικότητα αναπτύσσονται και τάσεις  $\sigma_y$  και  $\tau_{xy}$ , που, όμως, δεν εμφανίζονται στο σχήμα.



**Σχήμα 3.1 :** Σχηματική παράσταση μεταβολών θερμοκρασίας και τάσης κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων [48]

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.

ι 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 εμποδίζεται 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 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ**

Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις, από τις οποίες άλλες είναι καταστρεπτικές και άλλες μη καταστρεπτικές. Οι κυριότερες από τις μεθόδους αυτές κατατάσσονται στις ακόλουθες ομάδες, ανάλογα με τις βασικές αρχές στις οποίες στηρίζονται:

(α) Τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων (stress relaxation techniques).

(α1) Με χρήση επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης ή μηχανικών.

(α2) Με χρήση άλλων τεχνικών.

(β) Τεχνικές διάθλασης ακτίνων X (X-ray diffraction).

(γ) Τεχνικές βασισμένες σε ιδιότητες που εξαρτώνται από την τιμή των τάσεων (stress-sensitive properties).

(δ) Τεχνικές ρηγμάτων (cracking techniques).

Στις τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων, οι παραμένουσες τάσεις υπολογίζονται με μέτρηση της μεταβολής της ελαστικής παραμόρφωσης που προκύπτει σαν αποτέλεσμα του τεμαχισμού του δοκιμίου ή της αφαίρεσης με κοπή ενός τεμαχίου από το δοκίμιο. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια επιμηκυνσιομέτρων (strain gages) είτε μηχανικών, είτε ηλεκτρικής αντίστασης. Ανάλογα με τον απαιτού-

μενο από τη μέθοδο τρόπο κοπής, άλλες τεχνικές εφαρμόζονται σε ελάσματα, άλλες σε σωλήνες κλπ. Είναι, όμως, δυνατή η μέτρηση της μεταβολής της ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της χαλάρωσης των τάσεων και με άλλους τρόπους, όπως π.χ. με τη βοήθεια εύθραυστων επικαλύψεων (brittle coatings), δικτυωτών συστημάτων (grid systems) ή φωτοελαστικότητας. Το βασικό μειονέκτημα των μεθόδων της ομάδας (α) είναι ότι έχουμε μερική ή ολική καταστροφή του δοκιμίου. Οι τεχνικές, όμως, αυτές είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες λόγω της μεγάλης τους πιστότητας.

Σε μέταλλα που έχουν κρυσταλλική δομή, οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι δυνατόν να βρεθούν με μέτρηση της παραμέτρου πλέγματος (lattice parameter) με την τεχνική της διάθλασης των ακτίνων X. Δεδομένου ότι η παράμετρος πλέγματος ενός μετάλλου στην αφόρτιστη κατάσταση είναι γνωστή, οι ελαστικές παραμορφώσεις μπορούν να μετρηθούν χωρίς καταστροφή του δοκιμίου. Η μέτρηση γίνεται είτε με ακτινογραφίες X (X-ray film) είτε με χρήση διαθλασίμετρου (diffractometer). Με τις τεχνικές αυτές είναι δυνατή η μέτρηση επιφανειακών τάσεων σε περιοχή βάθους μέχρι 0.025mm και διαμέτρου 0.0025mm. Το μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι χρονοβόρα, ενώ και για την ακρίβεια της μεθόδου υπάρχουν ερωτηματικά, ιδιαίτερα σε μέταλλα που έχουν υποστεί παραμόρφωση της ατομικής τους δομής λόγω προηγούμενων θερμικών κατεργασιών.

Έχουν γίνει ακόμα προσπάθειες μέτρησης των παραμενουσών τάσεων σε μέταλλα με έμμεσο τρόπο, μετρώντας τις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού που εξαρτώνται από την επιβαλλόμενη τάση. Από τις προταθείσες τεχνικές ξεχωρίζουν εκείνες των υπερήχων και της σκληρότητας. Η τεχνική με υπερήχους (ultrasonic technique) γίνεται είτε με πολωμένα υπερηχητικά κύματα (polarized ultrasonic waves), που βασίζεται στη μεταβολή της γωνίας πόλωσης με την τάση, είτε με χρήση του γεγονότος ότι η απορρόφηση των υπερηχητικών κυμάτων είναι συνάρτηση της τάσης. Η τεχνική της σκληρότητας (hardness technique) βασίζεται στη μεταβολή της σκληρότητας του υλικού σαν συνάρτηση της τάσης. Καμία, πάντως, τεχνική της ομάδας δεν χρησιμοποιείται ακόμα στην πράξη.

Τέλος, έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές που βασίζονται στην παρατήρηση της φύσης των ρωγμών σε συγκολλητά δοκίμια. Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται με έκθεση των

συγκολλήσεων σε διαβρωτικό περιβάλλον και εφαρμογή εξωτερικών φορτίων. Όλες, όμως, αυτές οι τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για ποιοτική μόνο έρευνα.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότερες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις.

### **3.3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**

Οι τεχνικές χαλάρωσης των τάσεων (stress relaxation techniques) βασίζονται στην αρχή ότι οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται κατά την αποφόρτιση (unloading) είναι ελαστικές, ακόμη και αν το υλικό έχει υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις κάτω από την επίδραση φορτίων. Είναι, επομένως, δυνατή η εύρεση των παραμενουσών τάσεων χωρίς γνώση της προηγούμενης ιστορίας κατεργασιών και φορτίσεων του υλικού.

Παρακάτω δίνονται επιγραμματικά 5 μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων που βασίζονται στην παραπάνω αρχή [48]. Οι πρώτες δύο εφαρμόζονται κυρίως σε ελάσματα, οι επόμενες δύο σε τριδιάστατα σώματα και η πέμπτη είναι ποιοτική. Εκτός, όμως, από τις μεθόδους αυτές, υπάρχουν και άλλες που ο χώρος δεν επιτρέπει την περιγραφή τους.

- (1) Τεχνικές κοπής με χρήση επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης.
- (2) Τεχνική διάτρησης των Mathar - Soete.
- (3) Τεχνική διάτρησης του Gunnert.
- (4) Τεχνική κοπής των Rosenthal - Norton.
- (5) Τεχνική διάτρησης εύθραυστων επικαλύψεων.

### **3.3.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ**

Κάτω από την επίδραση εσωτερικών ή εξωτερικών δυνάμεων παρατηρείται παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής των υλικών, άρα μεταβολή των ενδοατομικών τους αποστάσεων. Όταν η παραμόρφωση υπερβεί το όριο ελαστικότητας, λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση που οφείλεται στην ολίσθηση των πλεγματικών επιπέ-



δων μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η μεταβολή της ενδοατομικής απόστασης είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης.

Η τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων με ακτίνες X είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση σε μεταλλικούς κρυστάλλους. Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων X καθιστά δυνατή τη διείσδυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά ένα ποσοστό και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

Δυο γενικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την καταγραφή του τρόπου διάθλασης των ακτίνων X [48]:

- (1) Η φωτογραφική μέθοδος (photographic or X-ray film).
- (2) Η μέθοδος διαθλασίμετρου ακτίνων X (X-ray diffractometer or counter tube technique). Στις περισσότερες περιπτώσεις η μέθοδος αυτή διαφέρει από την προηγούμενη μόνο στο είδος του ανιχνευτή (detector) και στη γωνία μεταξύ του δοκιμίου και της δέσμης των ακτίνων X. Η γωνία αυτή είναι  $90^\circ$  στην φωτογραφική μέθοδο και  $\theta$  στη μέθοδο διαθλασίμετρου. Για την αποτύπωση της έντασης της ανακλώμενης δέσμης χρησιμοποιούνται ένας μετρητής και μια οπή που κινούνται πάνω σε γωνιομετρικό κύκλο. Η γωνία διάθλασης προσδιορίζεται ως η γωνία εκείνη που δίνει τη μέγιστη ένταση.

### 3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε μεταλλικές συγκολλητές κατασκευές, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής μέτρησης προκειμένου να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος σκοπός. Μερικοί από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή αυτή είναι:

- (α) η επιτρεπόμενη έκταση βλάβης στην κατασκευή (καταστρεπτική ή μη καταστρεπτική μέτρηση).
- (β) η απαιτούμενη ποιότητα της μέτρησης (ακρίβεια των μετρήσεων, είδος και πιθανή κατανομή τάσεων, κλπ.).
- (γ) η επίδραση μεταβολών των ιδιοτήτων του υλικού στα αποτελέσματα.

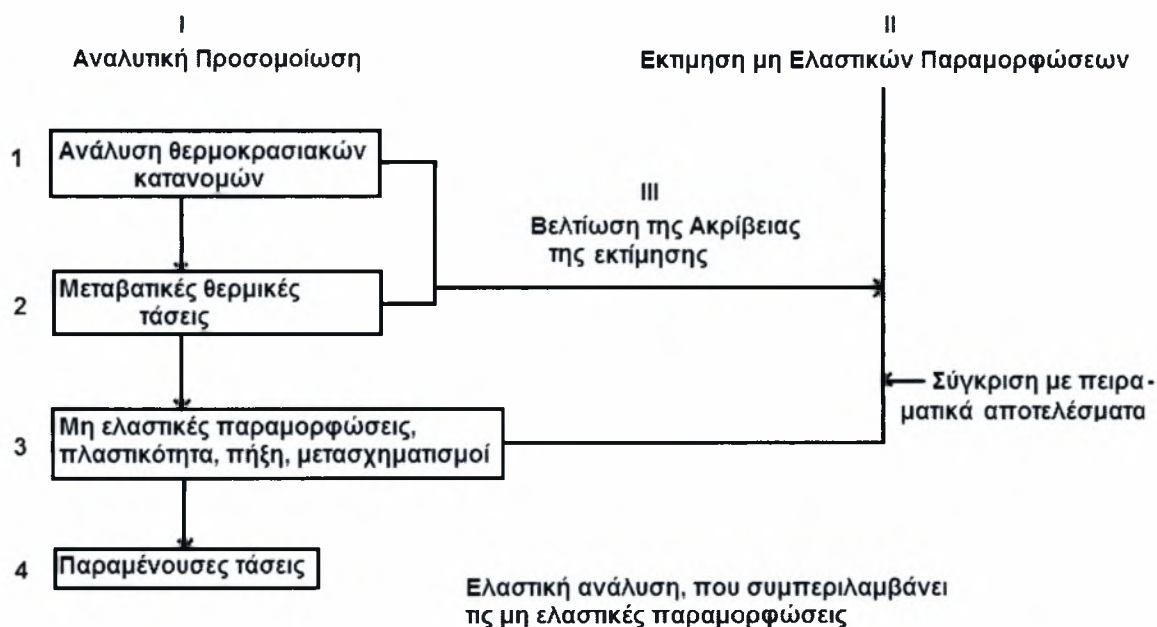
(δ) το κατά πόσο η μέτρηση θα γίνει σε εργαστήριο ή στον τόπο ανέγερσης της κατασκευής.

(ε) το κόστος και η διάρκεια της μέτρησης.

### 3.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

#### 3.4.1 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 [48]  
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 συμβιβάστες (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 συμβιβάστες 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.

### **3.4.2 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 H/Y. Μπορεί να λάβει υπόψη της τη μεταβολή των φυσι-

κών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με τη θερμοκρασία, την επίδραση περισσότερων 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.

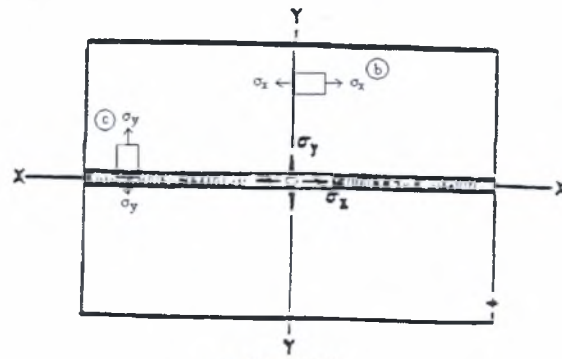
### **3.5 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ**

#### **3.5.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΛΟΓΩ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ**

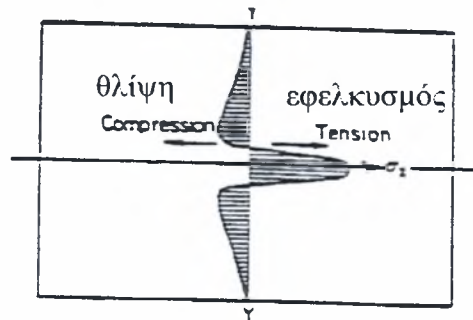
Οι παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται κατά την ανέγερση συγκολλητών κατασκευών διακρίνονται σε δυο είδη:

- (1) Στις παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης, που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση ελεύθερου, δηλαδή χωρίς εξωτερικούς περιορισμούς, μελών.
- (2) Στις τάσεις αντίδρασης (reaction stresses) που οφείλονται στην παρουσία εξωτερικών περιορισμών (external restraint).

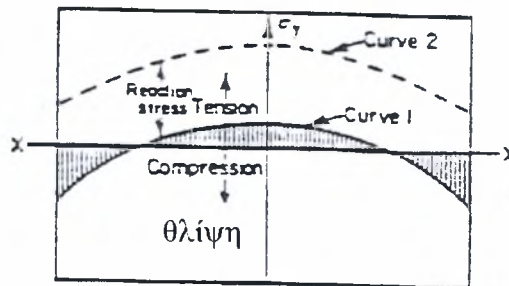
Το σχήμα 3.3 δείχνει μια τυπική κατανομή παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση κατά συμβολή (butt weld). Οι πιο σημαντικές τάσεις είναι οι  $\sigma_x$ , παράλληλες προς τη διεύθυνση συγκόλλησης, και  $\sigma_y$ , κάθετες προς αυτήν.



a. Butt Weld  
Συγκόλληση κατά συμβολή



b. Distribution of  $\sigma_x$  Along YY  
Κατανομή της  $\sigma_x$  κατά μήκος του yy



c. Distribution of  $\sigma_y$  Along xx

**Σχήμα 3.3 :** Τυπική κατανομή παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση κατά συμβολή [48]

Το σχήμα 3.3β δείχνει την κατανομή των διαμήκων τάσεων  $\sigma_x$ . Εφελκυστικές τάσεις μεγάλου μεγέθους αναπτύσσονται στην περιοχή γύρω από τη συγκόλληση, που σταδιακά μειώνονται, για να γίνουν θλιπτικές σε απόσταση από τη γραμμή συγκόλλησης. Η κατανομή αυτών των τάσεων χαρακτηρίζεται από δυο παραμέτρους:

- (1) τη μέγιστη τάση στην περιοχή της συγκόλλησης,  $\sigma_m$  και
- (2) το πλάτος της ζώνης εφελκυσμού της παραμένουσας τάσης,  $b$ .

Σε συγκολλήσεις κοινών χαλύβων (low-carbon steels), η μέγιστη παραμένουσα τάση  $\sigma_m$  είναι συνήθως ίση προς την τάση διαρροής του υλικού.

Ένας συνηθισμένος τρόπος προσέγγισης της κατανομής των παραμενουσών τάσεων  $\sigma_x$  είναι εκείνος που παρέχεται από τη σχέση 3.9:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y}{b} \right)^2} \quad (3.9)$$

Η κατανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων  $\sigma_y$  κατά μήκος της συγκόλλησης παριστάνεται με την καμπύλη 1 του σχήματος 3.3γ. Εφελκυστικές τάσεις χαμηλής σχετικά έντασης δημιουργούνται στο μέσο της συγκόλλησης και θλιπτικές τάσεις κατά τα άκρα της ραφής.

Αν η πλευρική συστολή της ραφής παρεμποδίζεται, όμως, από κάποιον εξωτερικό περιορισμό, όπως π.χ. από μια σειρά ελατηρίων, τότε η κατανομή της  $\sigma_y$  παίρνει τη μορφή της καμπύλης 2 του σχήματος. Παρατηρείται, δηλαδή, υπέρθεση εφελκυστικών τάσεων με σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή σε όλο το μήκος της ραφής. Οι τάσεις αυτές είναι οι τάσεις αντίδρασης. Σημειώνεται, ότι η παρουσία εξωτερικού περιορισμού έχει αμελητέα επίδραση στην κατανομή των διαμήκων παραμενουσών τάσεων  $\sigma_x$ . Πρέπει, ακόμα, να αναφερθεί ότι τάσεις αντίδρασης δημιουργούνται και κατά τη διάρκεια συγκόλλησης με πολλαπλές στρώσεις (multiple welding).

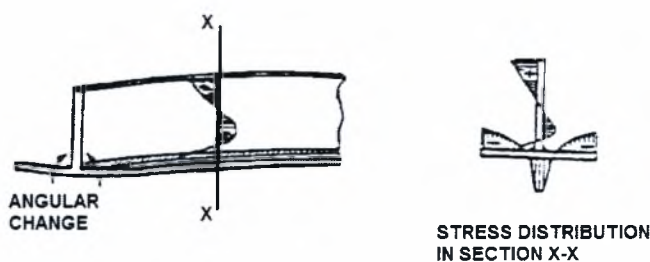
Τέλος, σημειώνεται ότι οι κατανομές παραμενουσών τάσεων που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2 αναφέρονται σε τάσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια των συγκολληθέντων ελασμάτων. Όταν τα ελάσματα είναι λεπτά, τότε μπορεί να υποθεθεί, χωρίς μεγάλο σφάλμα, ότι η ίδια κατανομή υπάρχει και σε οποιοδήποτε επίπεδο κάθετο προς τον άξονα z. Στην περίπτωση, όμως, που τα ελάσματα έχουν μεγάλο πάχος, μεγαλύτερο για παράδειγμα των 25mm, τότε η κατανομή των τάσεων κατά το πάχος (άξονας z) δεν είναι πια ομοιόμορφη όπως θα φανεί παρακάτω.

### 3.5.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

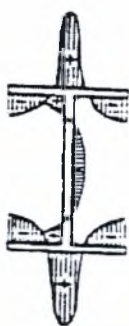
Σε περιπτώσεις που η απαιτούμενη ροπή αντίστασης διατομής δεν μπορεί να καλυφθεί με εξελασμένες διατομές του εμπορίου, παρουσιάζεται η ανάγκη κατασκευής σύνθετων διατομών με συγκόλληση ελασμάτων. Το Σχήμα 3.4 δείχνει τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε τέτοιες σύνθετες διατομές (built-up shapes). Το Σχήμα 3.4α παρουσιάζει τις παραμένουσες τάσεις και την παραμόρφωση που ανα-

πτύσσονται 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 3.4α 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 διαμήκουσ συστολής της συγκόλλησης.

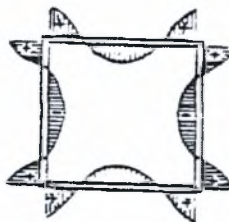
Τα Σχήματα 3.4β και γ δείχνουν τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε διατομή H (διπλού T) και σε κοίλη δοκό αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις οι παραμένουσες τάσεις οι παράλληλες προς τον άξονα της συγκόλλησης είναι εφελκυστικές στις περιοχές των συγκολλήσεων και θλιπτικές μακριά από αυτές.



α. Παραμένουσες τάσεις και παραμόρφωση σε συγκόλληση διατομής T



β. Διατομή H



γ. Κοίλη δοκός

**Σχήμα 3.4 :** Τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές διατομές [48]

## 3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

### 3.6.1 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.

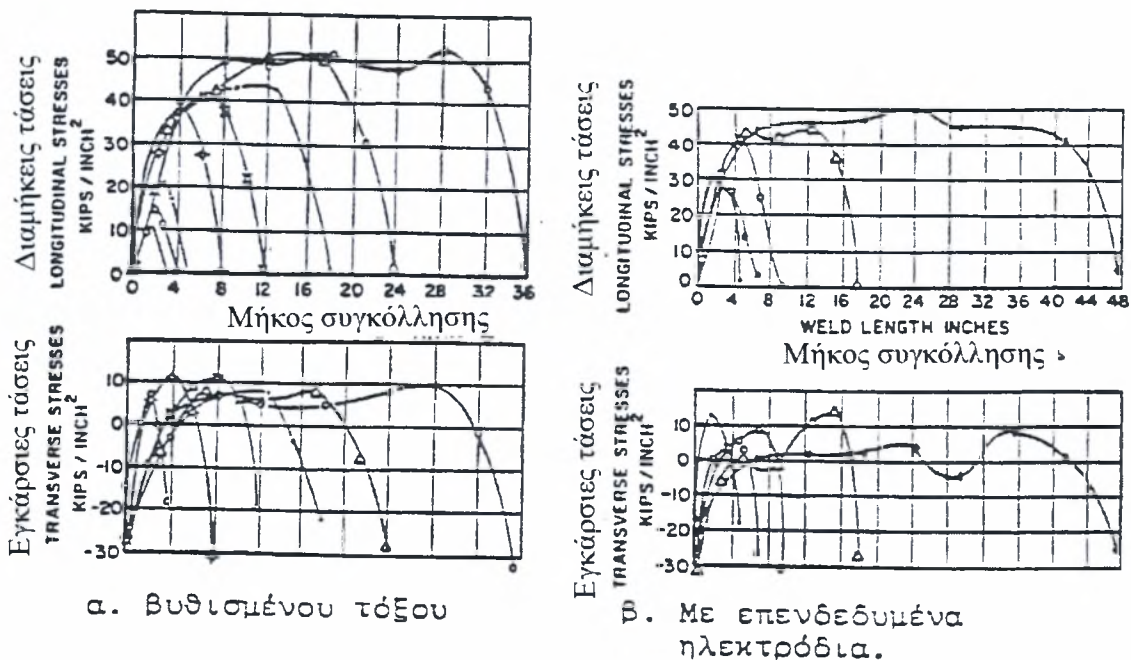
### 3.6.2 ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Για τη σωστή μέτρηση των παραμενουσών τάσεων σε μια συγκολλητή κατασκευή, είναι απαραίτητη προϋπόθεση το μέγεθος του δοκιμίου να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιέχει παραμένουσες τάσεις μεγέθους ίσου προς τις μέγιστες δυνατές που μπορούν να αναπτυχθούν σε πραγματικές κατασκευές.

Διάφοροι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει σειρά πειραμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό του ελαχίστου μεγέθους των δοκιμίων. Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα από μια τυπική τέτοια σειρά πειραμάτων, που έγιναν κατά τη συγκόλληση κατά συμβολή ελασμάτων από μαλακό χάλυβα με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια και με την τεχνική βυθισμένου τόξου. Όλα τα πειράματα έγιναν με απουσία οποιουδήποτε εξωτερικού περιορισμού. Τα σχήματα 3.5α και β δείχνουν τις κατανομές των παραμε-

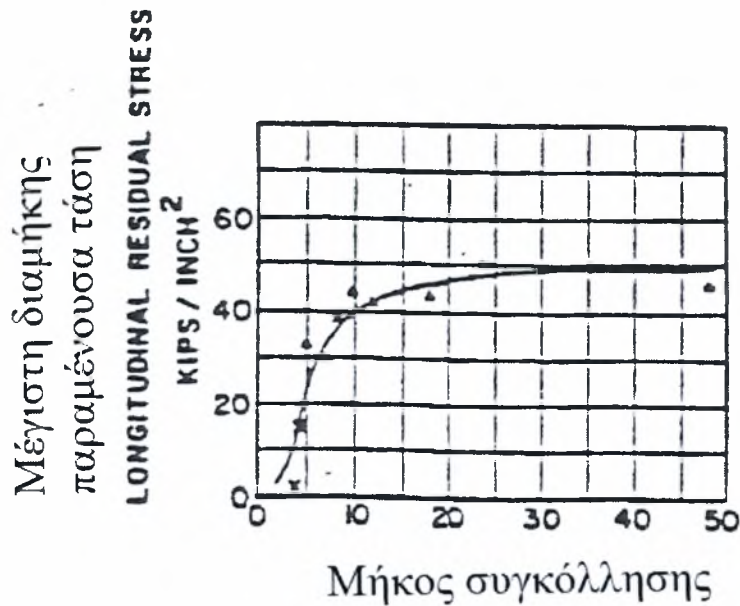


νουσών τάσεων σε συγκολλήσεις διαφόρων μηκών, που έγιναν με τις μεθόδους βυθισμένου τόξου και επενδεδυμένων ηλεκτροδίων αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.5 :** Κατανομή παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή μηκών [48]

Η τιμή της διαμήκουσ παραμενουσας τάσης πρέπει να είναι ίση με το μηδέν στα δυο άκρα της συγκόλλησης και να αποκτά τη μέγιστη τιμή στην κεντρική περιοχή της. Το σχήμα δείχνει ότι η τιμή της μέγιστης τάσης αυξάνει με αύξηση του μήκους συγκόλλησης. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 3.6, που δείχνει τη μέγιστη διαμήκη παραμενουσα τάση σαν συνάρτηση του μήκους συγκόλλησης. Παρατηρείται ότι απαιτούνται μήκη συγκόλλησης μεγαλύτερα των 460mm (18in) για την ανάπτυξη των μέγιστων δυνατών διαμήκων εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι, σε συγκολλήσεις με μήκος μεγαλύτερο των 460mm, η κατανομή των διαμήκων παραμενουσών τάσεων στην κεντρική τους περιοχή είναι ομοιόμορφη.



