

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ TIG  
ΣΤΟ ΧΑΛΥΒΑ ARMOX 500T**

υπό

**ΛΟΥΚΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ**

Επιβλέπων

**ANNA ZEPBAKH**

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

2018

© 2018 Κωνσταντίνος Λούκας

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

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής  
(Επιβλέπων)

Δρ. Άννα Ζερβάκη  
ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Σπύρος Καραμάνος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Άννα Ζερβάκη, επιβλέπουσα καθηγήτρια, για τη βοήθεια και την καθοδήγηση στην εκπόνηση της διπλωματικής και για τη διόρθωση αυτής. Επιπλέον τη ευχαριστώ για την τεράστια υποστήριξη και υπομονή που επέδειξε κατά τη διάρκεια του εξαμήνου.

Επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της επιτροπής, κ.κ. Σπύρο Καραμάνο και Αλέξη Κερμανίδη, για την προσεχτική ανάγνωση και διόρθωση της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη Στραντζοποιία Βόλου- Αφοί Λαζάρου για την πραγματοποίηση των συγκολλήσεων, και ιδιαίτερα στον κ. Λάζαρο Λαζάρου, για την άψογη συνεργασία και τις χρήσιμες συμβουλές που μου προσέφερε όλο αυτόν τον καιρό.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Γρηγόρη Σαρβάνης και Γιαννούλα Χαρζοπούλου, για την πολύτιμη βοήθεια στη διεξαγωγή των δοκιμών εφελκυσμού.

Τέλος, οι μεγαλύτερες ευχαριστίες πάνε στην οικογένεια μου για τη δυνατότητα σπουδών που μου προσέφεραν σε δύσκολους καιρούς και για την αμέριστη στήριξη, και στους φίλους μου που μου χάρισαν τόσες όμορφες και απίστευτες στιγμές τα τελευταία χρόνια.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι προηγμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής, χαμηλής περιεκτικότητας κραματικών στοιχείων (AHSS) χρησιμοποιούνται εκτενώς για στρατιωτικές εφαρμογές. Στην κατηγορία αυτών των υλικών ανήκει ο χάλυβας ArmoX 500T, ο οποίος αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το χαμηλό κόστος παραγωγής σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, την καλή διαμορφωσιμότητα και κυρίως την υψηλή βαλλιστική απόδοση αποτελούν τους βασικούς παράγοντες για την επιλογή του ArmoX 500T σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή προστασία και ασφάλεια. Η βαλλιστική απόδοση ενός υλικού εξαρτάται από ιδιότητες όπως η ολκιμότητα, η σκληρότητα, η αντοχή και η συγκολλησιμότητα.

Στο σύνολο των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιείται ο χάλυβας ArmoX 500T απαιτείται η συγκόλληση ελασμάτων του υλικού και επομένως είναι πολύ σημαντική η καλή συμπεριφορά του υλικού κατά τη διεργασία της συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που επηρεάζουν σημαντικά το τελικό προϊόν της κατεργασίας. Οι μεταβολές στη μικροδομή και στις μηχανικές ιδιότητες θα πρέπει να ελέγχονται όσο το δυνατόν περισσότερο, έτσι ώστε η απόδοση της συγκολλητής κατασκευής να μην υποβαθμίζεται.

Η συγκόλληση με τη μέθοδο TIG προσφέρει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας και ελέγχου του ρυθμού εισαγωγής θερμότητας (PEΘ) σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους συγκόλλησης τήξης. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις TIG σε ελάσματα χάλυβα ArmoX 500T με διαφορετικές τιμές PEΘ. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή αξιολόγηση των συγκολλήσεων ως προς τη μικροδομή, τη μικροσκληρότητα και τις ιδιότητες εφελκυσμού και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης. Παράλληλα υπολογίστηκε ο ρυθμός ψύξης για κάθε μία από τις συγκολλήσεις.

Τα συμπεράσματα της εργασίας συσχετίζουν τις συνθήκες συγκόλλησης με τις παρατηρούμενες αλλαγές στη μικροδομή, στη μικροσκληρότητα και στην αντοχή των συγκολλήσεων. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν από τους τελικούς χρήστες προκειμένου να επιλεγούν οι βέλτιστες παράμετροι συγκόλλησης.

## Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	11
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	12
2.1	Γενικά.....	12
2.2	Χάλυβες Χαμηλής Κραμάτωσης Υψηλής Αντοχής (HSLA).....	14
2.3	Χάλυβες στρατιωτικών εφαρμογών (Armox 500T) .....	16
2.3.1	Γενικά.....	16
2.3.2	Χάλυβας Armox 500T.....	16
2.3.3	Συγκολλησιμότητα χαλύβων Armox.....	19
2.3.4	Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW ή TIG) .....	21
2.4	Ερευνητική Δραστηριότητα στους Armox steels .....	24
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	32
3.1	Οπτικός έλεγχος .....	33
3.2	Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος.....	33
3.3	Μικροσκληρομετρήσεις .....	34
3.4	Δοκιμές εφελκυσμού.....	35
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	38
4.1	Οπτικός έλεγχος-Μακροδομή συγκολλήσεων .....	38
4.2	Μεταλλογραφικός Έλεγχος.....	44
4.3	Μικροσκληρομετρήσεις .....	61
4.4	Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού .....	70
4.5	Θεωρητικός υπολογισμός ρυθμού ψύξης.....	76
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	83
5.1	Μεταλλογραφία.....	83
5.2	Μικροσκληρομετρήσεις .....	83
5.3	Εφελκυσμός.....	84
5.4	Ρυθμοί Ψύξης.....	84
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Κατηγοριοποίηση και είδη χάλυβα .....	12
Πίνακας 2.2 Τυποποίηση και είδη χάλυβα [16].....	13
Πίνακας 2.3 Συστατικές Ιδιότητες των φάσεων φερρίτη, ωστενίτη και μαρτενσίτη .....	15
Πίνακας 2.4 Χημική Σύσταση του χάλυβα ArmoX 500T[5] .....	18
Πίνακας 2.5 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα ArmoX 500T[5].....	18
Πίνακας 2.6 Ισοδύναμα άνθρακα για τα διάφορα είδη ArmoX[6].....	20
Πίνακας 2.7 Ιδιότητες ArmoX 500T υπολογισμένες μετά από προσομοίωση ψύξης[10].....	27
Πίνακας 2.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ArmoX 500T μετά από θέρμανση πάνω από την A <sub>1</sub> [11].....	28
Πίνακας 2.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ArmoX 500T μετά από θέρμανση κάτω από την A <sub>1</sub> [11].....	28
Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση ηλεκτροδίου OK Tigrod 12.64[15].....	32
Πίνακας 3.2 Μηχανικές ιδιότητες ηλεκτροδίου OK Tigrod 12.64[15] .....	32
Πίνακας 3.3 Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων .....	33
Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτικός πίνακας ελέγχων και δοκιμών .....	37
Πίνακας 4.1 Τιμές πλάτους και βάθους διείσδυσης της λίμνης συγκόλλησης.....	43
Πίνακας 4.2 Τιμές του PEΘ και του πλάτους της ΘΕΖ για τα 5 δοκίμια .....	69
Πίνακας 4.3 Πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμής εφελκυσμού .....	70
Πίνακας 4.4 Ρυθμοί ψύξης για τα δοκίμια.....	76

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1 Θερμικές κατεργασίες για την παραγωγή Armox 500T .....	17
Διάγραμμα 2.2 Διάγραμμα CCT του χάλυβα Armox 500T .....	19
Διάγραμμα 2.3 Προφίλ σκληρομετρήσεων κατά μήκος της ΘΕΖ [9].....	26
Διάγραμμα 2.4 Πειραματικά Αποτελέσματα, Όριο Διαρροής στο Μέταλλο Συγκόλλησης και Βασικό Μέταλλο[9] .....	26
Διάγραμμα 2.5 Αριθμός και μήκος ρωγμών[13] .....	29
Διάγραμμα 2.6 (a)Μηχανική τάση-παραμόρφωση, (b)Πραγματική τάση-Πραγματική πλαστική παραμόρφωση[14] .....	31
Διάγραμμα 4.1 Γραφική απεικόνιση βάθους διείδυσης συγκόλλησης σε συνάρτηση με το PEΘ	43
Διάγραμμα 4.2 Γραφική απεικόνιση πλάτους λίκνης συγκόλλησης σε συνάρτηση με το PEΘ ....	44
Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 1 στην πάνω επιφάνεια.....	61
Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 2 στην πάνω επιφάνεια.....	62
Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 3 στην πάνω επιφάνεια.....	63
Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στην πάνω επιφάνεια.....	64
Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στο μέσο του δοκιμίου .....	65
Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στην κάτω επιφάνεια.....	65
Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 σε τρεις περιοχές .....	66
Διάγραμμα 4.10 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στην πάνω επιφάνεια.....	67
Διάγραμμα 4.11 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στο μέσο του δοκιμίου .....	68
Διάγραμμα 4.12 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στην κάτω επιφάνεια.....	68
Διάγραμμα 4.13 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 σε τρεις περιοχές .....	69
Διάγραμμα 4.14 Γραφική απεικόνιση πλάτους ΘΕΖ σε συνάρτηση με το PEΘ.....	70
Διάγραμμα 4.15 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4_A.....	72
Διάγραμμα 4.16 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4_B.....	73
Διάγραμμα 4.17 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5_A.....	74
Διάγραμμα 4.18 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5_B.....	75
Διάγραμμα 4.19 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 1.....	77
Διάγραμμα 4.20 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 2.....	77
Διάγραμμα 4.21 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 3.....	78
Διάγραμμα 4.22 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 100 <sup>0</sup> C.....	78
Διάγραμμα 4.23 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 200 <sup>0</sup> C.....	79
Διάγραμμα 4.24 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 300 <sup>0</sup> C.....	79
Διάγραμμα 4.25 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 100 <sup>0</sup> C.....	80
Διάγραμμα 4.26 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 200 <sup>0</sup> C.....	811
Διάγραμμα 4.27 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 300 <sup>0</sup> C.....	811



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Κατηγορίες χαλύβων βάσει της αντοχής και της ολκιμότητας .....	14
Εικόνα 2.2 Μικροδομή ArmoX 500T (επαναφερμένος μαρτενσίτης) .....	18
Εικόνα 2.3 Εξοπλισμός Συγκόλλησης TIG .....	22
Εικόνα 2.4 Μέθοδος Συγκόλλησης με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου (TIG) .....	23
Εικόνα 2.5 ΘΕΖ μετά από κοπή με laser, ArmoX 600 (μεγεθ. ×50)[8] .....	24
Εικόνα 2.6 ΘΕΖ μετά από κοπή με πλάσμα, ArmoX 600 (μεγεθ. ×50)[8] .....	25
Εικόνα 2.7 Δοκίμιο ArmoX 500T μετά από χημική προσβολή[13] .....	29
Εικόνα 2.8 ArmoX 500T, Βασικό μέταλλο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[14] .....	30
Εικόνα 2.9 ArmoX 500T, LHF ηλεκτρόδιο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[14] .....	30
Εικόνα 2.10 ArmoX 500T, ASS ηλεκτρόδιο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[14] .....	31
Εικόνα 3.1 Κοπή δοκιμίων για μεταλλογραφική προετοιμασία .....	34
Εικόνα 3.2 Μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 .....	35
Εικόνα 3.3 Δοκίμια εφελκυσμού για δείγμα 4 .....	36
Εικόνα 3.4 Δοκίμια εφελκυσμού για δείγμα 5 .....	36
Εικόνα 3.5 Σχέδιο δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8 .....	36
Εικόνα 4.1 Δοκίμιο 1 .....	38
Εικόνα 4.2 (×6.5) Δοκίμιο 1, μέτωπο της συγκόλλησης .....	38
Εικόνα 4.3 Δοκίμιο 1, τομή της συγκόλλησης .....	38
Εικόνα 4.4 Δοκίμιο 2 .....	39
Εικόνα 4.5 (×6.5) Δοκίμιο 2, μέτωπο της συγκόλλησης .....	39
Εικόνα 4.6 (×6.5) Δοκίμιο 2, τομή της συγκόλλησης .....	39
Εικόνα 4.7 Δοκίμιο 3 .....	40
Εικόνα 4.8 (×6.5) Δοκίμιο 3, μέτωπο της συγκόλλησης .....	40
Εικόνα 4.9 (×6.5) Δοκίμιο 3, τομή της συγκόλλησης .....	40
Εικόνα 4.10 Δοκίμιο 4 .....	41
Εικόνα 4.11 (×6.5) Δοκίμιο 4, πάνω επιφάνεια της συγκόλλησης .....	41
Εικόνα 4.12 (×6.5) Δοκίμιο 4, κάτω επιφάνεια της συγκόλλησης .....	41
Εικόνα 4.13 (×10) Δοκίμιο 4, τομή της συγκόλλησης .....	41
Εικόνα 4.14 Δοκίμιο 5 .....	42
Εικόνα 4.15 (×6.5) Δοκίμιο 5, πάνω επιφάνεια της συγκόλλησης .....	42
Εικόνα 4.16 (×6.5) Δοκίμιο 5, κάτω επιφάνεια της συγκόλλησης .....	42
Εικόνα 4.17 (×6,5) Δοκίμιο 5, τομή της συγκόλλησης .....	42
Εικόνα 4.18 Σχεδιάγραμμα μεταλλογραφικής ανάλυσης των δειγμάτων .....	44
Εικόνα 4.19 (×1000) Δομή βασικού μετάλλου, επαναφερμένος μαρτενσίτης (περιοχή 5) .....	45
Εικόνα 4.20 (×1000) Δομή βασικού μετάλλου, επαναφερμένος μαρτενσίτης (περιοχή 5) .....	45
Εικόνα 4.21 (×50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1) .....	46
Εικόνα 4.22 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2) .....	47
Εικόνα 4.23 (×200) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3) .....	47
Εικόνα 4.24 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3) .....	48
Εικόνα 4.25 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4) .....	48
Εικόνα 4.26 (×50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1) .....	49
Εικόνα 4.27 (×500) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2) .....	50
Εικόνα 4.28 (×500) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3) .....	50
Εικόνα 4.29 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4) .....	51
Εικόνα 4.30 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4) .....	51
Εικόνα 4.31 (×100) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1) .....	52
Εικόνα 4.32 (×500) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2) .....	53
Εικόνα 4.33 (×500) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3) .....	53
Εικόνα 4.34 (×100) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4) .....	54

Εικόνα 4.35 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4).....	54
Εικόνα 4.36(×200) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1).....	55
Εικόνα 4.37 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)....	56
Εικόνα 4.38 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3).....	56
Εικόνα 4.39 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4).....	57
Εικόνα 4.40 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4).....	57
Εικόνα 4.41 (×50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1).....	58
Εικόνα 4.42 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)....	59
Εικόνα 4.43 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3).....	59
Εικόνα 4.44 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4).....	60
Εικόνα 4.45 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4).....	60
Εικόνα 4.46 Εφελκυσμός και θραύση δοκιμίου .....	71
Εικόνα 4.47 Δοκίμιο 4_A, θέση θραύσης στη ΘΕΖ.....	72
Εικόνα 4.48 Δοκίμιο 4_B, θέση θραύσης στη ΘΕΖ.....	73
Εικόνα 4.49 Δοκίμιο 5_A, θέση θραύσης στο βασικό μέταλλο .....	74
Εικόνα 4.50 Δοκίμιο 5_B, θέση θραύσης στο βασικό μέταλλο .....	75

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ- ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι χάλυβες Armox χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή που τα καθιστά κατάλληλα υλικά για την προστασία και ενίσχυση διαφόρων κατασκευών. Με την προσπάθεια ανάπτυξης υλικών με μεγάλη αντοχή και καλή ταυτόχρονα απόδοση, τα τελευταία χρόνια μεγάλη είναι η ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τους χάλυβες Armox και την απόδοσή τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται κυρίως από τις κατεργασίες στις οποίες θα υποβληθεί καθώς η έκθεση των συγκεκριμένων χαλύβων σε υψηλές θερμοκρασίες έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν οι αιτίες της μεταβολής των ιδιοτήτων του υλικού και να καθοριστούν τρόποι για την αποφυγή αυτού του φαινομένου. Σε αυτή την κατηγορία χαλύβων ανήκει και ο χάλυβας Armox 500T, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές για την προστασία και θωράκιση κτιρίων και οχημάτων, οπότε γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητη η πλήρης αποτελεσματικότητά του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, μέσω πειραματικής διαδικασίας, της επίδρασης της συγκόλλησης με τη μέθοδο TIG στο χάλυβα Armox 500T με διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης και η βελτιστοποίηση αυτών. Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις στον Armox 500T με τη μέθοδο TIG και στη συνέχεια τα δοκίμια προετοιμάστηκαν μεταλλογραφικά έτσι ώστε να γίνει η μελέτη τους.

Η εργασία διαρθρώνεται σε 6 κεφάλαια:

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στις κατηγορίες των χαλύβων και εξετάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι χάλυβες υψηλής αντοχής. Μεγάλη έμφαση δίνεται στους χάλυβες στρατιωτικών εφαρμογών και ιδιαίτερα στον Armox 500T, για τον οποίο αναφέρονται οι ιδιότητες του και η ερευνητική διαδικασία που έχει γίνει μέχρι τώρα. Παράλληλα, παρουσιάζεται η διαδικασία και τα χαρακτηριστικά της μεθόδου TIG.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσεται η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία και μελέτη των συγκολλητών δοκιμίων.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα του οπτικού και μικροσκοπικού ελέγχου, των μικροσκληρομετρήσεων και των δοκιμών εφελκυσμού των δοκιμίων. Επίσης δίδονται και τα διαγράμματα των ρυθμών ψύξεως που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση Adams προκειμένου να γίνει πρόβλεψη της τελικής δομής των δειγμάτων.

Τέλος, στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται συνολικά τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων και τη βέλτιστη απόδοση του υλικού.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Γενικά

Ο χάλυβας είναι κράμα Fe-C με περιεκτικότητες μικρότερες από 2,06% άνθρακα, ενώ στη μη κραματωμένη μορφή του περιέχει και διάφορα άλλα στοιχεία, όπως Mn, Si, P και S σε μικρές ποσότητες. Ο χάλυβας είναι ίσως το πιο σύνθετο μεταλλικό κράμα και παρότι υπάρχει συσσωρευμένη μεγάλη έκταση έρευνα, δεν έχει οδηγήσει ακόμη στην πλήρη κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του.[1]

Είναι από τα πιο διαδεδομένα υλικά στο χώρο των κατασκευών και χρησιμοποιείται για μεγάλο φάσμα εφαρμογών, εξαιτίας της αλλοτροπίας του που επιτρέπει το σχηματισμό μια μεγάλης ποικιλίας μικροδομών και μηχανικών ιδιοτήτων: από την αρχιτεκτονική μέχρι την ιατρική για την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Η μεγάλη αυτή ποικιλία μικροδομών οφείλεται, κυρίως, στο μετασχηματισμό του ωστενίτη κατά την ψύξη του μετάλλου. Τέλος, η διαμόρφωση της δομής και των ιδιοτήτων στους χάλυβες γίνεται μέσω θερμικών κατεργασιών, όπως για παράδειγμα ωστενιτοποίηση, βαφή, επαναφορά, ανόπτηση, εξομάλυνση. Οι χάλυβες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

Πίνακας 2.1 Κατηγοριοποίηση και είδη χάλυβα

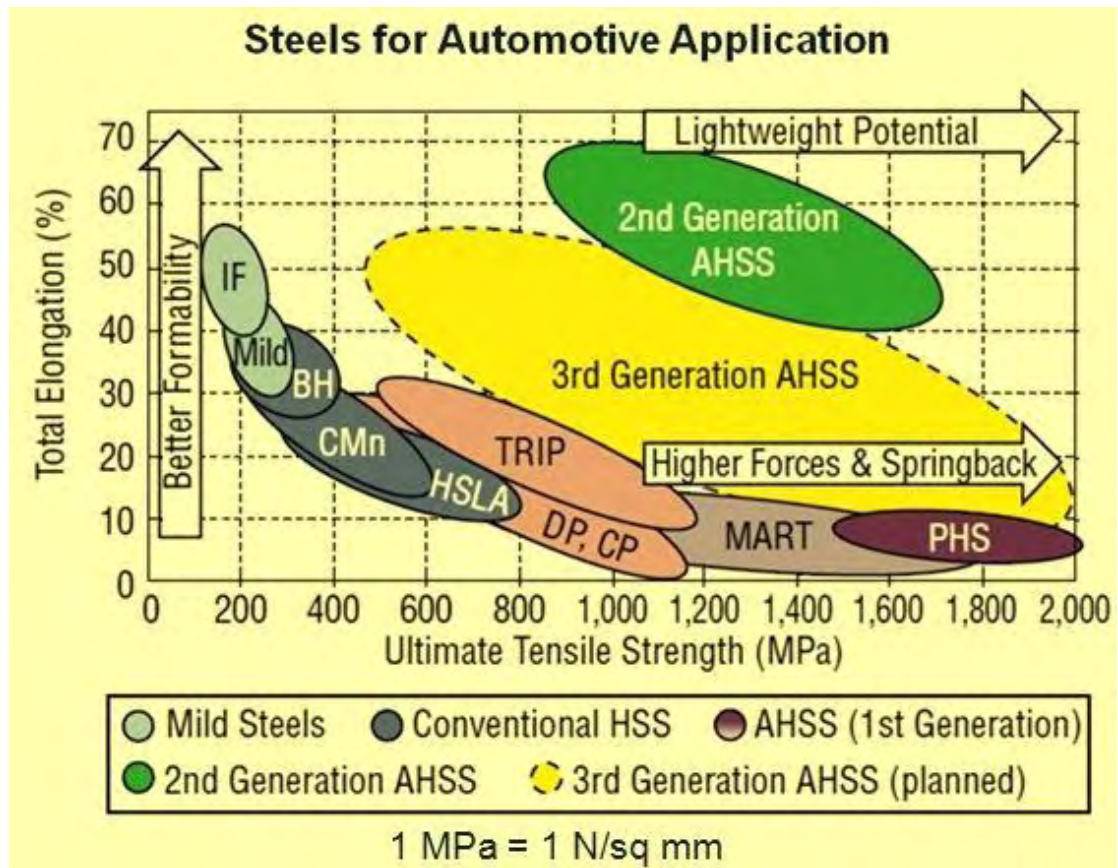
ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΑ
ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	Ανθρακούχοι, Κραματωμένοι
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	Διαμόρφωσης, Χυτοχάλυβες
ΑΝΤΟΧΗ	Χαμηλής και Υψηλής αντοχής
ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ	Φερριτικοί, Μπαινιτικοί, Ωστενιτικοί, Μαρτενσιτικοί
ΧΡΗΣΗ	Χάλυβες κατασκευών, Ανοξείδωτοι χάλυβες, Εργαλειοχάλυβες

Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ανάπτυξη νέων κατασκευών, εμφανίστηκε η ανάγκη για τη χρήση υλικών με τα βέλτιστα χαρακτηριστικά. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη χάλυβα που χρησιμοποιούνται συχνά. Από αυτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον εμφανίζουν οι χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης υψηλής αντοχής (HSLA), πάνω στους οποίους έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους.

Πίνακας 2.2 Τυποποίηση και είδη χάλυβα [15]

XX	ΕΙΔΟΣ ΧΑΛΥΒΑ
Mild	Μαλακοί χάλυβες
BH	Θερμοσκληρυνόμενοι (Bake hardenable)
CP	Πολυφασικοί (Complex phase)
DP	Διφασικοί (Dual phase)
FB	Φερριτομπαινιτικοί
HF	Εν θερμώ διαμόρφωσης (Hot formed)
HSLA	Χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης υψηλής αντοχής
IF	Απαλλαγμένοι από ατέλειες (Interstitial Free)
MS	Μαρτενσιτικοί
SF	Stretch-flangeable
TRIP	Transformation-Induced Plasticity
TWIP	Twinning-Induced Plasticity

Στην εικόνα 2.1 γίνεται η κατηγοριοποίηση των χαλύβων για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία ανάλογα με την αντοχή και ολκιμότητά τους. Στα αριστερά του διαγράμματος φαίνονται οι απαλλαγμένοι από ατέλειες (IF) και μαλακοί χάλυβες οι οποίοι έχουν μικρή αντοχή και μεγάλη ικανότητα διαμόρφωσης. Στο κέντρο του γραφήματος εμφανίζονται οι συμβατικές κατηγορίες των χαλύβων υψηλής αντοχής [interstitial-free, high strength (IF-HS), isotropic (IS), bake-hardenable (BH) and high strength, low-alloy (HSLA)], που χαρακτηρίζονται από υψηλότερη αντοχή αλλά χαμηλότερη ολκιμότητα. Τέλος, προς το δεξιό τμήμα του διαγράμματος βρίσκονται οι Προηγμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής [dual-phase (DP), complex-phase (CP), transformation-included plasticity (TRIP) and martensitic steels (MS)], οι οποίοι εμφανίζουν πολύ υψηλή αντοχή και (με εξαίρεση του μαρτενσιτικού χάλυβες) καλή διαμορφωσιμότητα.



Εικόνα 2.1 Κατηγορίες χαλύβων βάσει της αντοχής και της ολκιμότητας

## 2.2 Χάλυβες Χαμηλής Κραμάτωσης Υψηλής Αντοχής (HSLA)

Στις κατασκευές είναι απαραίτητο τα υλικά που χρησιμοποιούνται να είναι ελαφριά σε βάρος και με μεγάλη αντοχή στα φορτία που δέχονται. Οι Χαμηλά Κραματωμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (High Strength Low Alloy Steel, HSLA) έχουν όριο διαρροής από 250 έως και 590 MPa, όμως η υψηλή αντοχή των χαλύβων αυτών έχει ως αποτέλεσμα την περιορισμένη απόδοση και λειτουργικότητα τους. Η βελτίωση των ιδιοτήτων των χαλύβων HSLA γίνεται με την ενίσχυση των υλικών μέσω ενίσχυσης στερεού διαλύματος, ενίσχυσης με καθίζηση, εκλέπτυνσης κόκκων και μετασχηματισμού φάσεων, που αυξάνουν την ολκιμότητα και ταυτόχρονα διατηρούν την υψηλή αντοχή. Οι χάλυβες που προέκυψαν στα μέσα δεκαετίας του '90 ονομάστηκαν Προηγμένοι Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (Advanced High Strength Steel,

AHSS). Οι χάλυβες AHSS έχουν όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa και σύνθετες μικροδομές, που περιέχουν μαινίτη, μαρτενσίτη και ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν δυο γενιές AHSS και γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη της τρίτης γενιάς. Η 1<sup>η</sup> γενιά αυτών των χάλυβων βασίζεται στη φερριτική δομή και έχει μεγαλύτερη αντοχή από τους κοινούς χάλυβες υψηλής αντοχής. Παρόλα αυτά η διαμορφωσιμότητα τους παραμένει περιορισμένη. Έτσι αναπτύχθηκε η 2<sup>η</sup> γενιά η οποία βασίζεται στην ωστενιτική δομή. Η εύπλαστη ωστενιτική δομή των χάλυβων προσδίδει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τη διαμόρφωση τους αλλά το κόστος παράγωγής τους είναι αρκετά υψηλό. Για τους παραπάνω λόγους γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη μίας κατηγορίας χάλυβων που θα συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενιάς. Η 3<sup>η</sup> γενιά AHSS στοχεύει να πετύχει χαρακτηριστικά ανάμεσα στις δυο πρώτες με χαμηλό κόστος. Ο σκοπός αυτός μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συνδυασμό μαρτενσίτη και ωστενίτη στη μικροδομή του παραγόμενου υλικού, δίνοντας του έτσι ταυτόχρονα υψηλή αντοχή και ολκιμότητα. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του φερρίτη, μαρτενσίτη και ωστενίτη σύμφωνα με τα οποία καθορίζονται και οι τελικές ιδιότητες του υλικού.[2]

Πίνακας 2.3 Συστατικές Ιδιότητες των φάσεων φερρίτη, ωστενίτη και μαρτενσίτη

Μικροδομή	Όριο Θραύσης ( $R_m$ ) [MPa]	Ομοιόμορφη πραγματική παραμόρφωση $\epsilon$ (%)
Φερρίτης	300	0.3
Ωστενίτης	640	0.6
Μαρτενσίτης	2000	0.08

Το κλειδί στην παραγωγή των 3<sup>ης</sup> γενιάς AHSS είναι η ποσότητα παραμένοντα ωστενίτη στο τελικό προϊόν καθώς αποτελεί την εύπλαστη μικροδομή του υλικού, ενώ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε υψηλά φορτία μετατρέπεται σε μαρτενσίτη.

## **2.3 Χάλυβες στρατιωτικών εφαρμογών (Armox 500T)**

### **2.3.1 Γενικά**

Τις τελευταίες δεκαετίες συχνή είναι η μελέτη των χαλύβων στρατιωτικών εφαρμογών και η συμπεριφορά τους απέναντι σε βαλλιστικές και εκρηκτικές απειλές. Οι χάλυβες στρατιωτικών εφαρμογών χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή στρατιωτικών οχημάτων, για την θωράκιση σπιτιών προστασίας και για την ενίσχυση κατασκευών ποικίλων εφαρμογών. Η βαλλιστική απόδοση των μεταλλικών υλικών έχει μεγάλη σημασία για τις στρατιωτικές εφαρμογές και εξαρτάται από την αντοχή, τη σκληρότητα, τη μικροδομή και το ρυθμό εργοσκληύρυνσης του υλικού. Για να επιτευχτεί η βέλτιστη βαλλιστική απόδοση ενός υλικού απαιτείται ο κατάλληλος συνδυασμός όλων των προηγούμενων παραγόντων και όχι η επιλογή καθενός ξεχωριστά.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και συμπεριφορά ενός χάλυβα (και ιδιαίτερα ενός armox χάλυβα) είναι η θερμική κατεργασία αυτού. Με τη θερμική κατεργασία προσδίδονται οι ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν και καθορίζουν τη λειτουργία του. Σχετικά με τους AHSS, και πιο συγκεκριμένα τη μαρτενσιτική φάση της μικροδομής, η θερμοκρασία και ο χρόνος παίζουν καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως είναι η σκληρότητα και η διαμορφωσιμότητα, μέσω της διαδικασίας της ανόπτησης. Τέλος, η συμπεριφορά ενός υλικού σε διάφορες θερμοκρασίες έχει μεγάλη σημασία και για τις δευτερεύουσες διεργασίες που μπορεί αυτό να υποστεί, όπως είναι η κοπή και η συγκόλληση.[3]

### **2.3.2 Χάλυβας Armox 500T**

Ο χάλυβας Armox 500T θεωρείται κατάλληλος για αστική και στρατιωτική βαλλιστική εφαρμογή. Βασικές χρήσεις στην οποία συναντάται ο Armox 500T είναι για τη θωράκιση και προστασία οχημάτων, κτιρίων και κατασκευών στρατιωτικών κυρίως εφαρμογών. Χρησιμοποιείται σαν «πανοπλία» για την ενίσχυση οχημάτων μεταφοράς ανθρωπίνου δυναμικού, όπως το ALIGATOR στη Σλοβακία, καθώς και για τη θωράκιση κινητών κτιρίων, όπως νοσοκομεία και κέντρα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από το στρατό και απαιτούν μέγιστη προστασία. Ανήκει στους προηγμένους χάλυβες υψηλής αντοχής 2<sup>ης</sup> γενιάς (AHSS) με μαρτενσιτική μικροδομή



(επαναφερμένος μαρτενσίτης) και χαρακτηρίζεται από υψηλό όριο αντοχής και μεγάλη σκληρότητα. Τις μηχανικές ιδιότητες του τις αποκτά μέσω θερμικών κατεργασιών που έχουν ως στόχο τη διαμόρφωση μικροδομής τέτοιας ώστε να καθιστά το υλικό το καταλληλότερο για τον σκοπό που επιτελεί. Τα βήματα για την παραγωγή του είναι τα εξής (βλ. διάγραμμα 2.1):

α) Αρχικά γίνεται η χύτευση των πλακών του υλικού, όπου στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μέταλλο υψηλής χημικής καθαρότητας και στη συνέχεια πραγματοποιείται έλαση των πλακών σε θερμοκρασία  $1250^{\circ}\text{C}$ . Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εκκαθάριση της μικροδομής του μετάλλου προς δημιουργία ωστενιτικών κόκκων.

β) Ωστενιτοποίηση σε θερμοκρασία  $850^{\circ}\text{C}$ .

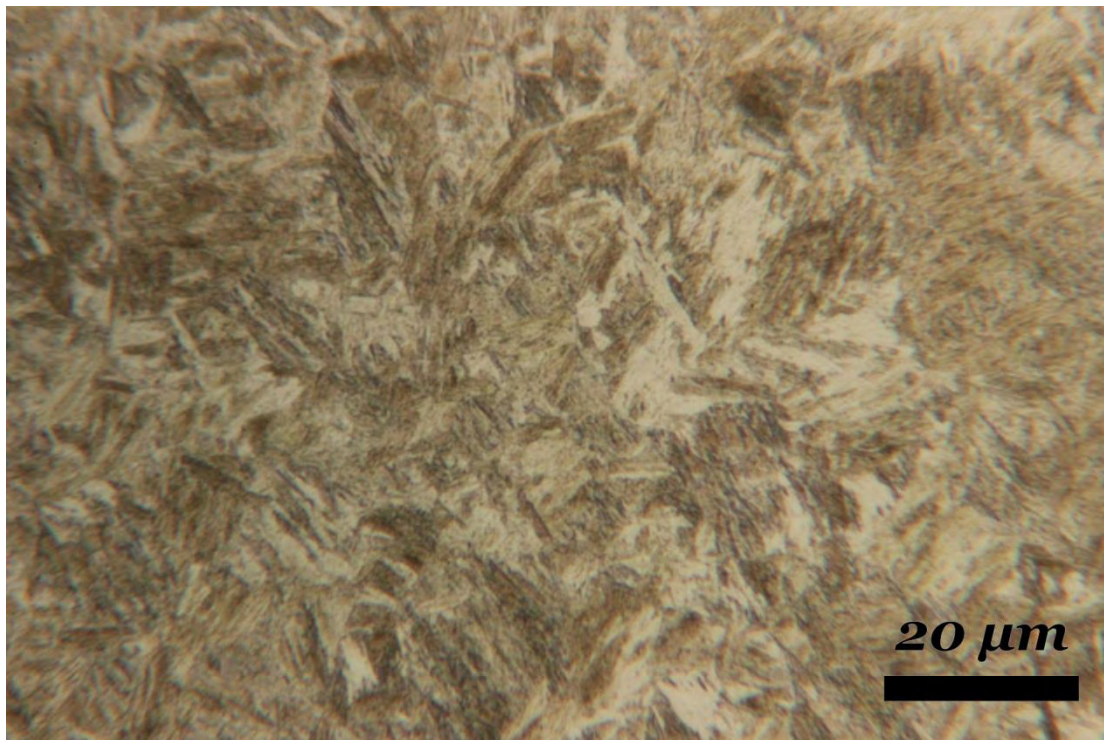
γ) Τέλος, το σημαντικότερο βήμα στην παράγωγή του χάλυβα είναι η βαφή και επαναφορά. Το υλικό θερμαίνεται μέχρι περίπου τους  $1000^{\circ}\text{C}$ , για να σχηματιστεί πλήρης ωστενιτική δομή, και στη συνέχεια ψύχεται και επαναθερμένεται μέχρι τους  $200-500^{\circ}\text{C}$  για να αποκτήσει βέλτιστο συνδυασμό σκληρότητας και ολκιμότητας.

