



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΞΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ**

Συγγραφέας: Θεοδόσιος ΣΚΑΡΟΣ (Α.Μ.: 46147738)

Επιβλέπων: Αθανάσιος ΜΟΥΡΛΑΣ

Αιγάλεω, Οκτώβριος 2022

[κενή σελίδα]



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Diploma Thesis

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURAL STEEL ARC WELDING

Student: Theodosios SKAROS (Register No: 46147738)

Supervisor: Athanasios MOURLAS

Egaleo, October 2022

[κενή σελίδα]




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΞΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Πανδώρα Ψυλλάκη	Καθηγήτρια	
2.	Γεράσιμος Παναγιωτάτος	Καθηγητής	
3.	Αθανάσιος Μουρλάς	Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Θεοδόσιος Σκάρος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 46147738, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Θεοδόσιος Σκάρος

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα, κ. *Μουρλά Αθανάσιο*, Ακαδημαϊκό Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (Διδάσκων μέσω προγράμματος ΕΣΠΑ), της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την κα. *Ψυλλάκη Πανδώρα*, Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους λίγους που έχω κρατήσει δίπλα μου τόσα χρόνια και, περιέργως, ακόμη με ανέχονται.

Αιγάλεω, Οκτώβριος 2022

Σκάρος Θεοδόσιος

[κενή σελίδα]

Περίληψη

Οι παραμορφώσεις αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των συγκολλητών κατασκευών και, συνήθως, ο έλεγχός τους γίνεται με εμπειρικούς τρόπους, ωστόσο αυτοί μπορούν να οδηγήσουν στην αλλοίωση των ανοχών των διαστάσεων των τελικών κατασκευών, με αποτέλεσμα την ανάγκη για μεγάλου κόστους επιδιορθώσεις και πιθανές καθυστερήσεις στην γραμμή παραγωγής ή, σε χειρότερες περιπτώσεις, η κατασκευή να κρίνεται ακατάλληλη προς χρήση. Ακόμη, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή σε κόπωση και σε λυγισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να κρίνονται εξαιρετικά σημαντικές η κατανόηση και ο έλεγχος της ανάπτυξης των παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκολλήσεων.

Οι προσομοιώσεις των συγκολλήσεων βοηθούν στην βελτιστοποίηση των διαφόρων παραμέτρων μιας κατασκευής, σε αρχικό στάδιο, με αποτέλεσμα την αποφυγή σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν αργότερα. Με την ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM) έχει αξιοποιηθεί σε πληθώρα μελετών για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων των συγκολλήσεων, με τις περισσότερες εξ' αυτών να αναφέρονται κατά κύριο λόγο στις θερμοκρασιακές κατανομές και τις παραμένουσες τάσεις τόσο των χαλύβων όσο και άλλων υλικών. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια μελέτη που να συγκρίνει τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις ως αποτελέσματα προσομοιώσεων συγκόλλησης για διαφορετικές ποιότητες χαλύβων ώστε να γίνει κατανοητό πως επηρεάζουν οι ιδιότητες αυτών την συμπεριφορά τους, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά τη συγκόλληση.

Καθώς κρίνεται αναγκαίο να καλυφθεί το συγκεκριμένο βιβλιογραφικό κενό, δημιουργώντας το κίνητρο για την έρευνα αυτής της επίδρασης, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά στην επίδραση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων ποιότητας κατασκευαστικών χαλύβων, στις, λόγω συγκόλλησης τόξου, παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις, μέσω αριθμητικής και πειραματικής ανάλυσης.

Abstract

Distortions are one of the greatest issues that weldments face and, usually, their quality control happens through means of empirical knowledge that may lead to out of specification tolerances. This may lead to expensive repairs, possible production line downtimes or, in the worst-case scenario, a weldment that is unusable. Furthermore, residual stresses might affect the weldments fatigue and buckling strength. Due to the aforementioned, understanding and controlling the growth of distortions and residual stresses are of high importance.

Welding simulations may aid the production of a weldment while it is on the early stages by optimizing all the involved parameters to avoid any possible complications that may occur. With the development of numerical analysis, Finite Element Methods (FEM) is being utilized in a plethora of different researches considering the prediction of residual stresses and distortions. While most of them mainly consider temperature profiles and residual stresses of steel and other materials, there is none that compares the simulation results of different steel grades in order to analyze how their properties affect residual stresses and distortions during and after welding.

All the above contributed to the need for writing this very thesis, creating a motive to research these properties effects. The specific subject of the thesis lies in the research of the properties effects of different steel grades on residual stresses and distortions after arc welding, in both numerical and experimental analysis.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	vii
Περίληψη	ix
Περιεχόμενοι πίνακες	xiii
Περιεχόμενα σχήματα.....	xv
Συμβολισμοί.....	xix
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	1
1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας	3
1.3 Δομή της εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2 Ιδιότητες κατασκευαστικού χάλυβα	7
2.1 Κατασκευαστικός χάλυβας.....	7
2.2 Παραγωγή του χάλυβα.....	9
2.3 Ιδιότητες των χαλύβων	12
2.3.1 Τύποι χαλύβων υψηλής αντοχής (High Strength Steel – HSS).....	12
2.3.2 Μηχανικές ιδιότητες	15
2.3.3 Χημική σύσταση	16
2.4 Ισοδύναμο άνθρακα	18
Κεφάλαιο 3 Θερμικά και μηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου	21
3.1 Τύποι συγκολλήσεων τόξου	21
3.2 Θερμικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου	24
3.2.1 Μεταφορά θερμότητας	24
3.2.2 Θερμικές ιδιότητες των υλικών	27
3.3 Μηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου.....	27
3.4 Συνδυασμένα θερμομηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου.....	30
3.5 Μοντελοποίηση της συγκόλλησης	31
3.5.1 Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης.....	32
3.5.2 Μοντελοποίηση των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων	34
Κεφάλαιο 4 Ανάπτυξη μοντέλου συγκόλλησης κατασκευαστικού χάλυβα.....	37
4.1 Εισαγωγή	37
4.2 Πειράματα και μετρήσεις.....	37

4.3 Μοντελοποίηση συγκόλλησης κατασκευαστικού χάλυβα	40
4.3.1 Θερμική ανάλυση	40
4.3.2 Μηχανική ανάλυση.....	44
4.3.3 Ορισμός κατάλληλης πυκνότητας του πλέγματος.....	46
4.4 Σύγκριση μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα	49
Κεφάλαιο 5 Μελέτη της επίδρασης των θερμομηχανικών ιδιοτήτων	55
5.1 Εισαγωγή	55
5.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων.....	55
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	61
5.3.1 Σύγκριση θερμικών κύκλων	61
5.3.2 Σύγκριση παραμενουσών τάσεων.....	67
5.3.3 Σύγκριση γωνιακών παραμορφώσεων.....	74
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	79
Βιβλιογραφία	83

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 2.1 Χάλυβες υψηλής (HSS) και κανονικής αντοχής (NSS).

Πίνακας 2.2 Ποιότητες κατασκευαστικών χάλυβων, βάσει ευρωπαϊκών προτύπων.

Πίνακας 2.3 Ονομαστικές τιμές ορίων διαρροής και αντοχής (ή θραύσης) κατασκευαστικών χάλυβων θερμής έλασης.

Πίνακας 2.4 Τυπικές τιμές, σε ποσοστά, των διαφόρων φάσεων σε AHSS.

Πίνακας 2.5 Αντοχή κρούσης διαφόρων κατασκευαστικών χάλυβων.

Πίνακας 2.6 Χημική σύσταση των χάλυβων S235, S355 και S690.

Πίνακας 2.7 Συγκολλησιμότητα και ανάγκη προθέρμανσης χάλυβων, βάσει της τιμής του ισοδύναμου άνθρακα της Εξίσωσης 2.3.

Πίνακας 4.1 Παράμετροι συγκόλλησης.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά πλέγματος, μέγιστες θερμοκρασίες και αποκλίσεις.

Πίνακας 5.1 Χημική σύσταση των χάλυβων ποιότητων S235, S355 και S690.

Πίνακας 5.2 Παράμετροι συγκόλλησης.

[κενή σελίδα]

Περιεχόμενα σχήματα

Εικόνα 2.1 Διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» εφελκυσμού για διάφορους χάλυβες.

Εικόνα 2.2 Χρονολογική ανάπτυξη των χαλύβων.

Εικόνα 2.3 Κατηγοριοποίηση χαλύβων.

Εικόνα 2.4 Διάγραμμα «τάσης – παραμόρφωσης».

Εικόνα 2.5 Εύρη συγκεντρώσεων (% w/w) για τα οποία εφαρμόζεται και ισχύει η Εξίσωση 2.3.

Εικόνα 3.1 Μέθοδοι συγκόλλησης τόξου: α), SMAW, β) GMAW και γ) SAW.

Εικόνα 3.2 Η μέθοδος συγκόλλησης GTAW.

Εικόνα 3.3 Παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις.

Εικόνα 3.4 Παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις.

Εικόνα 3.5 Σχέση παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων ανάλογα τον βαθμό πάκτωσης.

Εικόνα 3.6 Διάγραμμα ροής του θερμο-μηχανικού μοντέλου προσομοίωσης.

Εικόνα 3.7 Μοντέλο διπλής ελλειψοειδούς πηγής θερμότητας του Goldak.

Εικόνα 4.1 Διαστάσεις, πακτώσεις και σημεία μέτρησης συγκόλλησης τύπου T.

Εικόνα 4.2 Η χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης.

Εικόνα 4.3 Άποψη της πειραματικής διαδικασίας.

Εικόνα 4.4 Σχηματική απεικόνιση του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου θερμικής πηγής.

Εικόνα 4.5 Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.6 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.7 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.8 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.9 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.10 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

Εικόνα 4.11 Χαρακτηριστικά πλεγμάτων προσομοίωσης.

Εικόνα 4.12 Συσχέτιση μέγιστης θερμοκρασίας και χρόνου υπολογισμού με τον αριθμό στοιχείων για κάθε μέγεθος πλέγματος.

Εικόνα 4.13 Συσχέτιση μέγιστης θερμοκρασίας και απόκλισης με τον αριθμό στοιχείων για κάθε μέγεθος πλέγματος.

Εικόνα 4.14 Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Εικόνα 4.15 Μεγέθυνση τμήματος μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 4.14.

Εικόνα 4.16 Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Εικόνα 4.17 Μεγέθυνση τμήματος μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 4.16.

Εικόνα 4.18 Σύγκριση των πειραματικών γωνιακών παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση, για χάλυβα S355.

Εικόνα 4.19 Σύγκριση των πειραματικών παραμενουσών τάσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση, για χάλυβα S355.

Εικόνα 5.1 Διαστάσεις, πακτώσεις, διαδοχή συγκολλήσεων και σημεία μέτρησης συγκόλλησης τύπου T.

Εικόνα 5.2 Μοντέλο προσομοίωσης συγκόλλησης τύπου T.

Εικόνα 5.3 Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.4 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.5 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.6 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.7 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.8 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.9 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης A.

Εικόνα 5.10 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.9.

Εικόνα 5.11 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.9.

Εικόνα 5.12 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης Β.

Εικόνα 5.13 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.12.

Εικόνα 5.14 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.12.

Εικόνα 5.15 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης C.

Εικόνα 5.16 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.15.

Εικόνα 5.17 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.15.

Εικόνα 5.18 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η συγκόλληση (500s), για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.19 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.20 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S235.

Εικόνα 5.21 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S355.

Εικόνα 5.22 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S690.

Εικόνα 5.23 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η συγκόλληση (500s), για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.24 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.25 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S235.

Εικόνα 5.26 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S355.

Εικόνα 5.27 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S690.

Εικόνα 5.28 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) συγκόλληση, για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.29 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβες S235, S355 και S690.

Εικόνα 5.30 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S235.

Εικόνα 5.31 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S355.

Εικόνα 5.32 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S690.

Συμβολισμοί

$CE_{IIW}\%$, $P_{cm}\%$, $CET\%$	Ισοδύναμο άνθρακα
V	Τάση, Volt
I	Ένταση ρεύματος, Ampere
u	Ταχύτητα συγκόλλησης, mm/s
C	Θερμοχωρητικότητα/Ειδική θερμότητα, J/kg°C
ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
T	Θερμοκρασία, °C
t	Χρόνος, sec
Q	Ροή θερμότητας, W/m ³
k	Θερμική αγωγιμότητα, W/m°C
q_f , q_r	Κατανομή ροή θερμότητας, W/m ²
Q	Ενέργεια ηλ. τόξου, Watt
η	Βαθμός απόδοσης μεθόδου συγκόλλησης
a, b_f , b_r , c	Διαστάσεις θερμικής πηγής, mm
f_f , f_r	Αδιάστατες μεταβλητές μέρους ενέργειας για κάθε τμήμα της κινούμενης πηγής θερμότητας
E	Μέτρο Young, GPa
σ_s	Όριο διαρροής, MPa
α	Συντελεστής θερμικής διαστολής 10 ⁻⁶ /°C

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι παραμορφώσεις αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των συγκολλητών κατασκευών και, συνήθως, ο έλεγχος τους γίνεται με εμπειρικούς τρόπους, ωστόσο αυτές μπορούν να οδηγήσουν στην αλλοίωση των ανοχών των διαστάσεων των τελικών κατασκευών (Bachorski, et al., 1999), με αποτέλεσμα την ανάγκη για μεγάλου κόστους επιδιορθώσεις και πιθανές καθυστερήσεις στην γραμμή παραγωγής ή, σε χειρότερες περιπτώσεις, η κατασκευή κρίνεται ακατάλληλη προς χρήση (Anca, et al., 2011). Ακόμη, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή σε κόπωση και σε λυγισμό (Bhatti, et al., 2014). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να κρίνονται εξαιρετικά σημαντικές η κατανόηση και ο έλεγχος της ανάπτυξης παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων λόγω των συγκολλήσεων.

Με την ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM) έχει αξιοποιηθεί σε πληθώρα μελετών για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων των συγκολλήσεων (Li, et al., 2021). Οι προσομοιώσεις των συγκολλήσεων βοηθούν στην βελτιστοποίηση των διαφόρων παραμέτρων μιας κατασκευής, σε αρχικό στάδιο, με αποτέλεσμα την αποφυγή σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν αργότερα. Σύμφωνα με μελέτες τα οφέλη των προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντικά, τόσο σε οικονομικό επίπεδο όσο και στη μείωση του χρόνου υλοποίησης ή την ανάγκη για περαιτέρω κατεργασίες μετά το πέρας της συγκόλλησης (Eren & Karasu Asnaz, 2022). Οι Ueda και Yamakawa ήταν οι πρώτοι που ανέλυσαν τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις μετωπικών συγκολλήσεων και συγκολλήσεων τύπου T (T-joint) μέσω θερμο-ελαστο-πλαστικών μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων, με αποτέλεσμα περισσότεροι ερευνητές να ακολουθήσουν στα

βήματα τους και να εξελίξουν τις μεθόδους. Σε πληθώρα περιπτώσεων οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις αρχικά προβλέπονται με FEM και έπειτα επιβεβαιώνονται πειραματικά. Είναι, λοιπόν, αντιληπτό πως είναι σημαντική αυτού του είδους η μελέτη πριν την συγκόλληση (Li, et al., 2021).

Παρά την πληθώρα διαθέσιμης βιβλιογραφίας, υπάρχει πολύ λίγη η οποία αφορά στην επίδραση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων διαφορετικών ποιοτήτων χάλυβα στις παραμορφώσεις και στις παραμένουσες τάσεις. Οι Heinze, et al. ανακάλυψαν ότι απαιτείται το κατάλληλο αριθμητικό μοντέλο για την συμφωνία των αποτελεσμάτων του πειράματος με αυτά της προσομοίωσης, ενώ ακόμη οι παραμορφώσεις επηρεάζονται σημαντικά από παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα, η ροή θερμότητας, η επιφάνεια διατομής του τηγμένου μετάλλου και, τέλος, το σχήμα του στην θερμοκρασία των 1440°C (υποθετική θερμοκρασία στερεοποίησης) (Heinze, et al., 2012). Οι Little και Kamtekar, χρησιμοποιώντας ένα νέο πρόγραμμα FEM, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζει σημαντικά τις παροδικές κατανομές θερμοκρασίας, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για την ανταλλαγή θερμότητας με το γειτονικό περιβάλλον (Little & Kamtekar, 1998). Οι Armentani, et al. βρήκαν αντίστοιχα ευρήματα με τους προηγούμενους ως προς τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και τις παροδικές κατανομές θερμοκρασίας, ενώ ακόμη η αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας μειώνει τις διαμήκης παραμένουσες τάσεις κοντά στο μήκος της συγκόλλησης (Armentani, et al., 2007). Οι Zhu και Chao, κατά την προσομοίωση συγκόλλησης αλουμινίου, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αρκετές από τις ιδιότητες του υλικού που έχουν άμεση σχέση με την θερμοκρασία μπορούν να διατηρούνται σταθερές και ίσες με την τιμή που έχουν στην θερμοκρασία περιβάλλοντος με βασική, όμως, εξαίρεση το όριο διαρροής που καθόρισε σημαντικά τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων ανάλογα την θερμοκρασία, καθώς στην θερμοκρασία περιβάλλοντος οι τιμές αυτών ήταν μηδενικές λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού (Zhu & Chao, 2002). Οι Barosso, et al., στην προσπάθειά τους να απλοποιήσουν το μοντέλο συγκόλλησης ελασμάτων κράματος νικελίου, συμπέραναν ότι οι ιδιότητες του υλικού μπορούν να θεωρηθούν σταθερές με την μεταβολή της θερμοκρασίας διατηρώντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στα πλαίσια προκαταρκτικών δοκιμών (Barroso, et al., 2010). Οι Cañas,

et al., σε προσομοίωση συγκόλλησης αλουμινίου, συμπέραναν ότι ο βαθμός απόδοσης της μεθόδου συγκόλλησης και, κυρίως, οι θερμικές ιδιότητες του υλικού δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των παραμενουσών τάσεων, παρά την μεταβολή τους με την θερμοκρασία (Cañas, et al., 1996). Τέλος, οι Asserin, et al. αξιοποιώντας την μέθοδο ανάλυσης ευαισθησίας συμπέραναν ότι μόνο ένα μέρος από το σύνολο των ιδιοτήτων του υλικού είναι απαραίτητο για την παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, συγκεκριμένα, στην έρευνα τους, μόνο 3 από τις συνολικά 35 και 40, για κάθε μελέτη περίπτωσης αντίστοιχα, μεταβλητές κρίθηκαν αναγκαίες (Asserin, et al., 2011).

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία έρευνας

Όπως είναι αντιληπτό από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι αναφορές απασχολούνται με διάφορα αντικείμενα. Αυτές αναφέρονται κατά κύριο λόγο στις κατανομές θερμοκρασίας και τις παραμένουσες τάσεις τόσο των χαλύβων όσο και άλλων υλικών. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια μελέτη που να συγκρίνει τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις ως αποτελέσματα προσομοιώσεων συγκόλλησης για διαφορετικές ποιότητες χαλύβων, τόσο κανονικής όσο και υψηλής αντοχής, ώστε να γίνει κατανοητό πως επηρεάζουν οι ιδιότητες αυτών την συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια και μετά τη συγκόλληση.

Καθώς κρίνεται αναγκαίο να καλυφθεί το συγκεκριμένο βιβλιογραφικό κενό, δημιουργώντας το κίνητρο για την έρευνα αυτής της επίδρασης, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά στην επίδραση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων ποιοτήτων κατασκευαστικών χαλύβων, στις, λόγω συγκόλλησης τόξου, παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις, μέσω αριθμητικής και πειραματικής ανάλυσης.

Για την ανάπτυξη της εργασίας υιοθετείται η τεχνολογία της συγκόλλησης τόξου λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων, ποιοτήτων S235, S355 και S690. Τα συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία όσον αφορά τους μετασχηματισμούς δομής κατά τη διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας, ενώ η κατεργασία των συγκολλήσεων συνδυάζει το μέγιστο εύρος θερμοκρασιών συμπεριλαμβάνοντας σε μια φάση κατεργασίας τη

θέρμανση, την ψύξη και την στερεοποίηση. Παράλληλα, η ευαισθησία των συγκολλήσεων όσον αφορά στις τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της κατεργασίας καθιστά την υιοθέτησή τους ένα ολοκληρωμένο αντικείμενο μελέτης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί ως βασικό αποδεικτικό εργαλείο τον αριθμητικό υπολογισμό με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό. Κατασκευάστηκε τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης. Το μοντέλο αυτό αποσκοπεί στο να «προβλέψει» τη θερμική και μηχανική απόκριση των προς συγκόλληση ελασμάτων πριν την πραγματοποίηση των ίδιων των συγκολλήσεων, δεδομένου ότι η εύστοχη και ταχεία «πρόβλεψη» αποτελεί σήμερα το ζητούμενο στη κατασκευαστική, και όχι μόνο, βιομηχανία. Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα και προτείνονται βελτιωμένα μοντέλα για μελλοντικές έρευνες.

1.3 Δομή της εργασίας

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές εξαρτημένες από τη θερμοκρασία θερμο-μηχανικές ιδιότητες διαφόρων ποιοτήτων κατασκευαστικού χάλυβα στα θερμοκρασιακά πεδία, στις παραμένουσες τάσεις καθώς και στις γωνιακές παραμορφώσεις, που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων τόξου, η δε εργασία αποτελείται από έξι (6) κεφάλαια.

Στο παρόν (πρώτο) κεφάλαιο, βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναδεικνύεται και περιγράφεται το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα διπλωματική εργασία και παρουσιάζονται οι στόχοι και η δομή της εργασίας, προκειμένου να παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα ακόλουθα κεφάλαια και το περιεχόμενό τους.

Στο κεφάλαιο 2, περιγράφονται γενικά οι ιδιότητες του κατασκευαστικού χάλυβα, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη αυτού, πραγματοποιείται σύγκριση αυτού ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες, ενώ γίνεται και αναφορά για την συγκολλησιμότητά του.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα θερμικά και μηχανικά φαινόμενα, που συνυπάρχουν στις διεργασίες συγκόλλησης τόξου. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι συγκόλλησης τόξου, αναλύονται τα θερμικά, μηχανικά και τα συνδυασμένα θερμομηχανικά φαινόμενα που εμφανίζονται στις διεργασίες συγκόλλησης και τέλος, πάλι βάσει βιβλιογραφικής ανασκόπησης, παρουσιάζονται οι μέθοδοι μοντελοποίησης της κινούμενης πηγής θερμότητας, καθώς επίσης και των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Περνώντας στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλες οι προκαταρκτικές δοκιμές, ο χρησιμοποιούμενος πειραματικός εξοπλισμός και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, περιγράφεται και αναπτύσσεται το μοντέλο προσομοίωσης συγκόλλησης τόξου και, τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση.

Καθώς επιβεβαιώθηκε η ορθότητα ή η πιστότητα του ανωτέρου πλήρους θερμομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης, υλοποιήθηκαν και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις συγκόλλησης τόξου, για τρεις ποιότητες κατασκευαστικού χάλυβα (S235, S355 και S690), από τις οποίες αντλήθηκαν αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων, τα οποία εν συνεχεία συγκρίθηκαν και επιβεβαιώθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά/βιβλιογραφικά δεδομένα και παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5.

Τέλος, το κεφάλαιο 6, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πολυεπίπεδη μελέτη πάνω σε όλα τα θέματα που αφορούν στις συγκολλήσεις του κατασκευαστικού χάλυβα και ουσιαστικά, μέσα από τη διπλωματική αυτή εργασία αναδεικνύεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου προσομοίωσης.

[κενή σελίδα]

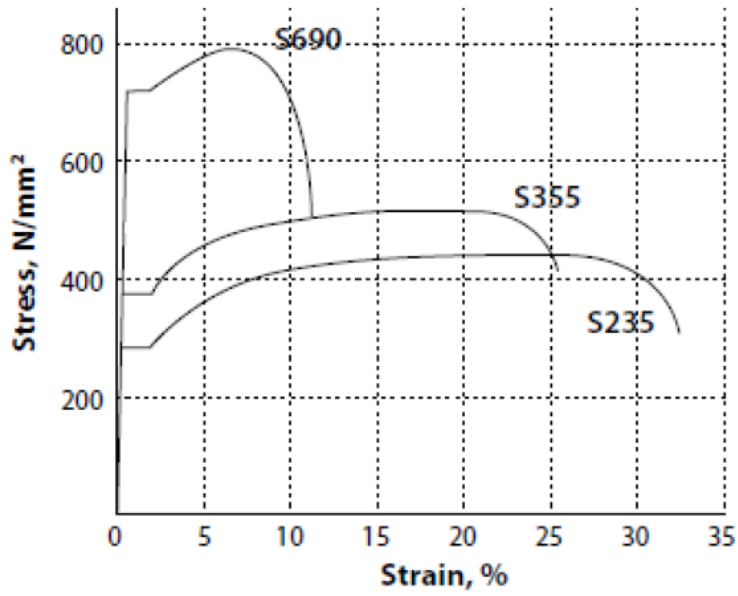
Κεφάλαιο 2

Ιδιότητες κατασκευαστικού χάλυβα

2.1 Κατασκευαστικός χάλυβας

Η σχέση μεταξύ «τάσης – παραμόρφωσης» είναι από τις πλέον απαραίτητες κατά τις μηχανικές δοκιμές των υλικών. Πειραματικοί έλεγχοι έχουν δείξει πως η υποβολή ενός δοκιμίου σε τάση έχει άμεση σχέση με την παραμόρφωση αυτού. Κρατώντας την τιμή της τάσης υπό ορισμένα πλαίσια, που εξαρτώνται από το εκάστοτε υλικό, η σχέση αυτή είναι αναλογική. Ξεπερνώντας τα εν λόγω πλαίσια, η αναλογική σχέση παύει να ισχύει και η μέγιστη τιμή ονομάζεται *όριο αναλογίας* (Ghavami, 2015). Η περιοχή στην οποία ισχύει η αναλογική συμπεριφορά, δηλαδή στο υπό κλίση ευθύγραμμο τμήμα της [Εικόνας 2.1](#), περιγράφεται από τον *νόμο του Hooke* και συγκεκριμένα από το *μέτρο ελαστικότητας* ή *μέτρο Young*, ως το πηλίκο της τάσης προς την παραμόρφωση (Ghavami, 2015) (Γαλιατσάτος, et al., 2016) και για τους χάλυβες η τιμή αυτού είναι 210000N/mm^2 ή 210GPa (EN1993-1-1, 2005). Όπως ειπώθηκε παραπάνω το μέτρο ελαστικότητας είναι κοινό για όλους τους χάλυβες πράγμα το οποίο αποδεικνύεται και στην [Εικόνα 2.1](#) όπου το ευθύγραμμο τμήμα είναι κοινό για τους χάλυβες S235, S355 και S690 με όριο διαρροής 235, 355, και 690MPa, αντίστοιχα.

Ως *χάλυβες υψηλής αντοχής* (High Strength Steels, HSS) χαρακτηρίζονται οι χάλυβες με όριο διαρροής μεγαλύτερο των 460 MPa, ενώ χάλυβες με όριο διαρροής μικρότερο των 460 MPa χαρακτηρίζονται ως *χάλυβες κανονικής αντοχής* (Normal Strength Steels, NSS) (Gkantou, et al., 2018), όπως παρουσιάζεται και στον [Πίνακα 2.1](#). Οι διαφορετικές ποιότητες χαλύβων, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία συνοψίζονται στον [Πίνακα 2.2](#).



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα «τάσεων-παραμορφώσεων» εφελκυσμού για διάφορους χάλυβες (Baddoo & Brown, 2015).

Πίνακας 2.1 Χάλυβες υψηλής (HSS) και κανονικής αντοχής (NSS).

Steel Type	Yield Limit (MPa)
NSS	<460
HSS	≥460

Στον Πίνακα 2.2 οι διαφορετικές ποιότητες των χαλύβων κωδικοποιούνται ως SXXX, όπου το σύμβολο S αναφέρεται στο ότι επρόκειτο για κατασκευαστικό χάλυβα ενώ τα επόμενα ψηφία αναφέρονται στο ελάχιστο όριο διαρροής. Η δεξιά στήλη αναφέρεται σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς την ποιότητά τους:

- H: Κοίλη διατομή
- J: Ελάχιστη δυσθραυστότητα 27J
- K: Ελάχιστη δυσθραυστότητα 40J
- N: Εξομαλυσμένος
- M: Θερμομηχανικής έλασης
- L: Για χαμηλότερες θερμοκρασίες
- Q: Βαφή

Οι συμβολισμοί R, 0, 1 και 2 αναφέρονται στη θερμοκρασία που εκτελείται η δοκιμή κρούσης Charpy (Nordenstam & Svantesson, 2016).

Πίνακας 2.2 Ποιότητες κατασκευαστικών χαλύβων, βάσει ευρωπαϊκών προτύπων (Baddoo & Brown, 2015).

Standard		Steel Grade	Steel Quality
EN 10025-2	Non-alloy structural steels	S275, S355	JR, J0, J2, K2
EN 10025-3	Normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels	S275, S355, S420, S460	N, NL
EN 10025-4	Thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels	S275, S355, S420, S460	M, ML
EN 10025-6	Flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition	S460, 500, 550, 620, 690, 890, 960	Q, QL, QL1
EN 10210-1 *	Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steel	Non alloy S275, S355	JRH, JOH, J2H, K2H
		Fine grain S275, 355, 420, 460	NH, NLH,
EN 10219	Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels	Non alloy S275, S355	JRH, JOH, J2H, K2H
		Fine grain S275, 355, 420, 460	NH, NLH

2.2 Παραγωγή του χάλυβα

Η παραγωγή των χαλύβων περιλαμβάνει πέντε διαφορετικές μεθόδους, όπως φαίνονται και περιγράφονται παρακάτω (Nordenstam & Svantesson, 2016):

- Χάλυβες έλασης
- Εξομαλυμένοι χάλυβες
- Εξομαλυμένοι χάλυβες έλασης
- Θερμο-μηχανικής έλασης
- Χάλυβες ύστερα από βαφή και επαναφορά (ή βαμμένοι και επαναφερμένοι)

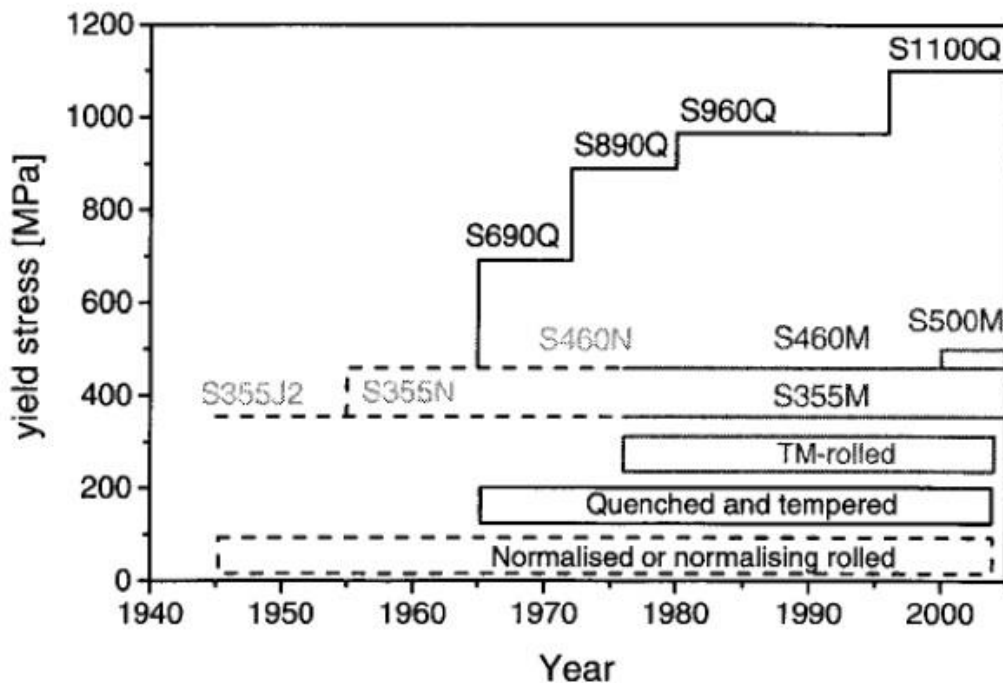
Μία θερμή έλαση με μέγιστη θερμοκρασία κατεργασίας περίπου τους 750°C ακολουθούμενη από αργή ψύξη στον αέρα δίνει ως τελικό προϊόν αυτό που ονομάζεται *χάλυβας εξέλασης*. Στην περίπτωση που ο συγκεκριμένος χάλυβας θερμανθεί περίπου στους 900°C για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πριν την αργή ψύξη του στον αέρα το τελικό προϊόν ονομάζεται *εξομαλυμένος χάλυβας*. Ένας εξομαλυμένος χάλυβας έχει λεπτότερη και πιο ομοιογενή δομή κόκκων συγκριτικά με έναν χάλυβα εξέλασης.