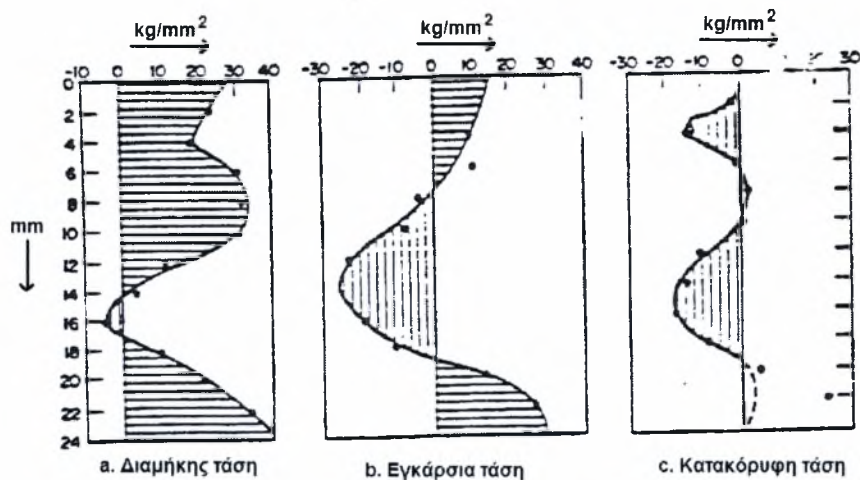
**Σχήμα 3.6** : Επίδραση του μήκους συγκόλλησης στη μέγιστη παραμένουσα τάση [48]

Το σχήμα 3.5 ακόμη δείχνει ότι οι εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές στις κεντρικές περιοχές και θλιπτικές στα άκρα της συγκόλλησης. Το μήκος συγκόλλησης δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος της μέγιστης εγκάρσιας τάσης.

Αναφέρεται ακόμα ότι το πλάτος του δοκιμίου έχει αμελητέα επίδραση στην κατανομή των παραμενουσών τάσεων, αρκεί το μέγεθός του να είναι ίσο με μερικά πολλαπλάσια του πλάτους της ζώνης που παρουσιάζονται εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις.

### 3.6.3 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,  $\sigma_z$  ούτε η κατανομή των άλλων τάσεων  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$  κατά το πάχος.



**Σχήμα 3.7 :** Κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους [48]

Το σχήμα 3.7 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 τάσεις 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  $\sigma_z$ . Η  $\sigma_z$  είναι, όπως πρέπει, μηδέν στις δύο επιφάνειες. Στο εσωτερικό της συγκόλλησης μετρήθηκαν θλιπτικές τάσεις.

### 3.6.4 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.)

### 3.6.5 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:

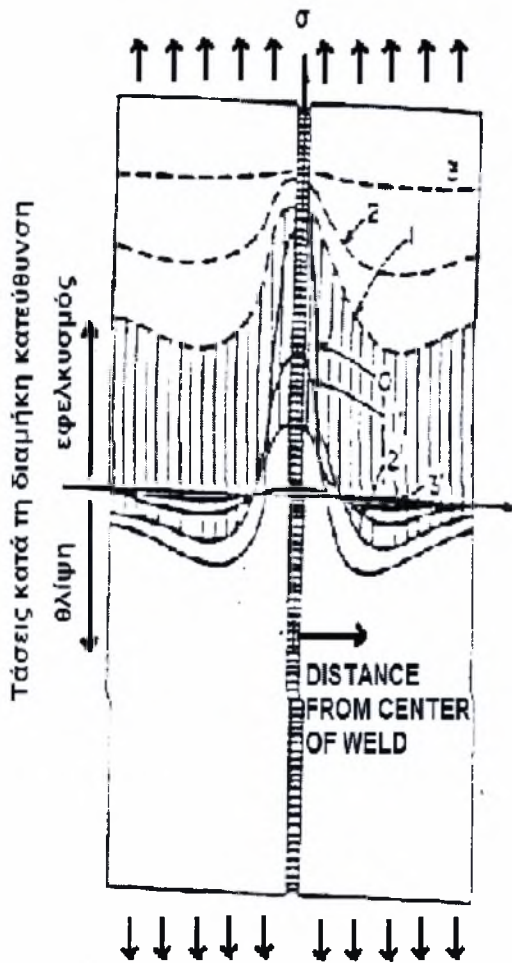
(α) Η επίδραση της ακολουθίας συγκόλλησης στις παραμένουσες τάσεις κατά μήκος της συγκόλλησης είναι αμελητέα. Σε όλες τις περιπτώσεις μετρήθηκαν εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις υψηλής έντασης στο μέταλλο συγκόλλησης.

(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.

### 3.7 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 ανακατανεμηθούν, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αιχμών στην κατανομή τους. Το Σχήμα 3.8 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 3.8** : Σχηματικές κατανομές παραμενουσών τάσεων σε συγκολλήσεις κατά συμβολή υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων. [48]

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  $\sigma_2$ . 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  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  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.

### **3.8 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ**

Τα διάφορα είδη παραμορφώσεων που συναντώνται σε συγκολλητές κατασκευές οφείλονται σε τρεις βασικές μεταβολές διαστάσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης:

- (1) Την εγκάρσια συστολή (transverse shrinkage), κάθετα προς τη γραμμή συγκόλλησης.
- (2) Τη διαμήκη συστολή (longitudinal shrinkage), παράλληλα προς τη γραμμή συγκόλλησης.

(3) Τη γωνιακή παραμόρφωση (angular distortion), δηλαδή την περιστροφή γύρω από τη γραμμή συγκόλλησης.

Οι βασικές αυτές μεταβολές διαστάσεων φαίνονται στο σχήμα 3.9 μαζί με τα είδη παραμορφώσεων που οφείλονται σε αυτές και που είναι τα ακόλουθα:

(α) Εγκάρσια συστολή, δηλαδή συστολή κάθετη προς τη γραμμή συγκόλλησης.

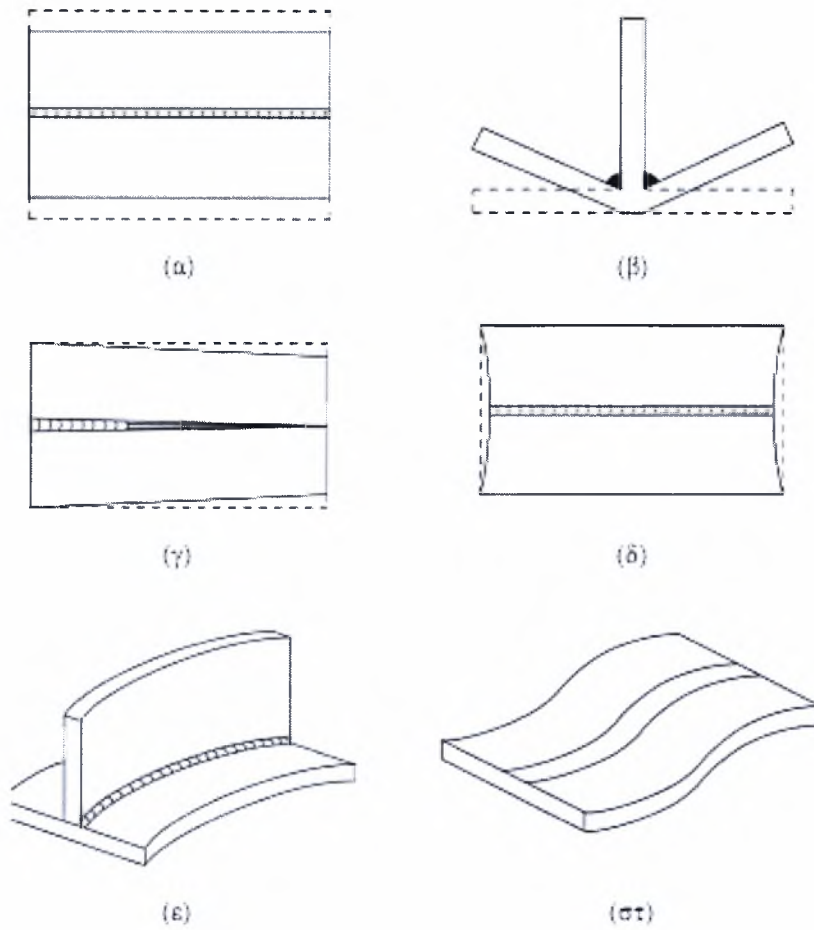
(β) Γωνιακή μεταβολή, που οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασιών κατά τη διεύθυνση του πάχους.

(γ) Περιστροφική παραμόρφωση (rotational distortion), δηλαδή γωνιακή παραμόρφωση στο επίπεδο του ελάσματος που οφείλεται σε θερμική διαστολή.

(δ) Διαμήκης συστολή, δηλαδή συστολή κατά τη διεύθυνση της γραμμής συγκόλλησης.

(ε) Διαμήκης καμπτική παραμόρφωση (longitudinal bending distortion), που συμβαίνει σε επίπεδο που περιέχει τη γραμμή συγκόλλησης και είναι κάθετο στο έλασμα.

(στ) Παραμόρφωση λυγισμού (buckling distortion), που συμβαίνει σε λεπτά ελάσματα κάτω από της επίδραση των θλιπτικών θερμικών τάσεων.



**Σχήμα 3.9 :** Βασικοί τύποι παραμορφώσεων κατά την συγκόλληση

### 3.8.1 ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Η αντιμετώπιση του προβλήματος των παραμορφώσεων σε συγκολλητές κατασκευές μπορεί να γίνει ακολουθώντας μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες γενικές κατευθύνσεις:

- (1) Ανάπτυξη μεθόδων συγκόλλησης και διαδικασιών ανέγερσης που ελαχιστοποιούν τις παραμορφώσεις
- (2) Δημιουργία ορθολογιστικών προτύπων για αποδεκτά όρια παραμορφώσεων
- (3) Ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών για τη διόρθωση των ήδη αναπτυχθέντων παραμορφώσεων



Με κατάλληλο συνδυασμό των παραπάνω θεωρήσεων πιστεύεται ότι θα επιτευχθεί ο πλέον αποτελεσματικός έλεγχος των παραμορφώσεων. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια κάπως λεπτομερέστερη ανάπτυξη τους.

**Ελαχιστοποίηση παραμορφώσεων:** Είναι, προφανώς, προτιμότερο να γίνει ανέγερση μιας συγκολλητής κατασκευής χωρίς παραμορφώσεις, παρά να απαιτηθεί διόρθωσή τους αφού έχουν δημιουργηθεί. Απαιτείται, επομένως, μια μέθοδος συγκόλλησης που σαν βασικό πλεονέκτημα θα έχει την πρόκληση ελάχιστης, αν όχι μηδενικής παραμόρφωσης. Με τη σημερινή τεχνογνωσία κάτι τέτοιο θεωρείται αδύνατο.

Πέραν της μεθόδου συγκόλλησης, όμως, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που οδηγούν στην ενίσχυση της τάσης δημιουργίας των παραμορφώσεων, όπως η ακολουθία της ανέγερσης, ο βαθμός περιορισμού με τον οποίο γίνεται η συγκόλληση, οι γεωμετρικές λεπτομέρειες της ραφής, κτλ.

**Ορθολογιστικά Πρότυπα:** Επειδή, σύμφωνα με την σημερινή τεχνογνωσία, είναι αδύνατον η αποφυγή των παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης, είναι επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας προτύπων που θα ορίζουν αποδεκτά όρια των παραμορφώσεων αυτών. Τα πρότυπα αυτά πρέπει να λαμβάνουν υπ'όψη την αξιοπιστία της κατασκευής, την οικονομική αξία της κατασκευής, και το κόστος ανέγερσής της. Παρά τις σημαντικές προσπάθειες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια προς την κατεύθυνση αυτή, απαιτείται ακόμα σημαντική ερευνητική δραστηριότητα.

**Διόρθωση παραμορφώσεων:** Αν και η διόρθωση παραμορφώσεων που έχουν ήδη δημιουργηθεί, και που γίνεται με θερμικά μέσα, πρέπει να κρατιέται στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα, ιδιαίτερα στην περίπτωση θερμικά κατεργασμένων υλικών, παρατηρούνται πολλές περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια. Στην περίπτωση αυτή είναι, βέβαια, απαραίτητη η εφαρμογή διορθωτικών μεθόδων. Δυστυχώς, ακόμα και σήμερα, οι περισσότερες από τις μεθόδους αυτές εξαρτούν την επιτυχία τους από τη δεξιοτεχνία του τεχνίτη που θα τις εφαρμόσει. Απαιτείται, επομένως, συστηματική έρευνα για τη μετατροπή τους σε τεχνικές που βασίζονται σε επιστημονικές γνώσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

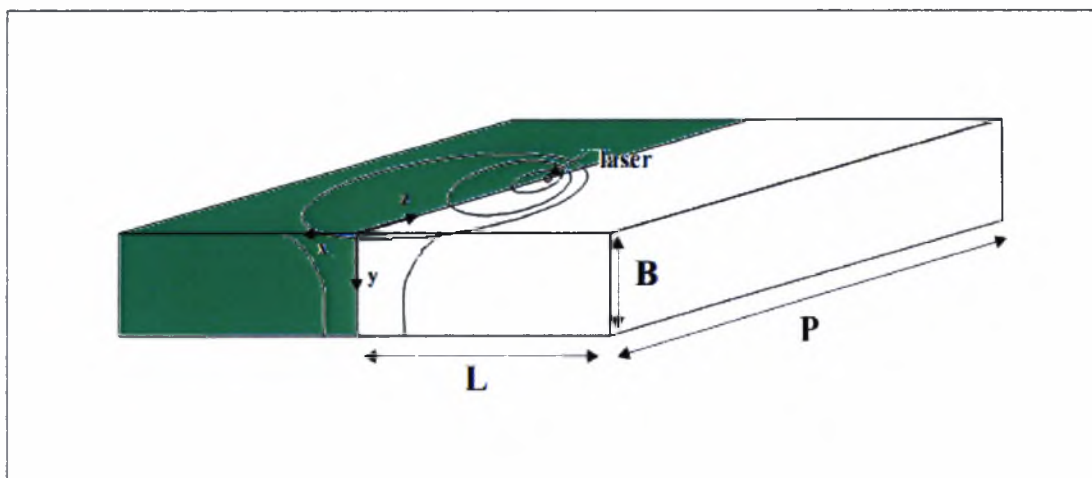
### 4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε όπως προαναφέρθηκε, το υπολογιστικό πακέτο ABAQUS που βασίζεται στα πεπερασμένα στοιχεία. Για την ανάλυση ελήφθη υπόψη η ακριβής εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων από την θερμοκρασία

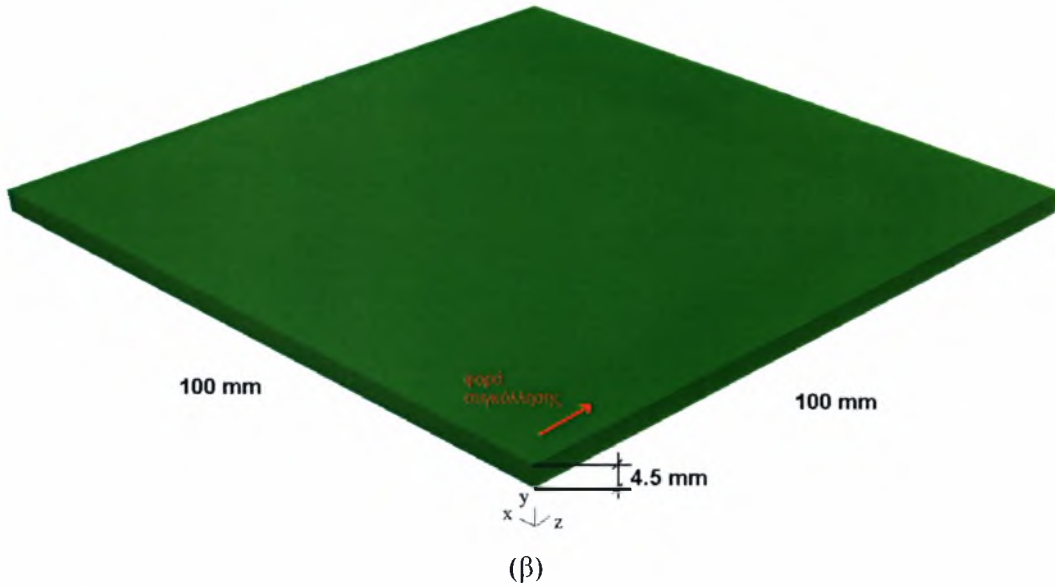
Προκειμένου να επιτευχθεί μια κατά το δυνατόν πληρέστερη ανάλυση των συγκολλησεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία τριδιάστατου μοντέλου (3-D). Λόγω συμμετρίας του προβλήματος ως προς το επίπεδο  $x$  η επίλυση γίνεται στο μισό του προβλήματος.

Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο αυτό. Γίνεται η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος και ο τρόπος κατασκευής των καννάβων. Τέλος, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στον τρόπο με τον οποίο προσημειώθηκε η δέσμη laser σαν κινούμενη πηγή θερμότητας.

Η σχηματική παράσταση της περιοχής που μοντελοποιήθηκε φαίνεται στα σχήματα 4.1α και 4.1β. Για το τριδιάστατο μοντέλο κατασκευάστηκε ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων που φαίνεται στα σχήματα 4.2 και 4.3.



(α)



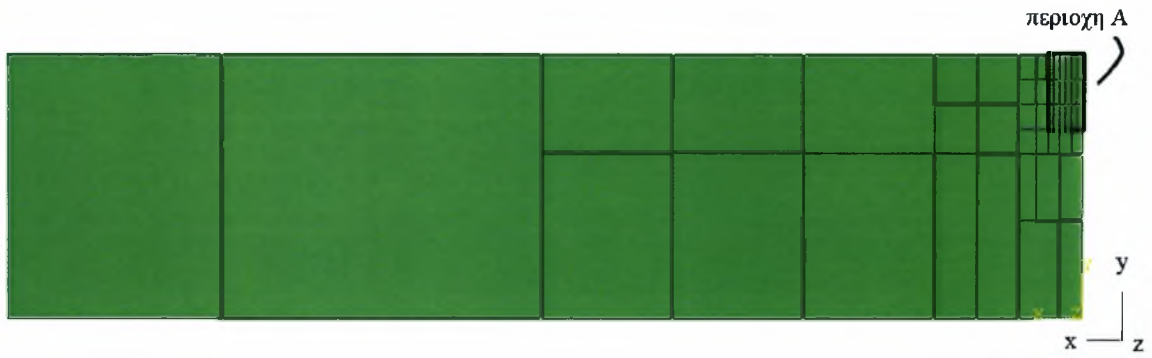
**Σχήμα 4.1 :** (α) Σχηματική παράσταση των ελασμάτων και της λίμνης συγκόλλησης  
(β) Σχηματική παράσταση του ελάσματος προσομοίωσης

Ο κάναβος έχει διαστάσεις μήκους  $L=100\text{mm}$ , πλάτους  $P=100\text{mm}$  και πάχους  $B=4.5\text{mm}$ . Αποτελείται από 76076 κόμβους και 51000 στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν τριδιάστατα ισοπαραμετρικά 8-κομβικά στοιχεία. Πιο κάτω αναλύεται ακριβέστερα η διακριτοποίηση των στοιχείων.

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται αναλυτικότερα η διακριτοποίηση στο  $x$ - $y$  επίπεδο. Παρατηρείται μια περιοχή με μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων όπου τα στοιχεία έχουν μήκος  $\Delta x=0.1\text{ mm}$ , πλάτος  $\Delta z=0.1\text{mm}$  και ύψος  $\Delta y=0.422\text{mm}$  (περιοχή A) και ομάδες περιοχών με μικρότερη πυκνότητα στοιχείων. Η ανομοιόμορφη διακριτοποίηση επιλέχτηκε προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα ακριβέστερης ανάλυσης στα στοιχεία πρόσπτωσης της δέσμης του τόξου .



(α)



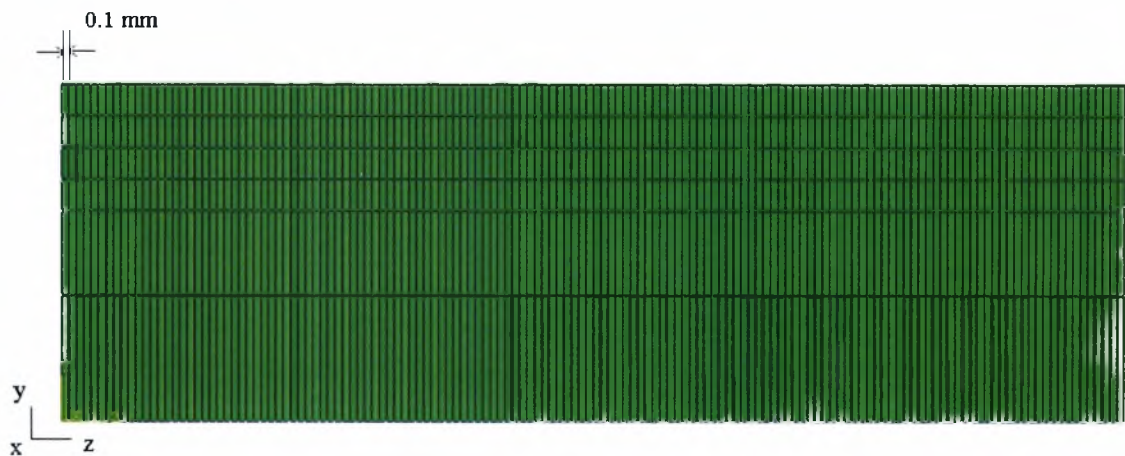
(β)

**Σχήμα 4.2 :** (α) Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων 3-D κατά άξονα x και y ( πρόσοψη)  
(β) μεγέθυνση περιοχής

Η διακριτοποίηση κατά τον άξονα z είναι ομοιόμορφη και έγινε ανά 0.1 mm όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3(α) και 4.3(β)



(α)

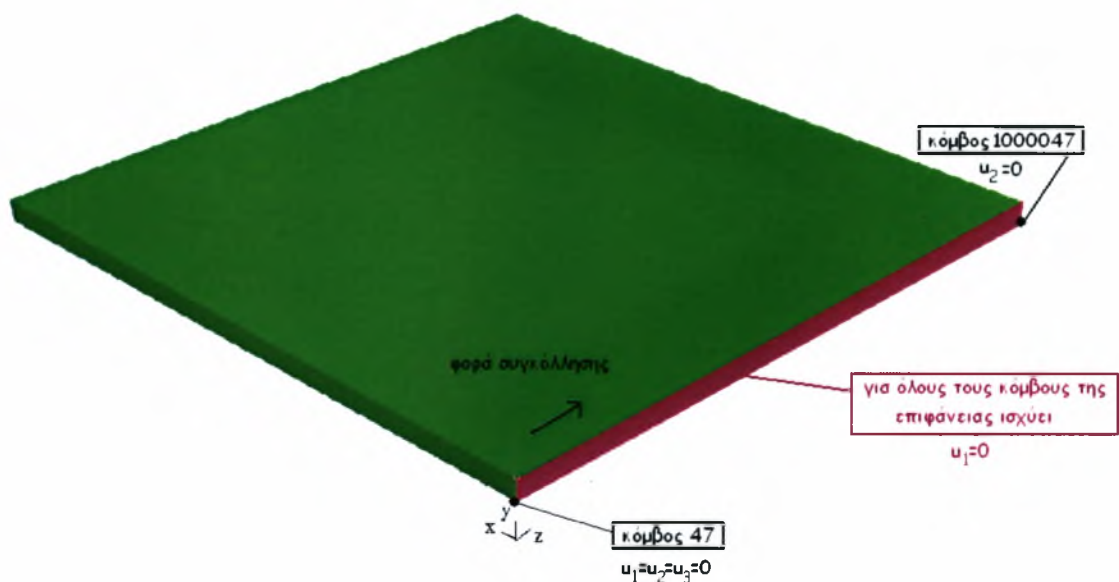


(β)

**Σχήμα 4.3:** (α)Μήκος στοιχείων στον άξονα z (β)Διακριτοποίηση κατά άξονα z (πλάγια όψη)

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος ορίστηκαν ως εξής :

- Στον κόμβος 47, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4 η μετατόπιση ως προς τους άξονες x, y και z είναι μηδενική
- Στους κόμβους της επιφάνειας χρώματος μωβ του σχήματος 4.4 η μετατόπιση ως προς τον άξονα x ορίστηκε μηδενική
- Στους κόμβους της επιφάνειας χρώματος μωβ του σχήματος 4.4 η μετατόπιση ως προς τον άξονα x ορίστηκε μηδενική