Διάγραμμα 2.1 Θερμικές κατεργασίες για την παραγωγή Armox 500T



Η τελική δομή του Armox 500T αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη και συνδυάζει υψηλή αντοχή και σκληρότητα (εικόνα 2.2). Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος χάλυβας εμφανίζει ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες και απότομες αλλαγές θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Στους πίνακες 2.4 και 2.5 δίδονται η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

[4]



Εικόνα 2.2 Μικροδομή ArmoX 500T (επαναφερμένος μαρτενσίτης)

Πίνακας 2.4 Χημική Σύσταση του χάλυβα ArmoX 500T[5]

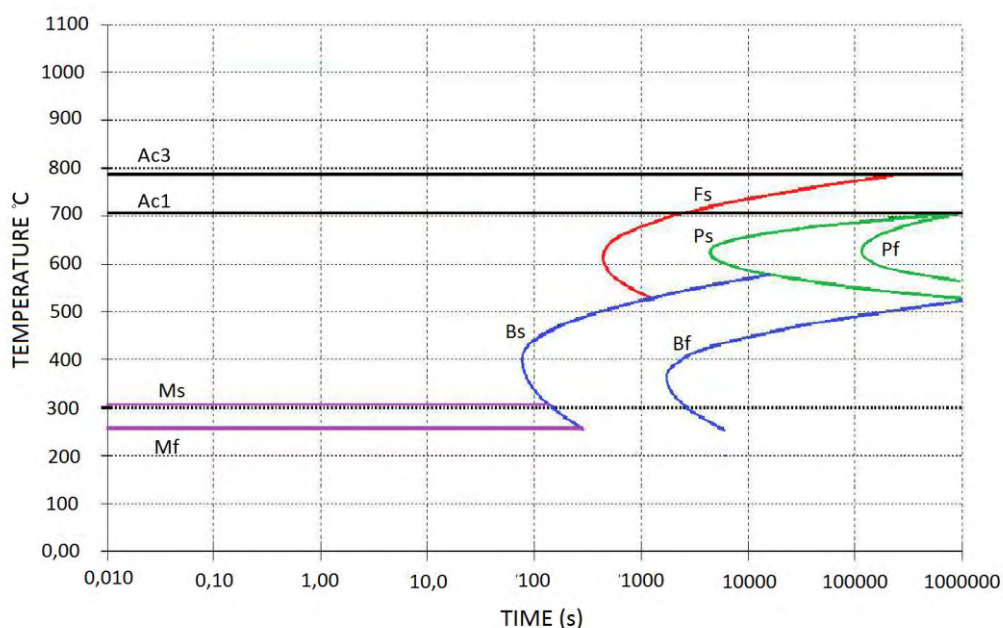
C (max%)	Si (max%)	Mn (max%)	P (max%)	S (max%)	Cr (max%)	Ni (max%)	Mo (max%)	B (max%)
0.32	0.4	1.2	0.015	0.01	1.01	1.81	0.7	0.005

Πίνακας 2.5 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα ArmoX 500T[5]

Πάχος (mm)	Σκληρότητα (HBW)	Charpy-V	Όριο Διαρροής $R_{p0.2}$ [MPa]	Όριο Θραύσης $R_m$ [MPa]	Επιμήκυνση $A_5$ (%)	Επιμήκυνση $A_{50}$ (%)
3-80	480-540	32 J/-40°C	1250	1450-1750	8	10

Στο διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT του χάλυβα ArmoX 500T στο οποίο περιγράφονται οι μετασχηματισμοί της μικροδομής που μπορούν να προκύψουν κατά τη ψύξη του υλικού. Το διάγραμμα CCT χρησιμοποιείται για να γίνει πρόβλεψη της τελικής δομής του υλικού όπως αυτή προκύπτει έπειτα από θέρμανση και ψύξη του. Σημαντικό ρόλο για την πρόβλεψη παίζει ο ρυθμός ψύξης που υπόκεινται κάθε υλικό

γιατί καθορίζει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να αποκτήσει το υλικό την επιθυμητή θερμοκρασία και τελική δομή. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες για το σχηματισμό φερρίτη ή περλίτη είναι λίγο πάνω από τους 600<sup>0</sup> C, ενώ μαινίτης σχηματίζεται λίγο πάνω από τους 400<sup>0</sup> C. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι σημαντικό να είναι γνωστές προκειμένου να προσδιοριστεί σωστά με βάση το ρυθμό ψύξης, η τελική μικροδομή και κατ' επέκταση οι τελικές ιδιότητες του υλικού.



Διάγραμμα 2.2 Διάγραμμα CCT του χάλυβα Armox 500T

### 2.3.3 Συγκολλησιμότητα χαλβων Armox

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής, όπως είναι οι Armox, χαρακτηρίζονται από απλή χημική σύσταση και από χαμηλό ισοδύναμο άνθρακα, καθιστώντας τους έτσι υλικά με πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Παρόλα αυτά, η συγκόλλησή τους εμφανίζει προβλήματα λόγω της σημαντικής θερμικής επίδρασης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Σημαντικό ρόλο για τη συγκόλληση παίζει ο Ρυθμός Εισαγωγής Θερμότητας (ΡΕΘ) ο οποίος καθορίζει και τις μηχανικές ιδιότητες στη περιοχή γύρω από τη συγκόλληση. Ο ΡΕΘ εξαρτάται από την ένταση και την τάση του ρεύματος και από την ταχύτητα της συγκόλλησης σύμφωνα με τη σχέση:

$$PE\Theta = \frac{n \times V \times I}{u}, \text{όπου}$$

n=βαθμός απόδοσης συγκόλλησης (αδιάστατος)

V=τάση ρεύματος (Volt)

I=ένταση ρεύματος (Ampere)

u=ταχύτητα συγκόλλησης (mm/s)

Επίσης σημαντικό για τη διεργασία της συγκόλλησης είναι και το ισοδύναμο του άνθρακα καθώς καθορίζει τη θερμοκρασία προθέρμανσης που χρειάζεται κάθε υλικό πριν τη συγκόλληση. Σχετικά με την προθέρμανση, δε θα πρέπει να υπερβαίνει τους 200<sup>0</sup> C στην περίπτωση του Armox 500T. Στον πίνακα 2.6 δίδονται χαρακτηριστικά ισοδύναμο άνθρακα για διάφορα είδη Armox. Τα ισοδύναμο άνθρακα υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους:

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$$

$$CEV = C + Mn/6 + (Mo+Cr+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

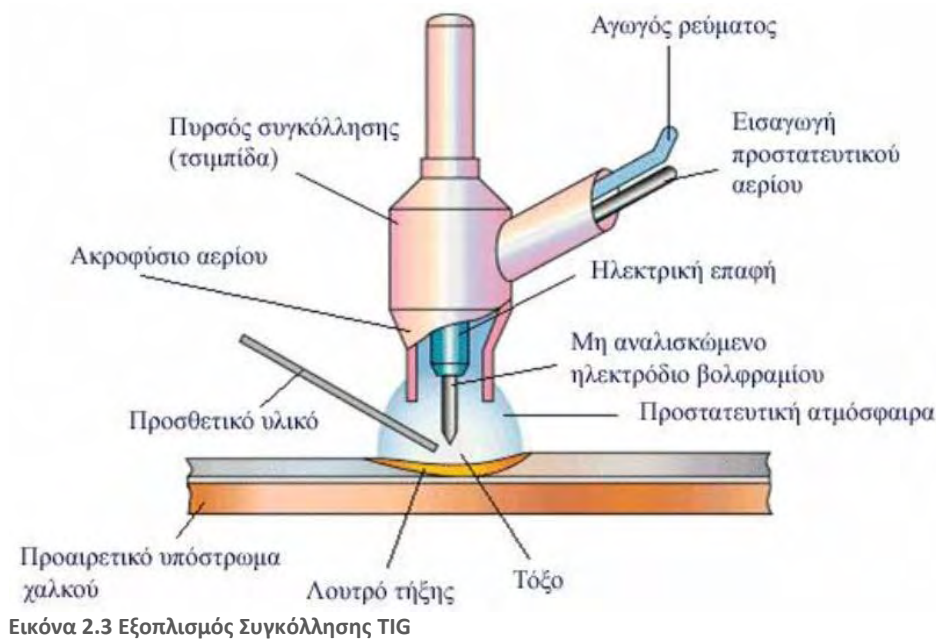
Πίνακας 2.6 Ισοδύναμο άνθρακα για τα διάφορα είδη Armox[6]

Βαθμίδα Χάλυβα	Εύρος Πάχους (mm)	CET [%]	CEV [%]
Armox 370T CL1 & CL2	3–100	0.46–0.50	0.67–0.73
Armox 440T	4–80	0.39–0.42	0.67–0.73
Armox 500T	3–80	0.46–0.502	0.67–0.732
Armox 600T	4–20	0.58–0.61	0.83–0.86
Armox Advance	4–12	0.64–0.68	0.89–0.96

Τέλος, καθοριστικό ρόλο έχει και η επιλογή του ηλεκτρόδιου ή σύρματος που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση ως συγκολλητικό υλικό (filler). Από τον κατασκευαστή προτείνεται η χρήση συγκολλητικού υλικού με φερριτική δομή με όσο το δυνατό χαμηλότερη αντοχή,(που να πληροί τις προϋποθέσεις) με επιθυμητή τιμή περίπου 500 MPa για το όριο διαρροής, καθώς έτσι προσφέρει μεγαλύτερη σκληρότητα στο μέταλλο συγκόλλησης, μεγαλύτερη αντίσταση σε ψυχρή ρηγμάτωση (hydrogen cracking) και περιορίζονται οι παραμένουσες τάσεις. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν filler με ωστενιτική μικροδομή, προτείνονται ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα, όπως τα AWS 307 και AWS 309.[6]

### **2.3.4 Συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW ή TIG)**

Η συγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (TIG, Tungsten Inert Gas) χρησιμοποιεί ένα μη καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο από βολφράμιο, καθώς και κάποιο αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Επίσης, στη μέθοδο TIG μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποιο μέταλλο προσθήκης με τη μορφή σύρματος ή ράβδου. Στη συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης χρησιμοποιείται συνήθεστερα η ορθή πολικότητα (ο αρνητικός πόλος στο ηλεκτρόδιο). Εξαιρέση αποτελούν τα μέταλλα αλουμινίου και μαγνησίου, όπου σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δύσκολο να διασπαστούν τα οξειδία των συγκεκριμένων μετάλλων και στα οποία προτιμάται η ανάστροφη πολικότητα. Το ρόλο των αερίων προστασίας παίζουν το Αργό και το ήλιο. Το Ar έχει μικρότερο κόστος και λόγω του βάρους του απαιτείται μικρή παροχή, το He απαιτεί μεγάλη τάση τόξου και χρησιμοποιείται συνήθως για υλικά μεγάλων διατομών καθώς προκαλεί μεγαλύτερη διείδυση. Όσον αφορά τους τύπους των ηλεκτροδίων, σε αυτά βασικό μέταλλο είναι το W το οποίο πολλές φορές κραματώνεται με άλλα μέταλλα, όπως το Th, το La, το Ce, το Zr και διάφορες σπάνιες γαίες. Τα ηλεκτρόδια καθαρού βολφραμίου χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις κυρίως Al και Mg χαμηλών απαιτήσεων ενώ τα ηλεκτρόδια W-Th χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση ανθρακούχων και ανοξειδωτων χαλύβων, κραμάτων νικελίου και τιτανίου. Τα ηλεκτρόδια W-La έχουν καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια W-Th, τα ηλεκτρόδια W-Ce συγκολλούν καλά ανοξειδωτους σωλήνες και τα ηλεκτρόδια W-Zr εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα σε συνθήκες εναλλασσόμενου ρεύματος.



Η μέθοδος συγκόλλησης TIG, είναι ιδανική για τη σύνδεση ελασμάτων μικρού σχετικά πάχους, καθώς και για τη συγκόλληση του πρώτου κορδονιού (ρίζας) σε συγκολλήσεις πλήρους διείσδυσης όπου η πρόσβαση είναι εφικτή μόνο από τη μία πλευρά της συγκόλλησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης είναι πιο αργή σε σχέση με τις υπόλοιπες, ενώ και τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο κόστος. Για τους λόγους αυτούς η TIG χρησιμοποιείται συνήθως όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

Βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης είναι η ακρίβεια και ο έλεγχος της θερμότητας σε ικανοποιητικό βαθμό, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να κρίνεται επιτυχές και ακέραιο. Όσο αφορά την καθαρότητα της συγκόλλησης, δεν υπάρχουν δείγματα σκουριάς της ραφής ενώ θετικό είναι και το γεγονός πως δεν είναι απαραίτητη η χρήση μετάλλου προσθήκης, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο χημική ομοιομορφία στο συγκολλητό αντικείμενο. Βασική εφαρμογή της TIG είναι συγκόλληση λεπτών ελασμάτων και υλικών με υψηλό σημείο τήξης, καθιστώντας την καταλληλότερη μέθοδο για εφαρμογές ειδικών αναγκών και εκεί που οι υπόλοιπες μέθοδοι είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν.

Σχετικά τώρα με τα μειονεκτήματα της TIG, δεν συνίσταται η χρήση της σε μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξης, όπως ο κασσίτερος και τα κράματα ψευδαργύρου, ενώ και τα προς συγκόλληση τεμάχια θα πρέπει να είναι απαλλαγμένα από ακαθαρσίες. Επίσης,



για την εφαρμογή της απαιτείται ειδικός εξοπλισμός με μεγάλο κόστος που είναι δύσκολος στην μεταφορά του και αρκετή εμπειρία και εξάσκηση από το συγκολλητή. Τέλος, ένα συνηθισμένο πρόβλημα που εμφανίζει η TIG είναι τα εγκλείσματα βολφραμίου, τα οποία δημιουργούνται από την επαφή του ηλεκτροδίου με το λουτρό τήξης.[7]

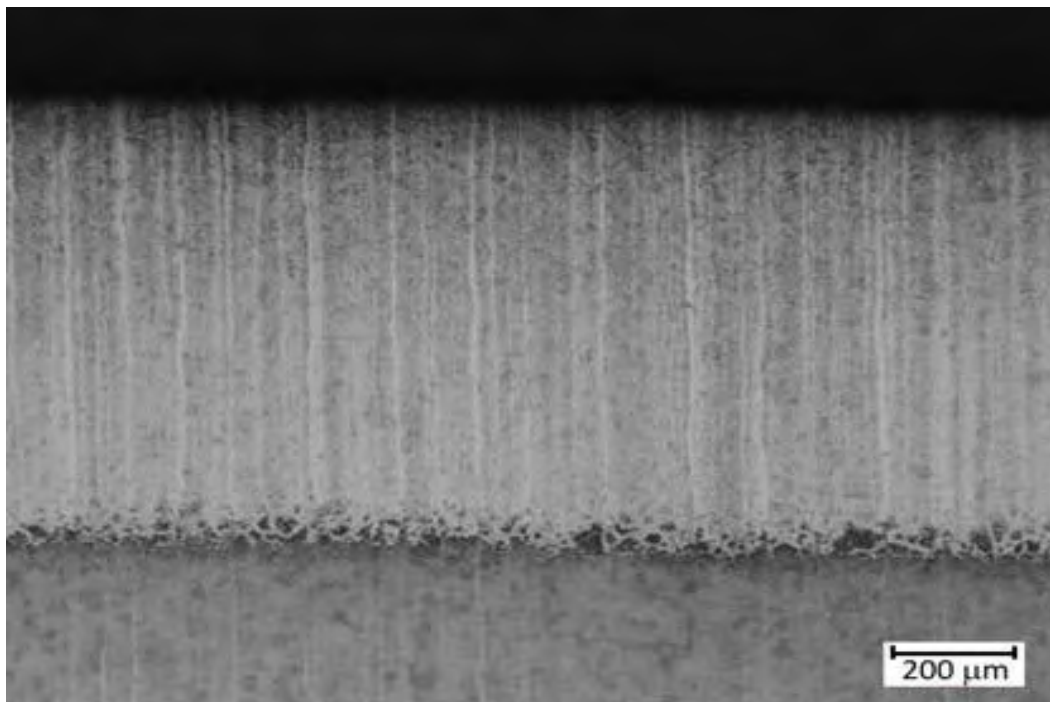


Εικόνα 2.4 Μέθοδος Συγκόλλησης με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου (TIG)

## 2.4 Ερευνητική Δραστηριότητα στους Armox steels

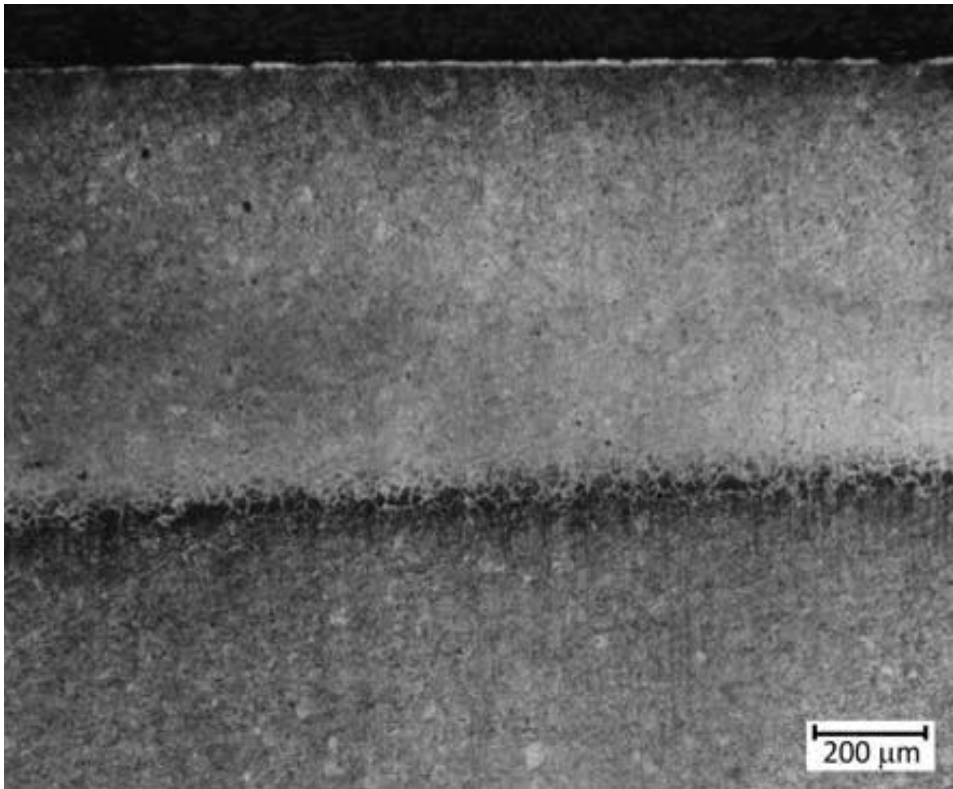
Στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν δημοσιευτεί ερευνητικές εργασίες προκειμένου να προσδιοριστεί η αρνητική επίδραση που έχουν οι δευτερεύουσες θερμικές κατεργασίες στην απόδοση των Armor steels.

Η επίδραση που έχει η κοπή με laser και πλάσμα (plasma cutting) στους χάλυβες Armox 440,500 και 600 αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δύο μεθόδους κοπής είχε δημιουργηθεί ένα επιφανειακό μαρτενσιτικό στρώμα, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται και μια περιοχή μερικής ανακρυστάλλωσης, με αυτή να είναι μεγαλύτερη στην κοπή με πλάσμα. Επίσης, παρατηρήθηκε μερικός κορεσμός (partial saturation) στα δείγματα που κόπηκαν με πλάσμα καθώς και το βάθος της ΘΕΖ ήταν σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με την κοπή με λέιζερ. Στις εικόνες 2.5 και 2.6 παρουσιάζονται οι μικροδομές του χάλυβα Armox 600 μετά από κοπή με laser και plasma. [4]



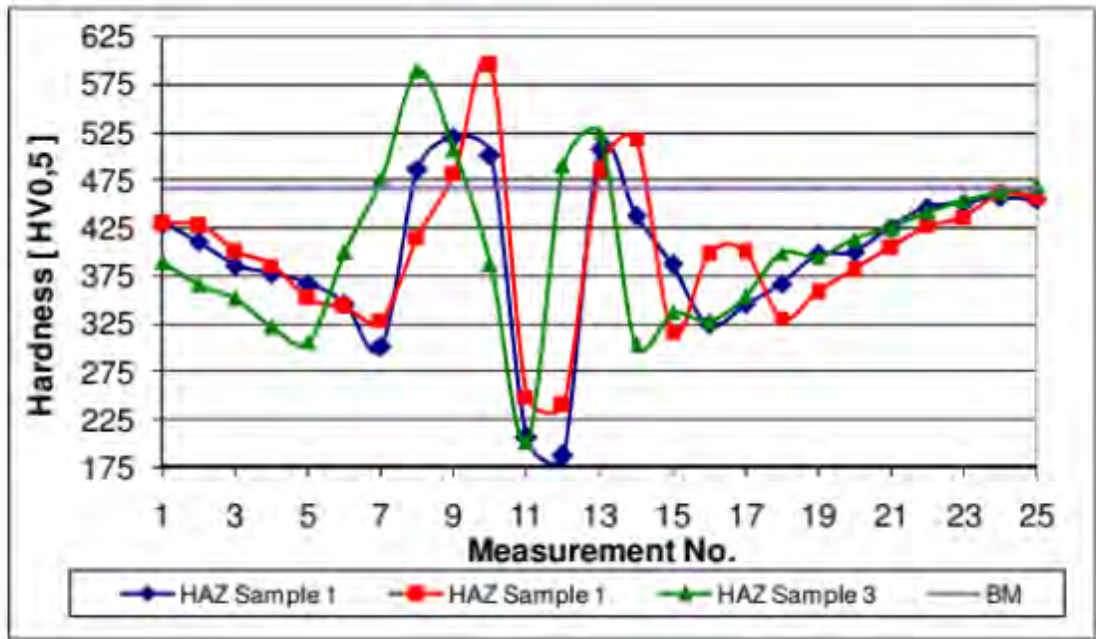
Εικόνα 2.5 ΘΕΖ μετά από κοπή με laser, Armox 600 (μεγεθ.  $\times 50$ )[8]



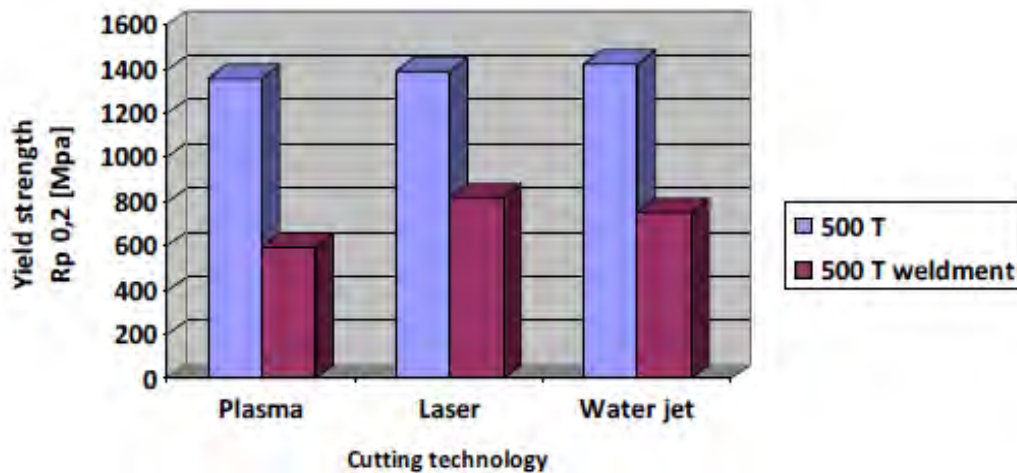


Εικόνα 2.6 ΘΕΖ μετά από κοπή με πλάσμα, Α6061 (μεγεθ.  $\times 50$ ) [8]

Επίσης έχει μελετηθεί η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα A6061-T6 μετά τη συγκόλληση του. Στα αποτελέσματα λήφθηκε υπόψη και η μέθοδος κοπής που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να προετοιμαστούν τα προς εξέταση δείγματα. Η πειραματική μελέτη έδειξε ότι η μείωση στις παραμέτρους αντοχής του υλικού (όριο θραύσης και διαρροής) είναι της τάξης του 40-60 % της αρχικής τιμής. Ακόμη, μετρήσεις μικροσκληρότητας δείχνουν σημαντική μείωση της σκληρότητας σε όλη την περιοχή της ΘΕΖ, εκτός από το κομμάτι που υπάρχει μαρτενσιτική δομή, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων. Στο διάγραμμα 2.3 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων με τη μορφή γραφικών παραστάσεων και στο διάγραμμα 2.4 παρουσιάζεται η σύγκριση για το όριο διαρροής μετά από συγκόλληση με διαφορετικές μεθόδους κοπής για τη λίμνη συγκόλλησης και το βασικό μέταλλο. [8]



Διάγραμμα 2.3 Προφίλ σκληρομετρήσεων κατά μήκος της ΘΕΖ [9]



Διάγραμμα 2.4 Πειραματικά Αποτελέσματα, Όριο Διαρροής στο Μέταλλο Συγκόλλησης και Βασικό Μέταλλο[9]

Επιπλέον υπάρχουν δημοσιευμένες μελέτες που έχουν σκοπό τον υπολογιστικό προσδιορισμό της μεταβολής των ιδιοτήτων των Armor steels μετά από θέρμανση σε τιμή πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία των  $200^{\circ}\text{C}$  (overtempering), καθώς γίνονται μετασχηματισμοί της μικροδομής που υποβαθμίζουν τις ιδιότητες του υλικού. Τα συμπεράσματα από συγκεκριμένη έρευνα δείχνουν σημαντική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων (σκληρότητα, όριο θραύσης) ειδικά στις περιοχές που επηρεάζονται

περισσότερο από το overtempering. Το μέγεθος της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία θέρμανσης και το χρόνο που παραμένει σε αυτή. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.7, οι ιδιότητες του χάλυβα διαφέρουν μετά το overtempering σε σχέση με τις συνθήκες παράδοσής του.[9]

Πίνακας 2.7 Ιδιότητες ArmoX 500T υπολογισμένες μετά από προσομοίωση ψύξης[9]

ARMOX 500T properties calculated by simulaton		Starting Temperature		Delivered conditions
		500°C	1000°C	
Critical temperatures [°C]	A <sub>c3</sub>	786		-
	A <sub>c1</sub>	707		-
Structural components [%]	Bainite	81	84.5	-
	Martensite	19	15.5	-
Mechanical properties	R <sub>m</sub> [MPa]	1335	1312	1750
	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	1070	1049	1250
	HV/HB	441/418	435/413	610/540

Επιπρόσθετα, προσομοιώσεις για τη συμπεριφορά των Armor steels μετά από θερμική κατεργασία έχουν γίνει και με τη βοήθεια του προγράμματος TTSteel 2.1. Το συγκεκριμένο λογισμικό καθορίζει και υπολογίζει τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή των υλικών μετά από την θερμική τους επεξεργασία. Το πρόγραμμα υπολογίζει διαγράμματα φάσεων και μετασχηματισμών με βάση τη χημική σύσταση του κάθε υλικού και με βάση το ρυθμό ψύξης. Συγκεκριμένα για το χάλυβα ArmoX 500T έχει υπολογιστεί ότι η υποβάθμιση των ιδιοτήτων μετά από θέρμανση πάνω από την A<sub>1</sub> είναι 20-30 % (Πίνακας 2.7) των αρχικών τιμών και μετά από θέρμανση λίγο κάτω από την A<sub>1</sub> και αργή ψύξη στους 20<sup>0</sup> C είναι 14-19 % (Πίνακας 2.8). [10]

Πίνακας 2.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης του Armox 500T μετά από θέρμανση πάνω από την  $A_1$ [10]

Conditions	Armox 500T – mechanical properties			
	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Hardness [HV]	Microstructure
After quenching	1839	1548	559	100% martensite
After cooling on air	1339	1081	412	80% bainite, 20% martensite
Difference [%]	-27 %	-30 %	-26 %	

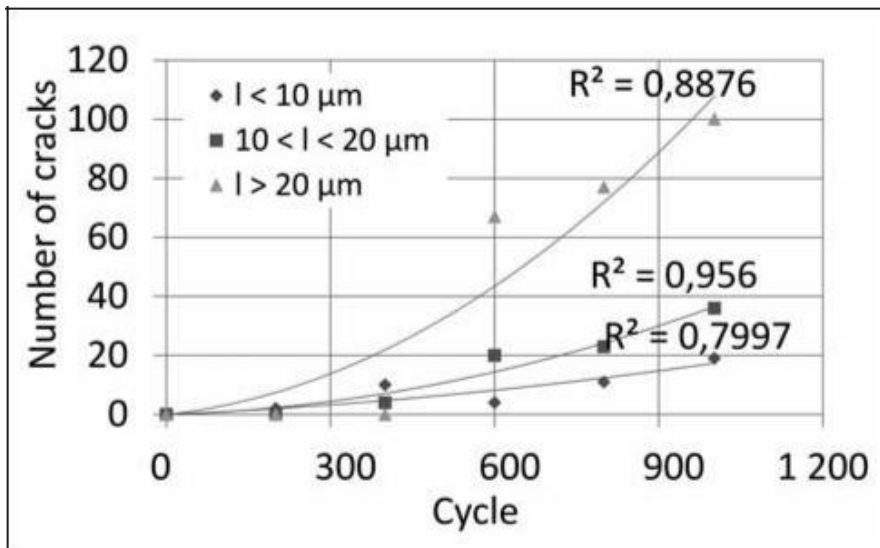
Πίνακας 2.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης του Armox 500T μετά από θέρμανση κάτω από την  $A_1$ [10]

Conditions	Armox 500T - mechanical properties		
	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	Hardness [HV]
After quenching	1839	1548	559
After uncontrolled tempering	1516	1247	465
Difference [%]	-18 %	-19 %	-17 %

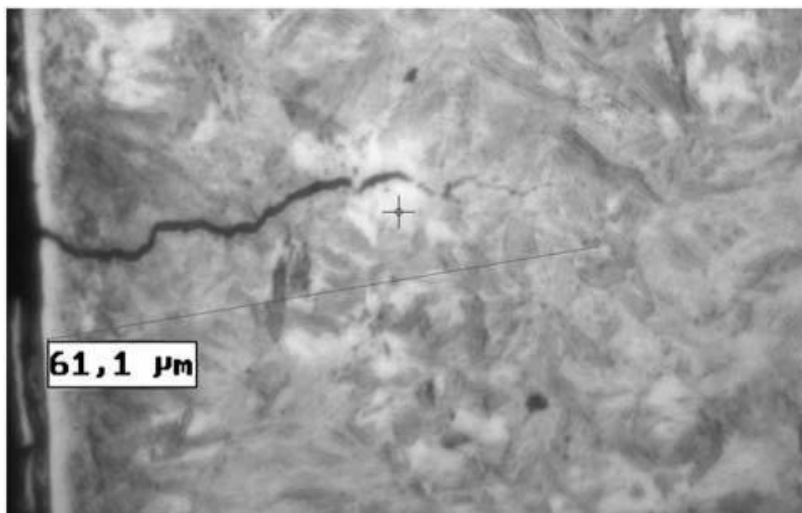
Στα πλαίσια της μελέτης της βαλλιστικής απόδοσης και συμπεριφοράς των Armor steels, πραγματοποιήθηκε έρευνα που ασχολήθηκε με τη συμπεριφορά του Armox 500T κάτω από ποικίλες συνθήκες εντατικής κατάστασης, παραμόρφωσης και θερμοκρασίας. Οι βαλλιστικές δοκιμές διεξήχθησαν στον Armox 500T και στρατιωτικά διατηρητικά βλήματα (API) 7.62 και 12.7 χιλιοστών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αναπαρήχθησαν στο πρόγραμμα ABAQUS/Explicit με τη χρήση κώδικα και παραμέτρων προσαρμοσμένα στα υλικά του πειράματος. Από τη συγκεκριμένη μελέτη διαπιστώθηκε μείωση στο όριο θραύσης του υλικού υπό τη επίδραση τριαξονικής εντατικής κατάστασης λόγω μείωσης της ολκιμότητάς του. Επίσης, παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στην αντοχή του υλικού για θερμοκρασία λίγο πάνω από τους  $200^{\circ}\text{C}$ , καθώς, όμως, αυξανόταν η θερμοκρασία, η αντοχή υπέστη σημαντική μείωση.[11]

Συχνά είναι απαραίτητη και η γνώση της αντοχής του υλικού κάτω από την επίδραση κυκλικής φόρτισης. Έτσι, ερευνητές επικεντρώθηκαν στη ανάλυση της μικροδομής του χάλυβα Armox 500T, μετά την άσκηση μονοαξονικού φορτίου εναλλασσόμενης κυκλικής κόπωσης σταθερού πλάτους, και του μηχανισμού δημιουργίας και ανάπτυξης των ρωγμών. Οι αναλύσεις της μικροδομής έγιναν κατά μήκος των δοκιμίων και ανά 200 κύκλους φόρτισης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η πρώτη μικρορωγή μήκους 10  $\mu\text{m}$  εμφανίστηκε πριν την συμπλήρωση των πρώτων

200 κύκλων φόρτισης ενώ η ανάπτυξη των ρωγμών συνεχίστηκε με την περαιτέρω άσκηση φορτίου. Οι μεγάλες ρωγμές, οι οποίες οδηγούν και στη θραύση του υλικού, εμφανίστηκαν στο χρονικό μέσο της διάρκειας ζωής. Στο διάγραμμα 2.5 απεικονίζονται οι ρωγμές και το μήκος αυτών συναρτήσει των κύκλων ζωής για κόπωση του υλικού, ενώ στην εικόνα 2.7 φαίνεται η μικροδομή μετά από μεταλλογραφική προετοιμασία και η ύπαρξη ρωγμής. [12]