Οι *εξομαλυμένοι χάλυβες έλασης* έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές των *εξομαλυμένων χαλύβων*. Ένας *εξομαλυμένος χάλυβας έλασης* έχει μέγιστη θερμοκρασία κατεργασίας ίση με 900°C ενώ έπειτα ψύχεται αργά στον αέρα. Αυτή είναι και η μόνη ουσιαστική τους διαφορά.

Ωστόσο, υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για την περαιτέρω αύξηση του ορίου διαρροής των συγκεκριμένων χαλύβων:

- **Κραματοποίηση:** Υπάρχει πληθώρα στοιχείων κραμάτωσης που αυξάνουν το όριο διαρροής των χαλύβων, όπως για παράδειγμα ο άνθρακας (C) και το μαγγάνιο (Mn). Από την άλλη όμως, μια τέτοια παρέμβαση επιφέρει και αρνητικά αποτελέσματα, κατά κύριο λόγο στην συγκολλησιμότητα του χάλυβα.
- **Θερμικές κατεργασίες:** Με αυτή την μέθοδο μεταβάλλεται η μικροδομή και το μέγεθος κόκκων του χάλυβα. Συγκριτικά με μία χοντρόκοκκη μικροδομή, μια λεπτόκοκκη επιτυγχάνει παράλληλα μεγαλύτερη αντοχή αλλά και μεγαλύτερη δυσθραυστότητα.

Αναφορικά με τις μεθόδους παραγωγής των χαλύβων, υπάρχουν δύο μέθοδοι μέσω των οποίων το τελικό προϊόν είναι μεγαλύτερης αντοχής. Οι μέθοδοι αυτές είναι η *βαφή και επαναφορά* (Quench and Tempering, QT) και η *θερμομηχανική μέθοδος έλασης* (Thermomechanical, TM). Στην [Εικόνα 2.2](#) παρουσιάζεται η χρονολογική ανάπτυξη των χαλύβων, καθώς επίσης και η επίδραση των παραπάνω δύο μεθόδων ως προς το όριο διαρροής των χαλύβων.



Εικόνα 2.2 Χρονολογική ανάπτυξη των χαλύβων.

Κατά τη θερμομηχανική μέθοδο έλασης, απαιτείται ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών για να λάβει την τελική του μορφή ο χάλυβας, με ιδιότητες τις οποίες δεν μπορεί να έχει με μια απλή θερμική κατεργασία. Επίσης, η συγκολλησιμότητα των χαλύβων είναι πολύ καλή λόγω του μικρού ποσοστού κραματικών στοιχείων. Συχνά προστίθενται μικρά ποσοστά Νιόβιου (Nb), Βαναδίου (V) και Τιτανίου (Ti) για την περαιτέρω ενίσχυση της αντοχής του χάλυβα.

Η μέθοδος της βαφής και επαναφοράς ξεκινά με έναν εξομαλυμένο χάλυβα με θέρμανση στους 900°C. Έπειτα, ψύχεται απότομα με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής του, μειώνοντας ωστόσο την δυσθραυστότητα. Στην συνέχεια, για την επαναφορά της δυσθραυστότητας του υλικού, αυτό αναθερμαίνεται στους 600°C και ψύχεται αργά στον αέρα. Σε αντίστοιχο μοτίβο με την προηγούμενη μέθοδο προστίθενται κραματικά στοιχεία όπως το Νιόβιο (Nb), το Βανάδιο (V) και το Τιτάνιο (Ti) για την βελτίωση της αντοχής και της δυσθραυστότητας του χάλυβα.

Πίνακας 2.3 Ονομαστικές τιμές ορίων διαρροής και αντοχής (ή θραύσης) κατασκευαστικών χαλύβων θερμής έλασης (EN10025-6, 2019).

Steel Grade	Subgrade	Minimum yield strength (MPa)	Minimum Tensile Strength (MPa)
S500	Q	440	540
	QL		
	QL1		
S550	Q	490	590
	QL		
	QL1		
S690	Q	630	710
	QL		
	QL1		

2.3 Ιδιότητες των χαλύβων

Τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά ενός χάλυβα, για δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, μπορούν να προβλεφθούν αν είναι γνωστές η χημική του σύσταση, η μέθοδος κατασκευής του και, τέλος, οι θερμικές κατεργασίες που έχει υποστεί. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την συμπεριφορά του χάλυβα υπό ορισμένες συνθήκες καταπόνησης και επιτρέπουν την ασφαλή και αξιόπιστη επιλογή του κατάλληλου χάλυβα για την εκάστοτε εφαρμογή (Smith, 2007).

2.3.1 Τύποι χαλύβων υψηλής αντοχής (High Strength Steel – HSS)

Ένας από τους σημαντικότερους τρόπους ταξινόμησης των χαλύβων έγκειται στην αντοχή τους. Τα ακρωνύμια HSS (High Strength Steel) και AHSS (Advanced High Strength Steel) περιγράφουν ουσιαστικά το ίδιο ακριβώς πράγμα, δηλαδή τους χάλυβες υψηλής αντοχής (Hu & Feng, 2021). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως, λόγω της ταχείας ανάπτυξης των χαλύβων υψηλής αντοχής και των διαφόρων ποιοτήτων αυτών, η παραπάνω ταξινόμηση συχνά συναντά προβλήματα και για τον λόγο αυτό, ένας χάλυβας μπορεί να ανήκει και στις δύο κατηγορίες παράλληλα (Keeler, et al., 2017). Οι πιο «συνηθισμένοι» χάλυβες υψηλής αντοχής χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

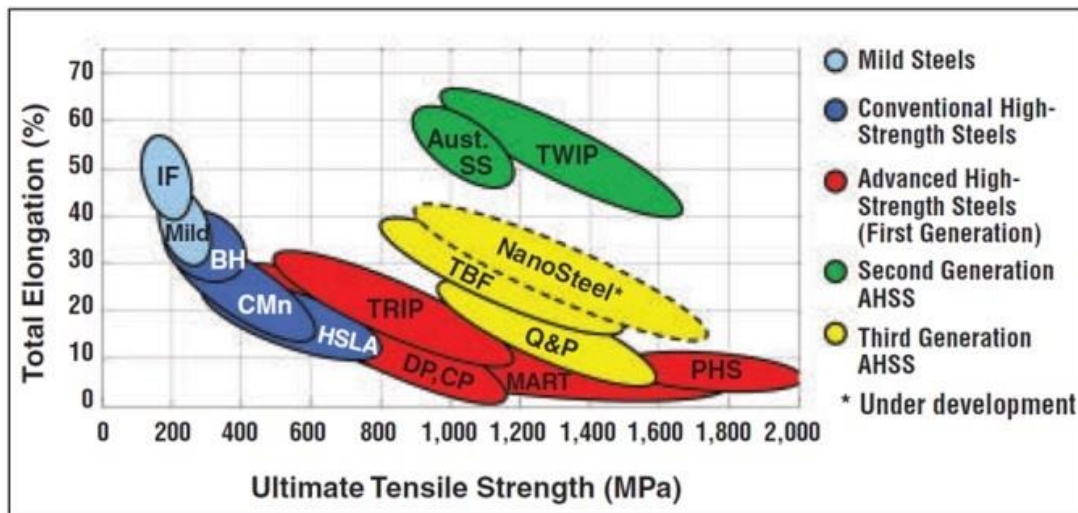
- **Interstitial-Free (IF) HSS:** Οι συγκεκριμένοι χάλυβες αξιοποιούν, για την αύξηση της αντοχής τους, κραματικά στοιχεία όπως ο φώσφορος (P), κατακρημνίσεις καρβιδίων ή/και νιτριδίων και εκλέπτυνση του μεγέθους των κόκκων της κρυσταλλικής δομής (Keeler, et al., 2017).
- **Bake Hardenable (BH) Steels:** Οι συγκεκριμένοι χάλυβες περιέχουν άζωτο (N) και άνθρακα (C) (Uijl & Carless, 2012) ενώ έχουν και φερριτική μικροδομή. Σημαντικός είναι ο τρόπος που αξιοποιείται ο περιεχόμενος άνθρακας (C) κατά την παραγωγή του χάλυβα, επιτυγχάνοντας τελικά αύξηση του ορίου διαρροής χωρίς την ταυτόχρονη μείωση της διαμορφωτικής ικανότητας του (Keeler, et al., 2017).
- **Carbon-Manganese (CM) Steels:** Οι συγκεκριμένοι χάλυβες περιέχουν άνθρακα (C) και Μαγγάνιο (Mn) που είναι τα δύο πλέον οικονομικότερα κραματικά στοιχεία για την αύξηση της αντοχής ενός χάλυβα. Ωστόσο, παρότι αυξάνεται η αντοχή του, επηρεάζεται άμεσα και μειώνεται η σκληρότητα, η ολκιμότητα και η συγκολλησιμότητα του (Anon., χ.χ.).
- **High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steels:** Οι συγκεκριμένοι χάλυβες αυξάνουν την αντοχή τους με μικρο-κραματικά στοιχεία τα οποία παράλληλα βοηθούν στην κατακρήμνιση λεπτών καρβιδίων και την μεταβολή του μεγέθους των κόκκων της κρυσταλλικής δομής (Keeler, et al., 2017). Επίσης, έχουν πολύ καλή αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση, καλή διαμορφωτική ικανότητα και συγκολλησιμότητα (Davis, 2001).

Αντίστοιχα, οι χάλυβες υπερ-υψηλής αντοχής χωρίζονται σε τρεις γενιές (Hu & Feng, 2021).

- **1^η γενιά:** διπλής φάσης (dual phase, DP), σύνθετης φάσης (complex phase, CP), πλαστικότητας που προκαλείται ύστερα από μετασχηματισμούς (transformation induced plasticity, TRIP steels), μαρτενσιτικοί (martensitic, MS). Οι συγκεκριμένοι χάλυβες παρουσιάζουν βελτιωμένη διαμορφωτική ικανότητα σε σχέση με τους HSLA στα ίδια επίπεδα αντοχής λόγω της μικροδομής τους, που είναι αποτέλεσμα ειδικών θερμικών κατεργασιών.
- **2^η γενιά:** twinning induced plasticity, (TWIP steels). Η συγκεκριμένη γενιά έχει ακόμη πιο βελτιωμένη διαμορφωτική ικανότητα, ωστόσο περιέχει μεγάλα ποσοστά

κραματικών στοιχείων, ιδίως Μαγγανίου (Mn), (βλ. Πίνακα 2.4) καθιστώντας την αρκετά ακριβή.

- **3^η γενιά:** Αναφορικά με την τρίτη γενιά των χαλύβων υπερ-υψηλής αντοχής δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία καθώς είναι ακόμη υπό ανάπτυξη. Αναμένεται βελτιωμένη αντοχή και ολκιμότητα σε σχέση με τις προηγούμενες δύο γενιές με ταυτόχρονη μείωση βάρους κατασκευής κατά περισσότερο από 35%.



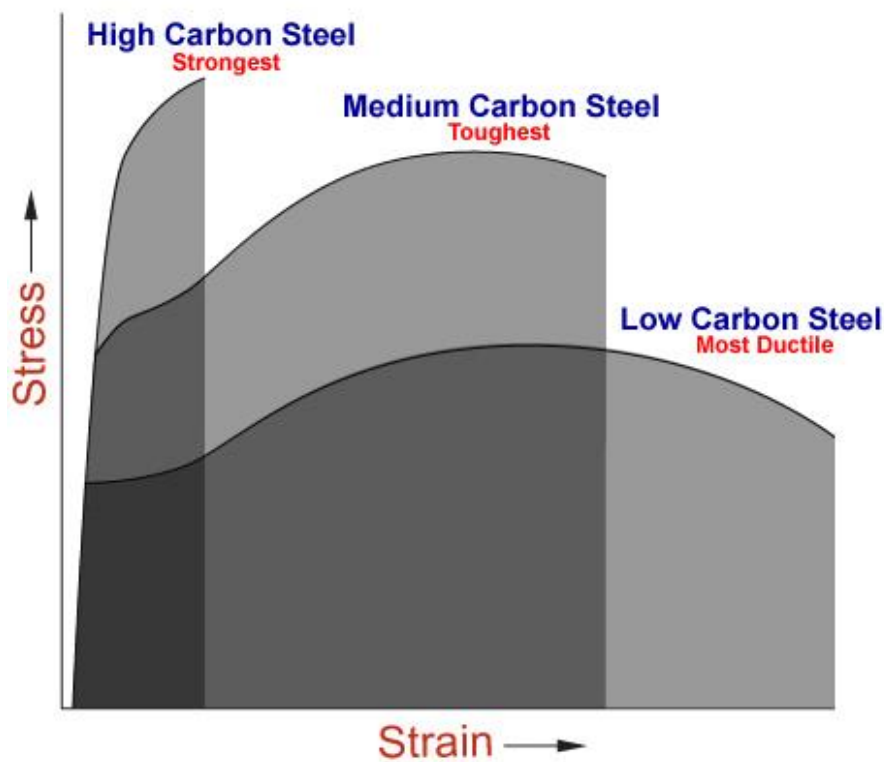
Εικόνα 2.3 Κατηγοριοποίηση χαλύβων (Hu & Feng, 2021).

Πίνακας 2.4 Τυπικές τιμές, σε ποσοστά, των διαφόρων φάσεων σε AHSS (Hu & Feng, 2021).

AHSS classification	Steel designation	C	Si and/or Al	Mn
1	Low-C TRIP	0.10–0.30	1.0–2.0	1.0–2.0
2	High-Mn steel	0.10–0.60	0–3.0	>14.0
3	Quenching and partitioning steel	0.10–0.30	1.0–2.0	1.5–3.0
3	Medium-Mn steel	0.05–0.40	1.0–3.0	3.0–12.0

2.3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Δυσθραυστότητα ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια και να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να θραύεται. Ένα υλικό με υψηλή αντοχή και ολκιμότητα θα έχει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από ένα υλικό με χαμηλή αντοχή και υψηλή ολκιμότητα (ISU, n.d.), γεγονός που καθιστά πολύ σημαντική την περαιτέρω εξέλιξη των χαλύβων υπερ-υψηλής αντοχής 3^{ης} γενιάς.



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα «τάσης – παραμόρφωσης» (ISU, χ.χ.).

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται αποσπάσματα από το πρότυπο SS EN 1993-1-10 το οποίο περιέχει τις τιμές ενέργειας κρούσης για τους χάλυβες S235, S355 και S690. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι οι χάλυβες υψηλής αντοχής (π.χ. S690) έχουν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από τους χάλυβες κανονικής αντοχής (π.χ. S235) σε δεδομένες θερμοκρασίες, γεγονός που οδηγεί και σε καλύτερη συγκολλησιμότητα (Gunn, 1997).

Πίνακας 2.5 Αντοχή κρούσης διαφόρων κατασκευαστικών χαλύβων (EN1993-1-10, 2005).

Steel Grade	Subgrade	Temperature (°C)	Impact Energy (J _{min})
S235	JR	20	27
	JO	0	27
	J2	-20	27
S355	JR	20	27
	JO	0	27
	J2	-20	27
	K2, M, N	-20	40
	ML, NL	-50	27
S690	Q	0	40
	Q	-20	30
	QL	-20	40
	QL	-40	30
	QL1	-40	40
	QL1	-60	30

Σκληρότητα χαρακτηρίζεται η ιδιότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε πλαστικές παραμορφώσεις της επιφάνειάς του, όπως η διείδυση και οι εσοχές. Δεν μπορεί να δοθεί μια πιο συγκεκριμένη προσέγγιση στην έννοια, καθώς κάθε μέθοδος ελέγχου σκληρότητας παρεμβάλλει συγκεκριμένες μεταβλητές στο υπό έλεγχο δοκίμιο και άρα συγκεκριμένες προσεγγίσεις ως προς την ποιότητα αυτού. Συνοπτικά, σκληρότητα είναι η αντίσταση ενός υλικού στην πλαστική του παραμόρφωση (Sakaguchi & Powers, 2012). Οι δύο συχνότερες μέθοδοι ελέγχου σκληρότητας είναι η σκληρότητα κατά Brinell και η σκληρότητα κατά Rockwell, έχοντας κάθε μία τη δική της μέθοδο για τον συγκεκριμένο έλεγχο (Smith, 2007).

2.3.3 Χημική σύσταση

Είναι σχεδόν απίθανο ένα μέταλλο να χρησιμοποιείται στην καθαρή του μορφή. Συνήθως περιέχουν πληθώρα μεταλλικών και μη μεταλλικών χημικών στοιχείων τα οποία μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους, με σκοπό την καλύτερη συμπεριφορά του μετάλλου. Μερικά από αυτά προστίθενται επιτηδευμένα ενώ άλλα είναι αναπόφευκτο να μην υπάρχουν. Για παράδειγμα, το σημαντικότερο χημικό στοιχείο που προστίθεται στον

σίδηρο (Fe) για την δημιουργία των χαλύβων είναι ο άνθρακας (C), ο οποίος βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα του υλικού αλλά μειώνει την ολκιμότητα του. Η χημική σύσταση ενός χάλυβα καθορίζει σημαντικά τις ιδιότητές του (Smith, 2007). Διαφορετικές χημικές συστάσεις και κραματικά στοιχεία οδηγούν σε διαφορετικές ιδιότητες υλικού. Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις των χαλύβων S235, S355 και S690 σύμφωνα με τα πρότυπα BS EN10025-2 και BS EN10025-6 κατά BSi.

Πίνακας 2.6 Χημική σύσταση των χαλύβων S235, S355 και S690 (EN10025-2, 2019) (EN10025-6+A1, 2009).

Element (% max.)	S235	S355	S690
	BS EN 10025-2	BS EN 10025-2	BS EN 10025-6
C	0,20	0,24	0,20
Si	-	0,55	0,80
Mn	1,40	1,60	1,70
P	0,035	0,035	0,025
S	0,035	0,035	0,015
N	0,012	0,012	0,015
B	-	-	0,005
Cr	-	-	1,50
Cu	0,55	0,55	0,50
Mo	-	-	0,70
Nb	-	-	0,06
Ni	-	-	2,0
Ti	-	-	0,05
V	-	-	0,12
Zr	-	-	0,15

Ο Πίνακας 2.6 δείχνει ότι οι χάλυβες υψηλής αντοχής (S690) αποτελούνται από περισσότερα κραματικά στοιχεία συγκριτικά με έναν κοινό χάλυβα, όπως ο S235. Αυτή η διαφοροποίηση επηρεάζει την συγκολλησιμότητα των χαλύβων η οποία αποδίδεται με την τιμή του ισοδύναμου άνθρακα (Carbon Equivalent Value, CEV) όπως παρουσιάζεται στην Ενότητα 2.4.

2.4 Ισοδύναμο άνθρακα

Το *ισοδύναμο άνθρακα* (Carbon Equivalent Value, CEV) είναι ένα «εργαλείο» που χρησιμοποιείται για να προβλέψει την συγκολλησιμότητα ενός χάλυβα. Οι «εν ψυχρώ» ρηγματώσεις, δηλαδή αυτές που προκύπτουν από το υδρογόνο, και τα χαρακτηριστικά της *Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης* ΘΕΖ (Heat Affected Zone, HAZ) δύναται να υπολογιστούν βάσει του CE (έννοιες οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενες ενότητες). Ακόμη, χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της πρόθεσης της συγκόλλησης να σχηματίσει μαρτενσιτική δομή κατά την ψύξη με αποτέλεσμα την ψαθυρή θραύση. Αναλόγως την τιμή που έχει το CE απαιτείται, ή όχι, η προθέρμανση του υλικού για την αποφυγή ρηγματώσεων. Για παράδειγμα, τιμές του CE κάτω του 0,35 δεν απαιτούν προθέρμανση. Αναλυτικότερα παρουσιάζεται η ανάγκη για προθέρμανση καθώς και η συγκολλησιμότητα στον Πίνακα 2.8 όπως προκύπτουν από την Εξίσωση 2.3 (Alhassan & Bashiru, 2021). Ως προς τις εξισώσεις υπολογισμού του ισοδύναμου άνθρακα, η πρώτη εξίσωση έγινε από τους Dearden και O'Neill, ενώ αργότερα τροποποιήθηκε από το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (International Institute of Welding, IIW) και προέκυψε η Εξίσωση 2.1 (Kasuya, et al., 1995). Έπειτα, αναπτύχθηκε, στην Ιαπωνία, μία ακόμη εξίσωση, η Εξίσωση 2.2, που λαμβάνει υπόψιν της χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα. Επικρατέστερη όλων, όμως, είναι η Εξίσωση 2.3 που θεωρείται ως αυτή που λειτουργεί καλύτερα. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ο πρωταρχικός σκοπός των συγκεκριμένων εξισώσεων είναι η πρόβλεψη της σκληρότητας της ΘΕΖ, ενώ οι υπόλοιπες «λειτουργίες» της προέκυψαν εμπειρικά. Επίσης, οι εξισώσεις δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε υλικά διαφορετικά από αυτά για τα οποία αναπτύχθηκαν (Hakansson, 2002).

$$CE_{IIW}\% = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+V+Mo}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

$$P_{cm}\% = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

$$CET\% = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Carbon	C	= 0.05 to 0.32
Silicon	Si	= max. 0.8
Manganese	Mn	= 0.5 to 1.9
Chromium	Cr	= max. 1.5
Copper	Cu	= max. 0.7
Molybdenum	Mo	= max. 0.75
Niobium	Nb	= max. 0.06
Nickel	Ni	= max. 2.5
Titanium	Ti	= max 0.12
Vanadium	V	= max. 0.18
Boron	B	= max. 0.005

Εικόνα 2.5 Εύρη συγκεντρώσεων (% w/w) για τα οποία εφαρμόζεται και ισχύει η Εξίσωση 2.3 (Hakansson, 2002).

Πίνακας 2.7 Συγκολλησιμότητα και ανάγκη προθέρμανσης χαλύβων, βάσει της τιμής του ισοδύναμου άνθρακα της Εξίσωσης 2.3 (Alhassan & Bashiru, 2021).

Carbon equivalent (CE)	Weldability	Preheating
Up to 0.35	Excellent	Not Necessary
0.36 - 0.40	Very good	Recommended
0.41 - 0.45	Good	Necessary
0.46 - 0.50	Fair	Necessary
0.51 and over	Poor	Necessary

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 3

Θερμικά και μηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου

3.1 Τύποι συγκολλήσεων τόξου

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος συγκόλλησης τόξου είναι η *συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια* (Shielded Metal Arc Welding, SMAW). Κατά την εφαρμογή της χρησιμοποιείται ένα επενδυμένο καταλισκόμενο ηλεκτρόδιο και δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο μεταξύ αυτού και του μετάλλου βάσεως. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την τήξη του μετάλλου δημιουργώντας το λουτρό συγκόλλησης (Παντελής, et al., 2017). Η συγκόλληση μπορεί να επιτυγχάνεται τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα, ωστόσο, κατά κανόνα, συχνότερο είναι το συνεχές ρεύμα ενώ μόνο μερικοί τύποι ηλεκτροδίων ενδείκνυνται για χρήση με εναλλασσόμενο ρεύμα. Το υλικό του πυρήνα του ηλεκτροδίου είναι τέτοιο ώστε να έχει την ίδια ή σχεδόν ίδια χημική σύσταση με αυτή του μετάλλου βάσεως και προστατεύεται εξωτερικά από μία επένδυση. Η επένδυση του ηλεκτροδίου εξασφαλίζει την προστασία του τηγμένου μετάλλου από τις ακαθαρσίες, για την συγκόλληση, του ατμοσφαιρικού αέρα (H_2 , O_2 , N_2) ενώ, παράλληλα, βοηθά και στην περαιτέρω αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης (Διαμαντούδης, 2000). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι τόσο διαδεδομένη λόγω της ευελιξίας χρήσης, του χαμηλού κόστους και της δυνατότητας μεταφοράς της δίνοντας της κυρίαρχη θέση στην βιομηχανία (Παντελής, et al., 2017) (Jenney & O'Brien, 2001).

Μία εξίσου γνωστή μέθοδος συγκόλλησης είναι και η συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου ή *συγκόλληση τόξου με προστατευτικό αέριο* (Gas Metal Arc Welding, GMAW). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ημιαυτόματη και είχε ως πρωταρχικό της σκοπό την συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου με την χρήση αδρανών αερίων (Ar, He) ως προστατευτικό μέσο και για τον λόγο αυτό ονομαζόταν MIG (Metal Inert Gas). Αργότερα εξελίχθηκε και επετράπη η χρήση της και για την συγκόλληση άλλων

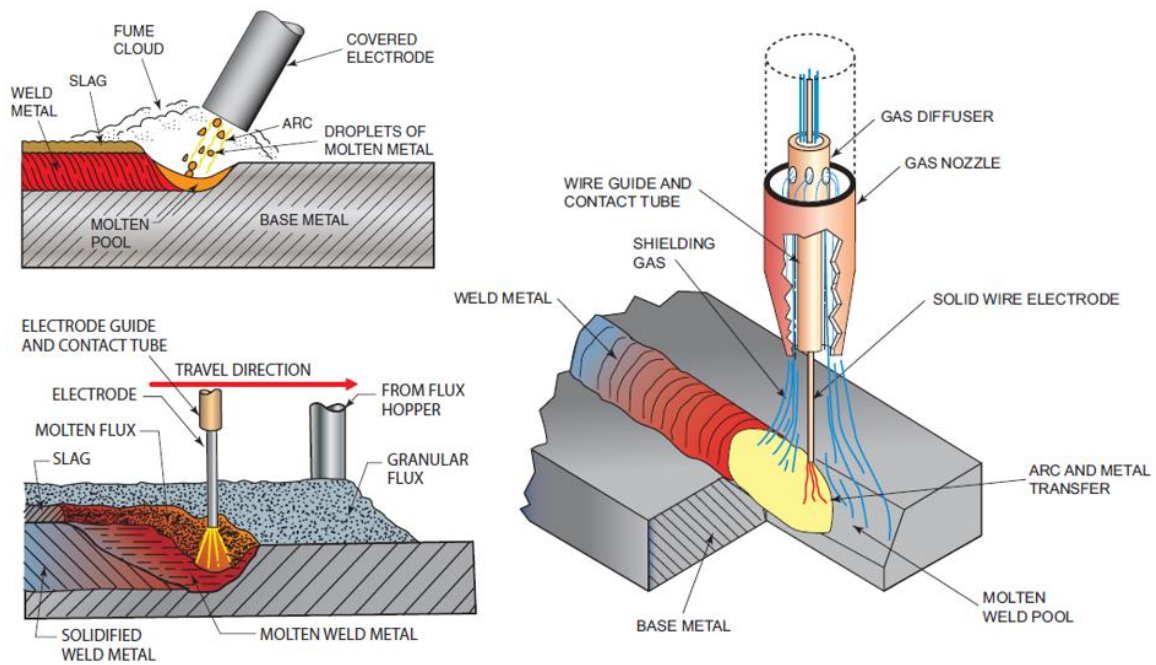
μετάλλων, όπως ο χάλυβας, με ενεργά αέρια (κυρίως CO₂), με την ονομασία MAG (Metal Active Gas). Στην συγκεκριμένη διαδικασία το ηλεκτρόδιο, υπό την μορφή τηκόμενου σύρματος, έχει ταυτόχρονα τον ρόλο του υλικού πλήρωσης. Κατά την συγκόλληση το συνεχές ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα και μέσω ενός ακροφυσίου παρέχεται και το προστατευτικό αέριο. Επίσης, χρησιμοποιούνται μηχανές συγκόλλησης σταθερής τάσης και συνεχούς, εναλλασσόμενου ή παλλόμενου συνεχούς ρεύματος, ανάλογα την εφαρμογή. Η GMAW έχει υψηλούς ρυθμούς παραγωγής χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη εμπειρία από τον χειριστή ωστόσο είναι λιγότερο οικονομική από την SMAW και δεν ενδείκνυται για χρήση σε εξωτερικούς χώρους (Παντελής, et al., 2017) (Jenney & O'Brien, 2001).

Η *συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου* (Submerged Arc Welding, SAW) είναι αυτοματοποιημένη μέθοδος υψηλής παραγωγικότητας. Η θερμότητα τήξης παράγεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά τόξα, που δημιουργούνται μεταξύ ενός ή περισσότερων ηλεκτροδίων και του προς συγκόλληση μετάλλου. Το ηλεκτρικό τόξο και η λίμνη συγκόλλησης προστατεύονται από στρώμα τηγμένης σκωρίας και ένα στρώμα εύτηκτου κοκκώδους υλικού (σκόνη βόρακα, flux). Το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο σε μορφή σύρματος και τήκεται τόσο με την χρήση συνεχούς όσο και με την χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος. Η μέθοδος αυτή έχει ευρύτατο πεδίο εφαρμογών ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για επίπεδες συγκολλήσεις (Παντελής, et al., 2017) (Jenney & O'Brien, 2001).

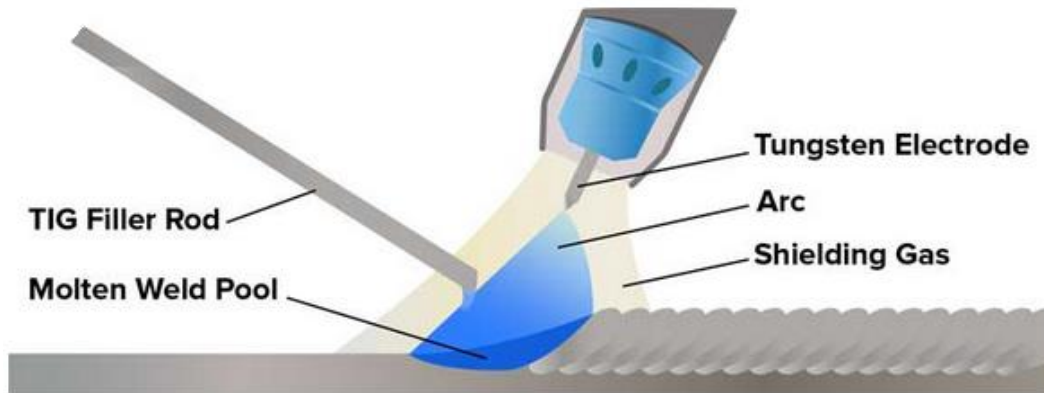
Η *συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου* (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) είναι μία μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιεί μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου, καθώς επίσης και προστατευτικό αέριο όπως και η GMAW. Είναι επίσης γνωστή και ως TIG (Tungsten Inert Gas). Κατά την εκτέλεση της μεθόδου GTAW μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποιο υλικό πλήρωσης υπό την μορφή ράβδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι υψηλής ακρίβειας και μπορεί να προσφέρει συγκολλήσεις υψηλής ποιότητας καθώς μπορεί να ελέγχεται ξεχωριστά η θερμότητα του τόξου από την προσθήκη υλικού πλήρωσης. Αυτό την καθιστά κατάλληλη μέθοδο και για την συγκόλληση ελασμάτων πολύ μικρού πάχους. Ωστόσο, απαιτείται μεγάλο γνωστικό

επίπεδο από την μεριά του χειριστή ενώ πρόκειται και για μία αρκετά ακριβή μέθοδο με εξοπλισμό δύσκολο στην μεταφορά (Παντελής, et al., 2017) (Jenney & O'Brien, 2001).

Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου συγκόλλησης εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων. Πρέπει πάντοτε να λαμβάνονται υπόψιν οι συνθήκες και οι απαιτήσεις της συγκόλλησης, η κατάρτιση και η εμπειρία των χειριστών και φυσικά το κόστος της χρήσης κάθε μεθόδου.



Εικόνα 3.1 Μέθοδοι συγκόλλησης τόξου: α), SMAW, β) GMAW και γ) SAW.



Εικόνα 3.2 Η μέθοδος συγκόλλησης GTAW.

3.2 Θερμικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου

3.2.1 Μεταφορά θερμότητας

Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης επικρατούν έντονα θερμικά φορτία τα οποία οδηγούν στην απότομη θέρμανση και, τελικά, τήξη του μετάλλου προς συγκόλληση. Επίσης, οι θερμοκρασιακές μεταβολές συναρτήσει του χρόνου, δηλαδή ο θερμικός κύκλος της συγκόλλησης, επηρεάζουν της μηχανικές ιδιότητες του υλικού, την μικροδομή του και, ακόμη, επηρεάζουν τις παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις της τελικής κατασκευής. Εξαιτίας των παραπάνω απαιτείται η εκτενής μελέτη της μετάδοσης θερμότητας του υλικού καθώς αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα που εξαρτάται από τον χρόνο και τα αποτελέσματα της είναι μείζονος σημασίας για το τελικό προϊόν (Jenney & O'Brien, 2001).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η συγκόλληση προκαλεί έντονα θερμικά φαινόμενα τα οποία θερμαίνουν σημαντικά τα συγκολλούμενα μέταλλα, τήκοντας τα τοπικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην παραμένει σταθερή η θερμοκρασία του υλικού σε όλο το εύρος του. Τελικά, εμφανίζονται φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας τόσο εντός του υλικού όσο και μεταξύ αυτού και του περιβάλλοντος. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που εμφανίζονται κατά τις συγκολλήσεις είναι οι εξής τρεις (Νίκας & Παπάζογλου, 2010):

- Αγωγιμότητα ή αγωγή,
- Συναγωγιμότητα ή συναγωγή,
- Ακτινοβολία

Θερμική αγωγιμότητα (Thermal Conduction) ονομάζεται ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μία άλλη χαμηλότερης, μέσω ενός μέσου, υπό την προϋπόθεση της φυσικής επαφής.

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

$$q'' = -k\nabla T \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

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

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

$$c\rho \frac{\nabla T}{\nabla t} = \frac{d}{dx} \left(k_x \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy} \left(k_y \frac{dT}{dy}\right) + \frac{d}{dz} \left(k_z \frac{dT}{dz}\right) + Q \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Όπου, c η ειδική θερμότητα, ρ η πυκνότητα του υλικού, Q η θερμότητα που παράγεται σε μια στοιχειώδη περιοχή και t ο χρόνος.

Εάν υποθέσουμε πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k παραμένει σταθερός, τότε η εξίσωση (3.2) μετασχηματίζεται στη μορφή:

$$\frac{\nabla T}{\nabla t} = a \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2}\right) + Q \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Στη διαφορική εξίσωση θερμικής αγωγιμότητας (3.3), υποθέτουμε στατική, ιστροπική συμπεριφορά στερεού και σταθερή αγωγιμότητα k . Η λύση της εξίσωσης εξαρτάται άμεσα από τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες.

Θερμική συναγωγιμότητα (Thermal Convection) ονομάζεται ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός ρευστού και είναι ένας συνδυασμός αγωγιμότητας και κίνησης του ρευστού. Όταν άγεται θερμότητα σε στατικό ρευστό προκαλείται ογκομετρική διαστολή λόγω της μεταβολής της πυκνότητας του. Το διεσταλμένο ρευστό, υπό την επίδραση της βαρύτητας και των δυνάμεων άνωσης, κινείται μεταφέροντας με αυτόν τον τρόπο θερμότητα. Η κίνηση του ρευστού και η μεταφορά θερμότητας στα, αρχικά, στατικά ρευστά, ονομάζεται *ελεύθερη συναγωγιμότητα*.

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

$$q_h'' = h_f(T - T_\infty) \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

Όπου, h_f ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, T η θερμοκρασία του σώματος και T_∞ η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Θερμική ακτινοβολία (Thermal Radiation) ονομάζεται το φαινόμενο της ροής θερμότητας από την ύλη, μέσω του χώρου ή του κενού, υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην θερμοκρασία της ύλης και είναι αποτέλεσμα των μεταβολών στην ηλεκτρονική διάταξη των ατόμων και των μορίων.

Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, είναι η ακόλουθη:

$$q_{rad}'' = \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

Όπου, ε η διαχυτότητα, σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, T η θερμοκρασία του σώματος και T_∞ η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.2.2 Θερμικές ιδιότητες των υλικών

Οι φυσικές, και εν προκειμένω οι θερμικές, ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία. Από την έναρξη της συγκόλλησης μέχρι και το πέρας της και τελικά την ψύξη της μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι ιδιότητες αυτές μεταβάλλονται και με την σειρά τους μεταβάλλουν τις παραμένουσες τάσεις και τις παραμορφώσεις της τελικής κατασκευής. Ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα είναι κάποια από τα μεγέθη που είναι σημαντικό να γνωρίζουμε κατά την συγκόλληση και ιδιαίτερα κατά τις προσομοιώσεις αυτών (Jenney & O'Brien, 2001).

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον βαθμό επίδρασης των διαφόρων θερμικά εξαρτώμενων ιδιοτήτων των υλικών. Ερευνητές όπως οι (Daniyan, et al., 2019) έχουν συμπεράνει πως η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα και η θερμική διαστολή είναι απαραίτητες παράμετροι κατά την προσομοίωση συγκολλήσεων χάλυβα. Ακόμη, οι (Armentani, et al., 2007) συμπεραίνουν πως για την 2D μη γραμμική θερμική και θερμομηχανική ανάλυση μέσω προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων, θερμικές ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα είναι απαραίτητες.

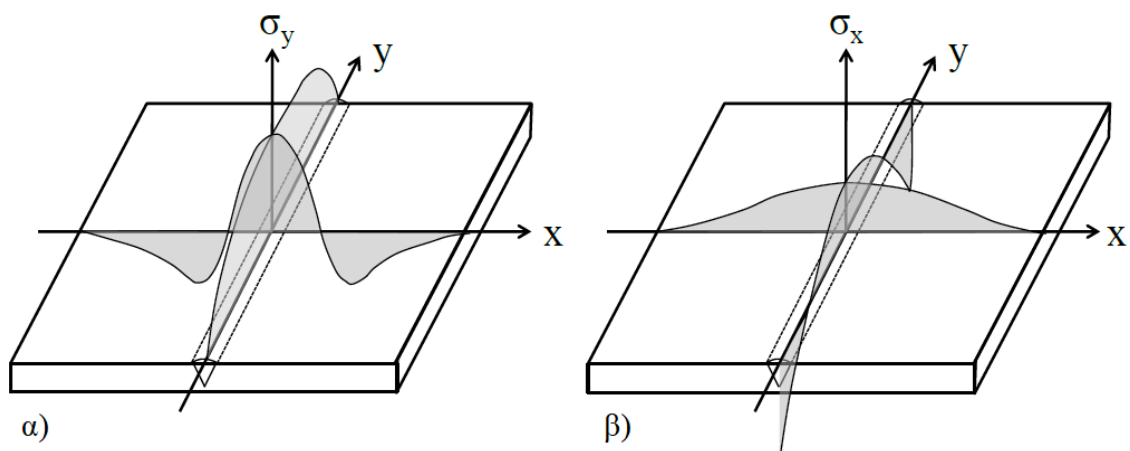
3.3 Μηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου

Στις συγκολλητές κατασκευές, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λαμβάνουν χώρα σημαντικά θερμικά φαινόμενα τα οποία ευνοούν την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων και, εν συνεχεία, παραμορφώσεων. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις παραμένουν ακόμη και μετά το πέρας της συγκόλλησης και της ψύξης στην θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζοντας την μηχανική συμπεριφορά της. Οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε μία συγκολλητή κατασκευή πρέπει οπωσδήποτε να ελέγχονται. Σε διαφορετική περίπτωση μπορούν να οδηγήσουν σε διαστατικές μεταβολές, εκτός των ανοχών που ορίζει ο κατασκευαστής με πιθανότητα ακόμη και την αστοχία της τελικής κατασκευής. Οι παραμένουσες τάσεις (Εικόνα 3.3), δηλαδή οι τάσεις που επιδρούν σε ένα σώμα μετά την απομάκρυνση των εξωτερικών φορτίων, επηρεάζουν περαιτέρω την μηχανική

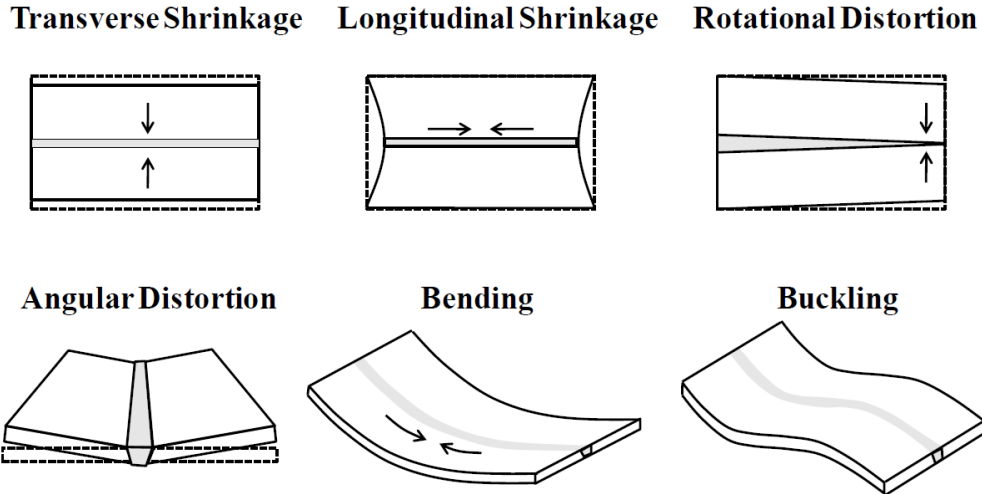
συμπεριφορά του υλικού με την ανάπτυξη ρηγματώσεων ή την μείωση της αντοχής σε λυγισμό (Παντελής, et al., 2017).

Γενικά οι παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις (Εικόνα 3.4) μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες (Παντελής, et al., 2017):

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

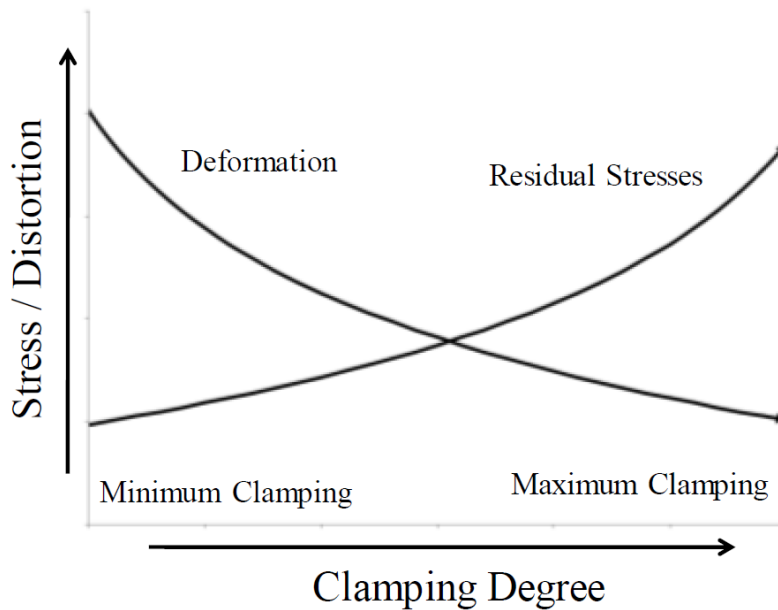


Εικόνα 3.3 Παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις.



Εικόνα 3.4 Παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις.

Σε πρακτικό επίπεδο, οι παραμένουσες τάσεις και οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις συγκολλήσεις είναι, ίσως, το σημαντικότερο ζήτημα που απαιτεί λύση. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.5 οι δύο αυτές έννοιες σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους καθώς η μείωση της μίας επιφέρει την αύξηση της άλλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός πριν την υλοποίηση μιας κατασκευής για την εύρεση του βέλτιστου σημείου συσχέτισης των δύο εννοιών.



Εικόνα 3.5 Σχέση παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων ανάλογα τον βαθμό πάκτωσης (Bernhardt, et al., 2016).

3.4 Συνδυασμένα θερμομηχανικά φαινόμενα στις συγκολλήσεις τόξου

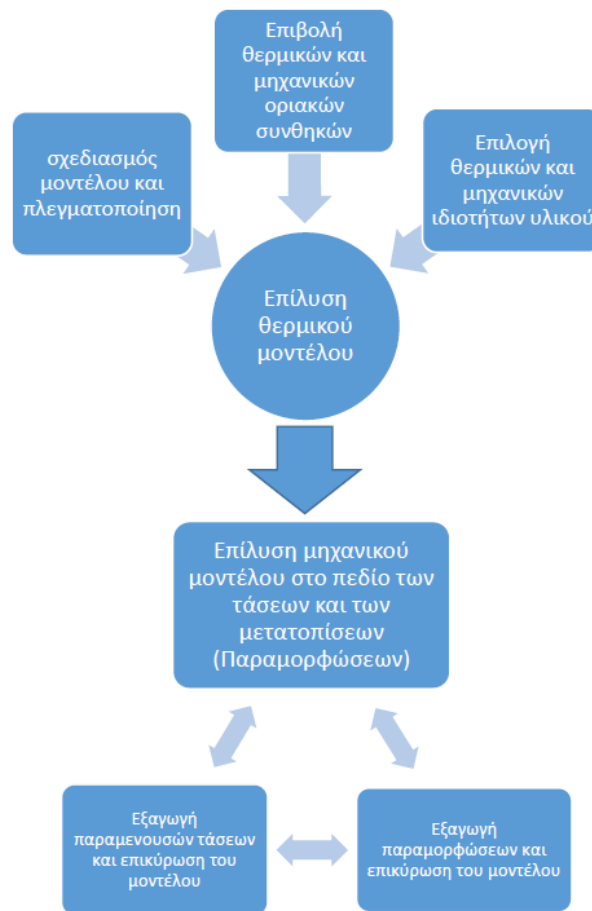
Σύμφωνα με τον (Ναντέρ, 2020), οι θερμικές και οι μηχανικές ιδιότητες είναι μη γραμμικές κατά την εξέλιξη της συγκόλλησης. Κατά την θέρμανση και τη ψύξη το υλικό υπόκειται σε αλλαγές φάσης, τήκεται όταν το ηλεκτρόδιο εφαρμόσει θερμικό φορτίο και στερεοποιείται πάλι μετά από κάποια ώρα. Το όριο διαρροής του υλικού μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του φαινομένου και όταν επανέλθει στην αρχική θερμοκρασία παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων γύρω και μέσα στη ζώνη τήξης. Ακόμη, αναπτύσσονται μετατοπίσεις λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στις επιφάνειες του υλικού και του τρόπου συγκράτησης.

Στην [Εικόνα 3.6](#) παρουσιάζεται η αλληλουχία των βημάτων κατά την σχεδίαση ενός θερμομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης συγκόλλησης τόξου. Οι είσοδοι του μηχανικού μοντέλου είναι η έξοδος των θερμοκρασιών της επίλυσης του θερμικού μοντέλου. Εκτός των θερμικών παραμορφώσεων, η είσοδος του υλικού στη πλαστική περιοχή, κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας, συνεισφέρει σημαντικά στη διαμόρφωση των τελικών μετατοπίσεων και των παραμενουσών τάσεων. Μία μη ρεαλιστική απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου θα αποτυπωνόταν στο μηχανικό μέρος.

Η μέθοδος επίλυσης που επιλέχθηκε στη παρούσα μελέτη διακρίνεται σε δύο βασικά μέρη, όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 3.6](#), το θερμικό και το μηχανικό. Στην πραγματικότητα, τα δύο αυτά πεδία εξελίσσονται ταυτόχρονα στη διαδικασία της συγκόλλησης αλλά αυτή η μέθοδος διαχωρισμού απλουστεύει το πρόβλημα, ενώ παράλληλα διευκολύνει στον ευκολότερο εντοπισμό των αιτιών των σφαλμάτων της προσομοίωσης, αφού η έντονη αλληλεξάρτηση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων του υλικού δημιουργεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα.

3.5 Μοντελοποίηση της συγκόλλησης

Η προσομοίωση συγκολλήσεων χαλύβων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών για δεκαετίες. Πρωτοπόρος ήταν ο (Rosenthal, 1946) που ανέπτυξε τις ομώνυμες εξισώσεις που περιγράφουν την ροή θερμότητα σημειακής πηγής θέτοντας τα θεμέλια για τις προσομοιώσεις των συγκολλήσεων. Βέβαια, η μελέτη του αποτελείται από πληθώρα παραδοχών με αποτέλεσμα να μην αποτελεί πολύ καλή – πιστή λύση ως προς τα πραγματικά φαινόμενα κατά την διάρκεια μιας συγκόλλησης.



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα ροής του θερμομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης (Ναντέρ, 2020).

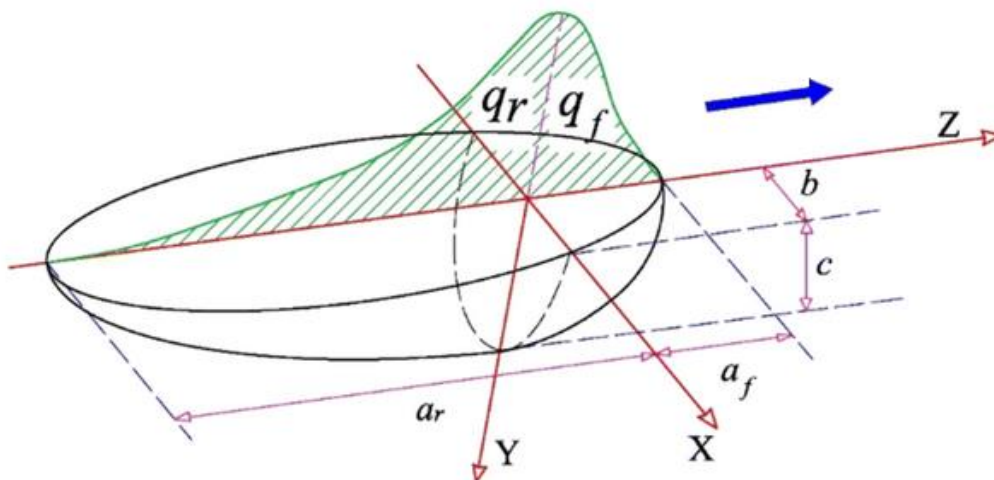
Σύμφωνα με τον (Ναντέρ, 2020), η πρώτη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης των φαινομένων που εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης έγινε από τον Friedman, ο οποίος ανέπτυξε ένα θερμομηχανικό μοντέλο για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών κατανομών και της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων. Οι Muraki, Bryan και Masubuchi ανέπτυξαν υπολογιστικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, που λάμβαναν υπόψιν την ελαστο-πλαστική συμπεριφορά του υλικού, με σκοπό τον προσδιορισμό των θερμικών παραμορφώσεων και της κίνησης του μετάλλου. Αργότερα, οι Papazoglou και Masubuchi ανέπτυξαν μια τεχνική στην οποία περιέγραφαν τις κατανομές των θερμοκρασιών, των θερμικών παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων με πεπερασμένα στοιχεία, συμπεριλαμβάνοντας και τις αλλαγές φάσης του υλικού. Τέλος, οι Islam και Bujk ανέπτυξαν ένα συνδυαστικό μοντέλο προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία και γενετικούς αλγορίθμους για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται μετά τη συγκόλληση.

3.5.1 Μοντελοποίηση του τόξου συγκόλλησης

Το σημαντικότερο ζήτημα που έχει απασχολήσει και συνεχίζει να απασχολεί την ερευνητική κοινότητα, όσον αφορά την μοντελοποίηση της θερμικής πηγής, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν το ποσό θερμότητας που αποδίδεται στη συγκολλητή κατασκευή από το ηλεκτρικό τόξο. Οι (Goldak, et al., 1984) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για θερμική πηγή συγκόλλησης, με βάση την κατανομή Γκάους. Έπειτα από τον έλεγχο διάφορων μοντέλων, όπως για παράδειγμα το σφαιρικό, κατέληξαν στο μοντέλο διπλής ελλειψοειδούς κατανομής θερμότητας (Εικόνα 3.7) προσδιορίζοντας έτσι το μέγεθος και το σχήμα της πηγής, καθώς και την κατανομή αυτής κατά το πάχος του ελάσματος (Ναντέρ, 2020). Σύμφωνα με τον (Ναντέρ, 2020), ο Paulo Roberto de Freitas Teixeira εξέτασε παραμετρικά την εφαρμογή της κατανομής θερμικής πηγής τύπου Γκάους για συγκόλληση TIG εξετάζοντας την επίδραση του πάχους των ελασμάτων και της ακτίνας του τόξου. Ο Hashemzadeh έκανε μια συγκριτική μελέτη μεταξύ τριών διαφορετικών μοντέλων θερμικής πηγής, της επιφανειακής κατανομής Γκάους, του ημι-ελλειψοειδούς μοντέλου του Goldak και του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου του Goldak σε συγκολλήσεις τόξου με αέριο (GMAW) και σε συγκόλληση με laser σε λεπτό έλασμα

ανοξειδωτου χάλυβα 304. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ρεαλιστικά για τα δύο μοντέλα του Goldak σε συγκολλήσεις τύπου laser και GMAW.

Για τη μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας, αρκετοί ερευνητές βασίστηκαν στο διπλό ελλειψοειδές μοντέλο (Εικόνα 3.7) που προτάθηκε από τους (Goldak, et al., 1984), και στην συνέχεια εξέλιξαν άλλοι ερευνητές. Η διπλή ελλειψοειδής γεωμετρία χρησιμοποιείται ώστε το σχήμα και το μέγεθος της πηγής θερμότητας να μπορεί να μεταβάλλεται εύκολα, αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κι έτσι να είναι δυνατή η μοντελοποίηση τόσο των διαδικασιών συγκόλλησης τόξου με ρηχή διείσδυση, όσο και αυτών με βαθύτερη διείσδυση, όπως είναι οι συγκολλήσεις με δέσμη λέιζερ ή δέσμες ηλεκτρονίων. Η κατανομή της ισχύος ή της ροής θερμότητας είναι γενικής μορφής Gauss κατά μήκος των διαμηκών αξόνων. Το μπροστινό μισό της πηγής είναι το ένα τεταρτημόριο μιας ελλειψοειδούς πηγής ενώ το πίσω μισό είναι το τεταρτημόριο μιας άλλης ελλειψοειδούς πηγής. Τέσσερα χαρακτηριστικά μήκη πρέπει να καθοριστούν, τα οποία από φυσικής άποψης αντιστοιχούν στις ακτινικές διαστάσεις της ζώνης τήξης. Αν η κάθετη τομή της ζώνης τήξης είναι γνωστή από τα πειράματα, τα δεδομένα της τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστούν οι διαστάσεις της πηγής θερμότητας. Αν δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα, οι (Goldak, et al., 1984), προτείνουν σαν λογική εκτίμηση τη λήψη της διάστασης μπροστά από την πηγή ίση με το μισό του πλάτους συγκόλλησης και την απόσταση πίσω από την πηγή ίση με το διπλάσιο του πλάτους συγκόλλησης.



Εικόνα 3.7 Μοντέλο διπλής ελλειψοειδούς πηγής θερμότητας του Goldak.

3.5.2 Μοντελοποίηση των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων

Ανά τα χρόνια, πολλοί ερευνητές αφιέρωσαν χρόνο στην εύρεση διαφόρων μεθόδων ελέγχου και πρόβλεψης των παραμενουσών τάσεων και των παραμορφώσεων. Οι (Michaleris & DeBiccarì, 1997) ανέπτυξαν ένα νέο μοντέλο πρόβλεψης παραμορφώσεων συνδυάζοντας 2D ανάλυση της συγκόλλησης και 3D μηχανική ανάλυση για χρήση στην κατασκευή πλοίων. Τα αποτελέσματα της έρευνας ασχολούνται κυρίως με την αντοχή σε λυγισμό με την δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε διάφορα στάδια της κατασκευής. Οι (Teng, et al., 2001) χρησιμοποίησαν πεπερασμένα στοιχεία για να κάνουν μία θερμική ελαστο-πλαστική ανάλυση για την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων σε συγκολλήσεις τύπου ταφ. Ακόμη, για την εναπόθεση υλικού πλήρωσης χρησιμοποίησαν την μέθοδο element birth and death ενώ λαμβάνουν υπόψιν τους και άλλες μεταβλητές όπως το πάχος των ελασμάτων. Οι (Chen & Hashemzadeh, 2014) προσομοίωσαν συγκολλήσεις με την μέθοδο TIG σε ελάσματα χάλυβα χρησιμοποιώντας ένα αποδοτικό 3D μοντέλο τόσο σε θερμικό όσο και σε μηχανικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα τους βρέθηκαν σύμφωνα με τα αντίστοιχα πειραματικά. Οι (Jiang, et al., 2005) έκαναν μελέτη συγκόλλησης τόσο σε ελάσματα όσο και σε αγωγούς. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τους έλαβαν υπόψιν παραμέτρους όπως η κινούμενη πηγή θερμότητας, η εναπόθεση υλικού πλήρωσης, θερμικά εξαρτώμενες ιδιότητες υλικού και τελικά τα αποτελέσματα τους ήρθαν σε συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά, επιτρέποντας την εφαρμογή της μεθόδου σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες και συγκολλήσεις. Οι (Tikhomirov, et al., 2005) εφάρμοσαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα για την αποφυγή πληθώρας ακριβών πειραμάτων. Με την κατάλληλη προετοιμασία των μοντέλων και των διαφόρων παραμέτρων αυτά θεωρούνται κατάλληλα για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι (Nodeh, et al., 2008) εφάρμοσαν ένα θερμομηχανικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψιν του και τα ηλεκτρικά φαινόμενα κατά την διαδικασία συγκόλλησης αντίστασης. Το μοντέλο τους λαμβάνει υπόψιν τις θερμικά εξαρτώμενες ιδιότητες του υλικού αλλά και τις παραμέτρους συγκόλλησης όπως τον χρόνο της συγκόλλησης αποδίδοντας αποτελέσματα σύμφωνα με τα αντίστοιχα πειραματικά, με τις παραμενουσες τάσεις να μετρούνται μέσω ακτινών X.

Σύμφωνα με τον (Ναντέρ, 2020), ο Lingdren εξέδωσε μία ανάλυση τριών μερών που ασχολήθηκε με τη καταγραφή μεγάλου τμήματος της ερευνητικής δουλειάς που έχει γίνει γύρω από το θέμα της προσομοίωσης συγκολλήσεων. Στο πρώτο μέρος ανέλυσε την μετάβαση από την πιο απλή δυσδιάστατη γεωμετρία συγκολλήσεων σε πιο περίπλοκες αλλά ρεαλιστικές τρισδιάστατες απεικονίσεις και τις σχέσεις αλληλεξάρτησης μεταξύ του θερμικού, του μηχανικού και του μεταλλουργικού πεδίου και της μικροδομής του υλικού. Στο δεύτερο μέρος ασχολήθηκε με την εξέλιξη στη μοντελοποίηση του υλικού συγκόλλησης και συνέχισε με την ανάλυση των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου και στην ελαστο-πλαστική περιοχή. Στο τρίτο μέρος, εξετάζει μεθόδους αριθμητικής βελτιστοποίησης της προσομοίωσης συγκόλλησης μετάλλων και αναλύει τους τρόπους επαλήθευσης των αποτελεσμάτων με το πραγματικό μοντέλο.

[κενή σελίδα]

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη μοντέλου συγκόλλησης κατασκευαστικού χάλυβα

4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στο να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές θερμομηχανικές ιδιότητες των διαφόρων ποιοτήτων κατασκευαστικού χάλυβα (S235, S355 και S690) στις παραμένουσες τάσεις καθώς και στις παραμορφώσεις που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων. Τα παραπάνω θα συμβούν στα πλαίσια προσομοιώσεων και για τον λόγο αυτό απαιτείται η εξακρίβωση των μέσων προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, υλοποιείται και εκτελείται προσομοίωση συγκόλλησης για κατασκευαστικό χάλυβα S355 από την οποία αντλούνται αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων τα οποία έπειτα συγκρίνονται και επιβεβαιώνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση πειράματος με τις ίδιες συνθήκες με αυτές της προσομοίωσης. Τελικά, η επιβεβαίωση αυτών θα επιτρέψει την εκτέλεση αντίστοιχων προσομοιώσεων και για τους υπόλοιπους χάλυβες, όπως θα παρουσιαστεί στο [Κεφάλαιο 5](#).

4.2 Πειράματα και μετρήσεις

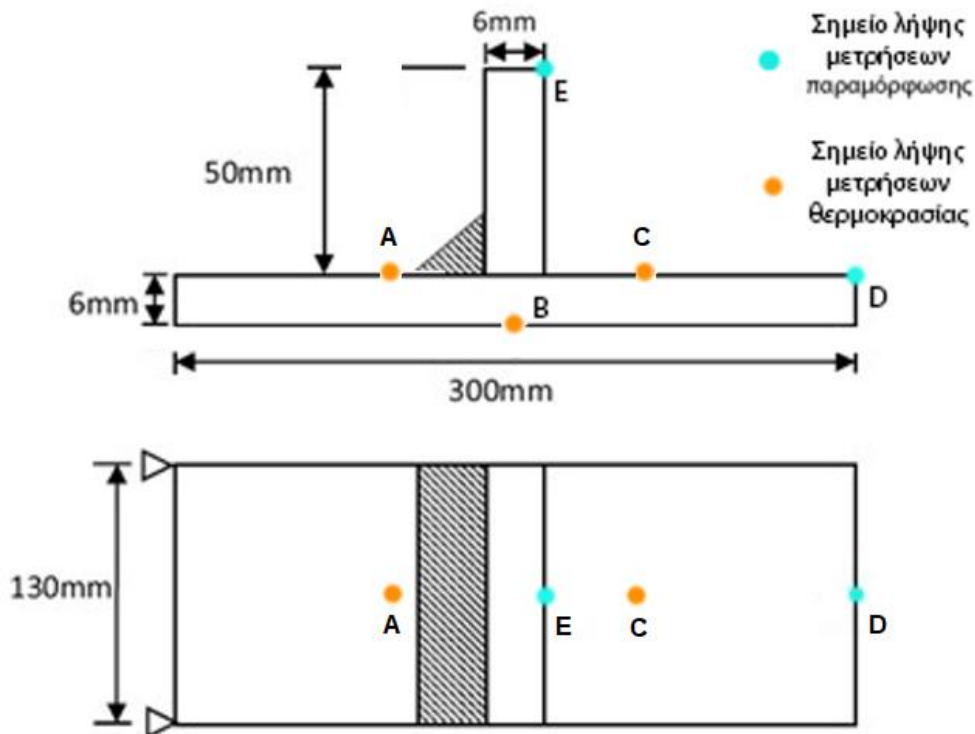
Για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκαν κατάλληλα ελάσματα από κατασκευαστικό χάλυβα ποιότητας S355 με σκοπό, στην τελική τους μορφή, να δημιουργούν μια συγκόλληση τύπου T (T-joint). Η συγκόλληση εκτελείται με την μέθοδο συγκόλλησης τόξου συμπαγούς σύρματος και προστατευτικού αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW). Τόσο το έλασμα βάσης (base plate) όσο και το κάθετο έλασμα σε αυτήν (web) έχουν πάχος 6mm. Το ύψος του κάθετου ελάσματος είναι 50mm, το πλάτος του ελάσματος βάσης 300mm, ενώ το μήκος και των δύο είναι κοινό, στα 130mm. Τα παραπάνω φαίνονται και στην [Εικόνα 4.1](#). Το έλασμα βάσης συγκρατείται από την μία

πλευρά ώστε να παραμένει πακτωμένο καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Τέλος, η συγκόλληση γίνεται από την μία πλευρά του σχηματιζόμενου T και συγκεκριμένα από αυτή που βρίσκεται και η πάκτωση.