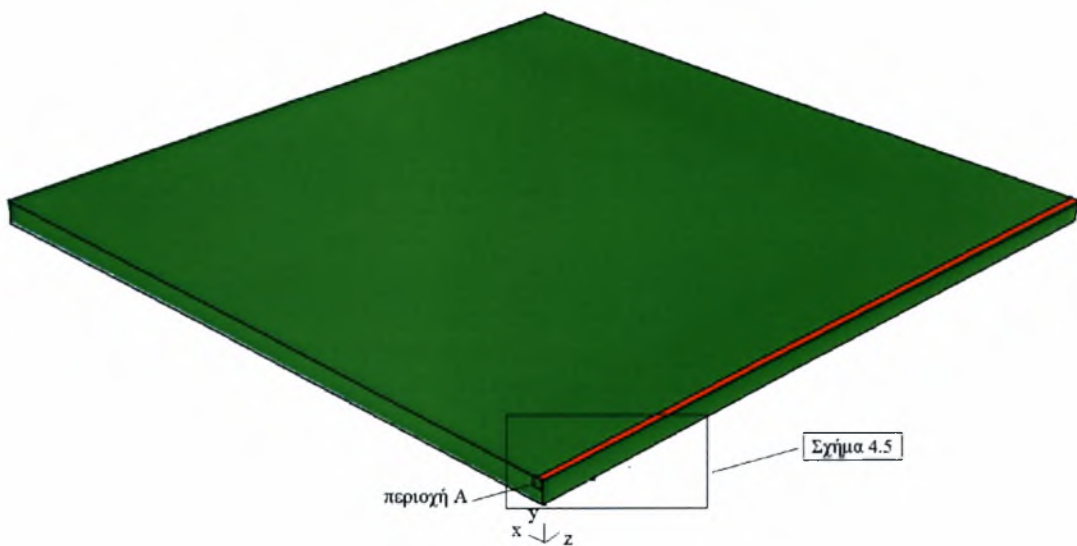


**Σχήμα 4.4 :** Συνοριακές συνθήκες

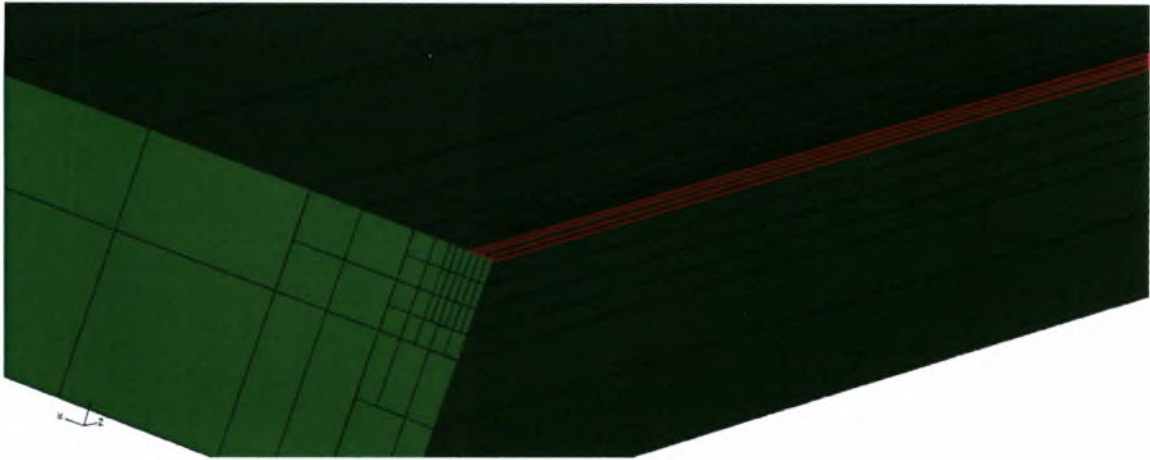
Η δέσμη του τόξου αντιμετωπίστηκε ως επιφανειακά καταμεμημένο φορτίο με κυκλική διατομή. Αναλυτικότερα:

#### 4.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Η δέσμη της ακτίνας Laser που αποτελεί τη θερμική πηγή του συγκεκριμένου προβλήματος μεταφοράς θερμότητας προσομοιώθηκε ως ένα επιφανειακά καταμεμημένο θερμικό φορτίο το οποίο εφαρμόζεται στην πάνω επιφάνεια της περιοχής Α όπως φαίνεται στα σχήματα 4.4 και 4.5.

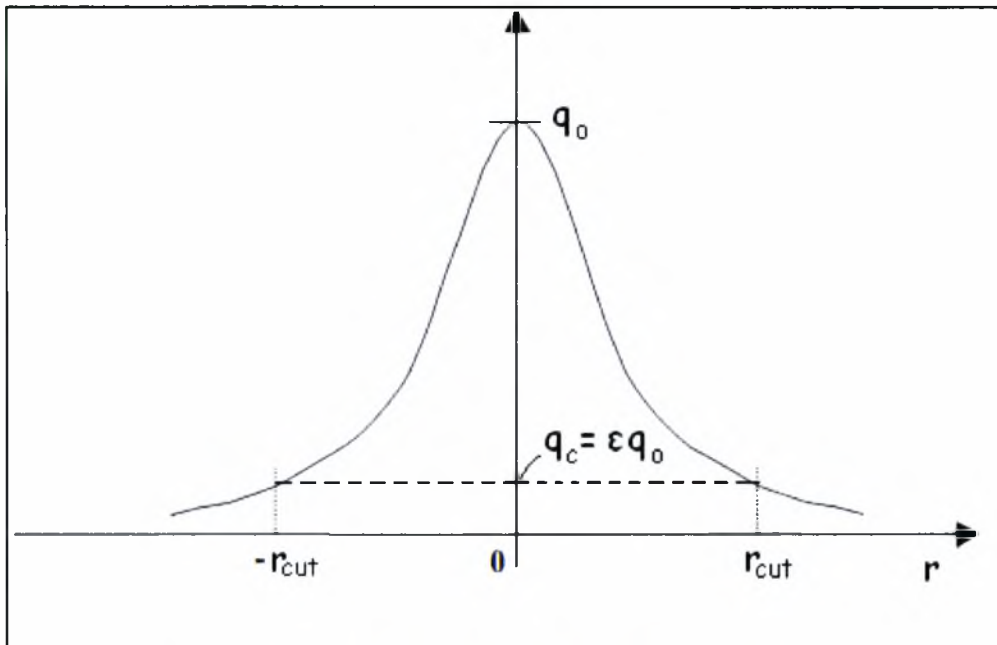


**Σχήμα 4.5 :** Επιφάνεια πρόσπτωσης της ακτίνας Laser



**Σχήμα 4.6** : Μεγέθυνση της επιφάνειας σχήματος 4.4

Η διατομή της ακτίνας του Laser είναι κυκλική και η κατανομή της ενέργειας ακολουθεί κατανομή Gauss. Η κατανομή Gauss έχει την μορφή «καμπάνας» και φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



**Σχήμα 4.7**: Κατανομή Gauss της ακτίνας Laser [46]

Συγκεκριμένα, το κέντρο της θερμικής πηγής κινείται με ταχύτητα  $v = 26.7 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  και η παρεχόμενη θερμική ισχύς της πηγής προσδιορίζεται από τη σχέση (3.10) που ακολουθεί

$$q(r) = \begin{cases} q_o e^{(-r/c)^2} & \text{εάν } r \leq r_{cut}, \\ 0 & \text{εάν } r > r_{cut}, \end{cases} \quad (3.10)$$

Με άλλα λόγια όταν η ακτίνα της δέσμης του laser είναι μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική απόσταση διάχυσης της θερμότητας  $r_{cut}$ , η θερμότητα δεν προλαβαίνει να διαχυθεί και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί η μετάδοση θερμότητας προς την κατεύθυνση αυτή. Στην αντίθετη περίπτωση ισχύει το πρώτο μέρος της εξίσωσης  $q_o e^{(-r/c)^2}$ .

Στην σχέση 3.10, το  $r$  είναι η απόσταση ενός σημείου στην επιφάνεια όπου πέφτει η ακτίνα Laser από το κέντρο της πηγής,  $q_o$  είναι η μέγιστη τιμή του  $q$  και δίνεται όταν το κέντρο της δέσμης βρίσκεται στο σημείο όπου το  $r = 0$  ( $q(0) = q_o$ ).

Ισχύει ότι :

$$\int_0^{r_{cut}} q(r) 2\pi r dr = P \quad \Rightarrow \quad q_o = \frac{P}{\pi c^2 \left[ 1 - e^{-(r_{cut}/c)^2} \right]} \quad (3.11)$$

$$\text{όπου } r_{cut} = \frac{d_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma}}{2} = \frac{0.6\text{mm}}{2} = \frac{0.0006\text{m}}{2} = 0.0003\text{m},$$

$P$  είναι η προσπίπτουσα ισχύς της δέσμης Laser στην επιφάνεια του ελάσματος και ισούται με  $P = 3818W$

Αρκεί να υπολογιστεί το  $c$ .

Ισχύει ότι ,

$$q_{cut} \equiv q(r_{cut}) = q_o e^{-(r_{cut}/c)^2} \quad (3.12)$$



Θέτοντας  $\varepsilon = \frac{q_c}{q_o} < 1$  , αντικαθιστώντας στην σχέση το  $q_c$  και λύνοντας ως

προς  $c$ , έχουμε :

$$c = \frac{r_{cut}}{\sqrt{-\ln \varepsilon}} \quad (3.13)$$

Τέλος, δίνοντας στο  $\varepsilon$  την τιμή 0.3 το  $c$  μπορεί να υπολογιστεί και θεωρείται γνωστό. Συνεπώς, το  $q_o$  είναι γνωστό από την σχέση 3.11 και πλέον μπορεί να υπολογιστεί το  $q(r)$  για κάθε τιμή του  $r$  (σχέση 3.10).

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

Στο αρχείο «input» χρησιμοποιήθηκε η εντολή COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT, η οποία λύνει βηματικά το θερμοκρασιακό πρόβλημα ταυτόχρονα με το τασικό. Ωστόσο, παράμετρος αυτής της εντολής είναι η DELTMX η οποία είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο ανά βήμα. Λόγω μεγάλης τιμής των βαθμών ελευθερίας, για να επιτύχουμε ικανοποιητικό υπολογιστικό χρόνο, η παράμετρος αυτή πήρε την τιμή των 3000 °C και το πρόβλημα λύθηκε ολοκληρωτικά. Για να έχουμε όμως, πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, το αρχείο «έτρεξε» και με τιμή της παραμέτρου ίση με 300 °C και πήραμε αποτελέσματα για την αρχή μόνο της συγκόλλησης. Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα για το πρόβλημα με μεταβλητή DELTMX=3000 και στο τέλος τα αποτελέσματα του προβλήματος με μεταβλητή DELTMX=300 από την αρχή της λίμνης συγκόλλησης.

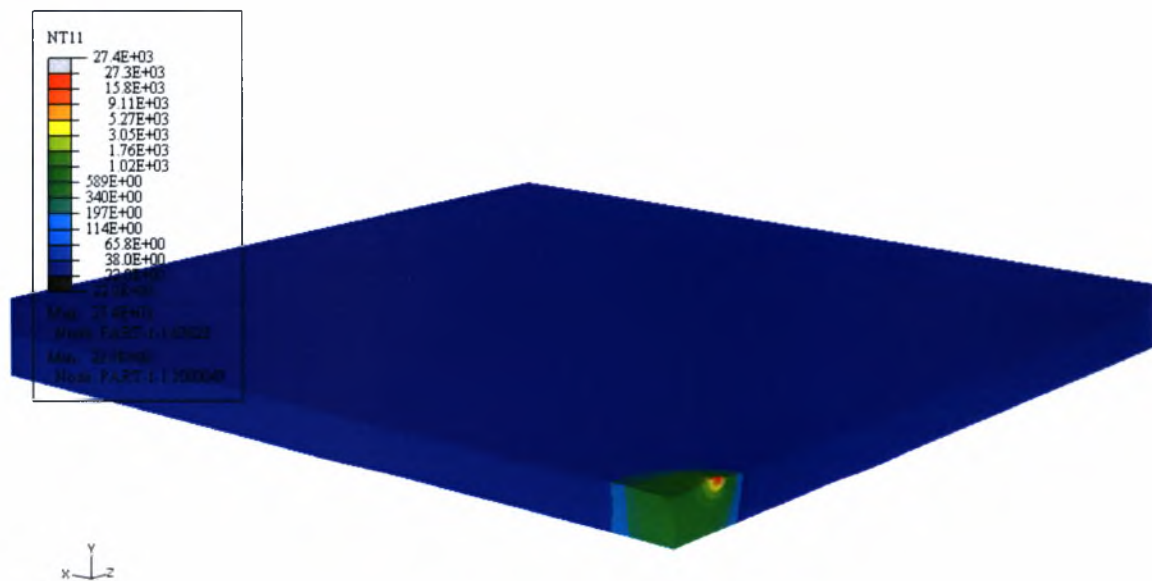
### 4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ DELTMX=3000

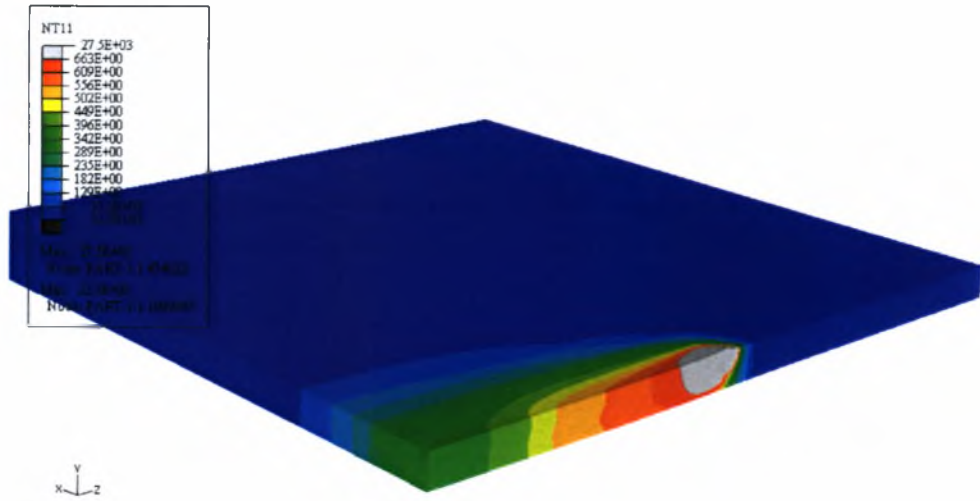
Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο θερμοκρασιακό πρόβλημα δίδονται στα σχήματα 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11 για **DELTMX=3000** όπου παρουσιάζονται ισοθερμοκρασιακές καμπύλες για συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, για διαφορετική χρονική στιγμή  $t$ . Οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες παρουσιάζουν την εξέλιξη του θερμοκρασιακού πεδίου σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης **την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση**

( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά καθώς και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση ( $t=10\text{sec}$ )

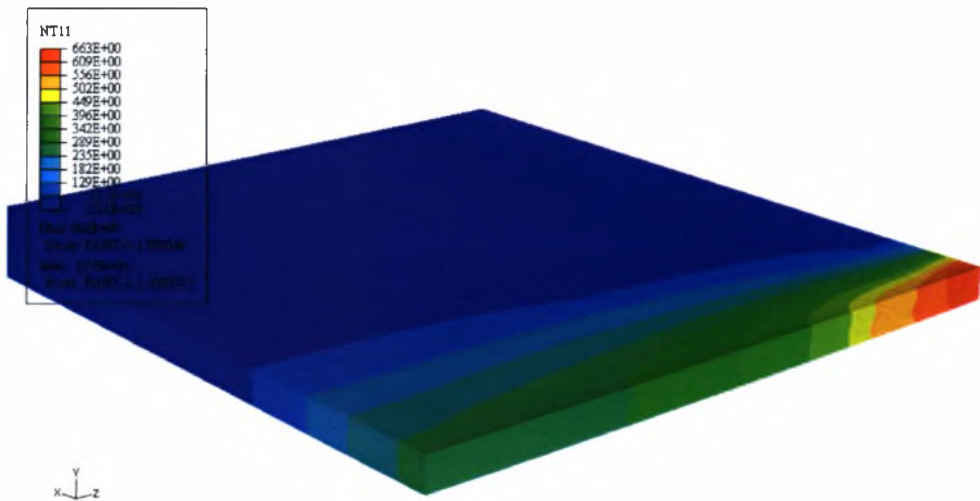
Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται θερμοκοί κύκλοι σε κόμβους που ευρίσκονται στην πάνω επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης στην αρχή, στη μέση και στο τέλος (κόμβοι 3022, 450022 και 900002 αντίστοιχα) όπως φαίνονται στο σχήμα 4.13 . Στο σχήμα 4.12α φαίνονται οι θερμοκοί κύκλοι στου κόμβους όταν έχει τελείωσει η συγκόλληση, δηλαδή χρονικό διάστημα τεσσάρων δευτερολέπτων ενώ στο 4.12β έχουμε τους θερμοκοί κύκλους για 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση καθώς ψύχεται το δοκίμιο. Παρατηρούμε ότι ο θερμοκρασιακός κύκλος κάθε κόμβου της λίμνης συγκόλλησης έχει άμεση σχέση με την θέση του σημείου ως προς τη δέσμη Laser 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 βαθμούς Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ) και ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (sec).



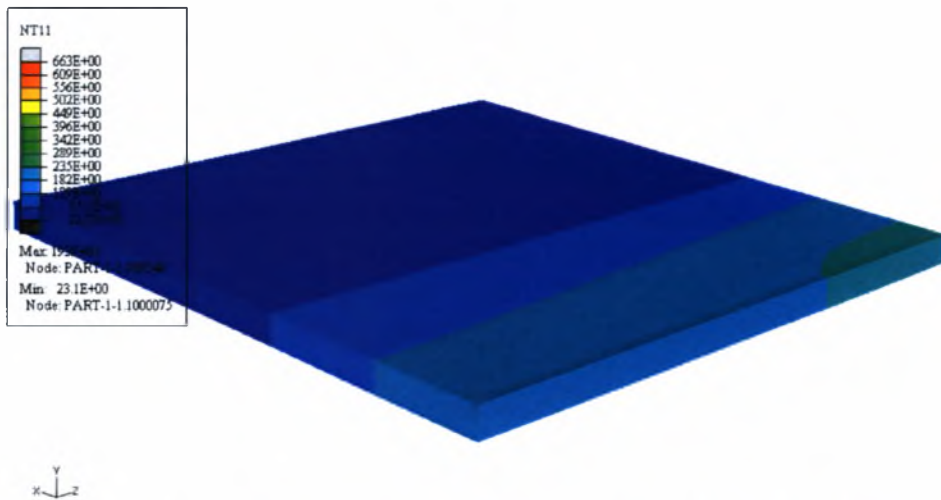
**Σχήμα 4.8:** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για  $t=0.2\text{sec}$  (DELTMX=3000 )



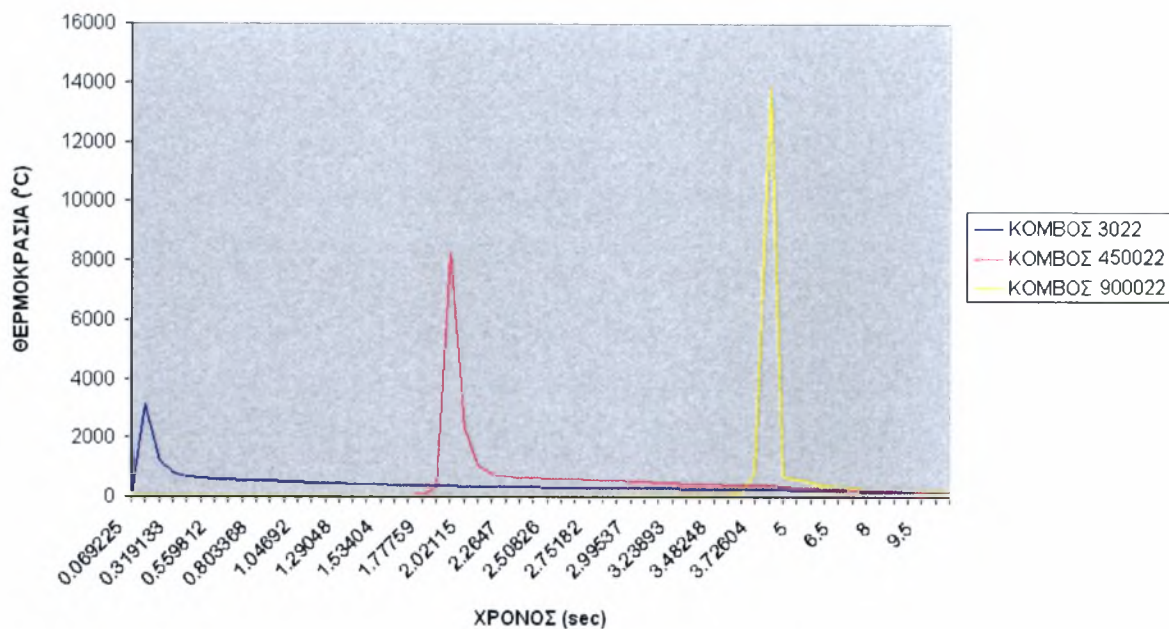
**Σχήμα 4.9:** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για **t=1.8sec** (DELTMX=3000)



**Σχήμα 4.10 :** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για **t=4sec** (DELTMX=3000)



**Σχήμα 4.11 :** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για **t=10sec** (DELTMX=3000)



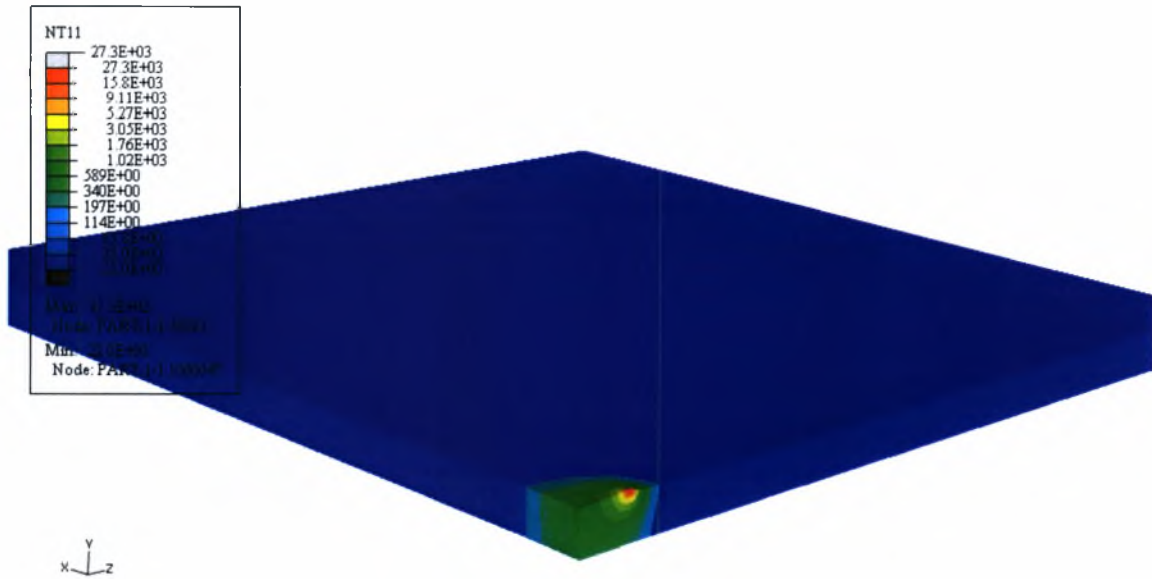
**Σχήμα 4.12 :** Θερμικοί κύκλοι κόμβων 3022, 450022 και 900022 ( $\Delta E L T M X = 3000$ )



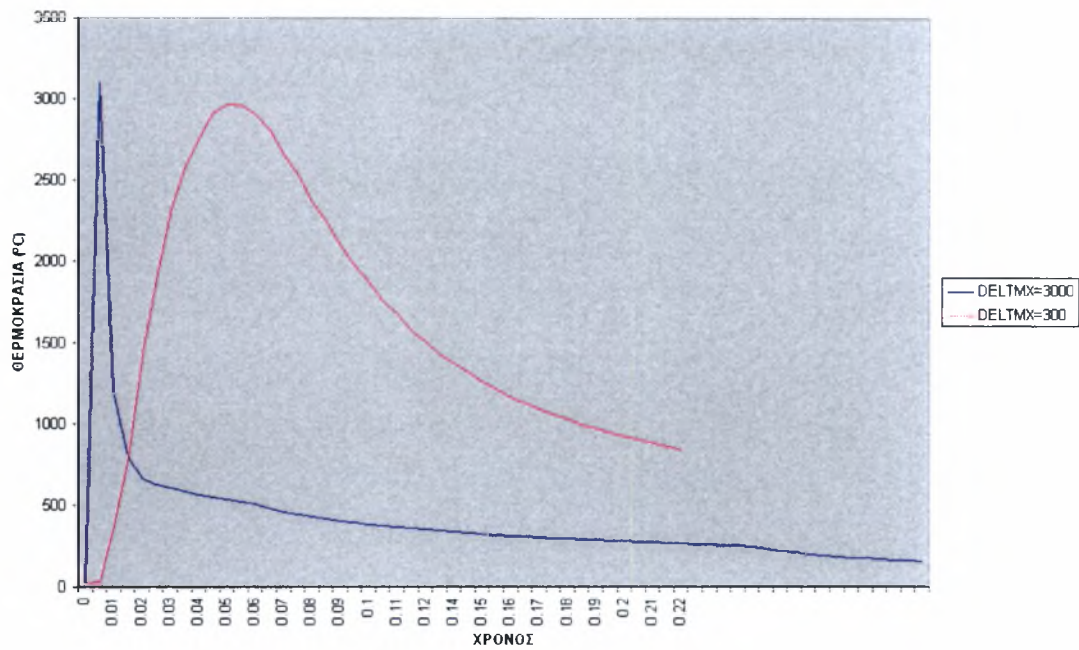
**Σχήμα 4.13:** Θέση κόμβων στον κάνναβο.