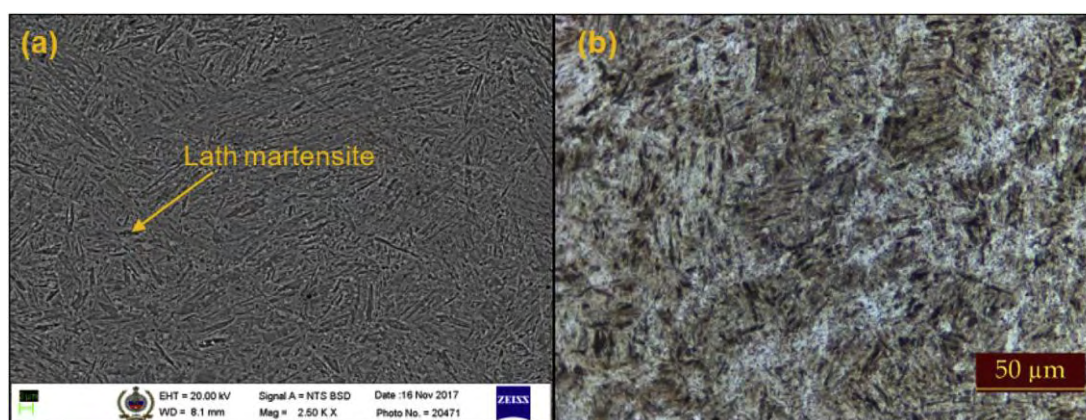
Διάγραμμα 2.5 Αριθμός και μήκος ρωγμών[12]



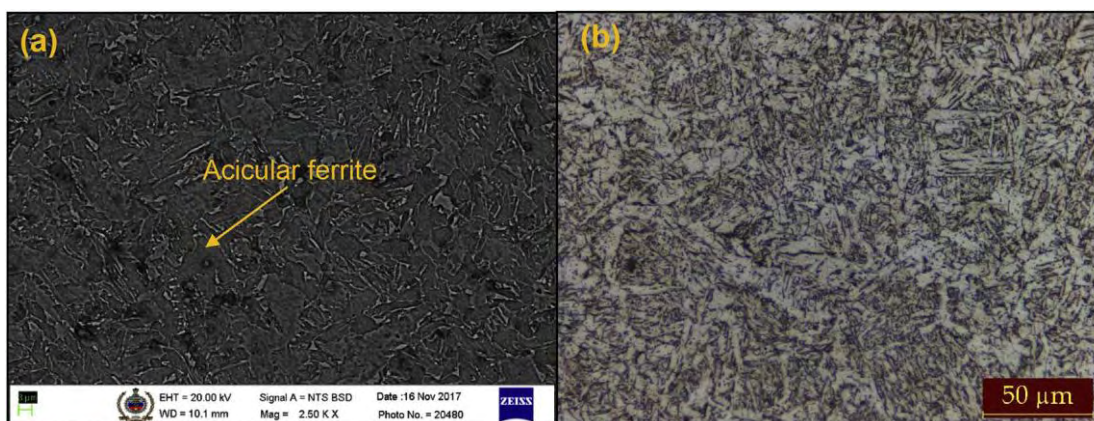
Εικόνα 2.7 Δοκίμιο ArmoX 500T μετά από χημική προσβολή[12]



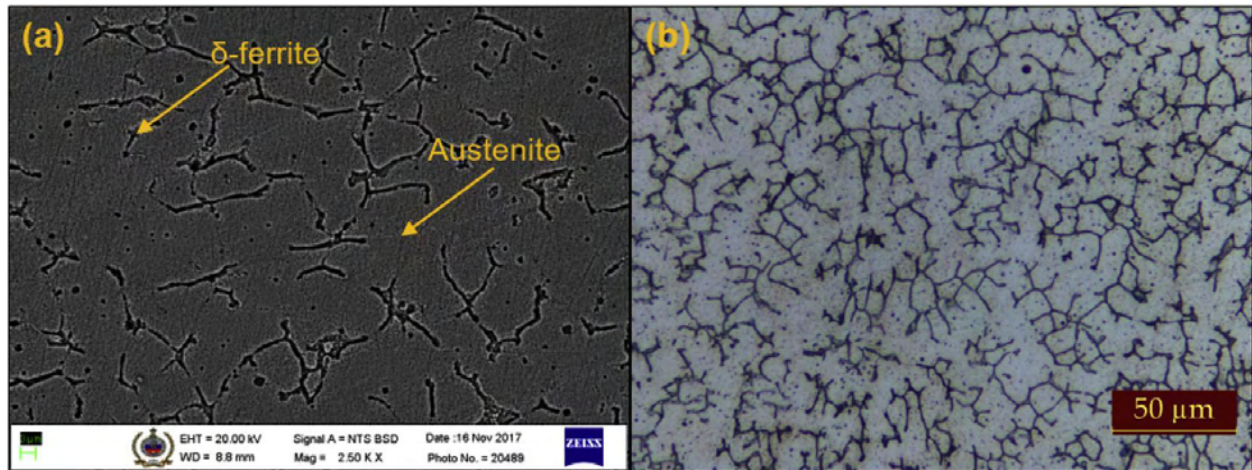
Τέλος, η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρεται στην επίδραση των συγκολλητικών υλικών στις ιδιότητες του Armox 500T μετά από συγκόλληση με τη χρήση της μεθόδου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW). Για το σκοπό του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια με φερριτική δομή χαμηλά σε υδρογόνο (Low Hydrogen Ferrite, LHF) και ωστενιτικά ανοξείδωτα ηλεκτρόδια (Austenitic Stainless Steel, ASS). Η απόδοση της σύνδεσης της συγκόλλησης με τη χρήση LHF ήταν 41.7% και με τη χρήση ASS ηλεκτροδίου ήταν 30.6% της αρχικής, γεγονός που φανερώνει την επιρροή του συγκολλητικού υλικού στις ιδιότητες του χάλυβα. Η περιεκτικότητα Ni στα συγκολλητικά υλικά επηρεάζει την σκληρότητα του τελικού αποτελέσματος σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες. Ακόμη, τα ASS ηλεκτρόδια περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα Ni από τα LHF. Για το λόγο αυτό εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας μετά τη συγκόλληση σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο, σε αντίθεση με τα LHF στα οποία παρατηρείται υποβάθμιση της σκληρότητας. Στις εικόνες 2.8-2.10 δίδονται οι μικροδομές με ηλεκτρονικό και οπτικό μικροσκόπιο για το χάλυβα Armox 500T πριν αλλά και μετά τη συγκόλληση για τα δύο είδη ηλεκτροδίων και στο διάγραμμα 2.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης. [13]



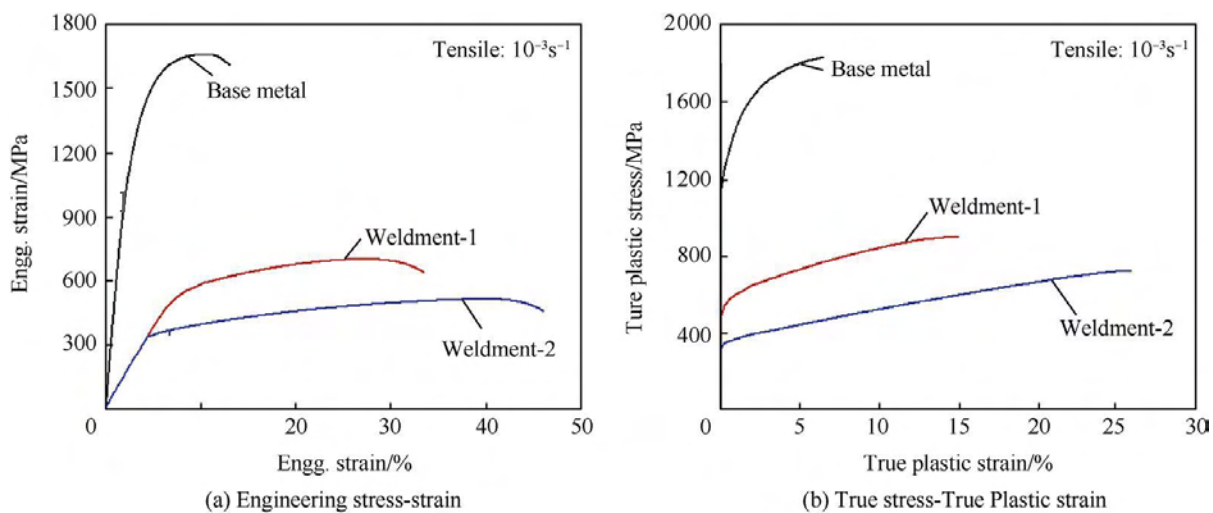
Εικόνα 2.8 Armox 500T, Βασικό μέταλλο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[14]



Εικόνα 2.9 Armox 500T, LHF ηλεκτρόδιο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[13]



Εικόνα 2.10 ArmoX 500T, ASS ηλεκτρόδιο, (a)SEM, (b) Οπτική Μικροσκοπία[13]



Διάγραμμα 2.6 (α)Μηχανική τάση-παραμόρφωση, (β)Πραγματική τάση-Πραγματική πλαστική παραμόρφωση[13]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές συγκολλήσεις ελασμάτων χάλυβα ArmoX 500T πάχους 3mm με τη μέθοδο TIG. Σκοπός ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση των συνθηκών συγκόλλησης στις μηχανικές ιδιότητες και την τελική μικροδομή του υλικού και να καθοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εργαστηριακή αξιολόγησή τους.

### 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε πέντε δοκιμαστικές συγκολλήσεις συμβολής (butt joints) με επιλεγμένες συνθήκες για κάθε πείραμα.

Οι συγκολλήσεις έγιναν στο μηχανουργείο Στραντζοποιΐα Βόλου- Αφοί Λαζάρου στο υλικό ArmoX 500T με τη μέθοδο GTAW-TIG από εξειδικευμένο συγκολλητή. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα με διαστάσεις  $100 \times 80 \times 3$  mm (μήκος  $\times$  πλάτος  $\times$  πάχος) και ως υλικό πληρώσεως χρησιμοποιήθηκε το OK Tigrod 12.64 με διάμετρο 2 mm. Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 δίνονται η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του ηλεκτροδίου:

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση ηλεκτροδίου OK Tigrod 12.64[14]

Mn	C	Si
1.68%	0.074%	0.95%

Πίνακας 3.2 Μηχανικές ιδιότητες ηλεκτροδίου OK Tigrod 12.64[14]

Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation %
525	595	26

Ως προστατευτικό αέριο χρησιμοποιήθηκε καθαρό Αργό (Argon 99,99 %) με παροχή 12 lit/min. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι συνθήκες συγκόλλησης των πέντε δοκιμών.



Πίνακας 3.3 Συνθήκες πειραματικών συγκολλήσεων

A/A δοκιμίου	Ένταση Ρεύματος (A)	Τάση Ρεύματος (V)	Ταχύτητα Συγκόλλησης (mm/s)	PEΘ (J/mm)	Παρατηρήσεις
1°	55	12	1,67	300	-
2°	105	12	1,67	600	-
3°	125	12	1,67	700	-
4°	80	12	1,67	440	Έγινε συγκόλληση και από τις 2 πλευρές
5°	90	12	1,67	535	Έγινε συγκόλληση και από τις 2 πλευρές

Η εργαστηριακή μελέτη των δοκιμίων συμπεριελάμβανε τους παρακάτω ελέγχους.

### 3.1 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος των δοκιμίων αποτελεί το πρώτο στάδιο μακροσκοπικής εξέτασης της πειραματικής διαδικασίας. Στο στάδιο αυτό έγινε παρατήρηση και φωτογράφιση των δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν το πρόσωπο και η ρίζα της συγκόλλησης, η ύπαρξη τυχόν παραμορφώσεων των ελασμάτων καθώς και η ομοιομορφία στη ραφή της συγκόλλησης. Ο οπτικός έλεγχος ολοκληρώθηκε με την παρατήρηση των δοκιμίων στο στερεοσκόπιο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο Leica WILD M3Z του εργαστήριου Υλικών.

### 3.2 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος

Από τα αρχικά συγκολλημένα δοκίμια τα, έγινε η κοπή με το κοπτικό Unitom-2 της Struers (Εικόνα 3.1) για τη δημιουργία μικρότερων τεμαχίων τα οποία προετοιμάστηκαν μεταλλογραφικά. Η μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων περιελάμβανε τον εγκιβωτισμό τους σε ρητίνη προς δημιουργία «καλουπιών», τα όποια στη συνέχεια λειάνθηκαν με χαρτια SiC διαφόρων μεγεθών κόκκων (80,120,220,320,500,800,1000). Η λείανση των δοκιμίων έγινε στο λειαντικό Knuth-Roter-3 της Struers. Το τελικό στάδιο της προετοιμασίας είναι η στίλβωση των «καλουπιών» με διαμαντόπαστα 3μm στο Dap-V της Struers και η χημική τους προσβολή με τη χρήση αντιδραστήριου Nital 5%. Ο μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος έγινε με το οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH.



Εικόνα 3.1 Κοπή δοκιμίων για μεταλλογραφική προετοιμασία

### 3.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Η μικροσκληρομέτρηση των δειγμάτων γίνεται για να παρατηρηθεί η μεταβολή της σκληρότητας του υλικού στις διάφορες περιοχές που προκύπτουν μετά το πέρας της συγκόλλησης. Οι μετρήσεις έγιναν με το μικροσκληρόμετρο SHIMADZU HMV-2000 του εργαστηρίου Υλικών με βάρος 300 γραμμάρια ( $HV_{0.3}$ ) και χρόνο μέτρησης 15 δευτερόλεπτα. Αρχή των σκληρομετρήσεων ήταν το κέντρο της λίμνης συγκόλλησης και συνέχιζαν με φορά προς το μέταλλο βάσης ανά 500  $\mu\text{m}$ .

### 3.4 Δοκιμές εφελκυσμού

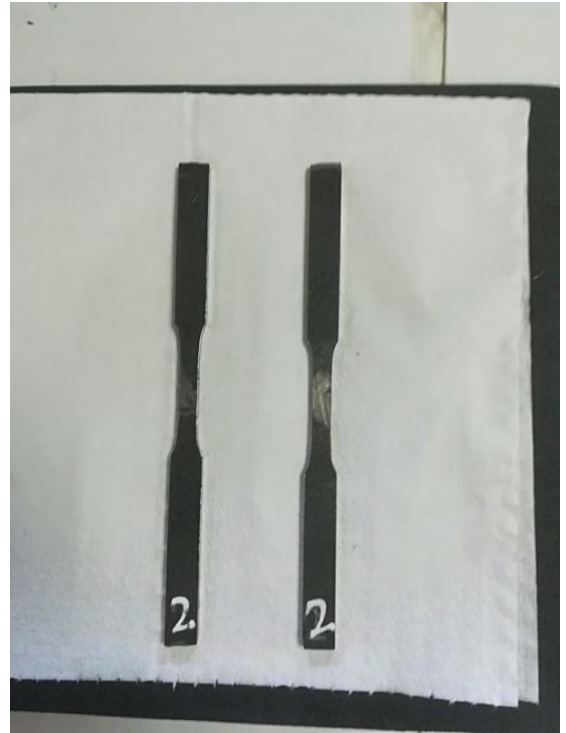
Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του Τμήματος με τη μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 (Εικόνα 3.2). Από τα δείγματα Νο. 4 και Νο. 5 του Πιν. 3.2 προετοιμάστηκαν 4 δοκίμια εφελκυσμού (δύο για κάθε συνθήκη συγκόλλησης που παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.3 και 3.4 σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM-E8



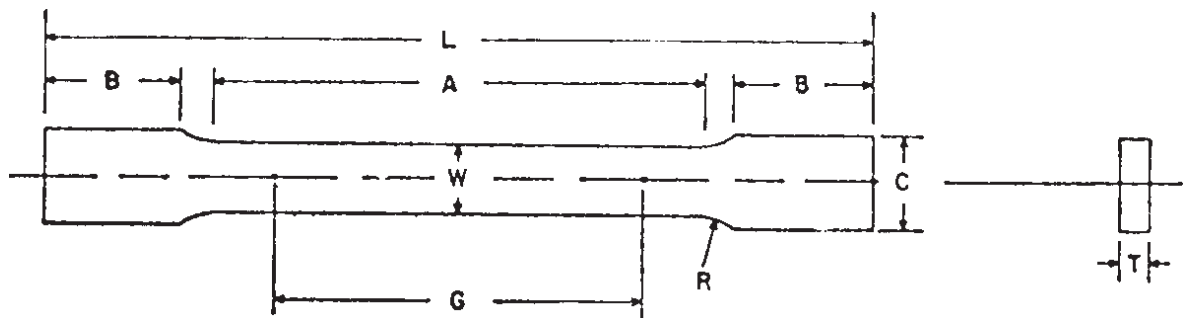
Εικόνα 3.2 Μηχανή εφελκυσμού Instron 8801



Εικόνα 3.3 Δοκίμια εφελκυσμού από το δείγμα 4



Εικόνα 3.4 Δοκίμια εφελκυσμού από το δείγμα 5



Εικόνα 3.5 Σχέδιο δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα συγκολλημένα δείγματα.

Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτικός πίνακας ελέγχων και δοκιμών

A/A δοκιμίου	Οπτικός έλεγχος	Μικροσκοπικός έλεγχος	Μικροσκληρομέτρηση	Δοκιμή εφελκυσμού
1	x	x	x	-
2	x	x	x	-
3	x	x	x	-
4	x	x	x	x
5	x	x	x	x

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 4.1 Οπτικός έλεγχος-Μακροδομή συγκολλήσεων

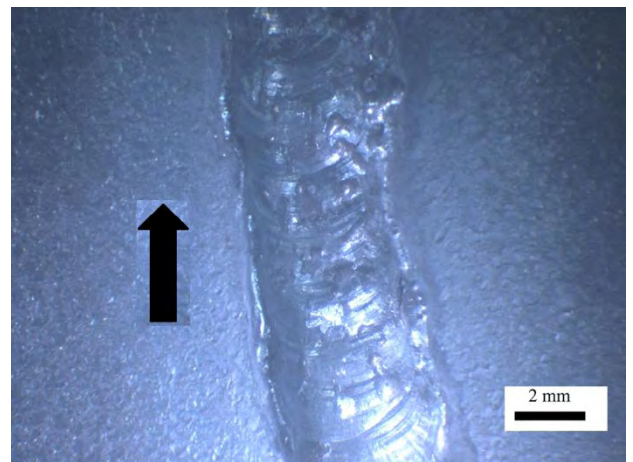
Στο παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου ανά δοκίμιο.

- **Δοκίμιο 1 (PEΘ= 300 J/mm)**

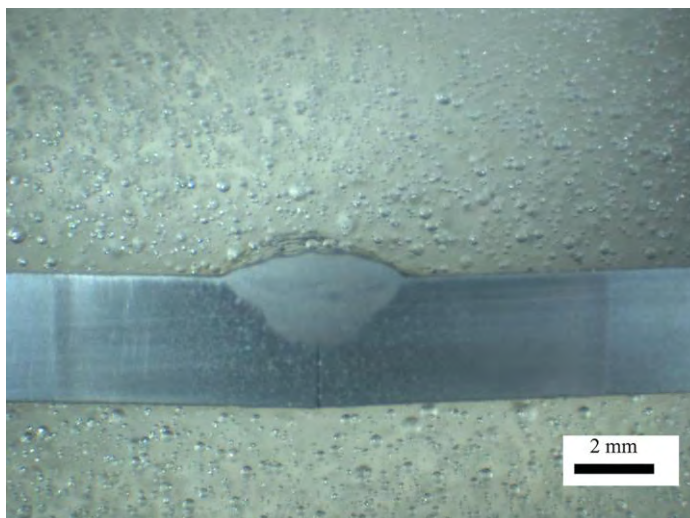
Η επιφάνεια του Δοκίμιο 1 παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1. Στην Εικόνα 4.2 το βέλος δείχνει τη κατεύθυνση της συγκόλλησης και παρατηρείται ότι η συγκόλληση εμφανίζει μικρή τραχύτητα στη ραφή. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η μακροδομή της συγκόλλησης. Διακρίνονται τα όρια της λίμνης συγκόλλησης (ΛΣ) και της θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης (ΘΕΖ). Η συγκόλληση δεν είναι πλήρους διείσδυσης. Το πλάτος της λίμνης είναι 4.18mm και το βάθος διείσδυσης είναι 1.33mm



Εικόνα 4.1 Δοκίμιο 1



Εικόνα 4.2 (x6.5) Δοκίμιο 1, μέτωπο της συγκόλλησης



Εικόνα 4.3 Δοκίμιο 1,τομή της συγκόλλησης

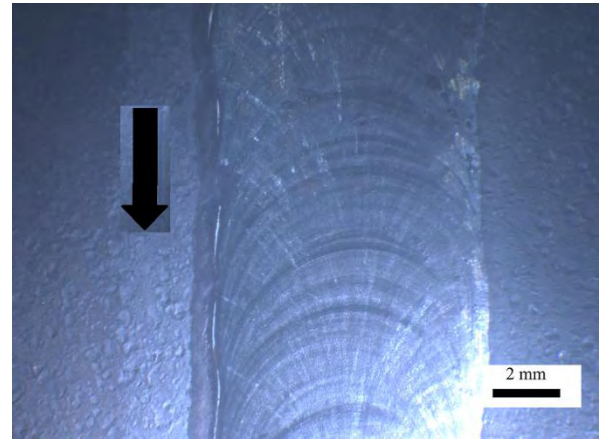


- **Δοκίμιο 2 (PEΘ= 600 J/mm)**

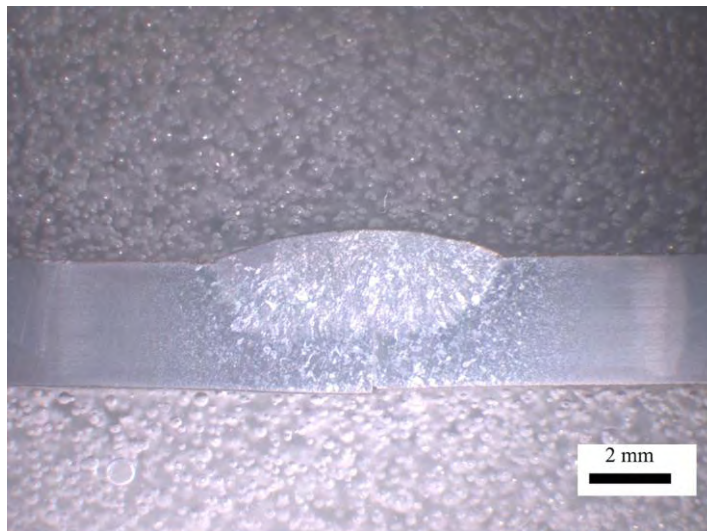
Το Δοκίμιο 2 παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4. Στην Εικόνα 4.5 παρατηρείται ότι η συγκόλληση εμφανίζει μεγαλύτερη τραχύτητα στη ραφή από ότι το δοκίμιο 1. Το βέλος δείχνει την διεύθυνση συγκόλλησης. Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η μακροδομή της συγκόλλησης, όπου διακρίνονται τα όρια ΛΣ και της ΘΕΖ. Η συγκόλληση δεν είναι πλήρους διείσδυσης, αλλά το filler φτάνει σε αρκετά μεγάλο βάθος υλικού. Το πλάτος της λίμνης είναι ίσο με 6.95mm και το βάθος είναι 2.29mm.



Εικόνα 4.4 Δοκίμιο 2



Εικόνα 4.5 (x6.5) Δοκίμιο 2, μέτωπο της συγκόλλησης



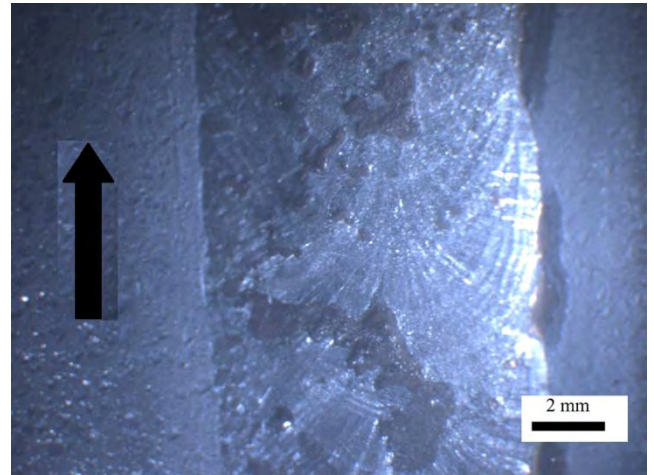
Εικόνα 4.6 (x6.5) Δοκίμιο 2, τομή της συγκόλλησης

- **Δοκίμιο 3 (PEΘ= 700 J/mm)**

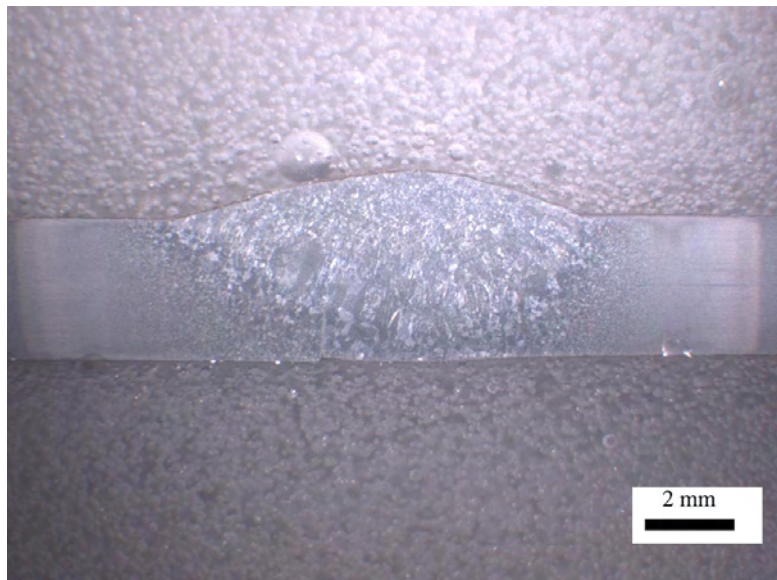
Στην Εικόνα 4.7 εμφανίζεται το δοκίμιο 3. Η ραφή της συγκόλλησης του συγκεκριμένου δοκιμίου εμφανίζει τη μεγαλύτερη τραχύτητα, ενώ εμφανείς είναι και οι πόροι που έχουν δημιουργηθεί (Εικόνα 4.8). Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η μακροδομή της συγκόλλησης καθώς και τα σύνορα της ΛΣ και της ΘΕΖ. Η συγκόλληση δεν είναι πλήρους διείσδυσης, αλλά το filler φτάνει στο μέγιστο βάθος υλικού από όλα τα δοκίμια. Το πλάτος ισούται με 8.76mm και το βάθος με 2.72mm.



Εικόνα 4.7 Δοκίμιο 3



Εικόνα 4.8 (×6.5) Δοκίμιο 3, μέτωπο της συγκόλλησης



Εικόνα 4.9 (×6.5) Δοκίμιο 3, τομή της συγκόλλησης

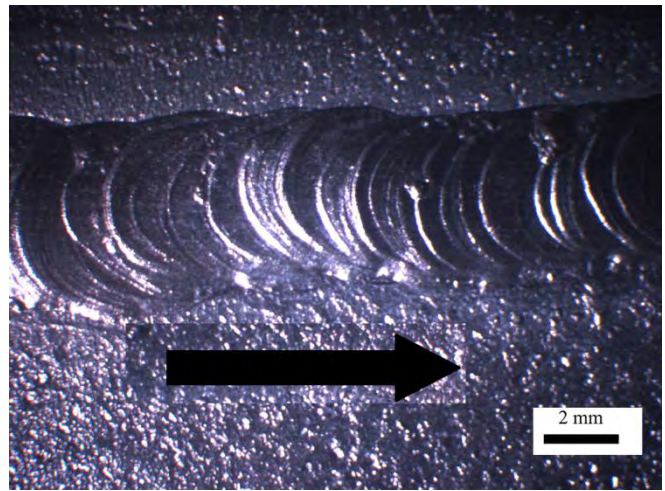


- Δοκίμιο 4 (PEΘ= 440 J/mm)

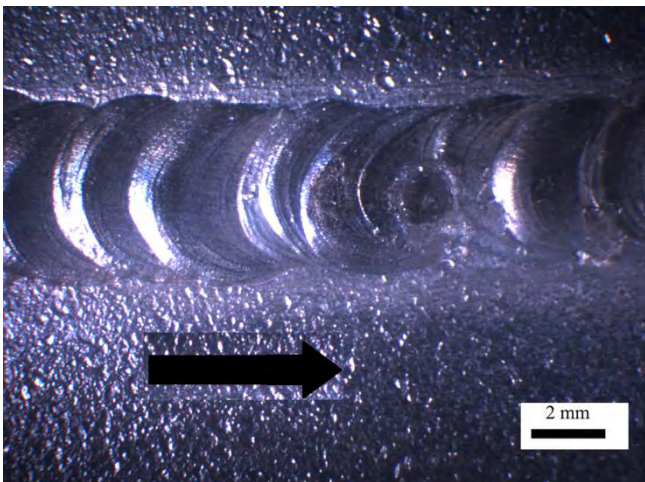
Στην Εικόνα 4.10 εμφανίζεται η συγκόλληση του δοκιμίου 5. Η ραφή της συγκόλλησης είναι λεία και ομαλή και στις 2 πλευρές που έχουν συγκολληθεί (Εικόνα 4.11 και 4.12). Τα βέλη απεικονίζουν τη κατεύθυνση συγκόλλησης και στις 2 πλευρές του ελάσματος. Η μακροδομή της συγκόλλησης καθώς και τα σύνορα της ΛΣ και της ΘΕΖ φαίνονται στην Εικόνα 4.13 . Η συγκόλληση είναι πλήρους διείσδυσης καθώς έχουν γίνει περάσματα και από τις δύο πλευρές του ελάσματος. Το πλάτος της λίμνης ισούται με 4.23 mm και το βάθος με 1.52mm.



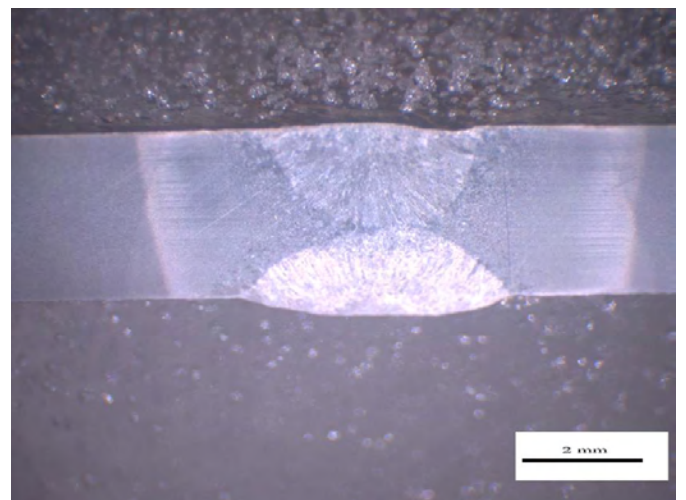
Εικόνα 4.10 Δοκίμιο 4



Εικόνα 4.11 (x6.5) Δοκίμιο 4, πάνω επιφάνεια της συγκόλλησης



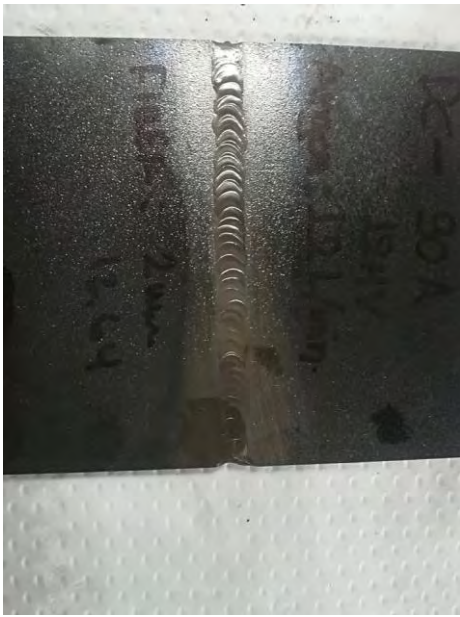
Εικόνα 4.12 (x6.5) Δοκίμιο 4, κάτω επιφάνεια της συγκόλλησης



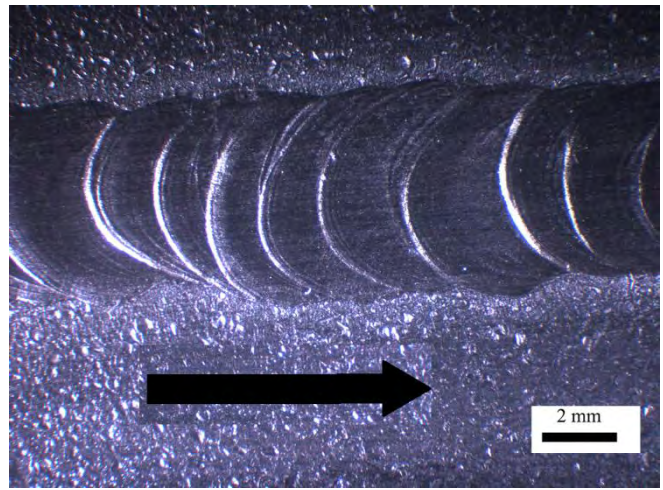
Εικόνα 4.13 (x10) Δοκίμιο 4, τομή της συγκόλλησης

- **Δοκίμιο 5 (PEΘ= 535 J/mm)**

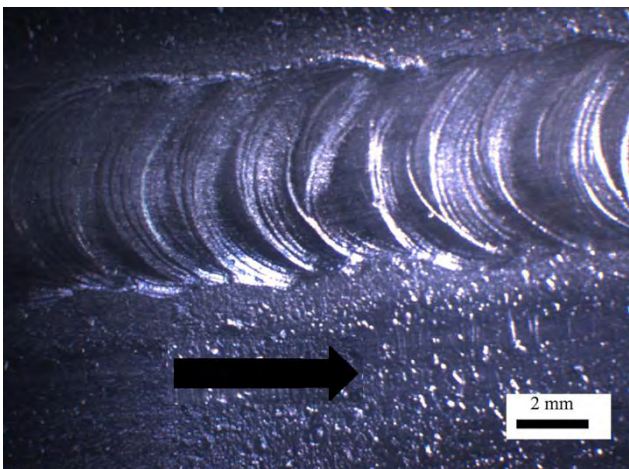
Στην Εικόνα 4.14 εμφανίζεται η συγκόλληση του δοκιμίου 5. Η λίμνη συγκόλλησης στην πάνω και κάτω επιφάνεια του ελάσματος είναι σχετικά λεία και χωρίς την ύπαρξη ατελειών (Εικόνα 4.15 και 4.16). Τα βέλη απεικονίζουν τη κατεύθυνση συγκόλλησης και στις 2 πλευρές του ελάσματος. Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζεται η μακροδομή του δοκιμίου καθώς και τα όρια της ΛΣ και ΘΕΖ. Η συγκόλληση είναι πλήρους διείσδυσης καθώς έχουν γίνει περάσματα και από τις δύο πλευρές του ελάσματος, όμως τα σύνορα της ΘΕΖ δε συμπίπτουν όπως στο δοκίμιο 4. Το πλάτος της λίμνης ισούται με 5.9 mm και το βάθος με 2 mm.



