



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τίτλος

**ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN ΚΑΙ
ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΧΑΛΥΒΩΝ**

Σώκος Χαράλαμπος

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης έως και σήμερα υπάρχει μια συνεχής απαίτηση για τη βελτίωση του τρόπου παραγωγής των χαλύβδινων σωλήνων, καθώς αυτοί χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως π.χ. η μεταφορά υγρών και αερίων καυσίμων. Η βελτίωση όμως των μεθόδων παραγωγής δε θα ήταν εφικτή, χωρίς την κατανόηση των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο μικρο-κλίμακας στο προς μελέτη υλικό. Επομένως, δημιουργείται η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη και χαρακτηρισμό των μηχανισμών αυτών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν δείγματα συγκολλημένου χαλυβδοσωλήνα, τα οποία προμηθευτήκαν εξ' ολοκλήρου από την ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε.. Η εξέταση των δειγμάτων αυτών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της καταγραφής των ελάσσονων βρόχων υστέρησης. Η μαγνητική απόκριση των συγκολλημένων δειγμάτων συσχετίστηκε με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά, τη χημική σύσταση και τη μηχανική συμπεριφορά των εν λόγω δειγμάτων.

Η σημασία του εγχειρήματος αυτού, αφορά τον έλεγχο των δειγμάτων με μία μη-καταστροφική τεχνική, με σκοπό τον ποιοτικό χαρακτηρισμό της συγκόλλησης που υπέστη. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, προς το παρόν, οι μαγνητικές μη καταστροφικές τεχνικές δεν αντικαθιστούν τις υπάρχουσες μεθόδους, αλλά δρουν συνεργατικά με αυτές. Παρόλα αυτά, η μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς του υλικού σε σχέση με τις παραμένουσες τάσεις, παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον και συνεισφέρει στην κατανόηση των μικροδομικών μηχανισμών που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά του.

Για την εκπόνηση και ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο- Καθηγητή ΕΜΠ για την υποστήριξη και την καλή συνεργασία όλο αυτό το διάστημα. Πολύτιμη επίσης υπήρξε η βοήθεια που έλαβα από την κα. Βουρνά Πολυξένη-Υπ. Διδάκτωρ.

Επίσης σημαντική υπήρξε και η συνδρομή της εταιρείας ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. η οποία και παραχώρησε τα δείγματα τα οποία μελετήθηκαν.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές μου, οι οποίοι υπήρξαν σύμβουλοι και συνοδοιπόροι στην πορεία εντός αλλά και εκτός της σχολής.

Στο τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου , που ανιδιοτελώς με υποστήριξαν και μου συμπαραστάθηκαν σε αυτή την προσπάθεια και γενικότερα σε όλη αυτή την πορεία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση των μη-καταστροφικών μεθόδων του *μαγνητικού θορύβου Barkhausen* και του *βρόχου υστέρησης* για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας συγκόλλησης δοκιμίων. Σε ότι αφορά τα υπό εξέταση δείγματα αποτελούσαν τμήμα χαλυβδοσωλήνων ευθείας ραφής συγκολλημένα με τη μέθοδο HF –EFW (υψίσυχνη συγκόλληση). Η διαδικασία υψίσυχνης συγκόλλησης χρησιμοποιεί πίεση και θερμότητα προκειμένου να ενώσει τις άκρες του ελάσματος που σχηματίζουν ανοικτή ραφή, χωρίς την προσθήκη μετάλλου πλήρωσης. Ωστόσο καμία άλλη πληροφορία που να αφορά την ποιότητα του χάλυβα (χημική σύσταση) που χρησιμοποιήθηκε, τις προδιαγραφές της συγκόλλησης, τον τρόπο παραγωγής τους, τη μετά τη συγκόλληση θερμική κατεργασία στην οποία υποβλήθηκαν, δεν ήταν γνωστή. Επομένως, εκτός από τις μαγνητικές μετρήσεις, κατέστη απαραίτητη και μία σειρά από άλλες διεργασίες κατά την πειραματική διαδικασία.

Στο πρώτο στάδιο, όπως είναι φυσικό, πραγματοποιήθηκαν όλοι οι απαραίτητοι μη-καταστροφικοί έλεγχοι. Με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen έγιναν γραμμικές σημειακές μετρήσεις, εκατέρωθεν σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων (μέταλλο βάσης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ζώνη συγκόλλησης). Ακολούθησαν γωνιακές σημειακές μετρήσεις για να προσδιορισθεί η μαγνητική ισοτροπία του δοκιμίου. Το τελευταίο βήμα των μη-καταστροφικών μεθόδων ήταν ο έλεγχος στο μαγνητικό υστερησιογράφο με στόχο τη λήψη των χαρακτηριστικών βρόχων υστέρησης για κάθε δοκίμιο.

Απουσία στοιχείων για τον τύπο του υλικού, προετοιμάστηκαν τα δοκίμια για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό με κοπή, εγκιβωτισμό, λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή. Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής έγινε αρχικά στο οπτικό μικροσκόπιο και ακολούθως στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) με σημειακές και γενικευμένες χημικές στοιχειομετρικές αναλύσεις στην επιφάνεια του δείγματος (EDS). Στο τέλος έγινε και έλεγχος με περιθλασιόμετρο ακτίνων x (XRD).

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων είναι το τελευταίο στάδιο του χαρακτηρισμού και μέσο απαραίτητο για τη συσχέτιση με τις μαγνητικές μετρήσεις. Έγινε σε δύο βασικά βήματα με πρώτη τη σκληρομέτρηση τύπου Vickers και επόμενο βήμα τις δοκιμές εφελκυσμού.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is the use of non-destructive methods of the “*Barkhausen magnetic noise*” and “*magnetic reluctance*” test for the evaluation and reliability test of the welding process. The samples were taken from straight welded alloy pipelines that were produced with HF-EFW (high frequency welding) method. The HF-EFW method combines high temperatures with pressure application in order to weld the alloy sheet edges which form an open juncture, without the addition of repletion material. However there was no information regarding the alloy type (chemical composition), the welding specifications, the production techniques or the heat treatments that were used. Therefore, despite the magnetic measurements, a series of other tests was necessary during the experimental process.

At first, there were performed all the needed magnetic tests. A series of linear spot measurements were taken throughout the surface of the test samples (both sides and at cross section), using the *Barkhausen magnetic noise* method (basic metal, heat affected zone and welding zone). The angular spot measurements followed, in order to determine the magnetic isotropy (intendancy of magnetization) of the samples. The last step of the non-destructive methods, was the magnetic reluctance test resulting to the acquisition of the characteristic magnetic reluctance loops for each sample.

Since there was no information about the pipeline alloy type, the test samples were prepared for the necessary metallographic characterization process. The steps followed were: cutting the samples, epoxy resin casting, grinding, polishing and chemical etching. The microstructure characterization was checked on the optical microscope (OM). Then, a more thorough observation was performed at the scanning electron microscope (SEM) combined with a general and spot chemical analysis (EDS) on the samples’ surface. Additionally, there was also a test on the x-ray diffractometer (XRD).

The determination of the sample material mechanical properties, was the last stage of the characterization and offered a valuable comparison with the magnetic properties. Two basic steps were followed, with a Vickers method hardness test being the first, and a tensile strength stress test being the second.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|------------|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | I |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | III |
| ABSTRACT | IV |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ | V |
| ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ | X |
| ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ | XIV |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 15 |
| 1.1 Εισαγωγή | 15 |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή | 15 |
| 1.3 Κύρια χαρακτηριστικά των χαλυβδοσωλήνων | 17 |
| 1.3.1 Αντοχή (Strength)..... | 17 |
| 1.3.2 Ευκολία εγκατάστασης (Ease of installation) | 18 |
| 1.3.3 Υψηλή ικανότητα ροής (High-flow capacity)..... | 18 |
| 1.3.4 Αντοχή σε συνθήκες διαρροής (Leak resistance)..... | 18 |
| 1.3.5 Μεγάλη διάρκεια ζωής (Long service life) | 18 |
| 1.3.6 Αξιοπιστία και ευελιξία (Reliability and versatility)..... | 19 |
| 1.3.7 Οικονομία (Economy) | 19 |
| 1.4 Χάλυβες σωληνώσεων..... | 20 |
| 1.5 Χαλυβδοσωλήνες της ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε. | 23 |
| 1.5.1 Ιδιότητες χαλύβων | 23 |
| 1.5.2 Τρόποι παραγωγής..... | 24 |
| 1.5.2.1 Μονάδα Ευθείας Ραφής, 26’’ | 24 |
| 1.5.2.2 Μονάδα Ελικοειδούς Ραφής, 100’’ | 26 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 1.5.3 | Θερμικές κατεργασίες χαλύβων στη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε. | 28 |
| 1.5.3.1 | Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση | 29 |
| 1.5.3.2 | Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση | 31 |
| 1.5.4 | Μορφολογία της συγκόλλησης High Frequency Electric Resistance Welding HF – ERW..... | 32 |
| 1.5.4.1 | Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης..... | 34 |
| | Εικόνα 1-16: Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης. | 35 |
| 1.5.4.2 | Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης..... | 35 |
| | Εικόνα 1-17: Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης. | 36 |
| 1.5.5 | Προετοιμασία δοκιμίων για μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων | 36 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | | 38 |
| 2.1 | Εισαγωγή | 38 |
| 2.2 | Μεθοδολογία..... | 38 |
| 2.3 | Δείγματα που παρελήφθησαν | 39 |
| 2.3.1 | Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη..... | 39 |
| 2.3.2 | Οπτικός έλεγχος (visual inspection) συγκολλημένων δοκιμίων | 40 |
| 2.4 | Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων..... | 40 |
| 2.4.1 | Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen | 40 |
| 2.4.1.1 | Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen..... | 40 |
| 2.4.1.2 | Τρόποι μέτρησης της απόκρισης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen | 42 |

| | | |
|------------------|--|----|
| 2.4.1.2.1 | Γραμμικές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen | 42 |
| 2.4.1.2.2 | Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen | 43 |
| 2.4.2 | Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης..... | 43 |
| 2.4.2.1 | Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου | 43 |
| 2.5 | Μεταλλογραφικός-Μικροδομικός χαρακτηρισμός των συγκολλημένων δειγμάτων | 48 |
| 2.5.1 | Απαίτηση για περαιτέρω μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του υλικού | 48 |
| 2.5.2 | Προετοιμασία δειγμάτων..... | 49 |
| 2.5.2.1 | Κοπή δοκιμίων | 49 |
| 2.5.2.2 | Εγκιβωτισμός | 49 |
| 2.5.2.3 | Λείανση | 49 |
| 2.5.2.4 | Στίλβωση | 50 |
| 2.5.2.5 | Χημική προσβολή | 50 |
| 2.5.3 | Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού | 51 |
| 2.5.3.1 | Οπτικό Μικροσκόπιο (OM) | 51 |
| 2.5.3.2 | Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) | 51 |
| 2.5.3.3 | Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy) | 52 |
| 2.5.4 | Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων | 52 |
| 2.5.4.1 | Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης | 53 |
| 2.5.4.2 | Δοκιμές εφελκυσμού | 53 |

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 54 |
| 3.1 Εισαγωγή | 54 |
| 3.2 Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων..... | 54 |
| 3.2.1 Χωρική κατανομή των γραμμικών σημειακών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen | 54 |
| 3.2.2 Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen | 58 |
| 3.2.3 Μέτρηση βρόχων υστέρησης | 63 |
| 3.2.4 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω οπτικού μικροσκοπίου | 68 |
| 3.2.5 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) | 69 |
| 3.2.6 Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)..... | 75 |
| 3.2.7 Μικρο-σκληρομέτρησης..... | 76 |
| 3.2.8 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ - $\epsilon\%$) | 77 |
| 3.2.9 Θραυστογραφίες..... | 77 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 79 |
| 4.1 Εισαγωγή | 79 |
| 4.2 Προσδιορισμός της ποιότητας του χάλυβα στην οποία ανήκουν τα υπο εξέταση συγκολλημένα δοκίμια..... | 79 |
| 4.3 Συσχέτιση της κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων δοκιμίων..... | 80 |
| 4.4 Συσχέτιση της κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με τις μεταβολές άλλων μαγνητικών παραμέτρων | 83 |
| 4.5 Συνοπτικά Συμπεράσματα | 85 |

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ..... | 86 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 87 |

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1-1: Τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης χαλυβδοσωλήνα..... | 19 |
| Εικόνα 1-2: Ποιότητες χαλυβδοσωλήνων. | 21 |
| Εικόνα 1-3: Μονάδα ευθείας ραφής. | 25 |
| Εικόνα 1-4: Μονάδα ελικοειδούς ραφής. | 27 |
| Εικόνα 1-5: Θερμή έλαση σωλήνα με ολική εξομάλυνση στους 850 °C – 1100 °C..... | 29 |
| Εικόνα 1-6: Vickers tests σκληρότητας HV 1 kg και ο χρωματικός κώδικας της σκληρότητας σε κλίμακα των 20 HV..... | 30 |
| Εικόνα 1-7: Μακροσκοπική απεικόνιση της ΘΕΖ ενός συγκολλημένου χαλυβδοσωλήνα με HF – ERW. Ο χάλυβας έχει υποστεί θερμή έλαση με πλήρη εξομάλυνση..... | 30 |
| Εικόνα 1-8: Ψυχρή σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση..... | 31 |
| Εικόνα 1-9: Vickers tests σκληρότητας HV 1 kg και ο χρωματικός κώδικας της σκληρότητας σε κλίμακα των 20 HV..... | 31 |
| Εικόνα 1-10: Μακροσκοπική απεικόνιση της ΘΕΖ ενός συγκολλημένου χαλυβδοσωλήνα με HF – ERW. Ο χάλυβας έχει υποστεί ψυχρή σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση. | 32 |
| Εικόνα 1-11: Συγκόλληση HF – ERW..... | 32 |
| Εικόνα 1-12: Φάση 1 συγκόλλησης HF -ERW..... | 33 |
| Εικόνα 1-13: Φάση 2 συγκόλλησης HF -ERW..... | 33 |
| Εικόνα 1-14: Φάση 3 συγκόλλησης HF -ERW..... | 34 |
| Εικόνα 1-15: Τρεις φάσης της συγκόλλησης HF -ERW..... | 34 |
| Εικόνα 1-16: Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης..... | 35 |
| Εικόνα 1-17: Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης. | 36 |
| Εικόνα 1-18: Ο χαλυβδοσωλήνας χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης δημιουργεί προϋποθέσεις για επικαθίσεις των ορυκτών αλάτων του νερού (νιτρικά, θειούχα φωσφορικά, χλωρικά άλατα και ιόντα νατρίου). | 36 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1-19: Μαρκάρισμα στην επιφάνεια των χαλυβδοσωλήνων των σημείων από τα οποία θα κοπούν δείγματα για να μελετηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. | 36 |
| Εικόνα 2-1: Υλικό που παρελήφθη. | 39 |
| Εικόνα 2-2: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen. | 40 |
| Εικόνα 2-3: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V. | 41 |
| Εικόνα 2-4: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια συγκολλημένου δείγματος. | 41 |
| Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen. | 42 |
| Εικόνα 2-6: Σημεία γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #1. | 42 |
| Εικόνα 2-7: Πολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης. | 43 |
| Εικόνα 2-8: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλογνωσίας. | 44 |
| Εικόνα 2-9: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλογνωσίας. | 44 |
| Εικόνα 2-10: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. | 46 |
| Εικόνα 2-11: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου. | 46 |
| Εικόνα 2-12: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου. | 47 |
| Εικόνα 2-13: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης. | 47 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 2-14: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού. | 48 |
| Εικόνα 2-15: Οπτικό μικροσκόπιο τύπου OLYMPUS BX41-M. | 51 |
| Εικόνα 2-16: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV... .. | 52 |
| Εικόνα 3-1: Απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στα συγκολλημένα δοκίμια(#1-#5), όταν το πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης. | 57 |
| Εικόνα 3-2: Ενδεικτικά πολικά διαγράμματα όπου απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης στο βασικό μέταλλο (Base Metal, BM), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ) και στη ζώνη τήξης (Fusion Zone, FZ). | 61 |
| Εικόνα 3-3 : Μορφή των ελασσόνων βρόχων υστέρησης από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για τα συγκολλημένα δοκίμια..... | 64 |
| Εικόνα 3-4 : Μορφή μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο AISI 1008 με τη μέθοδο EBW..... | 67 |
| Εικόνα 3-5: Μαγνητικές παράμετροι από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4. | 66 |
| Εικόνα 3-6: : Μορφή μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4..... | 67 |
| Εικόνα 3-7: Μαγνητική διαπερατότητα από α) μέταλλο βάσης, β) θερμικά επηρεασμένη ζώνη και γ) ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4 | 68 |
| Εικόνα 3-8: Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου από α) βασικό μέταλλο, β) θερμικά επηρεασμένη ζώνη και γ) ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #1..... | 69 |
| Εικόνα 3-9: Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για κάθε ζώνη συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο #1..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 3-10: Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για κάθε ζώνη συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4..... | 72 |
| Εικόνα 3-11 : Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για κάθε ζώνη συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο #5 | 74 |
| Εικόνα 3-12 : Κατανομή των τιμών της μικροσκληρότητας Vicker's στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #2..... | 76 |
| Εικόνα 3-13 : Εικόνες θραυστιγενούς επιφάνειας των συγκολλημένων δειγμάτων. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης..... | 77 |
| Εικόνα 4-1: Μεταβολές των παραμέτρων α και β της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου Barkhausen. | 82 |
| Εικόνα 4-2: Διακύμανση του παράγοντα ανισοτροπίας (k) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης | 82 |
| Εικόνα 4-3: : Συσχέτιση της διακύμανσης των τιμών του συνεκτικού πεδίου, της παραμένουσας μαγνήτισης και της μαγνητικής διαπερατότητας με τις παραμέτρους α και β της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου Barkhausen σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης..... | 83 |
| Εικόνα 4-4: Συσχέτιση βρόχων υστέρησης με τους βρόχους της μαγνητικής διαπερατότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το δοκίμιο #4 | 85 |

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1-1: Μηχανικές ιδιότητες από διάφορες ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σωλήνων. | 20 |
| Πίνακας 2-1: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό. | 48 |
| Πίνακας 2-2: Στάδια προετοιμασίας υλικού αναφοράς για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό. | 50 |
| Πίνακας 2-3: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς. | 53 |
| Πίνακας 3-2: Τιμές μικροσκληρότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για τα συγκολλημένα δοκίμια στην κάθετη διατομή του συγκολλημένου δοκιμίου #2. | 76 |
| Πίνακας 3-3: . Τιμές μικροσκληρότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για τα συγκολλημένα δοκίμια στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου #2. | 76 |
| Πίνακας 3-4: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης. | 77 |
| Πίνακας 4-1: Συγκριτικός πίνακας μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών (σύμφωνα με το πρότυπο API 5L) τιμών της ποσοστιαίας συμμετοχής κραματικών στοιχείων στο χάλυβα X65. | 79 |
| Πίνακας 4-2: Συγκριτικός πίνακας μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών (σύμφωνα με το πρότυπο API 5L) τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων στο χάλυβα X65. | 80 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι χαλυβδосωλήνες είναι μακροί, κοίλοι σωλήνες και αποτελούν ένα από τα κύρια προϊόντα που παράγονται από τη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα. Κάθε χρόνο παράγονται εκατομμύρια τόνοι σωλήνων από χάλυβα, που χρησιμοποιούνται σε ένα πλήθος εφαρμογών, καλύπτοντας απαιτήσεις για τη μεταφορά υγρών και αερίων καυσίμων, για την προστασία των ηλεκτρικών συρμάτων κ.α.