#### 4.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ $\Delta E L T M X = 300$

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται ισοθερμοκρασιακή καμπύλη για συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t = 0.2$  sec στην αρχή της συγκόλλησης και στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται ο θερμικός κύκλος σε κόμβο που ευρίσκονται στην πάνω επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης στην αρχή (κόμβος 10022) όπως φαίνονται στο σχήμα 4.13



**Σχήμα 4.14:** Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για  $t=0.2\text{sec}$  (DELTMX=300)



**Σχήμα 4.15:** Θερμικός κύκλος κόμβου 10022 (DELTMX=300)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η «ιστορία» του θερμοκρασιακού πεδίου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι απαραίτητη για την ανάλυση των τάσεων. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς είναι οι εξής: (μέτρο ελαστικότητας)  $E = 72 \text{ GPa}$ ,  $\nu$  (λόγος Poisson), (συντελεστής θερμικής διαστολής)  $\alpha = 23.3 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ , (όριο διαρροής)  $\sigma_0 = 500 \text{ MPa}$  (τέλεια πλαστικότητα). Δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία

Η τελική παραμόρφωση των ελασμάτων φαίνεται στα σχήματα 5.1. Με την μπλέ γραμμή φαίνεται η αρχική κατάσταση του ελάσματος.



(α)



(β)

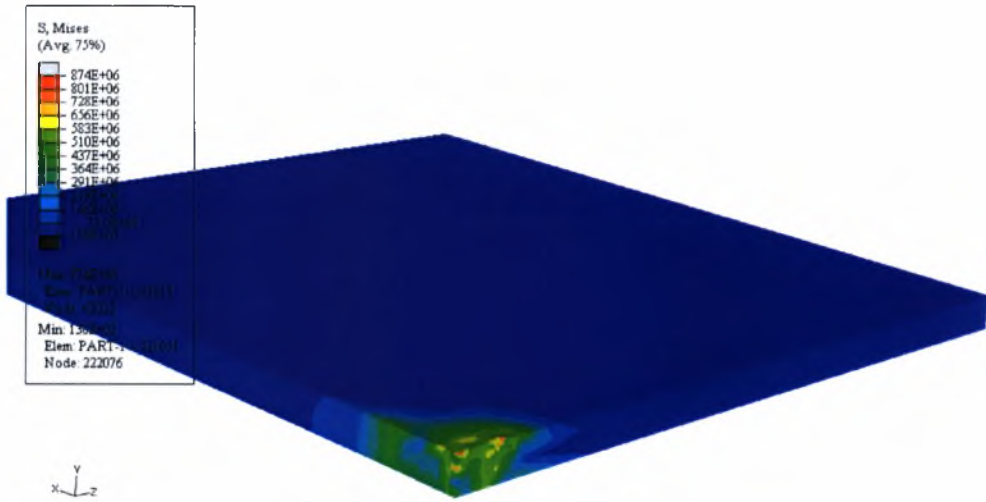
**Σχήμα 5.1** : Τελική παραμόρφωση μοντέλου 3-D

### 5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ $\Delta E L T M X = 3000$

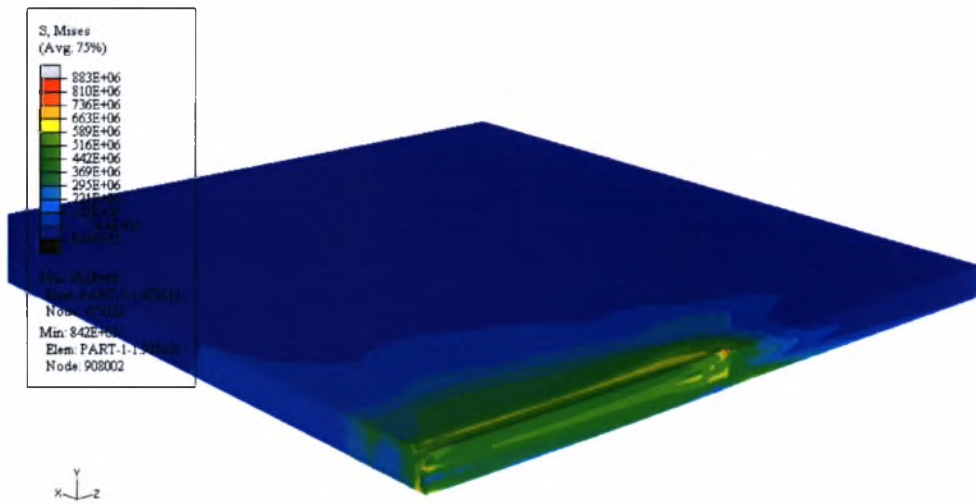
Χαρακτηριστικά αποτελέσματα από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων πεπερασμένων στοιχείων στο πρόβλημα τάσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 5.2, 5.3,

5.4. και 5.5. Οι εικόνες παρουσιάζουν την εξέλιξη των ισοϋψών της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση ( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά καθώς και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση ( $t=10\text{sec}$ ). Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν οι τάσεις είναι σε Pa. Υπενθυμίζουμε ότι το υλικό υποτίθεται «τέλεια πλαστικό» με όριο διαρροής 500 MPa. Αυτό σημαίνει ότι η ισοδύναμη τάση κατά von Mises  $\sigma_e$  δεν μπορεί να υπερβεί τα 500 MPa. Ο λόγος για τον οποίο σε μερικά από τα σχήματα εμφανίζονται τιμές μεγαλύτερες από τα 500 MPa είναι ο εξής. Οι υπολογισμοί των τάσεων γίνονται στους σταθμούς ολοκλήρωσης κατά Gauss και στα σημεία αυτά η  $\sigma_e$  είναι  $\leq 500$  MPa. Κατόπιν το ABAQUS υπολογίζει τις συνιστώσες  $\sigma_{ij}$  του τανυστή των τάσεων στους κόμβους με παρεκβολή (extrapolation) από τις τιμές των  $\sigma_{ij}$  στους σταθμούς ολοκλήρωσης και εν συνεχεία υπολογίζει την  $\sigma_e$  στους κόμβους από τη σχέση  $\sigma_e = \sqrt{1.5 s_{ij} s_{ij}}$ , όπου  $s_{ij} = \sigma_{ij} - (\sigma_{kk} / 3) \delta_{ij}$ . Οι κομβικές αυτές τιμές της  $\sigma_e$  είναι λιγότερο ακριβείς από τις αντίστοιχες τιμές στους σταθμούς ολοκλήρωσης και μπορεί να παραβιάζουν το κριτήριο διαρροής.

Στο σχήμα 5.6α φαίνεται πως μεταβάλλονται οι τάσεις κατά von Mises σε τρεις κόμβους κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης (στην αρχή, την μέση και το τέλος της λίμνης συγκόλλησης) και 6 δευτερόλεπτα μετά ενώ στο σχήμα 5.6β παρουσιάζονται οι τάσεις κατά von Mises σε τρία στοιχεία κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης (στην αρχή, την μέση και το τέλος της λίμνης συγκόλλησης) και 6 δευτερόλεπτα μετά. Οι κόμβοι που επιλέχθηκαν είναι ίδιοι με την ανάλυση στο θερμοκρασιακό πρόβλημα και φαίνονται στο Σχήμα 4.13..

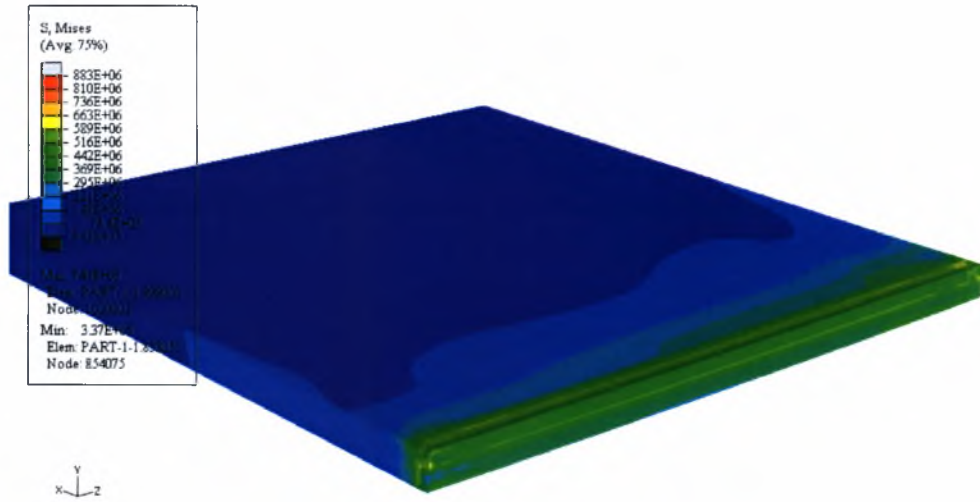


**Σχήμα 5.2 :** Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για **t=0.2sec** (DELTMX=3000)

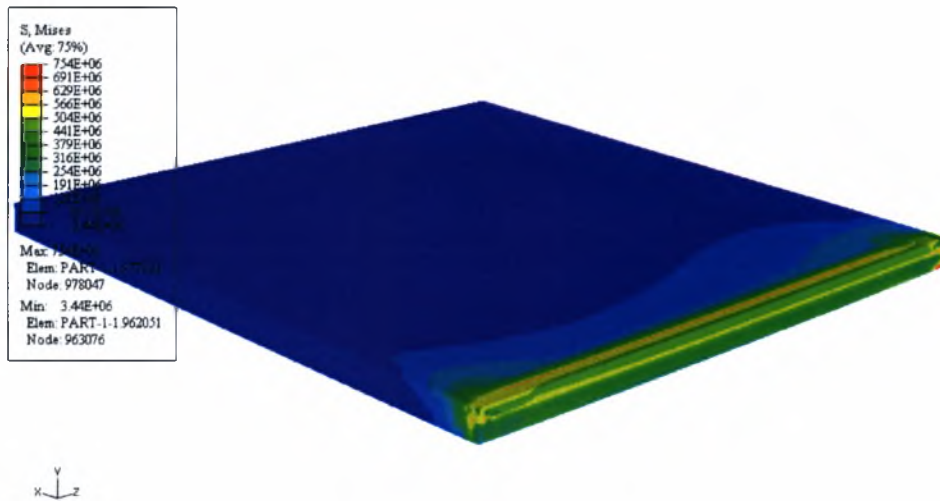


**Σχήμα 5.3 :** Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για **t=1.8sec** (DELTMX=3000)

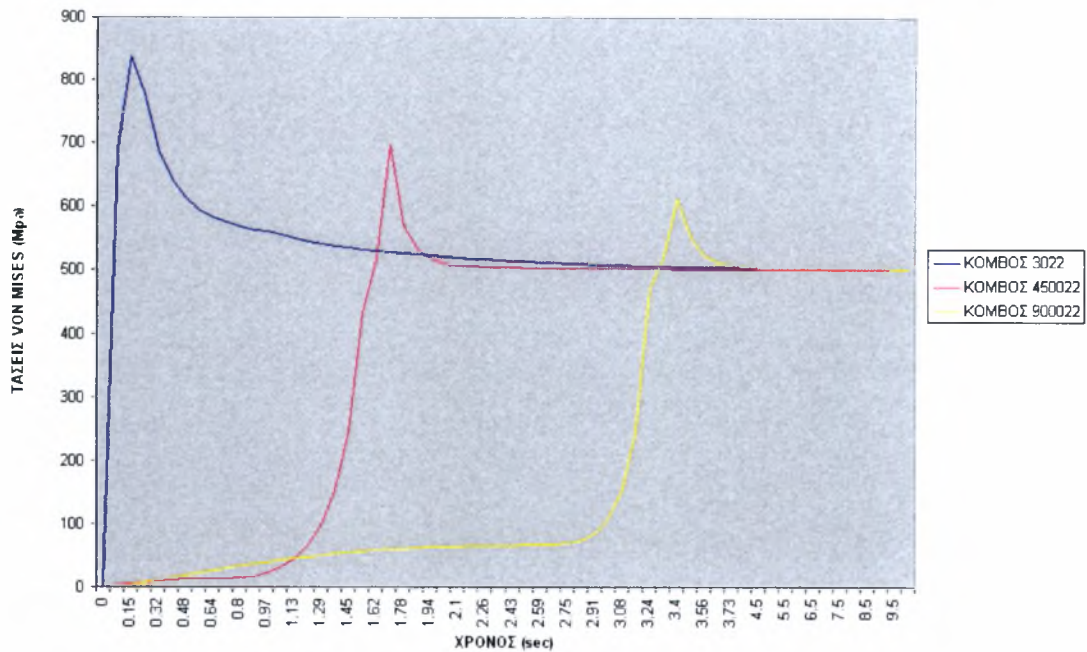




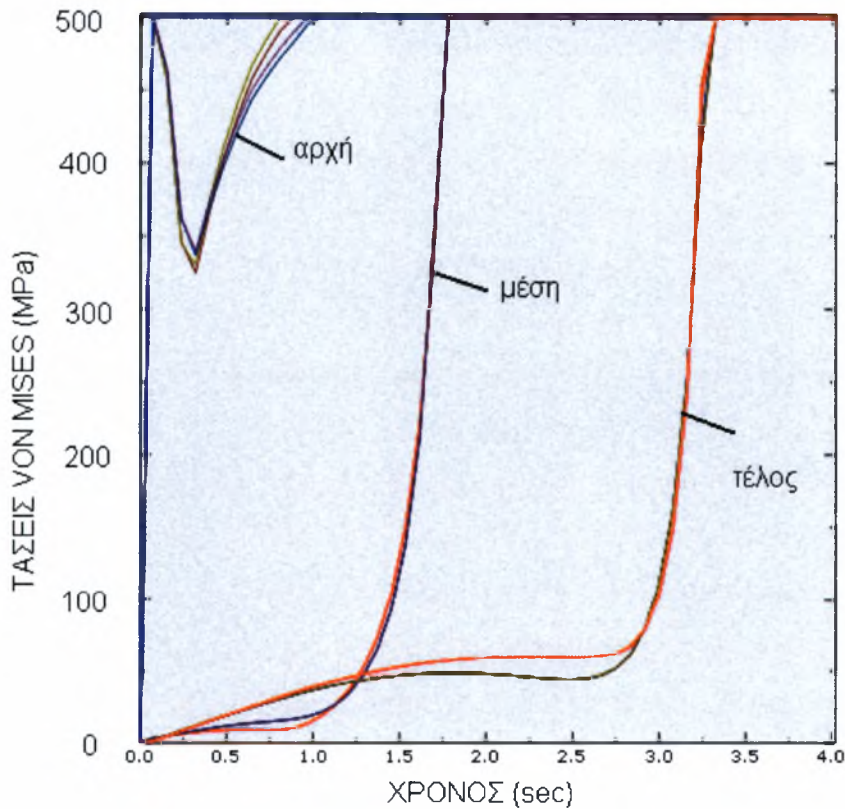
**Σχήμα 5.4:** Ισοψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για **t=4sec** (DELTMX=3000)



**Σχήμα 5.5:** Ισοψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για **t=10sec** (DELTMX=3000)



(α)



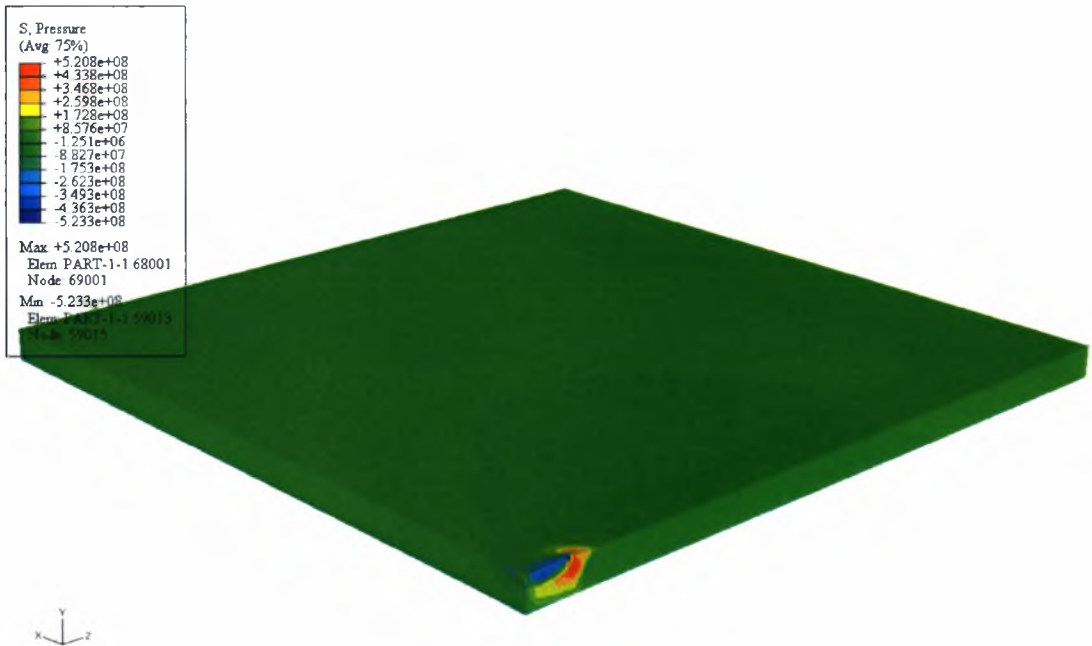
(β)

**Σχήμα 5.6:** Τάσεις κατά von Mises συναρτήσει του χρόνου ( $\Delta T_{MX}=3000$ )  
 (α) για κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης  
 (β) για στοιχεία στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης

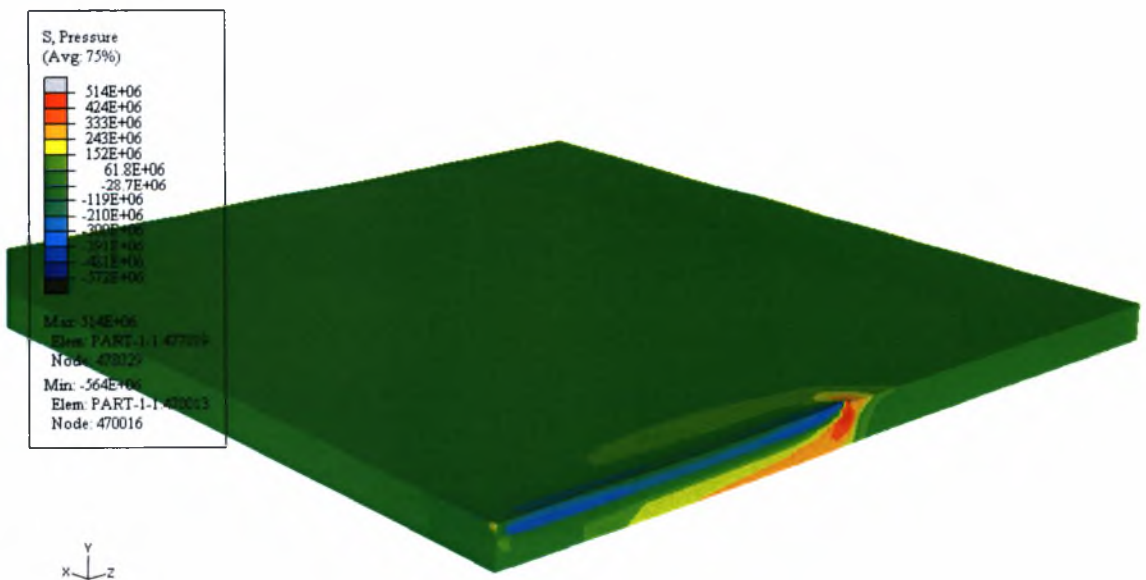
Στα Σχήματα 5.7, 5.8 και 5.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση

( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά και στο σχήμα 5.10 για 6 δευτερόλεπτα μετά το τέλος αυτής ( $t=10\text{sec}$ ).

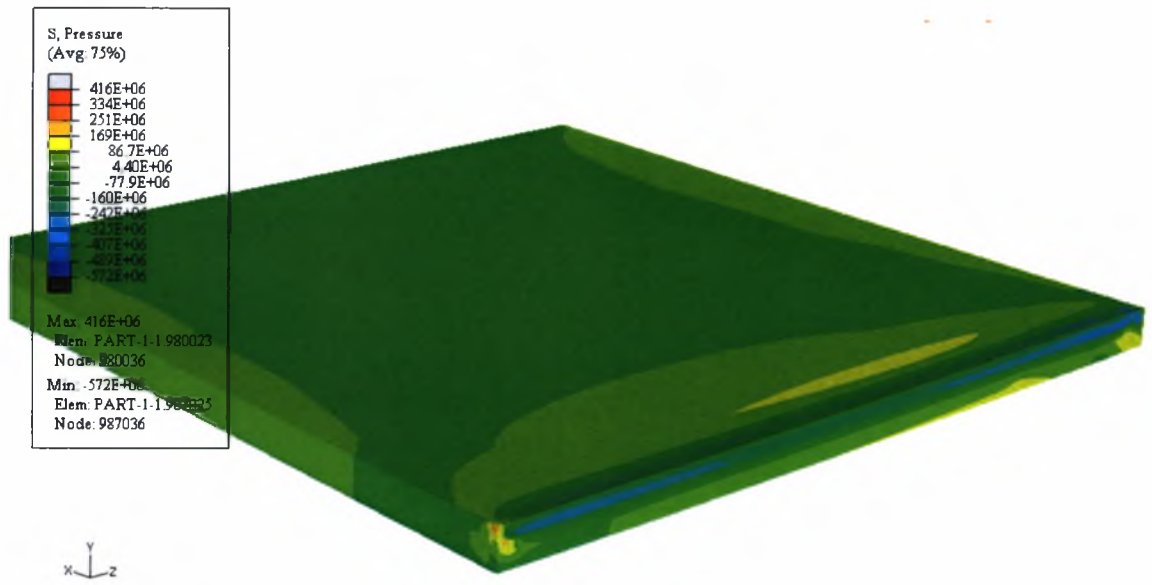
Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης σε τρεις κόμβους κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης για χρονικό διάστημα τεσσάρων δευτερολέπτων, όσο διαρκεί δηλαδή η συγκόλληση και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση καθώς ψύχεται το δοκίμιο.