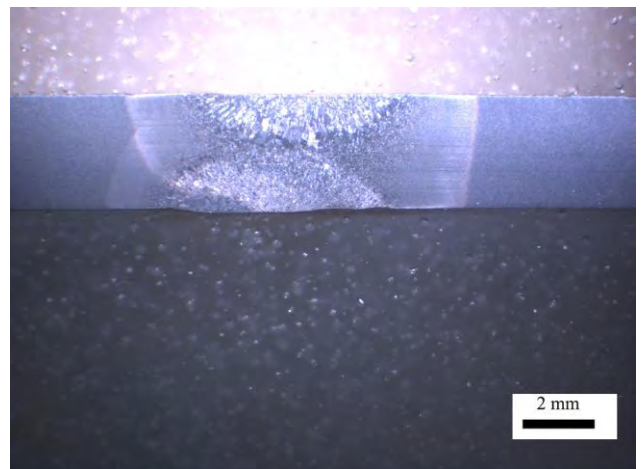
Εικόνα 4.14 Δοκίμιο 5



Εικόνα 4.15 (x6.5) Δοκίμιο 5, πάνω επιφάνεια της συγκόλλησης



Εικόνα 4.16 (x6.5) Δοκίμιο 5, κάτω επιφάνεια της συγκόλλησης

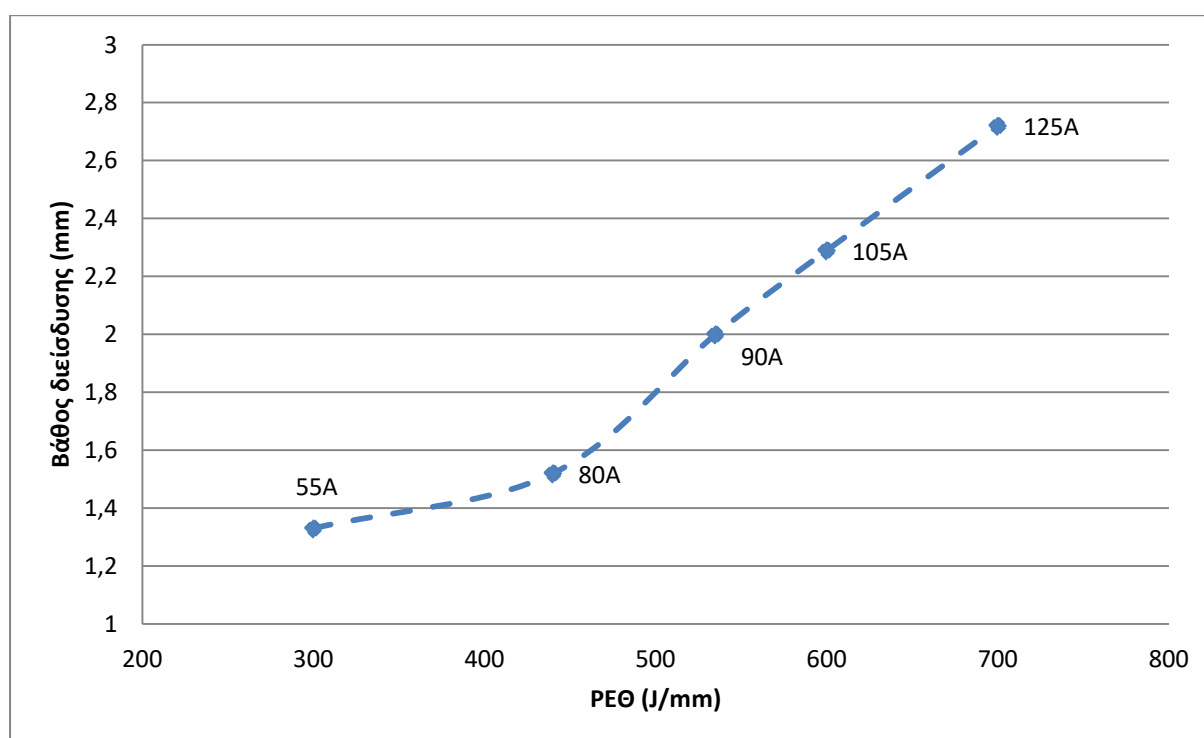


Εικόνα 4.17 (x6,5) Δοκίμιο 5, τομή της συγκόλλησης

Ο Πίνακας 4.1 περιέχει συγκεντρωτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε συγκόλλησης (βάθος διείσδυσης, πλάτος). Στα διαγράμματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζεται η συσχέτιση των μεγεθών αυτών με τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας (PEΘ) για κάθε συγκόλληση. Από τα διαγράμματα 4.1 και 4.2 προκύπτει ότι τόσο το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης όσο και το βάθος διείσδυσης αυξάνονται με την αύξηση του PEΘ.

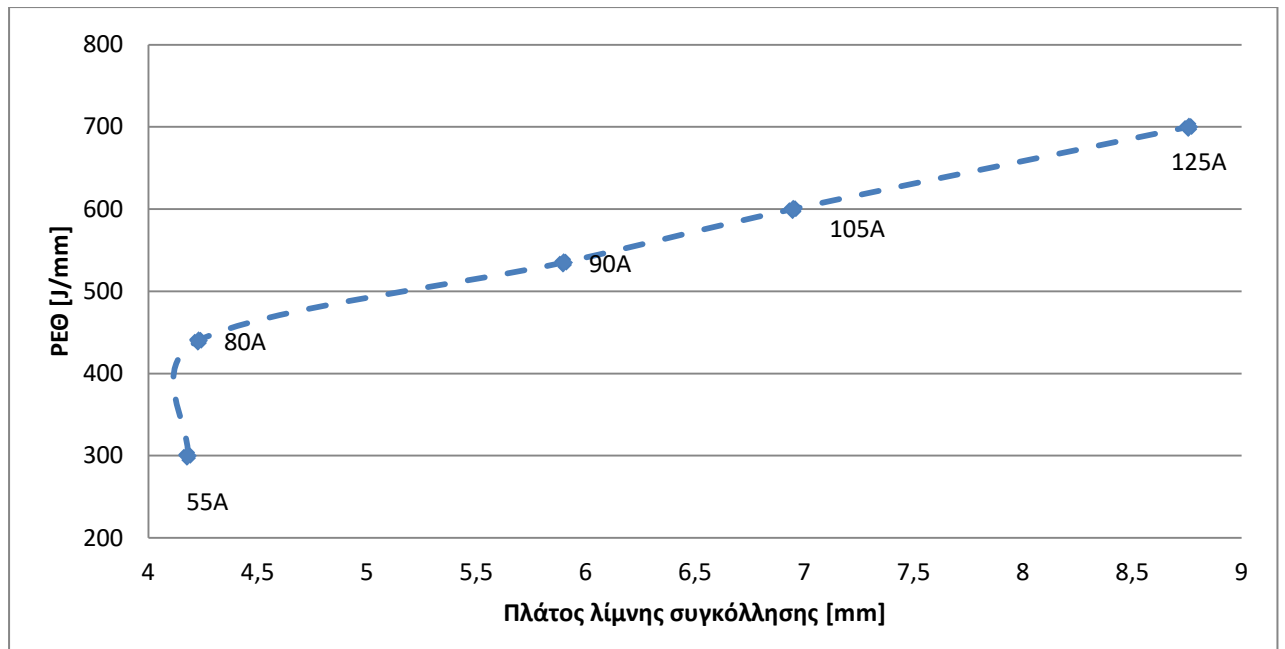
Πίνακας 4.1 Τιμές πλάτους και βάθους διείσδυσης της λίμνης συγκόλλησης

A/A ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΠΛΑΤΟΣ (mm)	ΒΑΘΟΣ (mm)
1	4.18	1.33
2	6.95	2.29
3	8.76	2.72
4	4.23	1.52
5	5.9	2



Διάγραμμα 4.1 Γραφική απεικόνιση βάθους διείσδυσης συγκόλλησης σε συνάρτηση με το PEΘ

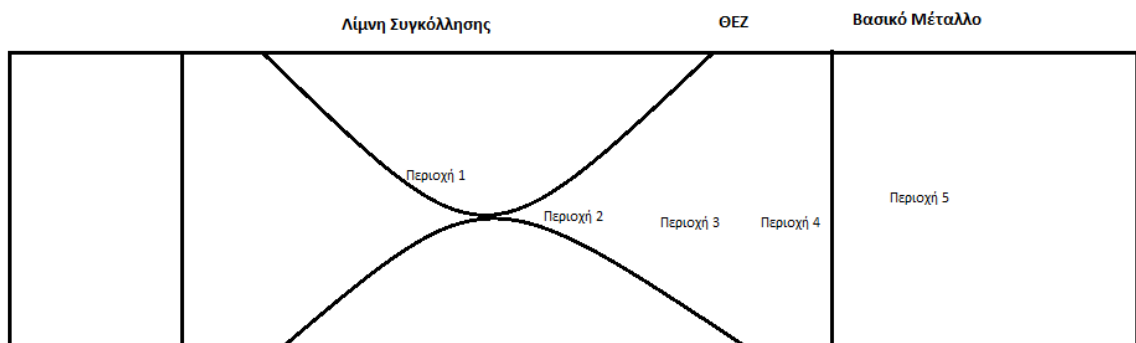




Διάγραμμα 4.2 Γραφική απεικόνιση πλάτους λίμνης συγκόλλησης σε συνάρτηση με το PEQ

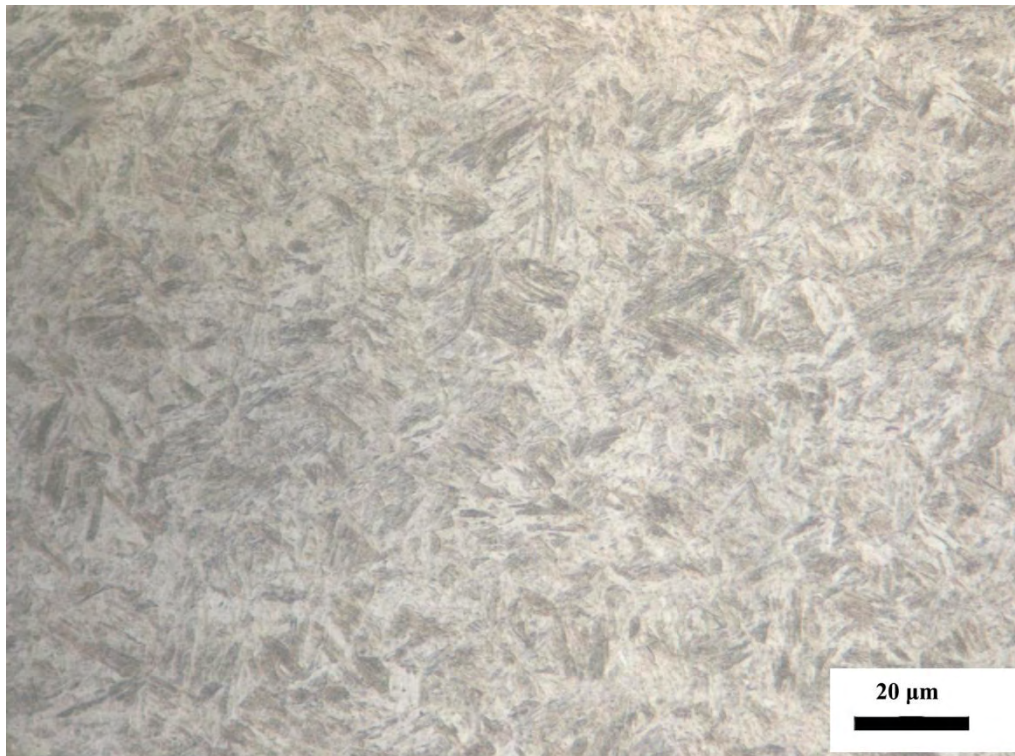
## 4.2 Μεταλλογραφικός Έλεγχος

Η μεταλλογραφική ανάλυση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στην εγκάρσια τομή κάθε δοκιμίου και αφορούσε τρεις ζώνες μελέτης: τη λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ), τη θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) και το βασικό μέταλλο (BM). Στο Εικόνα 4.18 φαίνονται τα σημεία στα οποία έγινε η παρατήρηση με το μικροσκόπιο σε κάθε μια από τις τρεις περιοχές της συγκόλλησης.

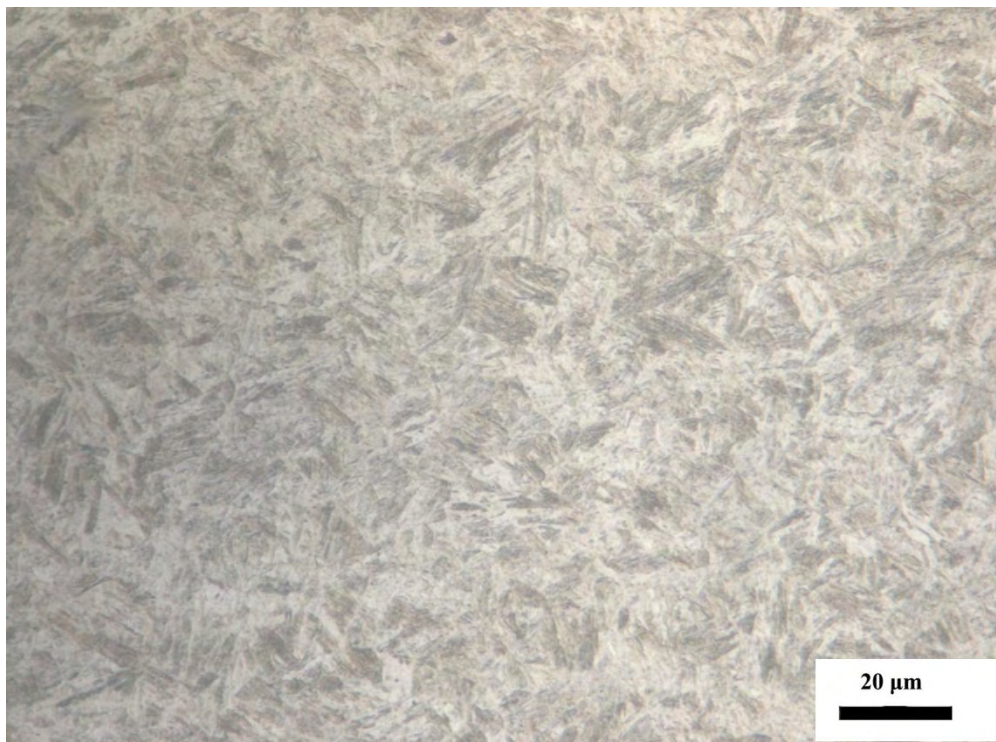


Εικόνα 4.18 Σχεδιάγραμμα μεταλλογραφικής ανάλυσης των δειγμάτων

Η δομή του βασικού μετάλλου του χάλυβα Armox 500T αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτης, όπως φαίνεται και στις εικόνες 4.19 και 4.20.



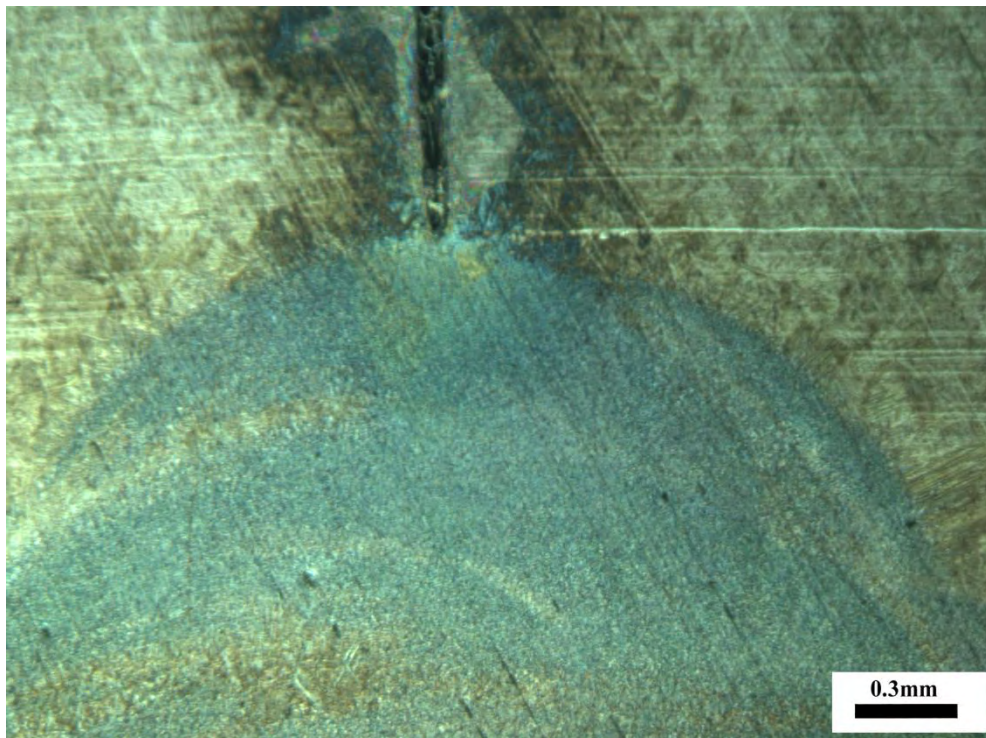
Εικόνα 4.19 (×1000) Δομή βασικού μετάλλου, επαναφερμένος μαρτενσίτης (περιοχή 5)



Εικόνα 4.20 (×1000) Δομή βασικού μετάλλου, επαναφερμένος μαρτενσίτης (περιοχή 5)

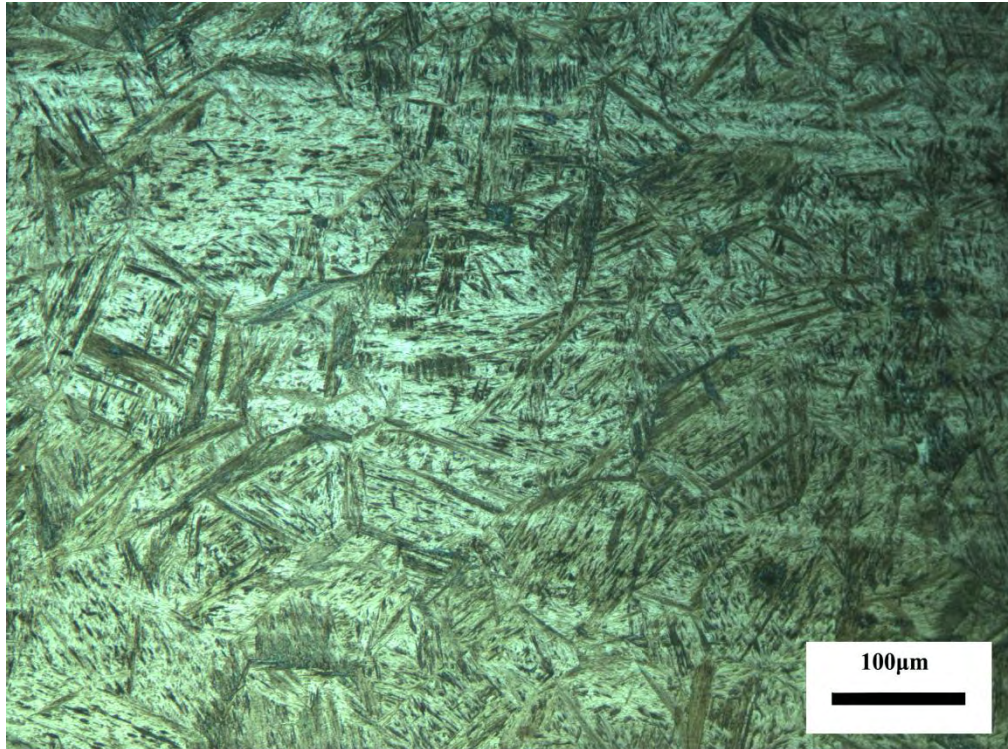
- **Δοκίμιο 1 (PEΘ=300 J/mm)**

Στη εικόνα 4.21 φαίνεται η λίμνη συγκόλλησης του δοκιμίου, καθώς και η περιοχή του μετάλλου όπου δεν υπάρχει πλήρης διείσδυση συγκολλητικού υλικού, όπως είχε φανεί και στη μακροδομή του υλικού. Κοντά στη λίμνη συγκόλλησης έχει σχηματιστεί χονδρόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνα 4.22) ενώ προς το κέντρο της ΘΕΖ εντοπίζεται λεπτόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνες 4.23 και 4.24). Η διαφορά αυτή στο μέγεθος των κόκκων της μικροδομής είναι εμφανής και οφείλεται στο ότι η περιοχή κοντά στη ΛΣ παρέμεινε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε υψηλές θερμοκρασίες (tempering) με αποτέλεσμα κατά την ψύξη του υλικού το σχηματισμό μεγαλύτερου μεγέθους κόκκων. Στην Εικόνα 4.25 παρουσιάζεται το σύνορο μεταξύ ΘΕΖ και ΒΜ. Στη συγκεκριμένη περιοχή η θερμοκρασία της συγκόλλησης έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της, με αποτέλεσμα η τελική δομή να αποτελείται από παραμένοντα ωστενίτη και μπαινίτη.

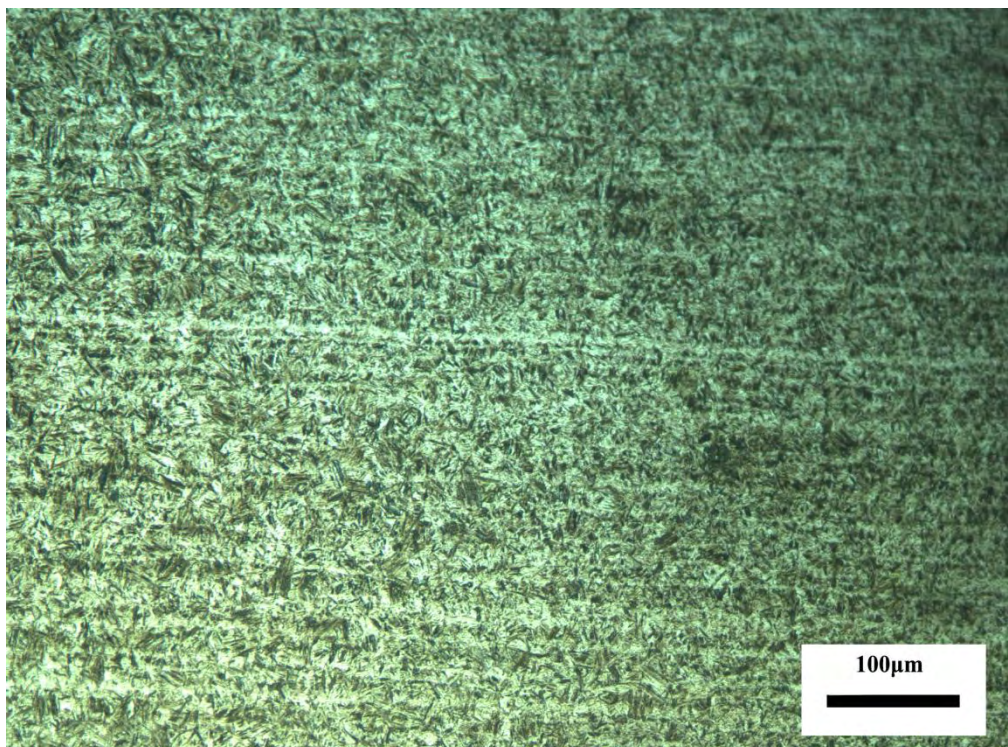


Εικόνα 4.21 (x50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1)



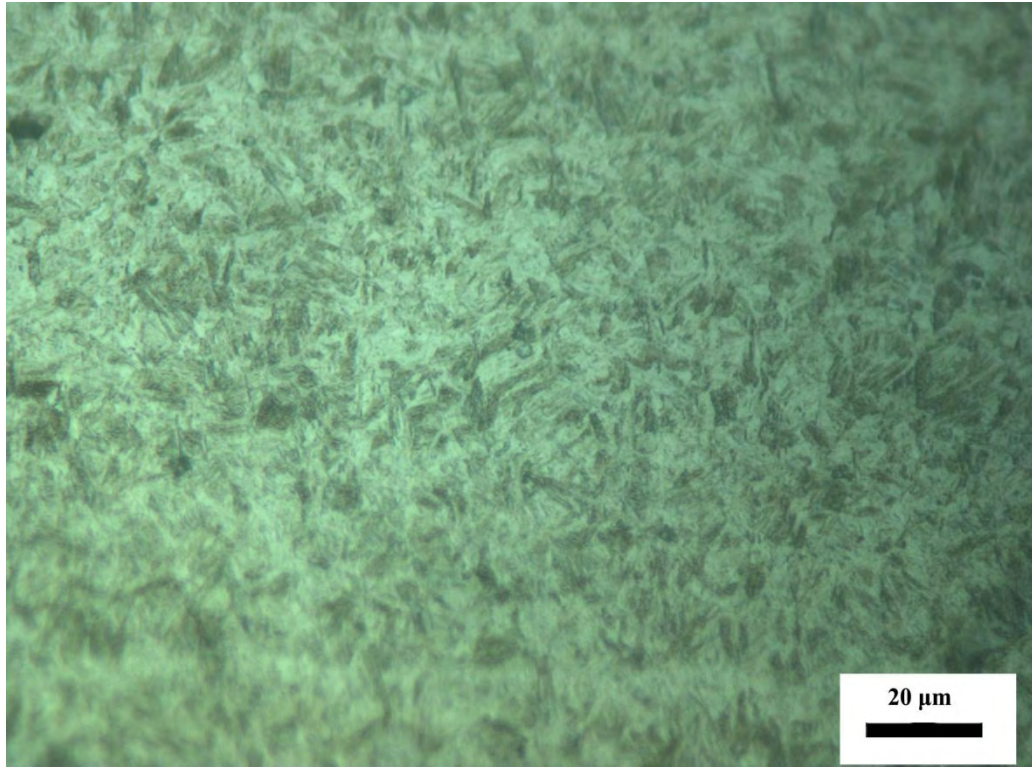


Εικόνα 4.22 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)

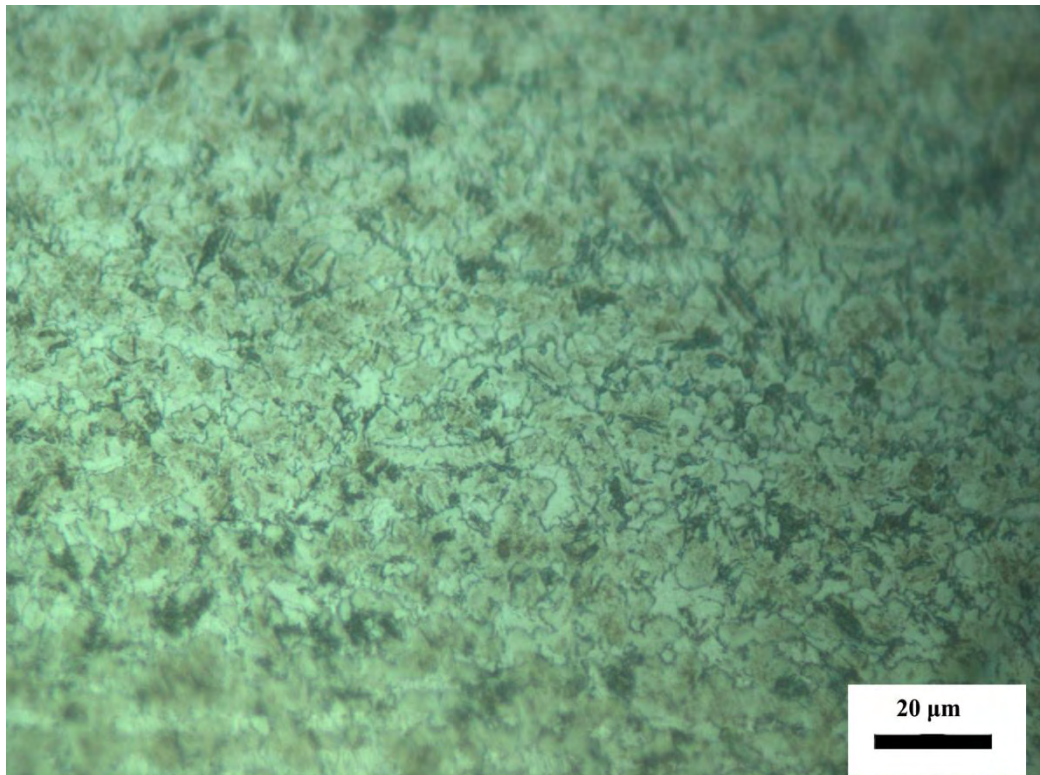


Εικόνα 4.23 (×200) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)





Εικόνα 4.24 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)

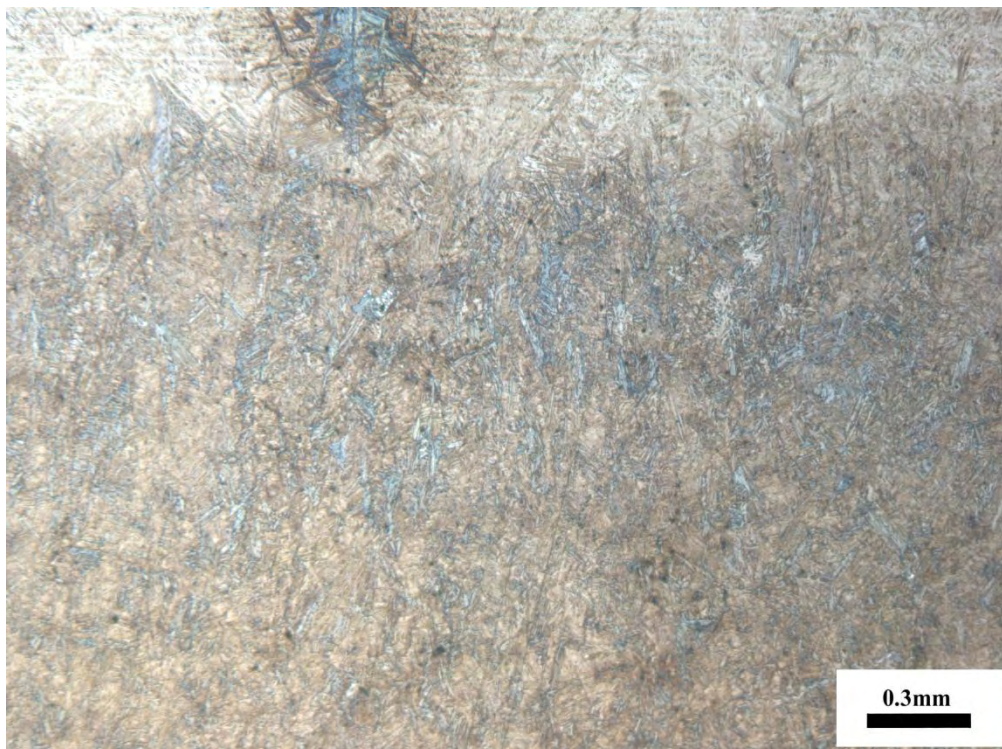


Εικόνα 4.25 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

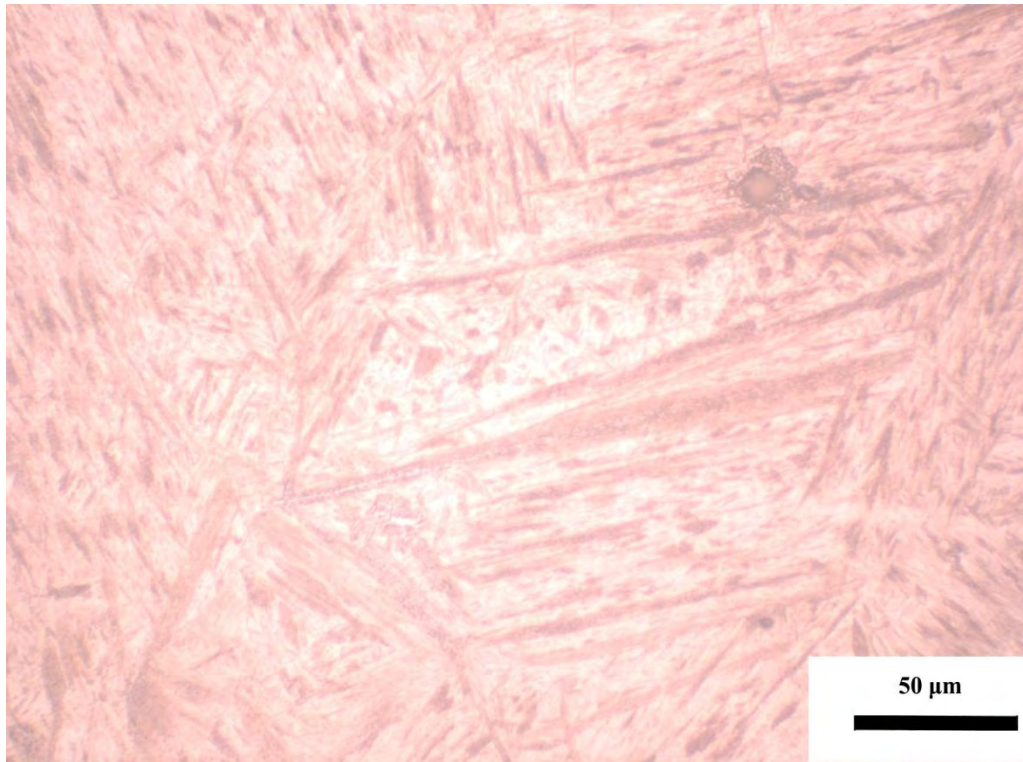


- **Δοκίμιο 2 (PEΘ= 600 J/mm)**

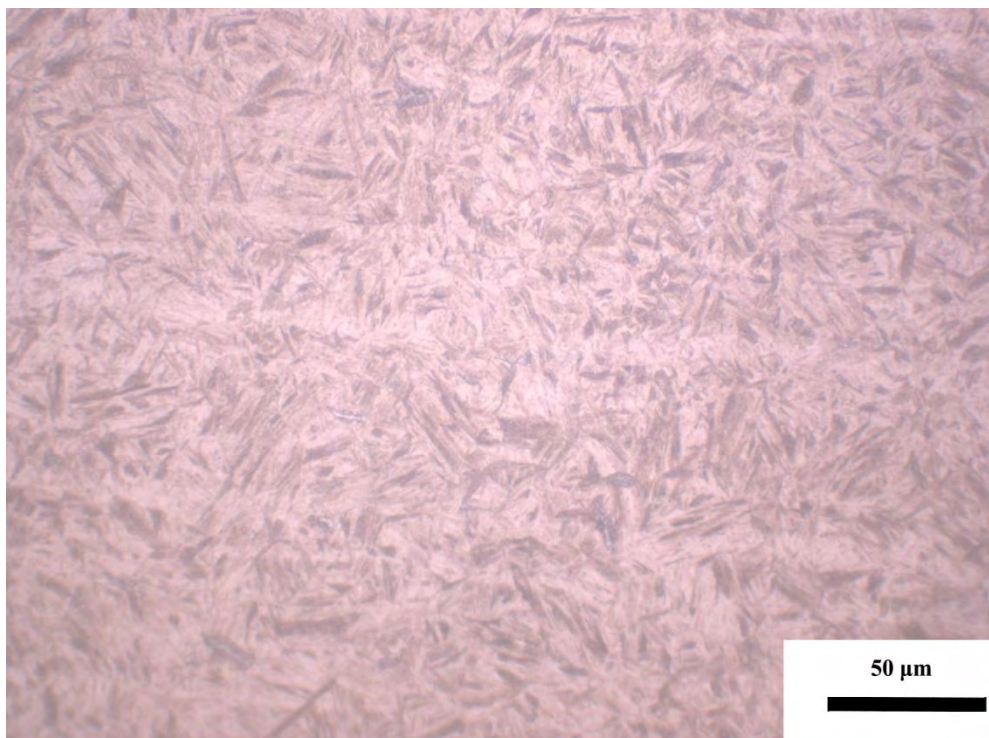
Στη εικόνα 4.26 φαίνεται η λίμνη συγκόλλησης του δοκιμίου 2, καθώς και η περιοχή του μετάλλου όπου δεν υπάρχει πλήρης διείσδυση συγκολλητικού υλικού. Στην Εικόνα 4.27 απεικονίζεται η περιοχή της ΘΕΖ κοντά στη ΛΣ, όπου η δομή του υλικού αποτελείται από χονδρόκοκκο μαρτενσίτη και πολύ μικρό ποσοστό μπαινίτη. Αντίθετα, στο κέντρο της ΘΕΖ έχει σχηματιστή λεπτόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνα 4.28). Τέλος, στις εικόνες 4.28 και 4.29 παρουσιάζεται η περιοχή της ΘΕΖ που συνορεύει με το ΒΜ. Στην 4.28 φαίνονται οι ζώνες έλασης στην περιοχή του ΒΜ και η εκλέπτυνση των κόκκων στο σύνορο, ενώ στην 4.29 διακρίνεται η τελική δομή της περιοχής η οποία αποτελείται από παραμένοντα ωστενίτη και μπαινίτη.