Για την παραγωγή τους εφαρμόζονται κυρίως δύο μέθοδοι, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να είναι είτε συγκολλημένο ή άνευ ραφής. Ωστόσο, κύρια απαίτηση και στις δύο μεθόδους, είναι το αρχικό ακατέργαστο υλικό του χάλυβα να υποστεί διάφορες κατεργασίες ώστε να μπορεί να είναι εύκολα μορφοποιήσιμο.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη χρήση σωλήνων από τον άνθρωπο, καταγράφεται ήδη από το 2000 π.Χ., όπου Κινέζοι αγρότες μετέφεραν το νερό στις επιθυμητές θέσεις, εκτρέποντάς το από τα ρυάκια και τα ποτάμια χρησιμοποιώντας καλάμια [1].

Οι πρώτες μέθοδοι για την παραγωγή σωλήνων από χάλυβα εισήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1800, και στη συνέχεια εξελίχθηκαν στις σύγχρονες μεθόδους. Ο William Murdock, το 1815, χρησιμοποίησε ένα δίκτυο αγωγών για τη συνεχή μεταφορά αερίου άνθρακα (coal gas) ώστε να ηλεκτροδοτήσει τους λαμπτήρες φωτισμού στο Λονδίνο. Αυτό το σύστημα φωτισμού αποδείχθηκε ιδιαίτερα επιτυχές και δημιούργησε την ανάγκη για την παραγωγή μακρικών μεταλλικών σωλήνων. Για το λόγο αυτό, ένα πλήθος επιστημόνων και εφευρετών εργάστηκε ώστε να αναπτύξει νέες μεθόδους παραγωγής σωλήνων. Μια από τις πρώτες αξιοσημείωτες μεθόδους παραγωγής μεταλλικών σωλήνων αναπτύχθηκε από τον James Russell το 1824 και μάλιστα που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα έλασμα σιδήρου κάμπτεται ώστε να ενωθούν οι δύο άκρες τους και στη συνέχεια συγκολλούνται μέσω μιας σφύρας ελευθέρως πτώσης (drop hammer). Να σημειωθεί ότι για πρώτη φορά το αρχικό υλικό θερμαίνεται ώστε να μπορεί να μορφοποιηθεί στη συνέχεια. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται ευρέως καθώς τον επόμενο χρόνο, ο Comenius Whitehouse αναπτύξε μια καλύτερη μέθοδο για την παραγωγή μεταλλικών σωλήνων. Σύμφωνα με τη μεθοδό του, τα ελάσματα χάλυβα

αφού θερμανθούν, διέρχονται από ένα άνοιγμα κωνικού σχήματος. Στην έξοδο της οπής, το μέταλλο έχει αποκτήσει κυρτό σχήμα και λαμβάνει το τελικό σχήμα του σωλήνα, συγκολλώντας τα άκρα του. Σταδιακά, πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις στη μέθοδο που ανέπτυξε ο Whitehouse [2]. Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες εισήχθη από τον John Moon το 1911, ο οποίος πρότεινε μια συνεχή μονάδα παραγωγής.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1800 παράγονται οι πρώτοι χαλυβδοσωλήνες χωρίς ραφή, δημιουργώντας μια οπή στο κέντρο ενός στερεού χαλύβδινου κυλίνδρου. Το τελικό προϊόν είναι ελαφρύ και χαρακτηρίζεται από λεπτά τοιχώματα. Το πρώτο εργοστάσιο για την παραγωγή σωλήνων χωρίς συγκόλληση χτίστηκε το 1895. Οι σωλήνες αυτοί χρησιμοποιούνται στην αυτοβιομηχανία και στους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου. Καθώς η εξόρυξη πετρελαίου γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, το αίτημα για παραγωγή χαλυβδοσωλήνων χωρίς ραφή γίνεται ακόμη μεγαλύτερο. Επειδή η δημιουργία οπής στο κέντρο του χαλύβδινου κυλίνδρου ήταν μια δύσκολη διαδικασία, το 1840 αναπτύσσεται μια διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται διάνοιξη μιας οπής στο εσωτερικό ενός στερεού μετάλλου, δημιουργώντας ένα ακατέργαστο τεμάχιο (billet), το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται και επιμηκύνεται δια μέσου μιας σειράς μητρών (dies) ώστε να σχηματιστεί ο σωλήνας. Αυτή η μέθοδος ήταν αναποτελεσματική επειδή ήταν η δημιουργία οπής στο κέντρο με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να μην έχει ομοιόμορφο πάχος. Το 1888, μια νέα μέθοδος αναπτύχθηκε κατά την οποία, το μέταλλο χυτεύεται σε ένα πυρίμαχο καλούπι που στο εσωτερικό του έχει ένα κυλινδρικό πυρήνα. Όταν το χυτό ψύχονταν, το καλούπι απομακρύνονταν αφήνοντας μια τρύπα στο εσωτερικό του.

Η κάμψη των σωλήνων αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο στη διαμόρφωση πολλών διαφορετικών τύπων των αγωγών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου, νερού. Αγωγοί πετρελαίου χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Πενσυλβάνια, όπου συνδέουν την πετρελαιοπηγή με ένα σιδηροδρομικό σταθμό. Αυτή είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται ένας αγωγός μήκους 6 μιλίων κατασκευασμένος από σίδηρο. Στη συνέχεια, βελτιώσεις στη διαδικασία της παραγωγής των σωλήνων αυτών, οδήγησαν στην ανάπτυξη των σύγχρονων αγωγών, οι οποίοι πλέον αποτελούνται από χάλυβα [3-4].

Το 1905 παράγονται στη Νέα Υόρκη οι πρώτοι χαλυβδοσωλήνες τύπου Lock-Bar. Οι πεπλατυσμένες άκρες των δύο ημι-κυλινδρικών τμημάτων του σωλήνα, ενώνονται μεταξύ

τους με μια διαμήκη ράβδο σχήματος Η. Σύμφωνα με δεδομένα που καταγράφονται από το 1915 έως το 1920, εγκαθίστανται 1000 Km σωλήνων τύπου Lock-Bar.

Η ανάπτυξη της αυτόματης ηλεκτροσυγκόλλησης (automatic electric welding) στις αρχές του 1920 και η μεγάλη πρόοδος που σημειώνεται κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1930, οδηγούν στη βελτίωση της παραγωγής χαλύβδινων σωλήνων. Από το 1920 έως το 1940 πάνω από 2000 Km συγκολλημένων χαλυβδοσωλήνων εγκαθίστανται. Μετά το τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, κατά το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1940, ξεκινά η παραγωγή σωλήνων χάλυβα ευθείας ραφής με συγκόλληση ηλεκτρικής αντίστασης και τήξης. Παράλληλα αυτοματοποιείται η παραγωγή χαλύβων ελικοειδούς ραφής. Κατά τη δεκαετία του 1950 αρχίζουν να παράγονται σωλήνες μεγαλύτεροι σε μήκος και σε όγκο. Συγχρόνως, παρατηρούνται βελτιώσεις και στο προστατευτικό στρώμα επικάλυψης, στις συνδέσεις και στην ποιότητα των χαλύβων.

Κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα, το αίτημα για πιο αποδοτική μεταφορά υγρών και αερίων καυσίμων γίνεται πιο επιτακτικό, ενώ παράλληλα αυξάνεται και η ζήτηση στην παραγωγή χαλυβδοσωλήνων. Επιπλέον, βελτιώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής τους, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται πιο ανθεκτικοί σωλήνες.

1.3 Κύρια χαρακτηριστικά των χαλυβδοσωλήνων

Οι κυριότερη απαίτηση των σωλήνων από χάλυβα είναι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπόγειους αγωγούς. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων υπόγειων σωλήνων που λειτουργούν υπό πίεση είναι τα ακόλουθα:

1.3.1 Αντοχή (Strength)

Το γεγονός ότι οι χάλυβες των σωλήνων δεν χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό βάρους, έχει ως αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή στο εσωτερικό τους όταν αυτοί λειτουργούν υπό πίεση ή όχι. Η ελάχιστη τιμή της αντοχής που περιγράφει τις περισσότερες από τις ποιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιούνται στους σωλήνες είναι 290 MPa. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμες και ποιότητες χάλυβα υψηλότερης αντοχής. Η τιμή της διαμήκουσ αντοχής (beam strength) του χαλυβδοσωλήνα είναι σημαντική παράμετρος όταν ο σωλήνας υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, μη ομοιόμορφη κάμψη ή είναι υπόγειος σε σαθρό υπόβαθρο (η διαμήκης εφελκυστική τάση σε ένα υπόγειο σωλήνα προκαλείται από οποιοδήποτε κάμψη, εσωτερική πίεση και μείωση της θερμοκρασίας. Η υψηλή τιμή της αντοχής του χάλυβα σε συνδυασμό με το

χαμηλό λόγο Poisson και τον συντελεστή θερμικής διαστολής / συστολής, οδηγούν σε ένα ανθεκτικό σωλήνα χάλυβα όταν επιδρούν διαμήκεις τάσεις.

1.3.2 Ευκολία εγκατάστασης (Ease of installation)

Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης των χαλυβδοσωλήνων, ο δακτύλιος του πρέπει να είναι άκαμπτος (stiff) ώστε να διατηρήσει το σχήμα του σχεδόν κυκλικό. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι 207 GPa. Τα υλικά με χαμηλότερη τιμή πρέπει να έχουν παχύτερα τοιχώματα ώστε να παρέχουν ισοδύναμη ακαμψία και για να αποφευχθεί η κατάρρευση.

1.3.3 Υψηλή ικανότητα ροής (High-flow capacity)

Η αντιτριβική ιδιότητα του χαλυβδοσωλήνα κατά τη ροή ενός υγρού ή αερίου στο εσωτερικό του είναι συγκριτικά χαμηλή. Τυπικές ταχύτητες ροής είναι μικρότερες από 4.6 mps. Γενικά, εάν θεωρήσουμε την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα μια περιοριστική παράμετρο, όσο πιο λεπτό είναι το τοίχωμα της, τόσο πιο μεγάλη είναι η εσωτερική διάμετρος και υψηλότερη η ικανότητα ροής (flow capacity).

1.3.4 Αντοχή σε συνθήκες διαρροής (Leak resistance)

Οι συγκολλητές αρθρώσεις του χαλυβδοσωλήνα χρειάζεται να είναι στεγανές και να είναι σχεδιασμένες ώστε να εκπληρώνουν τις απαιτήσεις των συνιστώμενων ορίων πίεσης και γωνίας μετατοπίσεως των παρακείμενων τμημάτων των σωλήνων.

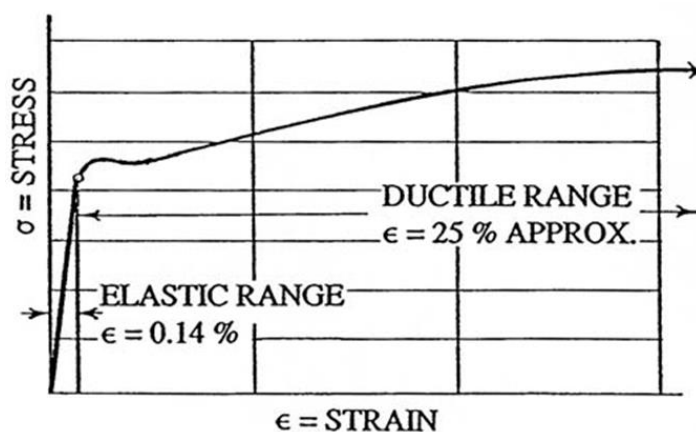
1.3.5 Μεγάλη διάρκεια ζωής (Long service life)

Η διάρκεια ζωής του σωλήνα εξαρτάται από τις συνθήκες διάβρωσης της εξωτερικής επιφάνειας του χάλυβα και από το ποσοστό της εσωτερικής τριβής. Αύξηση της διάρκειας ζωής μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλης προστατευτικής επικάλυψης και καθοδικής προστασίας.

Να σημειωθεί, ότι κατά το σχεδιασμό των χαλυβδοσωλήνων, δίνεται ένα περιθώριο ασφαλείας στη διάρκεια ζωής του, το οποίο επιτρέπει την αύξηση της ροής στο εσωτερικό τους σε μελλοντική χρήση, αρκεί οι εφαρμοζόμενες τάσεις να βρίσκονται εντός λογικών ορίων.

1.3.6 Αξιοπιστία και ευελιξία (Reliability and versatility)

Ο χάλυβας των σωλήνων είναι όλκιμος (ductile) και χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε θραύση (toughness) όταν υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση, συγκριτικά με ένα ψαθυρό υλικό. Στην εικόνα # παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ενός χάλυβα που χρησιμοποιείται σε αγωγούς. Το ποσοστό της παραμόρφωσης εντός της ελαστικής περιοχής είναι περίπου 0.14%, ενώ στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης είναι 25%. Παρατηρείται ένα υψηλό ποσοστό ολκιμότητας και όριο αντοχής σε εφελκυστική τάση (ultimate tensile stress). Η ολκιμότητα που χαρακτηρίζει το χάλυβα των σωλήνων δίνει την δυνατότητα υπολογισμού ενός περιθωρίου ασφαλείας στις ιδιότητες και τη διάρκεια ζωής του χάλυβα.



Εικόνα 1-1: Τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης χαλυβδοσωλήνα.

Η αξιοπιστία περιλαμβάνει την αδυναμία αστοχίας των σωλήνων σε απρόβλεπτες φορτίσεις ή μετατοπίσεις εξαιτίας μιας πιθανής αύξησης της πίεσης, δόνησης που προκλήθηκε από σεισμό και άλλα φυσικά αίτια. Η ευελιξία περιλαμβάνει τη δυνατότητα επιδιόρθωσης ή αντικατάστασης ενός τμήματος των χαλυβδοσωλήνων. Όταν απαιτούνται τέτοιες εξωτερικές παρεμβάσεις, ο σωλήνας μπορεί να κοπεί και να συγκολληθεί.

1.3.7 Οικονομία (Economy)

Το τελικό κόστος των χαλυβδοσωλήνων περιλαμβάνει τη σωλήνα, τη μεταφορά, την εγκατάσταση, τη συντήρηση, την επισκευή ή τροποποίηση της κατασκευής. Η μεταφορά τους είναι αποδοτική εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου τους, λόγω του λεπτού τοιχώματος, ενώ το χαμηλό βάρος τους κάνει εύκολη την τοποθέτησή τους. Όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος του κάθε τμήματος των σωλήνων, τόσο περισσότερο μειώνεται ο αριθμός των συγκολλήσεων που απαιτείται για την ένωση των τμημάτων αυτών. Σε περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαία η επιδιόρθωση ή αντικατάσταση ενός τμήματος της συνολικής

κατασκευής απαιτείται η επισκευή μόνο του συγκεκριμένου τμήματος. Αντίστοιχα, στην περίπτωση αστοχίας ή αποκόλλησης ενός τμήματος της κατασκευής, η συγκολλημένη περιοχή τείνει να τη συγκρατήσει, ελαχιστοποιώντας το ποσοστό της καταστροφής που προκλήθηκε.