**Σχήμα 5.7:** Ισοϋψείς της πίεσης για  $t=0.2\text{sec}$  ( $\text{DELTMX}=3000$ )



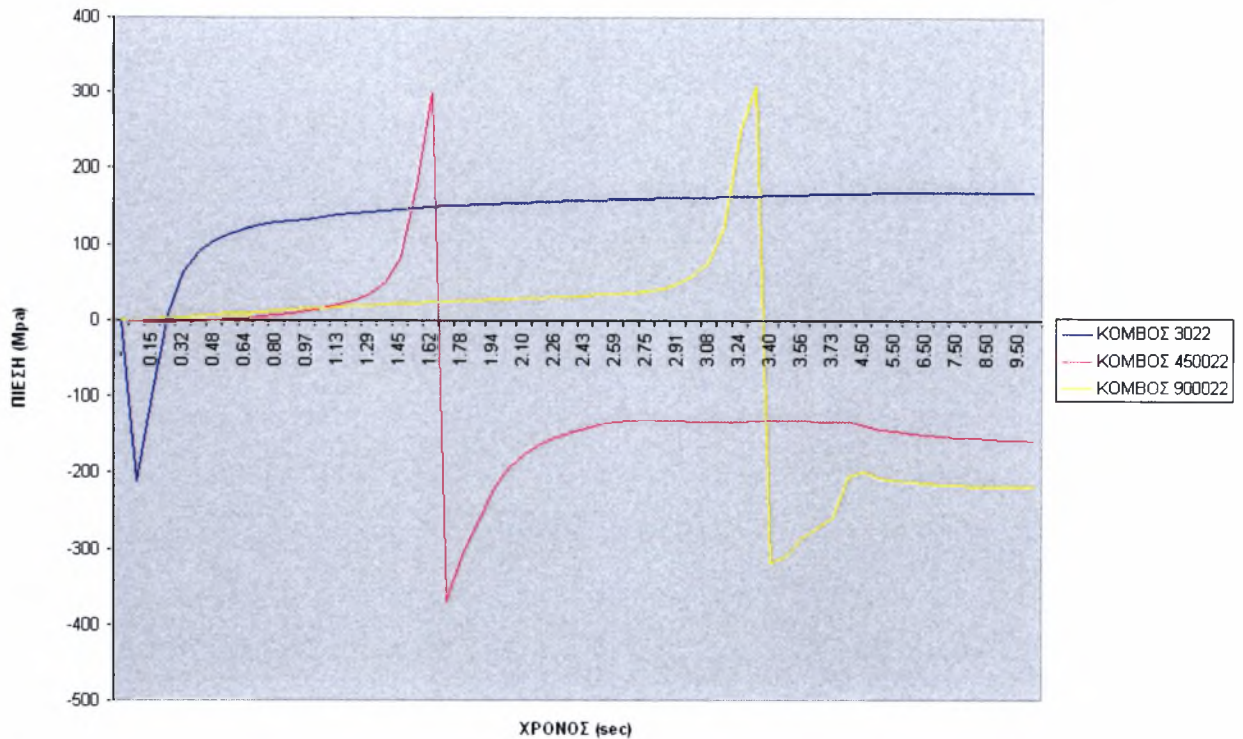
**Σχήμα 5.8:** Ισοϋψείς της πίεσης για  $t=1.8\text{sec}$  ( $\text{DELTMX}=3000$ )



**Σχήμα 5.9** Ισοϋψείς της πίεσης για **t=4sec** (DELTMX=3000)



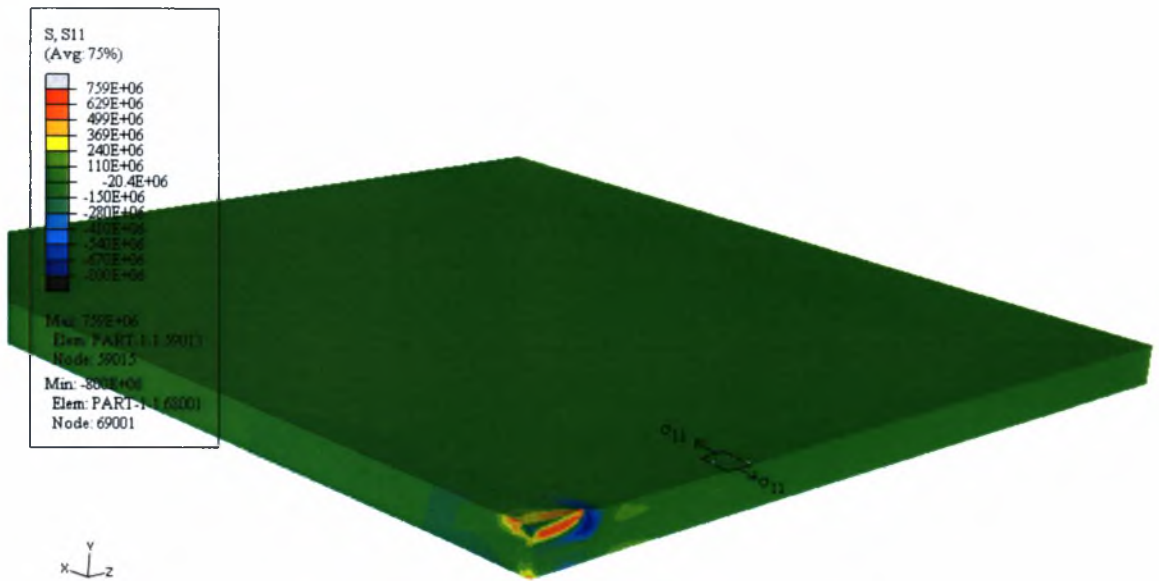
**Σχήμα 5.10** Ισοϋψείς της πίεσης για **t=10sec** (DELTMX=3000)



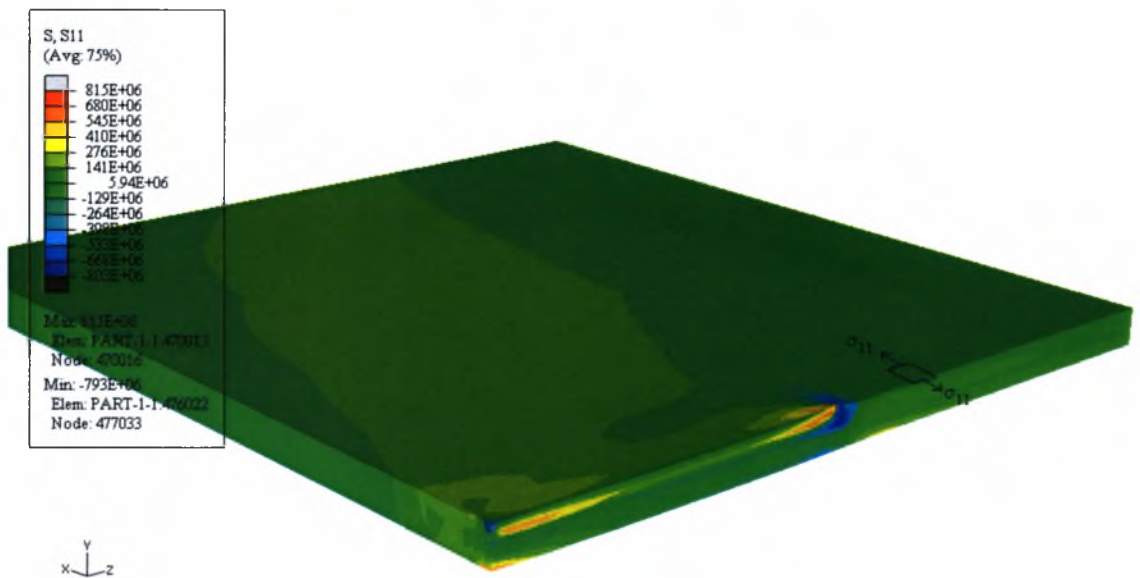
**Σχήμα 5.11:** Πίεση συναρτήσεως του χρόνου σε τρεις κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης. (**DELTMX=3000**)

Στα Σχήματα 5.12, 5.13 και 5.14 παρουσιάζεται η εξέλιξη της **τάσης  $\sigma_{11}$**  (τάσεις κατά τον άξονα x) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση ( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά και στο σχήμα 5.15 για 6 δευτερόλεπτα μετά το τέλος αυτής ( $t=10\text{sec}$ ).

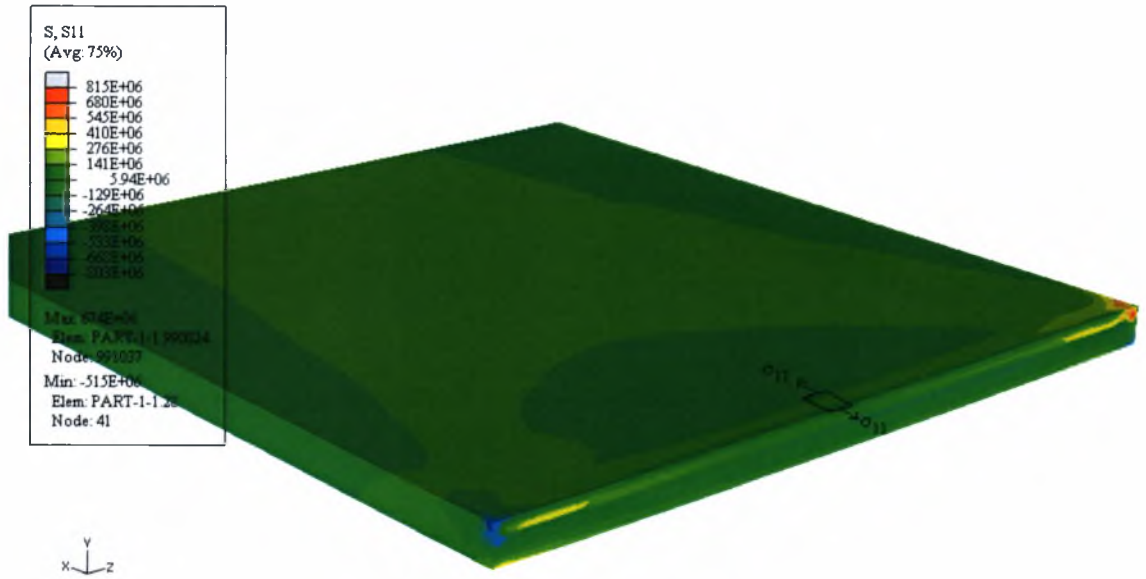
Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων  $\sigma_{11}$  σε τρεις κόμβους κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση καθώς ψύχεται το δοκίμιο..



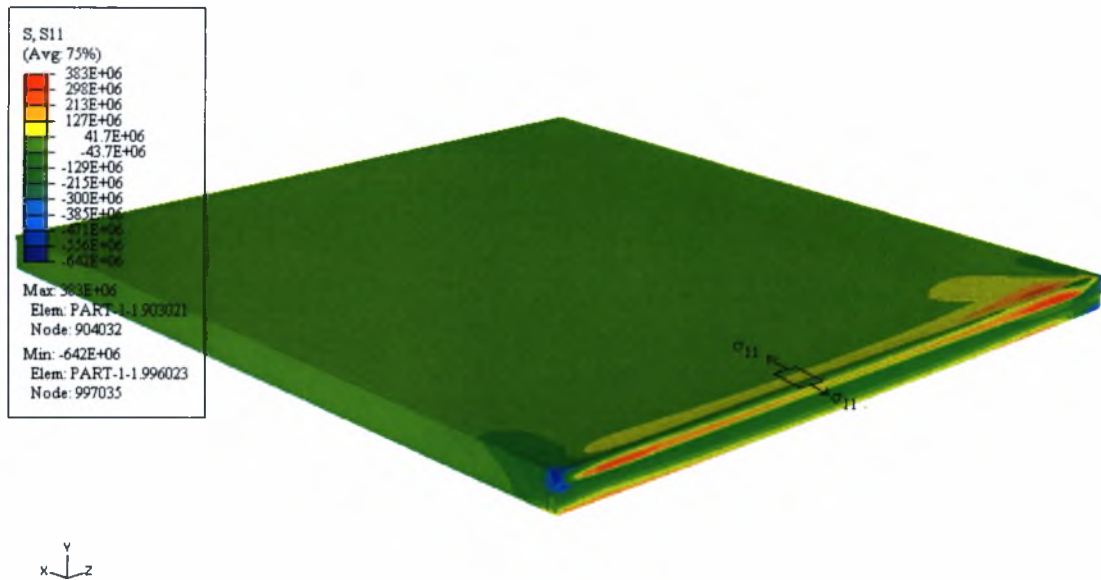
**Σχήμα 5.12 :** Ισοΰψεις τάσεως  $\sigma_{11}$  για  $t=0.2\text{sec}$  (DELTMX=3000)



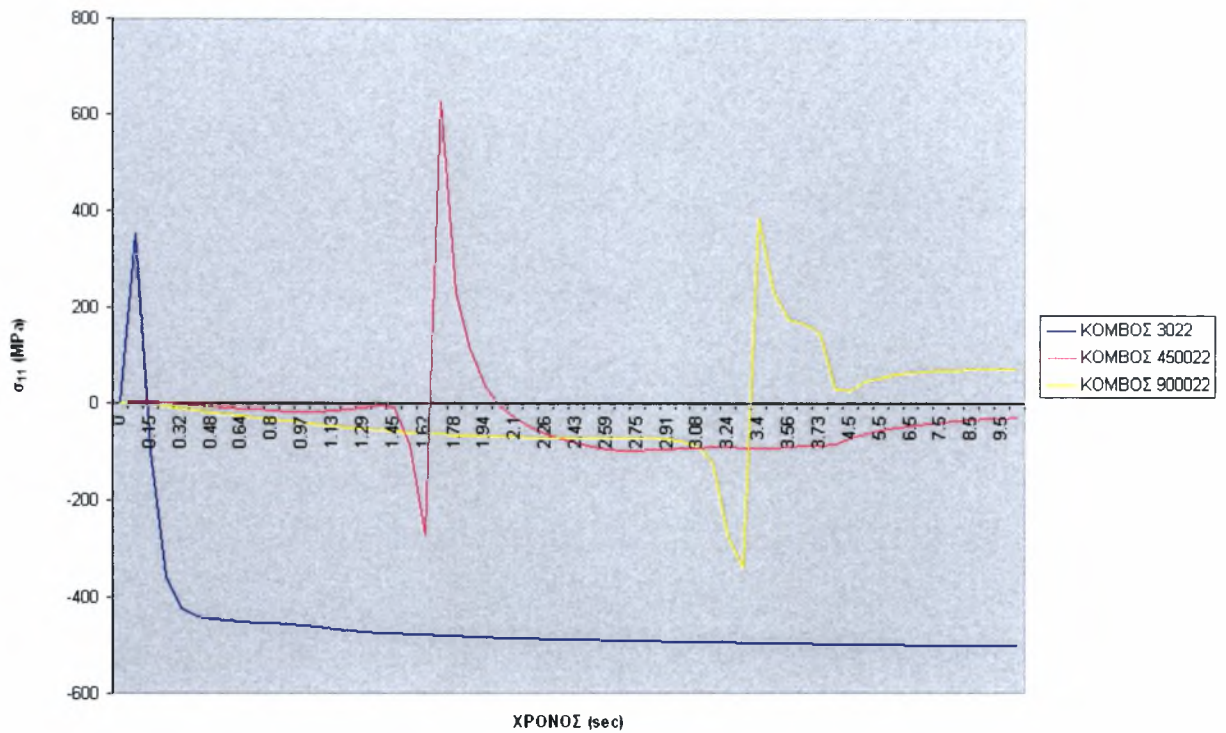
**Σχήμα 5.13 :** Ισοΰψεις τάσεως  $\sigma_{11}$  για  $t=1.8\text{sec}$  (DELTMX=3000)



**Σχήμα 5.14 :** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{11}$  για  **$t=4\text{sec}$** (DELTMX=3000)



**Σχήμα 5.15 :** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{11}$  για  **$t=10\text{sec}$** (DELTMX=3000)

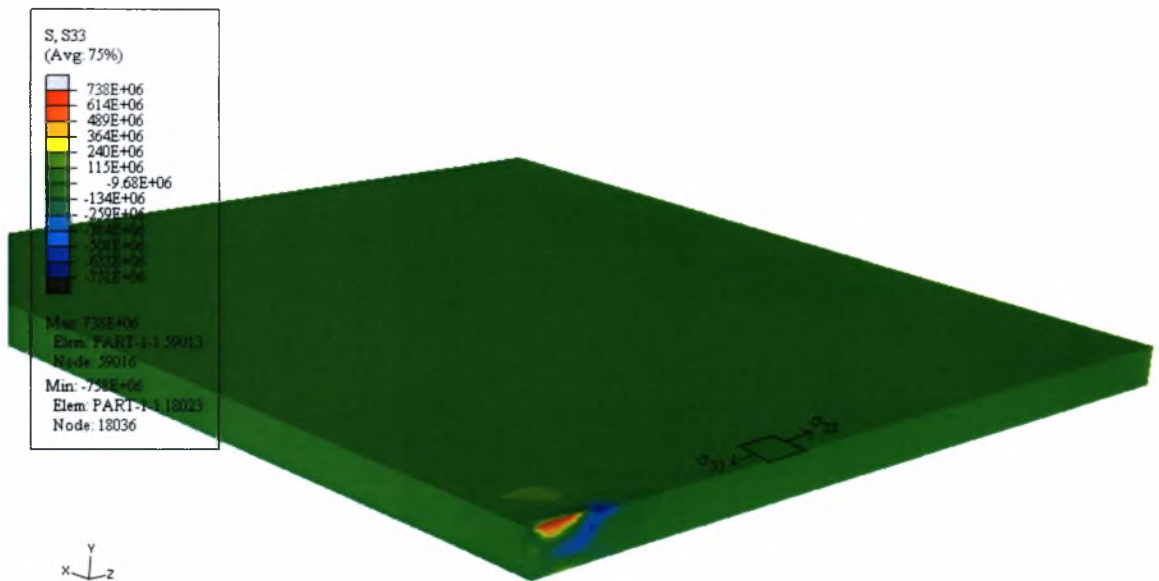


**Σχήμα 5.16:** Τάσεις  $\sigma_{11}$  συναρτήσει του χρόνου για τρεις κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης. (DELTMX=3000)

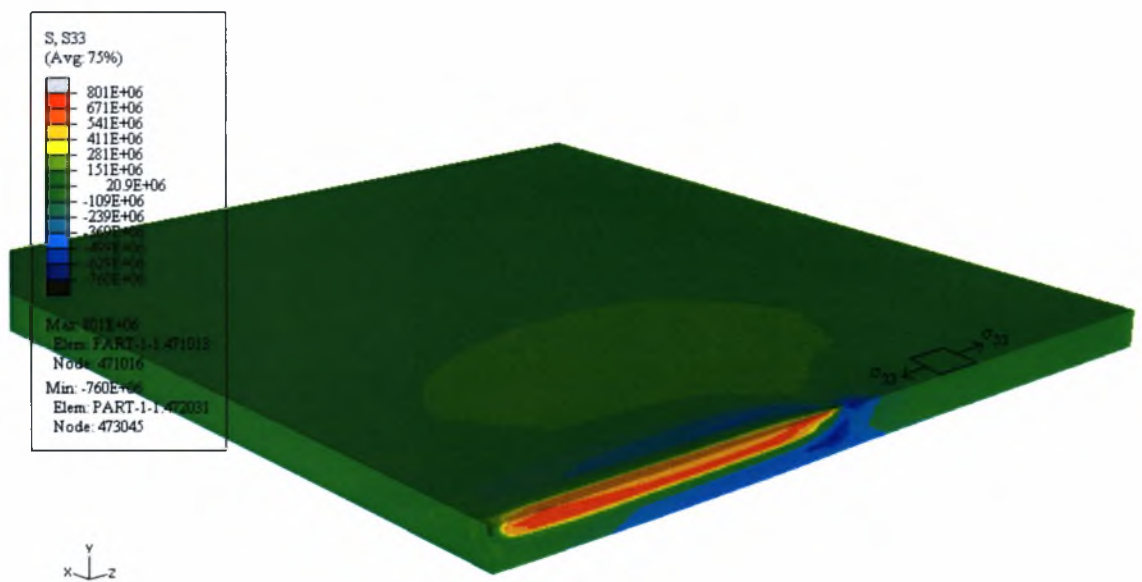
Στα σχήματα 5.17, 5.18, και 5.19 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τάσης  $\sigma_{33}$  (τάσεις κατά τον άξονα z) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση ( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά και στο σχήμα 5.20 για 6 δευτερόλεπτα μετά το τέλος αυτής ( $t=10\text{sec}$ ).

Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζεται η μεταβολή των τάσεων  $\sigma_{33}$  σε τρεις κόμβους κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης ( $\Delta t=4\text{sec}$ ) και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση καθώς ψύχεται το δοκίμιο.

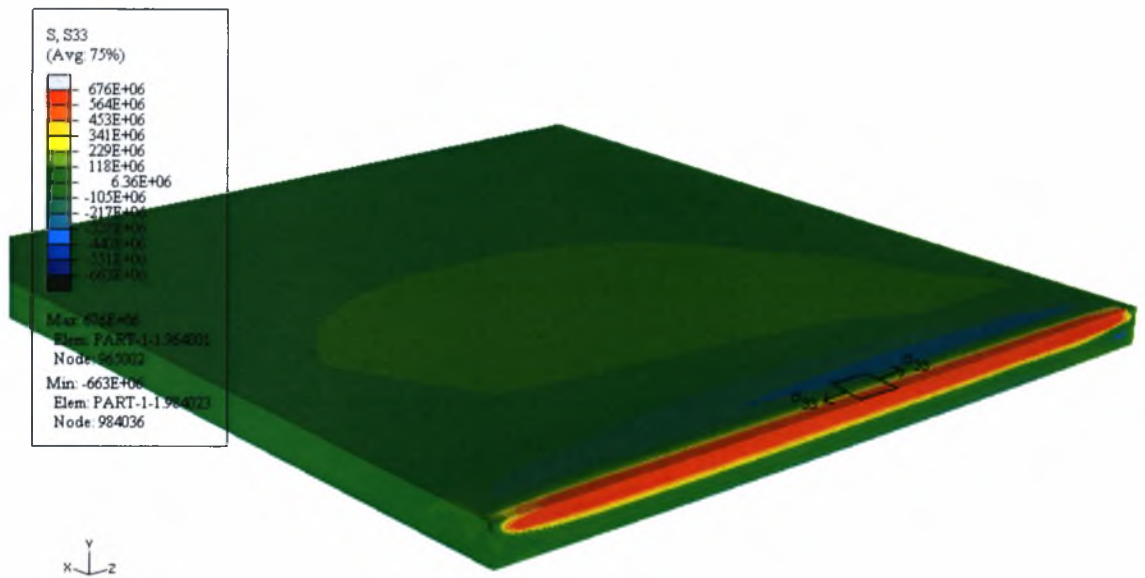




**Σχήμα 5.17:** ΙσοΨείς τάσεως  $\sigma_{33}$  για  $t=0.2\text{sec}$  (DELTMX=3000)



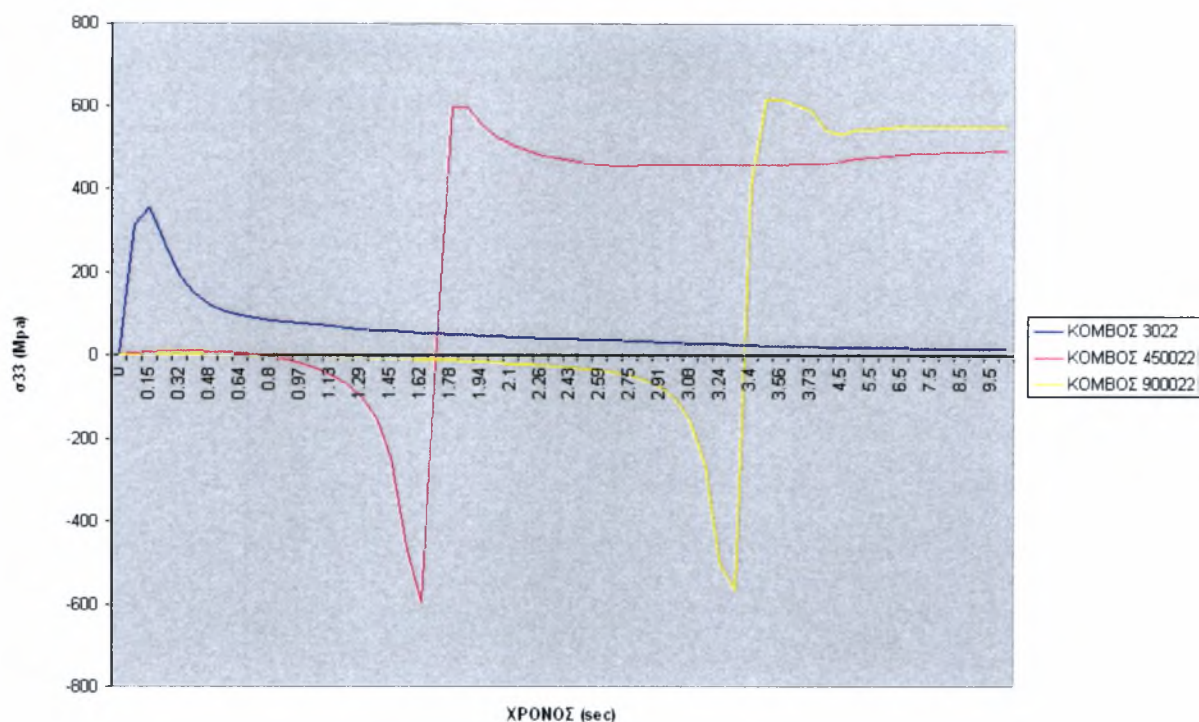
**Σχήμα 5.18 :** ΙσοΨείς τάσεως  $\sigma_{33}$  για  $t=1.8\text{sec}$  (DELTMX=3000)