Εικόνα 4.26 (x50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1)

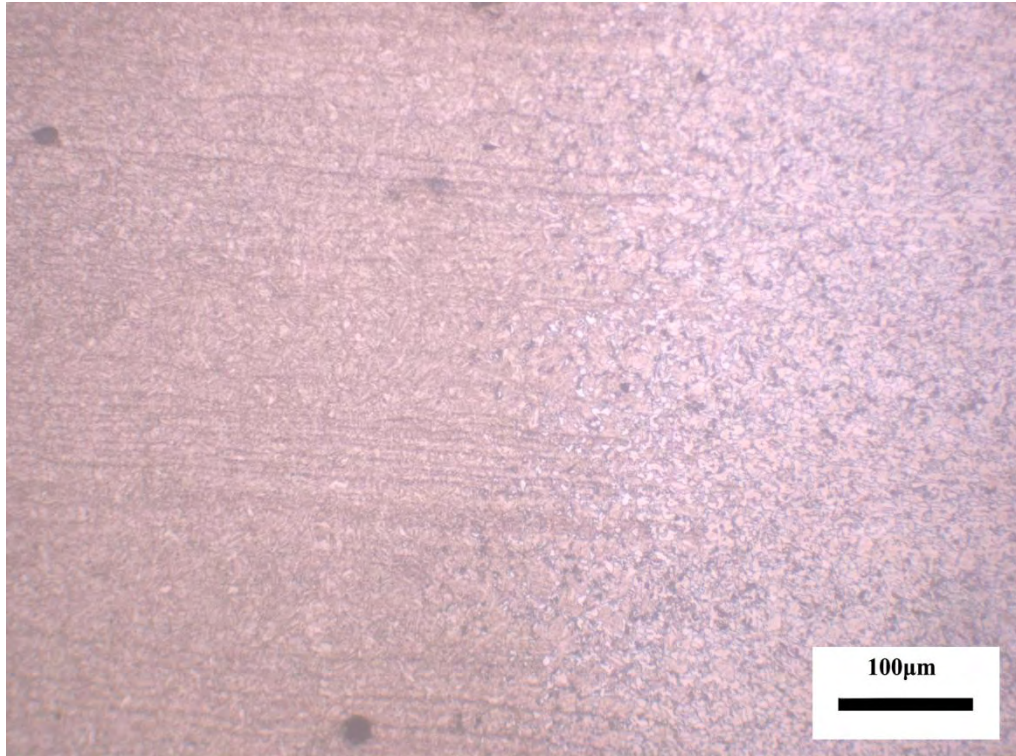


Εικόνα 4.27 (×500) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)

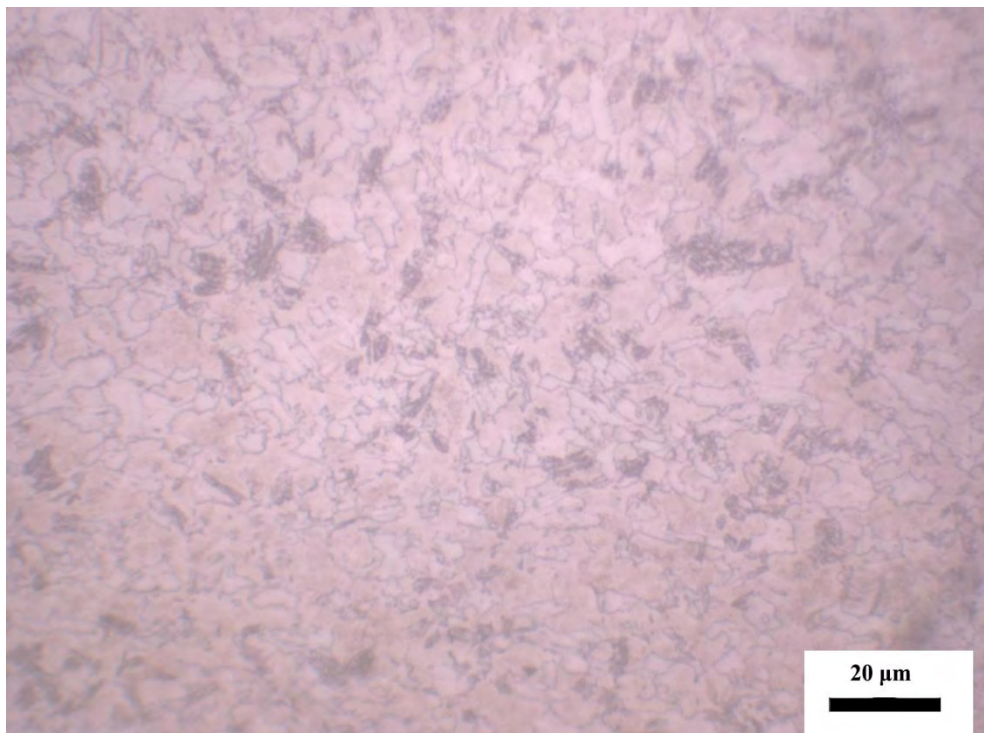


Εικόνα 4.28 (×500) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)





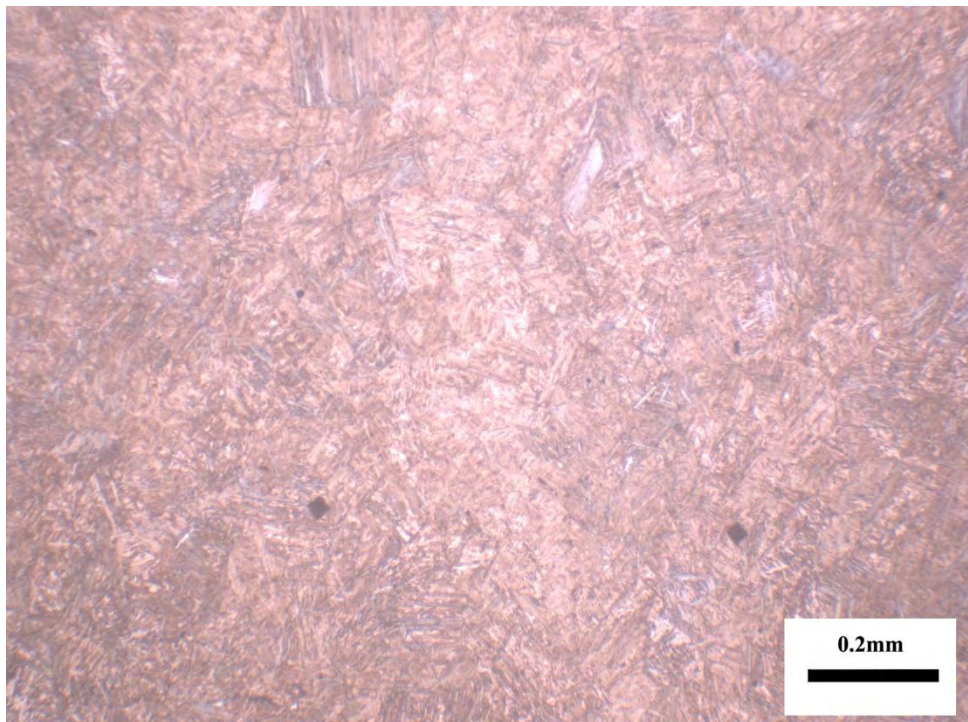
Εικόνα 4.29 ( $\times 200$ ) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)



Εικόνα 4.30 ( $\times 1000$ ) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

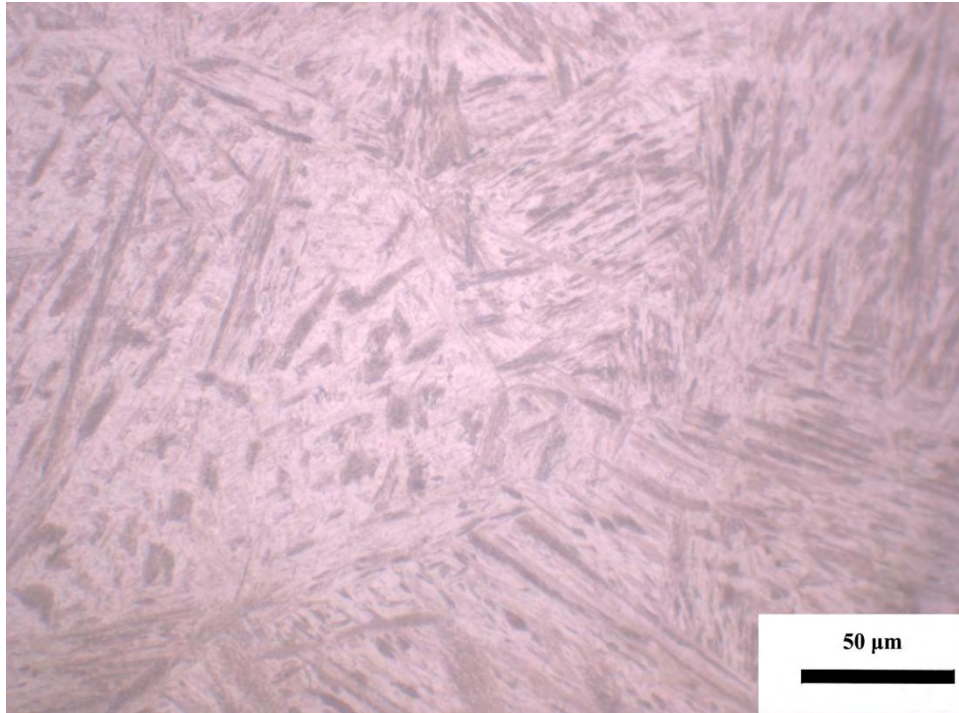
- **Δοκίμιο 3 (PEΘ= 700 J/mm)**

Στην Εικόνα 4.31 παρουσιάζεται η μικροδομή της ΛΣ του δοκιμίου 3. Στις Εικόνες 4.32 και 4.33 απεικονίζεται η περιοχή της ΘΕΖ κοντά στη ΛΣ και το κέντρο της ΘΕΖ αντίστοιχα. Η μικροδομή της περιοχής της ΘΕΖ κοντά στη ΛΣ αποτελείται από μικρό ποσοστό μπαινίτη και χονδρόκοκκο μαρτενσίτη, ενώ προς το κέντρο της ΘΕΖ η δομή μετατρέπεται σε λεπτόκοκκο μαρτενσίτη. Κατά την μετάβαση από τη ΘΕΖ προς το ΒΜ, υπάρχει η ζώνη εκλέπτυνσης των κόκκων (Εικόνα 4.34), όπου εκεί η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από μπαινίτη και ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη (Εικόνα 4.35).

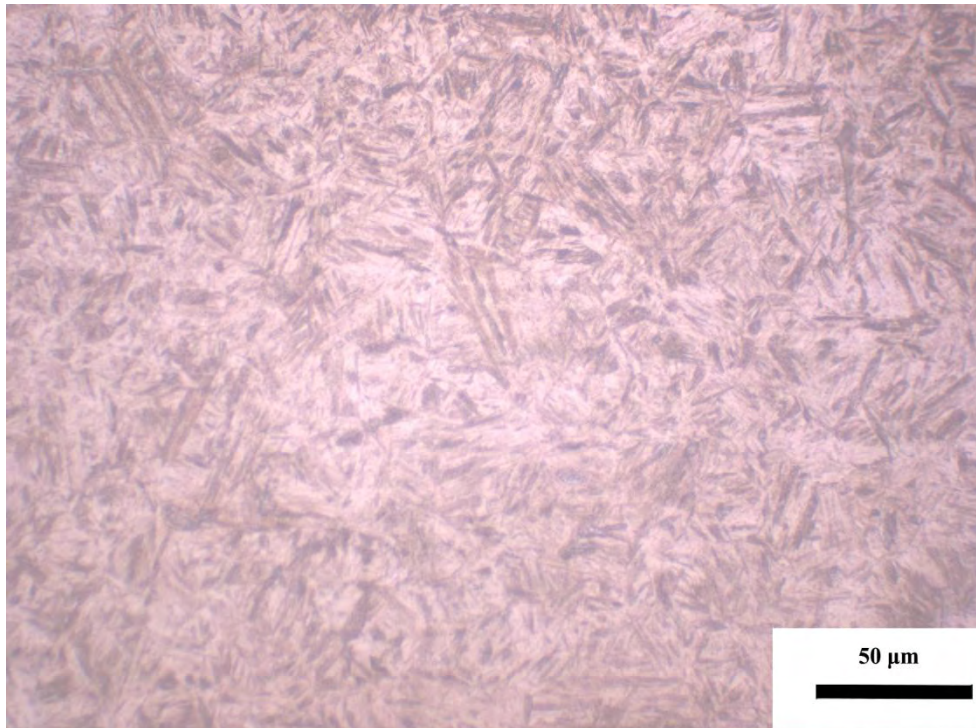


Εικόνα 4.31 (×100) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1)

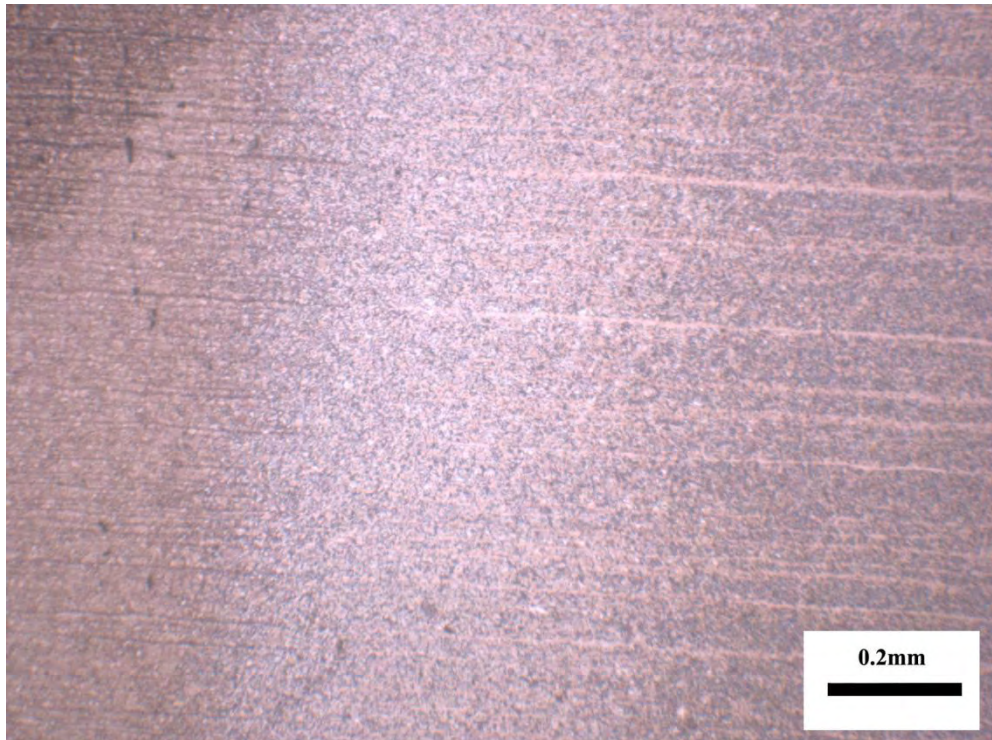




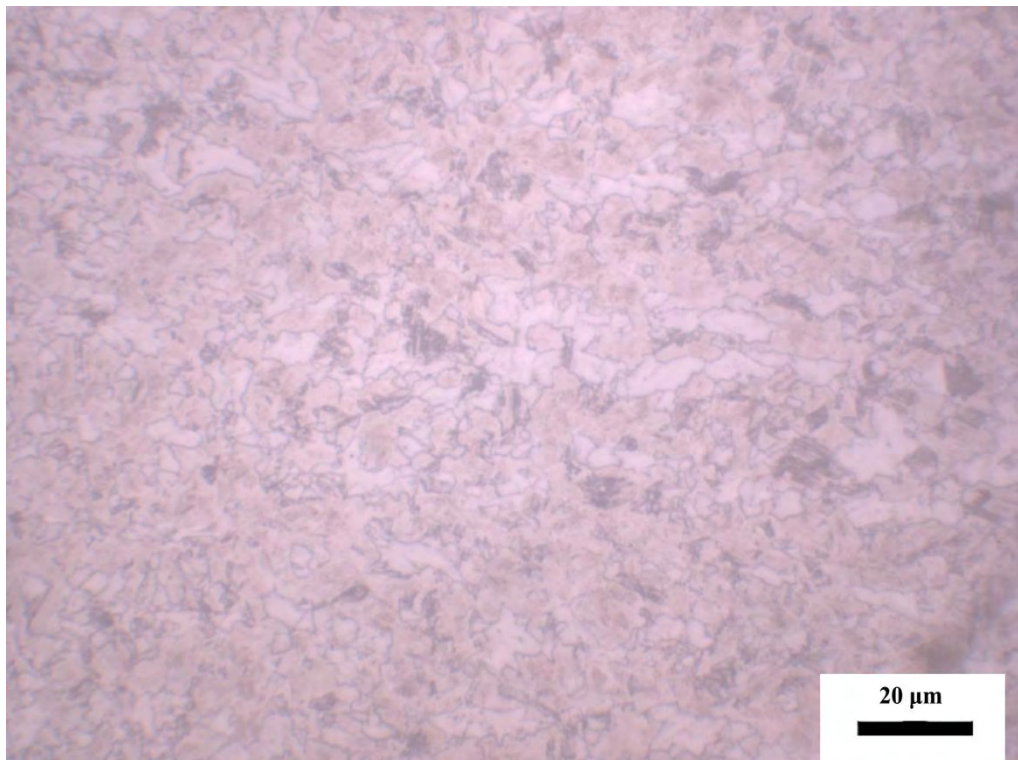
Εικόνα 4.32 (x500) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)



Εικόνα 4.33 (x500) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)



Εικόνα 4.34 ( $\times 100$ ) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

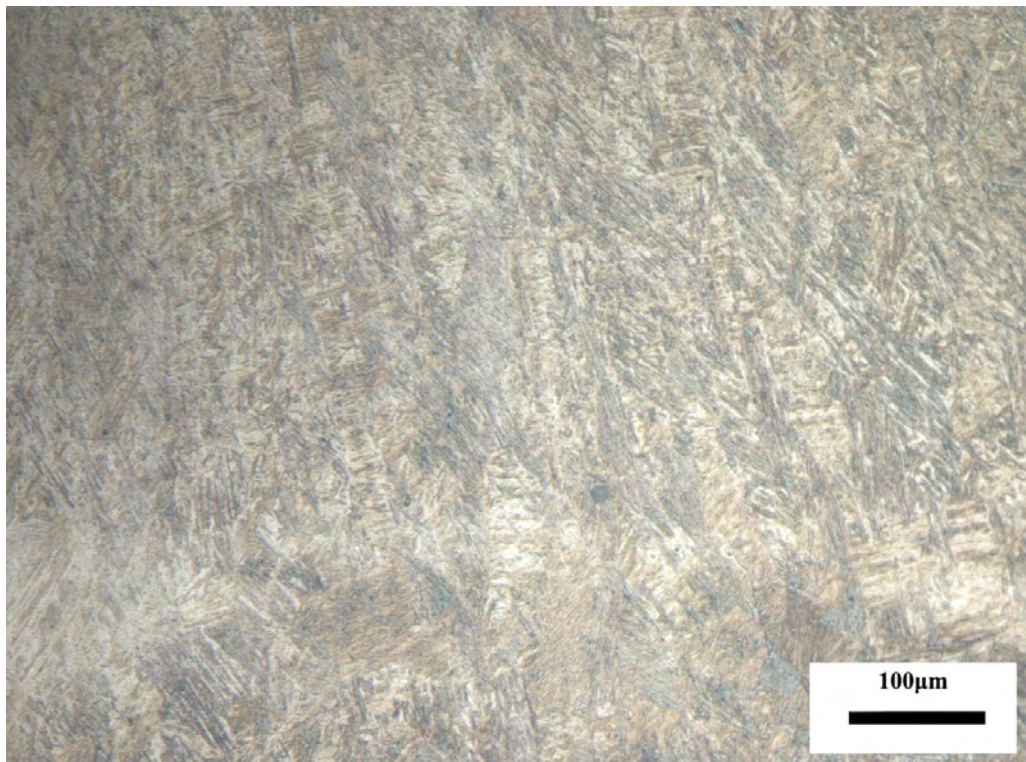


Εικόνα 4.35 ( $\times 1000$ ) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)



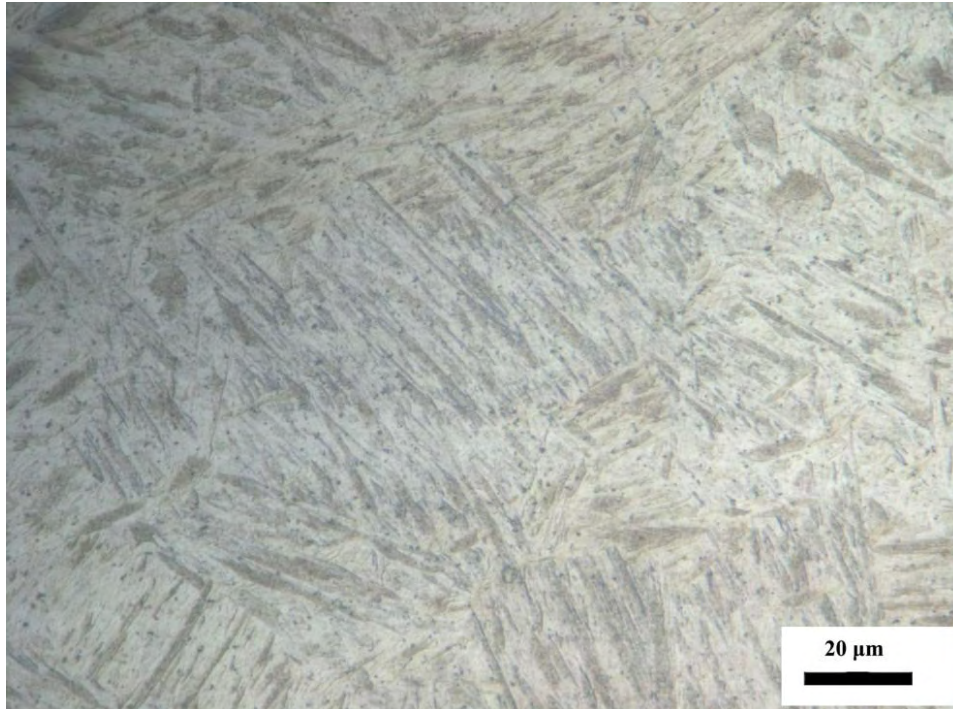
- **Δοκίμιο 4 (PEΘ= 440 J/mm)**

Στη εικόνα 4.36 φαίνεται το επίπεδο επαφής ανάμεσα στις δύο λίμνες συγκόλλησης του δοκιμίου 4. Κοντά στην ΛΣ έχει σχηματιστεί χονδρόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνα 4.37) που γίνεται λεπτόκοκκος προς το κέντρο της ΘΕΖ (Εικόνα 4.38). Στην Εικόνα 4.39 παρουσιάζονται οι ζώνες μεγέθυνσης και εκλέπτυνσης των κόκκων από το κέντρο της ΘΕΖ προς το ΒΜ. Στη συγκεκριμένη περιοχή η δομή του υλικού αποτελείται από σημαντικό ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη και μπαινίτη.

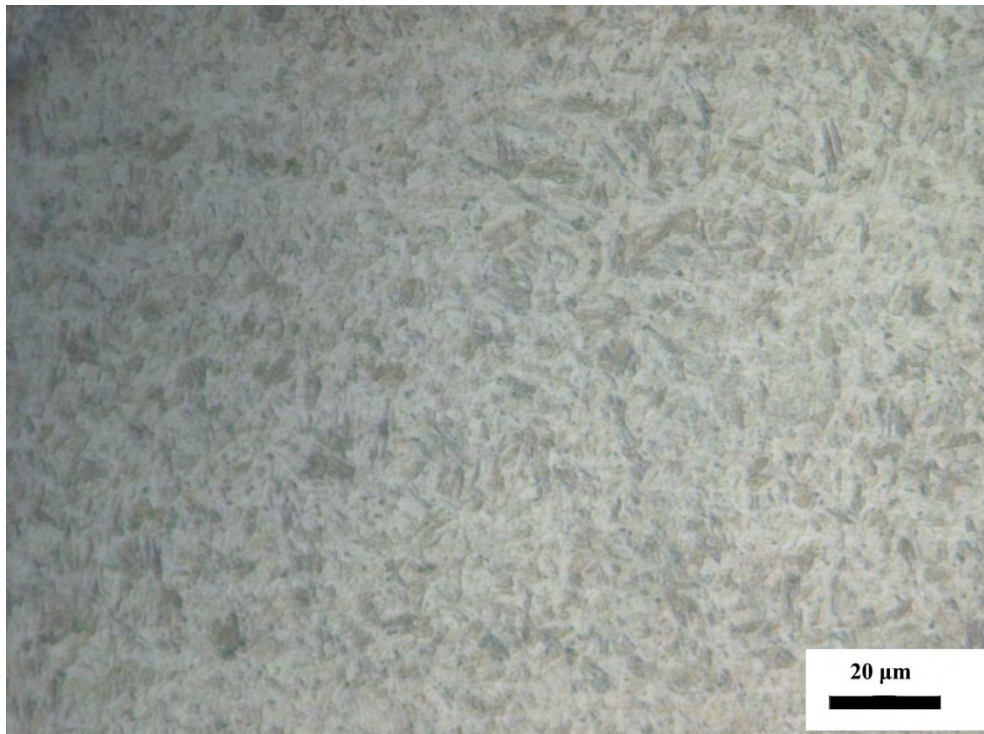


Εικόνα 4.36(×200) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1)



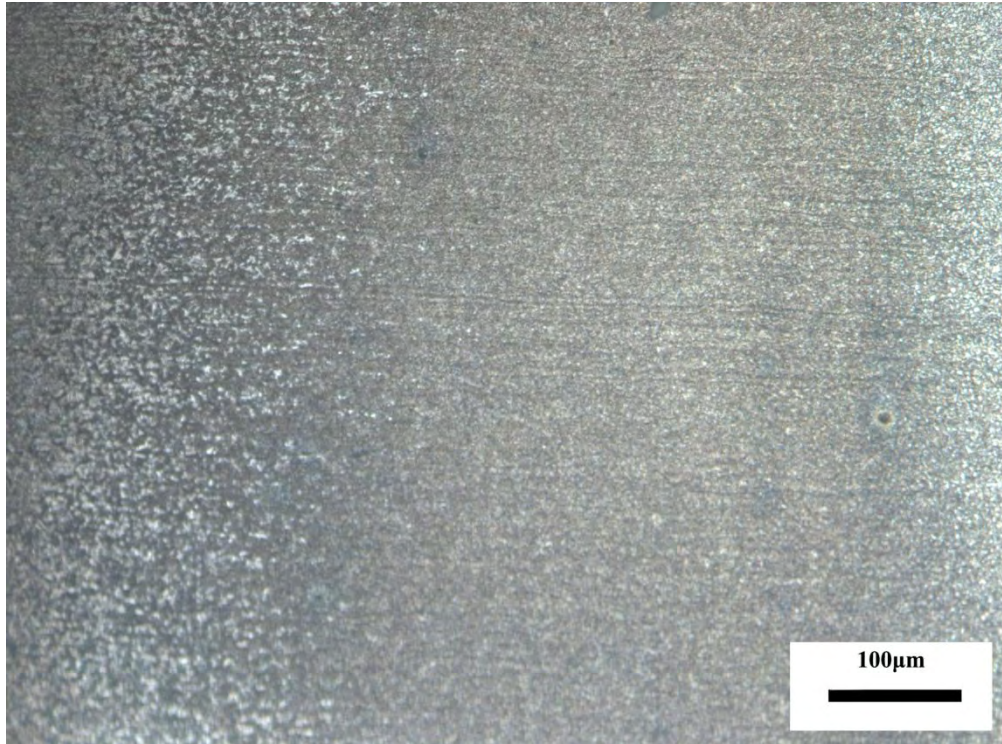


Εικόνα 4.37 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)

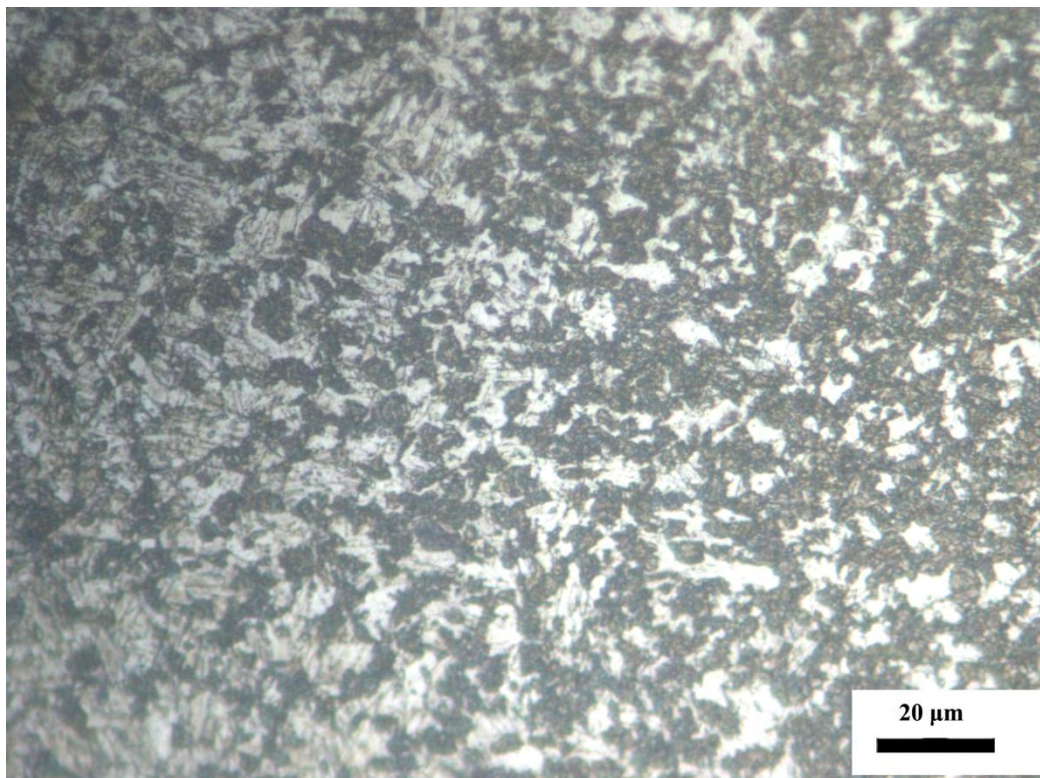


Εικόνα 4.38 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)