1.4 Χάλυβες σωληνώσεων

Η American Petroleum Institute (API) στο πρότυπό της API 5L διαμορφώνει τις προδιαγραφές που χρειάζεται να πληρούν οι χαλυβδοσωλήνες και περιλαμβάνει διάφορες ποιότητες χάλυβα με ένα ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων και χημικής σύνθεσης. Ωστόσο, περιγράφουν γενικές απαιτήσεις δίνοντας τα ελάχιστα ή μέγιστα επιτρεπτά όρια. Στον πίνακα 1-1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι απαιτήσεις του προτύπου API 5L.

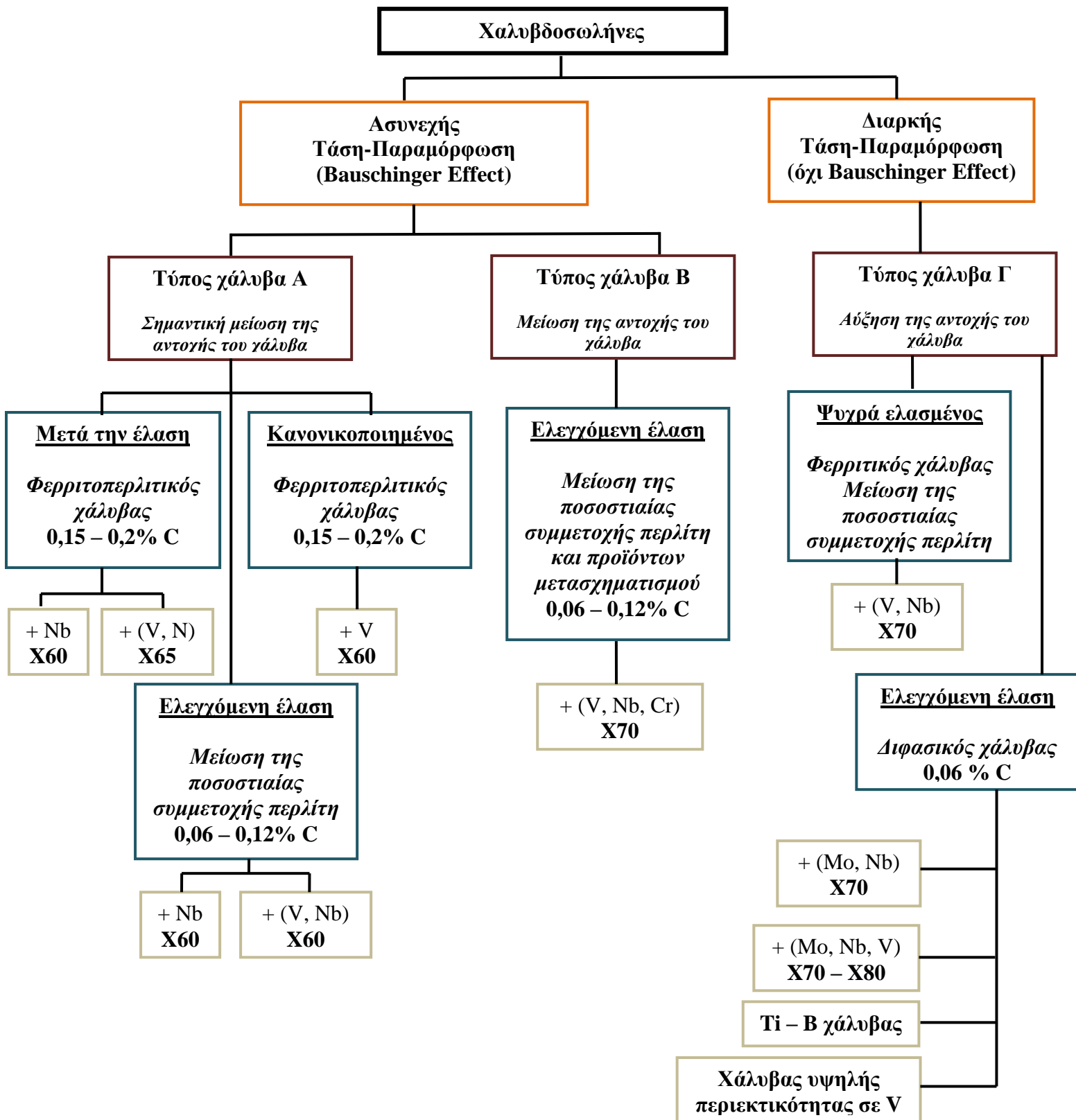
Πίνακας 1-1: Μηχανικές ιδιότητες από διάφορες ποιότητες χάλυβα σωληνώσεων.

| API 5L Grade | Chemical Composition % (max)* | | | | Yield Strength min. | | Tensile Strength min. | | Yield to Tensile Ratio (max.) | Elongation** min. % |
|--------------|-------------------------------|------|-------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|-------------------------------|---------------------|
| | C | Mn | S | P | (ksi) | (MPa) | (ksi) | (MPa) | | |
| A | 0.22 | 1.20 | 0.030 | 0.030 | 30 | | 48 | | 0.93 | 28 |
| B | 0.22 | 1.30 | 0.030 | 0.030 | 35 | | 60 | | 0.93 | 23 |
| X42 | 0.22 | 1.40 | 0.030 | 0.030 | 42 | | 60 | | 0.93 | 23 |
| X46 | 0.22 | 1.40 | 0.030 | 0.030 | 46 | | 63 | | 0.93 | 23 |
| X52 | 0.22 | 1.40 | 0.030 | 0.030 | 52 | | 66 | | 0.93 | 21 |
| X56 | 0.22 | 1.40 | 0.030 | 0.030 | 56 | | 71 | | 0.93 | 19 |
| X60 | 0.22 | 1.40 | 0.030 | 0.030 | 60 | | 75 | | 0.93 | 19 |
| X65 | 0.22 | 1.45 | 0.030 | 0.030 | 65 | | 77 | | 0.93 | 18 |
| X70 | 0.22 | 1.65 | 0.030 | 0.030 | 70 | | 82 | | 0.93 | 17 |
| X80 | 0.22 | 1.85 | 0.030 | 0.030 | 80 | | 90 | | 0.93 | 16 |

* Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κραματικά στοιχεία όπως νιόβιο, βανάδιο, τιτάνιο, ή συνδυασμός αυτών με αμοιβαία συμφωνία μεταξύ του πελάτη και κατασκευαστή.

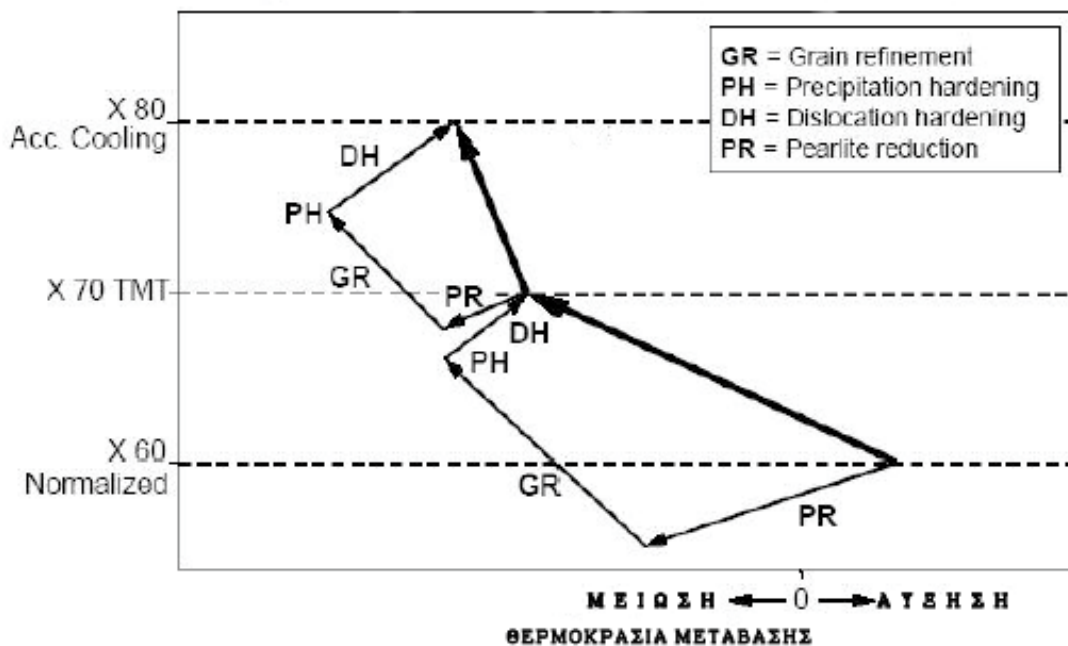
** Η επιμήκυνση υπολογίζεται από τον τύπο $e = [625,000A^{0.2} / U^{0.9}]$ όπου A είναι το εμβαδό της κάθετης διατομής του δείγματος και U η ελάχιστη τιμή της τάσης εφελκυσμού σε psi.

Σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των API χάλυβων υψηλής αντοχής (API high strength steel grades) προσδίδει η επιλογή κατάλληλης χημικής σύστασης και θερμομηχανικής διεργασίας (thermomechanical processing, TMP) που οδηγούν σε ομογενοποίηση της μικροδομής και δημιουργία των απαιτούμενων φάσεων και μικροδομικών συστατικών (εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-2: Ποιότητες χαλβδοσωλήνων.

Οι μηχανισμοί σκλήρωσης που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή διαφόρων ποιοτήτων χαλύβων σωληνώσεων παρουσιάζονται στην εικόνα 1-3.

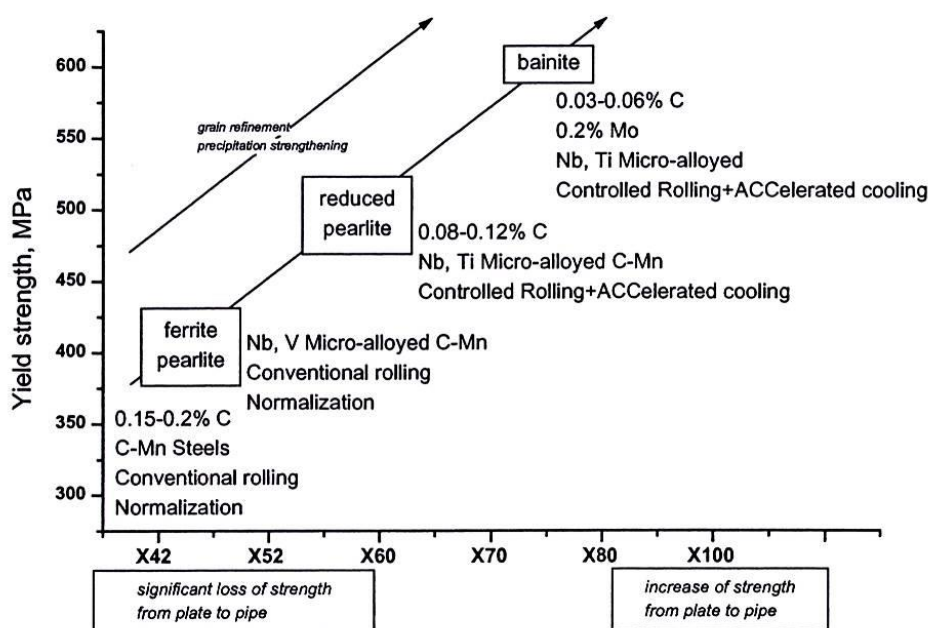


Εικόνα 1-3: Μικροδομικές αλλαγές για την σκλήρυνση και τη μεταβολή της δυσθραυστότητας σους χάλυβες σωληνώσεων.

Παρατηρείται αύξηση της αντοχής και της δυσθραυστότητας των χάλυβων με κωδικό ποιότητας από X60 και πάνω. Η παραγωγική διαδικασία του API 5L X70 χάλυβα, απαιτεί τη σημαντική μείωση του μεγέθους των κόκκων φερρίτη. Περαιτέρω μείωση του μεγέθους τους και της ποσοστιαίας συμμετοχής του περλίτη, σε συνδυασμό με τη σκλήρωση μέσω αύξησης των διαταραχών και κατακρημνίσεων οδηγεί στην παραγωγή χάλυβα X70 με βελτιωμένη συγκολλησιμότητα και σκληρότητα. Περαιτέρω αύξηση της μηχανικής αντοχής και δυσθραυστότητας πραγματοποιήθηκε οδήγησε στην παραγωγή του X80 χάλυβα μέσω μικροδομικών αλλαγών: από φερριτοπερλιτικούς κόκκους σε φερριτομπαϊνιτικούς κόκκους [12-15].

Στη δεκαετία του 80, διεργασίας όπως η θερμή έλαση (hot rolling) και η εξομάλυνση (normalizing) αντικαταστάθηκαν από κατάλληλες θερμομηχανικές διεργασίες, με σκοπό να επιτρέψουν την παραγωγή ποιότητων χάλυβα από X70 και πάνω από μικροκραμάτωμένους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (microalloyed low carbon steel). Μια τυπική θερμομηχανική διεργασία ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο πραγματοποιείται ελεγχόμενη έλαση (controlled rolling process) όπου οι κόκκοι του ωστενίτη παραμορφώνονται ισχυρά στην περιοχή μη-ανακρυστάλλωσης (nonrecrystallization), οδηγώντας στην εκλέπτυνση (refinement) της τελικής μικροδομής. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται ελεγχόμενη επιταχυνόμενη απόψυξη (accelerated

controlled cooling, ACC), με σκοπό την αύξηση του ρυθμού πυρήνωσης των φερριτικών κόκκων (παρεμποδίζοντας ωστόσο το σχηματισμό πολυγωνικού φερρίτη) και τον σχηματισμό επιθυμητών προϊόντων μετασχηματισμού, όπως ο βελονοειδής φερρίτης (acicular ferrite) και ο μπαινίτης (bainite). Συνεπώς, μέσω της εφαρμογής κατάλληλης θερμομηχανικής διεργασίας, έχει καταστεί δυνατή η παραγωγή χαλύβων υψηλής αντοχής, με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ώστε να παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά κατά τη συγκόλληση (εικόνα 1-4).



Εικόνα 1-4: Χάλυβες σωληνώσεων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

1.5 Χαλυβδοσωλήνες της ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε.

1.5.1 Ιδιότητες χαλύβων

Ελάσματα χάλυβα σε μορφή ρολών (τσέρκια) αποτελούν την πρώτη ύλη για την κατασκευή σωλήνων στη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε. Οι οδηγίες που χρησιμοποιούνται στα ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. βασίζονται στα πρότυπα API Recommended Practice 5L3 και EN 10274. Για την επίτευξη των απαιτούμενων αντοχών στις δοκιμές που πραγματοποιούνται στην εταιρεία, ο χρησιμοποιούμενος χάλυβας πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Υψηλή καθαρότητα. Εγκλείσματα και ακαθαρσίες τα οποία προέρχονται από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα μειώνουν την απορροφούμενη ενέργεια στη

δοκιμή δυσθραυστότητας (Charpy test) και δημιουργούν πόρους έγκλισης αέριου υδρογόνου.

- Τα ελάσματα του χάλυβα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ομοιομορφία των κόκκων και ομοιογένεια χωρίς μεγάλες διαφορές στη σκληρότητα. Σωστή επιλογή της σύστασης του χάλυβα και προσεκτικός έλεγχος της διαδικασίας χύτευσης οδηγούν στην εξάλειψη του φαινομένου των κατακρημνισμάτων στο κέντρο του ελάσματος. Η ομοιομορφία της δομής επιτυγχάνεται από τον προσεκτικό έλεγχο της διαδικασίας της έλασης και των επιβαλλόμενων θερμοκρασιών.