Για την εκτέλεση των συγκολλήσεων, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή συγκόλλησης τύπου/μεθόδου GMAW (Εικόνα 4.2) του Εργαστηρίου Συγκολλήσεων, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Οι παράμετροι συγκόλλησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε το M21 κατά EN ISO 14175 προστατευτικό αέριο (μίγμα 80% Ar – 20% CO₂) και το G3Si1 κατά EN ISO 14341-A συμπαγές σύρμα συγκόλλησης πάχους 1mm.

Πίνακας 4.1 Παράμετροι συγκόλλησης.

Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (mm/s)	Leg length (mm)
30	290	8.3	6



Εικόνα 4.1 Διαστάσεις, πακτώσεις και σημεία μέτρησης συγκόλλησης τύπου T.



Εικόνα 4.2 Η χρησιμοποιούμενη μηχανή συγκόλλησης.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα πειραματικά, καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των συγκολλήσεων, υπήρξε καταγραφή των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, με χρήση θερμοστοιχείων τύπου K, στα σημεία A και B, ενώ με το πέρας και την πλήρη ψύξη των δοκιμίων, υπήρξε μέτρηση των γωνιακών παραμορφώσεων των δοκιμίων με χρήση μετρητικών ορολογίων, στην εγκάρσια διεύθυνση της συγκόλλησης και συγκεκριμένα στο μέσο του μήκους, δηλαδή τα 65mm.



Εικόνα 4.3 Άποψη της πειραματικής διαδικασίας.

4.3 Μοντελοποίηση συγκόλλησης κατασκευαστικού χάλυβα

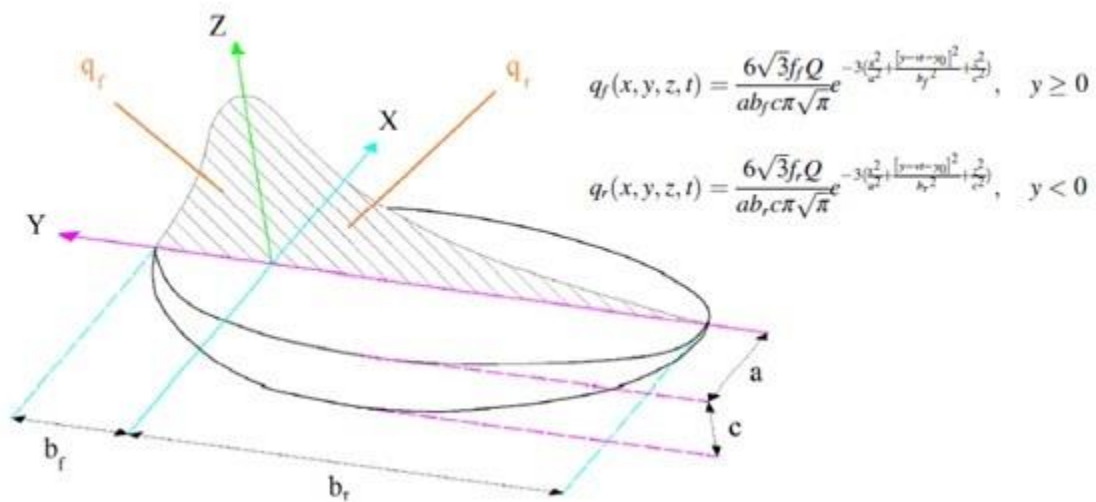
4.3.1 Θερμική ανάλυση

Η θερμική ανάλυση είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών φαινομένων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Αυτά τα φαινόμενα περιγράφονται ως συναρτήσεις του χρόνου (t) και των χωρικών συντεταγμένων (x, y, z) και περιγράφονται από την εξίσωση μη γραμμικής μετάδοσης θερμότητας (βλ. Εξίσωση 4.1).

$$Cp \frac{\partial T}{\partial x^2} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \text{Εξίσωση 4.1}$$

Στην Εξίσωση 4.1, οι μεταβλητές C , ρ , T , t , Q και k περιγράφουν την θερμοχωρητικότητα σε $J/kg^{\circ}C$, την πυκνότητα σε kg/m^3 , την θερμοκρασία σε $^{\circ}C$, τον χρόνο σε sec , την ροή θερμότητας σε W/m^3 και, τέλος, την θερμική αγωγιμότητα σε $W/m^{\circ}C$.

Σημαντικό βήμα στην θερμική ανάλυση των προσομοιώσεων συγκολλήσεων αποτελεί και η μοντελοποίηση της πηγής θερμότητας. Στην βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα διαφορετικών μοντέλων, ωστόσο η παρούσα μελέτη βασίζεται στο διπλό ελλειψοειδές, που προτάθηκε από τους (Goldak, et al., 1984). Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4, όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το ηλεκτρικό τόξο στο μέταλλο βάσης και στο υλικό πλήρωσης.



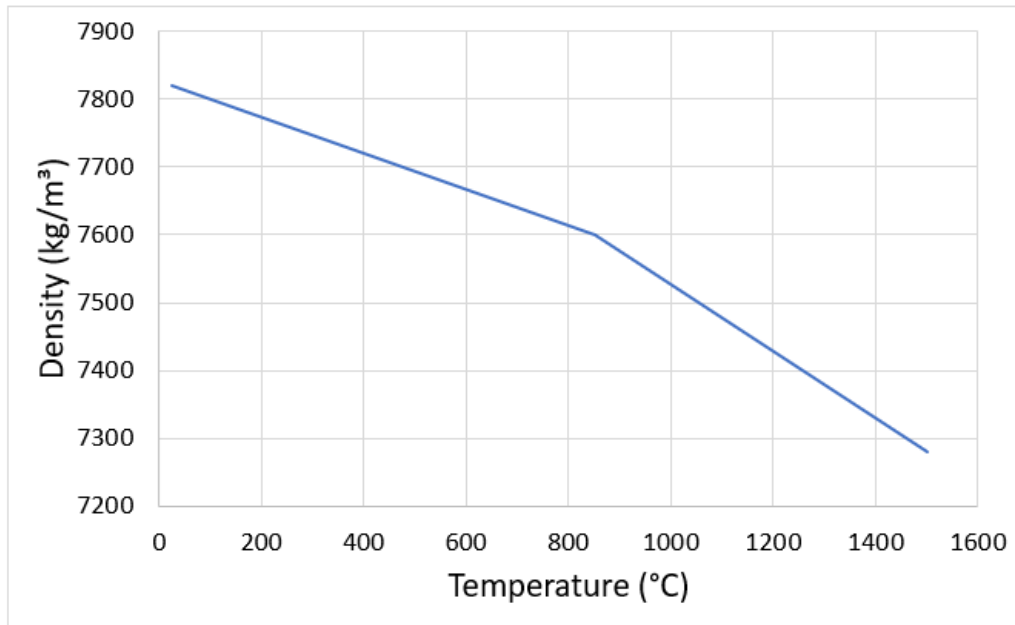
Εικόνα 4.4 Σχηματική απεικόνιση του διπλού ελλειψοειδούς μοντέλου θερμικής πηγής (Ghafouri, et al., 2022).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4 το μαθηματικό μοντέλο ορίζει δύο κατανομές ροής θερμότητας, μία για το εμπρός μισό τμήμα και μία για το πίσω, όπως περιγράφονται και από τις εξισώσεις q_f και q_r , αντίστοιχα, του σχήματος. Ως προς τις εξισώσεις, η μεταβλητή Q περιγράφει την ενέργεια του ηλεκτρικού τόξου και υπολογίζεται ως το γινόμενο της τάσης V , της έντασης ρεύματος I και του συντελεστή απόδοσης της μεθόδου συγκόλλησης η . Έπειτα, οι μεταβλητές a , b_f , b_r και c αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη – διαστάσεις της θερμικής πηγής. Οι αδιάστατες μεταβλητές f_f και f_r περιγράφουν το μέρος της ενέργειας που αποδίδεται στο εμπρός και πίσω τμήμα της θερμικής πηγής, αντίστοιχα. Οι μεταβλητές f_f και f_r συνδέονται μεταξύ τους με την παρακάτω σχέση (Εξίσωση 4.2):

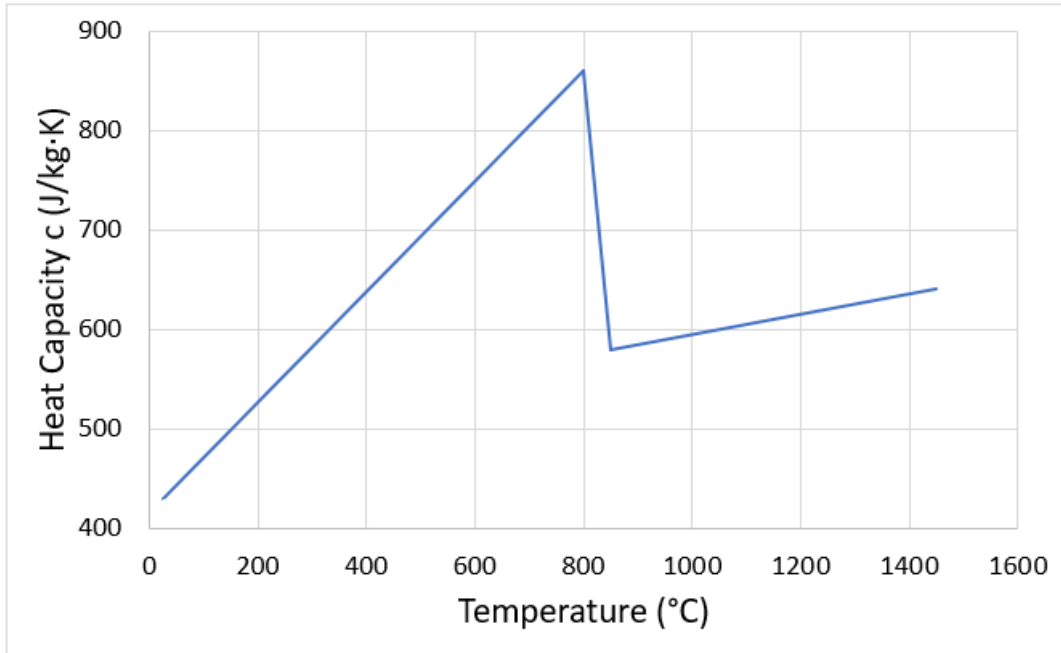
$$f_r + f_f = 2$$

Εξίσωση 4.2

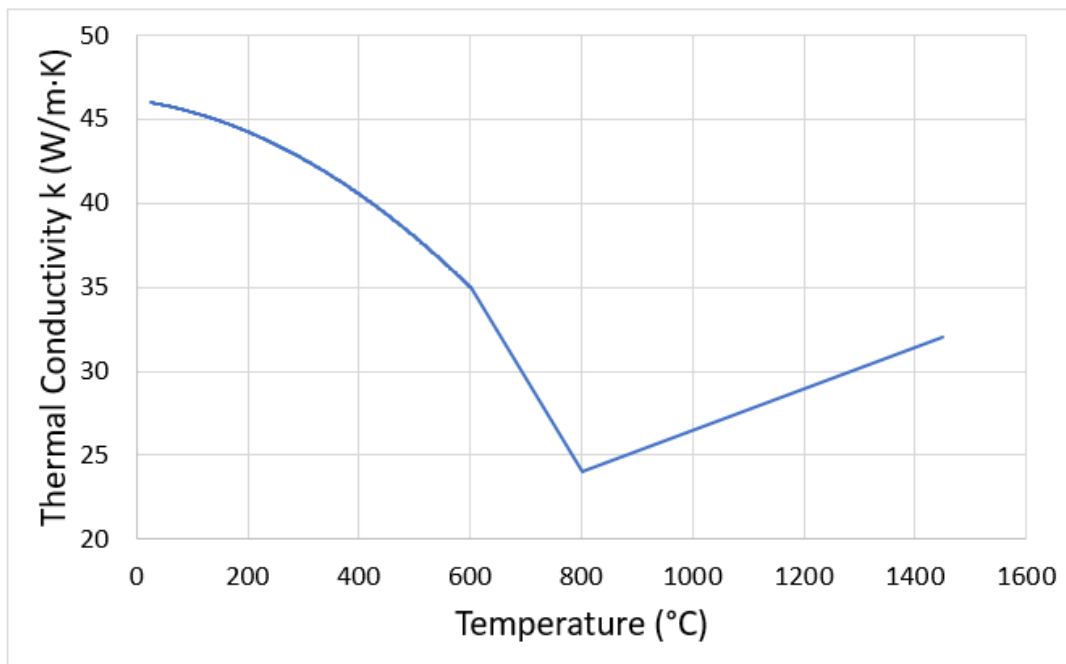
Επιστρέφοντας στην [Εξίσωση 4.1](#), φαίνεται ότι η πυκνότητα (density), η θερμοχωρητικότητα (heat capacity) και η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity), δηλαδή οι θερμικές ιδιότητες του υλικού, είναι απαραίτητες για την θερμική ανάλυση. Για τον χάλυβα ποιότητας S355, οι συγκεκριμένες ιδιότητες παρουσιάζονται στις [Εικόνες 4.5](#), [4.6](#) και [4.7](#). Όπως φαίνεται, οι συγκεκριμένες ιδιότητες μεταβάλλονται σημαντικά, αλλά και ακανόνιστα, συναρτήσει της θερμοκρασίας.



[Εικόνα 4.5](#) Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.



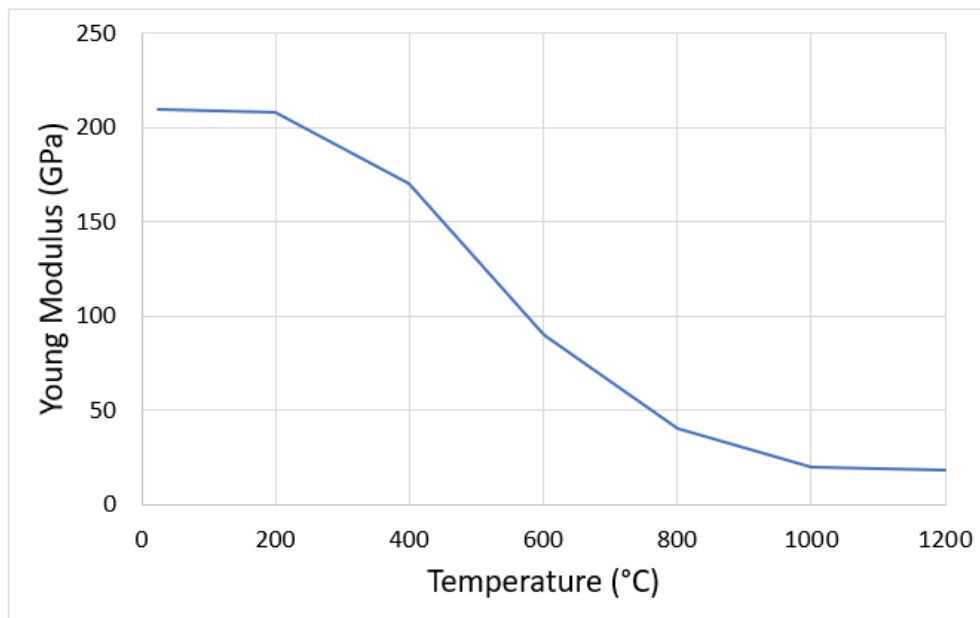
Εικόνα 4.6 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.



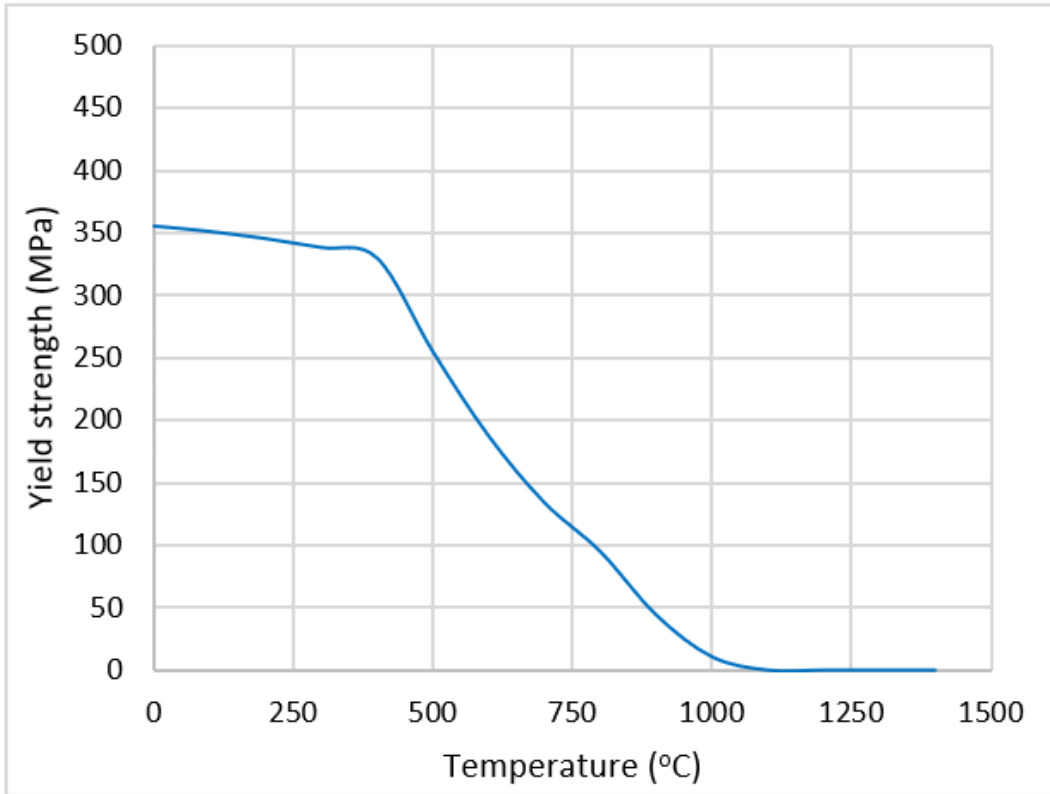
Εικόνα 4.7 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

4.3.2 Μηχανική ανάλυση

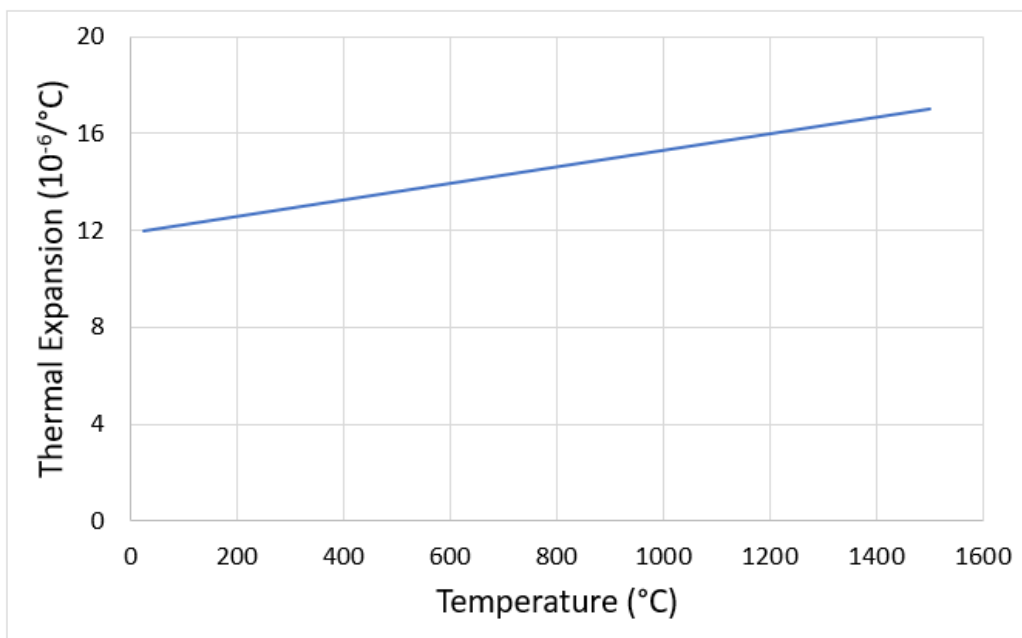
Αντίστοιχα με την θερμική ανάλυση, εξίσου σημαντική είναι και η μηχανική ανάλυση. Για την επίτευξη αυτής είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα S355 που εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία καθώς επίσης και το μοντέλο που χρησιμοποιείται, το οποίο ακολουθεί με ακρίβεια το αντίστοιχο πειραματικό, όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 4.1](#). Απαραίτητες ιδιότητες για την μηχανική ανάλυση είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young (Young modulus) καθώς επίσης και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (thermal expansion). Οι συγκεκριμένες ιδιότητες παρουσιάζονται στις [Εικόνες 4.8](#) και [4.9](#). Όπως φαίνεται, με την αύξηση της θερμοκρασίας ο S355 χάνει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής του, δηλαδή μειώνεται η δυσθραυστότητα του ενώ ταυτόχρονα γίνεται σημαντικά πιο όλκιμος. Παράλληλα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, μετά τους $\sim 1500^{\circ}\text{C}$, μειώνεται κατακόρυφα γεγονός που οφείλεται στην μετάβαση του S355 από στερεό σε ρευστό.



[Εικόνα 4.8](#) Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.



Εικόνα 4.9 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

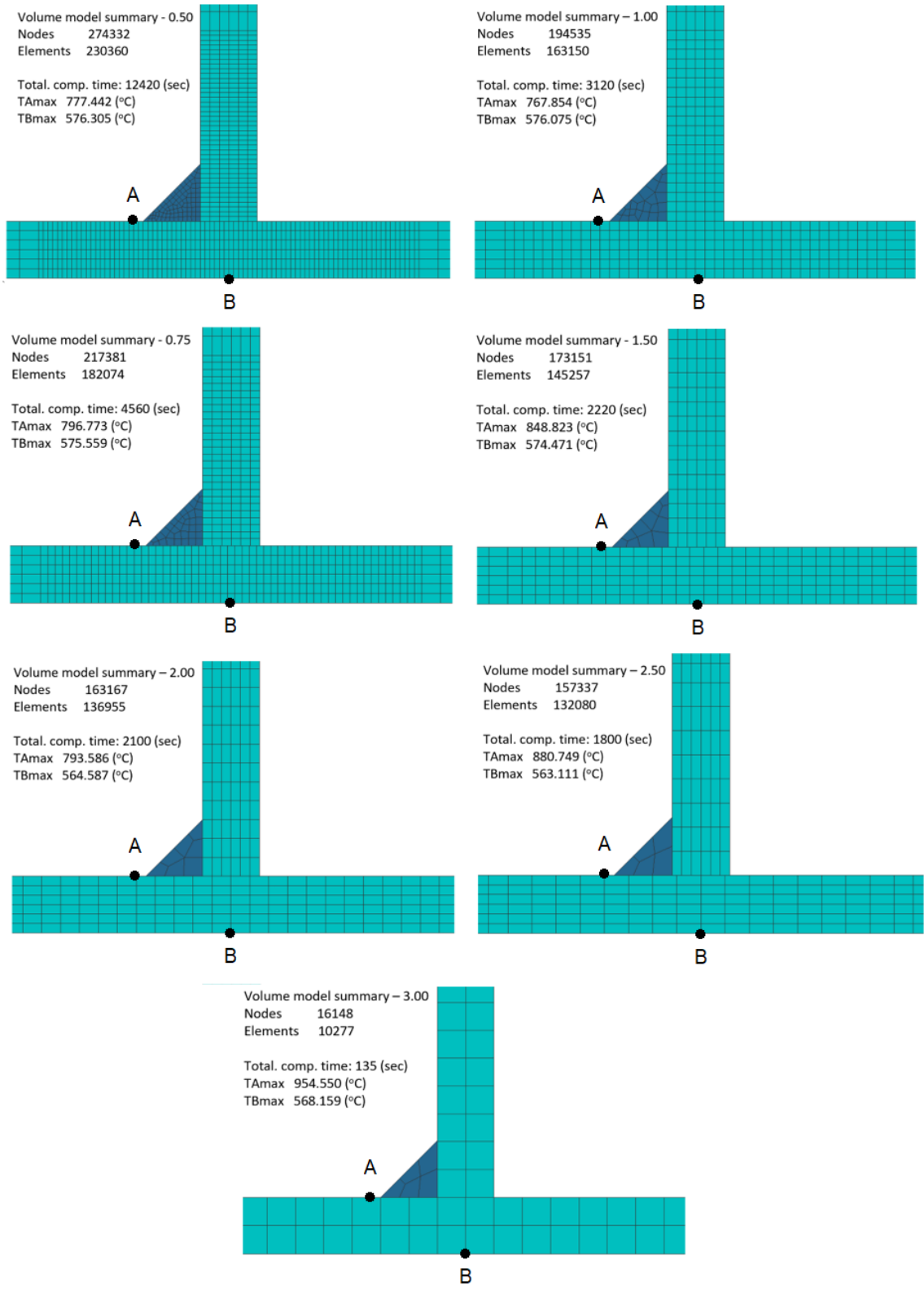


Εικόνα 4.10 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας, χάλυβα S355.

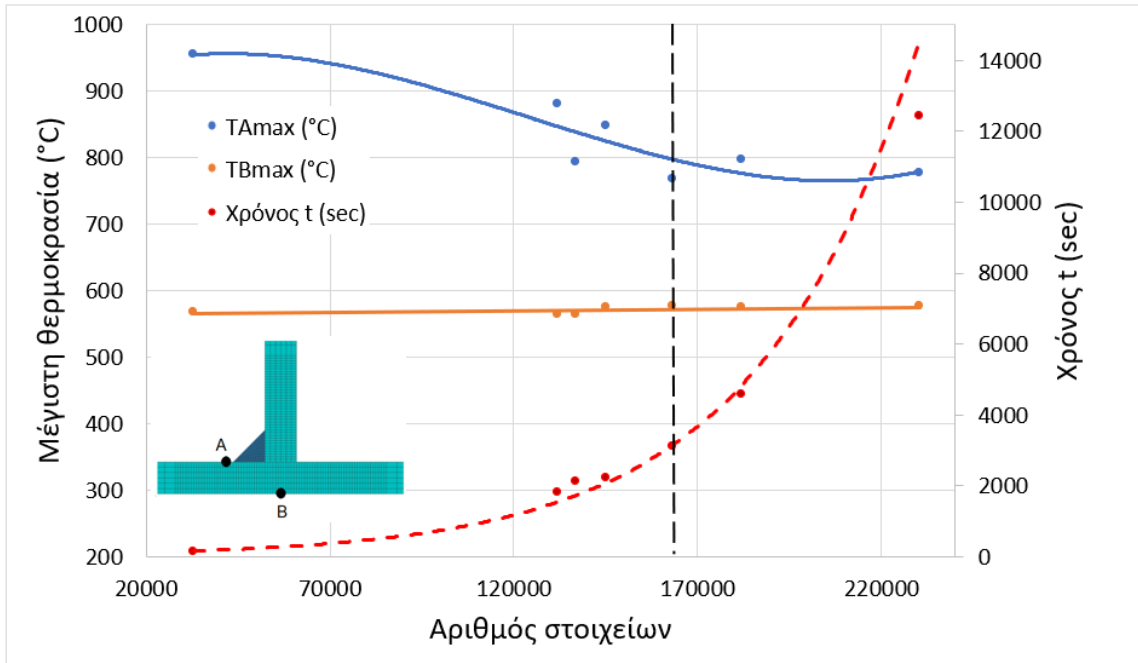
4.3.3 Ορισμός κατάλληλης πυκνότητας του πλέγματος

Για μία ολοκληρωμένη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητο να οριστεί η κατάλληλη πυκνότητα του πλέγματος που θα συνοδεύει τις γεωμετρίες και θα είναι υπεύθυνο για την, κατά το δυνατόν μεγαλύτερη, ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση για την επίτευξη αυτού επιλέχθηκαν μια σειρά από διαφορετικά μεγέθη, τα οποία παρουσιάζονται στην [Εικόνα 4.11](#). Παράλληλα, για την επαλήθευση του συνόλου της προσομοίωσης απαιτείται η εκτέλεση της προσομοίωσης για κάθε πλέγμα ώστε να επιλεγθεί, όπως προαναφέρθηκε, το κατάλληλο ενώ παράλληλα θα επιβεβαιώνεται και η ορθή λειτουργία της προσομοίωσης.

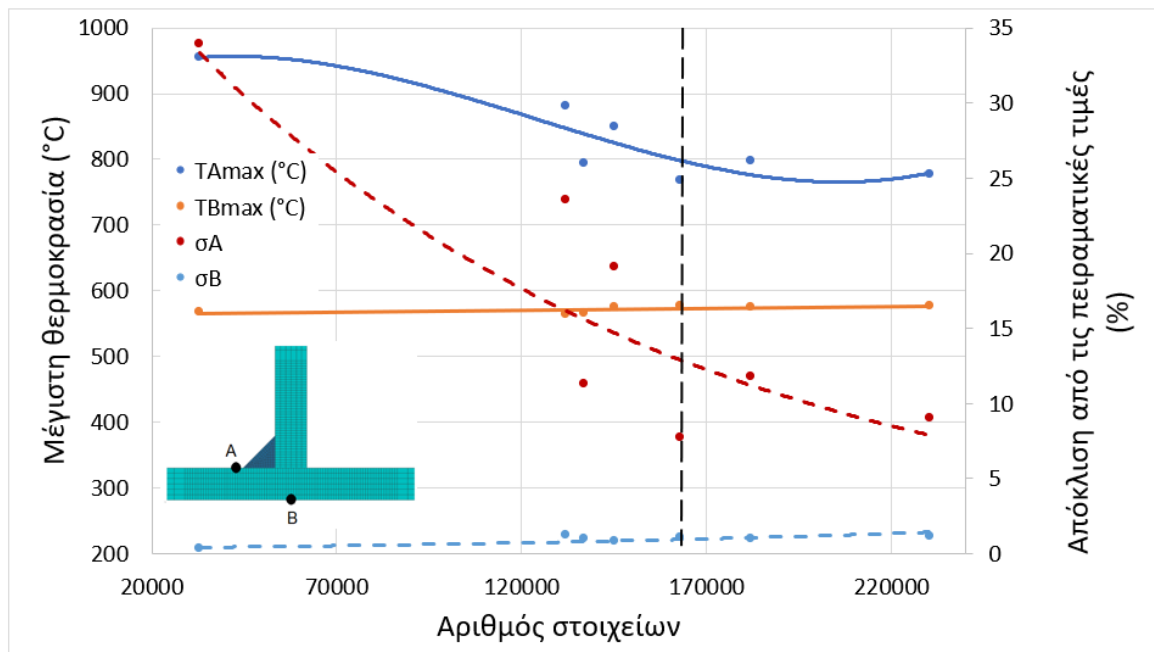
Οι θερμοκρασιακές τιμές των παραπάνω μεγεθών πλέγματος, με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται σε κάθε εικόνα, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά ώστε να αποφανθεί ποιο εκ των οποίων είναι πιστότερο. Οι πειραματικές τιμές καθώς και οι τιμές της προσομοίωσης των σημείων A και B που, φαίνονται στις [Εικόνες 4.11](#) έως [4.13](#) και συγκεντρωτικά στον [Πίνακα 4.2](#).