Εικόνα 4.39 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

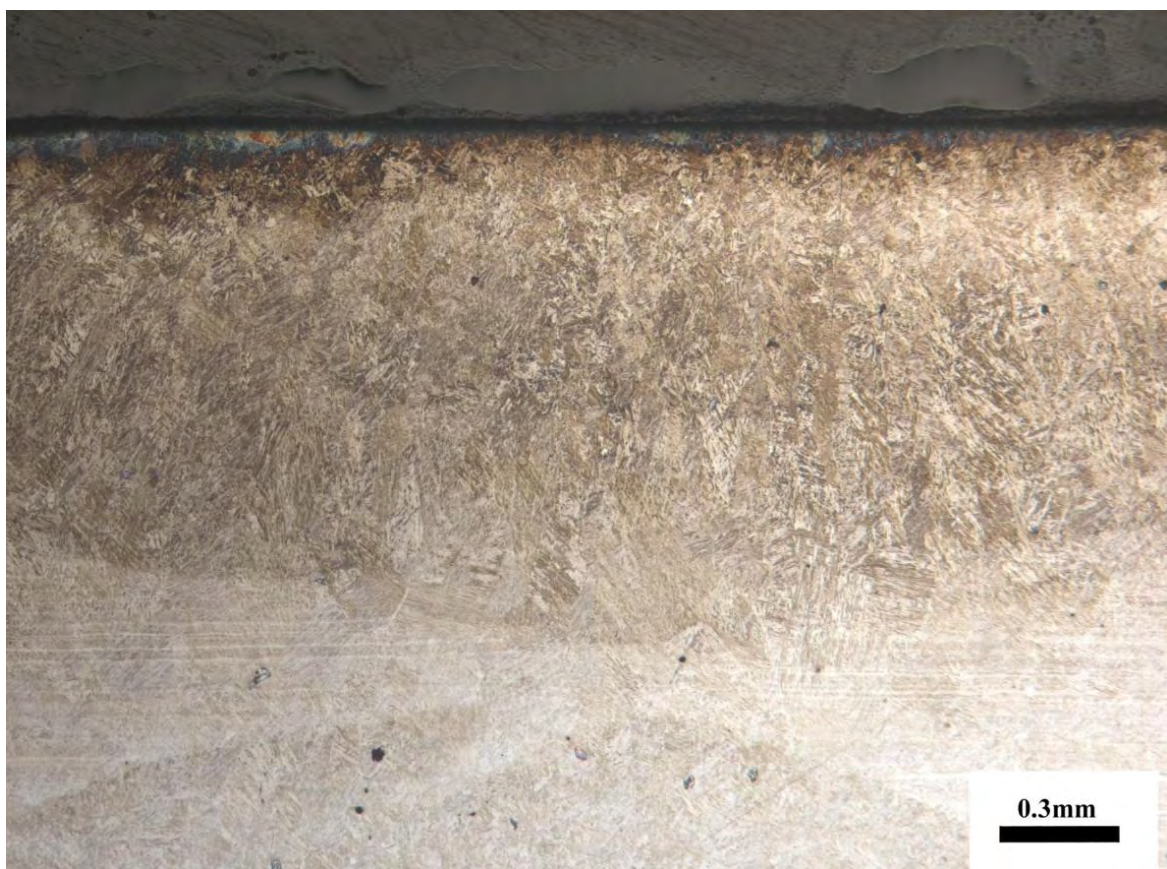


Εικόνα 4.40 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

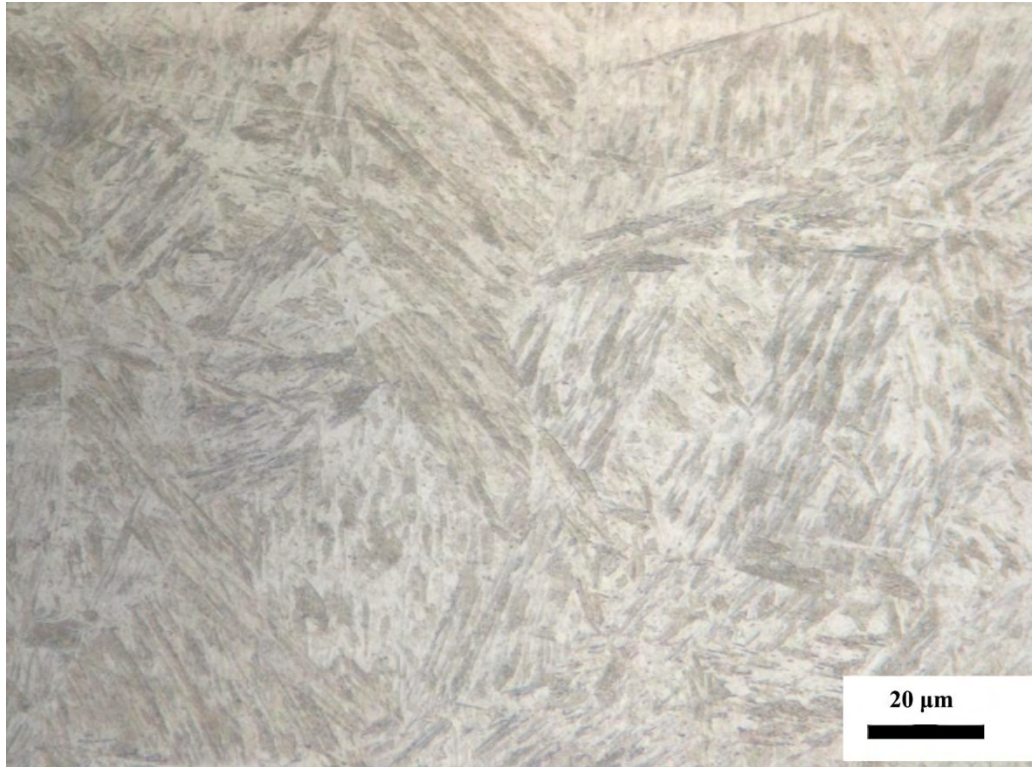


- **Δοκίμιο 5 (PEΘ= 535 J/mm)**

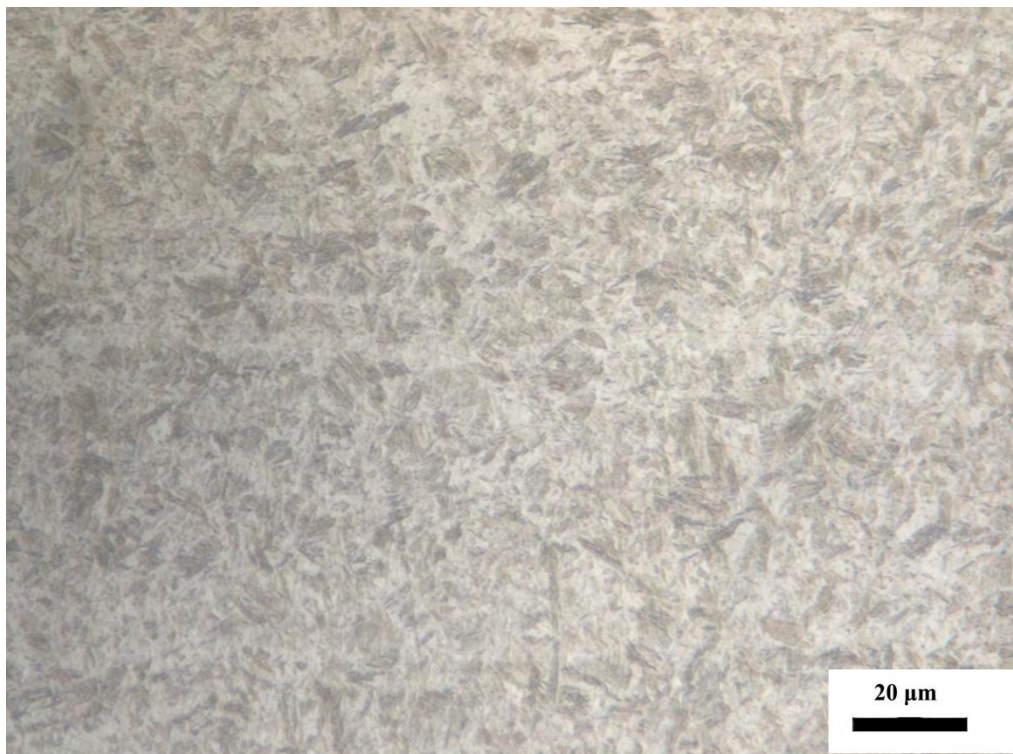
Στην Εικόνα 4.41 φαίνεται η ζώνης επαφής ανάμεσα στις δύο λίμνες συγκόλλησης του δοκιμίου 5. Στην Εικόνα 4.42 φαίνεται η περιοχή της ΘΕΖ κοντά στη λίμνη συγκόλλησης. Η δομή στο συγκεκριμένο σημείο του υλικού αποτελείται από μαρτενσίτη με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων από ότι στο κέντρο της ΘΕΖ, όπου εκεί υφίσταται λεπτόκοκκος μαρτενσίτης (Εικόνα 4.43). Στην Εικόνα 4.44 παρουσιάζεται το σύνορο μεταξύ ΘΕΖ και ΒΜ. Στη μεγέθυνση του συνόρου, φαίνεται πως η μικροδομή αποτελείται από παραμένοντα ωστενίτη, μπαινίτη και μικρό ποσοστό φερρίτη (Εικόνα 4.45).



Εικόνα 4.41 (x50) Λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 1)

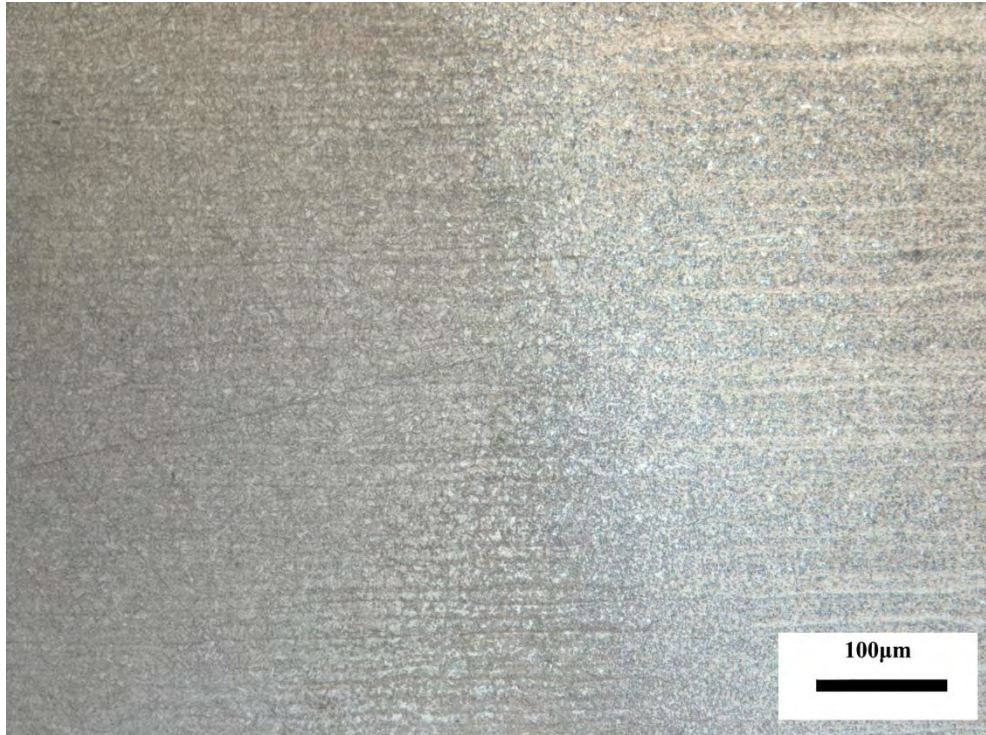


Εικόνα 4.42 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή 2)

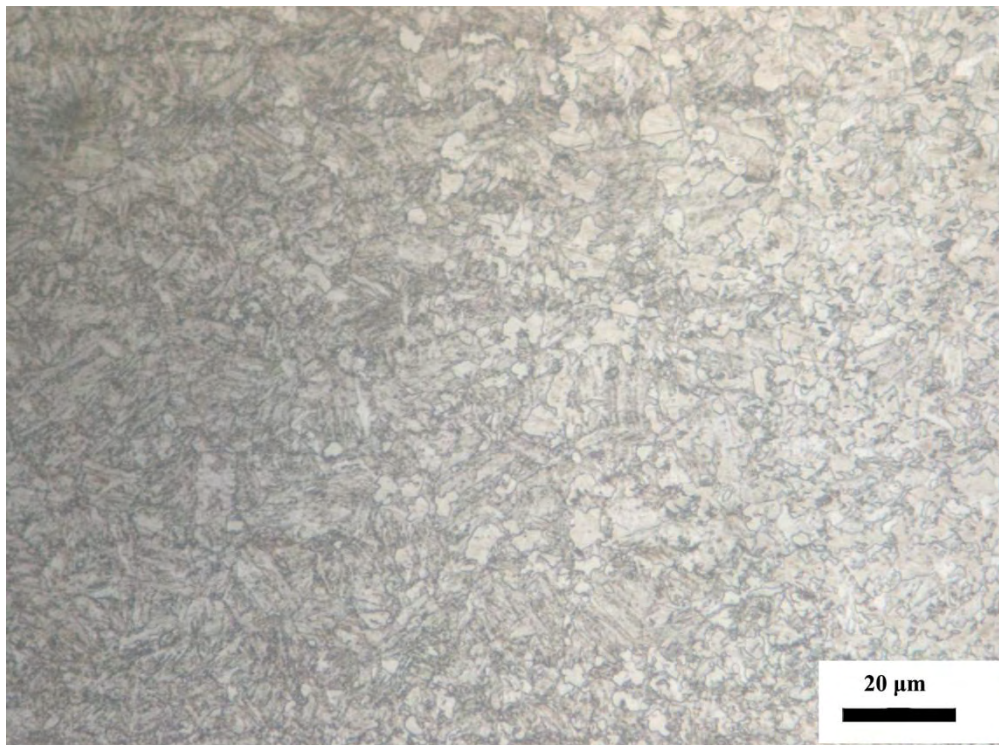


Εικόνα 4.43 (×1000) Κέντρο ΘΕΖ (περιοχή 3)





Εικόνα 4.44 (×200) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)



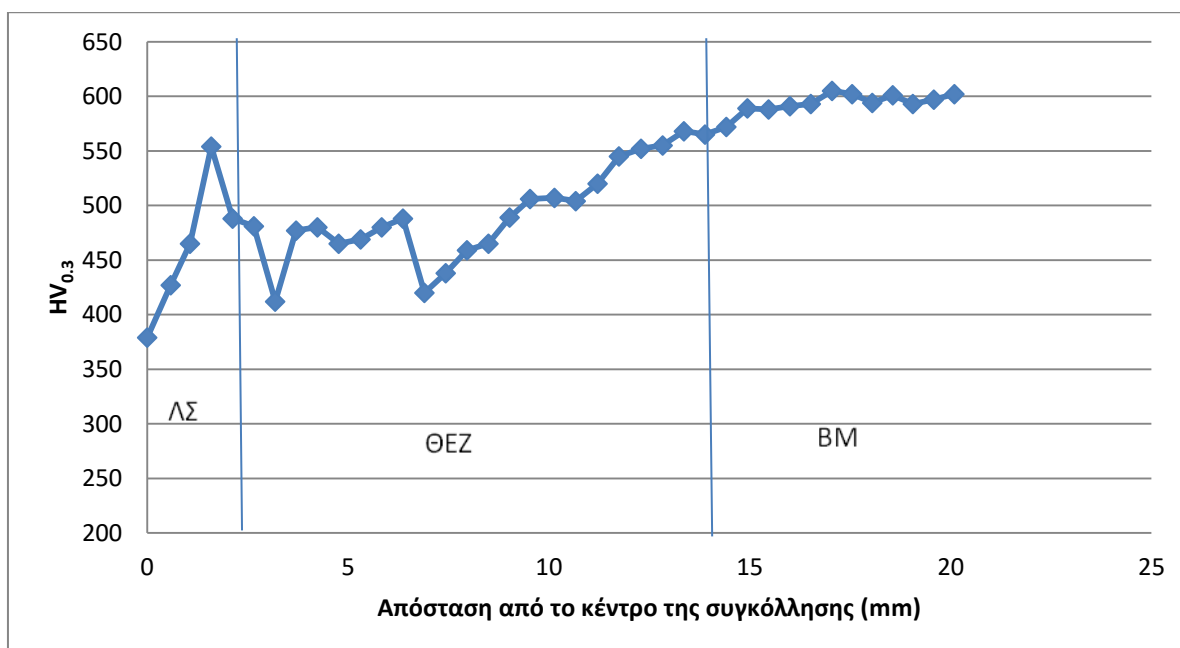
Εικόνα 4.45 (×1000) Θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη, κοντά στο βασικό μέταλλο (περιοχή 4)

### 4.3 Μικροσκληρομετρήσεις

Παρακάτω δίδονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μικροσκληρομετρήσεις των 5 πειραματικών δοκιμίων. Στα διαγράμματα σημειώνονται η Λίμνη συγκόλλησης (ΛΣ), η Θερμοεπηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ) και το Βασικό Μέταλλο (BM).

- **Δοκίμιο 1 (PEΘ= 300 J/mm)**

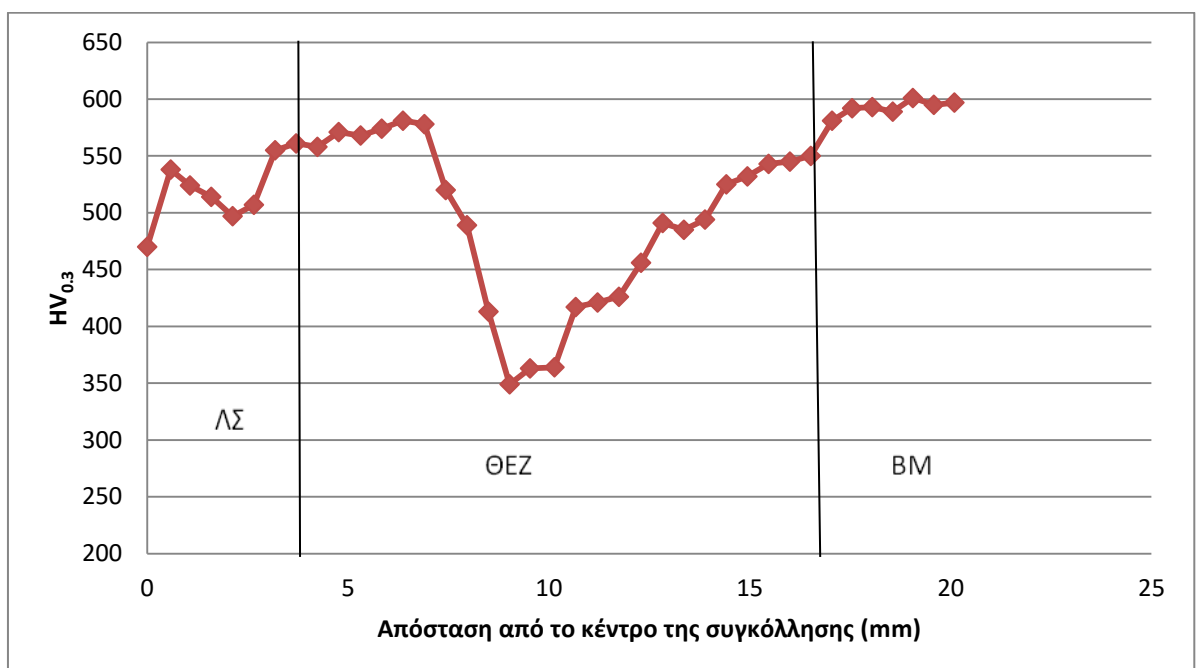
Στο διάγραμμα 4.3 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 1. Παρατηρείται πτώση της σκληρότητας τόσο στη λίμνη συγκόλλησης όσο και στη ΘΕΖ σε σχέση με το βασικό μέταλλο. Στη λίμνη συγκόλλησης το ποσοστό της μείωσης της σκληρότητας είναι κατά μέσο όρο 19% της αρχικής τιμής, ενώ στη λίμνης συγκόλλησης είναι 15% κατά μέσο όρο. Η πτώση της σκληρότητας οφείλεται στους μετασχηματισμούς που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και ιδιαίτερα στη δημιουργία και ύπαρξη φάσεων, όπως ο παραμένον ωστενίτης και ο μπαινίτης, στην τελική μικροδομή



Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 1 στην πάνω επιφάνεια

- Δοκίμιο 2 (PEΘ= 600 J/mm)

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4. Παρατηρείται πτώση της σκληρότητας τόσο στη λίκνη συγκόλλησης όσο και στη ΘΕΖ σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο. Η ποσοστιαία πτώση της σκληρότητας είναι 9% για τη ΛΣ και 16% για τη ΘΕΖ. Συγκριτικά με το δοκίμιο 1, η πτώση της τιμής της σκληρότητας είναι μεγαλύτερη και εντοπίζεται σε μεγαλύτερο μήκος. Επίσης, παρατηρείται ότι η λίκνης συγκόλλησης εμφανίζει μεγαλύτερη σκληρότητα σε σχέση με πριν. Η αύξηση στο μήκος της ΘΕΖ οφείλεται στο μεγαλύτερο PEΘ για τις συγκεκριμένες συνθήκες συγκόλλησης καθώς και για το ποσοστό μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη, που ευθύνονται για την υποβάθμιση της μικροσκληρότητας.

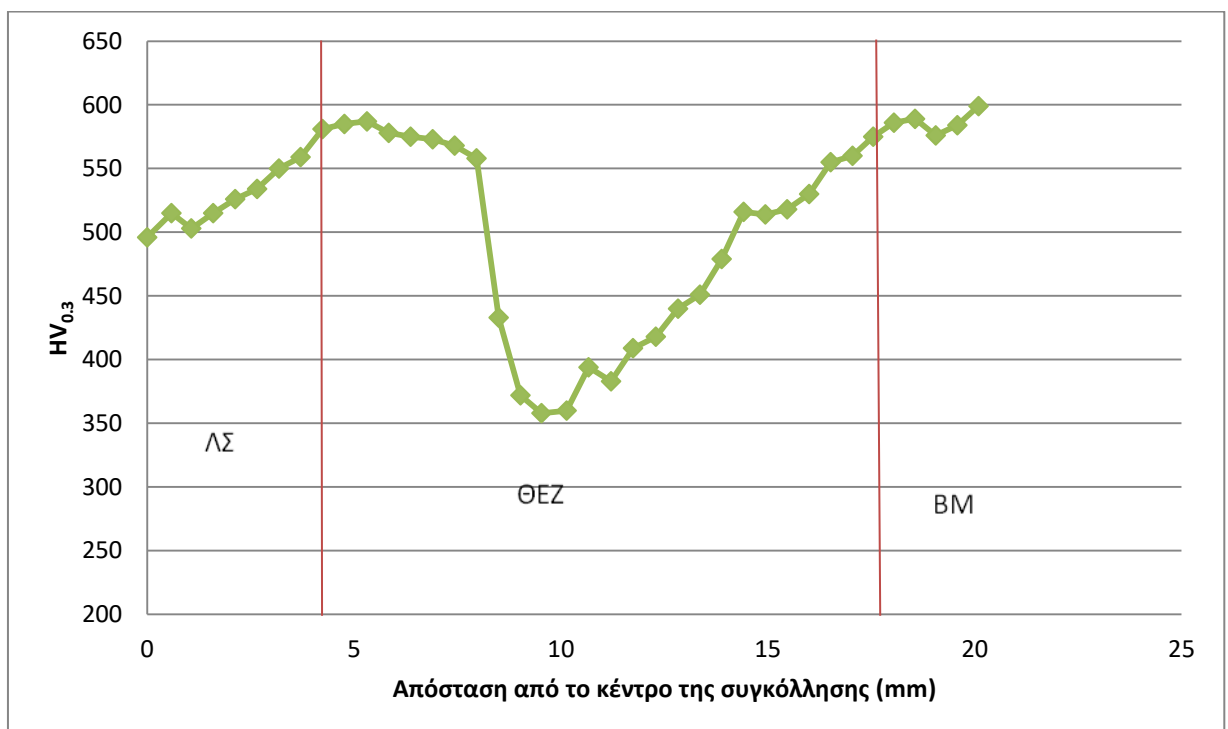


Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 2 στην πάνω επιφάνεια



- Δοκίμιο 3 (PEΘ= 700 J/mm)

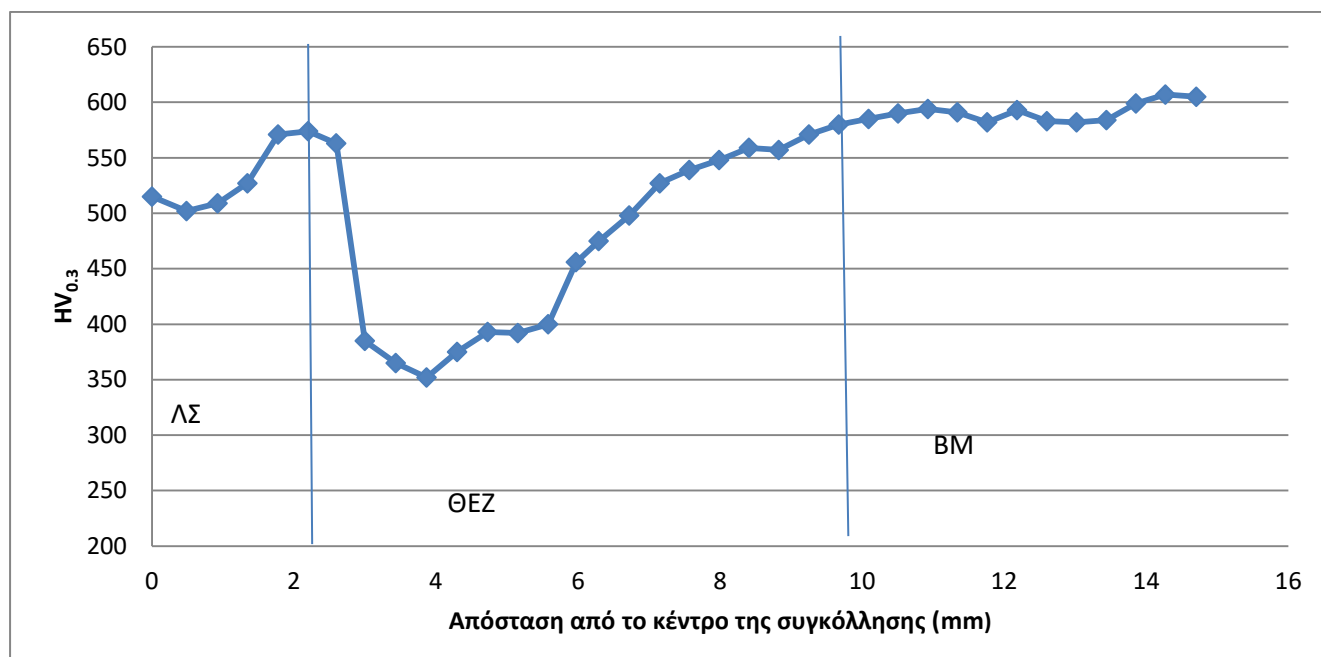
Στο διάγραμμα 4.5 παρουσιάζεται το προφίλ σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 3. Παρατηρείται πτώση της σκληρότητας τόσο στη λίμνη συγκόλλησης όσο και στη ΘΕΖ συγκριτικά με το βασικό μέταλλο. Το ποσοστό υποβάθμισης της μικροσκληρότητας ισούται με 7% στη περιοχή της ΛΣ και 15% για την περιοχή της ΘΕΖ. Για τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες συγκόλλησης, η τιμή του πλάτους της ΘΕΖ είναι η μέγοστη που μετρήθηκε. Τέλος, παρατηρείται ότι η λίμνης συγκόλλησης εμφανίζει μεγαλύτερη σκληρότητα σε σχέση με πριν. Η μικρότερη τιμή σκληρότητας και το μεγαλύτερο εύρος της ΘΕΖ οφείλονται στο υψηλότερο PEΘ που χρησιμοποιήθηκε καθώς και στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες συγκόλλησης. Οι υψηλές θερμοκρασίες συγκόλλησης οδηγούν στην δημιουργία μεγαλύτερου ποσοστού παραμένοντα ωστενίτη και κατά συνέπεια την μείωση της σκληρότητας.



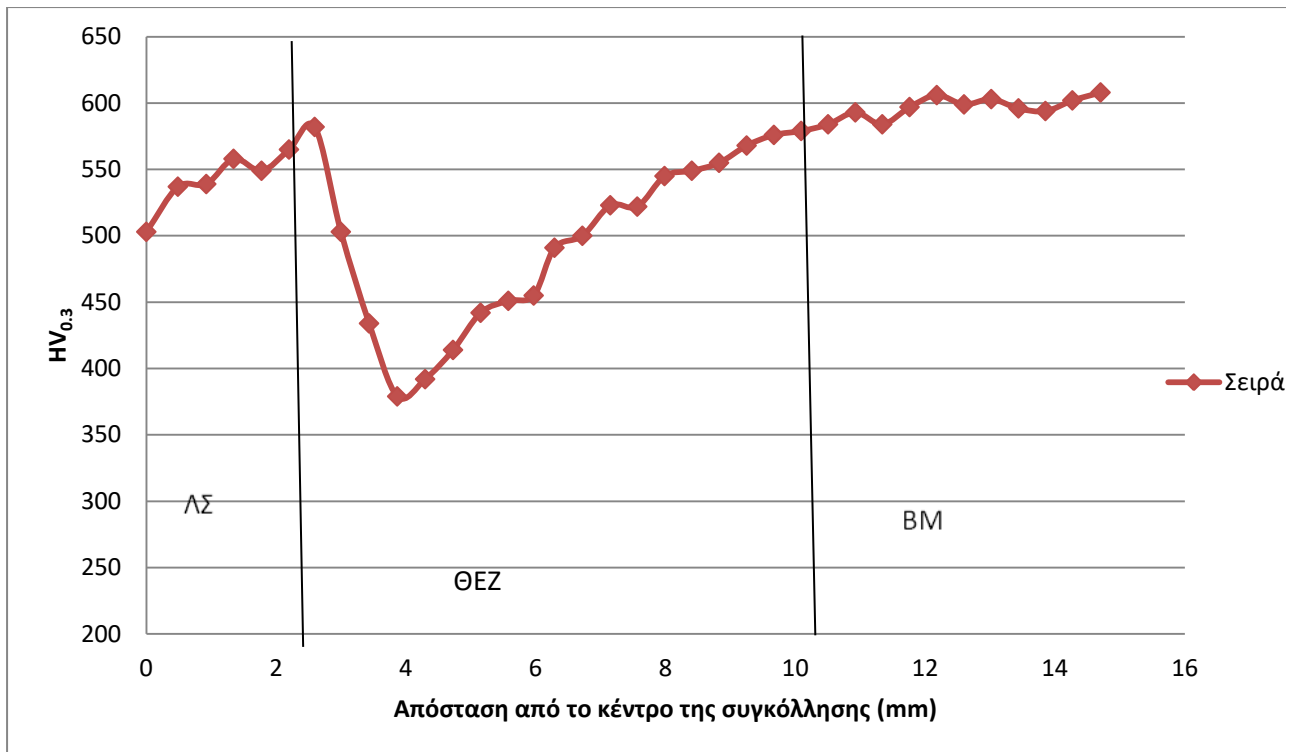
Διάγραμμα 4.5 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 3 στην πάνω επιφάνεια

- Δοκίμιο 4 (PEΘ= 440 J/mm)

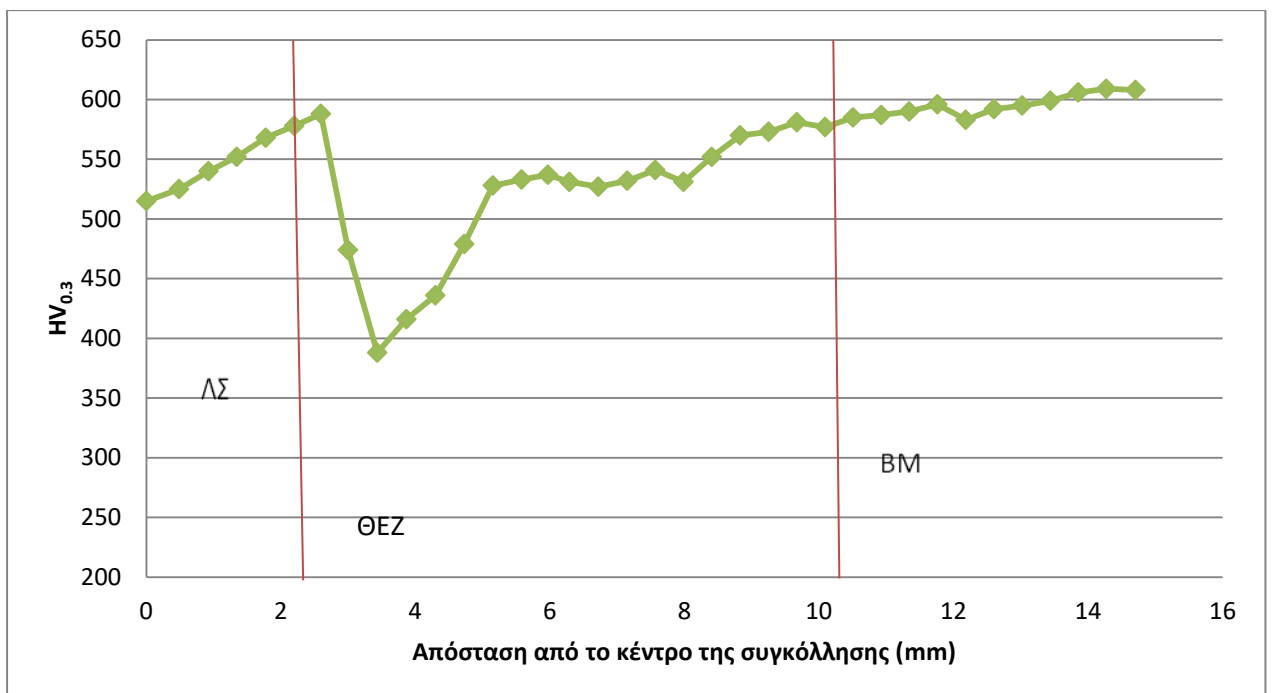
Στα διαγράμματα 4.6-4.8 παρουσιάζονται τα προφίλ σκληρότητας για το δοκίμιο 4 στην κορυφή, στη μέση και στο κάτω άκρο του συγκολλημένου ελάσματος, ενώ στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα προηγούμενα προφίλ. Η μείωση της σκληρότητας είναι 7% της τιμής του ΒΜ και η αντίστοιχη μείωση για τη ΘΕΖ είναι 13% . Το πλάτος της ΘΕΖ είναι το μικρότερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα και η τιμή σκληρότητας της ΛΣ είναι αρκετά κοντά στου ΒΜ. Η μικρή τιμή του ΡΕΘ έχει ως συνέπεια τη μικρή του πλάτους της ΘΕΖ, ενώ και θέρμανση και ψύξη του δοκιμίου οδηγεί στο σχηματισμό δομών, όπως ο μπαινίτης και ο ωστενίτης, με μικρότερη σκληρότητα από τον επαναφερμένο μαρτενσίτη.