**Σχήμα 5.19:** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{33}$  για  $t=4\text{sec}$  (DELTMX=3000)



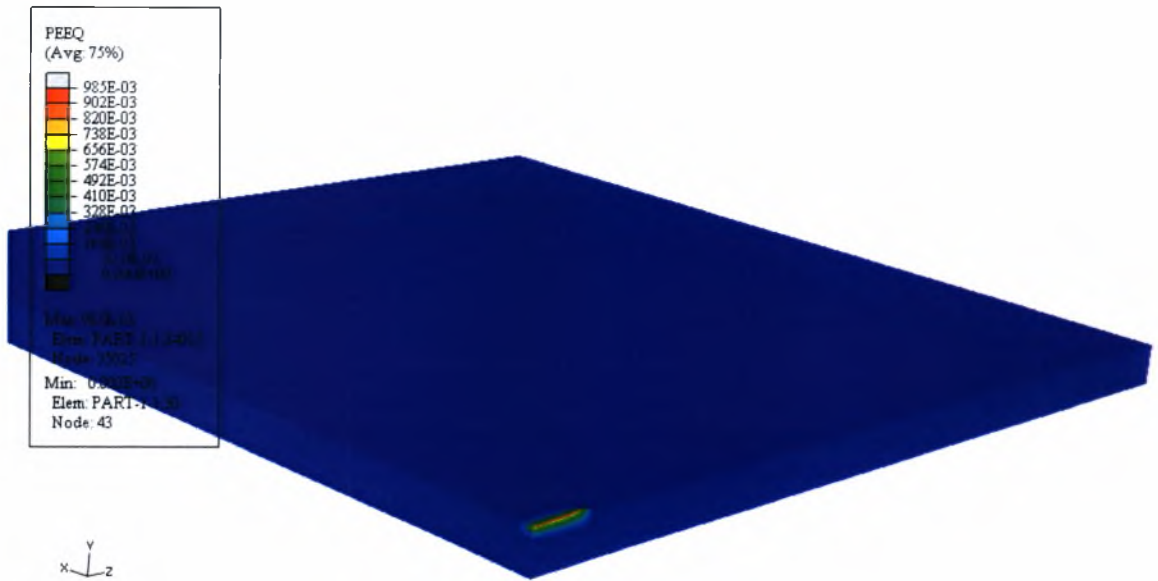
**Σχήμα 5.20:** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{33}$  για  $t=10\text{sec}$  (DELTMX=3000)



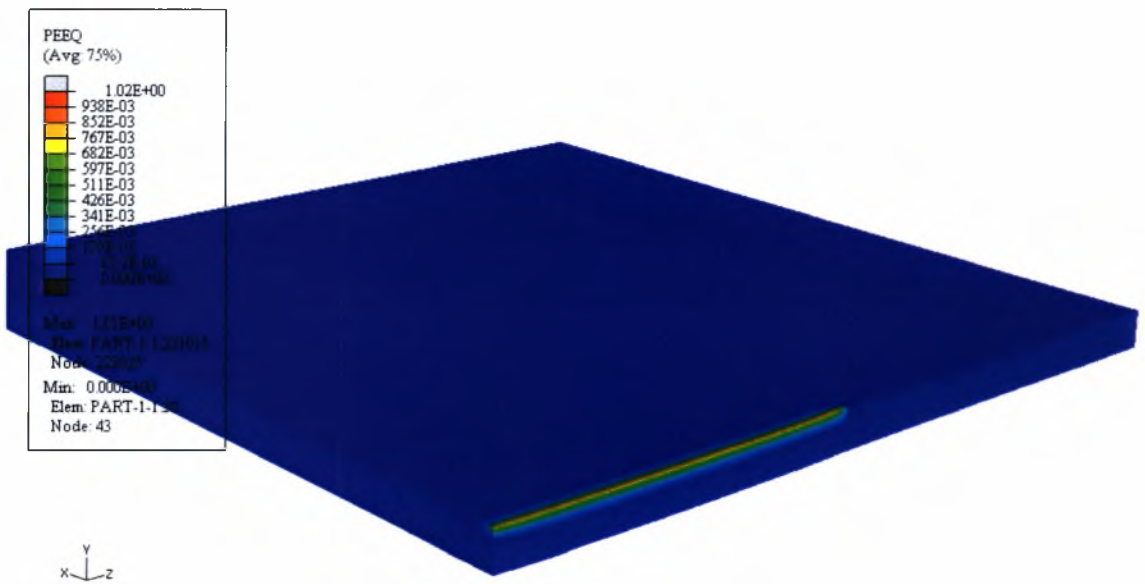
**Σχήμα 5.21:** Τάσεις  $\sigma_{33}$  συναρτήσει του χρόνου για κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης

Στα Σχήματα 5.22, 5.23, και 5.24 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, την αρχή ( $t=0.2\text{sec}$ ), την μέση ( $t=1.8\text{sec}$ ) και το τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) χρονικά και στο σχήμα 5.25 για 6 δευτερόλεπτα μετά το τέλος αυτής ( $t=10\text{sec}$ ).

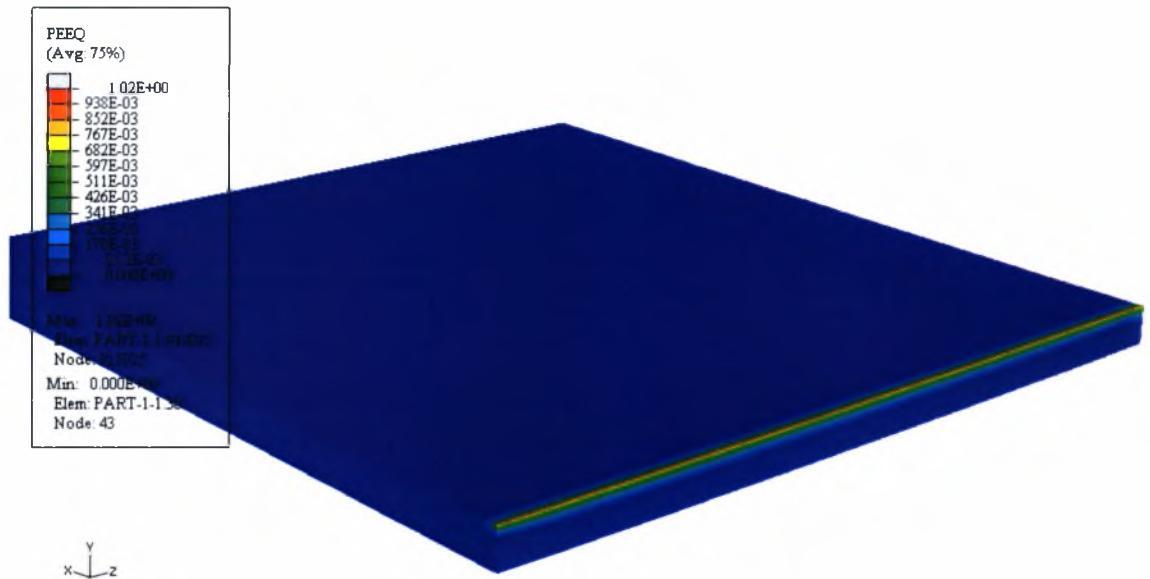
Στο σχήμα 5.26 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμορφώσεων κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης στην αρχή, την μέση και το τέλος της λίμνης συγκόλλησης ( $\Delta t=4\text{sec}$ ) και 6 δευτερόλεπτα μετά την συγκόλληση καθώς ψύχεται το δοκίμιο.



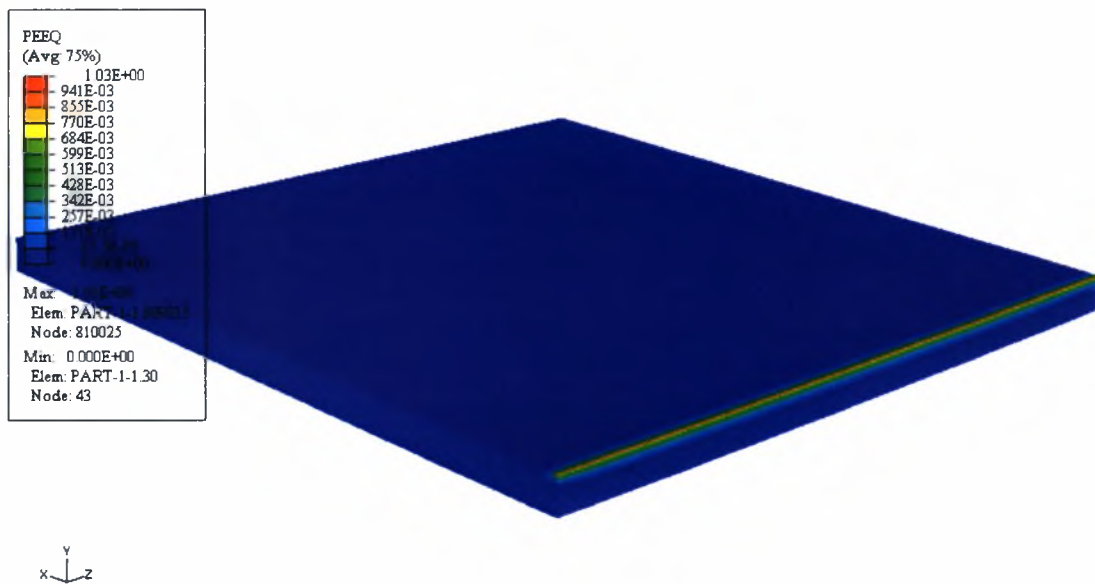
**Σχήμα 5.22:** Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για **t=0.2sec** (DELTMX=3000)



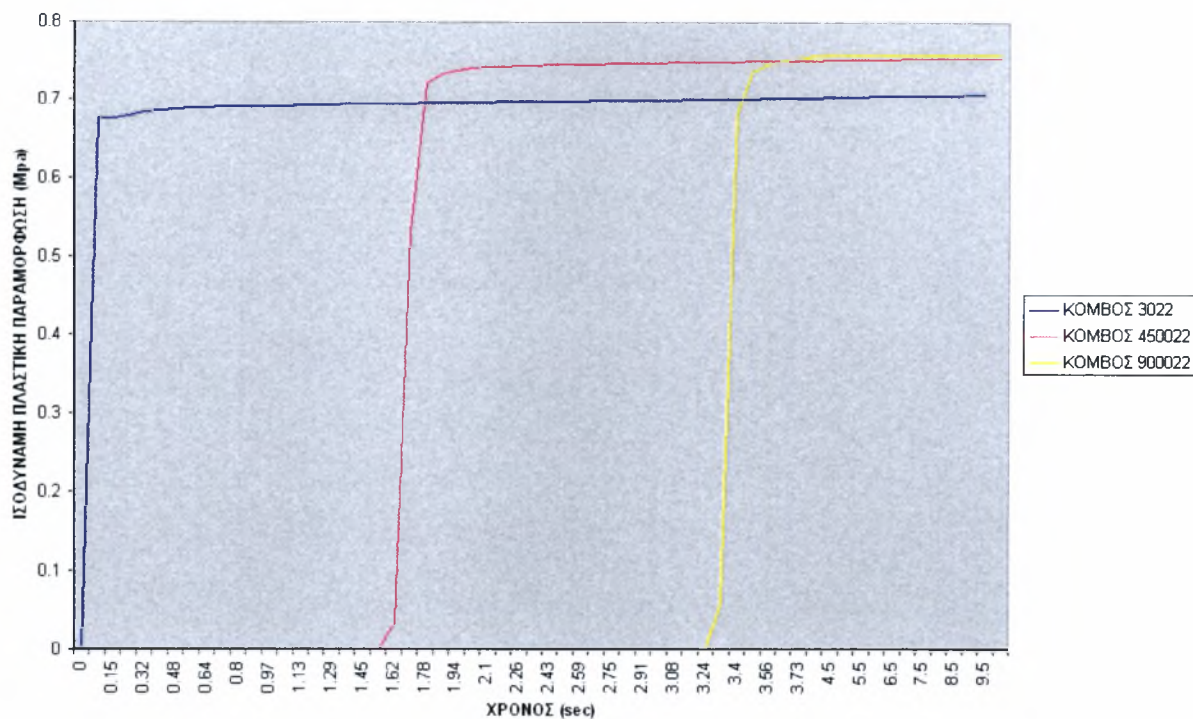
**Σχήμα 5.23:** Ισοϋψείς ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για **t=1.8sec** (DELTMX=3000).



**Σχήμα 5.24:** Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για **t=4sec** (DELTMX=3000).



**Σχήμα 5.25:** Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για **t=10sec** (DELTMX=3000).

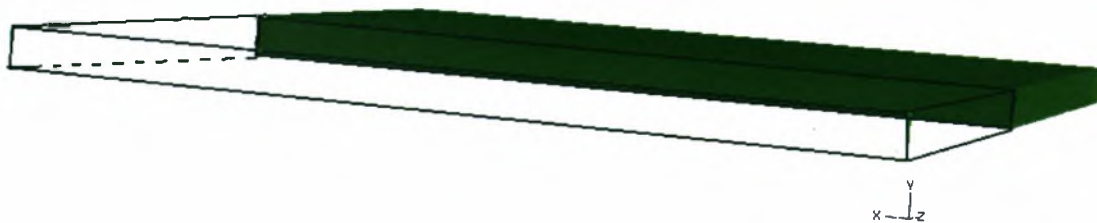


**Σχήμα 5.26** Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου για κόμβους στην αρχή, στην μέση και στο τέλος της λίμνης συγκόλλησης

Προκειμένου να μελετηθεί εκτενέστερα η θερμοκρασιακή κατανομή και η ανάλυση των τάσεων στην λίμνη συγκόλληση, έγινε τομή AA' όπως φαίνεται στο σχήμα 5.27 και μελετήθηκε «το κομμένο» κομμάτι του δοκιμίου που δίνεται στο σχήμα 5.28 με πράσινο χρώμα.

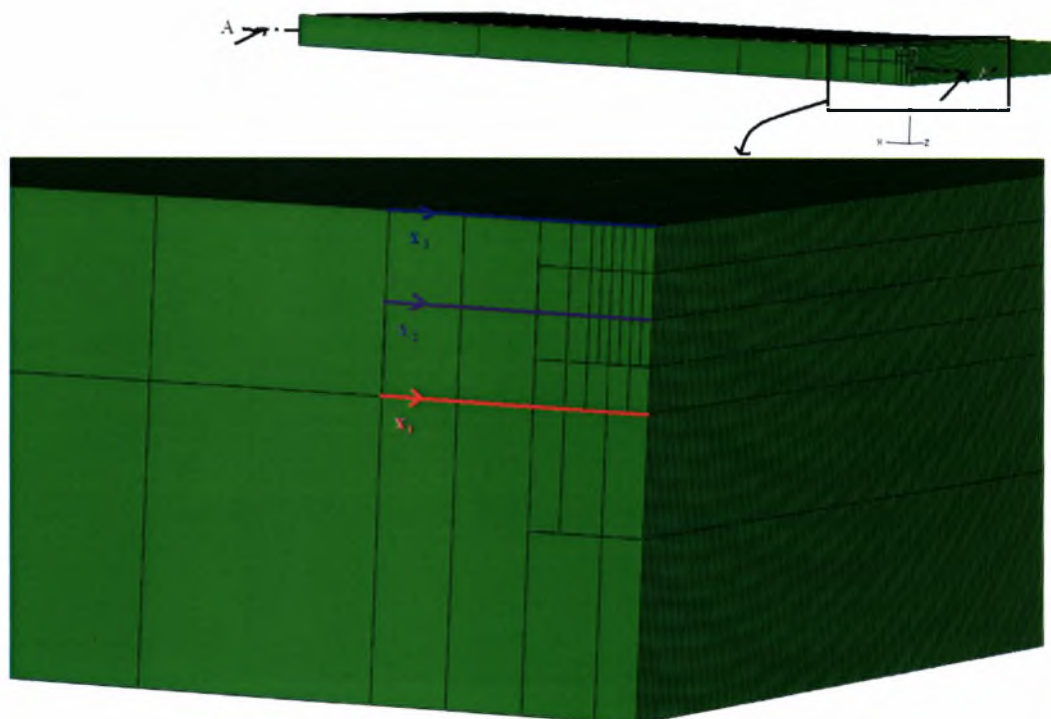


**Σχήμα 5.27:** Τομή AA' δοκιμίου



**Σχήμα 5.28:** Κομμάτι δοκιμίου που μελετήθηκε

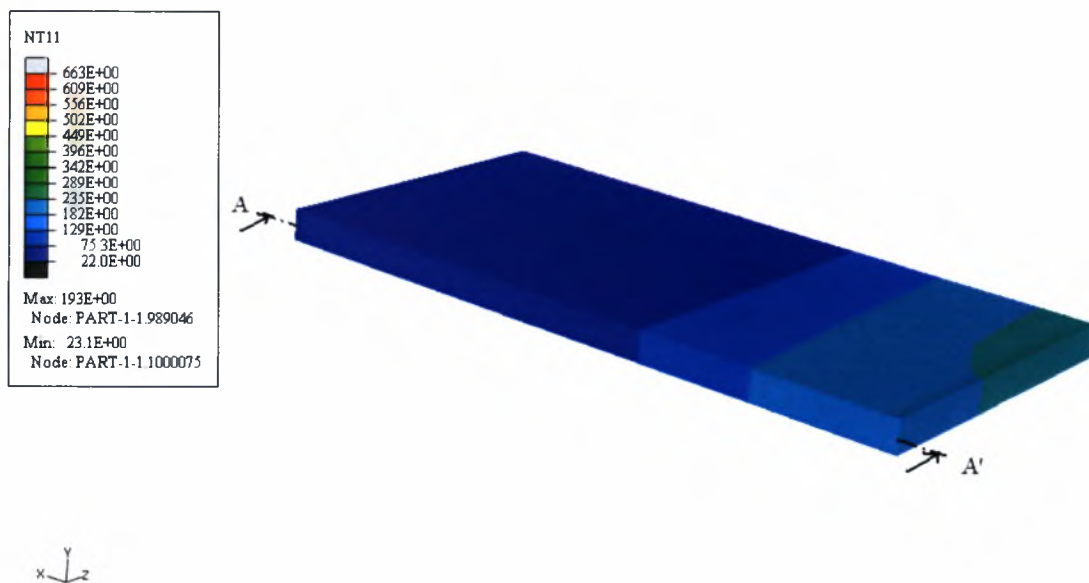
Επιπρόσθετα πάρθηκαν καμπύλες που δείχνουν την θερμοκρασία και την ανάλυση των τάσεων συναρτήσει των παρακάτω τμημάτων  $x_1, x_2, x_3$  του «κομμένου» δοκιμίου, όπως αυτά φαίνονται στο σχήμα 5.29



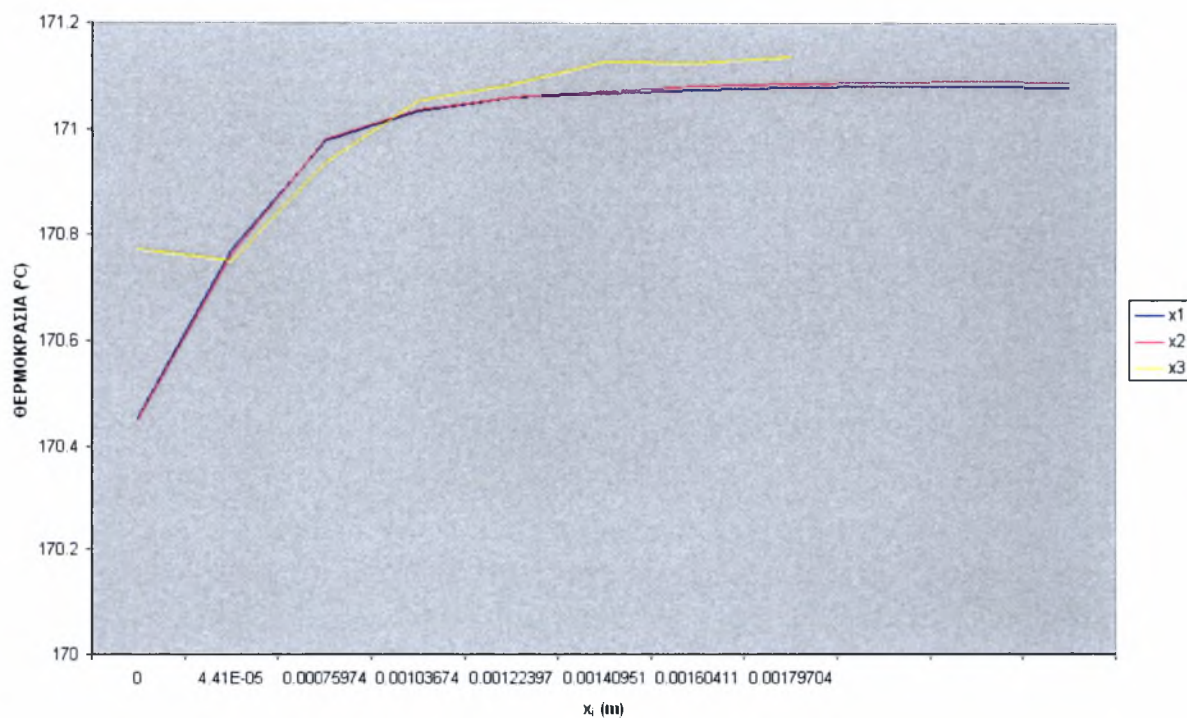
**Σχήμα 5.29 :** Τμήματα  $x_1, x_2, x_3$  «κομμένου» ελάσματος

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι ισοϋψείς της θερμοκρασίας, της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises, της πίεσης, της τάσεως  $\sigma_{11}$ , της τάσεως  $\sigma_{33}$  και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης αφού έχει ψυχθεί το έλασμα για 6 δευτερόλεπτα μετά

την συγκόλληση. Επίσης, δίνονται οι καμπύλες των παραπάνω μεταβλητών συναρτήσεων των τμημάτων  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