Εικόνα 4.11 Χαρακτηριστικά πλεγμάτων προσομοίωσης.



Εικόνα 4.12 Συσχέτιση μέγιστης θερμοκρασίας και χρόνου υπολογισμού με τον αριθμό στοιχείων για κάθε μέγεθος πλέγματος.



Εικόνα 4.13 Συσχέτιση μέγιστης θερμοκρασίας και απόκλισης με τον αριθμό στοιχείων για κάθε μέγεθος πλέγματος.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά πλέγματος, μέγιστες θερμοκρασίες και αποκλίσεις.

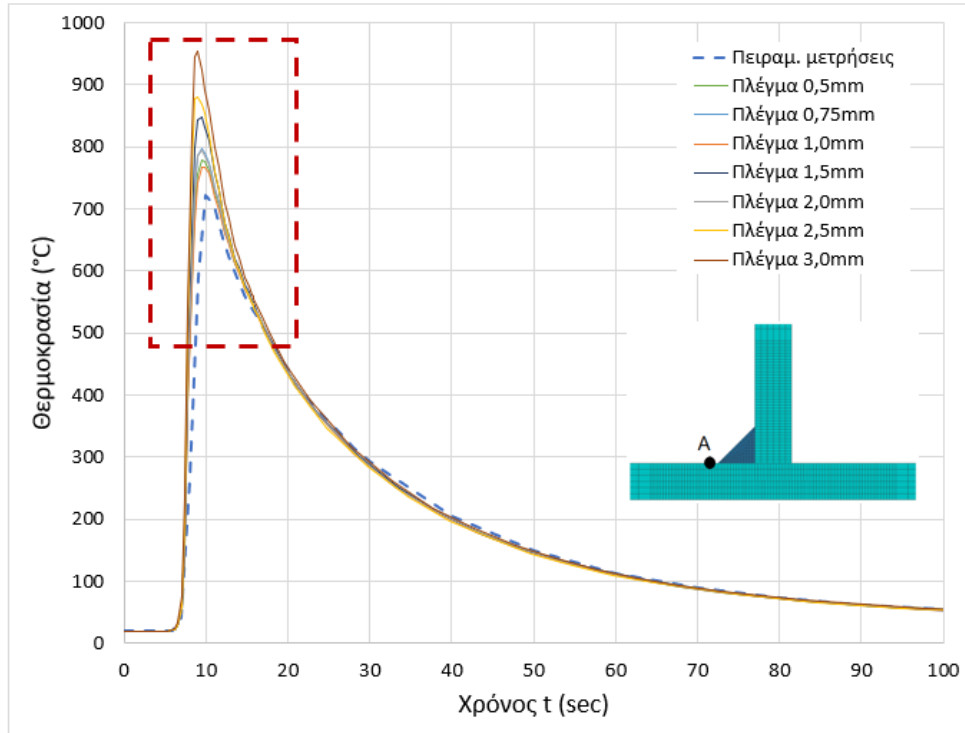
Size (mm)	Nodes	Elements	TAmax (°C)	TBmax (°C)	Time t (sec)	σA(%)	σB(%)
0,5	274332	230360	777,442	576,305	12420	9,04	1,11
0,75	217381	182074	796,773	575,559	4560	11,75	0,98
1	194535	163150	767,851	576,075	3120	7,69	1,07
1,5	173151	145257	848,823	574,471	2220	19,05	0,78
2	163167	136955	793,586	564,587	2100	11,30	0,95
2,5	157337	132080	880,749	563,111	1800	23,53	1,21
3	43384	32886	954,55	568,159	135	33,88	0,32

4.4 Σύγκριση μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα

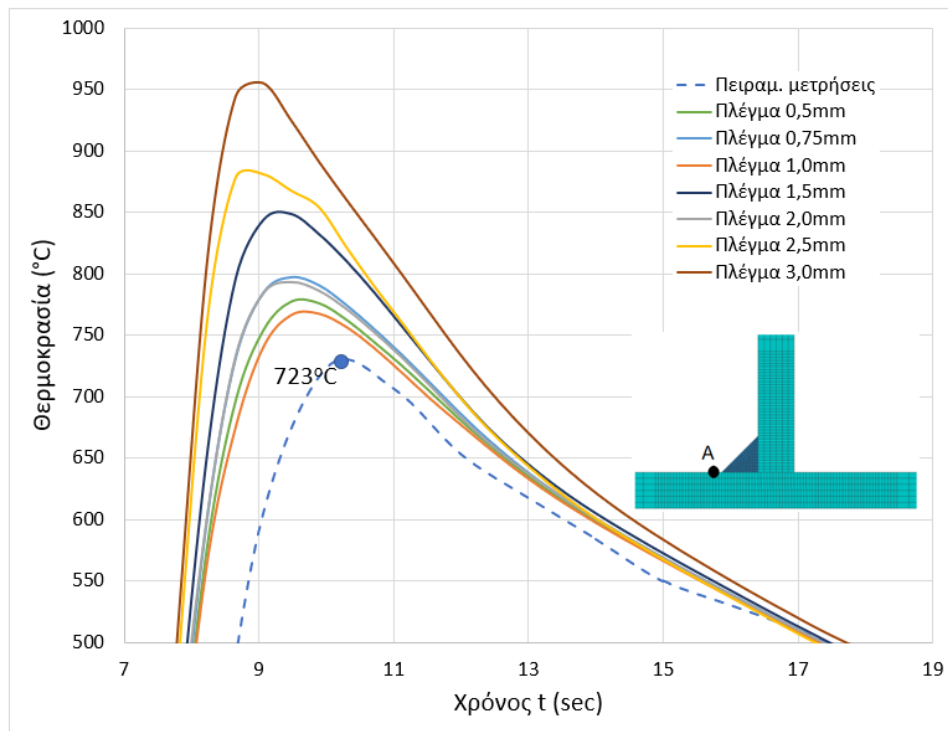
Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των Εικόνων 4.14 έως 4.17, οι μορφές των καμπυλών των θερμικών κύκλων από την προσομοίωση, στα σημεία μελέτης A και B, είναι σχεδόν ταυτόσημες με αυτές που προέκυψαν πειραματικά από τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων τόσο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης όσο και κατά τη διαδικασία της ψύξης.

Όπως φαίνεται, για το σημείο A, όσο πιο «αραιό» είναι το πλέγμα, τόσο αυξάνεται το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών της προσομοίωσης. Αντίθετα για το σημείο B, δεν παρατηρείται εξάρτηση της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας με την «πύκνωση» ή την «αραίωση» του πλέγματος.

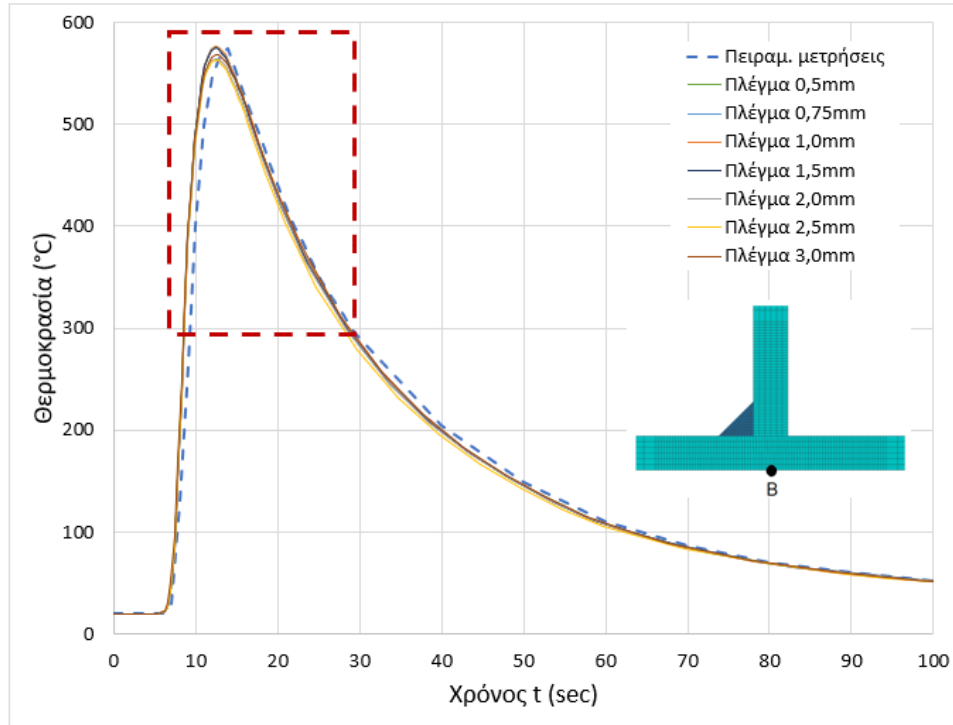
Επιπλέον, είναι αντιληπτό πως με την «πύκνωση» του πλέγματος αυξάνεται αυτομάτως ο αριθμός των στοιχείων που το αποτελούν και εν συνεχεία ο χρόνος περάτωσης (ή υπολογισμού) της προσομοίωσης. Παράλληλα, κάθε μέγεθος πλέγματος παρουσιάζει μια διαφορετική εικόνα ως προς τις υπολογιζόμενες θερμοκρασίες, άλλοτε πιστότερη και άλλοτε όχι, σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.



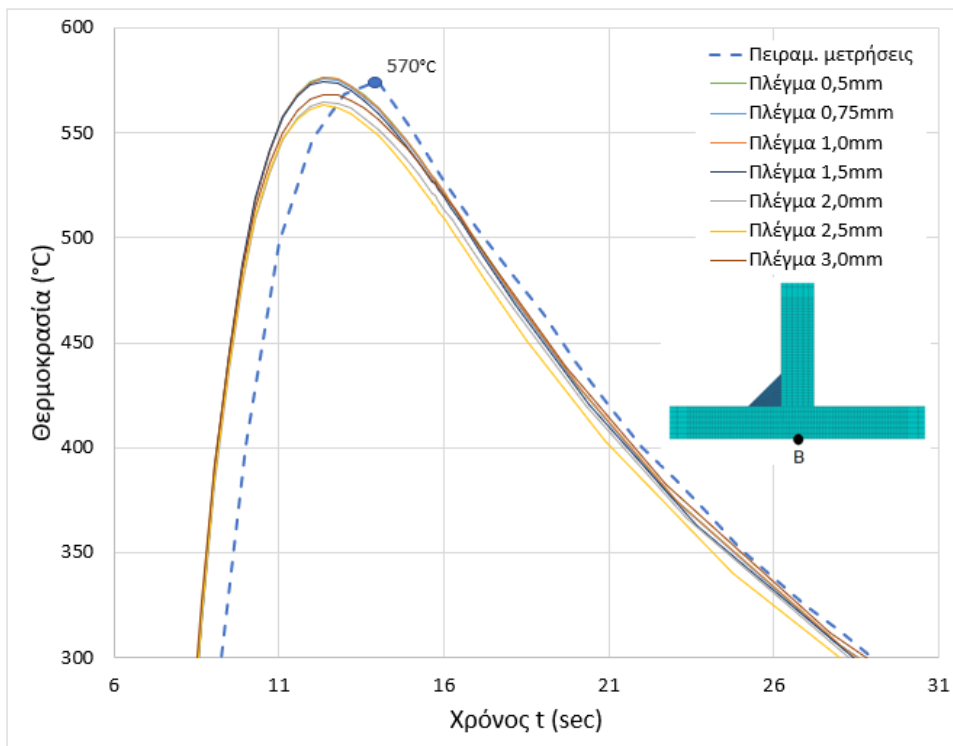
Εικόνα 4.14 Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.



Εικόνα 4.15 Μεγέθυνση τμήματος μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 4.14.

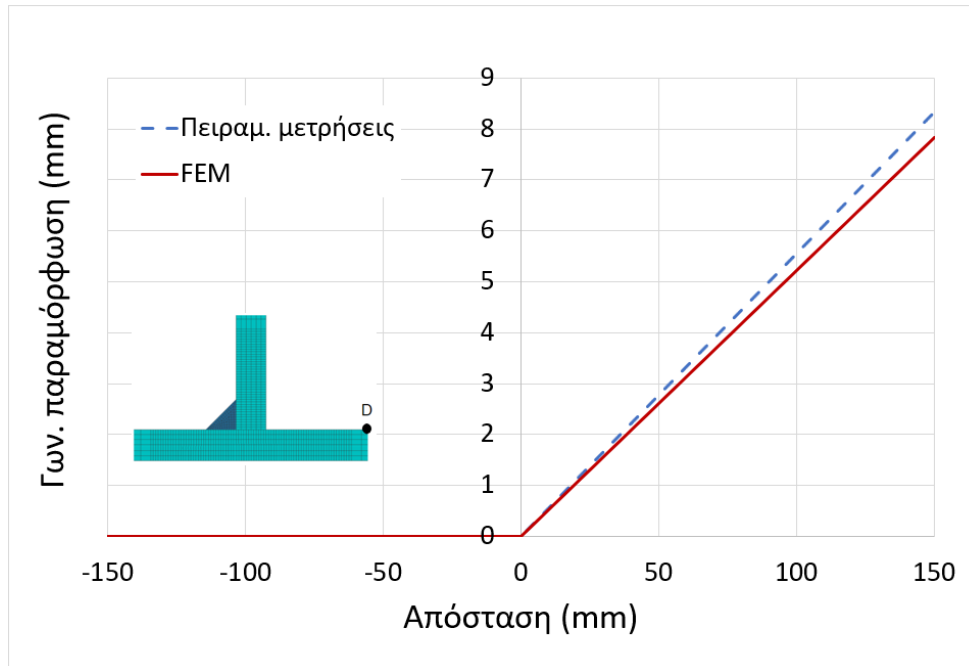


Εικόνα 4.16 Σύγκριση πειραματικών θερμικών κύκλων και θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.



Εικόνα 4.17 Μεγέθυνση τμήματος μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 4.16.

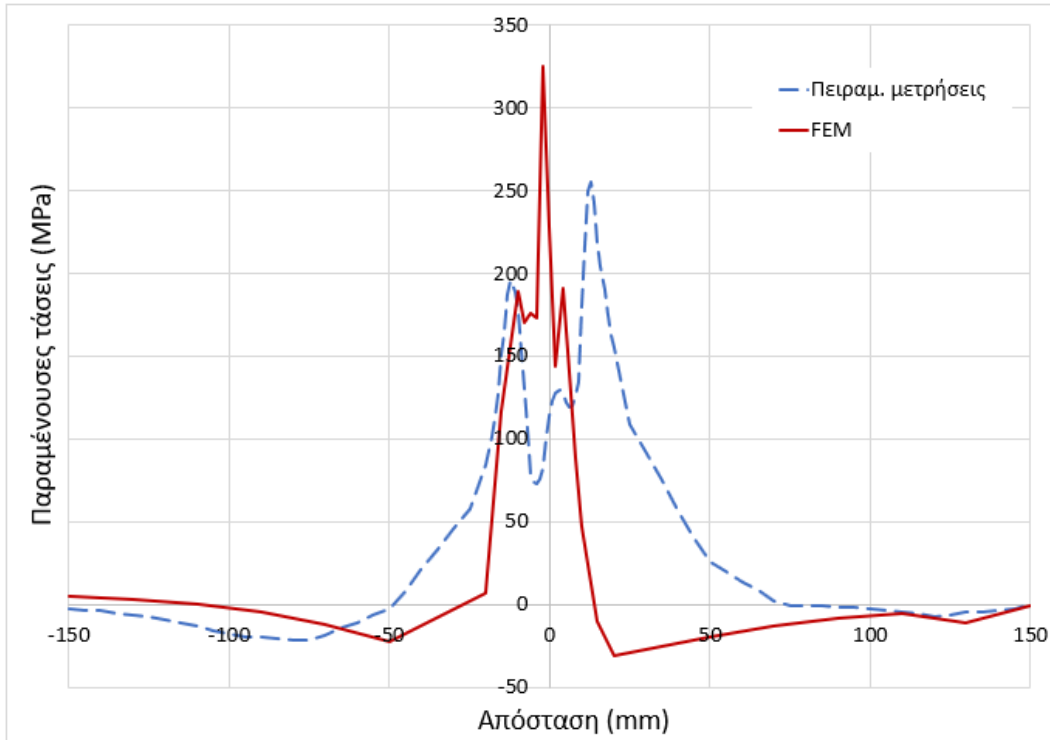
Από τη σύγκριση των πειραματικών γωνιακών παραμορφώσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση, πλέγματος μεγέθους 1mm (194535 nodes, 162150 elements) συνοψίζονται στο διάγραμμα της [Εικόνας 4.1](#), από το οποίο προκύπτει ότι το μοντέλο προβλέπει με πολύ ακρίβεια τις τιμές των γωνιακών παραμορφώσεων.



Εικόνα 4.18 Σύγκριση των πειραματικών γωνιακών παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση, για χάλυβα S355.

Η σύγκριση των πειραματικών (βάσει βιβλιογραφίας), εγκάρσια στη συγκόλληση, παραμενουσών τάσεων με αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση (πλέγμα μεγέθους 1mm, 194535 nodes, 162150 elements) συνοψίζονται στο διάγραμμα της [Εικόνας 4.19](#) που ακολουθεί.

Όπως προκύπτει, το μοντέλο προβλέπει με σχετικά πολύ καλή ακρίβεια τόσο την μορφή της κατανομής όσο και τις τιμές των παραμενουσών τάσεων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.



Εικόνα 4.19 Σύγκριση των πειραματικών παραμενουσών τάσεων με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την προσομοίωση, για χάλυβα S355.

Συγκεκριμένα, εντός του μετάλλου συγκόλλησης το μοντέλο δίνει τιμή ≈ 325 MPa που είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη θεώρηση ότι εντός του μετάλλου συγκόλλησης αναπτύσσονται τάσεις της τάξης του ορίου διαρροής (355 MPa). Εκτός του μετάλλου συγκόλλησης, δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης καθώς δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση των θέσεων μέτρησης (ιδιαίτερα κοντά στον άξονα συγκόλλησης όπου οι μεταβολές είναι μεγάλες). Είναι όμως εμφανές, ότι το μοντέλο, προβλέπει μια σαφώς πιο μικρή ζώνη εφελκυστικών τάσεων από αυτές που προσδιορίστηκαν πειραματικά. Επιπλέον, το μοντέλο, μετά από τη ζώνη των σημαντικών εφελκυστικών τάσεων κοντά στη συγκόλληση, προβλέπει πολύ πιο μικρές (θετικές ή αρνητικές) παραμένουσες τάσεις από τις επίσης πειραματικά μικρές.

Συμπερασματικά λοιπόν, από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και του πλήρους θερμο-μηχανικού μοντέλου, πλέγματος μεγέθους 1mm (194535 nodes, 162150 elements), αποδίδει τα πιο πιστά αποτελέσματα ενώ ταυτόχρονα αυτά λαμβάνονται σε

εύλογο χρονικό διάστημα και μικρότερο της μίας ώρας. Τελικά, η επιβεβαίωση αυτών επιτρέπει την εκτέλεση αντίστοιχων προσομοιώσεων και για τους υπόλοιπους χάλυβες, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5

Μελέτη της επίδρασης των θερμομηχανικών ιδιοτήτων

5.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα μελέτη διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές εξαρτημένες από τη θερμοκρασία θερμομηχανικές ιδιότητες διαφόρων ποιοτήτων κατασκευαστικού χάλυβα τα θερμοκρασιακά πεδία, τις παραμένουσες τάσεις καθώς και τις γωνιακές παραμορφώσεις, που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων τόξου. Συγκεκριμένα, υλοποιούνται και εκτελούνται προσομοιώσεις συγκόλλησης τόξου, βάσει των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου, για τρεις ποιότητες κατασκευαστικού χάλυβα (S235, S355 και S690), από τις οποίες αντλούνται αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων, τα οποία εν συνεχεία συγκρίνονται και επιβεβαιώνονται με τα αντίστοιχα θεωρητικά/βιβλιογραφικά δεδομένα.

5.2 Εκτέλεση προσομοιώσεων

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων συγκόλλησης τόξου τύπου T (T-joint), δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα προσομοίωσης από κατασκευαστικό χάλυβα ποιοτήτων S235, S355 και S690. Οι χημικές τους συστάσεις φαίνονται στον [Πίνακα 5.1](#) και οι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία θερμομηχανικές τους ιδιότητες στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.3](#) έως [5.7](#). Η συγκόλληση εκτελείται με την μέθοδο συγκόλλησης τόξου συμπαγούς σύρματος και προστατευτικού αερίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW), οι δε παράμετροι συγκόλλησης φαίνονται στον [Πίνακα 5.2](#). Τόσο το έλασμα βάσης (base plate) όσο και το κάθετο έλασμα σε αυτήν (web) έχουν πάχος 6mm. Το ύψος του κάθετου ελάσματος είναι 50mm, το πλάτος του ελάσματος βάσης 300mm, ενώ το μήκος και των δύο είναι κοινό, στα 130mm. Το έλασμα βάσης συγκρατείται από την μία πλευρά ώστε να παραμένει πακτωμένο καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Τέλος, σχετικά με τη

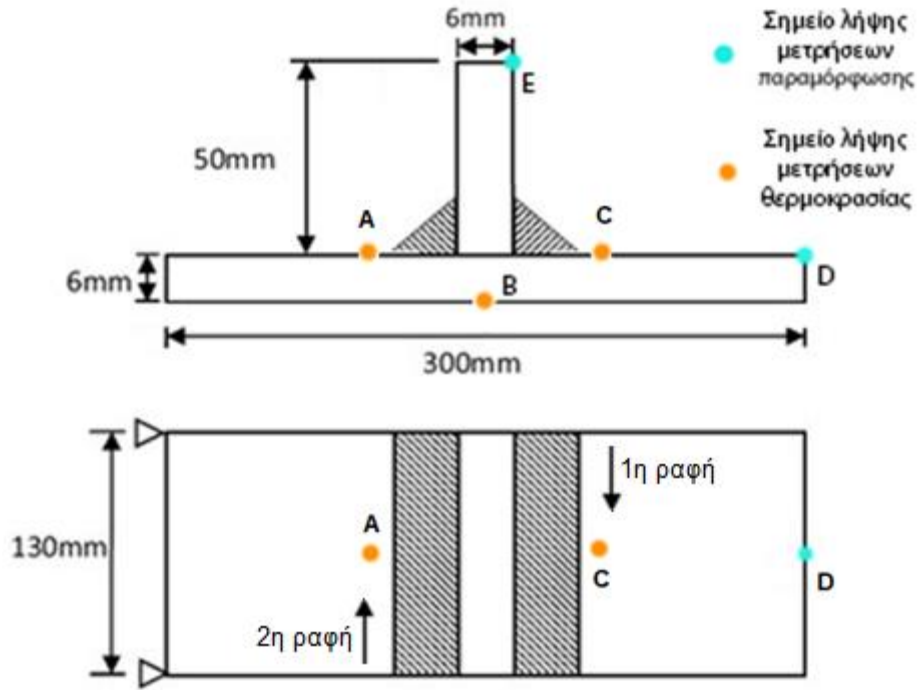
διαδοχή των συγκολλήσεων, η 1η συγκόλληση εκτελείται από την πλευρά του σχηματιζόμενου T που βρίσκεται αντίθετα από την πάκτωση και η 2η συγκόλληση εκτελείται όταν επέλθει πλήρης ψύξη του συστήματος και με διεύθυνση αντίθετη της 1ης συγκόλλησης (Εικόνα 5.1). Βάσει του προηγούμενου κεφαλαίου, σχετικά με την παραμετροποίηση των μοντέλων προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε πλέγμα μεγέθους 1mm (194535 nodes, 162150 elements), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.

Πίνακας 5.1 Χημική σύσταση των χαλύβων ποιότητων S235, S355 και S690.

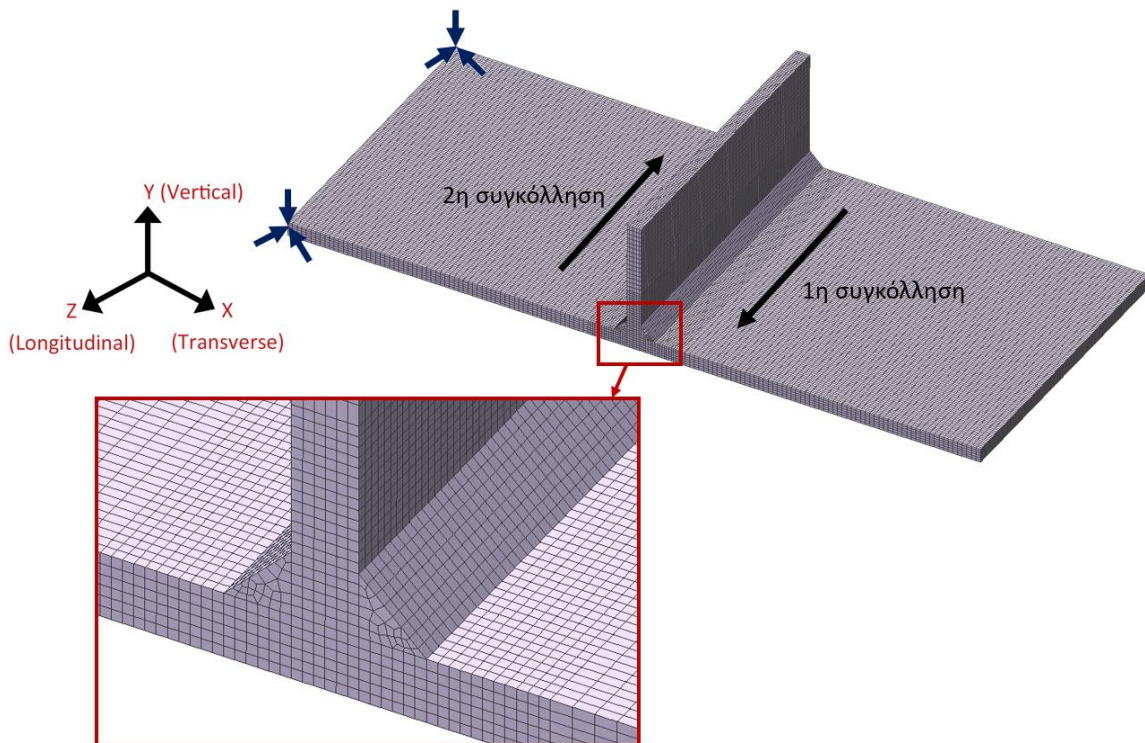
Element (% max.)	S235	S355	S690
	BS EN 10025-2	BS EN 10025-2	BS EN 10025-6
C	0,20	0,24	0,20
Si	-	0,55	0,80
Mn	1,40	1,60	1,70
P	0,035	0,035	0,025
S	0,035	0,035	0,015
N	0,012	0,012	0,015
B	-	-	0,005
Cr	-	-	1,50
Cu	0,55	0,55	0,50
Mo	-	-	0,70
Nb	-	-	0,06
Ni	-	-	2,0
Ti	-	-	0,05
V	-	-	0,12
Zr	-	-	0,15

Πίνακας 5.2 Παράμετροι συγκόλλησης.

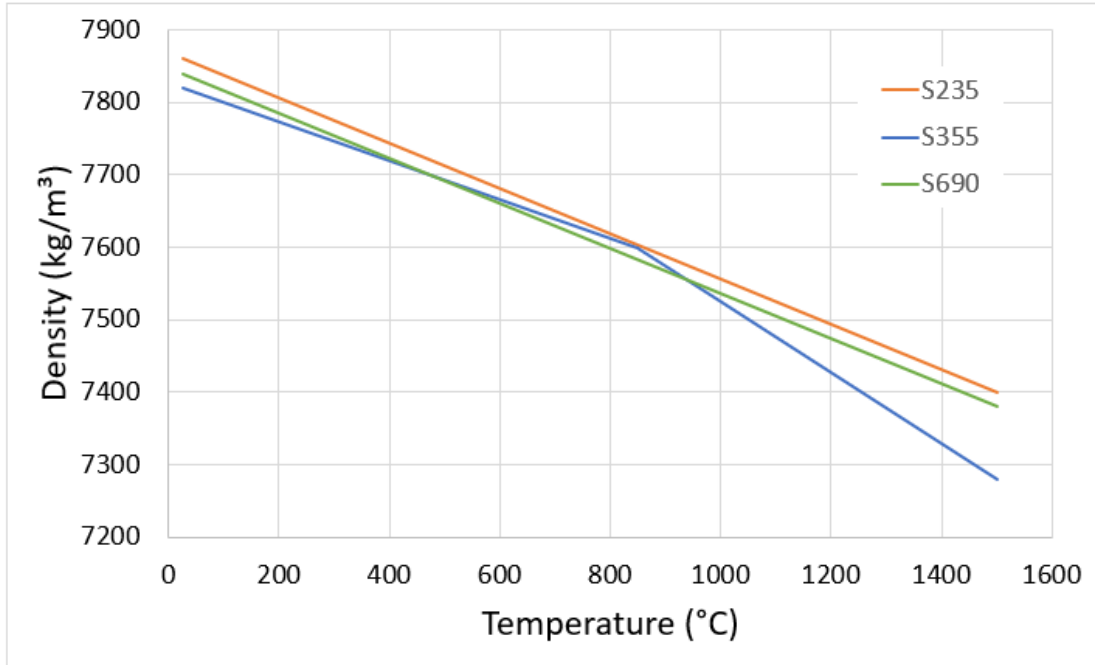
Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (mm/s)	Leg length (mm)
30	290	8.3	6



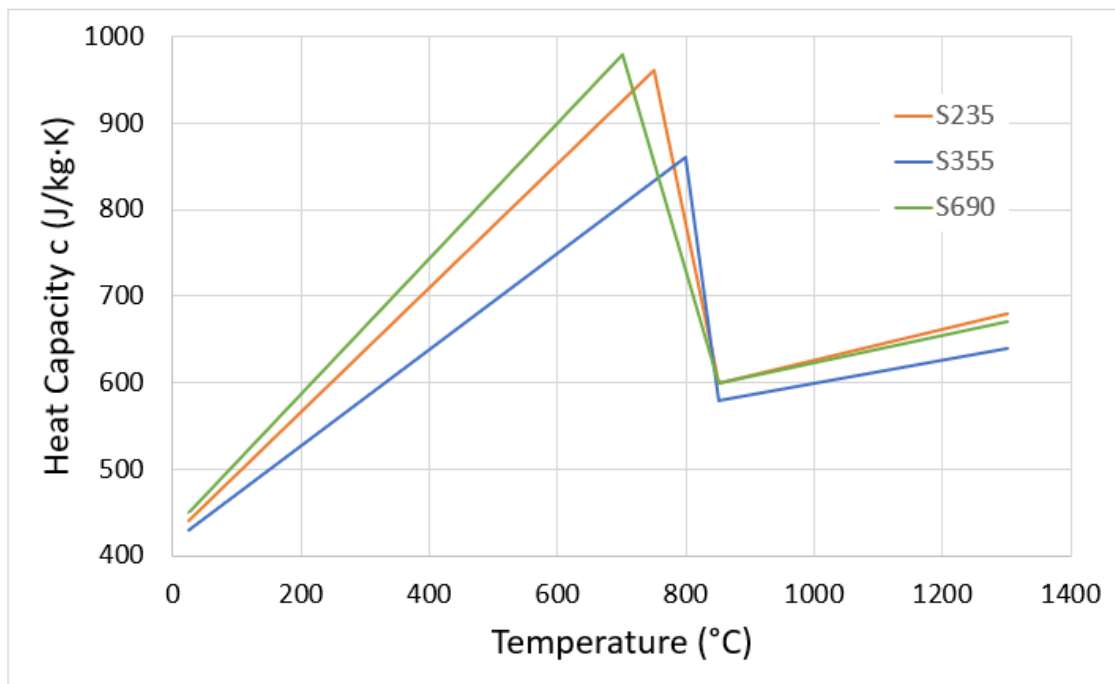
Εικόνα 5.1 Διαστάσεις, πακτώσεις, διαδοχή συγκολλήσεων και σημεία μέτρησης συγκόλλησης τύπου T.