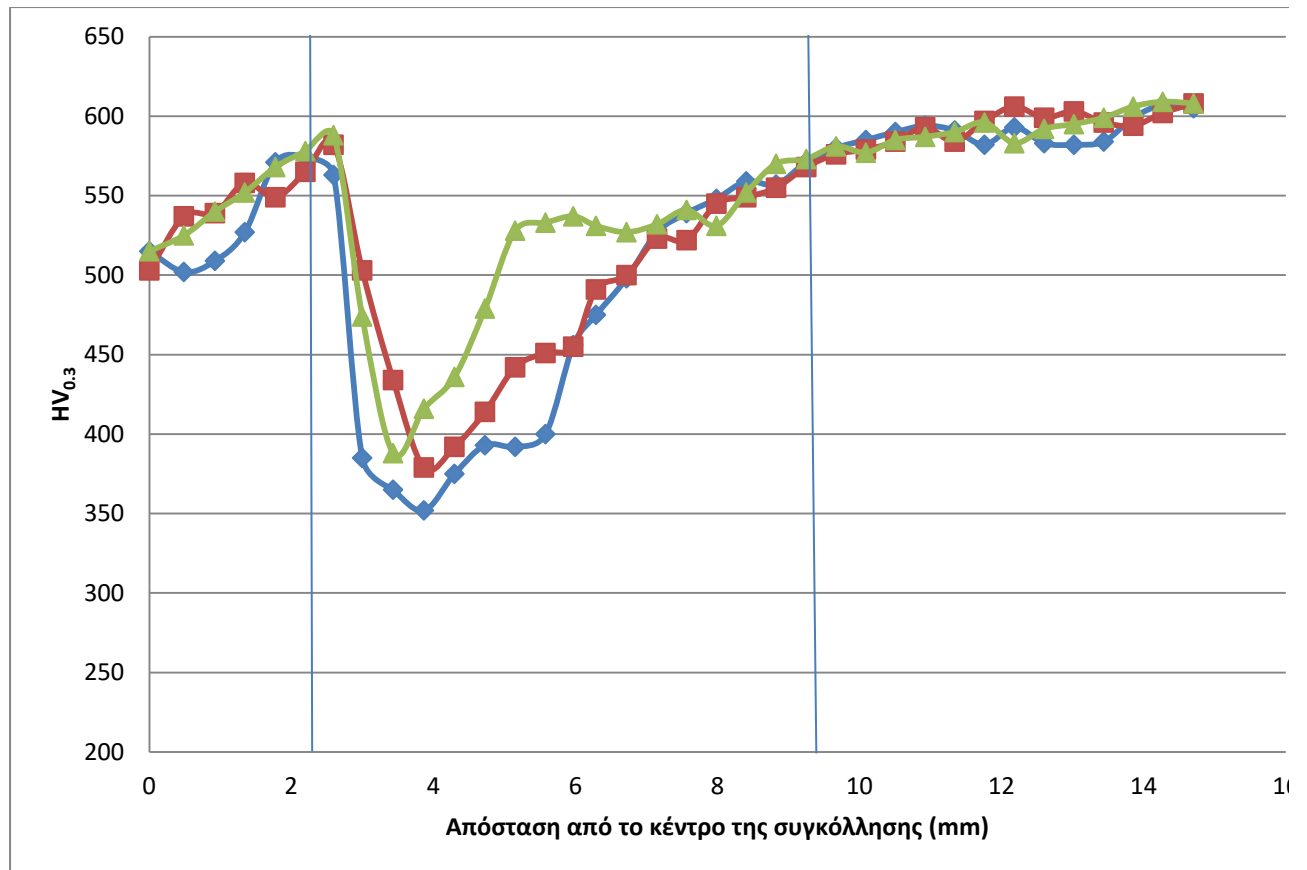
Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στην πάνω επιφάνεια



Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στο μέσο του δοκίμιου



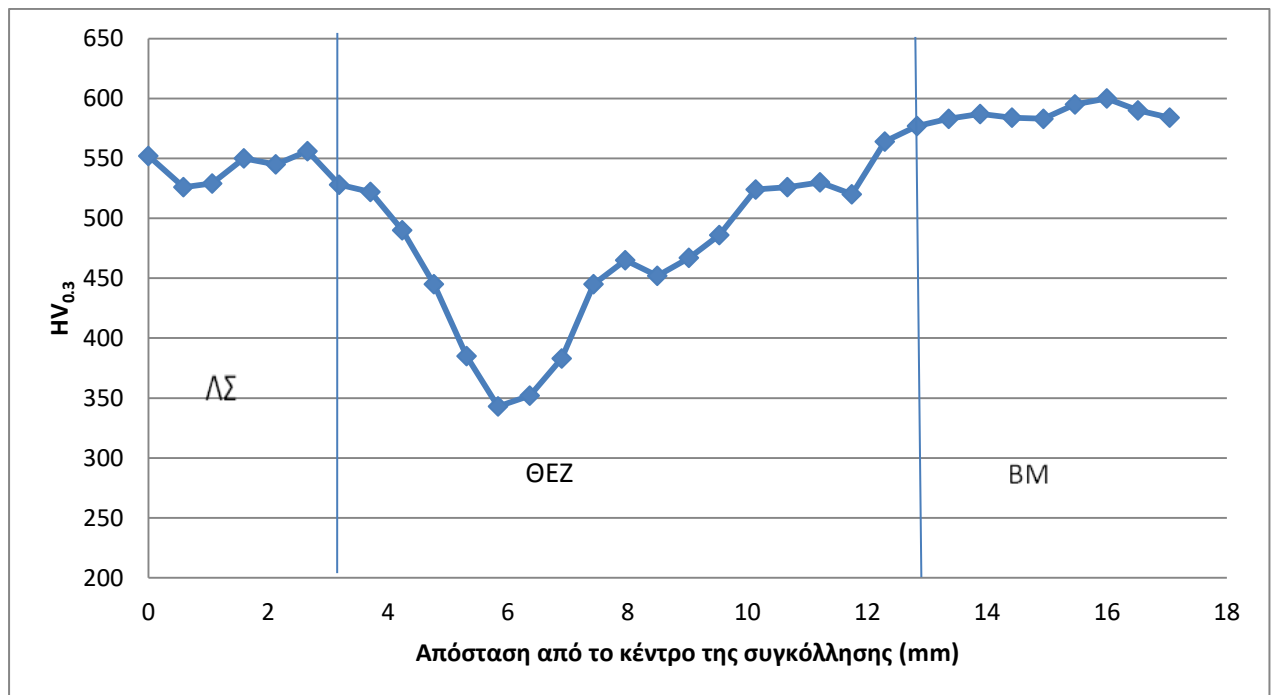
Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 στην κάτω επιφάνεια



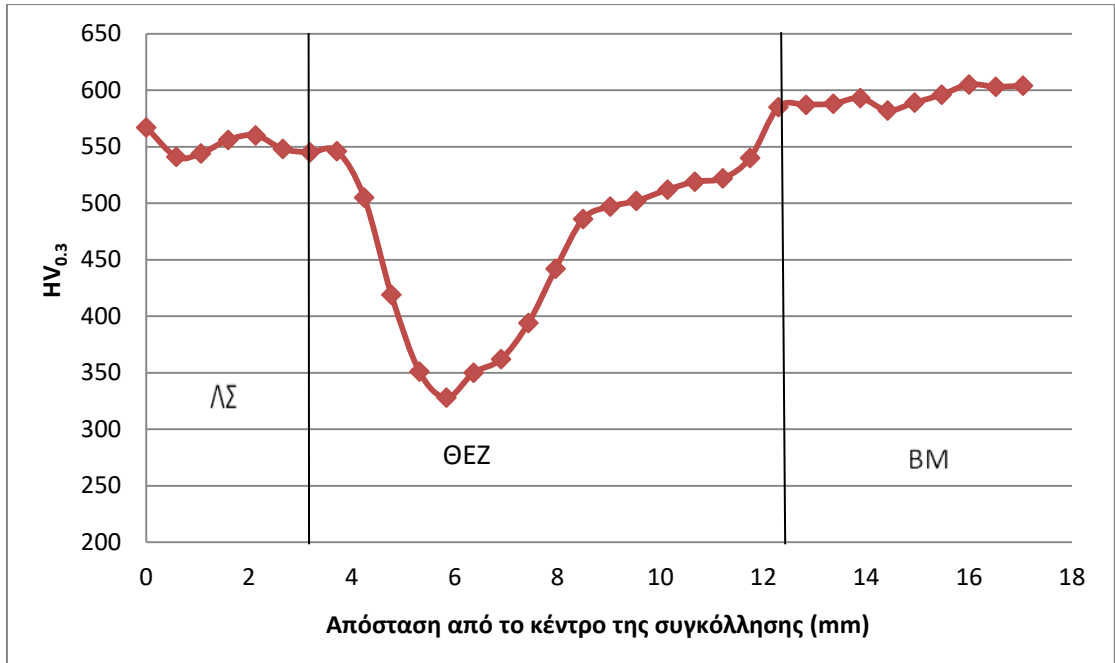
Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 4 σε τρεις περιοχές

- Δοκίμιο 5 (PEΘ= 535 J/mm)

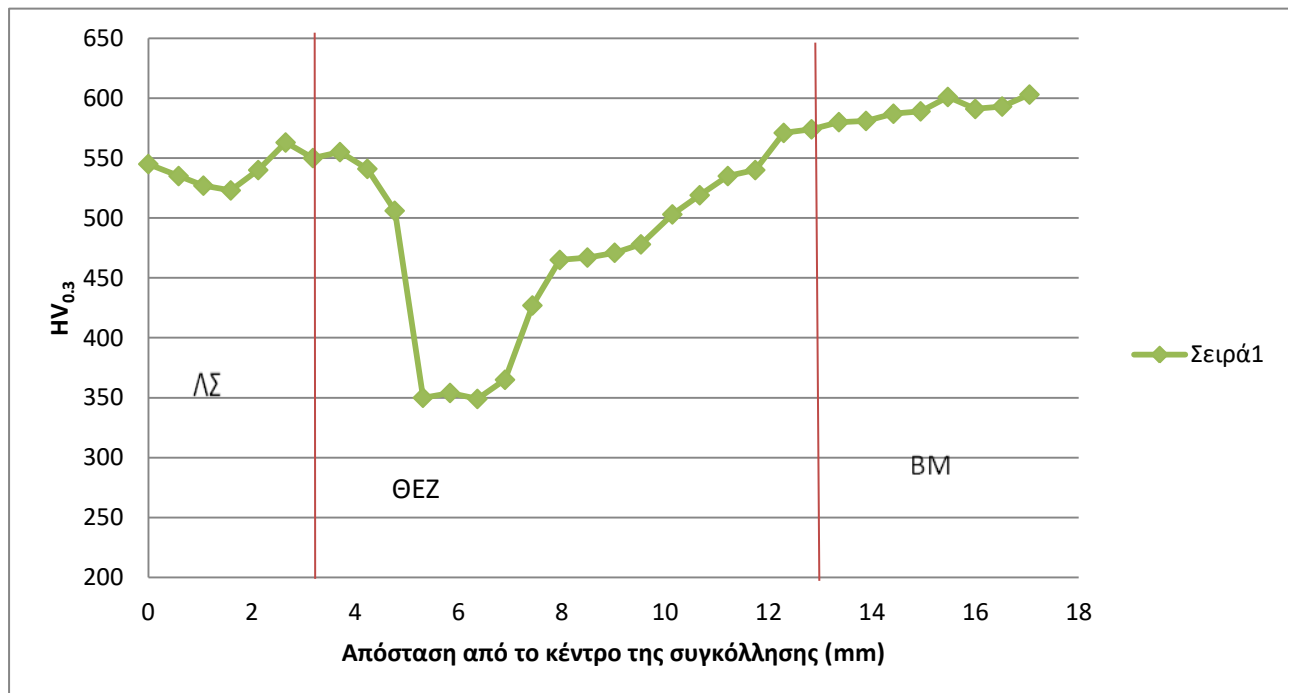
Στα διαγράμματα 4.10-4.12 παρουσιάζονται τα προφίλ σκληρότητας για το δοκίμιο 5 στην πάνω επιφάνεια, στη μέση και στην κάτω επιφάνεια του ελάσματος, ενώ στο διάγραμμα 4.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα προηγούμενα προφίλ. Από τα διαγράμματα είναι εμφανής η πτώση της σκληρότητας τόσο στη ΛΣ όσο και στη ΘΕΖ. Συγκεκριμένα για τη ΛΣ η μείωση είναι 5% και για τη ΘΕΖ είναι 18%. Παρατηρείται πως το εύρος της ΘΕΖ είναι σχετικά μικρό, όμως η ποσοστιαία πτώση της σκληρότητας είναι η μεγαλύτερη που παρατηρήθηκε από όλα τα δοκίμια. Το διπλό πέρασμα συγκόλλησης είχε σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω θέρμανση του ελάσματος και το σχηματισμό φερρίτη στην τελική μικροδομή, ο οποίος είναι φάση μικροδομής με μικρή τιμή σκληρότητας.



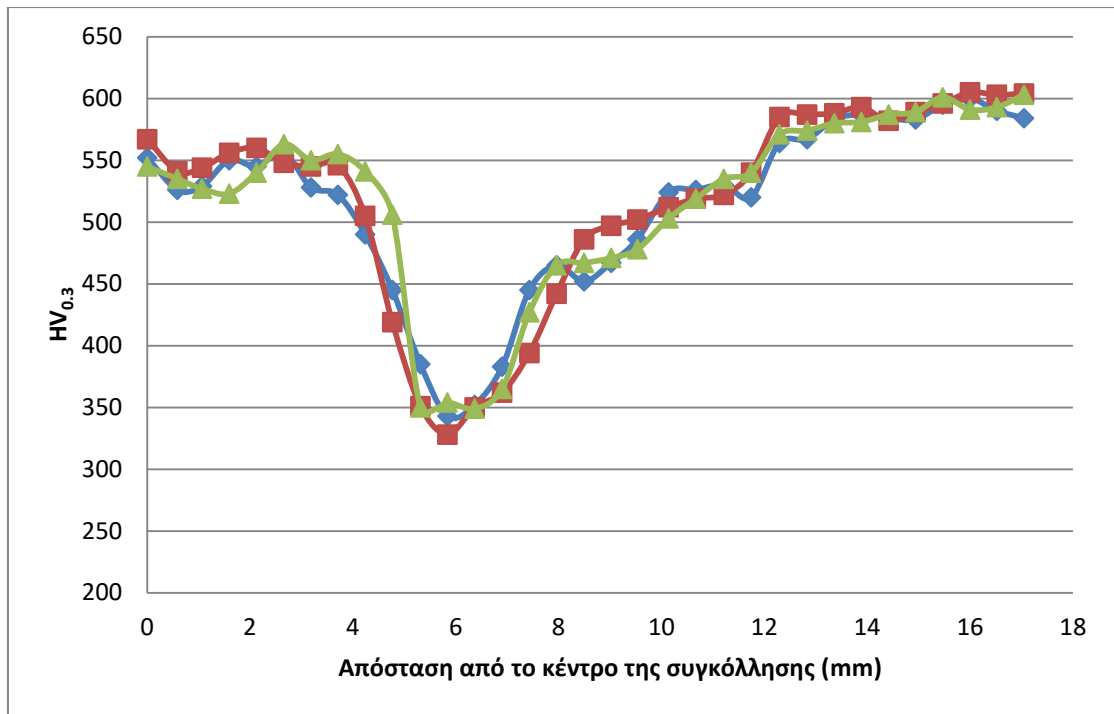
Διάγραμμα 4.10 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στην πάνω επιφάνεια



Διάγραμμα 4.11 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στο μέσο του δοκιμίου



Διάγραμμα 4.12 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 στην κάτω επιφάνεια



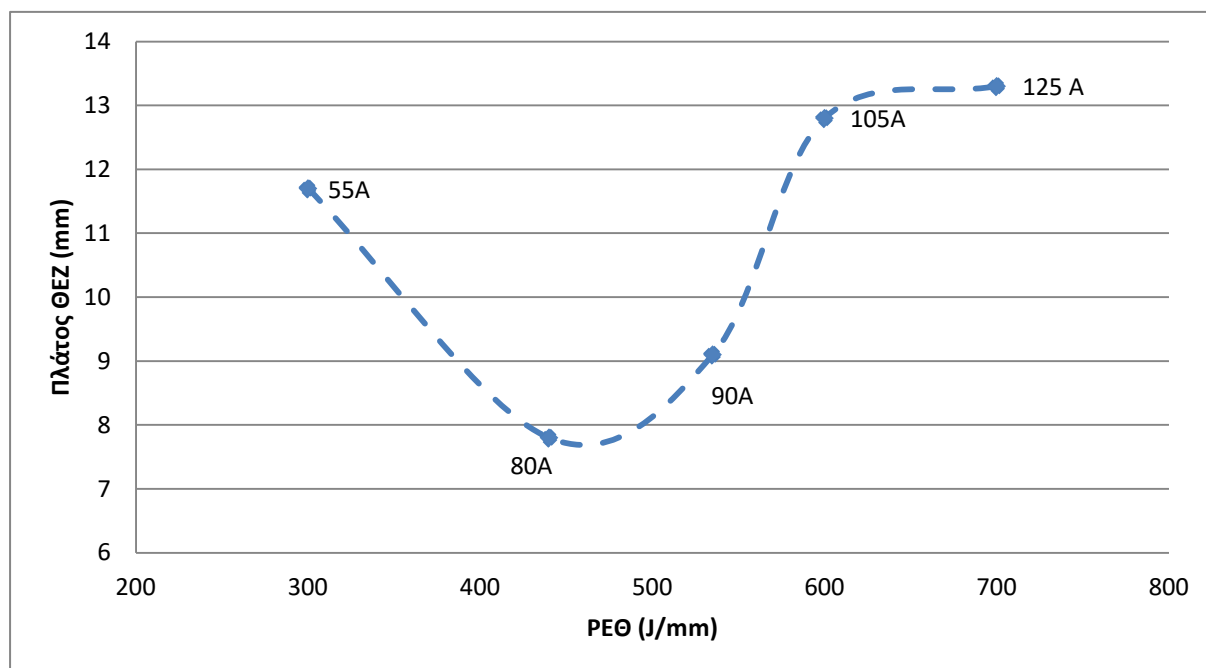
Διάγραμμα 4.13 Διάγραμμα σκληρομετρήσεων για το δοκίμιο 5 σε τρεις περιοχές

Στα προηγούμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα προφίλ σκληρότητας για τα 5 δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μελέτη. Από τα προφίλ παρατηρείται ότι το πλάτος της θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης λαμβάνει τις μικρότερες τιμές του για ενδιάμεσες τιμές του PEΘ (επομένως και για τις αντίστοιχες τιμές της έντασης του ρεύματος), ενώ μεγαλύτερο πλάτος ΘΕΖ εμφανίζουν τα υπόλοιπα δοκίμια. Στο διάγραμμα 4.14 και στον πίνακα 4.2 αποτυπώνεται αυτή παρατήρηση.

Πίνακας 4.2 Τιμές του PEΘ και του πλάτους της ΘΕΖ για τα 5 δοκίμια

A/A ΔΟΚ.	PEΘ (J/mm)	ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΖ (mm)
1	300	11.7
2	440	7.8
3	535	9.7
4	600	12.8
5	700	13.3





Διάγραμμα 4.14 Γραφική απεικόνιση πλάτους ΘΕΖ σε συνάρτηση με το ΡΕΘ

#### 4.4 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Στον πίνακα 4.3 δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού για τα δείγματα που προέρχονται από τα δύο πρώτα δοκίμια.

Πίνακας 4.3 Πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμής εφελκυσμού

Δοκίμιο	Όριο Διαρροής $R_{p0.2}$ [MPa]	Όριο Θραύσης $R_m$ [MPa]	Παραμόρφωση (%)	Θέση Θραύσης
4_A	753	946	1,38	ΘΕΖ
4_B	860	1080	1,57	ΘΕΖ
5_A	967	1113	5,56	Βασικό Μέταλλο
5_B	924	1080	5,68	Βασικό Μέταλλο

Παρατηρείται μείωση τόσο του ορίου διαρροής όσο και του ορίου θραύσης των συγκολλητών δοκιμίων σε σχέση με τις αρχικές ιδιότητες του υλικού ArmoX 500T. Συγκριτικά για τις συνθήκες συγκόλλησης των δειγμάτων, φαίνεται ότι για μεγαλύτερο ρυθμό εισαγωγής θερμότητας η αντοχή του υλικού είναι μεγαλύτερη, όπως και η ολκιμότητά του (μεγαλύτερα περιθώρια παραμόρφωσης). Αντίθετα, για τη μικρότερη τιμή του ΡΕΘ συμπεραίνεται πως το υλικό αποκτά μία πιο ψαθυρή συμπεριφορά καθώς οδηγείται στη θραύση σε μικρό χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ξεκινά να ρέει πλαστικά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της δοκιμής και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που εξήχθησαν.



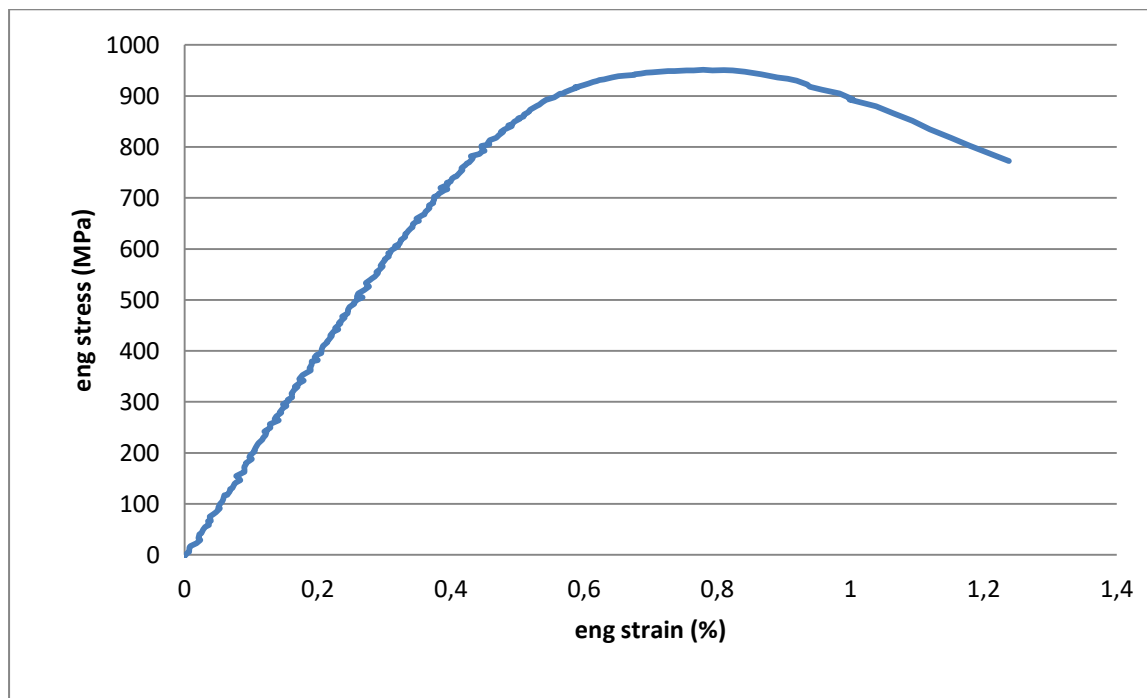
Εικόνα 4.46 Εφελκυσμός και θραύση δοκιμίου

Στα δοκίμια 4\_A και 4\_B η θραύση συνέβη στη ΘΕΖ του δοκιμίου (Εικόνες 4.47 και 4.48) για μικρή τιμή παραμόρφωσης, ενώ και τα όρια διαρροής και θραύσης είναι μειωμένα σε σχέση με το πρότυπο υλικό (Διαγράμματα 4.15 και 4.16). Πριν τη θραύση τα δοκίμια διέρρευσαν πλαστικά για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και μετά αστόχησαν. Η μικροδομή του δοκιμίου αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από μαρτενσίτη (χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο) και μικρό ποσοστό μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη, γεγονός που εξηγεί τη μείωση της αντοχής και τη ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού.

- Δοκίμιο 4\_A



Εικόνα 4.47 Δοκίμιο 4\_A, θέση θραύσης στη ΘΕΖ

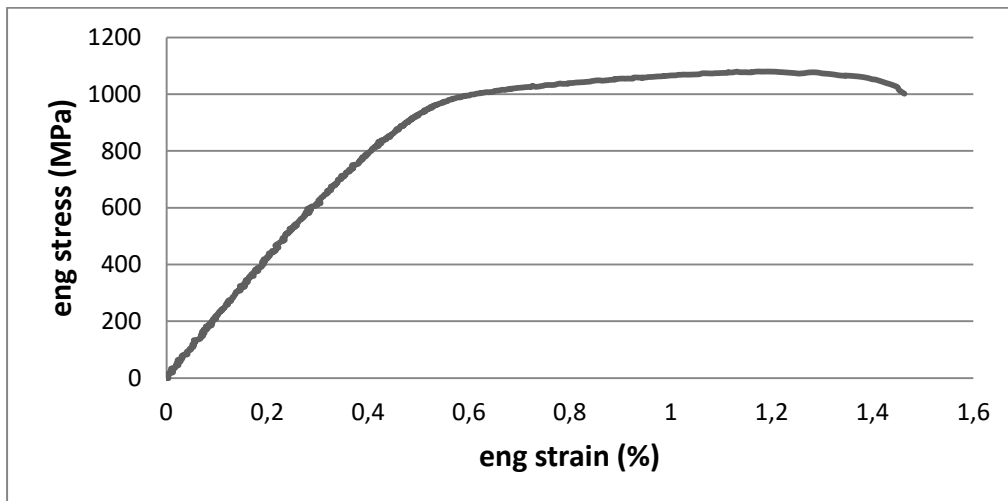


Διάγραμμα 4.15 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4\_A

- Δοκίμιο 4\_B



Εικόνα 4.48 Δοκίμιο 4\_B, θέση θραύσης στη ΘΕΖ



Διάγραμμα 4.16 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 4\_B

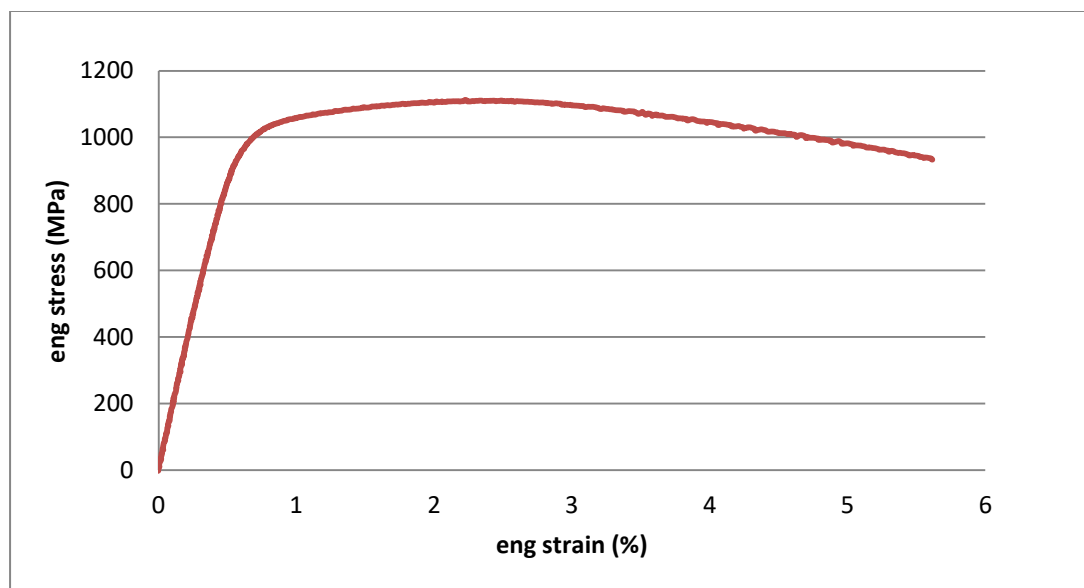


Στα δοκίμια 5\_A και 5\_B η θραύση συνέβη στο BM (Εικόνες 4.49 και 4.50) για μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης από τα αντίστοιχα του δοκιμίου 4, ενώ και τα όρια διαρροής και θραύσης εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή(Διαγράμματα 4.17 και 4.18). Παρόλα αυτά οι ιδιότητες αντοχής των συγκολλητών δειγμάτων είναι αρκετά υποβαθμισμένες σε σχέση με το χάλυβα. Πριν τη θραύση τα δοκίμια διέρρευσαν πλαστικά. Η μικροδομή του δοκιμίου αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από μαρτενσίτη (χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο) και μικρό ποσοστό μπαινίτη, παραμένοντα ωστενίτη και φερρίτη, γεγονός που εξηγεί τη μείωση της αντοχής και την περισσότερο όλκιμη συμπεριφορά του υλικού.

- **Δοκίμιο 5\_A**



Εικόνα 4.49 Δοκίμιο 5\_A, θέση θραύσης στο βασικό μέταλλο

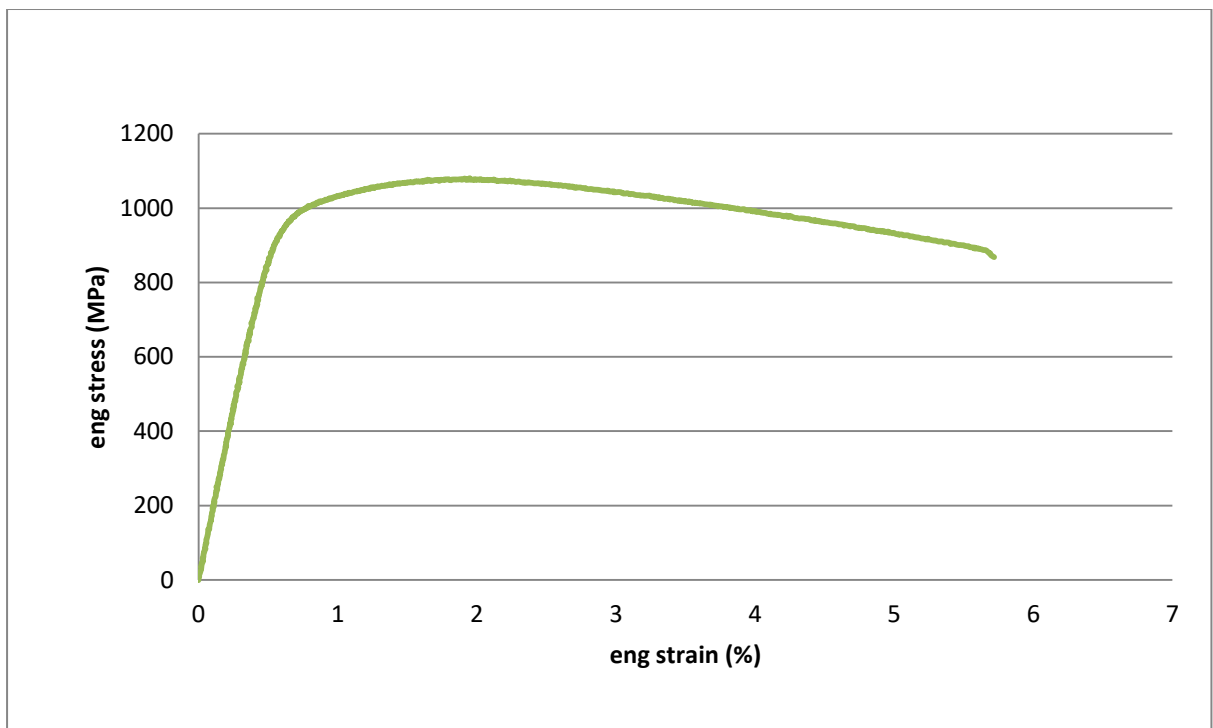


Διάγραμμα 4.17 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5\_A

- Δοκίμιο 5\_B



Εικόνα 4.50 Δοκίμιο 5\_B, θέση θραύσης στο βασικό μέταλλο



Διάγραμμα 4.18 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο 5\_B

#### 4.5 Θεωρητικός υπολογισμός ρυθμού ψύξης

Σκοπός του θεωρητικού υπολογισμού του ρυθμού ψύξης των δειγμάτων είναι η πρόβλεψη της τελικής μικροδομής των ελασμάτων μετά το πέρας της συγκόλλησης. Η πρόβλεψη της δομής είναι απαραίτητη και πολύ σημαντική καθώς σύμφωνα με αυτή μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά και απόδοση ενός υλικού σε ποικίλες συνθήκες.

Η συγκόλληση των δοκιμών γίνεται με αρχική θερμοκρασία τους 25<sup>0</sup> C (θερμοκρασία περιβάλλοντος). Για τα δοκίμια 4 και 5, στα οποία έχει γίνει συγκόλληση και στις 2 πλευρές (διπλό πέραςμα), κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες προθέρμανσης από το πρώτο πέραςμα. Για το λόγο αυτό έγιναν υπολογισμοί του ρυθμού ψύξης για αρχικές θερμοκρασίες 100, 200 και 300<sup>0</sup> C. Οι υπολογισμοί των ρυθμών ψύξης έγιναν με τη λύση του Adams σύμφωνα με τη σχέση: [7]

$$\frac{dT}{dt} = 2\pi k\rho c\left(\frac{H}{h}\right)^2(T - T_0)^3 \text{ (λεπτό έλασμα) όπου,}$$

k= θερμική αγωγιμότητα (W/mK)

ρ= πυκνότητα υλικού (Kg/m<sup>3</sup>)

c= ειδική θερμότητα (J/KgK)

H= πλάτος ελάσματος (mm)

h= ΡΕΘ (J/mm)

Στον πίνακα 4.4 δίνονται οι ρυθμοί ψύξης για τα πέντε πειραματικά δοκίμια.

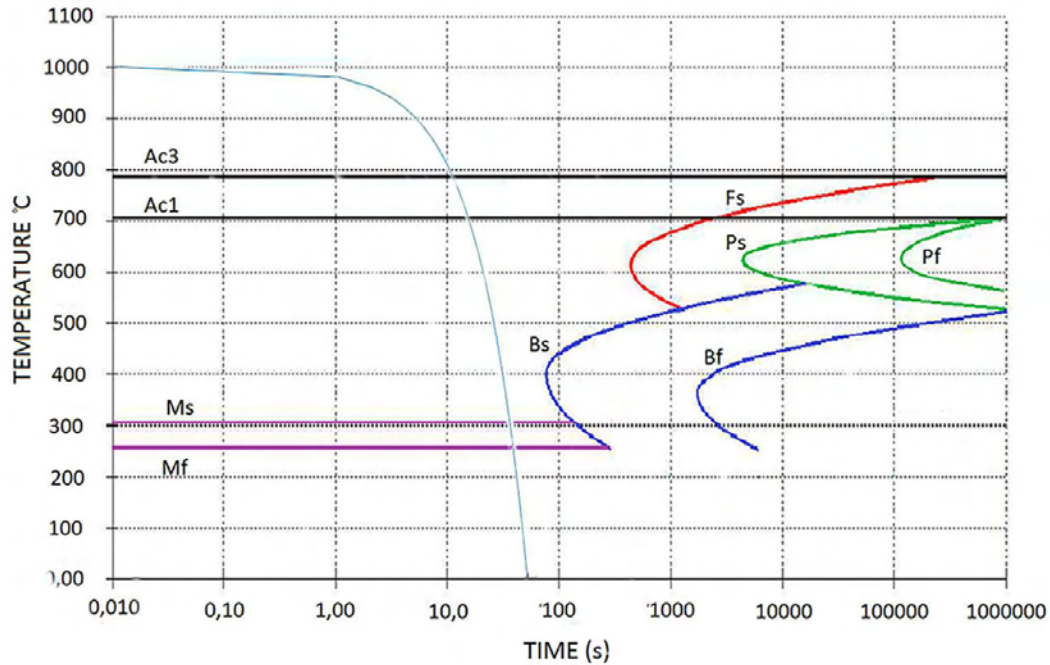
Πίνακας 4.4 Ρυθμοί ψύξης για τα δοκίμια

A/A ΔΟΚ	ΡΥΘΜΟΣ ΨΥΞΗΣ (°C/sec)
1ο	20.15
2ο	5.07
3ο	3.73
4ο	1.43
5ο	0.86

Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα των ρυθμών ψύξης ενσωματωμένα στο διάγραμμα CCT του χάλυβα ArmoX 500T.