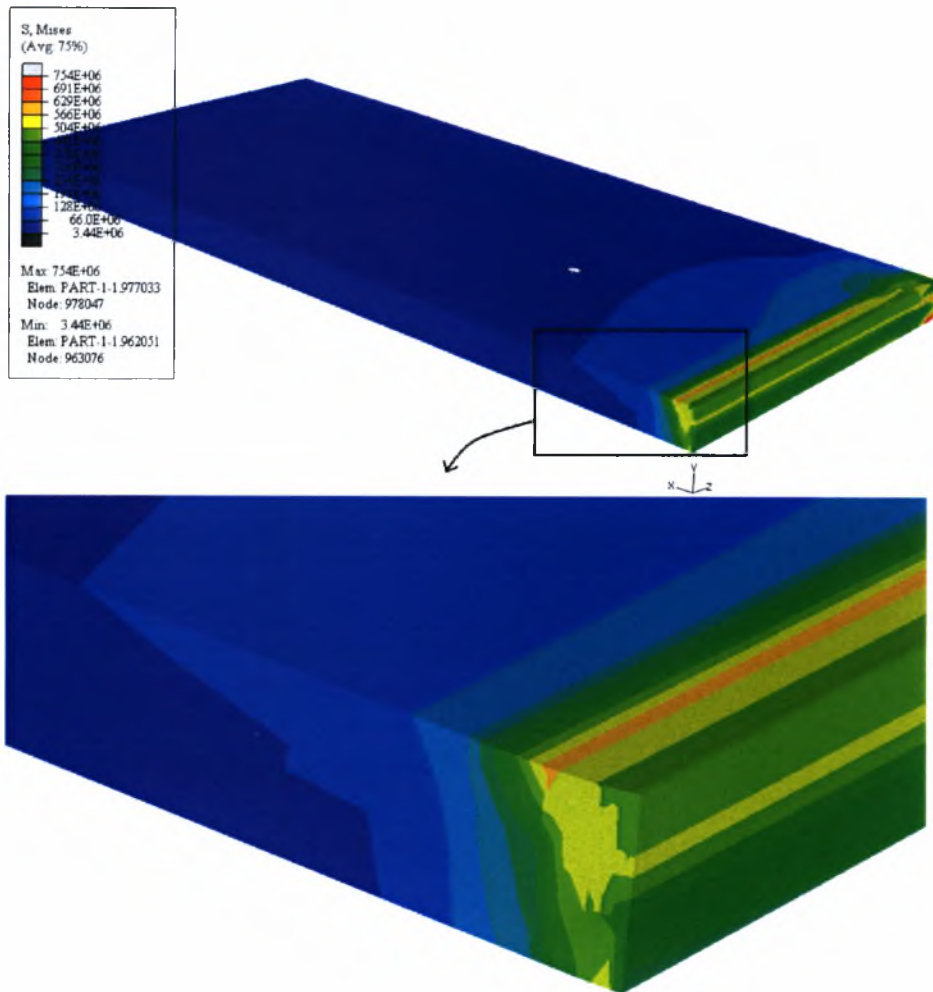


**Σχήμα 5.30** : Ισοϋψείς της θερμοκρασίας για  $t=10\text{sec}$

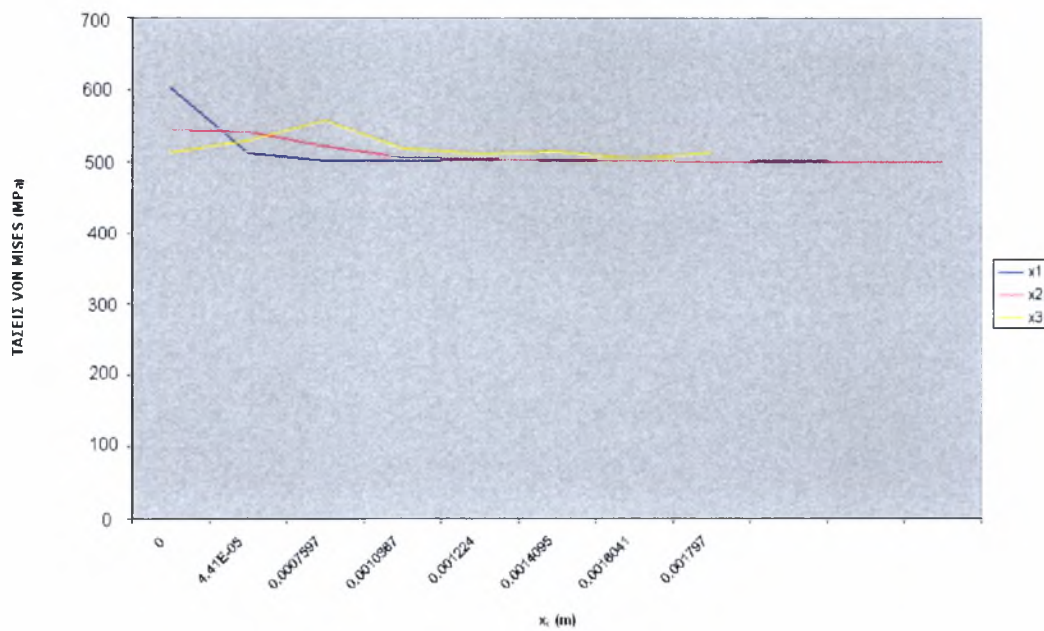


**Σχήμα 5.31** : Θερμικός κύκλος συναρτήσει  $x_i$

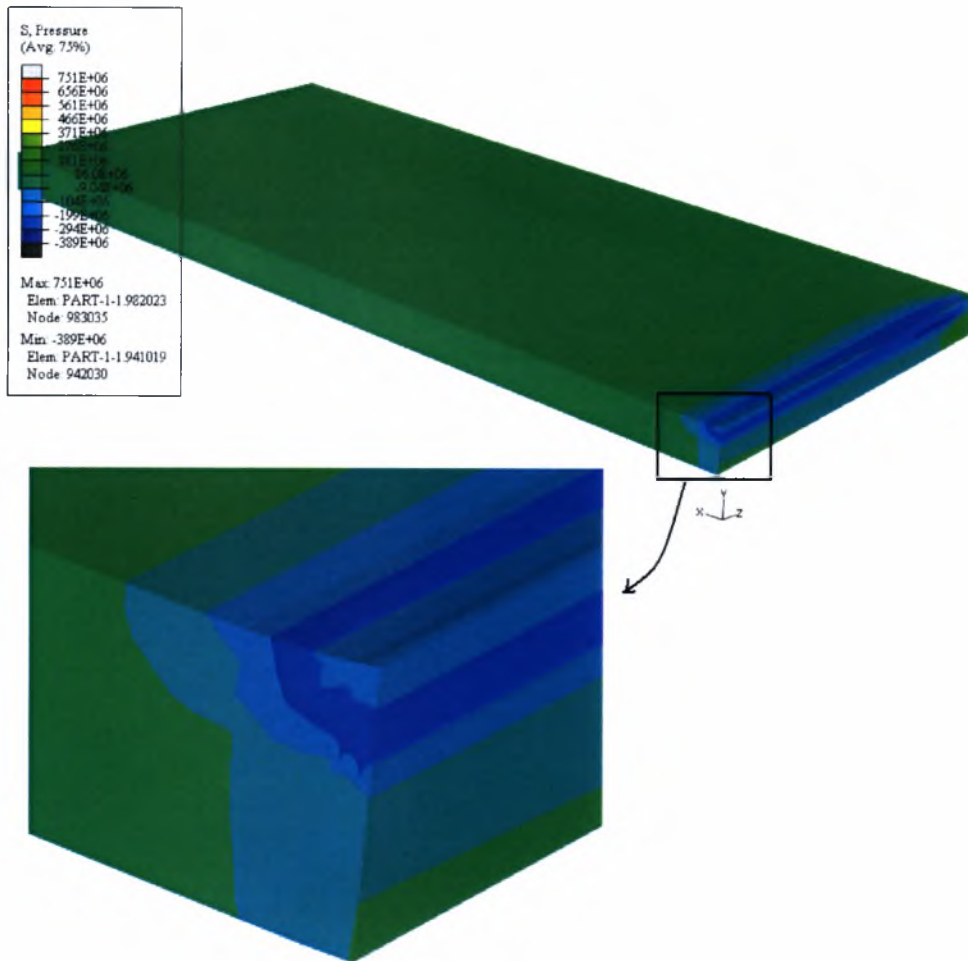




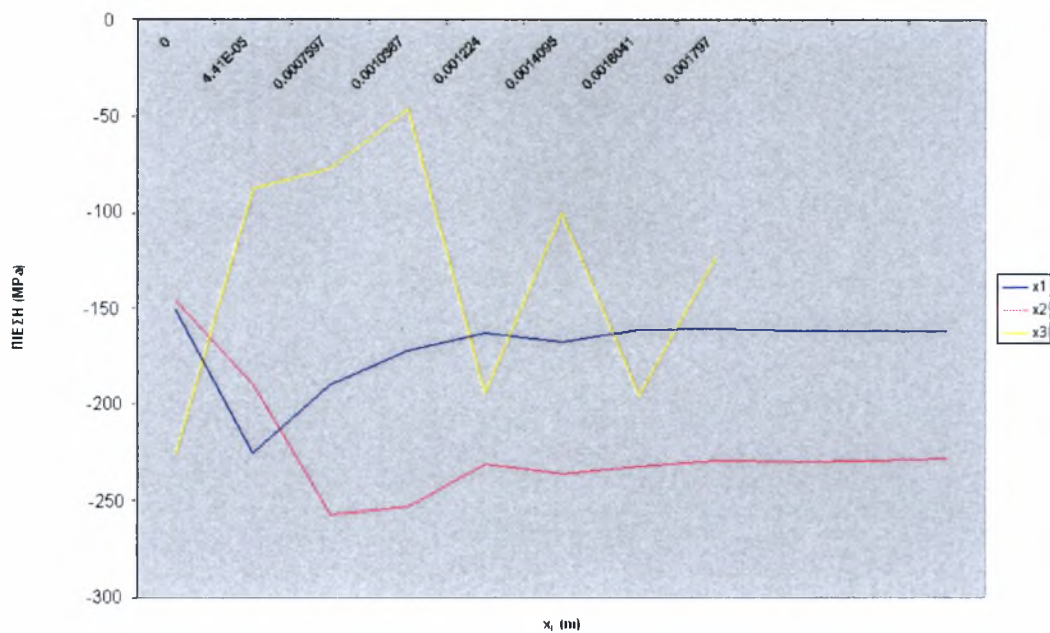
**Σχήμα 5.32:** Ισοϋψείς της ισοδύναμης τάσεως κατά von Mises για  $t=10\text{sec}$



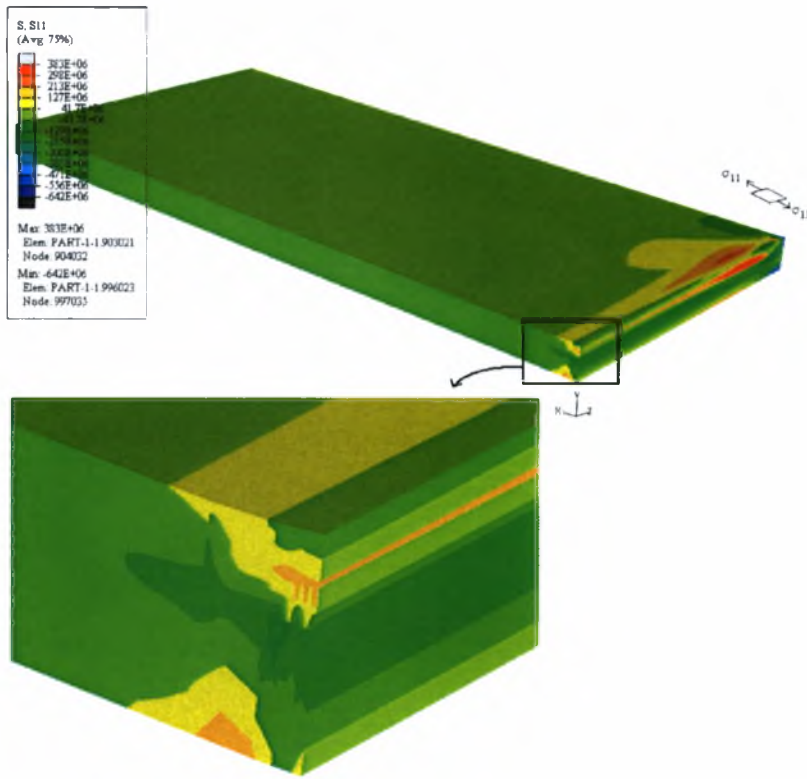
**Σχήμα 5.33 :** Τάσεις κατά von Mises συναρτήσει  $x_i$



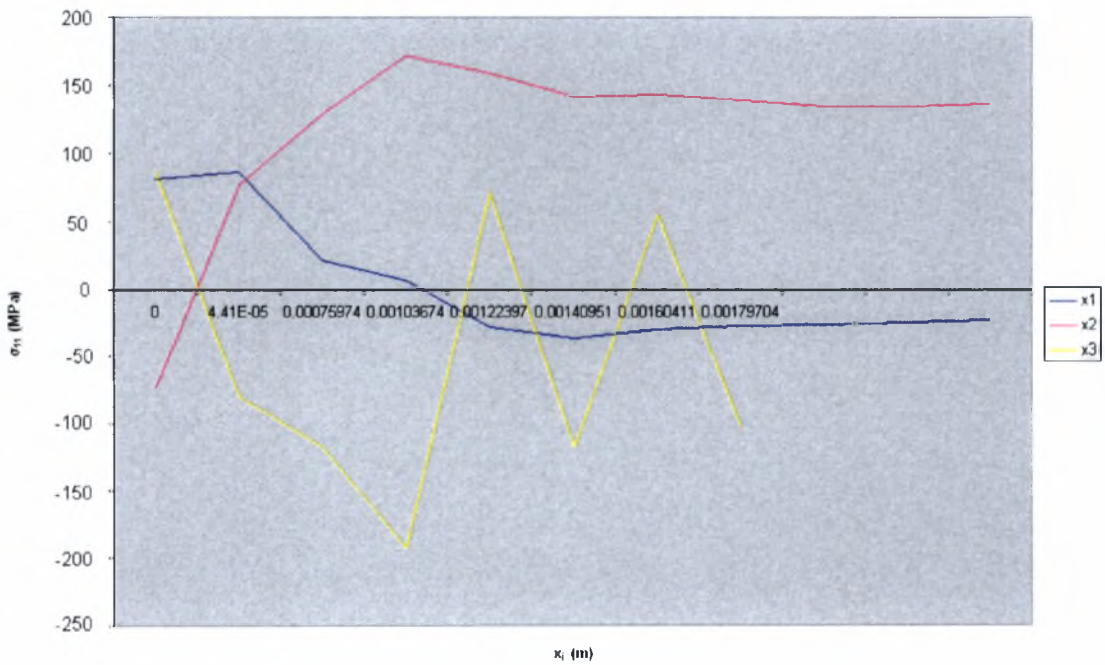
**Σχήμα 5.34** Ισοϋψείς της πίεσης για  $t=10\text{sec}$



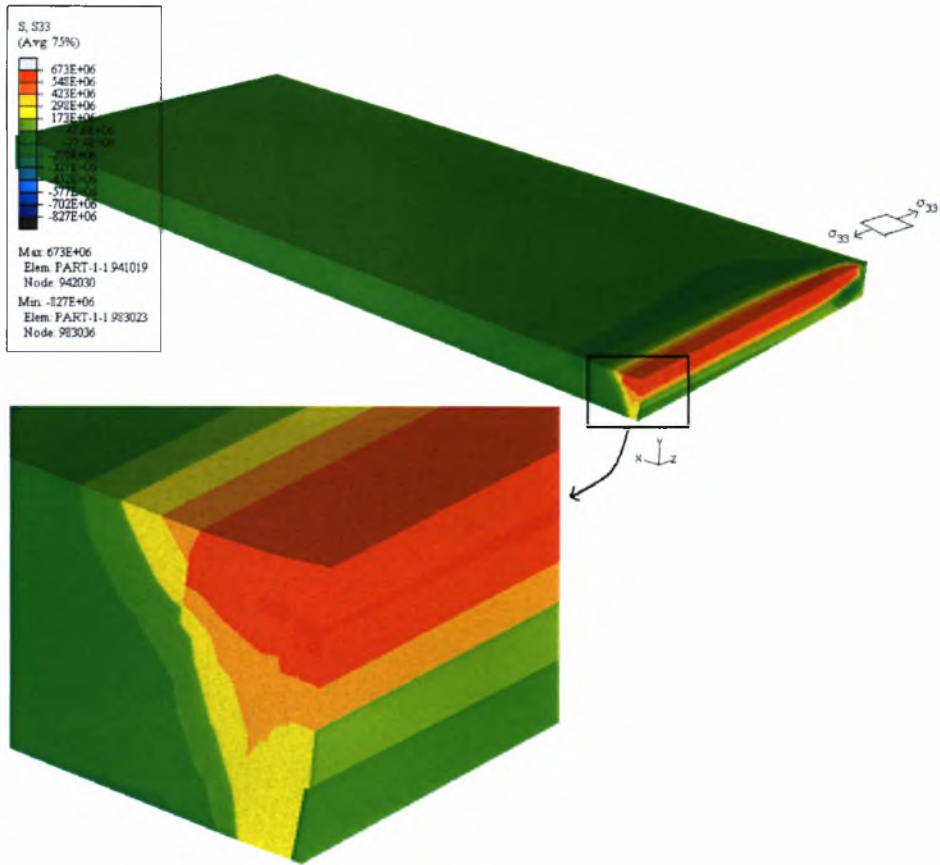
**Σχήμα 5.35** : Πίεση συναρτήσει  $x_i$



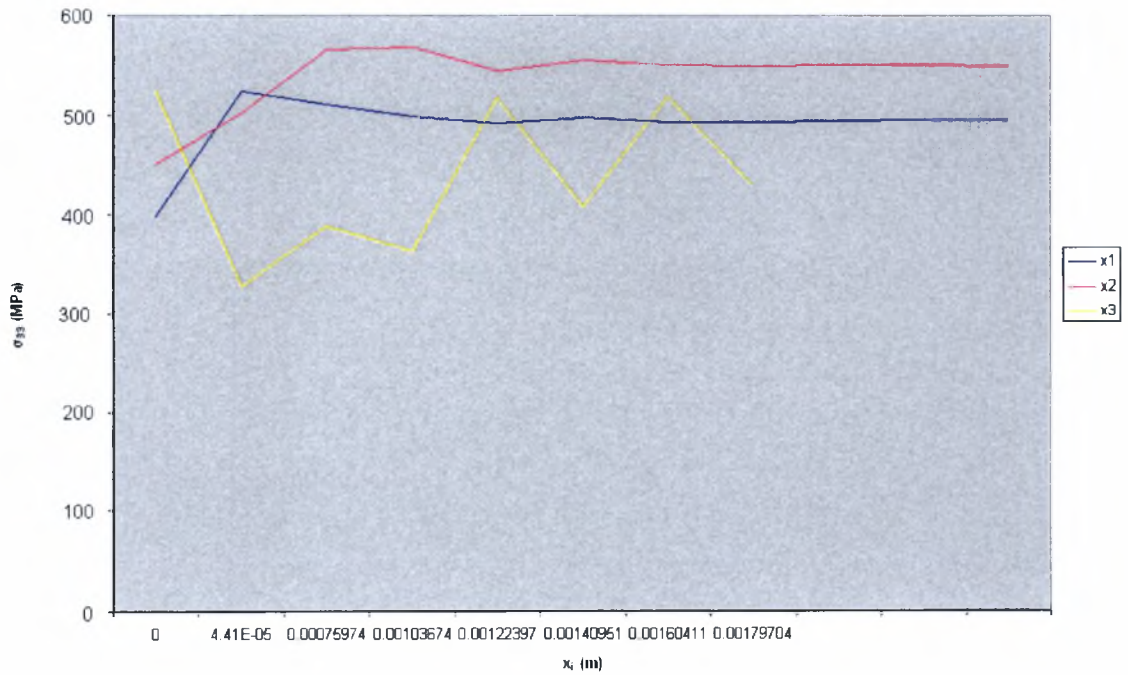
**Σχήμα 5.36 :** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{11}$  για  **$t=10\text{sec}$**



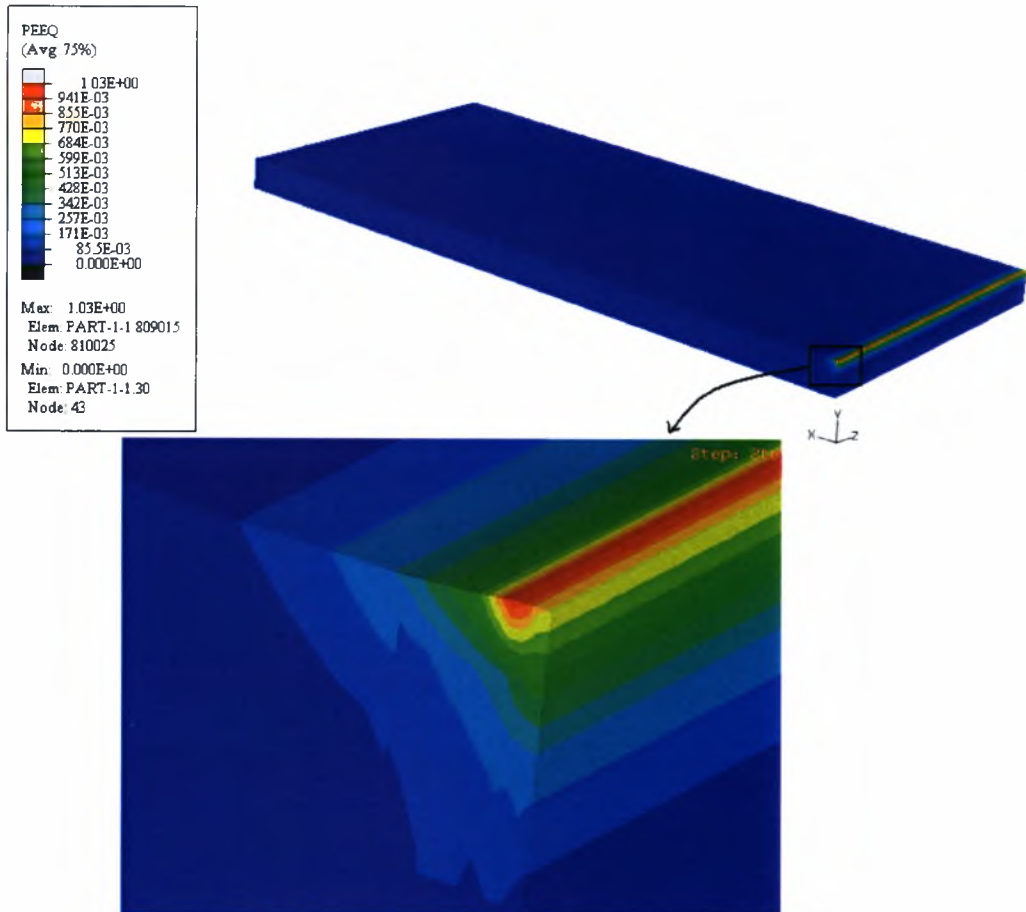
**Σχήμα 5.37 :** Τάσεις  $\sigma_{11}$  συναρτήσει  $x_1$



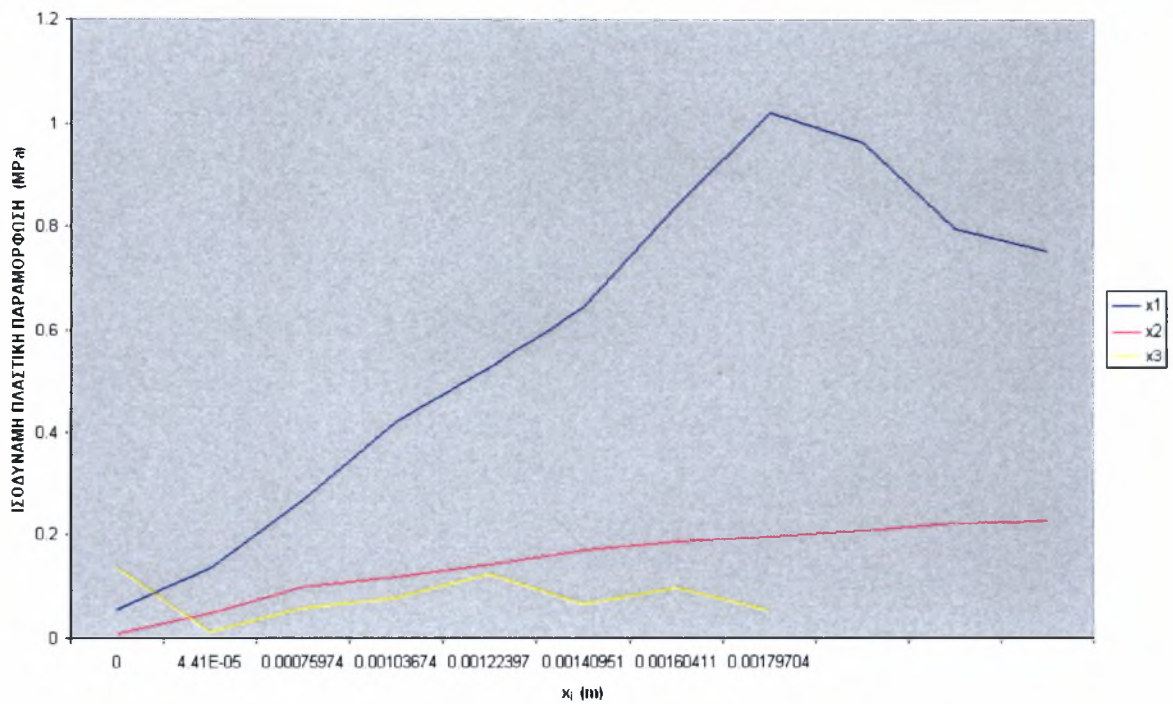
**Σχήμα 5.38 :** Ισοϋψείς τάσεως  $\sigma_{33}$  για  $t=10\text{sec}$



**Σχήμα 5.39 :** Τάσεις  $\sigma_{33}$  συναρτήσει  $x_1$

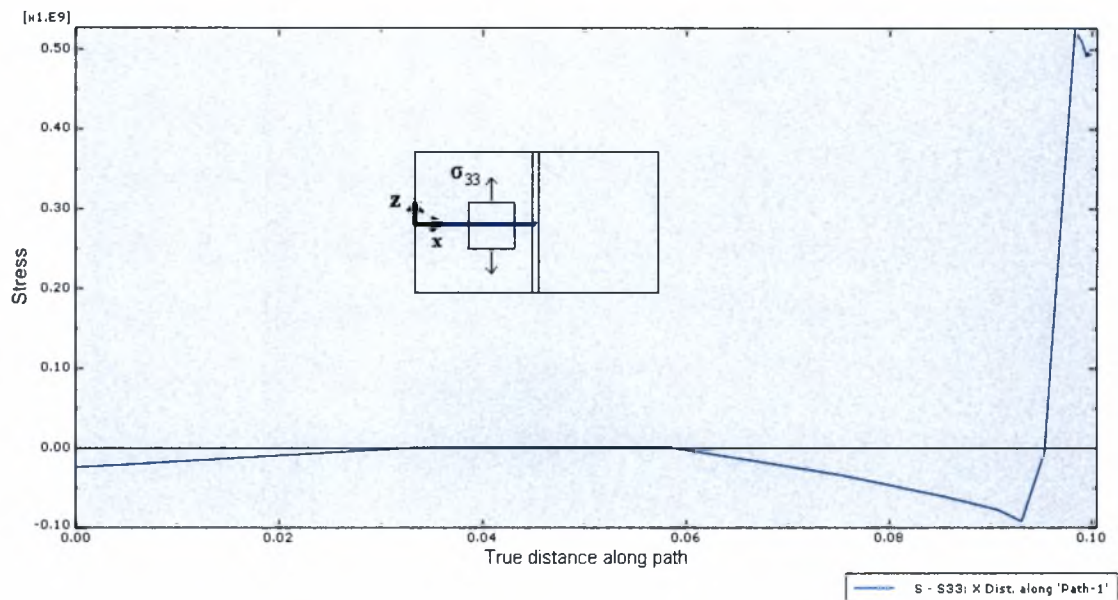


**Σχήμα 5.40 :** Ισοΰψεις ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για **t=10sec**

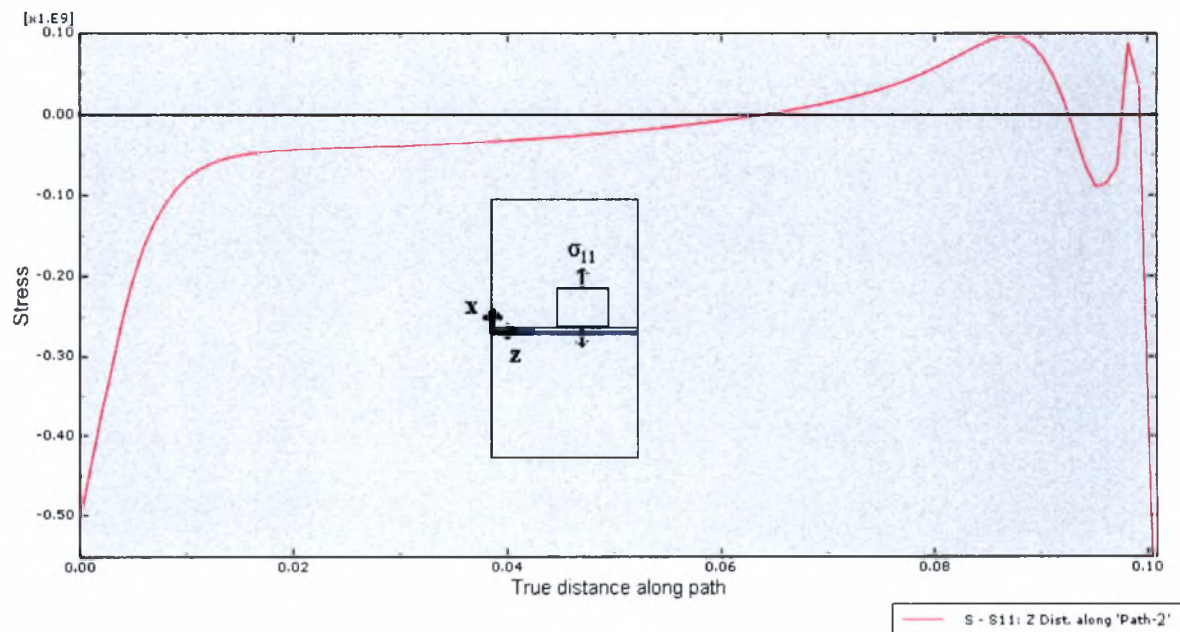


**Σχήμα 5.41 :** Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση συναρτήσει  $\xi_i$

Τέλος, πάρθηκαν καμπύλες αντίστοιχες του σχήματος 3.3, δηλαδή οι τάσεις  $\sigma_{33}$  συναρτήσει του άξονα  $x$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.41 και οι τάσεις  $\sigma_{11}$  συναρτήσει του άξονα  $z$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.42.