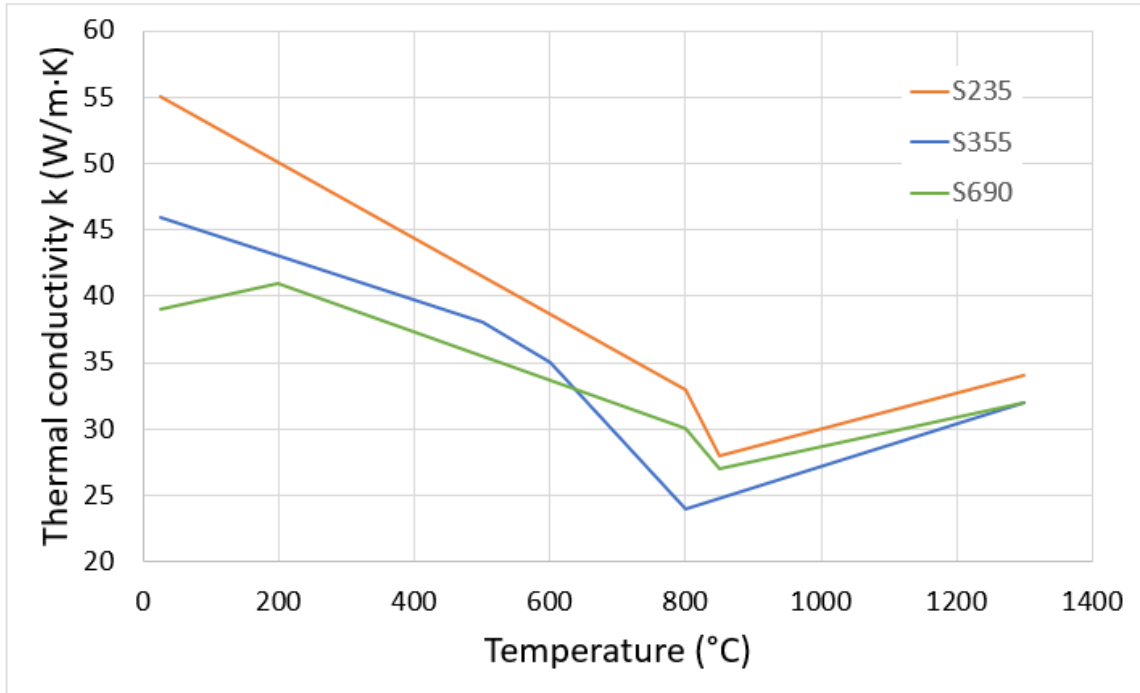
Εικόνα 5.2 Μοντέλο προσομοίωσης συγκόλλησης τύπου T.



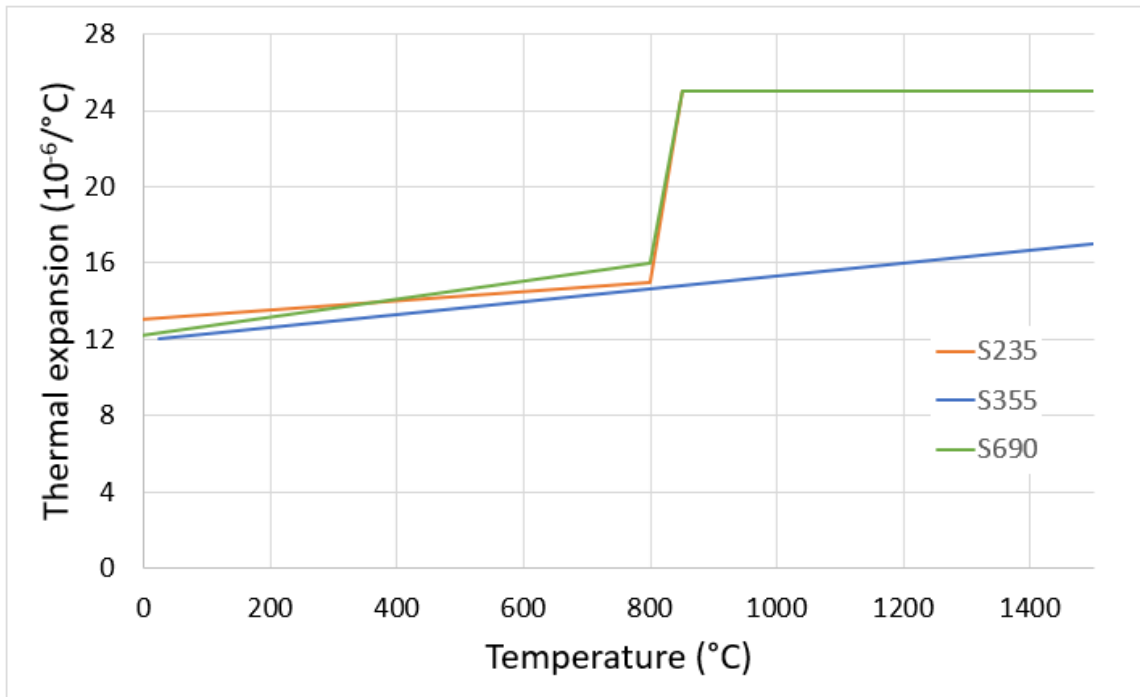
Εικόνα 5.3 Μεταβολή πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.



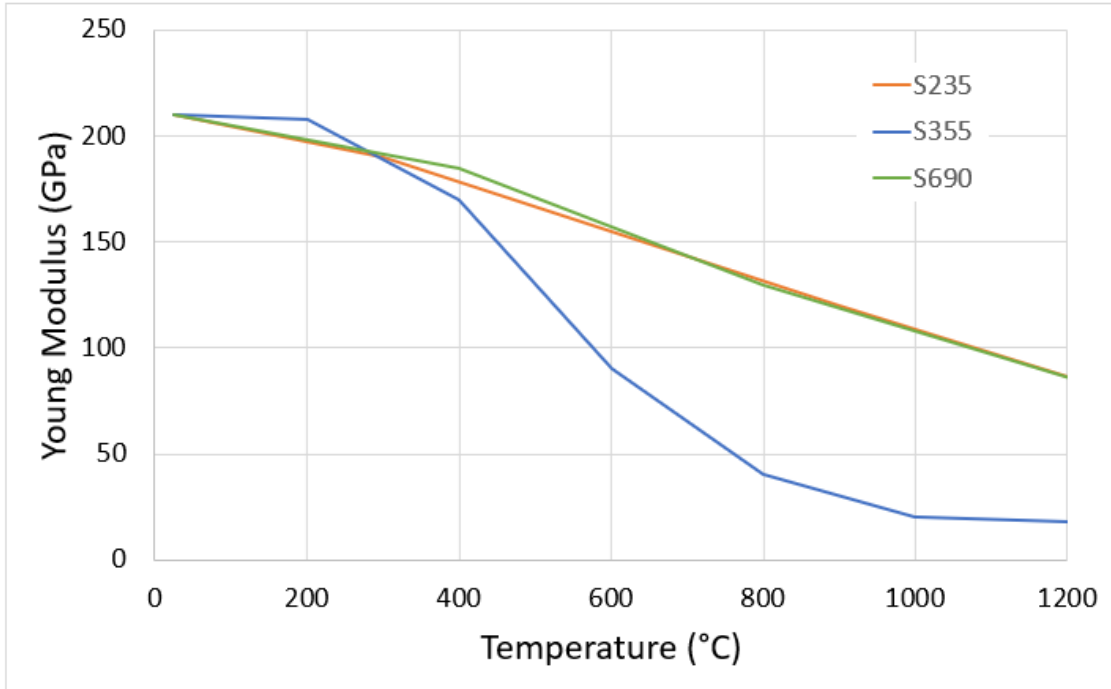
Εικόνα 5.4 Μεταβολή θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.



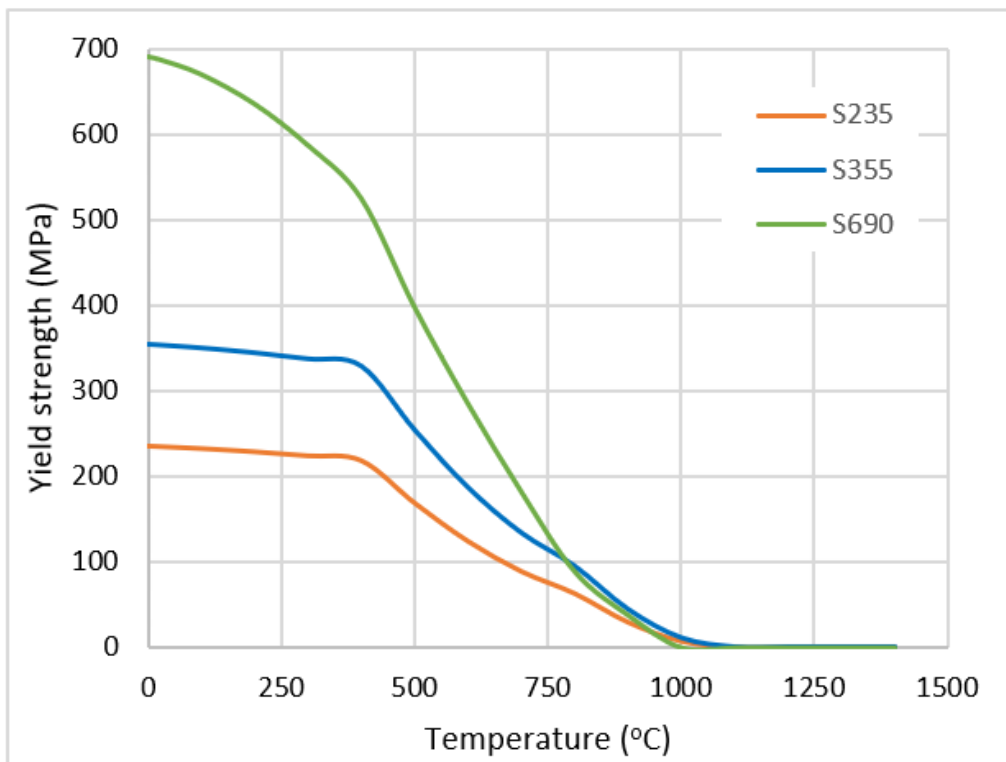
Εικόνα 5.5 Μεταβολή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.



Εικόνα 5.6 Μεταβολή συντελεστή θερμικής διαστολής συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.



Εικόνα 5.7 Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.



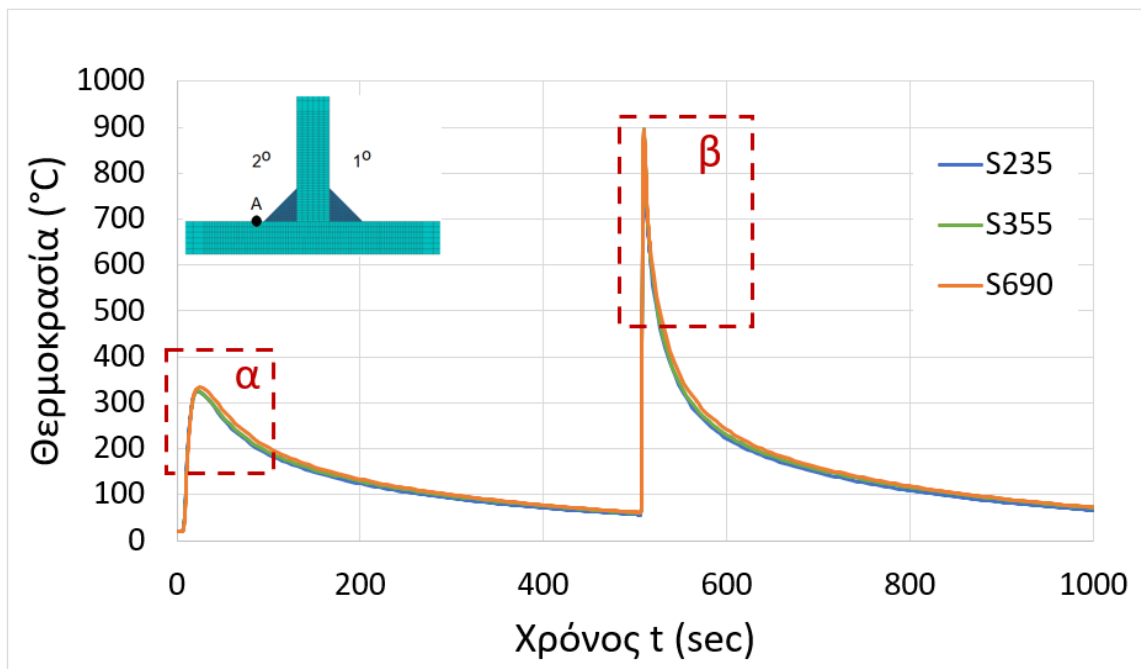
Εικόνα 5.8 Μεταβολή ορίου διαρροής συναρτήσει της θερμοκρασίας, για ποιότητες χαλύβων S235, S355 και S690.

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

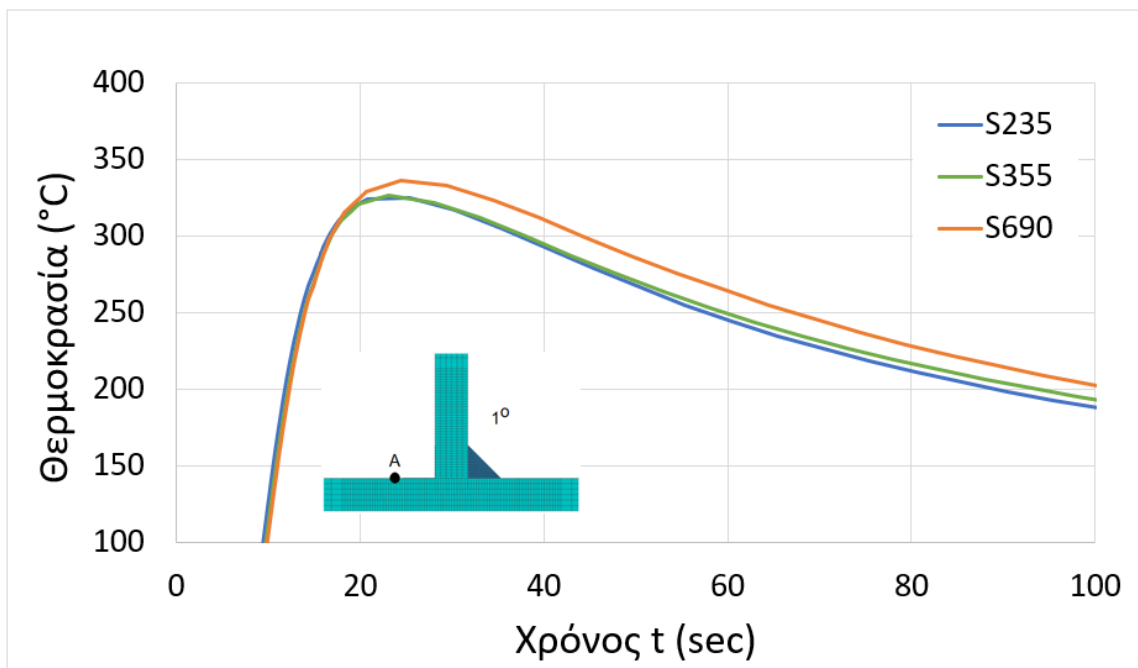
Παρακάτω μελετάται και συγκρίνεται η επίδραση των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία θερμομηχανικών ιδιοτήτων των τριών ποιοτήτων χάλυβα S235, S355 και S690 (πυκνότητα ρ , ειδική θερμότητα c , θερμική αγωγιμότητα k , συντελεστής θερμικής διαστολής α , μέτρο ελαστικότητας E και όριο διαρροής σ_s), οι οποίες θεωρείται ότι μπορούν να επιδράσουν στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης.

5.3.1 Σύγκριση θερμικών κύκλων

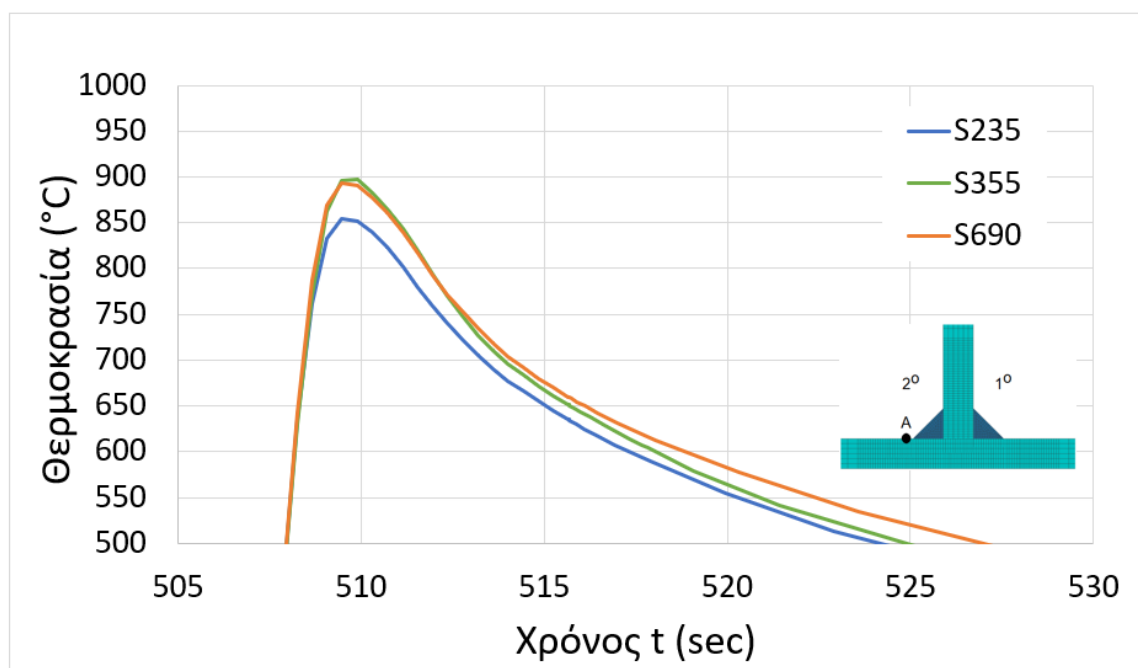
Η σύγκριση των θερμικών κύκλων για τις τρεις ποιότητες χάλυβα (S235, S355 και S690), που προέκυψαν από την προσομοίωση, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



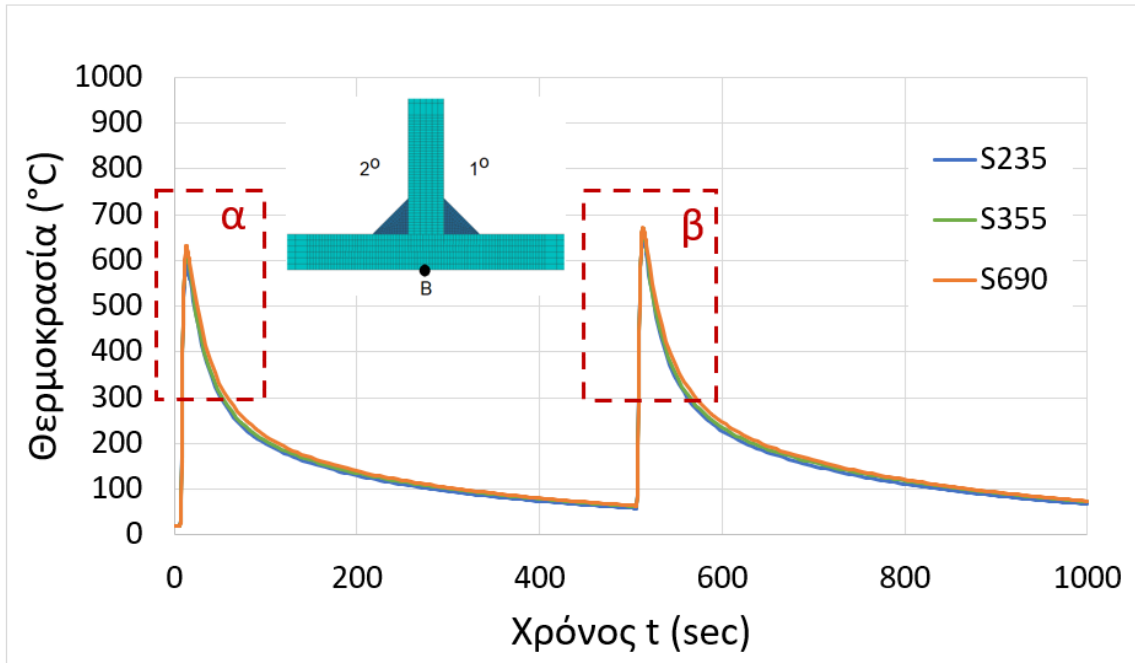
Εικόνα 5.9 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης A.



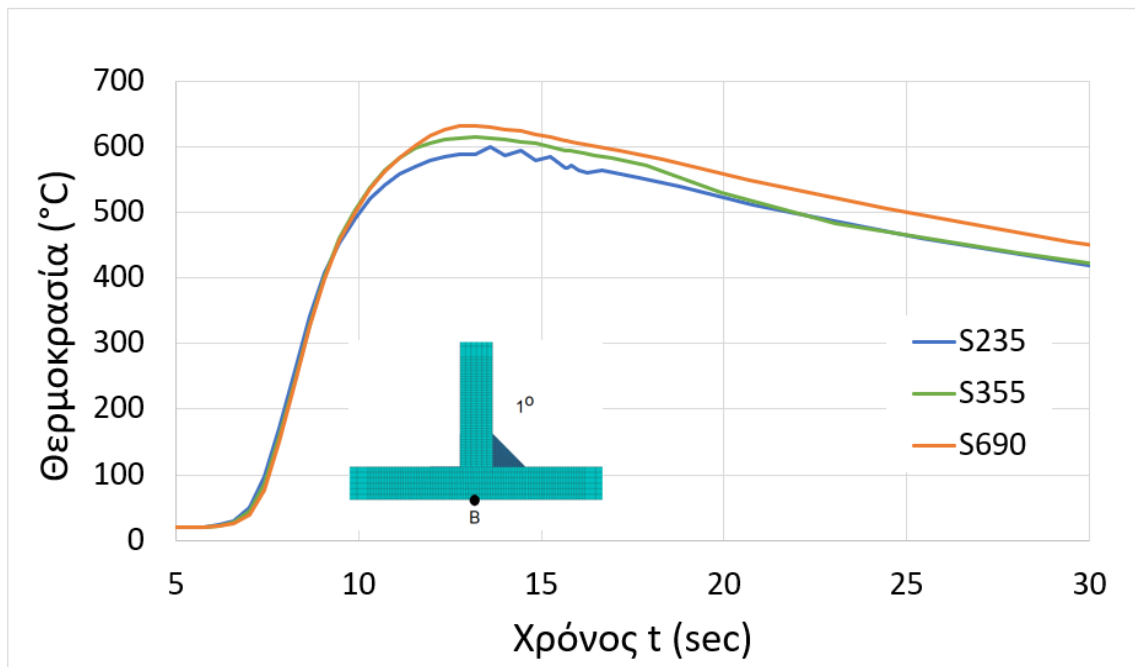
Εικόνα 5.10 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.9.



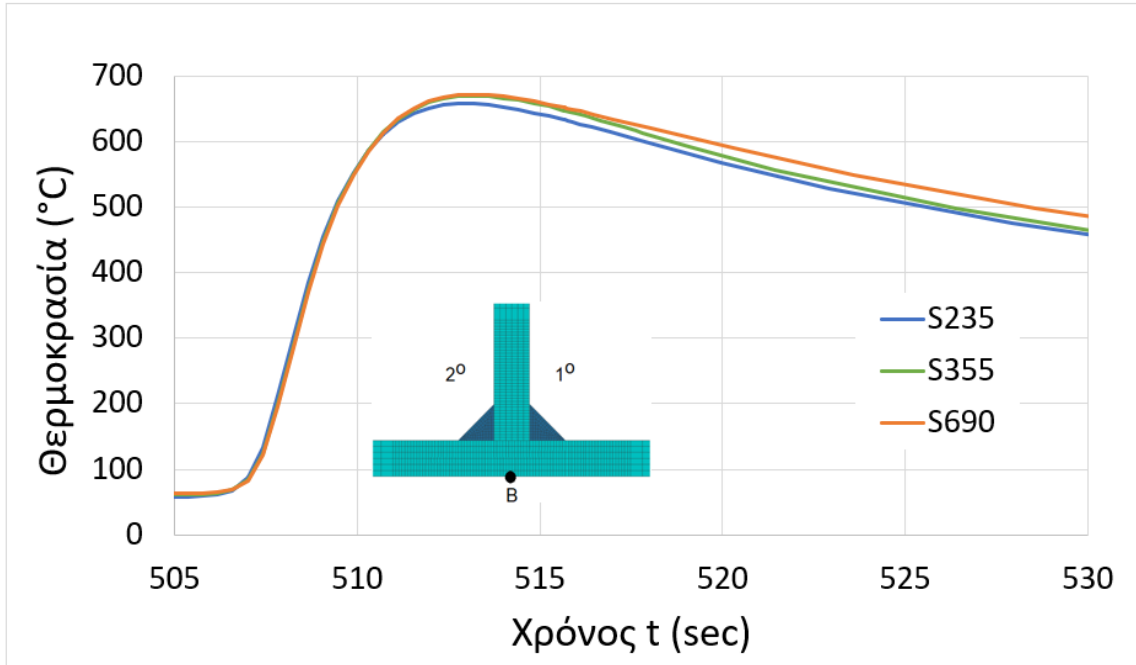
Εικόνα 5.11 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.9.



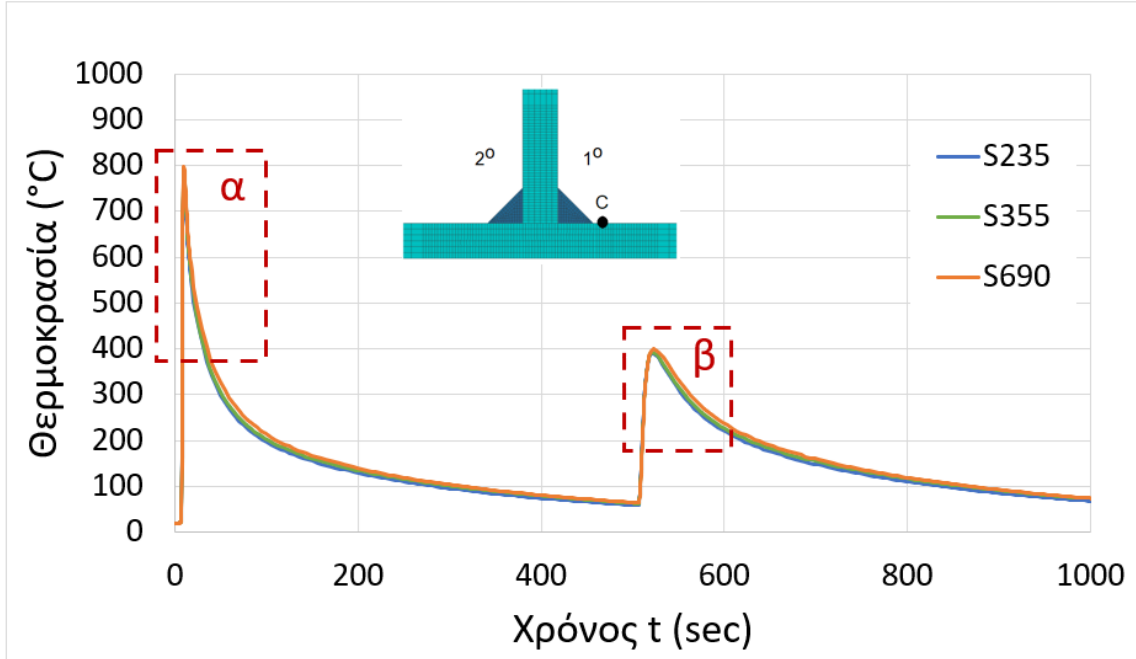
Εικόνα 5.12 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης B.



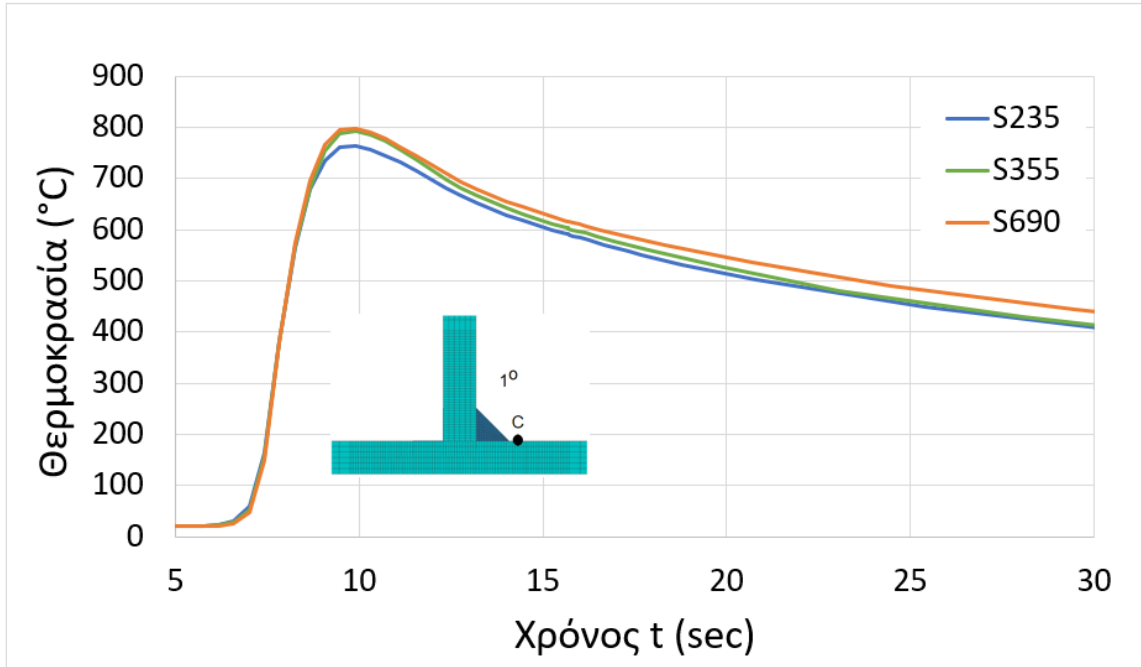
Εικόνα 5.13 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.12.



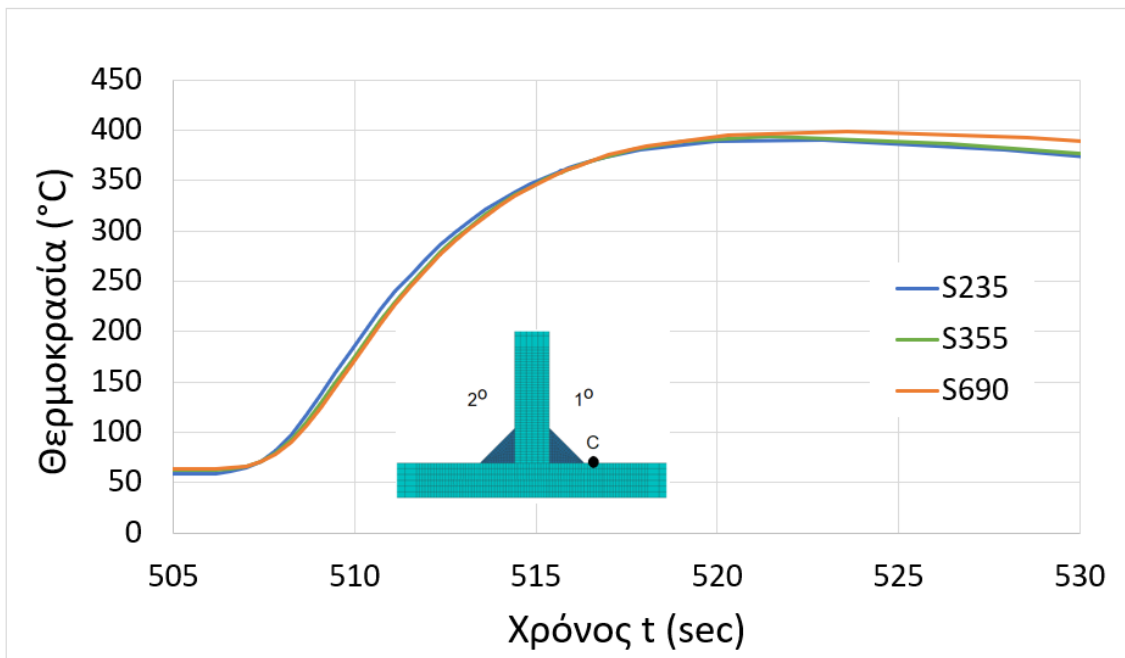
Εικόνα 5.14 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.12.