- **Δοκίμιο 1 (PEΘ=300 J/mm)**

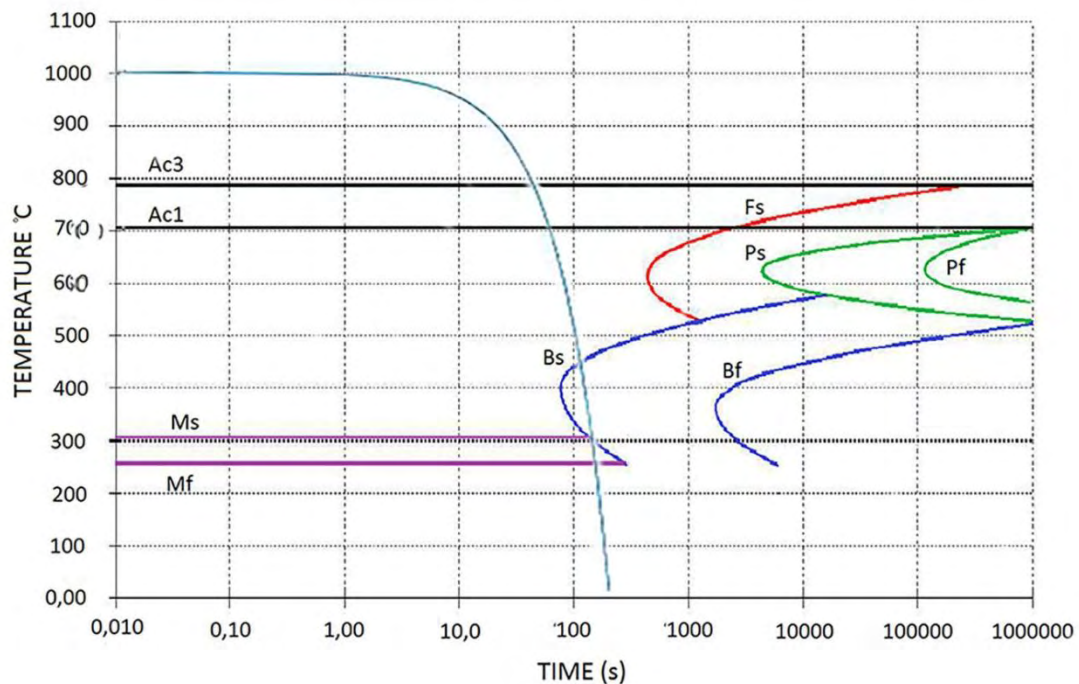
Από το διάγραμμα 4.19 προκύπτει πως η τελική μικροδομή του χάλυβα είναι εξολοκλήρου μαρτενσίτης. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με το μεταλλογραφικό έλεγχο του δοκιμίου, καθώς εκεί εντοπίστηκε και ένα ποσοστό μπαινίτη στην τελική μικροδομή.



Διάγραμμα 4.19 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 1

- **Δοκίμιο 2 (PEΘ=600 J/mm)**

Από το ρυθμός ψύξης φαίνεται πως η τελική μικροδομή του υλικού είναι μαρτενσίτης με ένα μικρό ποσοστό μπαινίτη, αποτέλεσμα που σωμαφώνει με τον μεταλλογραφικό έλεγχο.

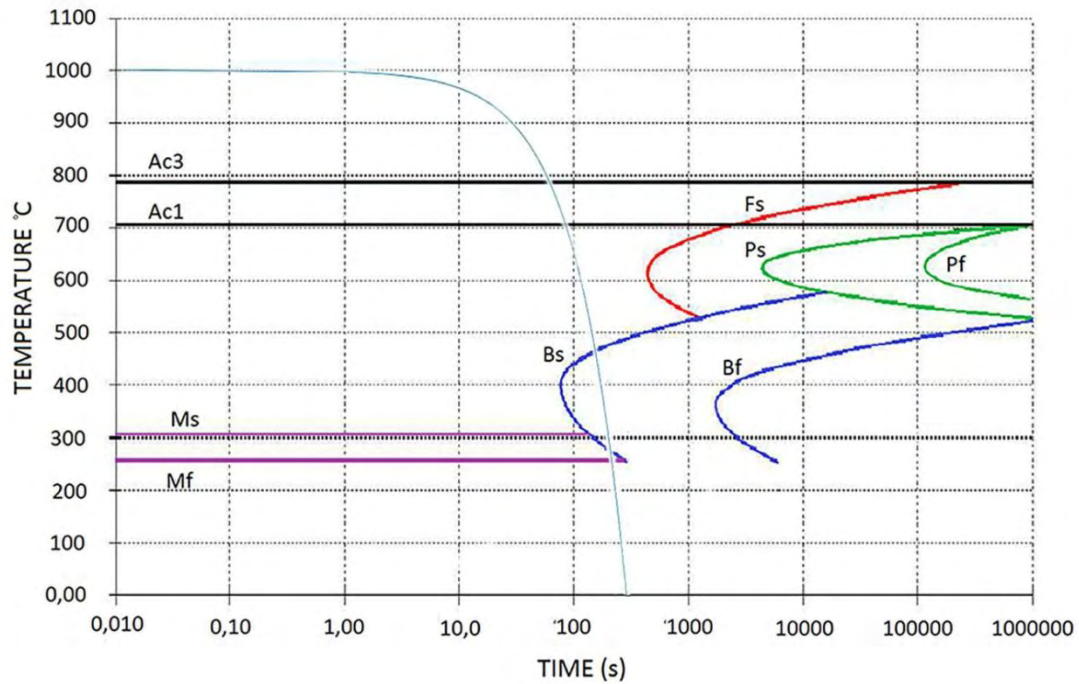


Διάγραμμα 4.20 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 2



- **Δοκίμιο 3 (PEΘ=700 J/mm)**

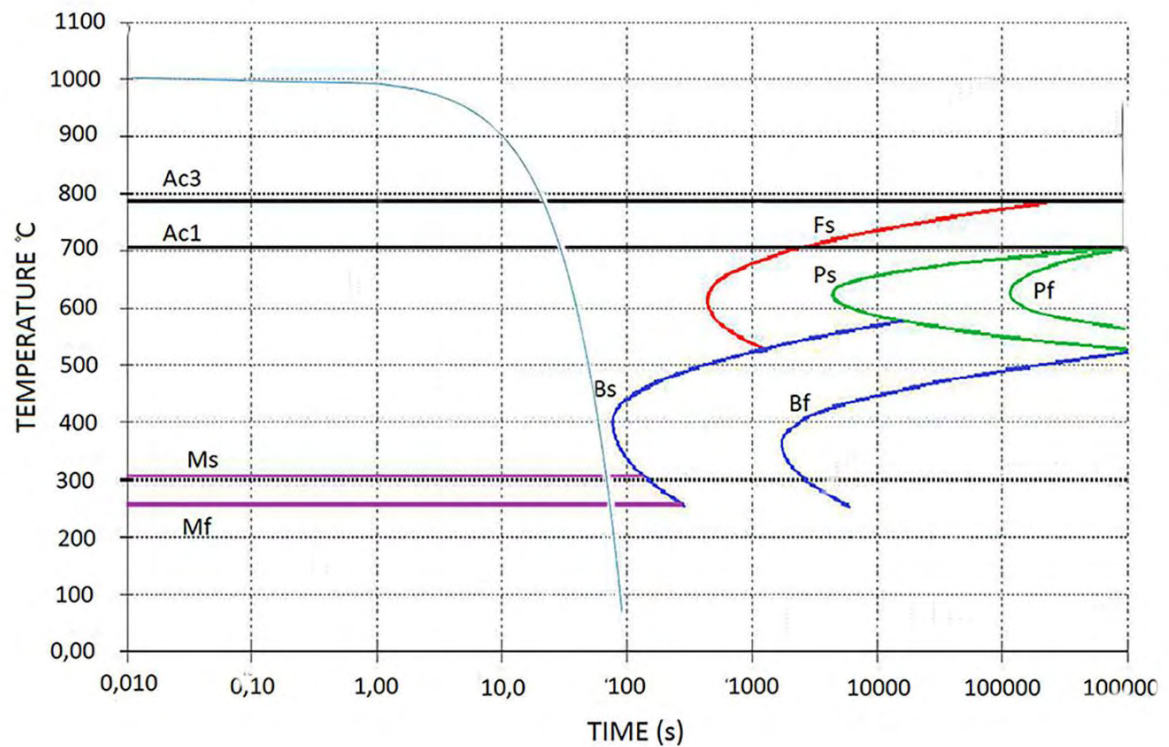
Από το ρυθμός ψύξης φαίνεται πως η τελική μικροδομή του υλικού είναι μαρτενσίτης και ένα ποσοστό μπαινίτης.



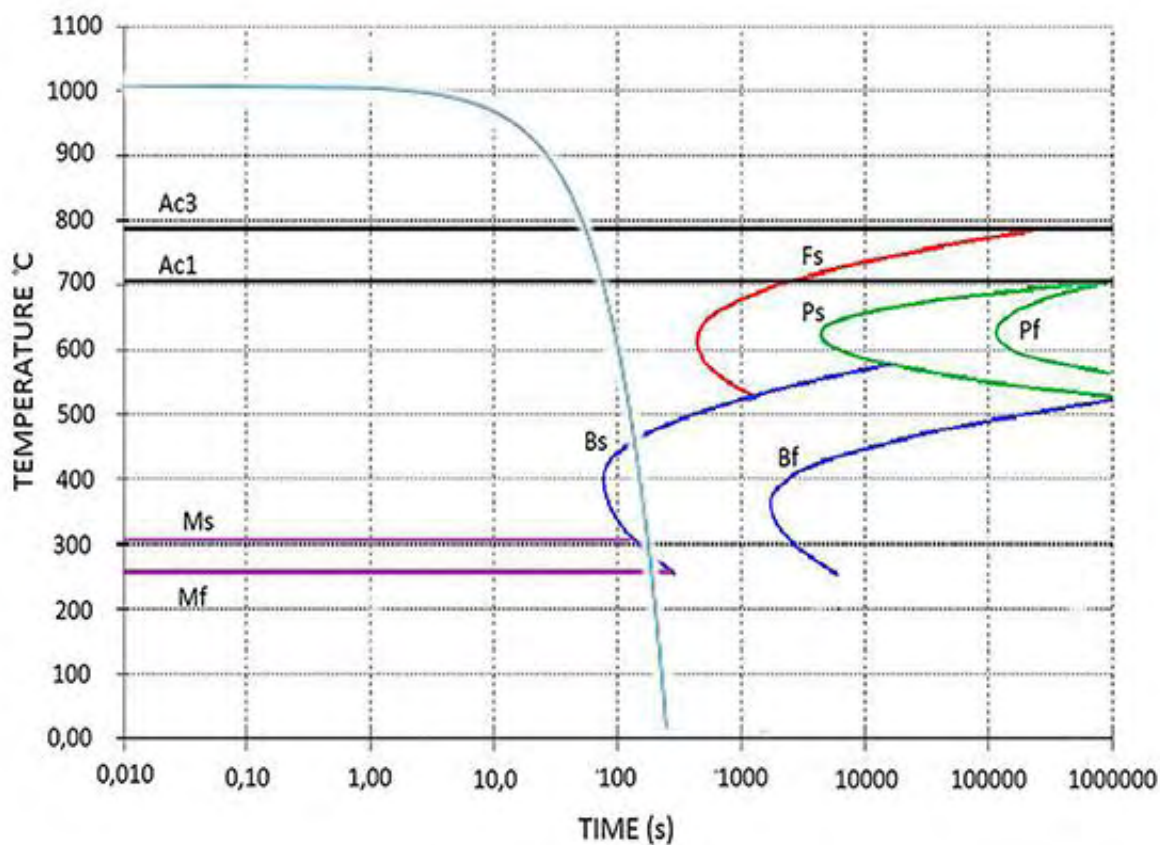
Διάγραμμα 4.21 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 3

- **Δοκίμιο 4 (PEΘ=440 J/mm)**

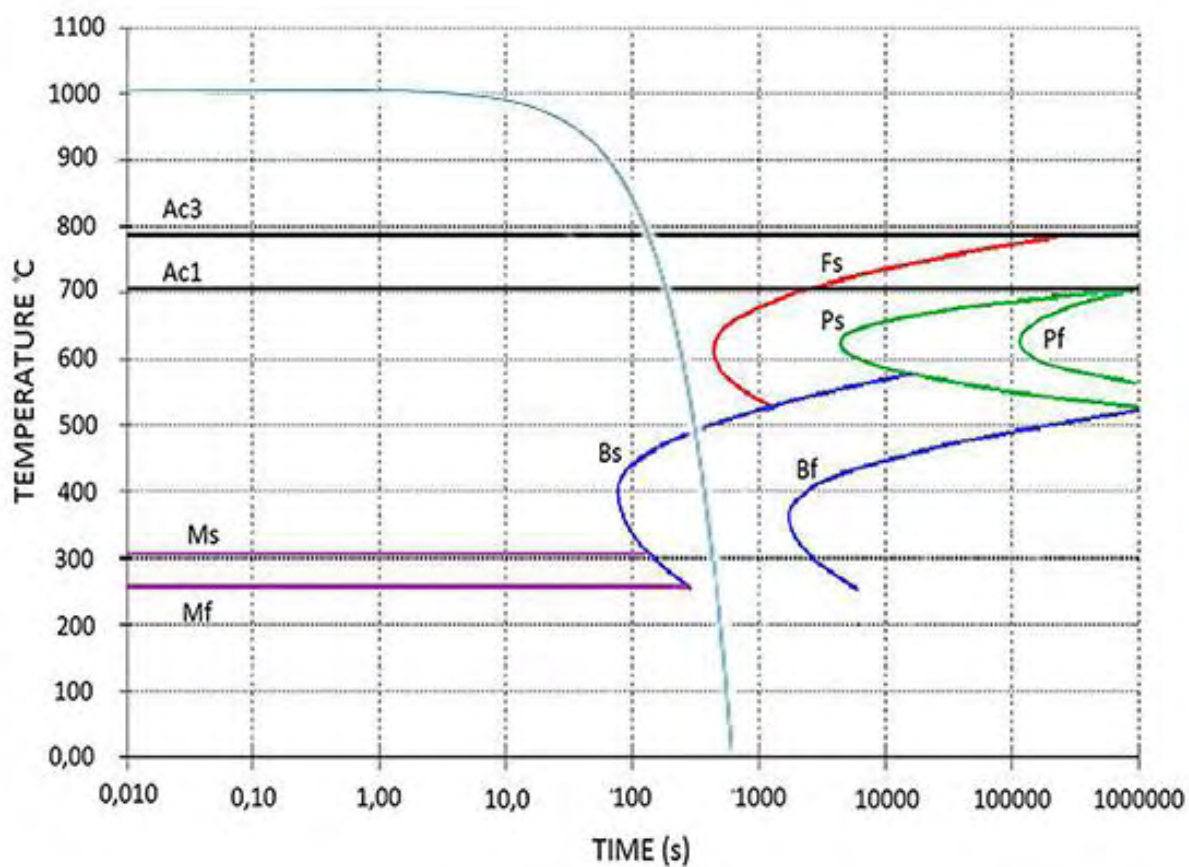
Από τα διαγράμματα 4.12-4.14 αυτό που προσεγγίζει τη δομή του δείγματος 4 σε σχέση με τον μεταλλογραφικό έλεγχο είναι το διάγραμμα 4.14 το οποίο προβλέπει ότι η τελική μικροδομή αποτελείται από μαρτενσίτη και μπαινίτη.



Διάγραμμα 4.22 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 100<sup>0</sup>C



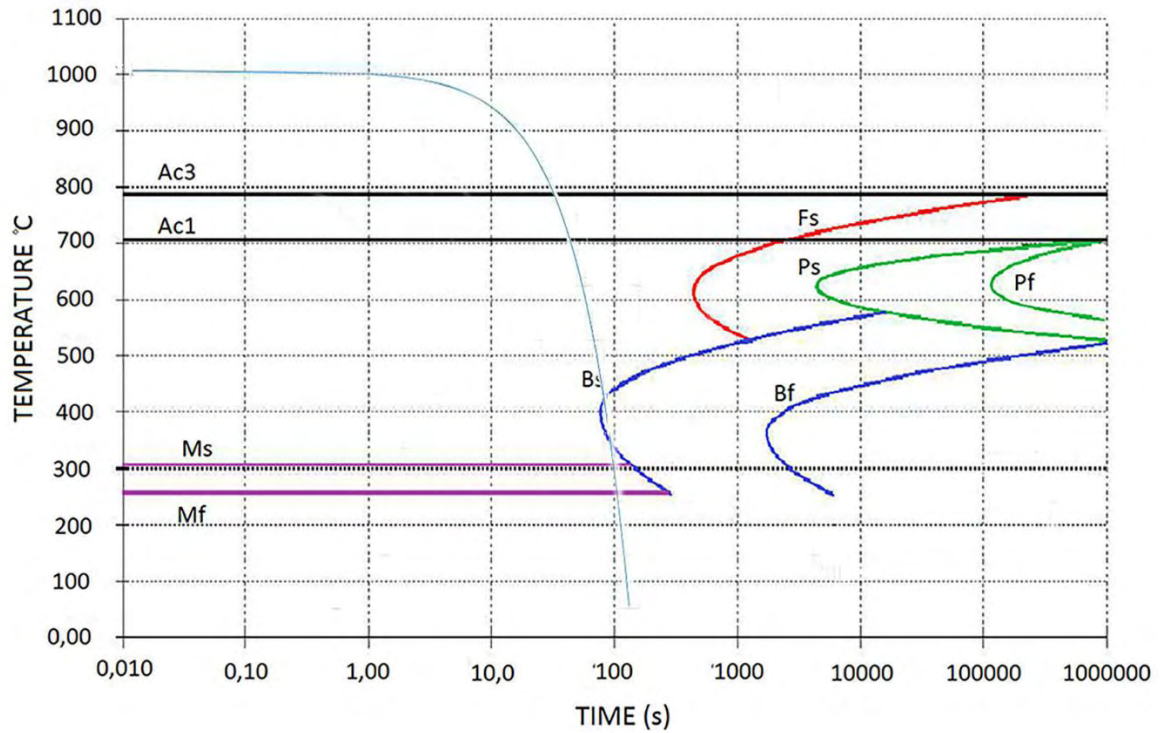
Διάγραμμα 4. 23 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 200<sup>0</sup> C



Διάγραμμα 4. 24 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 4 για αρχική θερμοκρασία 300<sup>0</sup> C

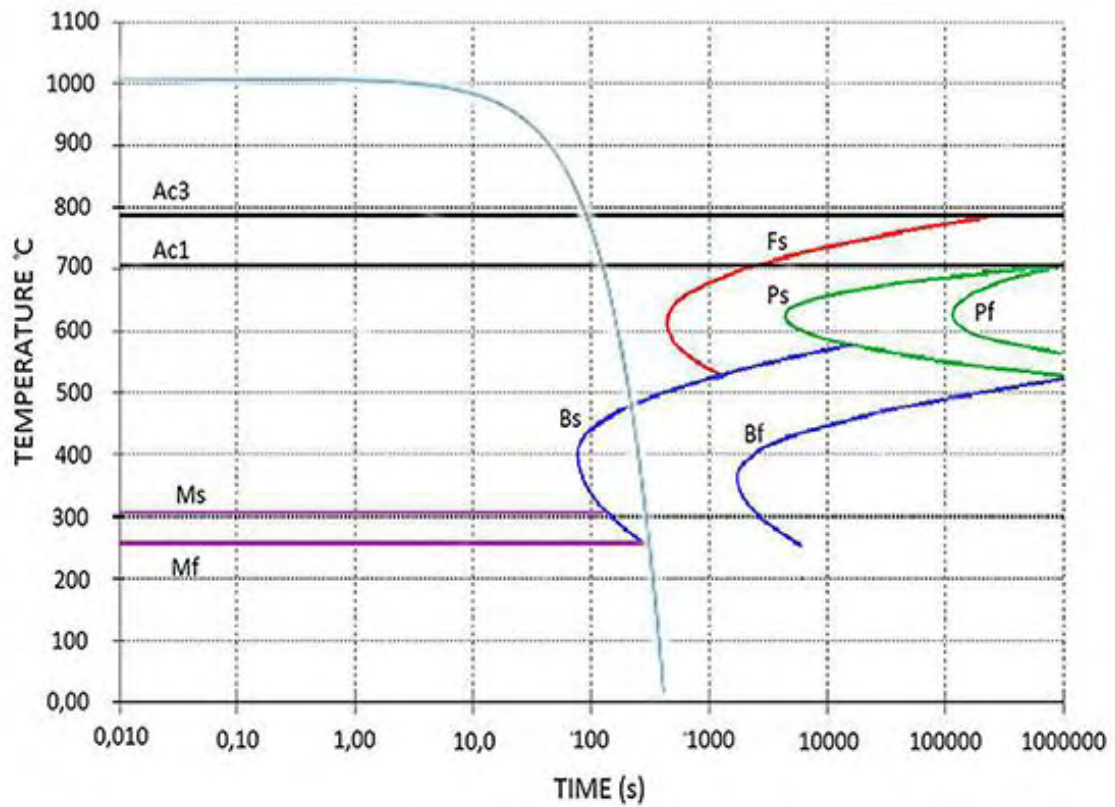
- Δοκίμιο 5 (PEΘ=535 J/mm)

Από τα διαγράμματα 4.15-4.17, εκείνο που προβλέπει τη μικροδομή του υλικού είναι το διάγραμμα 4.17 για θερμοκρασία προθέρμανσης 300<sup>0</sup> C. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό η τελική δομή του δείγματος αποτελείται από μαρτενσίτη, μπαινίτη και μικρό ποσοστό φερρίτη.

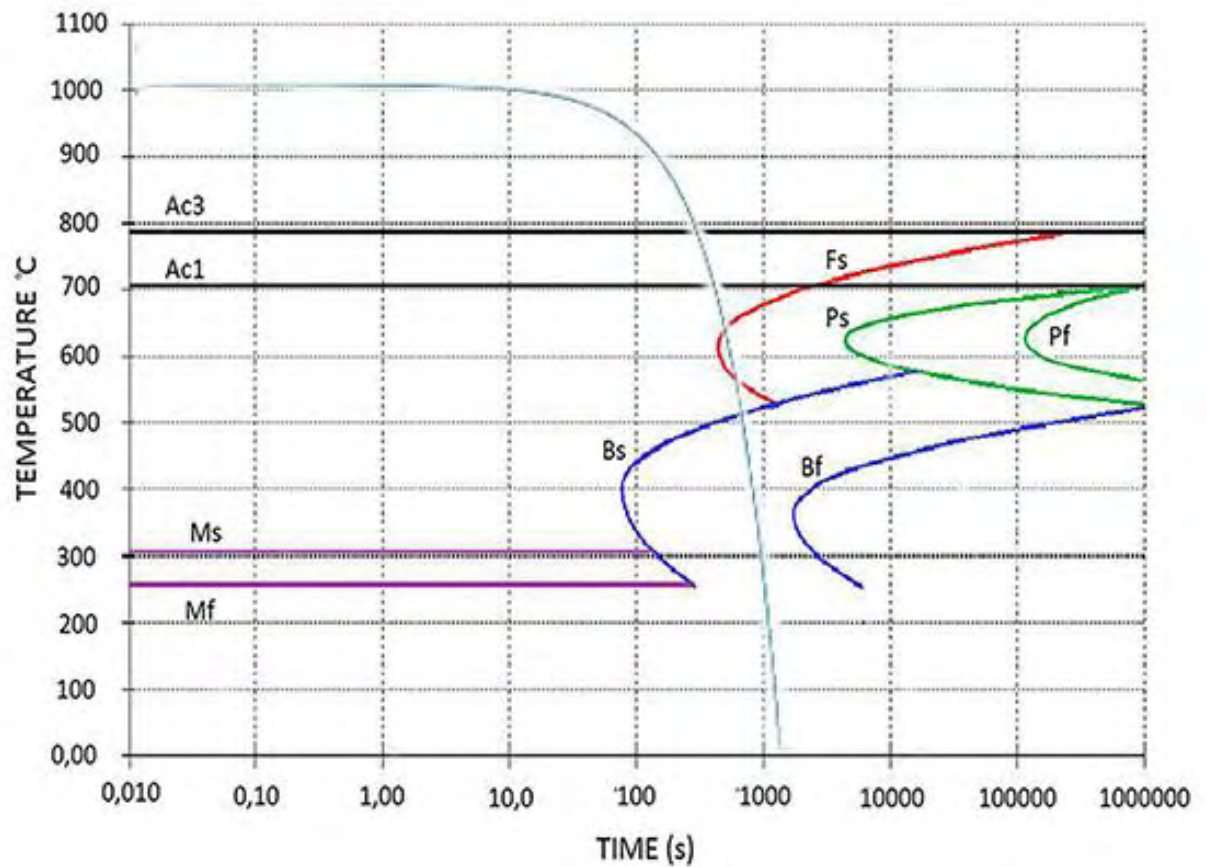


Διάγραμμα 4. 25 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 100<sup>0</sup> C





Διάγραμμα 4. 26 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 200<sup>0</sup> C



Διάγραμμα 4. 27 Ρυθμός ψύξης δοκιμίου 5 για αρχική θερμοκρασία 300<sup>0</sup> C



Οι ρυθμοί ψύξης που υπολογίστηκαν με τη εξίσωση του Adams και η πρόβλεψη για την τελική μικροδομή των ελασμάτων προσεγγίζουν το πραγματικό αποτέλεσμα, αλλά η λύση που δίνουν δεν είναι απολύτως ακριβής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η εξίσωση του Adams δεν λαμβάνει υπόψη τους γεωμετρικούς παράγοντες των δειγμάτων και ουσιαστικά υπολογίζει το ρυθμό ψύξης για ένα συγκεκριμένο σημείο.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των Εργαστηριακών Ελέγχων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

### 5.1 Μεταλλογραφία

Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και μετά το πέρας της διαδικασίας το έλασμα ψύχεται μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τους μετασχηματισμούς φάσεων και τη δημιουργία μικροδομών που είναι διαφορετικές από την αρχική.

Η μικροδομή του βασικού μετάλλου του χάλυβα ArmoX 500T αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη. Στη λίμνη συγκόλλησης και στην περιοχή γύρω από αυτή έχει σχηματιστεί χονδρόκοκκος μαρτενσίτης λόγω της θέρμανσης σε υψηλές θερμοκρασίες (ωστενιτοποίηση) και της γρήγορης ψύξης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο PEΘ της συγκόλλησης τόσο μεγαλύτερο είναι και το μέγεθος των κόκκων του μαρτενσίτη. Στο σύνορο μετάβασης από τη ΘΕΖ στο βασικό μέταλλο η δομή του υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες συγκόλλησης αλλά και από τη θερμοκρασία προθέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα, σε συνθήκες μεγάλου PEΘ και χωρίς προθέρμανση, παρατηρείται πως η δομή του χάλυβα αποτελείται από μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Στα δείγματα που πραγματοποιήθηκε συγκόλληση και από τις 2 πλευρές, παρατηρήθηκε πως η τελική δομή του υλικού αποτελούνταν από μπαινίτη, παραμένοντα ωστενίτη και μικρο ποσοστό φερρίτη, επηρεάζοντας σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες.

### 5.2 Μικροσκληρομετρήσεις

Τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων δείχνουν πως η συγκόλληση έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της σκληρότητας του υλικού σε μεγάλο ποσοστό. Είναι φανερό πως από το κέντρο της συγκόλλησης έως και τη ζώνη μετάβασης από τη ΘΕΖ στο βασικό μέταλλο, η τιμή της σκληρότητας υποβαθμίζεται. Πιο συγκεκριμένα, στη λίμνη της συγκόλλησης εντοπίζεται μια μικρή μείωση της σκληρότητας της τάξης του 5-7% και οι τιμές εκεί πλησιάζουν πολύ σε αυτές του βασικού μετάλλου. Η μέγιστη μείωση παρατηρείται στη περιοχή της ΘΕΖ σε όλα τα δοκίμια. Η ποσοστιαία πτώση της σκληρότητας είναι ανάλογη της τελικής μικροδομής του υλικού και κατά συνέπεια των συνθηκών συγκόλλησης. Εντοπίζεται πως στα δοκίμια που έχει προηγηθεί προθέρμανση λόγω του πρώτου περάσματος συγκόλλησης το πλάτος της ΘΕΖ εμφανίζει τη μικρότερη τιμή. Επομένως και η υποβάθμιση των ιδιοτήτων σε αυτά τα δοκίμια είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η πτώση της σκληρότητας είναι περίπου ίδια για όλα τα δείγματα και έχει τιμή 15-18% της αρχικής σκληρότητας. Η αυξομείωση της σκληρότητας οφείλεται στους μετασχηματισμούς φάσεων που έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης του υλικού και στις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν κάθε μικροδομή.

### 5.3 Εφελκυσμός

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού για τα δοκίμια 4 και 5 έδειξαν πως η αντοχή του χάλυβα ArmoX 500T μετά από συγκόλληση τελικής εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Αναλυτικότερα, τα δείγματα του δοκιμίου 4 παρουσίασαν μία ψαθυρή συμπεριφορά, καθώς το χρονικό σημείο που άρχισαν να διαρρέουν πλαστικά αστόχησαν άμεσα. Η θραύση συνέβη στη ΘΕΖ για μικρή τιμή παραμόρφωσης, ενώ και τα όρια διαρροής και θραύσης ήταν αρκετά υποβαθμισμένα σε σχέση με τις πρότυπες τιμές.

Σχετικά με τα δοκίμια του δείγματος 5, παρατηρήθηκε πιο ομαλή πλαστική συμπεριφορά καθώς τα συγκεκριμένα δοκίμια αστόχησαν στο βασικό μέταλλο σε μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης από τα αντίστοιχα του δείγματος 4, ενώ και τα όρια διαρροής και θραύσης ήταν εμφανώς αυξημένα. Παρόλα αυτά, τα συγκολλημένα δοκίμια εξακολουθούν να εμφανίζουν αρκετά υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με το αρχικό υλικό.

### 5.4 Ρυθμοί Ψύξης

Ο ρυθμός ψύξης χρησιμοποιείται για να γίνει πρόβλεψη για την τελική μικροδομή ενός υλικού μετά από θερμική κατεργασία. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, οι ρυθμοί ψύξης των συγκολλημένων ελασμάτων υπολογίστηκαν με τη εξίσωση του Adams. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν προσεγγίζουν σε καλό βαθμό την πραγματική δομή του υλικού για τις υψηλές τιμές του  $PE\Theta$ , ενώ για τις χαμηλές τιμές η πρόβλεψη δεν ήταν αρκετά κοντά στο τελικό αποτέλεσμα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η εξίσωση του Adams δε λαμβάνει υπόψη γεωμετρικούς παράγοντες και περιέχει πληροφορίες μόνο για ένα σημείο του ελάσματος. Επιπλέον, παραβλέπει τυχόν αλλαγές στις συνθήκες της συγκόλλησης και δε προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις συγκολλήσεις με πολλαπλά πάσα. Για το λόγο αυτό προτείνεται ο υπολογισμός του ρυθμού ψύξης να γίνει με τη χρήσης πεπερασμένων στοιχείων.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία συμφωνούν με τη βιβλιογραφία και την έρευνα που έχει γίνει μέχρι τώρα για το χάλυβα ArmoX 500T. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα οι κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης με τη μέθοδο TIG είναι:

- $PE\Theta = 440 \text{ J/mm}$  για συγκόλληση και από τις 2 πλευρές και τελικό αποτέλεσμα με τη μέγιστη σκληρότητα.
- $PE\Theta = 535 \text{ J/mm}$  για συγκόλληση και από τις 2 πλευρές και τελικό αποτέλεσμα με τη μέγιστη αντοχή.

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

- Δοκιμές κρούσης σε δείγματα που θα συγκολληθούν με τις βέλτιστες συνθήκες που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία.
- Υπολογισμός συνολικού θερμικού κύκλου της συγκόλλησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χαϊδεμενόπουλος, Γ. Ν. (2007). *Φυσική Μεταλλουργία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα
- [2] Demeri, M. Y. (n.d.). Advanced high strength steels: science technology and applications
- [3] Pradipta Kumar Jena, P. S. (2016). Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel . *Applied research and technology* , σσ. 7-53
- [4] Barenyi, I. (2013, April 4). Microstructure changes in cut face obtained by plasma and laser cutting of selected high strength steels . *Problems Of Mechatronics* , σσ. 7-14.
- [5] *Armox 500T Data sheet*, <https://www.ssab.com/products/brands/armox/armox-500t>
- [6] *SSAB Armox Workshop recommendations*, <https://www.ssab.com>
- [7] Δημήτρης Ι. Παντελής, Β. Ι. (2017). *Επιστήμη και Τεχνολογία Συγκολλήσεων*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [8] Barenyi, I. (2014). Degradation of mechanical properties of selected UHSS steels in HAZ after their welding. *University Review* , σσ. 99-103
- [9] Igor Barenyi, O. H. (2013, April). Changes in mechanical properties of armoyred UHSLA stel Amox 500 after overtempering. σσ. 7-14.
- [10] Barenyi, I. (2014). Simulation of Armox steels mechanical properties degradation in HAZ after selected thermal cutting processes. *University Review* , σσ. 18-22.
- [11] M.A. Iqbal, K. S. (2016, May 26). An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *Impact Engineering* , σσ. 146-164.
- [12] V. Pepel, A. Ž. (2016, February 25). Crack Growth through low-cycle fatigue loading of material Armox 500T . σσ. 691-693.
- [13] Ambuj Saxena, A. K. (2018, January 18). Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal. *Defence Technology* , σσ. 1-8
- [14] ESAB Knowledge Center: <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/index.cfm>



[15] Tamarelli, C. M. (2011). *AHSS 101: The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications*. University of Michigan.