1.5.2 Τρόποι παραγωγής

1.5.2.1 Μονάδα Ευθείας Ραφής, 26’’

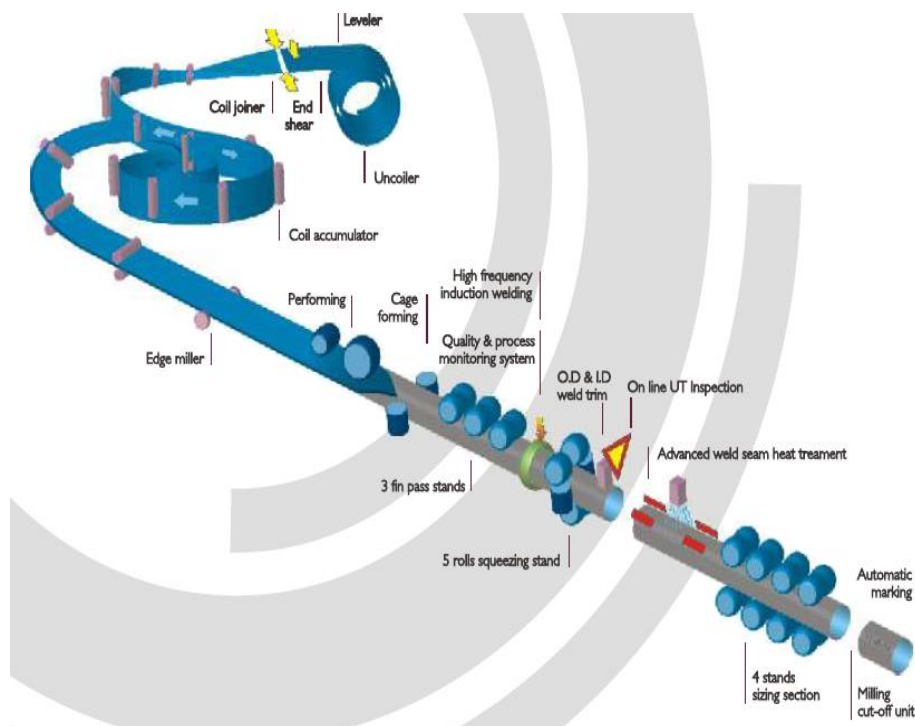
Ο σωλήνας υψίσυχνης συγκόλλησης HFI (High Frequency welding) κατασκευάζεται ελάσμα σε σχήμα ρολού (τσέρκι). Αφού εκτυλιχθεί, το επίπεδο έλασμα ξακρίζεται σε σταθερό πλάτος από μία μηχανή φρεζαρίσματος άκρων. Κατόπιν το έλασμα λαμβάνει σταδιακά στρογγυλό σχήμα από ράουλα διαμόρφωσης, τα οποία καταλήγουν πριν από τη συγκόλληση στην τελική διάμετρο του σωλήνα. Στο τελικό βήμα της από διαμόρφωσης οι άκρες του ελάσματος συγκλίνουν προς το σημείο συγκόλλησης.

Η διαδικασία υψίσυχνης συγκόλλησης χρησιμοποιεί πίεση και θερμότητα προκειμένου να ενώσει τις άκρες του ελάσματος που σχηματίζουν ανοικτή ραφή, χωρίς την προσθήκη μετάλλου πλήρωσης. Καθώς πλησιάζουν οι άκρες του ελάσματος σε σχήμα V, παρέχεται γύρω από τον σωλήνα ρεύμα υψηλής συχνότητας από ένα επαγωγικό πηνίο. Το ρεύμα συγκεντρώνεται κατά μήκος των άκρων του V θερμαίνοντάς το μέσω ηλεκτρικής αντίστασης, ώστε να σχηματιστεί η συγκόλληση καθώς οι κύλινδροι συμπίεσης κλείνουν τον σωλήνα. Τα εξωτερικά και εσωτερικά καπάκια τήγματος συγκόλλησης -που σχηματίζονται λόγω πίεσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης- αφαιρούνται ενώ το υλικό είναι ακόμη ζεστό. Μια συσκευή συνεχούς ελέγχου με υπέρηχους, τοποθετημένη ακριβώς μετά το σημείο συγκόλλησης, ελέγχει συνεχώς την ποιότητα της συγκόλλησης.

Η υψίσυχνη συγκόλληση υποβάλλεται στην συνέχεια σε θερμική κατεργασία προκειμένου να επαναφερθεί η δομή του χάλυβα στη ζώνη αυτή. Η γραμμή θερμικής κατεργασίας αποτελείται από δύο στάδια επαγωγικής θέρμανσης, με ένα ενδιάμεσο στάδιο ψύξης με νερό.

Η ακριβής εξωτερική διάμετρος δίνεται στον σωλήνα με την τελική ψυχρή διαμόρφωση. Η ίδια γραμμή διαμόρφωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή

τετράγωνων ή ορθογώνιων κοίλων δοκών με ψυχρή κατεργασία. Ο σωλήνας κόβεται τελικά στο καθορισμένο μήκος από ένα κινητό μηχάνημα κοπής.



Εικόνα 1-5: Μονάδα ευθείας ραφής.

Μετά τη διαμόρφωση των άκρων, ο σωλήνας προωθείται στη γραμμή επιθεώρησης. Κάθε σωλήνας ελέγχεται υδροστατικά σύμφωνα με τα εφαρμοζόμενα πρότυπα και στη συνέχεια υποβάλλεται σε μη καταστροφικό έλεγχο με υπέρηχους της συγκόλλησης και του σώματος του. Στο τελικό στάδιο, όλοι οι σωλήνες επιθεωρούνται για έλεγχο συμμόρφωσής τους με τις εκάστοτε διαστασιακές απαιτήσεις, ενώ επίσης διενεργείται οπτικός έλεγχος της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας κάθε σωλήνα.

Η διαδικασία παραγωγής και επιθεώρησης παρακολουθείται πλήρως από υπολογιστικό σύστημα περισυλλογής ποιοτικών δεδομένων, με τερματικά εισόδου κατά μήκος όλης της γραμμής. Κανένας σωλήνας δεν γίνεται αποδεκτός αν δεν διασταυρωθεί η συμμόρφωση όλων των δεδομένων που σχετίζονται με την παραγωγή και την ποιότητα με τις εφαρμοζόμενες προδιαγραφές.

Οι σωλήνες υψίσυχνης συγκόλλησης συχνότητας (HFI) έχουν επιτυχή παρουσία, εδώ και πολλά χρόνια, σε απαιτητικές εφαρμογές της ενεργειακής βιομηχανίας. Ορισμένα από τα οφέλη που προέρχονται από την επιλογή των σωλήνων HFI είναι:

- **Αξιόπιστη προμήθεια:** Η υψηλή παραγωγικότητα της διαδικασίας HFI εξασφαλίζει αξιοπιστία και ευελιξία στους χρόνους παράδοσης.
- **Ποιότητα συγκόλλησης:** Ο τελευταίος τεχνολογίας εξοπλισμός παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου εξασφαλίζει συγκολλήσεις με ιδιότητες που ικανοποιούν και τα πιο απαιτητικά πρότυπα ποιότητας.
- **Ομοιομορφία πάχους:** Η χρήση χάλυβα θερμής έλασης διασφαλίζει μικρές ανοχές πάχους τοιχώματος για όλη την περιφέρεια του σωλήνα.
- **Γρήγορη εργοταξιακή κατασκευή:** Η συμμόρφωση των σωλήνων με τις αυστηρότερες ανοχές διαστάσεων διασφαλίζει ευκολία στο ταίριασμα των άκρων και βέλτιστη on-site συγκολλησιμότητα.

1.5.2.2 Μονάδα Ελικοειδούς Ραφής, 100’’

Η διαδικασία δύο βημάτων για την κατασκευή σωλήνα ελικοειδούς ραφής βυθισμένου τόξου (SAWH) αποτελείται από δύο ξεχωριστές εργασίες: διαμόρφωση σωλήνα/συνεχής προ-συγκόλληση (tack welding) και διπλή συγκόλληση εμβαπτιζόμενου τόξου. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται χαλύβδινο έλασμα θερμής έλασης διαμορφωμένο σε ρολά. Αφού εκτυλιχθεί, το χαλύβδινο έλασμα φρεζάρεται στο επιθυμητό πλάτος και οι άκρες μορφοποιούνται σε διπλό V, για να δώσουν τις συγκολλήσιμες άκρες. Πριν από την εισαγωγή του στον κλωβό διαμόρφωσης, τα άκρα του ελάσματος κάμπτονται ελαφρά στη μηχανή προ-διαμόρφωσης.

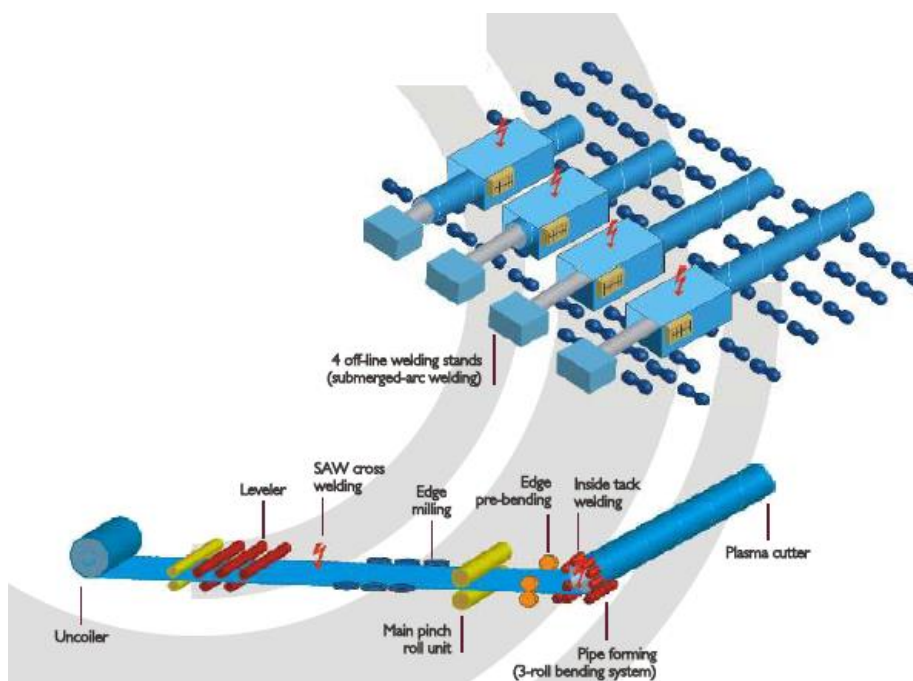
Η διαμόρφωση του σωλήνα γίνεται από σύστημα κάμψης τριών σημείων (three-roll bending). Η διάμετρος του παραγόμενου σωλήνα εξαρτάται από τη γωνία ελίκωσης. Οι συγκλίνουσες άκρες του ελάσματος ενώνονται με μια συνεχή προ-συγκόλληση (Tack-welding) υπό ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου (Gas Metal Arc Weld). Οι παράμετροι διαμόρφωσης και συγκόλλησης παρακολουθούνται συνεχώς από συστήματα ελεγχόμενα με υπολογιστή, ενώ η κεφαλή της συγκόλλησης καθοδηγείται από σύστημα ανίχνευσης με λέιζερ. Στη συνέχεια μια κινητή διάταξη κοπής με πλάσμα κόβει το σωλήνα στο επιθυμητό μήκος.

Κατόπιν ο ήδη διαμορφωμένος σωλήνας προωθείται στο δεύτερο κατασκευαστικό βήμα, στη διπλή συγκόλληση βυθισμένου τόξου (DSAW). Στο βήμα αυτό ο σωλήνας συγκολλάται εξωτερικά και εσωτερικά με εμβαπτιζόμενο τόξο (SAW), τήκοντας την αρχική προ-συγκόλληση (Tack weld), έτσι ώστε αυτή να ενσωματωθεί στην τελική συγκόλληση. Σε ένα προγενέστερο στάδιο, στο κάθε άκρο του σωλήνα προσαρτώνται

πλάκες έναρξης - τέλους της συγκόλλησης για τη διασφάλιση της σταθεροποίησης των παραμέτρων συγκόλλησης, οι οποίες συνεχώς παρακολουθούνται, ελέγχονται και καταγράφονται αυτόματα καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η πλήρης ευθυγράμμιση της εσωτερικής και εξωτερικής συγκόλλησης διασφαλίζεται από αντίστοιχα συστήματα ανίχνευσης με λέιζερ.

Αφού συγκολληθεί, ο σωλήνας προωθείται στους σταθμούς ελέγχου. Ο κάθε σωλήνας δοκιμάζεται υδροστατικά σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα και στη συνέχεια υποβάλλεται σε Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο με υπερήχους επί της ραφής συγκόλλησης και επί του σώματος του σωλήνα. Επιπλέον διενεργείται ραδιογραφικός έλεγχος της συγκόλλησης σε κάθε άκρο του σωλήνα καθώς και σε τυχόν σημεία που επιδιορθώθηκαν με συγκόλληση. Αφού προετοιμασθούν τα άκρα του σωλήνα, όλοι οι σωλήνες υποβάλλονται σε τελικό έλεγχο, για να εξακριβωθεί η συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις των διαστάσεων και διενεργείται οπτικός έλεγχος των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών.

Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής και ελέγχων παρακολουθείται από ένα κεντρικό σύστημα συγκέντρωσης δεδομένων το οποίο αποτελείται από τερματικούς σταθμούς (υπολογιστές) σε κάθε σταθμό εργασίας. Η τελική αποδέσμευση κάθε σωλήνα πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που όλα τα δεδομένα κατά την παραγωγική διαδικασία και τους ελέγχους ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμοζόμενων προδιαγραφών.



Εικόνα 1-6: Μονάδα ελικοειδούς ραφής.

Οι σωλήνες με ελικοειδή συγκόλληση εμβαπτιζόμενου τόξου (SAWH, Hellical Submerged Arc Welded) έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως στην ενεργειακή βιομηχανία με επιτυχία, εδώ και πολλά χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, οι σωλήνες SSAW που κατασκευάζονται με τη μέθοδο "Two - Step" κερδίζουν διαρκώς μερίδιο αγοράς, από ότι οι εναλλακτικές τεχνολογίες (σωλήνες UOE, σωλήνες on-line SAW) κυρίως εξαιτίας των προηγμένων τεχνικών χαρακτηριστικών τους:

- **Ευελξία:** Η διάμετρος του παραγόμενου σωλήνα μπορεί να μεταβληθεί εύκολα προσαρμόζοντας ανάλογα τη γωνία ελίκωσης του ελάσματος. Αυτό δεν εξασφαλίζει μόνο οφέλη σε σχέση με την έγκαιρη παράδοση εντός στενών χρονικών πλαισίων, αλλά και επιτρέπει την παραγωγή σωλήνων μη τυποποιημένης διαμέτρου.
- **Χαμηλό κόστος εγκατάστασης αγωγού:** Παράγονται σωλήνες μήκους έως και 18 m, γεγονός που οδηγεί σε επωφελή μείωση του αριθμού των περιφερειακών συγκολλήσεων που απαιτούνται για την κατασκευή του αγωγού.
- **Χαμηλότερο κόστος παραγωγής:** Το χαμηλότερο κόστος προκύπτει από το μειωμένο κόστος Α' ύλης (HRC έναντι plate), το χαμηλότερο κόστος παραγωγής και τις μικρότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες.
- **Υψηλότερη παραγωγικότητα:** Ο μεγαλύτερος ρυθμός παραγωγής της διαδικασίας "Two - Step" εξασφαλίζει άμεση παράδοση προϊόντων εντός στενών χρονικών πλαισίων.
- **Διαστασιολογικά χαρακτηριστικά και ποιότητα συγκόλλησης ανώτερου επιπέδου:** Τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά βελτιστοποιούνται κατά το στάδιο της διαμόρφωση του σωλήνα, ενώ στο επόμενο στάδιο της συγκόλλησης του σωλήνα βελτιστοποιούνται οι παράμετροι της συγκόλλησης, χωρίς το ένα στάδιο να επηρεάζει το άλλο αρνητικά.

1.5.3 Θερμικές κατεργασίες χαλύβων στη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε.

Οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων έχουν σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, μέσω της επέμβασης στην κρυσταλλική δομή. Ειδικά στους χαλυβδοσωλήνες μεταφοράς υγρών και αερίων, η θερμική κατεργασία του σωλήνα έχει σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, δηλαδή της αντοχής τόσο ολόκληρου του σωλήνα όσο και της συγκόλλησης.

Οι βασικές μέθοδοι θερμικής κατεργασίας του χάλυβα είναι η εξομάλυνση (normalizing), η ανόπτηση (annealing), η επαναφορά (tempering) και η βαφή (quenching). Η διαφορά των παραπάνω θερμικών κατεργασιών είναι: διαφορετικές θερμοκρασίες και διαφορετικοί ρυθμοί απόψυξης. Συνήθως οι χαλυβδοσωλήνες παράγονται με εξομάλυνση (normalizing) στη ΣΩΝΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε.

Όταν ο χάλυβας υποστεί θερμική κατεργασία, όπως και η ψυχρή σωληνοποίηση, γίνεται σκληρότερος πιο εύθραυστος και στο εσωτερικό του περιοχές με συγκέντρωση τάσεων. Έτσι, χρειάζεται να αποκτήσει κάποιες από τις χαμένες ιδιότητές του. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξομάλυνση. Η επιπλέον θερμική κατεργασία, που αποτελεί βασική προϋπόθεση της θερμής έλασης, κάνει το χαλυβδοσωλήνα μηχανικά μαλακότερο, ομοιογενή και λεπτόκοκκο. Παράλληλα αφαιρεί τις εσωτερικές τάσεις του σωλήνα, βελτιώνει την κατεργασιμότητά του, του προσδίδει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και επιμήκυνση θραύσης και τέλος εξομαλύνει την κρυσταλλική δομή στις γειτνιάζουσες περιοχές της συγκόλλησης (Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη, ΘΕΖ).