Εικόνα 5.15 Σύγκριση θερμικών κύκλων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στο σημείο παρακολούθησης C.



Εικόνα 5.16 Μεγέθυνση τμήματος α μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.15.



Εικόνα 5.17 Μεγέθυνση τμήματος β μέγιστων θερμοκρασιών της Εικόνας 5.15.

Στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.9, 5.12 και 5.15](#) παρουσιάζονται οι θερμικοί κύκλοι των συγκολλήσεων για κάθε ποιότητα χάλυβα, όπως αυτοί προέκυψαν από τα σημεία παρακολούθησης A, B και C. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται ότι οι μορφές των καμπύλων των θερμικών κύκλων της προσομοίωσης, είναι σχεδόν ταυτόσημες. Όπως είναι αντιληπτό, κάθε σημείο έχει μια διαφορετική εικόνα ως προς τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, κατά την συγκόλληση, και τα μέγιστα αυτών. Τα σημεία παρακολούθησης A και C που βρίσκονται σε μικρή απόσταση, 10mm αριστερά και δεξιά από το κέντρο της επάνω πλευράς του ελάσματος βάσης, από κάθε ραφή της συγκόλλησης παρουσιάζουν αντίθετη εικόνα. Τη στιγμή που η κινούμενη πηγή θερμότητας (ή το τόξο συγκόλλησης) βρίσκεται από την πλευρά του σημείου παρακολούθησης A αυτό έχει αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το σημείο παρακολούθησης C, με την ακριβώς αντίθετη εικόνα να παρατηρείται τη στιγμή που η κινούμενη πηγή θερμότητας (ή το τόξο συγκόλλησης) βρίσκεται από την πλευρά του σημείου παρακολούθησης C. Σχετικά με το σημείο παρακολούθησης B, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της κάτω πλευράς του ελάσματος βάσης, παρατηρείται ομοιομορφία στους θερμικούς κύκλους, με σχεδόν ίσες μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες.

Στο διάγραμμα της [Εικόνας 5.10](#), ως μεγέθυνση του α τμήματος του πρώτου θερμικού κύκλου του σημείου παρακολούθησης A, παρατηρείται μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία του χάλυβα ποιότητας S690 σε σχέση με τις δύο άλλες ποιότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χάλυβας S690 παρουσιάζει χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα k στην θερμοκρασία των 300-350 °C ([Εικόνας 5.4](#)) με αποτέλεσμα η θερμότητα να διαδίδεται «δυσκολότερα» στο εσωτερικό του αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία τοπικά, δηλαδή στην περιοχή της συγκόλλησης, η οποία βρίσκεται κοντά στο σημείο A.

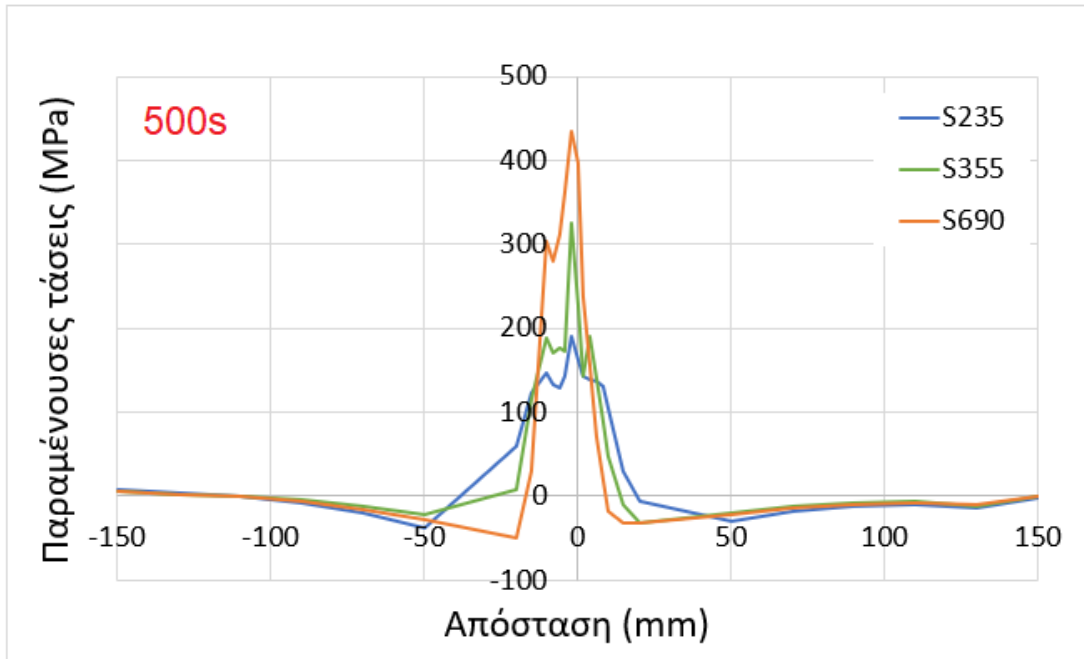
Διαφορετική εικόνα παρατηρείται κατά το δεύτερο θερμικό κύκλο, στο σημείο παρακολούθησης A ([Εικόνα 5.11](#)), κατά την οποία οι θερμοκρασιακές συναρτήσεις του χρόνου μεταβολές των χαλύβων ποιότητας S355 και S690 σχεδόν ταυτίζονται στους ~900°C, προφανώς εξ' αιτίας της ίδιας τιμής θερμικής αγωγιμότητας k σε τέτοιες θερμοκρασίες. Στο διάγραμμα της [Εικόνας 5.13](#), ως μεγέθυνση του τμήματος α του πρώτου θερμικού κύκλου του σημείου παρακολούθησης B, δίνει μια ενδιαφέρουσα εικόνα

ως προς τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες των χαλύβων ποιότητας S355 και S690, οι οποίες συγκλίνουν στους ~ 650 °C, το οποίο συνάδει και με την ταύτιση των καμπυλών θερμικής αγωγιμότητα k (Εικόνα 5.5). Ίδια τάση για τους χάλυβες ποιότητας S355 και S690 φαίνεται να υπάρχει και στο διάγραμμα της Εικόνας 5.14, στην ίδια περίπου θερμοκρασία. Τέλος, στο διάγραμμα της Εικόνας 5.15, με τις αντίστοιχες μεγεθύνσεις των Εικόνων 5.16 και 5.17, ο χάλυβας ποιότητας S235 αναπτύσσει την χαμηλότερη θερμοκρασία, το οποίο εξηγείται από την μέγιστη, εκ των τριών, τιμή θερμικής αγωγιμότητας k για θερμοκρασία ~ 800 °C.

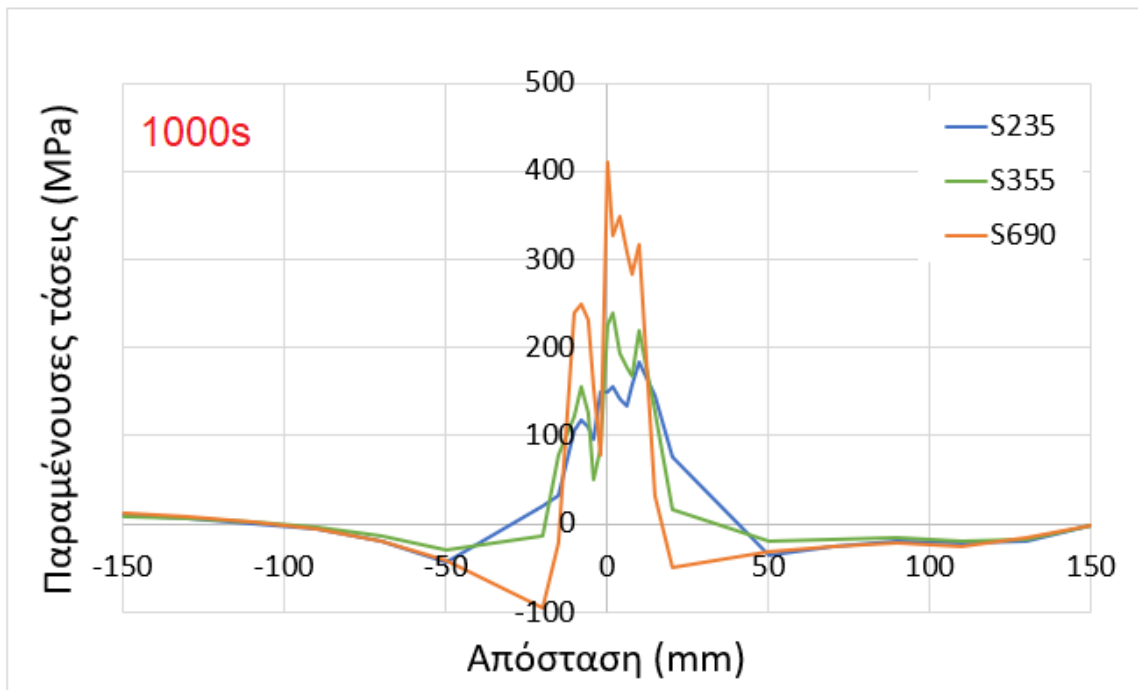
Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η θερμική αγωγιμότητα k των υλικών, ως ιδιότητα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, δεν θα πρέπει να διατηρείται σταθερή, όταν πρόκειται για προσομοίωση των θερμικών φαινομένων των συγκολλήσεων, όπως υποστηρίζουν και οι (Komanduri & Hou, 2001).

5.3.2 Σύγκριση παραμενουσών τάσεων

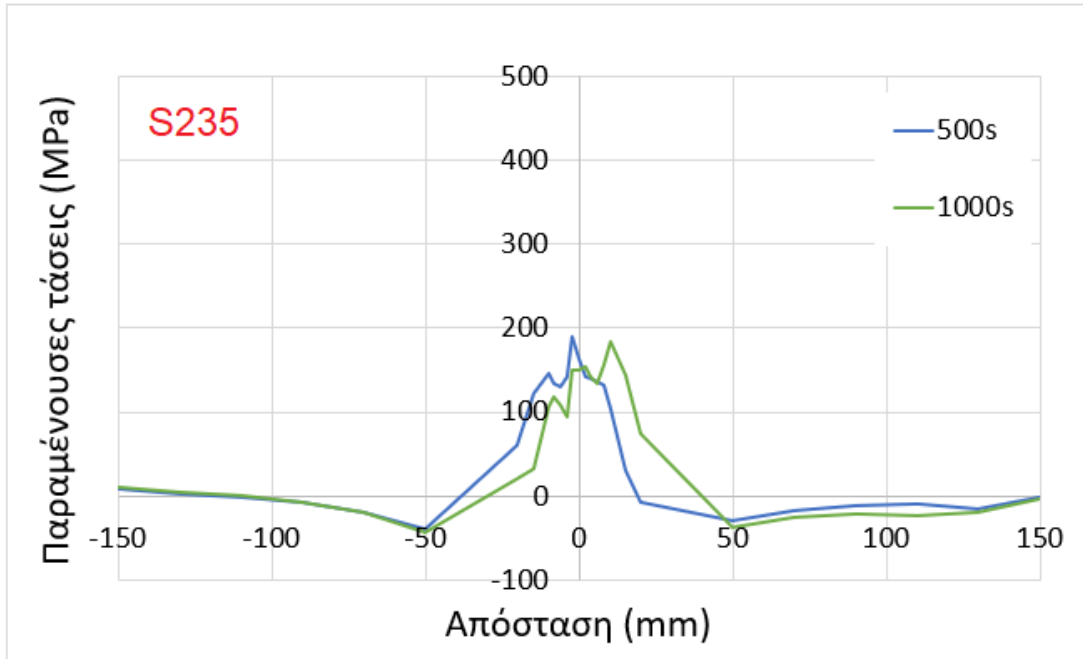
Η σύγκριση των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκόλλησης για τις τρεις ποιότητες χάλυβα (S235, S355 και S690), που προέκυψαν από την προσομοίωση, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



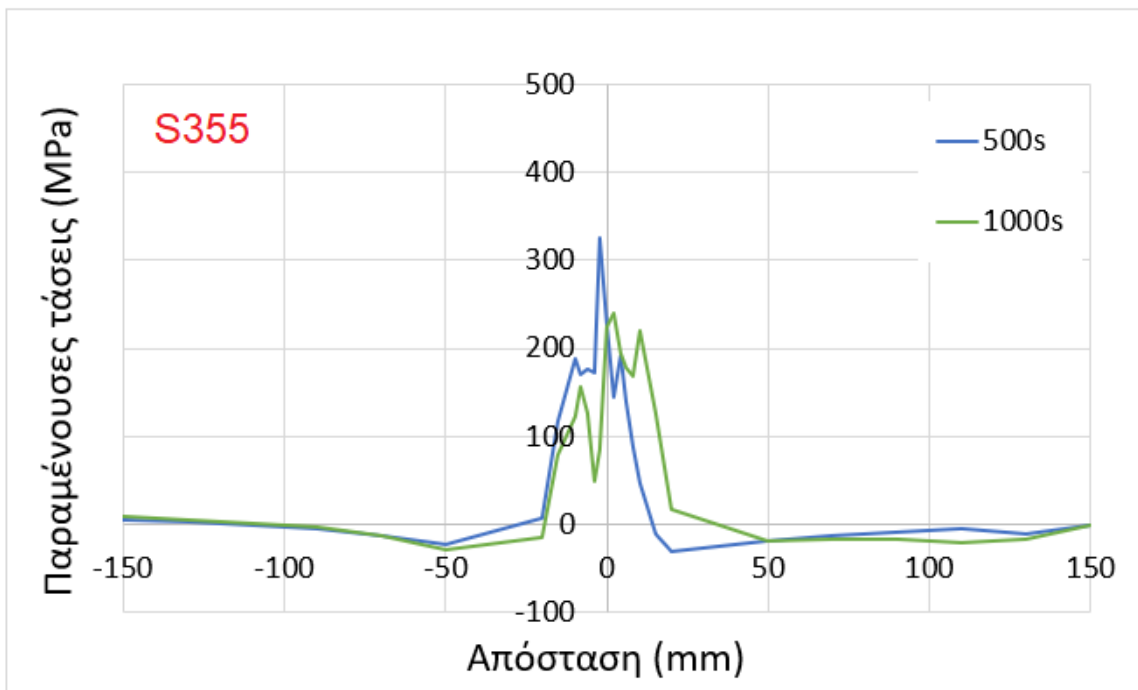
Εικόνα 5.18 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η συγκόλληση (500s), για χάλυβες S235, S355 και S690.



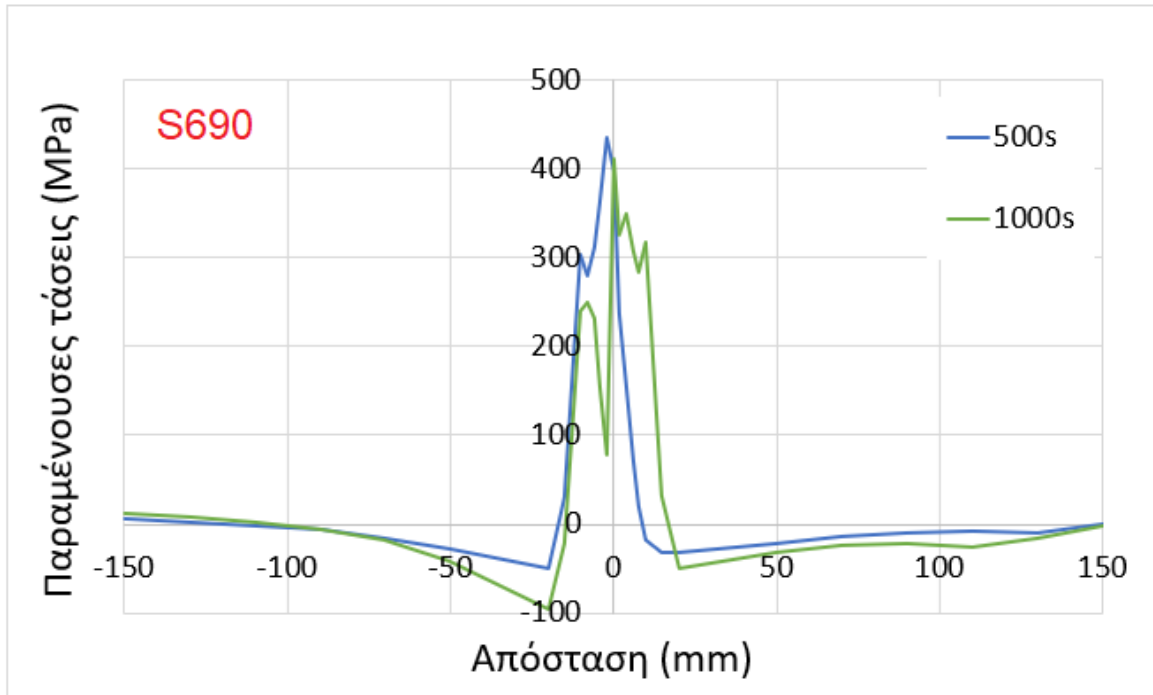
Εικόνα 5.19 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβες S235, S355 και S690.



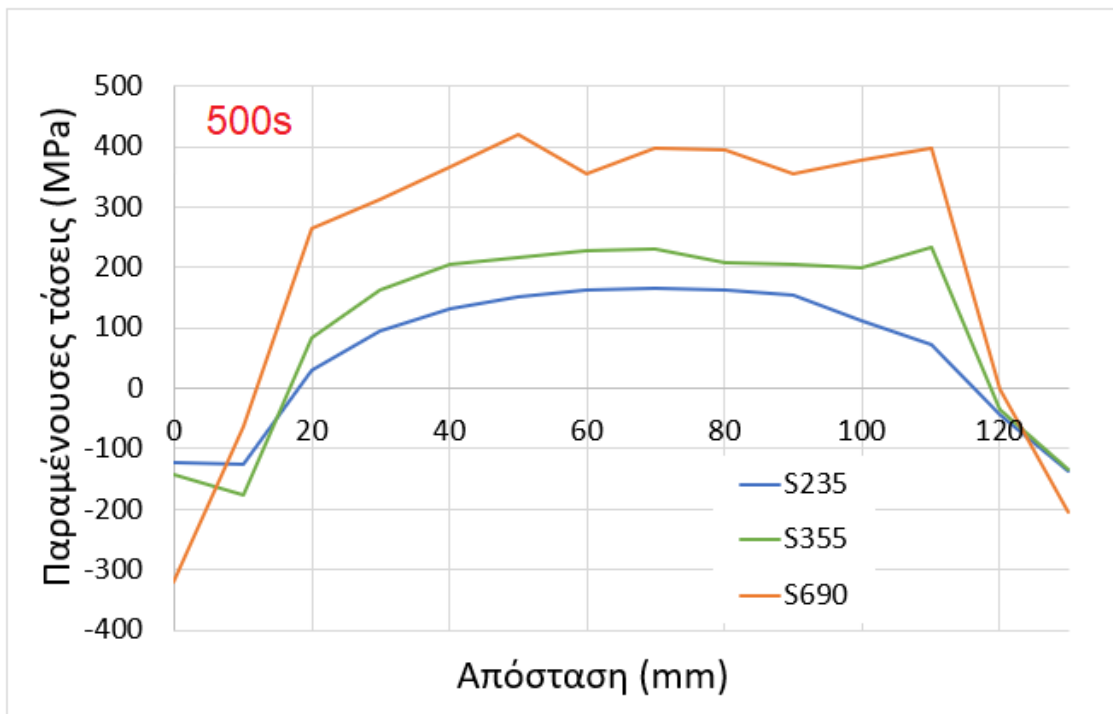
Εικόνα 5.20 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S235.



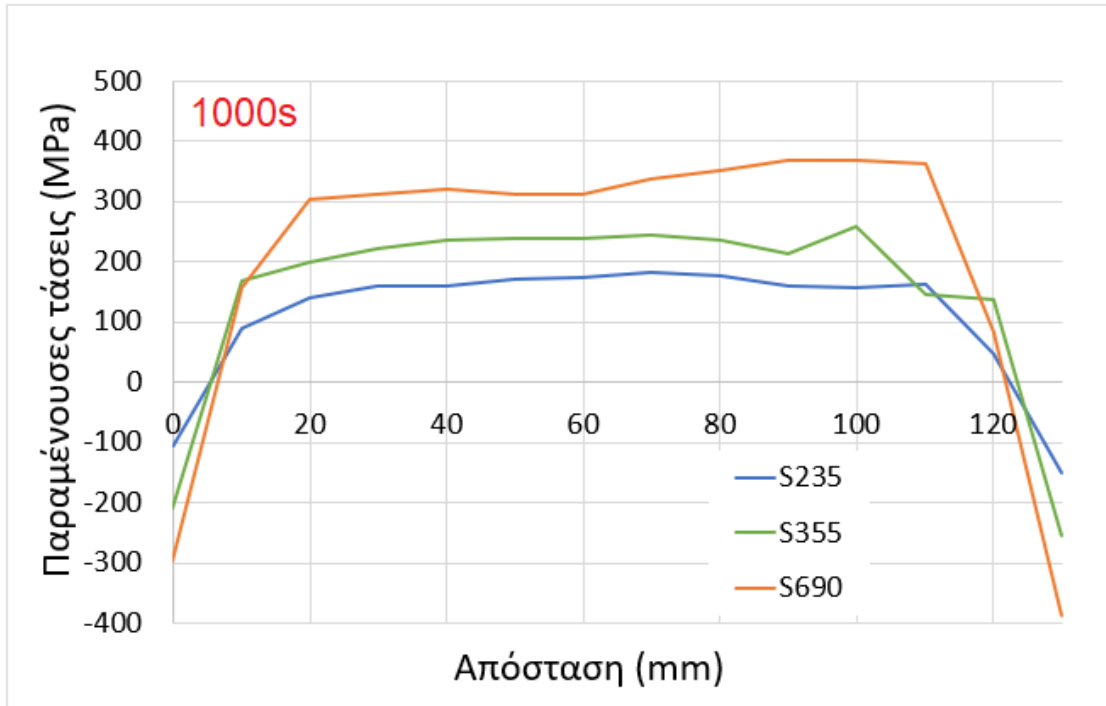
Εικόνα 5.21 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S355.



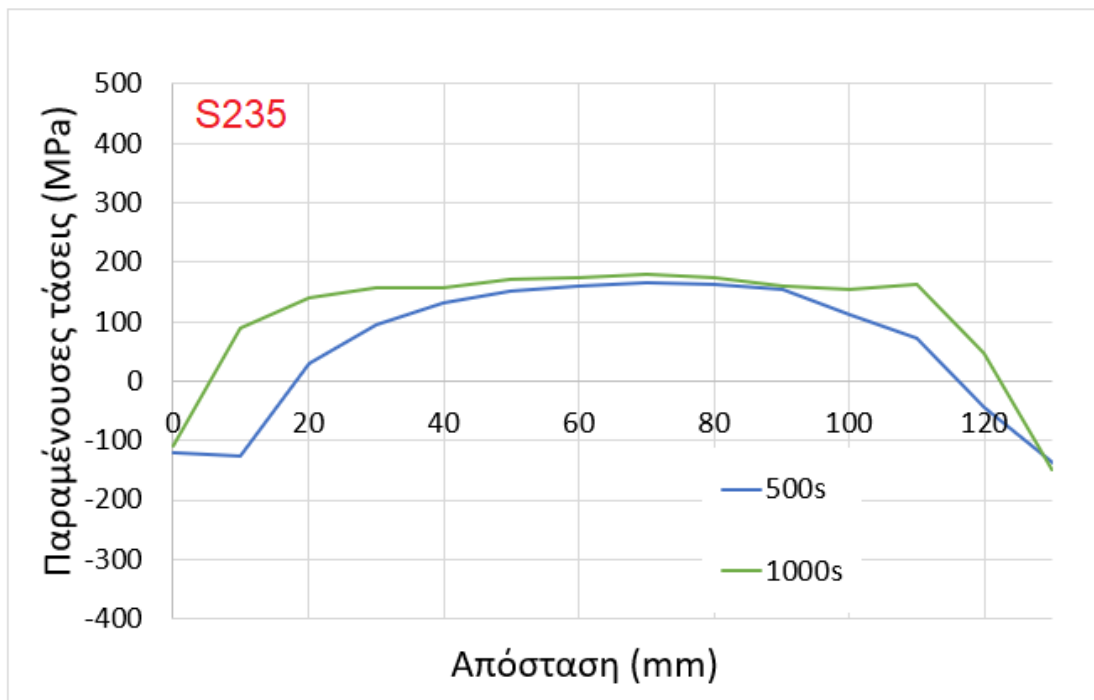
Εικόνα 5.22 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S690.



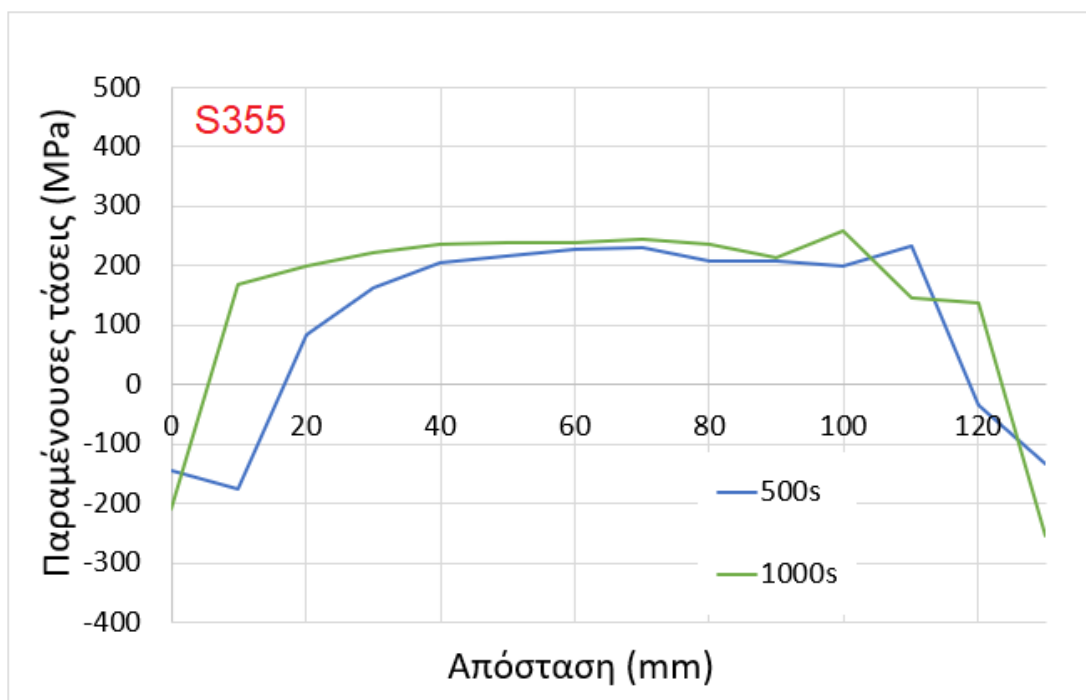
Εικόνα 5.23 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η συγκόλληση (500s), για χάλυβες S235, S355 και S690.



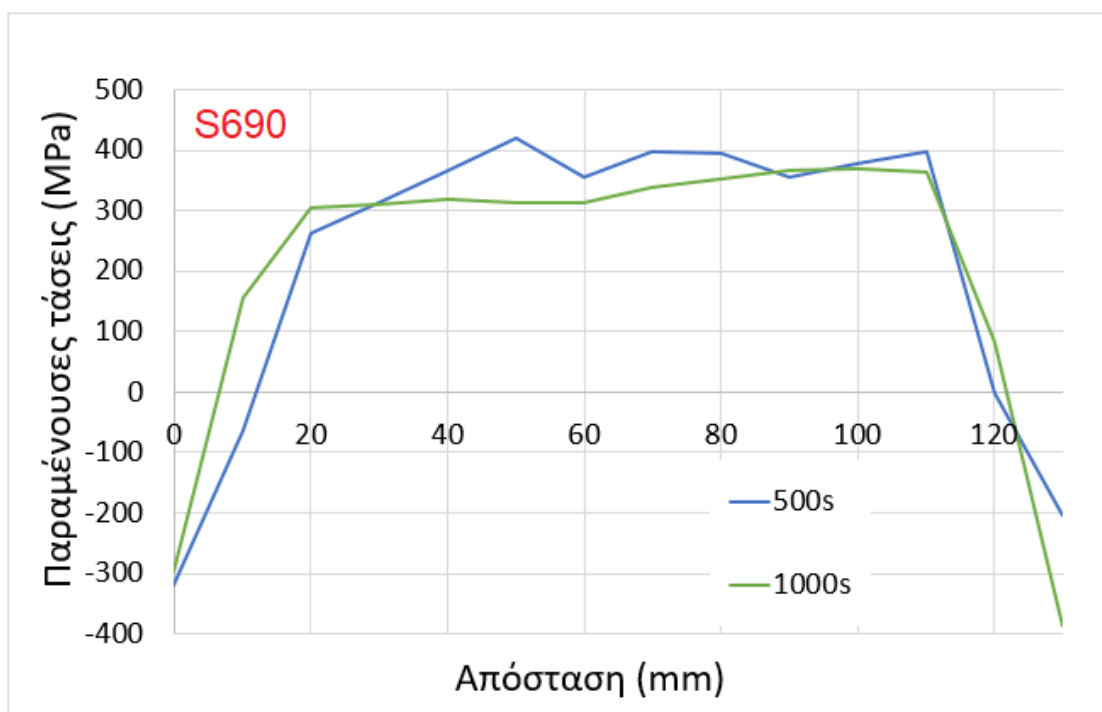
Εικόνα 5.24 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβες S235, S355 και S690.



Εικόνα 5.25 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S235.



Εικόνα 5.26 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S355.



Εικόνα 5.27 Κατανομή των παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης στη διαμήκη διεύθυνση, μετά την 1η (500s) και 2η συγκόλληση (1000s), για χάλυβα S690.

Στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.18](#) και [5.19](#) φαίνονται οι κατανομές των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης των τριών ποιτήτων χάλυβα (S235, S355 και S690), δηλαδή οι τάσεις που αναπτύσσονται εγκάρσια στη διεύθυνση της συγκόλλησης, μετά την ολοκλήρωση των θερμικών κύκλων για κάθε συγκόλληση, δηλαδή στα 500s και 1000s. Αντίστοιχα, στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.20](#) έως [5.22](#) φαίνεται η κατανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων για εκάστοτε ποιότητα χάλυβα.

Αντίστοιχα, στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.23](#) και [5.24](#) φαίνονται οι κατανομές των διαμηκών παραμενουσών τάσεων της προσομοίωσης των τριών ποιτήτων χάλυβα (S235, S355 και S690), δηλαδή οι τάσεις που αναπτύσσονται παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης, μετά την ολοκλήρωση των θερμικών κύκλων για κάθε συγκόλληση, δηλαδή στα 500s και 1000s. Αντίστοιχα, στα διαγράμματα των [Εικόνων 5.25](#) έως [5.27](#) φαίνεται η κατανομή των διαμηκών παραμενουσών τάσεων για εκάστοτε ποιότητα χάλυβα.