**Σχήμα 5.42:** Τάσεις  $\sigma_{33}$  συναρτήσει του άξονα  $x$



**Σχήμα 5.43:** Τάσεις  $\sigma_{11}$  συναρτήσει του άξονα  $z$

## 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 Laser CO<sub>2</sub> 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 Laser CO<sub>2</sub> στα κράματα αλουμινίου και την επακόλουθη διεύρυνση των εφαρμογών της συγκόλλησης στις διάφορες κατασκευές.

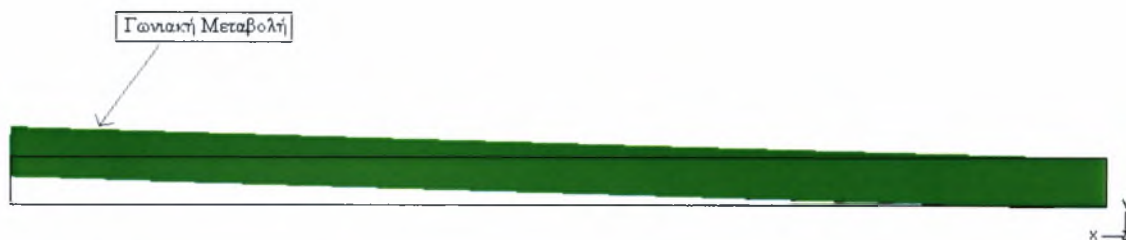
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των θερμοκρασιακών κατανομών στην λίμνη συγκόλλησης παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κοντά βρίσκεται η δέσμη του τόξου της συγκόλλησης σε κάποιον κόμβο τόσο πιο μεγάλη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό τον κόμβο. Ο θερμοκρασιακός κύκλος κάθε κόμβου της λίμνης συγκόλλησης έχει άμεση σχέση με την θέση του σημείου ως προς τη δέσμη Laser και την ακτινοβολούμενη επιφάνεια του ελάσματος.

Παρατηρείται ότι στο τέλος της συγκόλλησης ( $t=4\text{sec}$ ) η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας στο έλασμα είναι 663 °C, ενώ όταν το έλασμα έχει ψυχθεί για 6 δευτερόλεπτα, η μέγιστη θερμοκρασία είναι περίπου 182 °C. Επίσης εάν το δοκίμιο ψυχθεί για παραπάνω χρόνο απο ότι ψύχθηκε, τότε η ισουψής την θερμοκρασίας θα είναι ομοιόμορφη και δεν θα εμφανίζει καμμία περιοχή ανομοιομορφίας όπως το σχήμα 4.11.

Η ψύξη είναι πολύ απότομη και η απότομη αυτή θερμοκρασιακή κατανομή είναι εμφανέστατη στους θερμικούς κύκλους του σχήματος 4.12 όπου διακρίνονται οι απότομες κλίσεις των καμπυλών.

Συγκριτικά οι ισουψείς των θερμοκρασιών για  $\text{DELTMX}=3000^\circ\text{C}$  και  $\text{DELTMX}=300^\circ\text{C}$  των σχημάτων 4.8 και 4.14 αντίστοιχα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Ωστόσο, η «ιστορία» στους κόμβους έχει σχετικά μεγάλη απόκλιση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15.

Παρατηρώντας την τελική παραμόρφωση του ελάσματος, το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο. Έχουμε γωνιακή μεταβολή σε όλο το μήκος του ελάσματος όπως φαίνεται στα σχήματα 5.1 απο διαφορετικές οπτικές γωνίες.

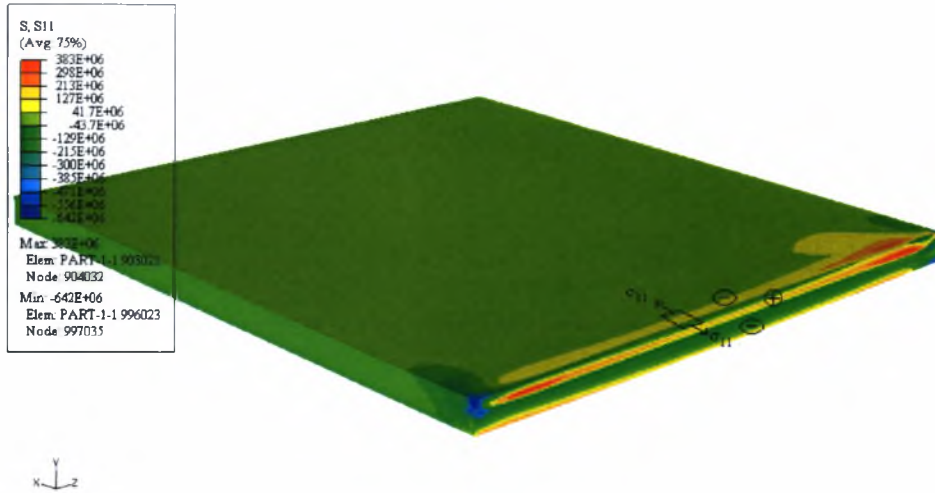


Η ανομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία παραμενουσών τάσεων. Οι παραμένουσες αυτές τάσεις προκάλεσαν την γωνιακή μεταβολή του ελάσματος

Από την «αστορία» των κόμβων των τάσεων κατά von Mises φαίνεται ότι όταν η δέσμη βρίσκεται πάνω και κοντά στον κόμβο η τάση αυξάνεται απότομα και έπειτα σταθεροποιείται. Κατά την ψύξη του ελάσματος οι τάσεις παίρνουν τιμή κοντά στο όριο διαρροής (500MPa). Ο λόγος για τον οποίο οι τάσεις φαίνεται να ξεπερνούν το όριο διαρροής εξηγούνται στην αρχή του Κεφαλαίου 5. Επίσης στο σχήμα 5.6β όπου παρουσιάζονται οι τάσεις κατά von Mises συναρτήσει του χρόνου για τρία στοιχεία, φαίνεται ότι οι τιμές των τάσεων αυξάνονται απότομα όταν η δέσμη βρίσκεται πάνω απο το εκάστοτε στοιχείο μέχρι την τιμή του ορίου διαρροής και έπειτα σταθεροποιούνται σε αυτήν την τιμή.

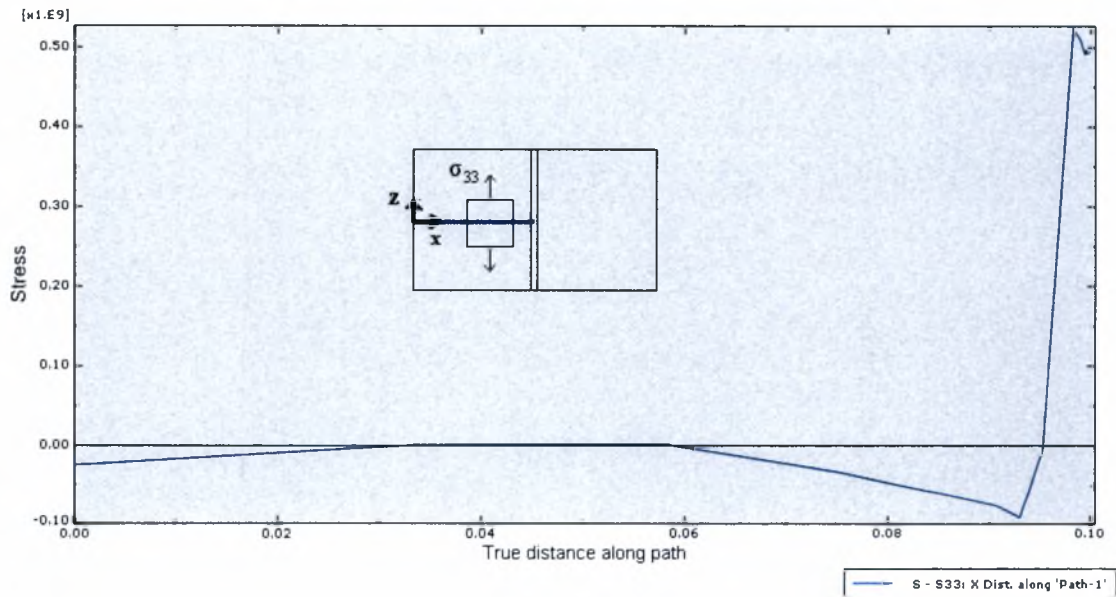
Από τα αποτελέσματα των τάσεων  $\sigma_{11}$ , η κατανομή των εγκάρσιων τάσεων δηλαδή, παρατηρείται ό,τι είναι γνωστό και από την θεωρία, δηλαδή γύρω από την λίμνη συγκόλλησης, στην θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις ενώ στην λίμνη της συγκόλλησης εφελκυστικές. .



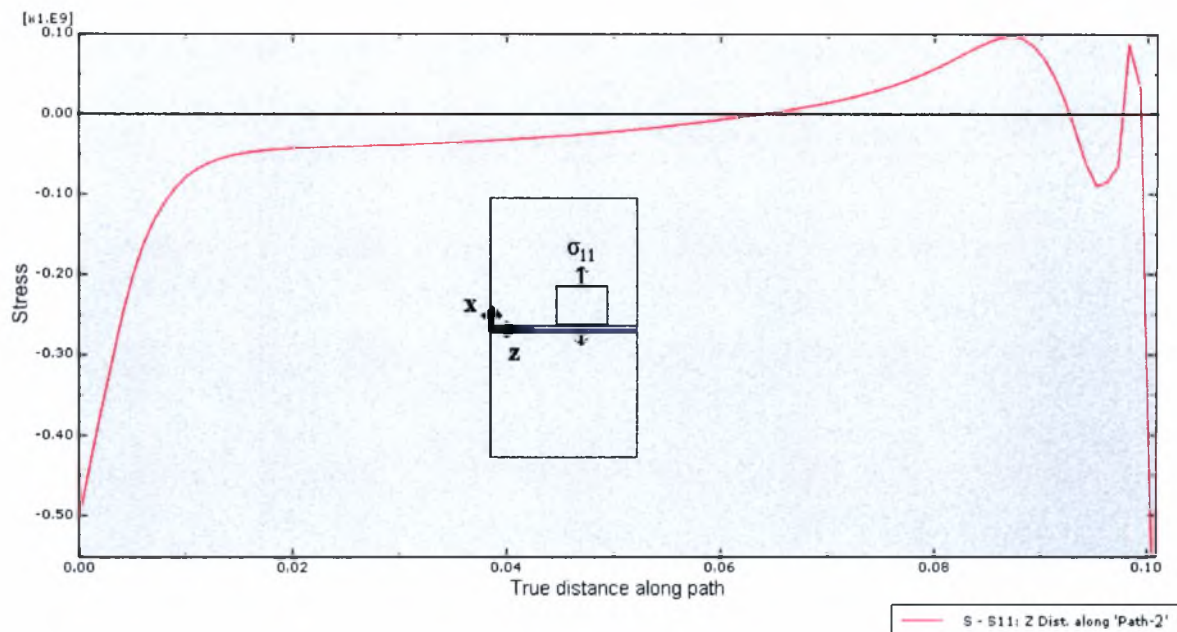


Είναι έντονες στις καμπύλες όπου δείχνονται οι «ιστορίες των κόμβων (σχήμα 5.16) οι απότομες κλίσεις των καμπυλών όταν η δέσμη βρίσκεται κοντά στον κάθε κόμβο.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι καμπύλες των σχημάτων 5.35 και 5.36.



**Σχήμα 5.42:** Τάσεις  $\sigma_{33}$  συναστήσει του άξονα x



**Σχήμα 5.43:** Τάσεις  $\sigma_{11}$  συναστήσει του άξονα z

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (σχήμα 3.3), στο σχήμα 5.35, οι θλιπτικές τάσεις  $\sigma_{33}$  θα έπρεπε να είναι μικρότερες και το σχήμα 5.36 δεν είναι ομοιόμορφο όπως θα έπρεπε να είναι. Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής κατανομής. Η συγκόλληση διήρκησε 4 δευτερόλεπτα και έπειτα το υλικό ψύχθηκε για 6 δευτερόλεπτα. Το χρονικό αυτό διάστημα δεν είναι αρκετό και τα αποτελέσματα από την ανάλυση των τάσεων δεν είναι τα αναμενόμενα.

Συμπερασματικά, από το θερμικό πρόβλημα φάνηκε ότι η συγκόλληση χαρακτηρίζεται από απότομη ψύξη η οποία δημιουργεί θερμοκρασιακή ανομοιομορφία. Αποτέλεσμα αυτής της ανομοιομορφίας είναι η ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων, όπως φάνηκε από την ανάλυση των τάσεων, και η ανάπτυξη πλαστικής παραμόρφωσης με την μορφή γωνιακής μεταβολής. Ωστόσο το έλασμα χρειάζεται να ψυχθεί για περισσότερο χρόνο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο ρεαλιστικά. Αυτά δεν συνέβει στη παρούσα εργασία λόγω έλλειψης υπολογιστικής ισχύς και χρόνου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από την προσομοίωση της συγκόλλησης ελασμάτων κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου 2024 προέκυψαν πολλά ερωτήματα, τα οποία μπορεί να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω έρευνας. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε αυχενικές συγκολλήσεις αλλά και σε συγκολλήσεις με γωνιακή σύνδεση δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της πτυχιακής αφορούσαν συγκολλήσεις κατά συμβολή.
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιώντας άλλου μεθόδους συγκόλλησης όπως MIG και TIG.
- 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.
- 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 άλλης σειράς 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.
- Αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου DELTMX με μικρότερες τιμές.
- Να δοθούν πιο ρεαλιστικές τιμές στην τιμή  $\Gamma_{cut}$ .

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. H. Fairbanks, C. M. Adams, Laser Beam Fusion Welding, *Welding Journal*, 1964, pp. 43s-97s.
- [2] N. Okerblow, The calculations of deformations of welded metal structures, Her Majesty's Stationery Office, London UK, 1958.
- [3] L. J. Yang, Z. M. Xiao, Elastic-plastic modeling of the residual stress caused by welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 48, 1995, pp. 589-601.
- [4] Y. Tanigawa, T. Akai, R. Kawamura, N. Oka, Transient Heat Conduction and Thermal Stress Problems of a Nonhomogeneous Plate with Temperature-Dependent Material Properties, *Journal of Thermal Stresses*, 19, 1996, pp. 77-102.
- [5] A. Chakravarti, L. M. Malik, and J. Goldak, Prediction of Distortion and Residual Stresses in Panel Welds, In computer modeling of fabrication processes and constitutive behavior of metals, Ottawa, Ontario, Canadian Government Publishing Centre, 1986, pp. 547-561.
- [6] S. Fujii, N. Takahashi, S. Sakai, T. Nakabayashi and M. Muro, Development of 2D Simulation Model for Laser Welding, *Proceedings of SPIE*, Vol. 3888, 2000.
- [7] M. R. Frewin, D. A. Scott, Finite Element Model of Pulsed Laser Welding, *Welding Journal*, *Welding Research Supplement*, Jan. 1999, pp. 15s-22s.
- [8] G. Reinhart, B. Lenz, F. Rick, Finite Element Simulation for the Planning of Laser Welding Applications, *Proc. Of the 18th intern. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO'99)*, San Diego/CA, 1999.
- [9] C. Carmignani, R. Mares, G. Toselli, Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 179, 1999, pp. 197-214.
- [10] R. I. Karlsson, B. L. Josefson, Three-Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in Single-Pass Butt-Welded Pipe, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 112, 1990, pp. 76-83.
- [11] Z. Tiechuan, C. Jimin, X. Rongshi, B. Yong, 3-Dimensional Welding and Cutting Using High Power CO<sub>2</sub> or YAG Laser, In *Process Control and Inspection for Industry*, edited by Shulian Zhang, *Proceedings of SPIE*, Vol. 4222, 2000.

- [12] D.-H. Kang, K.-J. Son, Y.-S. Yang, Analysis of laser weldment distortion in the EDFA LD pump packaging, *Finite Elements in Analysis and Design*, 37, 2001, pp. 749-760.
- [13] K. Masubuchi, *Analysis of welded structures*, Pergamon Press, Oxford UK, 1980.
- [14] C. T. Karlsson, Finite element analysis of temperatures and stresses in a single-pass butt-welded pipe- influence of mesh density and material modelling, *Eng. Comp.*, 6, 1989, pp. 133-141.
- [15] S. Brown, H. Song, Finite Element Simulation of Welding of Large Structures, *Journal of Engineering for Industry*, 114, 1992, pp. 441-451.
- [16] B. L. Josefson, Prediction of Residual Stresses and Distortions in Welded Structures, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 115, 1993, pp. 52-57.
- [17] F.O. Henkel, A. Schumann-Luck, H. Friedmann, Deformation Analysis of Welded Sheets, NISA Users Conference, Troy, Michigan, USA, 1994. [18] J. Ronda, Y. Estrin, G.J. Oliver, Modeling of welding. A comparison of thermo-mechano-metallurgical constitutive model with a thermo-viscoplastic material model, *Journal of Material Processing Technology*, 60, 1996, pp. 629-636.
- [19] J. Canas, R. Picon, F. Paris, A. Blazquez, J. C. Marin, A simplified numerical analysis of residual stresses in aluminum welded plates, *Computers & Structure*, 58(1), 1996, pp. 59-69.
- [20] P. Michaleris, A. DeBiccari, Prediction of Welding Distortion, *Welding Journal*, 76(4), 1997, pp. 172s-181s.
- [21] A. Bachorski, M.J. Painter, A.J. Smailes, M.A. Wahab, Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 1999, pp. 405-409.
- [22] J. B. Roelens, Numerical simulation of some multipass submerged arc welding- Determination of the residual stresses and comparison with experimental measurements, *Welding in the world*, 35(2), 1995.
- [23] Y. V. L. N. Murthy, G. Venkata Rao, P. Krishna Iyer, Numerical simulation of welding and quenching processes using transient thermal and thermo-elasto-plastic formulations, *Computers & Structures*, 60(1), 1996, pp. 131-154.
- [24] S. Sarkani, V. Trichtkov, G. Michaelov, An efficient approach for computing residual stresses in welded joints, *Finite Element in Analysis and Design*, 35, 2000, pp. 247-268.

- [25] C. K. Leung, R. J. Pick, D. H. B. Mok, Finite Element Modeling of a Single Pass Weld, *Weld. Res. Council Bull.*, 356, 1990, pp. 1-10.
- [26] T.-L. Teng, C.-P. Fung, P.-H. Chang, W.-C. Yang, Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, *International Journal of Vessels and Piping*, 78, 2001, pp. 523-538.
- [27] L-E Lindgren, Finite element modeling and simulation of welding Part 1: Increased complexity, *Journal of Thermal Stresses*, 24, 2001, pp. 141-192.
- [28] L-E Lindgren, Finite element modeling and simulation of welding Part 2: Improved material modeling, *Journal of Thermal Stresses*, 24, 2001, pp. 195-231.
- [29] L-E Lindgren, Finite element modeling and simulation of welding Part 3: Efficiency and integration, *Journal of Thermal Stresses*, 24, 2001, pp. 305-334.
- [30] S. M. Variyar, N. S. Prasad, Estimation of residual stresses in weldments using a nine-noded degenerated shell element, *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 1999, pp. 150-160.
- [31] B. Taljat, B. Radhakrishnan, T. Zacharia, Numerical analysis of a GTA weldin process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses, *Materials Science and Engineering*, A246, 1998, pp. 45-54.
- [32] P. Michaleris, Z. Feng, G. Campbell, Evaluation of 2D and 3D FEA models for predicting residual stress and distortion, *Approximate Methods in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping Components*, PVP-Vol.347, ASME 1997, pp. 91-102.
- [33] J. J. Janosch, J. B. Roelens, H. Koneczny, Definition of a "materials" data base for heavy structures, created by numerical simulation of welding and by experimental characterization of toughness-impact strength, *International Conference on Pressure Vessel Technology*, Vol. 1, ASME 1996, pp. 483-503.
- [34] J. B. Leblond, D. Pont, J. Devaux, D. Bru, and J. M. Bergheau, Metallurgical and mechanical consequences of phase transformations in numerical simulations of welding processes, *Modeling in Welding, Hot Powder Forming and Casting*, edited by Pr Lennart Karlsson, ASM International, Ch. 4, 1997, pp. 61-89.
- [35] Papazoglou V., Analytical techniques for determining temperatures thermal strains and residual stresses during welding, PhD thesis at the Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [36] K. Bathe, *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.

- [37] Αν. Κ. Κυρσανίδη, Προσομοίωση κατεργασίας μορφοποίησης μεταλλικών ελασμάτων με Laser, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1999
- [38] Αν. Κ. Kyrsanidi, Th. B. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis, "Numerical and experimental investigation of the laser forming process, Journal of Materials Processing Technology, 87(1), 1999, pp. 281-290.
- [39] Τσίρκα Α. Σωτηρίου, διδακτορική διατριβή με θέμα «Ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου υπολογισμού των στρεβλώσεων κατασκευαστικών στοιχείων υψηλής ολοκλήρωσης που συγκολλούνται με Laser», Πάτρα, Απρίλιος 2003
- [40] Γ.Ν.Χαιδεμενοπουλος, Φυσική Μεταλλουργία (Θεμελιώδης Αρχές), Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος 2000.
- [41] Τζαμτζής Ανδρέας, πτυχιακή εργασία με θέμα « Συγκολλήσεις MIG λεπτών ελασμάτων κράματος Al 5083 : Επίδραση παραμέτρων και χαρακτηρισμός» Βόλος 2007.
- [42] Πτυχιακή εργασία Πρωτογενείς παραγωγή αλουμινίου και καταγραφή μεθόδων κατεργασίας για παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων με πλαστική παραμόρφωση Γκουζιώτου Αρετή
- [43] Βελτιστοποίηση των μεθόδων συγκόλλησης στα κράματα Al της σειράς 5 xxx, Δρ. Σπ.Α. Παπαευθυμίου, Ήρων 2006-7
- [44] <http://www.azon.com>
- [45] <http://www.grantadesign.com>
- [46] Ζερβακη Άννα, Διδακτορική Διατριβή Με Θέμα: Συγκολλήσεις Κραμάτων Αλουμινίου Με Laser: Πειραματική Μελέτη Και Προσομοίωση Της Διαμόρφωσης Μικροδομής Της ΘΕΖ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Βόλος.
- [47] Γεώργιος Τσουκάντας ,Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της διεργασίας απομακρυσμένης συγκολλήσεως με Laser (remote laser welding), Διδακτορική Διατριβή
- [48] Β.Ι. Παπαζογλου, Επιστήμη Και Τεχνική Συγκολλήσεων (Σημειώσεις), Αθηνά 1989, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [51] [www.aircraftspruce.com](http://www.aircraftspruce.com)
- [52] [www.alcoa.com](http://www.alcoa.com)
- [53] [www.elval.gr](http://www.elval.gr)
- [53] Abaqus Keywords Manual Version 6.2.
- [54] Abaqus /Explicit User's Manual Version 6.3.
- [55] [www.google.com](http://www.google.com).

[56] [www.asm.matweb.com](http://www.asm.matweb.com)

[57] [www.efunda.com](http://www.efunda.com)





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104379