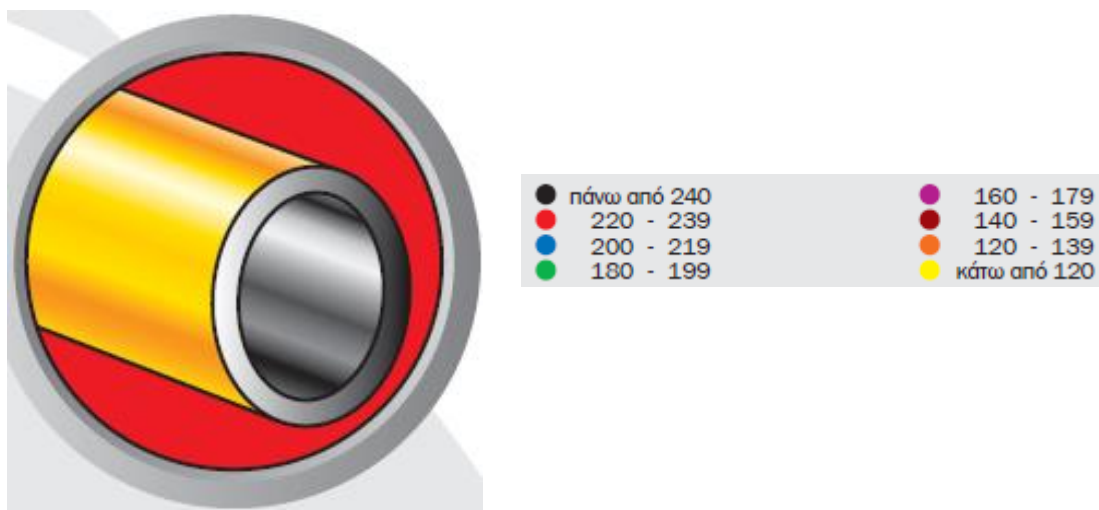
Έτσι προκύπτουν δύο τύποι χαλυβδοσωλήνων: (1) Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και (2) Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση.

1.5.3.1 Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση

Παρουσιάζουν ενιαία κρυσταλλική δομή (εικόνα 1-7) και σκληρότητα (hardness) (εικόνα 1-8), που εξασφαλίζεται με την ολική εξομάλυνση στην παραγωγή του σωλήνα σε 850 °C – 1100 °C.

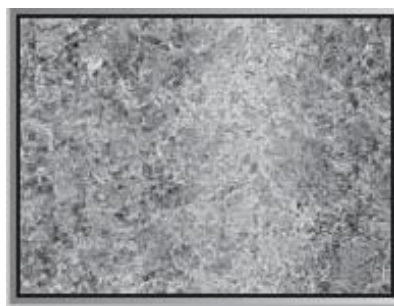


Εικόνα 1-7: Θερμή έλαση σωλήνα με ολική εξομάλυνση στους 850 °C – 1100 °C.



Εικόνα 1-8: Vickers tests σκληρότητας HV 1 kg και ο χρωματικός κώδικας της σκληρότητας σε κλίμακα των 20 HV.

Κατά τη φάση της συγκόλλησης των χαλυβδοσωλήνων με υψηλά ρεύματα (400 KHz – High Frequency Electric Resistance Welding, HF- ERW), δεν παρουσιάζεται μικροδομική και μορφολογική διαφοροποίηση στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Η ΘΕΖ αποτελεί ένα από το πλέον κρίσιμο σημείο του συγκολλητού σωλήνα. Με θερμή έλαση στους 850 °C – 1100 °C η συγκόλληση ομαλοποιείται (εικόνα 1-9) και ισχυροποιείται (στη μεταφορά καυσίμων αερίων ή υγρών, η ισχυρή συγκόλληση είναι η υπ' αριθμόν ένα προϋπόθεση ασφαλείας).



Εικόνα 1-9: Μακροσκοπική απεικόνιση της ΘΕΖ ενός συγκολλημένου χαλυβδοσωλήνα με HF – ERW. Ο χάλυβας έχει υποστεί θερμή έλαση με πλήρη εξομάλυνση.

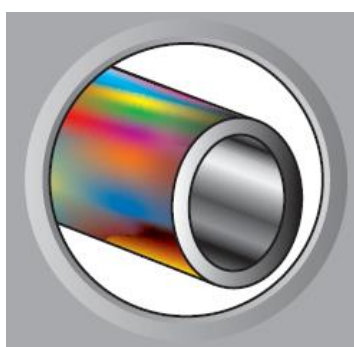
Η εξομάλυνση της κρυσταλλικής δομής του σωλήνα, που είναι ενιαία τόσο στην περιοχή της συγκόλλησης όσο και στον υπόλοιπο σωλήνα αποτρέπει τη θραύση του. Η ιδιότητά του αυτή είναι σημαντική για την ασφάλεια των θερμοϋδραυλικών δικτύων πυρόσβεσης και ειδικά των σωληνώσεων Φυσικού Αερίου καθώς ο χάλυβας αναπτύσσει αντοχή σε θερμικά φορτία και πυραντίσταση.

1.5.3.2 Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση

Παρουσιάζουν μη ενιαία κρυσταλλική δομή (εικόνα 1-10) και σκληρότητα (hardness) (εικόνα1-11), με διαφοροποιήσεις στις περιοχές της συγκόλλησης και της καμπύλωσης του σωλήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες του σωλήνα μην είναι σταθερές και να εμφανίζουν διακυμάνσεις κατά μήκος του σωλήνα. Η υπερθέρμανση (π.χ. λόγω πυρκαγιάς) μειώνεται η αντοχή του σωλήνα.



Εικόνα 1-10: Ψυχρή σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση.

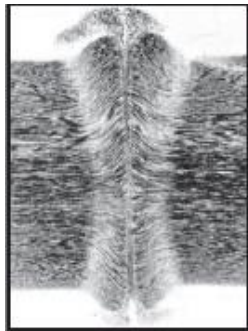


| | |
|----------------|----------------|
| ● πάνω από 240 | ● 160 - 179 |
| ● 220 - 239 | ● 140 - 159 |
| ● 200 - 219 | ● 120 - 139 |
| ● 180 - 199 | ● κάτω από 120 |

Εικόνα 1-11: Vickers tests σκληρότητας HV 1 kg και ο χρωματικός κώδικας της σκληρότητας σε κλίμακα των 20 HV.

Μετά τη συγκόλληση του σωλήνα με τα υψηλά ρεύματα (400 KHz –HF- ERW), παρουσιάζεται μικροδομική και μορφολογική διαφοροποίηση στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής της κρυσταλλικής δομής στη ΘΕΖ, η συγκόλληση του σωλήνα εμφανίζει αδύναμα σημεία. Παρατηρείται επίσης, παραμόρφωση του χάλυβα (material fibres deformation) λόγω της πίεσης που ασκείται στα προς συγκόλληση άκρα της χαλυβδοταινίας. Κατά την παρατήρηση της ΘΕΖ στο οπτικό μικροσκόπιο (εικόνα 1-12), η ζώνη αυτή εμφανίζει πάντοτε πιο σκουρόχρομη αντίθεση πεδίου σε σχέση με το μητρικό χάλυβα λόγω της διάχυσης του άνθρακα προς τα άκρα της συγκόλλησης. Στη μέση περίπτωση εμφανίζεται μια λευκή γραμμή λόγω της οξείδωσης του άνθρακα σε CO και CO₂. Γίνεται αντιληπτό ότι η ψυχρή σωληνοποίηση ενέχει τον κίνδυνο αστοχίας της συγκόλλησης του σωλήνα, λόγω της παραμόρφωσης που εμφανίζει η

κρυσταλλική δομή μετά τη συγκόλληση. Για τη μεταφορά καυσίμων, για παράδειγμα, ο ψυχρός σωλήνας μειονεκτεί σημαντικά σε ασφάλεια, από το θερμό σωλήνα.



Εικόνα 1-12: Μακροσκοπική απεικόνιση της ΘΕΖ ενός συγκολλημένου χαλυβδосωλήνα με HF – ERW. Ο χάλυβας έχει υποστεί ψυχρή σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση.

Η ανομοιογενής κρυσταλλική δομή μεταξύ της περιοχής της συγκόλλησης και του υπόλοιπου σωλήνα, έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του σωλήνα υπό συνθήκες υψηλού θερμικού φοτίου. Στα δίκτυα υψηλής ασφάλειας, όπως του Φυσικού Αερίου, η παραπάνω αδυναμία χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη.

1.5.4 Μορφολογία της συγκόλλησης High Frequency Electric Resistance Welding HF – ERW

Η συγκόλληση με υψίσυχνα ρεύματα (400 KHz) είναι η πλέον σύγχρονη και αποτελεσματική μέθοδος παραγωγής συγκολλητών χαλύβων.

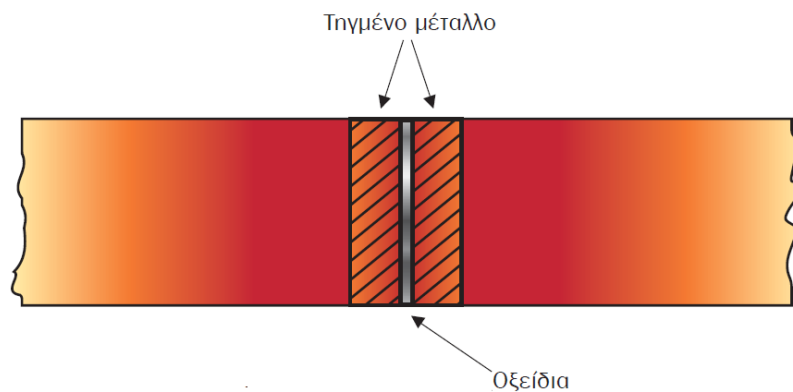
Η τεχνολογία είναι κοινή για την παραγωγή σωλήνων θερμής έλασης και ψυχρής σωλήνωσης. Ωστόσο η μορφολογία της HF- ERW, δημιουργεί τέτοιες συνθήκες, ώστε περαιτέρω επεξεργασίες να οδηγούν σε ποιοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ του σωλήνα θερμής έλασης με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης και του σωλήνα ψυχρής σωληνοποίησης χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης.



Εικόνα 1-13: Συγκόλληση HF – ERW.

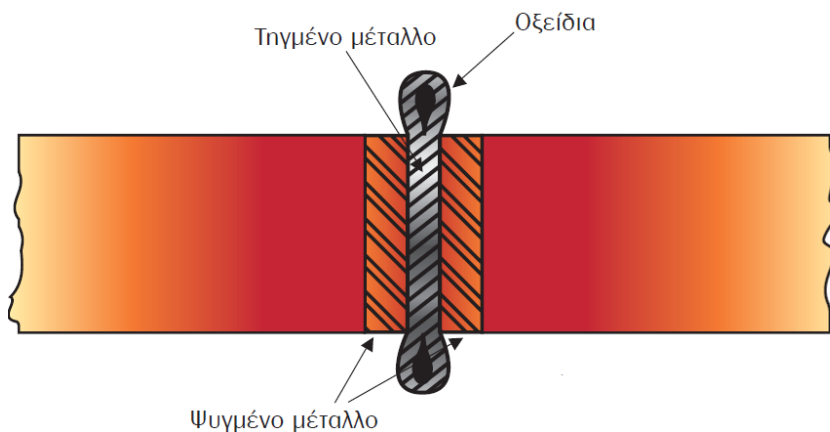
Η διαδικασία HF –ERW συνίσταται στην τήξη των άκρων της χαλυβδοταινίας με ταυτόχρονη συμπίεσή τους, ώστε να δημιουργηθεί αυτογενής συγκόλληση. Η δημιουργία ένωσης μετάλλου με μέταλλο απαιτεί πλήρη επαφή σε όλο το μήκος των προς συγκόλληση άκρων της χαλυβδοταινίας και τον αποκλεισμό κάθε ξένου στοιχείου. Η διαδικασία συγκόλλησης συνίσταται πρώτα στη θέρμανση των άκρων και στη συνέχεια στη μηχανική συμπίεση και ένωση των άκρων. Η μηχανική συμπίεση του τηγμένου μετάλλου παρουσιάζει τις εξής τρεις φάσεις:

- I. Στη φάση 1 έχουμε το τηγμένο μέταλλο στα προς συγκόλληση άκρα (εικόνα 1-14).



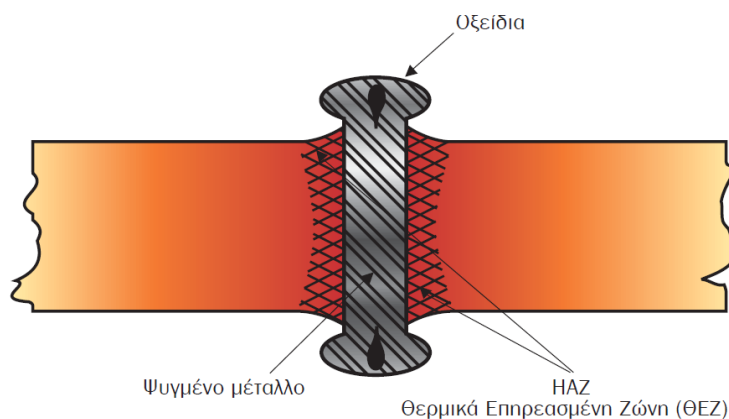
Εικόνα 1-14: Φάση 1 συγκόλλησης HF -ERW.

- II. Στη φάση 2 έχουμε την έναρξη της ψύξης και στερεοποίησης του μετάλλου στα ενοποιημένα άκρα της χαλυβδοταινίας, ενώ λόγω της συμπίεσης το εναπομένον τηγμένο μέταλλο διαρέει προς και έξω από τη συγκόλληση (εικόνα 1-15).



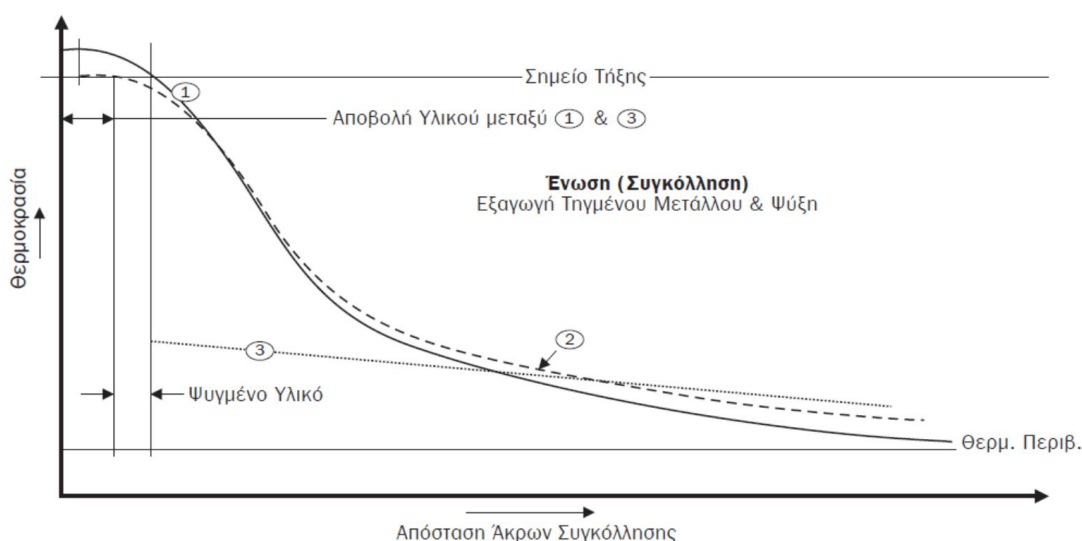
Εικόνα 1-15: Φάση 2 συγκόλλησης HF -ERW.

- III. Στη φάση 3 η συγκόλληση έχει περατωθεί και τα στερεοποιημένα υπολείμματα μετάλλου-οξειδίου αποτελούν την κρέμαση της αυτογενούς συγκόλλησης (γρέζι) (εικόνα 1-16).



Εικόνα 1-16: Φάση 3 συγκόλλησης HF -ERW.

Στην εικόνα 1-17 παρουσιάζονται οι τρεις φάσεις της συγκόλλησης HF – EWR.



Εικόνα 1-17: Τρεις φάσεις της συγκόλλησης HF -ERW.

Έτσι προκύπτουν δύο τύποι χαλυβδοσωλήνων: (1) Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης και (2) Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης.

1.5.4.1 Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης

Οι χαλυβδοσωλήνες με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης (εικόνα 1-18) παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υψηλό δείκτη ασφάλειας, λόγω της υψηλής αντοχής στη διάβρωση.
- Ισχυρή συγκόλληση, λόγω εξομάλυνσης της κρυσταλλικής δομής.

- Καθαρή συγκόλληση, λόγω της αφαίρεσης της εσωτερικής κρέμασης που περιέχει εγκλήσματα (ακαθαρσίες) οξειδίων.
- Ομαλή ροή υγρών αερίων.
- Ελαχιστοποίηση της τυρβώδους ροής.



Εικόνα 1-18: Χαλυβδοσωλήνες θερμής έλασης με ολική εξομάλυνση και με αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης.