Είναι γνωστό πως κατά την συγκόλληση αναπτύσσονται τόσο εφελκυστικά όσο και θλιπτικά φορτία. Ο χρόνος εμφάνισής τους και η τελική τους μορφή εξαρτάται από τον θερμικό κύκλο. Αρχικά, αναμένονται θλιπτικές τάσεις σε μια μικρή περιοχή αριστερά και δεξιά της συγκόλλησης διότι το μέταλλο βάσης δεν επιτρέπει την διαστολή του θερμικά επηρεασμένου μετάλλου ενώ, για να μπορέσει να υπάρξει ισορροπία, η αντίθετη εικόνα παρατηρείται στα υπόλοιπα τμήματα του ελάσματος. Με το πέρας, όμως, της συγκόλλησης η εικόνα αυτή αντιστρέφεται. Σε εκείνο τον χρόνο, έχουν αναπτυχθεί εφελκυστικές τάσεις καθώς πλέον το θερμικά επηρεασμένο μέταλλο αλλά και το τηγμένο μέταλλο ψύχονται, χωρίς ωστόσο να μπορούν να συσταλούν λόγω του μετάλλου βάσης, που τα περιορίζει, στο οποίο αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις ώστε να επέλθει ισορροπία (Παντελής, et al., 2017).

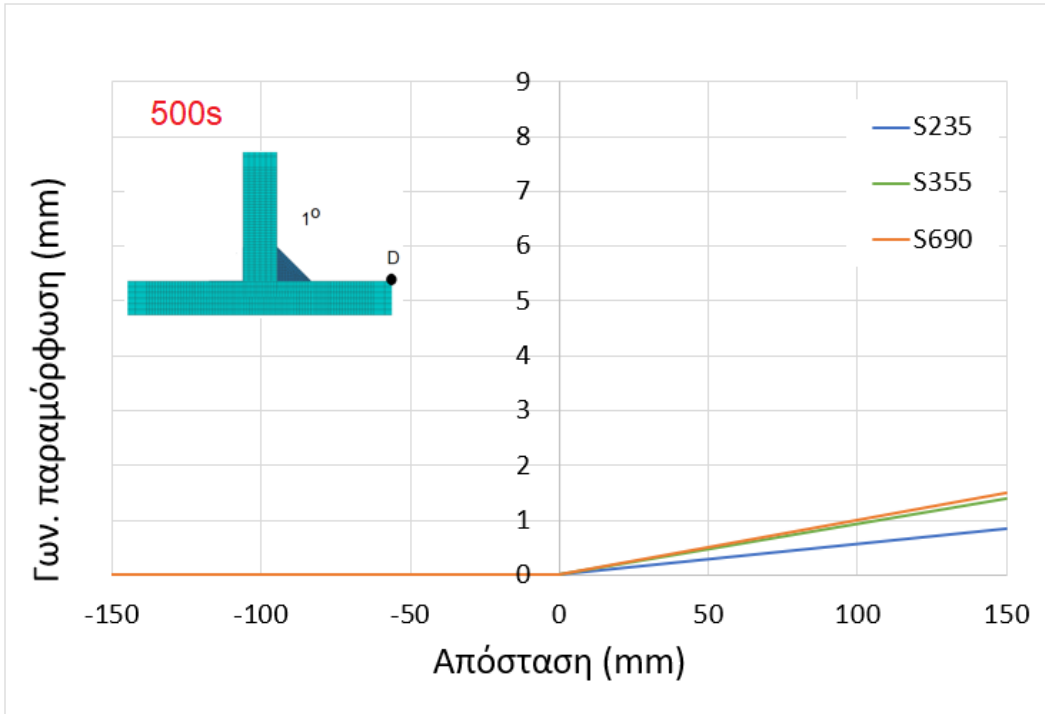
Όπως είναι αντιληπτό, από τα διαγράμματα των [Εικόνων 5.18](#) έως [5.27](#) παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοίωσης προβλέπει με ακρίβεια την μορφή της κατανομής τόσο των εγκάρσιων όσο και των διαμηκών παραμενουσών τάσεων. Ακόμη, σημαντικό είναι πως και για τις τρεις ποιότητες χάλυβα (S235, S355 και S355) οι εφελκυστικές τάσεις έχουν, όπως προβλέπεται, τιμή σχεδόν ίση με το όριο διαρροής τους. Επίσης, επειδή τα ελάσματα

προλαβαίνουν να ψυχθούν μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν τον δεύτερο θερμικό κύκλο, δεν παρατηρείται κάποια αύξηση στις μέγιστες τιμές των παραμενουσών τάσεων, κάτι λογικό και αναμενόμενο, καθώς η δεύτερη συγκόλληση (ή δεύτερος θερμικός κύκλος) ανατήκει το μέταλλο και, όπως είναι γνωστό, δεν δύναται να υπάρχουν τάσεις εντός του τήγματος.

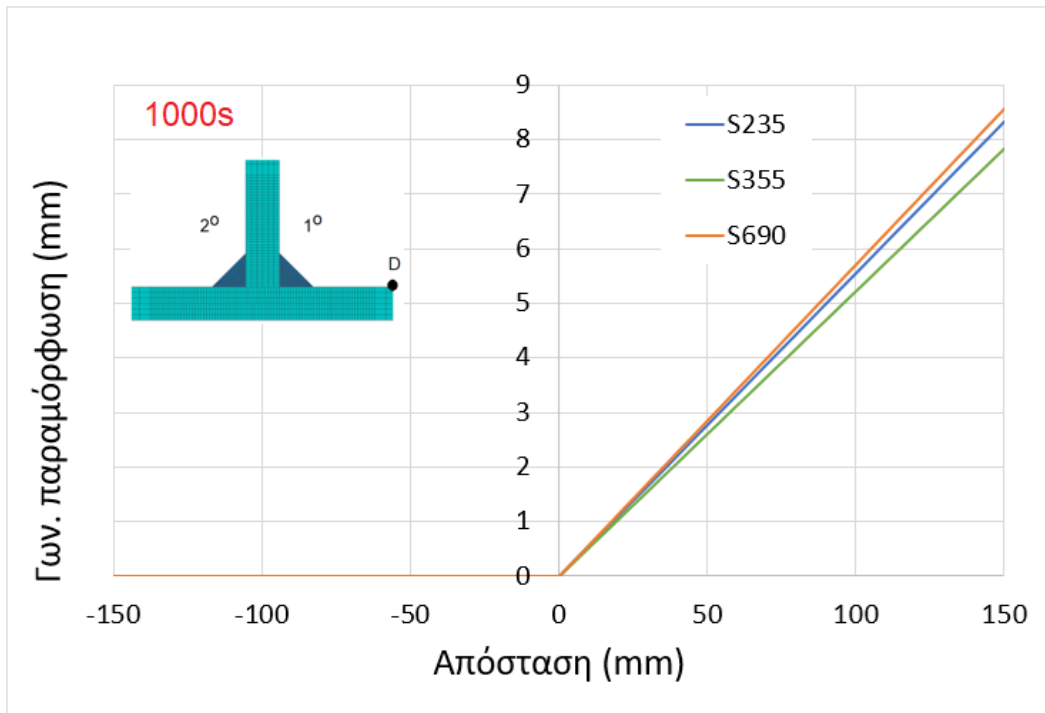
Στη συνέχεια, πέραν της μορφής της κατανομής, σημαντική είναι και η παρατήρηση των τιμών των αναπτυσσόμενων παραμενουσών τάσεων. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι με την αύξηση του ορίου διαρροής, ή απλά της αντοχής, κάθε εξεταζόμενης ποιότητας χάλυβα, παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση των τιμών των παραμενουσών τάσεων. Αυτό, βεβαίως, δικαιολογείται από τις τιμές ή και τις μεταβολές του ορίου διαρροής των τριών ποιοτήτων χάλυβα (Εικόνα 5.8). Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής τόσο μεγαλύτερες αναμένονται οι τάσεις μετά την ψύξη του υλικού, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι εφελκυστικές τάσεις συνήθως είναι ίσες με την τιμή του ορίου διαρροής.

5.3.3 Σύγκριση γωνιακών παραμορφώσεων

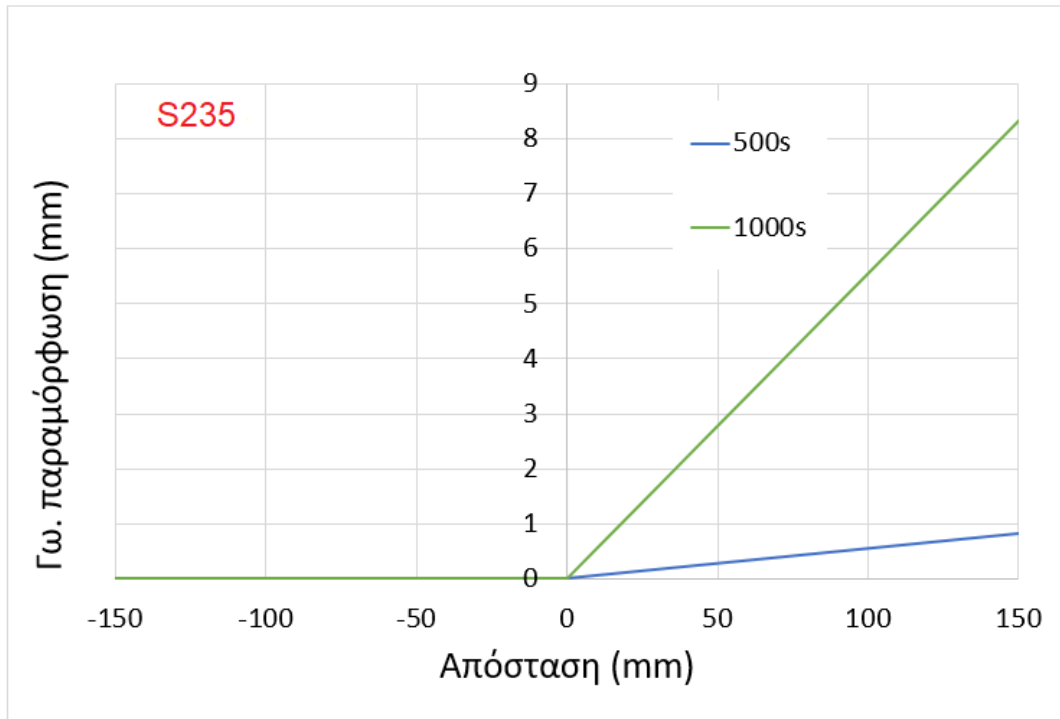
Η σύγκριση των γωνιακών παραμορφώσεων λόγω συγκόλλησης για τις τρεις ποιότητες χάλυβα (S235, S355 και S690), που προέκυψαν από την προσομοίωση, παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



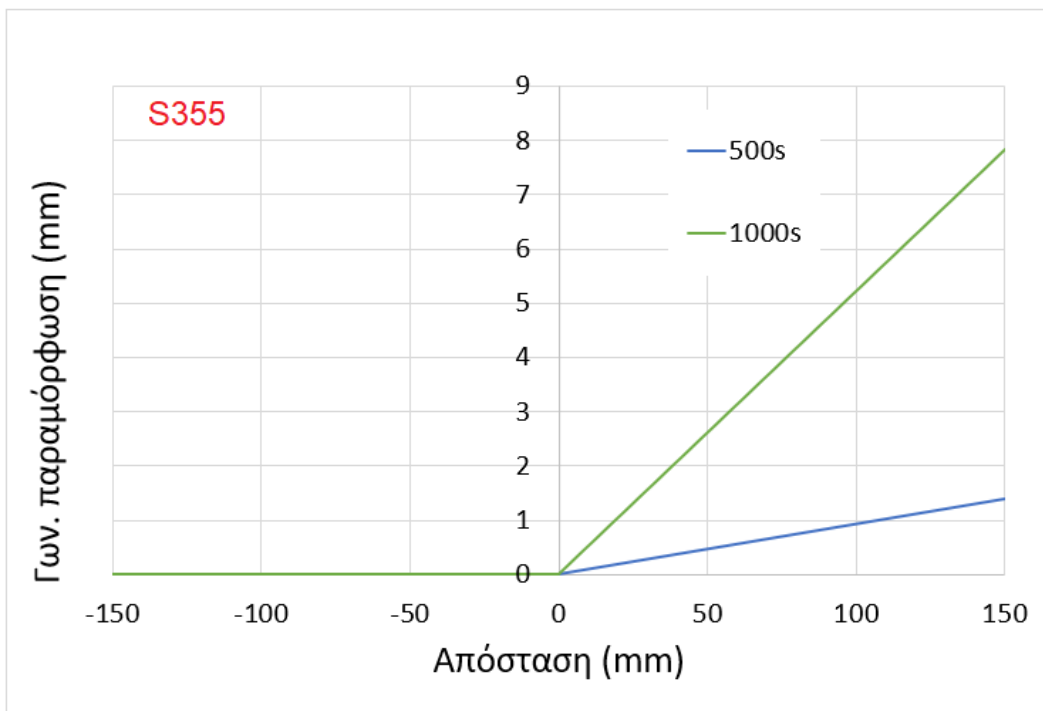
Εικόνα 5.28 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) συγκόλληση, για χάλυβες S235, S355 και S690.



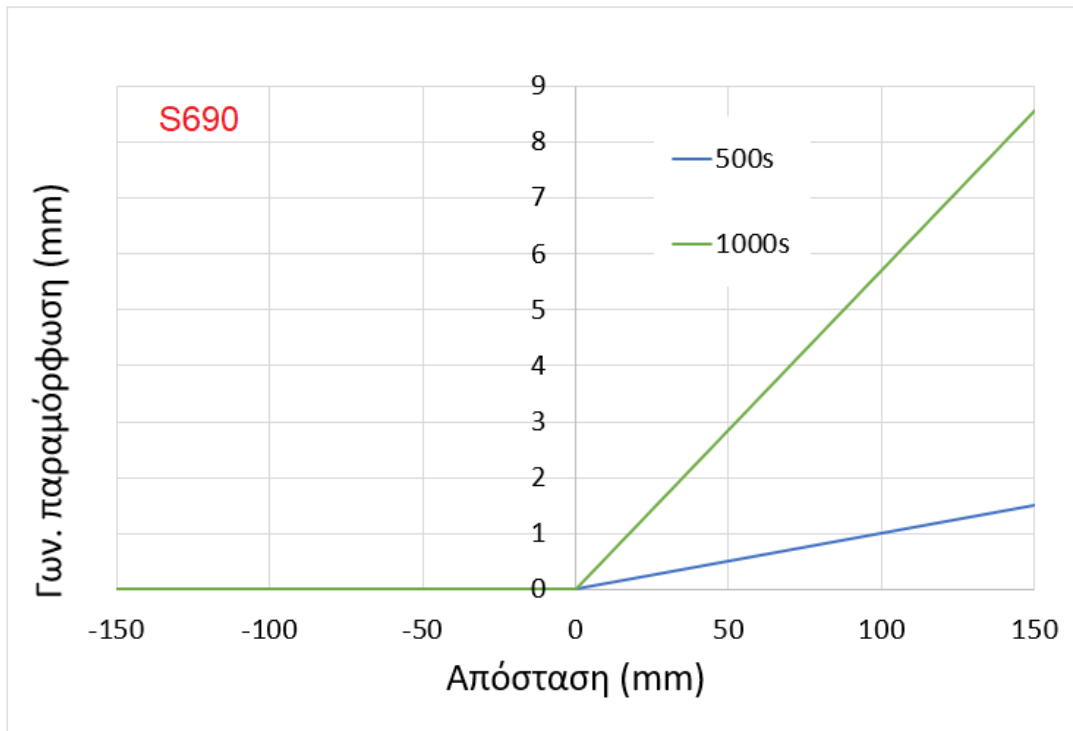
Εικόνα 5.29 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβες S235, S355 και S690.



Εικόνα 5.30 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S235.



Εικόνα 5.31 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S355.



Εικόνα 5.32 Γωνιακή παραμόρφωση της προσομοίωσης, μετά την 1η (500s) και την 2η (1000s) συγκόλληση, για χάλυβα S690.

Οι παραμορφώσεις που μελετήθηκαν και μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορούν στις γωνιακές παραμορφώσεις. Αυτές προκύπτουν στο μέταλλο λόγω της ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής κατά το πάχος του ελάσματος και αφορούν στην περιστροφή γύρω από τον άξονα της συγκόλλησης (Παντελής, et al., 2017).

Είναι προφανές ότι τα διαγράμματα είναι έτσι διαμορφωμένα, καθώς οι γωνιακές παραμορφώσεις είναι μονόπλευρες, αφού η μία πλευρά του ελάσματος βάσης είναι πακτωμένη καθ' όλη τη διάρκεια των συγκολλήσεων, μέχρι και την πλήρη ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Από τα διαγράμματα των Εικόνων 5.28 έως 5.32 παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις ο χάλυβας ποιότητας S690 έχει τις μέγιστες τιμές παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό είναι λογικό και εξαρτάται άμεσα από τις τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό και άρα από το όριο διαρροής. Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής ενός χάλυβα τόσο μεγαλύτερες θα

είναι οι παραμένουσες τάσεις αυτού, που ενισχύονται και από την περίπτωση μονόπλευρης πάκτωσης, οι οποίες θα αναγκάσουν το έλασμα να παραμορφωθεί. Εξίσου ενδιαφέρον είναι ότι παρά το μεγαλύτερο όριο διαρροής του χάλυβα ποιότητας S355, ο χάλυβας ποιότητας S235 παραμορφώνεται περισσότερο στα 1000s. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής των δύο υλικών (Εικόνα 5.6) κατά τον οποίο περιμένουμε σημαντικά μεγαλύτερη διαστολή του χάλυβα S235 σε σχέση με τον S355 στους ~900°C, αντίστοιχη, μάλιστα, με αυτή του S690 όπως μαρτυρεί και το διάγραμμα παραμορφώσεων. Οι παραπάνω παρατηρήσεις, που φαίνονται καθαρότερα στις Εικόνες 5.30 έως 5.32, μπορούν να δικαιολογηθούν και από το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young) των τριών υλικών. Η γωνιακή παραμόρφωση του χάλυβα S355 στο τέλος όλων των συγκολλήσεων είναι μικρότερη των άλλων δύο καθώς, όταν πλέον το υλικό φτάνει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (Εικόνα 5.7), γεγονός που του επιτρέπει μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης του να είναι ελαστικό, εν αντιθέσει με τις άλλες δύο ποιότητες.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε τόσο πειραματική όσο και υπολογιστική μελέτη της συγκόλλησης τόξου κατασκευαστικού χάλυβα. Στην πειραματική μελέτη, οι βασικοί άξονες μελέτης ήταν οι θερμικοί κύκλοι, οι παραμένουσες τάσεις και οι γωνιακές παραμορφώσεις, ενώ κατά την υπολογιστική μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της συγκόλλησης, με χρήση λογισμικού που πραγματοποιεί ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των πειραματικών και των αντίστοιχων υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Παρουσιάζεται έτσι μια πολυεπίπεδη μελέτη πάνω σε όλα τα θέματα που αφορούν στις συγκολλήσεις του κατασκευαστικού χάλυβα και ουσιαστικά, μέσα από τη διπλωματική αυτή εργασία αναδεικνύεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ πειράματος και μοντέλου προσομοίωσης. Θα ήταν αδύνατο, χωρίς τις πειραματικές μετρήσεις, να γίνουν οι κατάλληλες παραδοχές κατά την ανέγερση του μοντέλου προσομοίωσης. Αντίστοιχα, τα πειράματα πιθανότατα θα ήταν ανεπιτυχή αν βασιζόντουσαν μόνο στις βιβλιογραφικές αναφορές ή/και στις βασικές αρχές της φυσικής, των μαθηματικών, της θερμοδυναμικής κ.λπ. Το πείραμα και η παρατήρηση μέσω αυτού ήταν καθοριστικό τόσο για την εισαγωγή ρεαλιστικών παραδοχών και δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, όσο και για τη σωστή ερμηνεία και συσχέτιση της υπολογιστικής απεικόνισης με την πραγματική κατάσταση.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές εξαρτημένες από τη θερμοκρασία θερμομηχανικές ιδιότητες διαφόρων ποιοτήτων κατασκευαστικού χάλυβα στα θερμοκρασιακά πεδία, στις παραμένουσες τάσεις καθώς και στις γωνιακές παραμορφώσεις, που δημιουργούνται λόγω των συγκολλήσεων τόξου. Έτσι υλοποιήθηκαν και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις συγκόλλησης τόξου, βάσει συγκεκριμένης διαδικασίας, για τρεις ποιότητες κατασκευαστικού χάλυβα (S235, S355 και S690), από τις οποίες αντλήθηκαν

αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων, τα οποία εν συνεχεία συγκρίθηκαν και επιβεβαιώθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά/βιβλιογραφικά δεδομένα.

Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των εξαγόμενων τιμών των πλήρως υπολογιστικών μοντέλων, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Γενικά, τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να προβλέπουν με σχετικά πολύ καλή ακρίβεια τα αναπτυσσόμενα θερμοκρασιακά πεδία, την μορφή της κατανομής όσο και τις τιμές των παραμενουσών τάσεων, καθώς επίσης και τις τιμές των παραμορφώσεων.
- Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και του πλήρους θερμομηχανικού μοντέλου, πλέγμα μεγέθους 1mm (194535 nodes, 162150 elements), αποδίδει τα πιο πιστά αποτελέσματα ενώ ταυτοχρόνως αυτά λαμβάνονται σε εύλογο χρονικό διάστημα και μικρότερο της μίας ώρας.
- Για την επίτευξη όμως των ανωτέρω, η θερμική αγωγιμότητα k των υλικών, και όχι μόνο, ως ιδιότητα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, δεν θα πρέπει να διατηρείται σταθερή, όταν πρόκειται για προσομοίωση κυρίως των θερμικών φαινομένων των συγκολλήσεων.
- Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του ορίου διαρροής κάθε εξεταζόμενης ποιότητας χάλυβα, παρατηρείται και αντίστοιχη αύξηση των τιμών των παραμενουσών τάσεων. Αυτό, βεβαίως, δικαιολογείται από τις τιμές ή και τις μεταβολές του ορίου διαρροής των τριών ποιότητων χάλυβα. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής τόσο μεγαλύτερες αναμένονται οι τάσεις μετά την ψύξη του υλικού, καθώς, οι εφελκυστικές τάσεις συνήθως είναι ίσες με την τιμή του ορίου διαρροής.
- Παρατηρήθηκε επίσης, πως σε όλες τις περιπτώσεις ο χάλυβας ποιότητας S690 εμφανίζει τις μέγιστες τιμές παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό είναι λογικό και εξαρτάται άμεσα από τις τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό, άρα από το όριο διαρροής του. Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής ενός χάλυβα τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι παραμένουσες τάσεις αυτού, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψιν το πάχος ή και ο όγκος των ελασμάτων.

- Εξίσου ενδιαφέρουσα είναι η παρατήρηση ότι παρά το μεγαλύτερο όριο διαρροής του χάλυβα ποιότητας S355, ο χάλυβας ποιότητας S235 παραμορφώθηκε περισσότερο κατά τον 2^ο θερμικό κύκλο. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από τον συντελεστή θερμικής διαστολής των δύο υλικών κατά τον οποίο περιμένουμε σημαντικά μεγαλύτερη διαστολή του χάλυβα S235 σε σχέση με τον S355 σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορούν να δικαιολογηθούν και από το μέτρο ελαστικότητας των τριών υλικών.
- Τέλος, η γωνιακή παραμόρφωση του χάλυβα ποιότητας S355, στο τέλος και των δύο συγκολλήσεων, είναι μικρότερη των άλλων δύο ποιοτήτων, καθώς, το υλικό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, γεγονός που του επιτρέπει μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης του να είναι ελαστικό, εν αντιθέσει με τις άλλες δύο ποιότητες.

Σχετικά με την συνέχεια της παρούσας έρευνας, ο συγγραφέας προτείνει συμπληρωματικά των ανωτέρω α) την μελέτη της επίδρασης του μετασχηματισμού των φάσεων στα θερμοκρασιακά πεδία, στις παραμένουσες τάσεις και στις παραμορφώσεις, η οποία θα συμπληρωθεί και με μεταλλογραφικές αναλύσεις και β) τη μελέτη της επίδρασης της ακολουθίας συγκόλλησης, με σκοπό να διερευνηθεί αν υπάρχει κάποια ακολουθία συγκόλλησης που μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, κυρίως σε ότι αφορά στις παραμένουσες τάσεις και στις παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης τόξου.

[κενή σελίδα]

Βιβλιογραφία

Alhassan, M. & Bashiru, Y., 2021. Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels. *World Journal of Engineering and Technology*, pp. 782-792.

Anca, A., Cardona, A., Risso, J. & Fachinotti, V., 2011. Finite element modeling of welding processes. *Applied Mathematical Modelling*, pp. 688-707.

Anon., χ.χ. *Carbon-Manganese (CMn)*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/carbon-manganese-cmn/>

[Πρόσβαση 25 Αύγουστος 2022].

Armentani, E., Esposito, R. & Sepe, R., 2007. The effect of thermal properties and weld efficiency on residual stresses in welding. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Ιανουάριος-Φεβρουάριος, pp. 319-322.

Asserin, O., Loredo, A., Petelet, M. & Iooss, B., 2011. Global sensitivity analysis in welding simulations—What are the material data you really need?. *Finite Elements in Analysis and Design*, Σεπτέμβριος, pp. 1004-1016.

Bachorski, A., Painter, M., Smailes, A. & Wahab, M., 1999. Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 405-409.

Baddoo, N. & Brown, D., 2015. <https://www.newsteelconstruction.com/>. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.newsteelconstruction.com/wp/wp-content/uploads/TechPaper/TechNSCSept15.pdf>

[Πρόσβαση 25 Αύγουστος 2022].

Barroso, A. και συν., 2010. Prediction of welding residual stresses and displacements by simplified models. Experimental validation. *Materials & Design*, Μάρτιος, pp. 1338-1349.

Bhatti, A., Barsoum, Z. & Khurshid, M., 2014. Development of a finite element simulation framework for the prediction of residual stresses in large welded structures. *Computers and Structures*, pp. 1-11.

Cañas, J. και συν., 1996. A simplified numerical analysis of residual stresses in aluminum welded plates. *Computers & Structures*, 3 Ιανουάριος, pp. 59-69.

Chen, B. & Hashemzadeh, M., 2014. Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1121-1131.

Daniyan, I., Mpofo, K. & Adeodu, A., 2019. Investigating the Thermal Properties of Carbon Steel STKM13a for the Welding Assembly of Rail Car Suspension System. *Conference on Manufacturing Systems*, pp. 886-891.

Davis, J., 2001. High-Strength Low-Alloy Steels. Στο: *Alloying: Understanding The Basics*. Ohio: ASM International, p. 193.

EN10025-2, 2019. *BS EN10025-2: Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN10025-6+A1, 2009. *BS EN10025-6: Hot rolled products of structural steels - Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN10025-6, 2019. *BS EN10025-6: Hot rolled products of structural steels - Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN1993-1-10, 2005. *EN 1993-1-10: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN1993-1-1, 2005. *EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.

Eren, İ. & Karasu Asnaz, M., 2022. Finite element simulation and experimental validation of welding distortion of fillet welded T-joints. *Journal of Polytechnic*, pp. 455-466.

- Ghafouri, M., Ahola, A., Björk, T. & Ahn, J., 2022. Numerical and experimental investigations on the welding residual stresses and distortions of the short fillet welds in high strength steel plates. *Engineering Structures*.
- Ghavami, P., 2015. *Mechanics of Materials An Introduction to Engineering Technology*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Gkantou, M., Theofanous, M. & Baniotopoulos, C., 2018. Plastic Design of Hot-finished High Strength Steel Continuous Beams. *Thin-Walled Structures*, pp. 85-95.
- Goldak, J., Chakravarti, A. & Bibby, M., 1984. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Metallurgical Transactions*, Ιούνιος.
- Gunn, R., 1997. *Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Hakansson, K., 2002. *Weld Metal Properties for Extra High Strength Steels*. Stockholm: The Royal Institute of Technology (KTH).
- Heinze, C., Schwenk, C. & Rethmeier, M., 2012. Effect of heat source configuration on the result quality of numerical calculation of welding-induced distortion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Ιανουάριος, pp. 112-123.
- Hu, X. & Feng, Z., 2021. *Advanced High-Strength Steel—Basics and Applications in the Automotive Industry*, Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory.
- ISU, I. S. U., χ.χ. <https://www.nde-ed.org/>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Mechanical/Creep.xhtml>
[Πρόσβαση 25 08 2022].
- Jenney, C. & O'Brien, A., 2001. *Welding Handbook Vol. 1*. 9th επιμ. Florida: American Welding Society.
- Jiang, W., Yahiaoui, K., Hall, F. & Laoui, T., 2005. Finite Element Simulation of Multipass Welding: Full Three-Dimensional Versus Generalized Plane Strain or Axisymmetric Models. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*.
- Kasuya, T., Yurioka, N. & Okumura, M., 1995. Methods for Predicting Maximum Hardness of Heat-Affected Zone and Selecting Necessary Preheat Temperature for Steel Welding. *Nippon Steel Technical Report No. 65*, Απρίλιος.
- Keeler, S., Kimchi, M. & Mooney, P., 2017. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines*. 6η Έκδοση επιμ. s.l.:WorldAutoSteel.

- Komanduri, R. & Hou, Z. B., 2001. Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part II. Effect of Variation of Thermophysical Properties with Temperature. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Ιούνιος, pp. 483-499.
- Li, L. και συν., 2021. Prediction of Welding Deformation and Residual Stress of a Thin Plate by Improved Support Vector Regression. *Scanning*, 3 Μάρτιος.
- Little, G. & Kamtekar, A., 1998. The effect of thermal properties and weld efficiency on transient temperatures during welding. *Computers & Structures*, 1 Ιούλιος, pp. 157-165.
- Michaleris, P. & DeBiccari, A., 1997. Prediction of Welding Distortion: A two-step numerical analysis technique was developed to predict welding-induced distortion and the structural integrity of large and complex structures. *Welding Research Supplement*.
- Nodeh, I., Serajzadeh, S. & Kokabi, A., 2008. Simulation of welding residual stresses in resistance spot welding, FE modeling and X-ray verification. *journal of materials processing technology*, pp. 60-69.
- Nordenstam, J. & Svantesson, G., 2016. *High strength steel in conventional building structures*. Sweden: Chalmers University of Technology.
- Rosenthal, D., 1946. The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatments. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Τόμος 68, pp. 849-866.
- Sakaguchi, R. & Powers, J., 2012. *Craig's Restorative Dental Materials*. 13η Έκδοση επιμ. Philadelphia: Mosby, Inc..
- Smith, P., 2007. *The Fundamentals of Piping Design*. Houston: Gulf Publishing Company.
- Teng, T., Fung, C., Chang, P. & Yang, W., 2001. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 523-538.
- Tikhomirov, D., Rietman, B., Kose, K. & Makkink, M., 2005. Computing Welding Distortion: Comparison of Different Industrially Applicable Methods. *Advanced Materials Research*.
- Uijl, N. D. & Carless, L., 2012. Advanced metal-forming technologies for automotive applications. Στο: *Advanced Materials in Automotive Engineering*. Netherlands: Tata Steel RD&T, pp. 28-56.

- Zhu, X. & Chao, Y., 2002. Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*, Μάιος, pp. 967-976.
- Γαλιατσάτος, Ν., Λιναρδάτος, Γ. & Λιναρδάτος, Δ., 2016. *ANTOXH ΥΛΙΚΩΝ*. 2η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Διαμαντούδης, Θ., 2000. *Συγκολλήσεις Μετάλλων*. 2η επιμ. Thessaloniki: Θ. Α. Διαμαντούδης.
- Ναντέρ, Μ., 2020. *Αριθμητική προσομοίωση συγκολλήσεων τόξου*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Νίκας, Κ. & Παπάζογλου, Ε., 2010. *Αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας για Μηχανικούς: Συνοπτική Θεωρία και Ασκήσεις*. 1η επιμ. Athens: Νίκας - Παπάζογλου.
- Παντελής, Δ., Παπάζογλου, Β. & Χαϊδεμενόπουλος, Γ., 2017. *Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.