1.5.4.2 Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης

Οι χαλυβδοσωλήνες χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης (εικόνα 1-19) παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η κρέμαση περιέχει διαβρωτικά οξείδια, χημικές προσμίξεις θείου, μαγγανίου, φωσφόρου, άνθρακα, μολυβδαινίου ως μη μεταλλικές ακαθαρσίες, που στο σύνολό τους δρουν σαν περιοχές διάβρωσης
- Παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης ρωγμής υδρογόνου (Hydrogen Pressure Induced Cracking, - HPIC), ειδικότερα σε όξινο περιβάλλον.
- Μέσα στη κρέμαση υπάρχουν ρωγμές, στις άκρες των οποίων δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων. Οι ρωγμές αυτές έχουν διεύθυνση κάθετη στο τοίχωμα του σωλήνα διότι δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση και την αποβολή οξειδίων. Σε δυναμικές συνθήκες μεταβολών (αυξομειώσεις θερμοκρασίας, δονήσεις κτλ), οι ρωγμές αυτές μπορούν να διαδοθούν στο σωλήνα και ειδικά στην περιοχή της συγκόλλησης.
- Η ρηγμάτωση εμφανίζεται συνήθως σε περιοχές με τοπική συγκέντρωση τάσεων.
- Η κρέμαση αυξάνει την τυρβώδη ροή, η οποία προκαλεί σπηλαιώσεις στα τοιχώματα γύρω του, αυξάνοντας δραματικά το ρυθμό διάβρωσης των σωλήνων (εικόνα 1-20).



Εικόνα 1-19: Χαλυβδοσωλήνες ψυχρής σωληνοποίηση χωρίς εξομάλυνση και χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης.



Εικόνα 1-20: Ο χαλυβδοσωλήνας χωρίς αφαίρεση της εσωτερικής κρέμασης της συγκόλλησης δημιουργεί προϋποθέσεις για επικαθίσεις των ορυκτών αλάτων του νερού (νιτρικά, θειούχα φωσφορικά, χλωρικά άλατα και ιόντα νατρίου).

1.5.5 Προετοιμασία δοκιμών για μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων

Μετά την παραγωγή των χαλυβδοσωλήνων ευθείας και ελικοειδούς ραφής, τμήμα από την στεφάνη του σωλήνα απομακρύνεται με στόχο την περαιτέρω εξέταση του δείγματος με καταστροφικές μεθόδους με σκοπό τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Για το λόγω αυτό στην περίμετρο του κάθε σωλήνα επισημαίνονται τα σημεία από τα οποία θα κοπούν τα προς μελέτη δείγματα (εικόνα 1-21).



Εικόνα 1-21: Μαρκάρισμα στην επιφάνεια των χαλυβδοσωλήνων των σημείων από τα οποία θα κοπούν δείγματα για να μελετηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες.

Στη συνέχεια τα δείγματα υπόκεινται σε δοκιμές εφελκυσμού, μικροσκληρομέτρησης και drop weight tear test, σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις του πελάτη, ώστε να επιβεβαιωθεί η συμφωνία των μετρούμενων τιμών με τις προδιαγραφές και να διαπιστωθεί η καταλληλότητα των χαλυβδοσωλήνων που παρείχθησαν για την εκάστοτε εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας συγκόλλησης δοκιμών που προέρχονται εξ ολοκλήρου από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε.. Στο σύνολό τους παρελήφθησαν πέντε συγκολλημένα δοκίμια από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α. Ε..

Σε ό,τι αφορά τα υπό εξέταση δείγματα (εικόνα 1) αποτελούσαν τμήμα χαλυβδοσωλήνων ευθείας ραφής συγκολλημένα με τη μέθοδο HF –EFW. Ωστόσο καμία άλλη πληροφορία που να αφορά την ποιότητα του χάλυβα (χημική σύσταση) που χρησιμοποιήθηκε, τις προδιαγραφές της συγκόλλησης, τον τρόπο παραγωγής τους, τη μετά τη συγκόλληση θερμική κατεργασία στην οποία υποβλήθηκαν, δεν ήταν γνωστή.

2.2 Μεθοδολογία

Για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας συγκόλλησης των δειγμάτων, με μη-καταστροφικό έλεγχο (Non-Destructive Evaluation, NDE), χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

1. Μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (Magnetic Barkhausen Noise, MBN) και
2. Απεικόνιση των βρόχων υστέρησης (B-H loops)

Με τη χρήση της μεθόδου του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, πραγματοποιήθηκαν τόσο γραμμικές όσο και γωνιακές σημειακές μετρήσεις. Μέσω των γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου προσδιορίστηκε η χωρική κατανομή, των διαφόρων μετρήσιμων παραμέτρων του, στην επιφάνεια των δειγμάτων από την οποία εξήχθησαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αξιοπιστία και καταλληλότητα της συγκόλλησης καθώς επίσης και για τη μικροδομική-μορφολογική ομοιογένεια της κρυσταλλικής δομής και των διακυμάνσεων των τιμών της μακροσκληρότητας στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Η μαγνητική απόκριση των γωνιακών μετρήσεων του θορύβου ανέδειξε, μακροσκοπικά, τον άξονα της μαγνητικής ανισοτροπίας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.

Η κατανομή του θορύβου Barkhausen προσδιορίστηκε και στα δείγματα #1, #4, και #5 που παρελήφθησαν. Οι γωνιακές μετρήσεις της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου

πραγματοποιήθηκαν μόνο σε ένα συγκολλημένο δείγμα χάλυβα και συγκεκριμένα στο #4 δοκίμιο.

Ωστόσο, οι παραπάνω μετρήσεις είναι σημειακές και αφορούν μόνο την επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων. Συνεπώς τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, δεν αφορούν όλο τον όγκο της συγκόλλησης. Μέσω της απεικόνισης του βρόχου υστέρησης, προσδιορίζονται μαγνητικές παράμετροι/ιδιότητες της κάθε ζώνης της συγκόλλησης που αφορούν όλο τον όγκο των δειγμάτων. Οι μεταβολές των τιμών των παραμέτρων αυτών ως συνάρτηση των ζωνών συγκόλλησης, οδηγούν με τη σειρά τους στον ποιοτικό έλεγχο της συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό από το #1 συγκολλημένο δοκίμιο κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής αντιπροσωπευτικά δείγματα της κάθε ζώνης της συγκόλλησης και προσδιορίστηκε στη συνέχεια ο βρόχος υστέρησης.

Επειδή, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν ήταν γνωστή καμία η χημική σύσταση του χάλυβα ή η μικροδομή του, ούτε είχαμε λάβει γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων του κρίθηκε αναγκαίος ο μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, μέσω οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (δείγμα #2), καθώς επίσης και η λήψη μικροσκληρομετρήσεων σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης (δείγμα #3). Τέλος, προσδιορίστηκαν οι μηχανικές του ιδιότητες μέσω πειραμάτων εφελκυσμού (δείγμα #4 και δείγμα #5).

2.3 Δείγματα που παρελήφθησαν

2.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη

Τα συγκολλημένα δείγματα παρελήφθησαν από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε σε μορφή κατάλληλη για δοκιμή εφελκυσμού (εικόνα 2-1). Το σύνολο των δειγμάτων ήταν 5 στον αριθμό.



Εικόνα 2-1: Υλικό που παρελήφθη.

2.3.2 Οπτικός έλεγχος (visual inspection) συγκολλημένων δοκιμίων

Σε καμία από τις συγκολλήσεις δεν ανιχνεύθηκαν σφάλματα (weld defects) όπως π.χ. επιφανειακές ατέλειες (π.χ. ρωγμές) ή παραμορφώσεις (distortions) που σχετίζονται είτε με την εγκάρσια (transverse shrinkage) ή διαμήκη (longitudinal shrinkage) συστολή των δοκιμίων ως προς τον άξονα της συγκόλλησης, είτε με τη γωνιώδη μεταβολή-περιστροφή γύρω από τον άξονα της συγκόλλησης (angular change) λόγω ανομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής κατά το πάχος των ελασμάτων, είτε τέλος με το λυγισμό (buckling distortion) των ελασμάτων.

2.4 Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων

2.4.1 Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

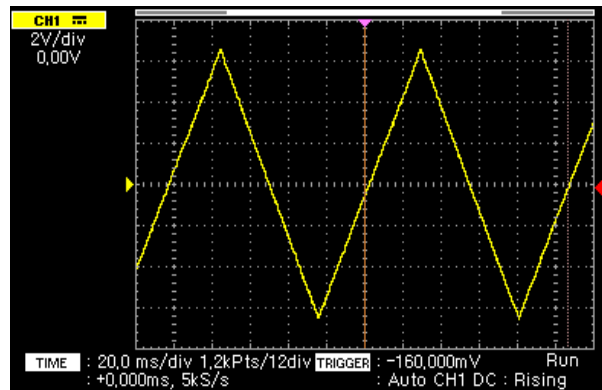
2.4.1.1 Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen

Με τη χρήση της συσκευής MEB-2cG (εικόνα 2-2), λήφθηκε η απόκριση του MBN στην άνω και κάτω επιφάνεια των συγκολλημένων δειγμάτων.



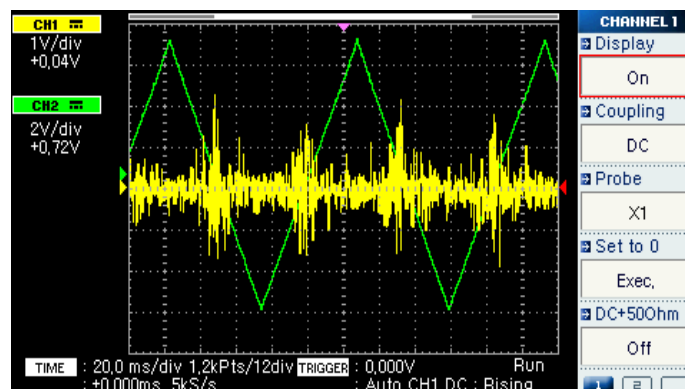
Εικόνα 2-2: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

Ο αισθητήρας Barkhausen αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη σε σχήμα Π, όπου στην μεγάλη του πλευρά είναι τυλιγμένο ένα πηνίο διέγερσης (excitation coil). Στο πηνίο αυτό εφαρμόζεται ένα τριγωνικό σήμα με συχνότητα 10Hz και πλάτος παλμού από κορυφή σε κορυφή 14Volt (εικόνα 2-3), με αποτέλεσμα να διεγείρεται με πεδίο το υπό εξέταση φερρομαγνητικό υλικό [14-28].



Εικόνα 2-3: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V.

Ο μαγνητικός θόρυβος (εικόνα 2-4) λαμβάνεται από το πηνίο λήψης (receiving ή sensing coil) το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα ραβδόμορφο φερρίτη και βρίσκεται ανάμεσα στα στελέχη του ηλεκτρομαγνήτη. Ο ραβδόμορφος φερρίτης έχει τη δυνατότητα να μετακινείται κατ' ύψος και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος [14-28].

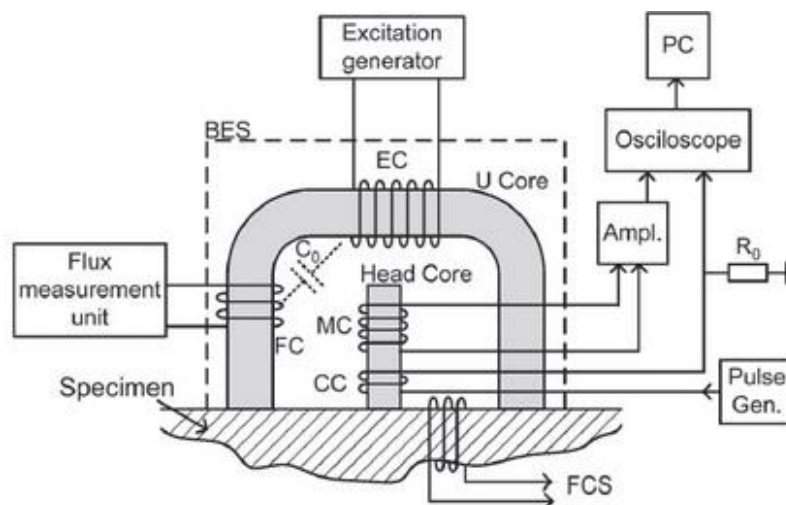


Εικόνα 2-4: Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια συγκολλημένου δείγματος.

Τα σήμα στο πηνίο λήψης, ενισχύεται και λαμβάνεται από μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων από κατάλληλο λογισμικό σε περιβάλλον LabView λαμβάνονται τρεις χαρακτηριστικές παράμετροι του θορύβου:

1. Ο αριθμός των παλμών του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (counts) πάνω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι δυναμικού (threshold),
2. Η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ($MBN_{RMS} = V1$),
3. Η ένδειξη της ποιότητας επαφής του αισθητήρα με την επιφάνεια του δείγματος (V2)

Στην εικόνα 2-5 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.



Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

2.4.1.2 Τρόποι μέτρησης της απόκρισης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Με τη χρήση της μεθόδου του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, πραγματοποιήθηκαν τόσο γραμμικές όσο και γωνιακές σημειακές μετρήσεις.

2.4.1.2.1 Γραμμικές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Για τη λήψη γραμμικών σημειακών μετρήσεων, απαιτείται ο προσδιορισμός, στην επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων, των σημείων μέτρησης του θορύβου. Στην εικόνα 2-6 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα σημεία μέτρησης στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #1.



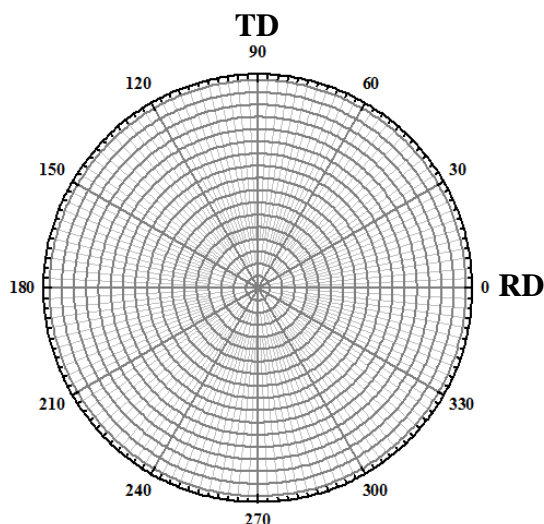
Εικόνα 2-6: Σημεία γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #1.

Στη συνέχεια το πεδίο μαγνήτισης εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δηλ. ο μαγνητικός αισθητήρας τοποθετούνταν κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης σε κάθε σημείο μέτρησης.

Μέσω των γραμμικών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου προσδιορίστηκε η χωρική κατανομή, των διαφόρων μετρήσιμων παραμέτρων του, στην επιφάνεια των δειγμάτων από την οποία εξήχθησαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αξιοπιστία και καταλληλότητα της συγκόλλησης καθώς επίσης και για τη μικροδομική-μορφολογική ομοιογένεια της κρυσταλλικής δομής και των διακυμάνσεων των τιμών της μικροσκληρότητας στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης.

2.4.1.2.2 Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Σε αντίθεση με τις γραμμικές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στις οποίες απαιτείται η βηματική μετακίνηση του ηλεκτρομαγνήτη, οι γωνιακές μετρήσεις απαιτούν την περιστροφή του ηλεκτρομαγνήτη από 0ο έως 360° με βήμα 15°. Μέσω των γωνιακών μετρήσεων αξιολογείται η μαγνητική ανισοτροπία των συγκολλημένων δοκιμίων. Σε κάθε γωνιακή θέση, ελήφθησαν πέντε μαγνητικές αποκρίσεις και ο μέσος όρος απεικονίζονταν σε πολικές γραφικές παραστάσεις, ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης (εικόνα 2-7).



Εικόνα 2-7: Πολικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης.

Η μαγνητική απόκριση των γωνιακών μετρήσεων του θορύβου ανέδειξε, μακροσκοπικά, τον άξονα της μαγνητικής ανισοτροπίας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης [29-40].

2.4.2 Βρόχοι μαγνητικής υστέρησης

2.4.2.1 Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου

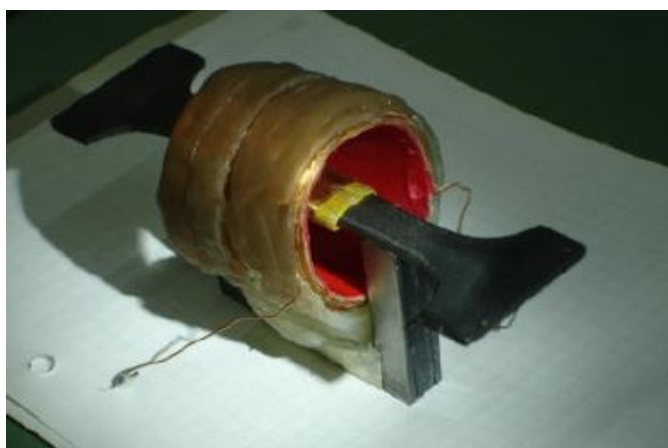
Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων του βρόχου υστέρησης στα συγκολλημένα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλουργίας (εικόνα 2-8).



Εικόνα 2-8: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλογνώσιας.

Η διάταξη αυτή πρέπει να είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγω αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις περιγράφονται από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει είτε το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα (εικόνα 2-9). Έτσι το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον ηλεκτρομαγνήτη (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος [16, 41-44].



Εικόνα 2-9: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Φυσικής Μεταλλουργίας.

Με τον τρόπο αυτό, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο προς εξέταση υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η ημιτονοειδής κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

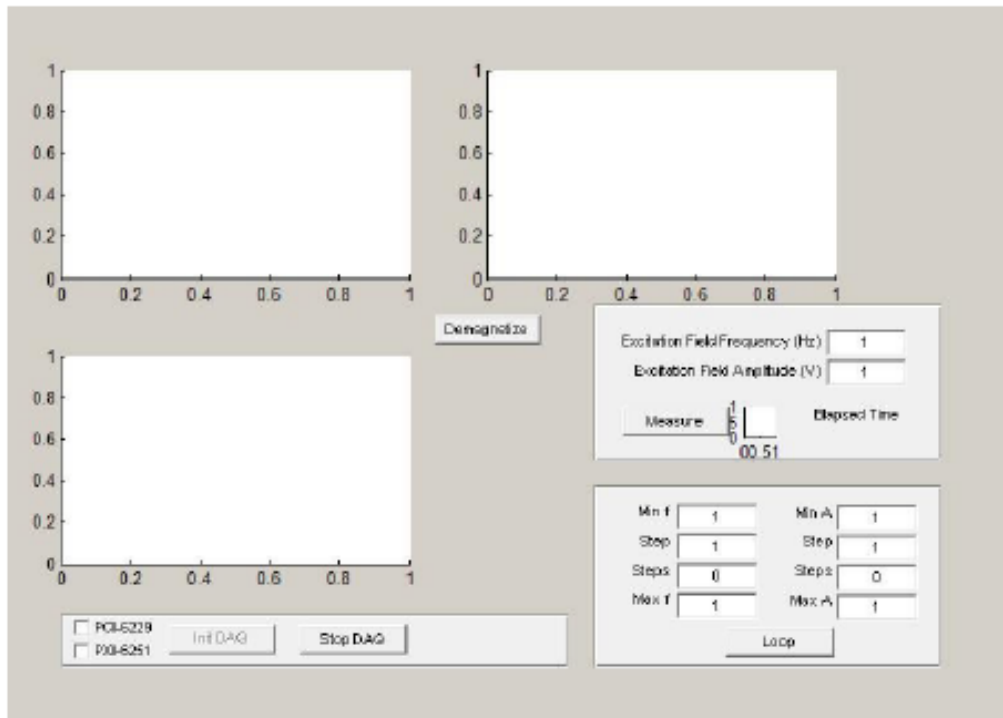
Το μαγνητικό κύκλωμα της διάταξης αποτελείται από:

- το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και
- τα πηνία διέγερσης και λήψης τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή:

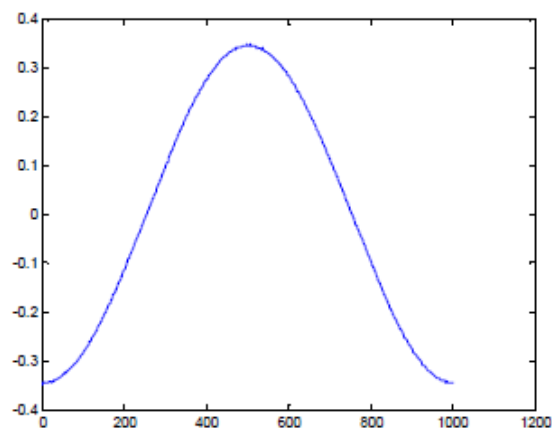
- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).
- Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά $\pm 70V$, $\pm 6A$ της Kerco

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην εικόνα 2-10.



Εικόνα 2-10: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλουργίας.

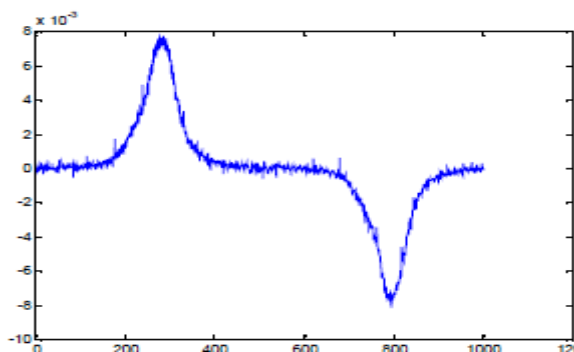
Το σήμα διέγερσης (εικόνα 2-11) δημιουργείται από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης του Matlab. Μέσω της πλατφόρμας αλληλεπίδρασης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να επιλέξει τις επιθυμητές τιμές του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης, ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.



Εικόνα 2-11: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

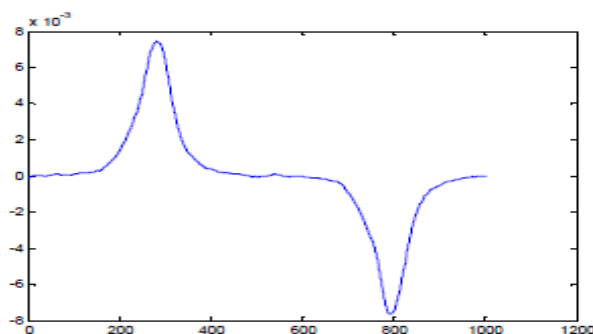
Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης, ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως

βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (εικόνα 2-12).



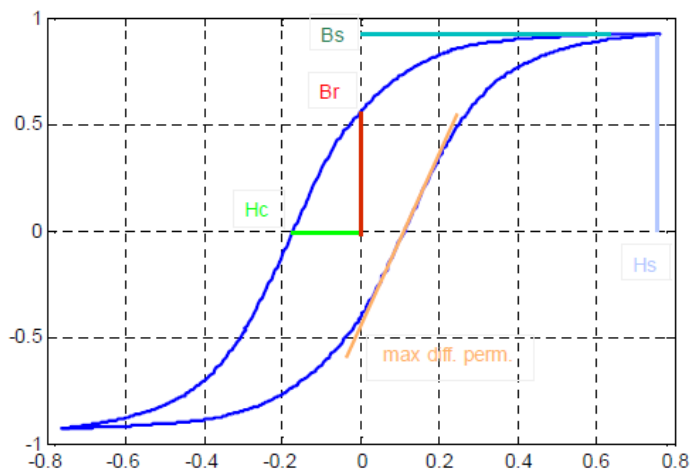
Εικόνα 2-12: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπερπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (εικόνα 13) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (εικόνα 2-14).



Εικόνα 2-13: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντας το με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά.



Εικόνα 2-14: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων (εικόνα 2-11, 2-13 – 2-14) που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον προκύπτοντα βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (εικόνα 2-14) προσδιορίζονται και οι παράμετροι των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού [41-44].

2.5 Μεταλλογραφικός-Μικροδομικός χαρακτηρισμός των συγκολλημένων δειγμάτων

2.5.1 Απαίτηση για περαιτέρω μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του υλικού

Επειδή, δεν ήταν γνωστή η χημική σύσταση του χάλυβα ή η μικροδομή του κρίθηκε αναγκαίος ο μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, μέσω οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Στον Πίνακα 2-1 αναφέρονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να ολοκληρωθεί η προετοιμασία για το δομικό χαρακτηρισμό του δοκιμίου #2.

Πίνακας 2-1: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν με στόχο το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.

| # Δείγματος | Χαρακτηρισμός |
|-------------|---|
| #2_1 | Μικροδομικός χαρακτηρισμός με τη χρήση Οπτικού Μικροσκοπίου (Optical Microscopy, OM). |
| #2_2 | Μικροδομικός χαρακτηρισμός με τη χρήση Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM). |
| #2_3 | Ταυτοποίηση φάσεων και προσδιορισμός κρυσταλλογραφικού ιστού (μακρο-ιστού, macrotecture) με τη χρήση Περιθλασιμετρίας Αντίνων Χ (X-ray Diffraction Pattern, XRD). |

2.5.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Πριν τη μελέτη ενός δοκιμίου πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του, η οποία σε πρώτη φάση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες και σε δεύτερη φάση αποκαλύπτει τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και η χημική προσβολή.

2.5.2.1 Κοπή δοκιμίων

Για το λόγο αυτό, από το συγκολλημένο δοκίμιο κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής τρία μικρότερα παραλληλεπίπεδα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροδομικών χαρακτηριστικών του καθώς και το χαρακτηρισμό του μικρογραφικού ιστού του.

2.5.2.2 Εγκιβωτισμός

Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλοι δοσομετρικοί σωλήνες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλινδρικών καλουπιών της Struers και στη συνέχεια συμπληρώθηκε το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης.

2.5.2.3 Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in²). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην πίεση του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειάζονταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνταν σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

2.5.2.4 Στίλβωση

Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα αντίστοιχο κάθε φορά της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3μm και στη συνέχεια 1μm. Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος λιπαντικό για την ψύξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε τρεχούμενο νερό, καθαρίζονταν με βαμβάκι, στη συνέχεια με αιθανόλη και τέλος ξηραίνονταν σε ρεύμα θερμού αέρα.

2.5.2.5 Χημική προσβολή

Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων των κόκκων (etching). Ουσιαστικά, η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται από ένα ισχυρά όξινο διάλυμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα η χημική προσβολή της επιφάνειας του δείγματος γίνεται με Nital 2% για 20sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολουθεί έκπλυση του δείγματος με αιθανόλη. Στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια της προετοιμασίας του εκάστοτε δείγματος.

Πίνακας 2-2: Στάδια προετοιμασίας υλικού αναφοράς για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό.

| # Δείγματος | #2_1 | #2_2 | #2_3 | |
|-------------------------------|----------------------------|--|---|---|
| Τεχνική δομικού χαρακτηρισμού | OM | SEM | XRD | |
| Στάδια προετοιμασίας | Κοπή (Cutting) | Υδροκοπή | | |
| | Εγκιβωτισμός (Mounting) | - | - | - |
| | Λείανση (Grinding) | Πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα στον περιστρεφόμενο κυκλικό δίσκο λείανσης της σχολής MMM, ενώ ταυτόχρονα ρινίσματα απομακρύνονταν με τη ρήψη νερού. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit | Ομοίως με τα δείγματα No1 & No2, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά SiC με 800 grit. | |

| | | | |
|--|---|--|---|
| | | (κόκκοι SiC/in ²). | |
| | Στίλβωση (Polishing) | Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σταδιακά με αδαμαντόπαστα 3μm και 1μm. | - |
| | Χημική προσβολή (Chemical Etching) | Nital 2% (=A ιθανόλη 98ml + Νιτρικό Οξύ 2ml) | - |

2.5.3 Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού

2.5.3.1 Οπτικό Μικροσκόπιο (OM)

Για την οπτική μεταλλογραφία χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός OLYMPUS BX41-M (εικόνα 2-15) για την παρατήρηση και ερμηνεία της μικροδομής του υλικού. Η μεγέθυνση ήταν x50. Χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή NIKON για τη λήψη φωτογραφιών.



Εικόνα 2-15: Οπτικό μικροσκόπιο τύπου OLYMPUS BX41-M.

2.5.3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope) που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπος Jeol GSM 6380-LV (εικόνα 2-16). Μέσω εικόνας δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η μορφολογία και η κατανομή των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού, ενώ μέσω εικόνας πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ταυτοποιήθηκαν οι φάσεις και τα μικροδομικά συστατικά του υπό εξέταση δοκιμίου. Οι παράμετροι για την λήψη της εικόνας ήταν:

- Τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων (acceleration voltage) 20kV
- Spot size: 50 (για εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων) και 60 (για εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων)
- Working distance: 15mm



Εικόνα 2-16: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV.

2.5.3.3 Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκαν σημειακές και γενικευμένες χημικές στοιχειομετρικές αναλύσεις στην επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της μικροανάλυσης ήταν η εξέταση της περιεκτικότητας του πυριτίου ενδοκρυσταλλικά και διακρυσταλλικά. Ποσοτικός προσδιορισμός ελαφριών στοιχείων (όπως C, N, B, O) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί

2.5.4 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου αναφοράς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σκληρότητας με τη μέθοδο Vickers στην επιφάνεια του κάθε δείγματος καθώς και πειράματα εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων σχετίζονται με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού μέσω του εμπειρικού τύπου: Όριο διαρροής_{min}=2,9•HVN και Όριο διαρροής_{max} = 3,2•HVN. Στον Πίνακα 4 αναφέρονται οι τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν ώστε να ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων.

Πίνακας 2-3: Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αναφοράς.

| # Δείγματος | Χαρακτηρισμός |
|-------------|--------------------|
| 3 | Σκληρομετρήσεις |
| 4-5 | Δοκιμές εφελκυσμού |

2.5.4.1 Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης

Πριν από τη μικροσκληρομέτρηση απαιτείται η λείανση και η στίλβωση των δοκιμίων. Κάθε αποτύπωμα του διεισδυτή απέχει 1000 μικρά (0,01mm = 10 μ m) κατά τη διάμετρο του δοκιμίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο της EAB και επιλέχθηκε φορτίο 200gf και χρόνος επιβολής πλήρους φορτίου 15 sec.

2.5.4.2 Δοκιμές εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη και πιο διαδεδομένη δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Ο σκοπός πραγματοποίησης των δοκιμών εφελκυσμού ήταν ο έλεγχος της μεταβλητότητας των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου δοκιμίου ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η συγκόλληση επηρέασε τις αντοχές του αρχικού υλικού. Επίσης, οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με στόχο να συσχετιστούν η μηχανική απόκριση του συγκολλημένου δοκιμίου με τη μικρογραφική δομή του (μετασχηματισμούς φάσεων για τον εκάστοτε θερμικό κύκλο) και το αναπτυσσόμενο τασικό πεδίο.

Η μηχανική δοκιμή πραγματοποιήθηκε παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης με συσκευή τύπου Instron – Model 4482. Η ταχύτητα εφελκυσμού που ορίστηκε στη μηχανή εφελκυσμού για όλες τις δοκιμές ήταν 3 mm/min. Μετά το τέλος της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης από την οποία προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά οι τιμές του ορίου διαρροής (Yield Point), της μέγιστης εφελκυστικής τάσης θραύσης (Ultimate Tensile Strength) και της ολκιμότητας (Elongation).

Επίσης πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη των θραυσιγενών επιφανειών του αρχικού δείγματος και του συγκολλημένου, ώστε να παρατηρηθεί ο τύπος της θραύσης (όλκιμης ή/και ψαθυρής) και στις δύο περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέρχονται από την εφαρμογή των μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) στα συγκολλημένα δοκίμια. Επίσης παρατίθενται αποτελέσματα που προέρχονται από το δομικό και μικροδομικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων, καθώς και οι διακυμάνσεις των κύριων μηχανικών ιδιοτήτων τους.

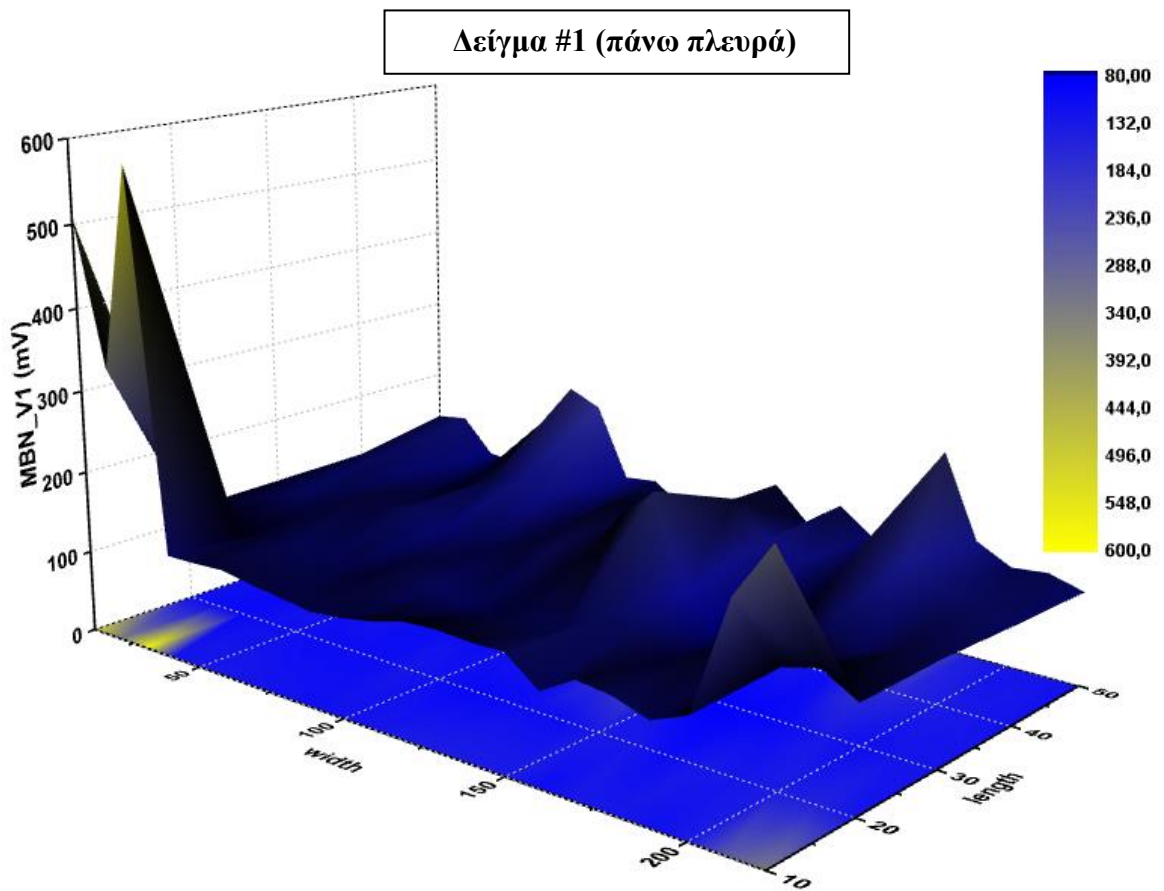
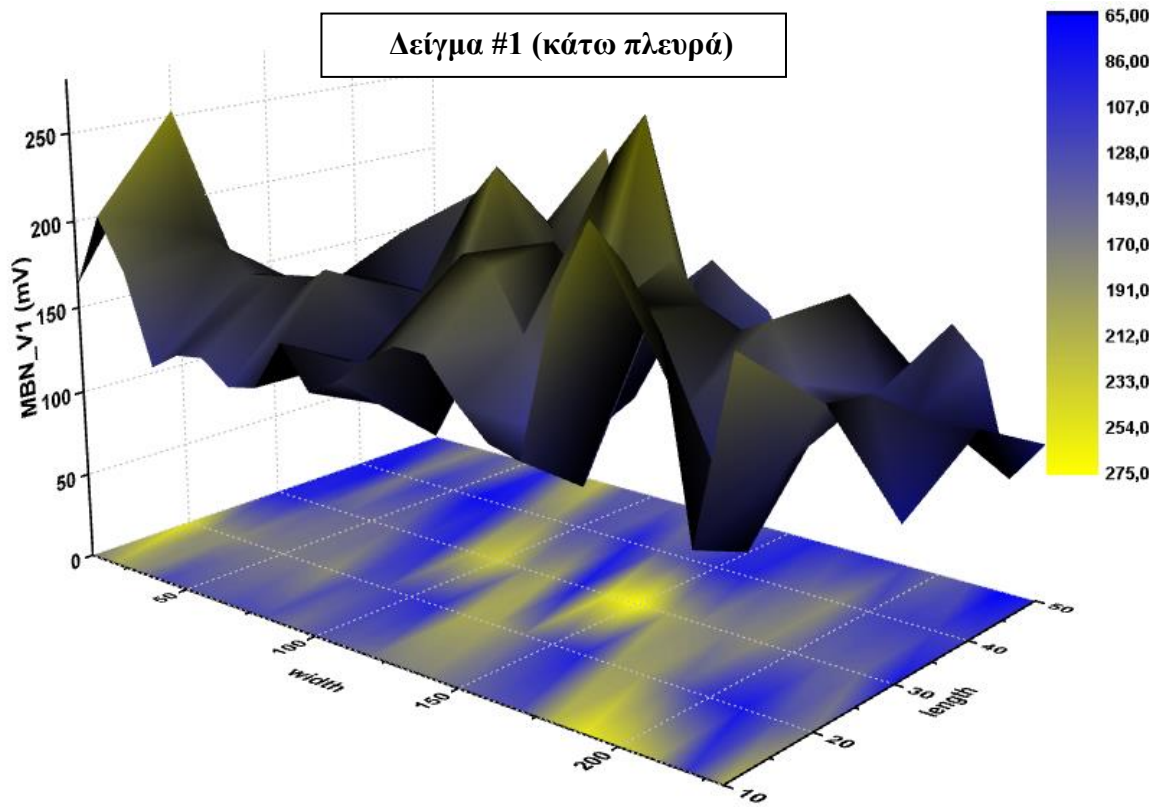
Στόχος της παρούσας πειραματικής ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της ποιότητας (grade) του χάλυβα στην οποία ανήκουν τα υπό εξέταση συγκολλημένα δείγματα του χάλυβα, η συσχέτιση των μεταβολών που υφίστανται οι μαγνητικές παράμετροι στα συγκολλητά μεταλλικά μέρη των υπό εξέταση δοκιμίων με την κατανομή των μικροσκληρομετρήσεων σε όλη την επιφάνεια της συγκόλλησης και τέλος ο μακροσκοπικός προσδιορισμός του εύκολου άξονα μαγνήτισης που παρουσιάζει η εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης.

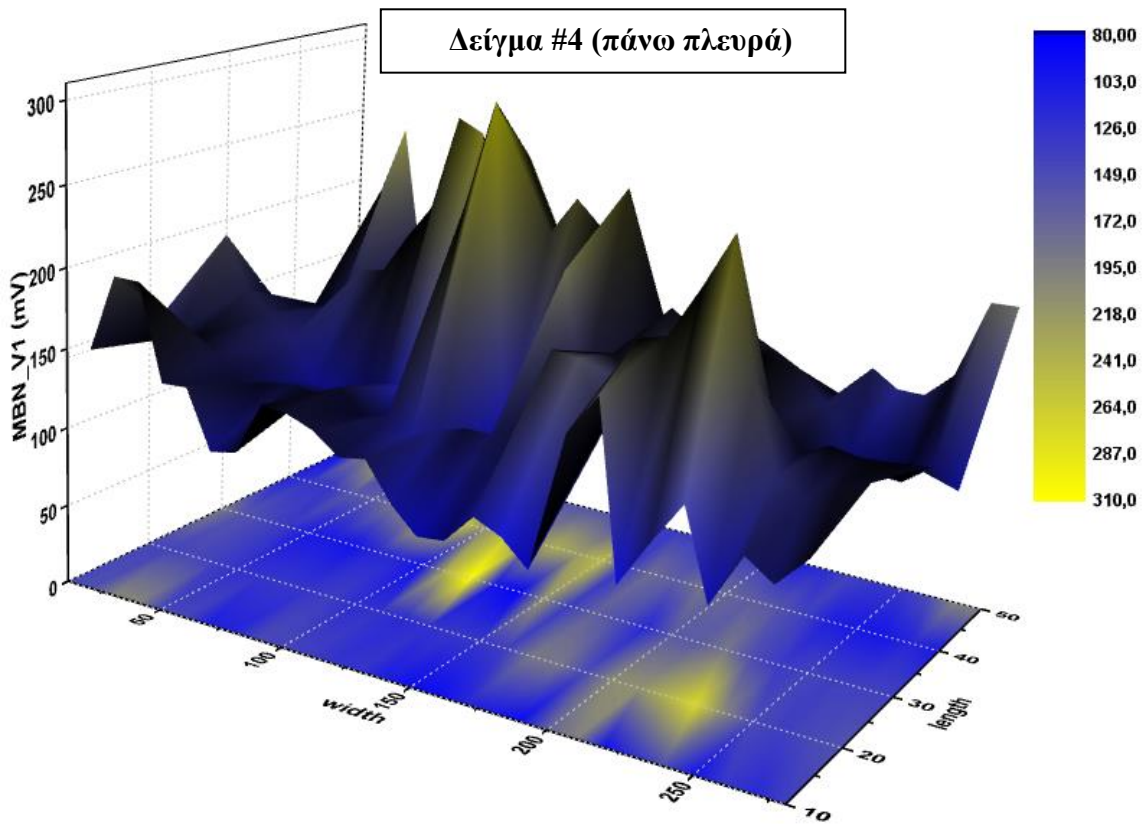
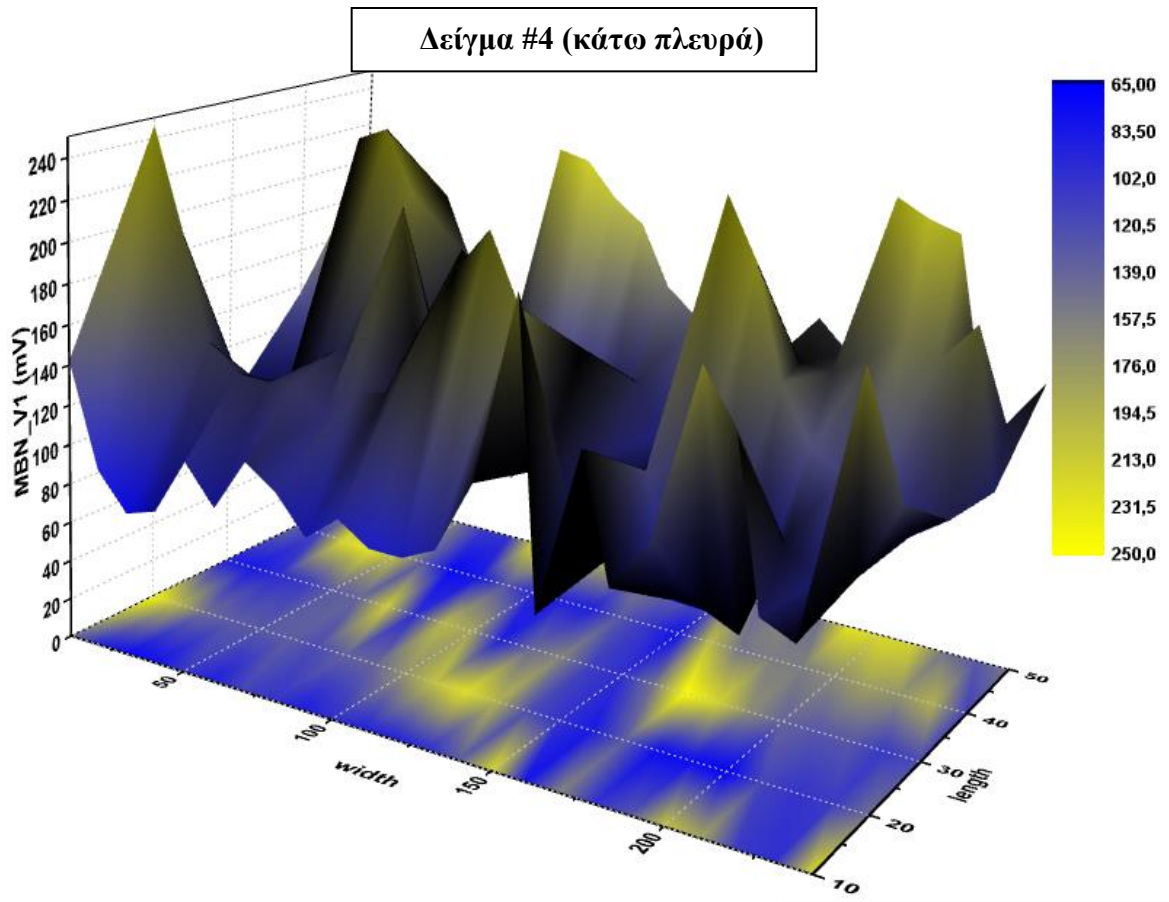
3.2 Μη-καταστροφικός έλεγχος των συγκολλημένων δειγμάτων

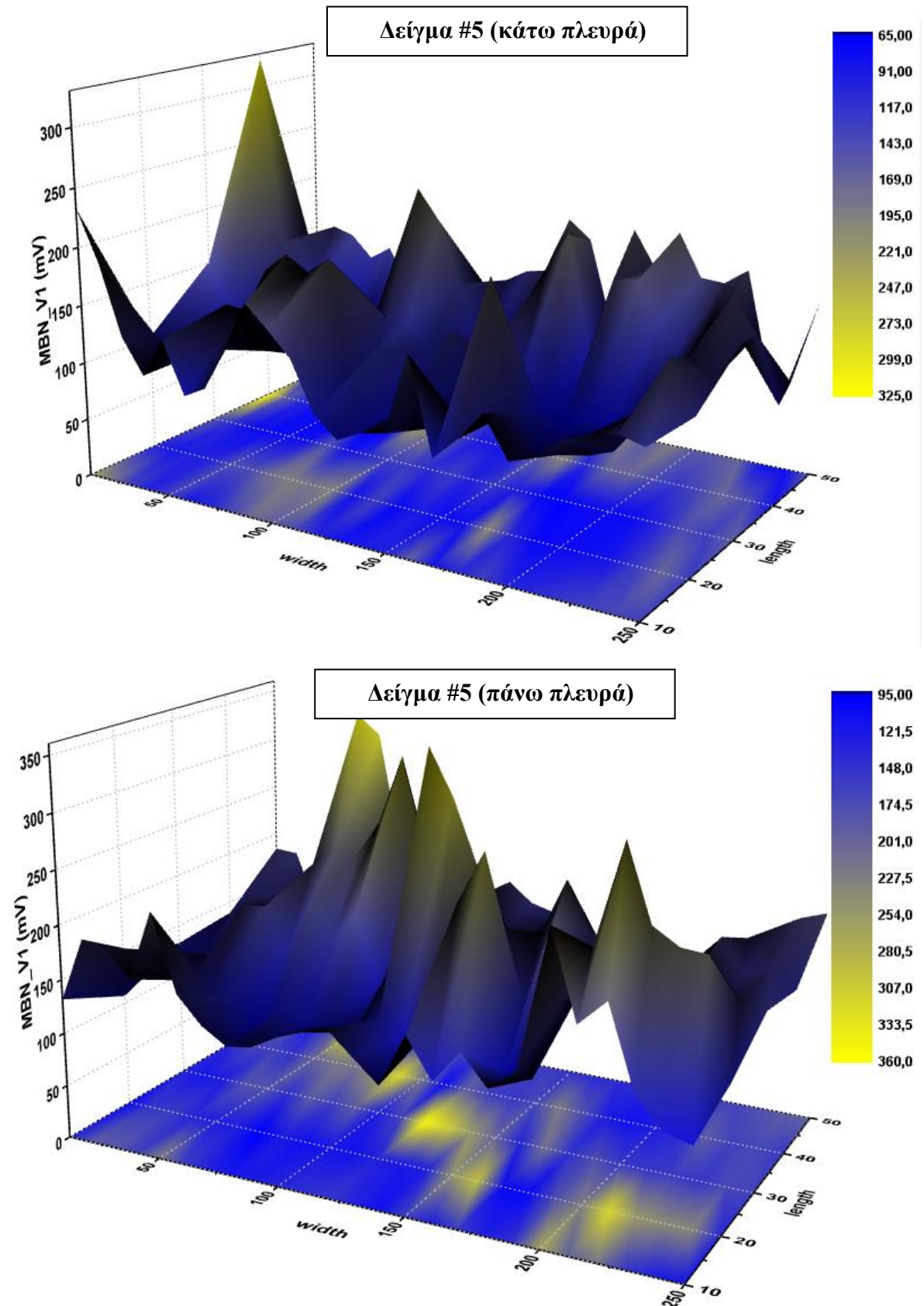
3.2.1 Χωρική κατανομή των γραμμικών σημειακών μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Για τη μέτρηση της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου (MBNrms), το πεδίο μαγνήτισης εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δηλαδή παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στην επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων παρουσιάζεται στην εικόνα 3-1. Με βάση το χρωματικό κώδικα, οι κίτρινες περιοχές υποδεικνύουν τις περιοχές του συγκολλημένου δοκιμίου με τις υψηλότερες τιμές MBNrms, ενώ με σκούρο μπλε τις περιοχές όπου η μαγνητική απόκριση λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές.

Στην εικόνα 3-1 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του μαγνητικού θορύβου, καθώς επίσης η προβολή της στο επίπεδο XY, για τα δείγματα #1, #4 και #5. Στα δείγματα αυτά η μαγνητική απόκριση αφορά την πάνω και κάτω πλευρά των δειγμάτων.







Εικόνα 3-1: Απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στα συγκολλημένα δοκίμια, όταν το πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης.

Παρατηρείται έντονη διακύμανση των τιμών του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και συγκεκριμένα της ενεργού τιμής του θορύβου (MBNrms ή V1), στην επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων.

Από τη χωρική κατανομή του θορύβου δεν προκύπτει διάκριση των ζωνών της συγκόλλησης, μέσω της ομότροπης ανάπτυξης της μαγνητικής απόκρισης στο εκάστοτε θερμοδυναμικό σύστημα. Είναι γνωστό ότι, ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen επηρεάζεται σημαντικά από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά [45-51], το είδος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων [52-65], το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης [66-71], τη μηχανική σκληρότητα [22-23, 72], την πυκνότητα των διαταραχών [73-75] και το ποσοστιαία συμμετοχή του άνθρακα [27]. Ως εκ τούτου, λόγω της μορφής του μαγνητικού θορύβου, είτε οι ζώνες παρουσιάζουν μικροδομική ομοιογένεια, είτε η χρήση του τόνου για την εξομάλυνση της τραχύτητας της επιφάνειας των συγκολλημένων δοκιμίων έχει επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό την κατανομή της μαγνητικής απόκρισης.

Να σημειωθεί ότι, η απόκριση του μαγνητικού θορύβου παρουσίαζε υψηλότερες τιμές στην πάνω μετρήσιμη πλευρά σε κάθε συγκολλημένο δοκίμιο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η πλευρά αυτή παρουσιάζει εφελκυστικές τάσεις και η κάτω πλευρά θλιπτικές. Είναι γνωστό, ότι η μορφή του θορύβου, αποτελεί μια ποιοτική ένδειξη τόσο της ύπαρξης, όσο και του είδους (εφελκυστικών ή θλιπτικών) των παραμενουσών τάσεων που υπάρχουν στο σημείο της μέτρησης. Συγκεκριμένα, σε ένα θετικά μαγνητοσυστολλικό υλικό, οι εφελκυστικές τάσεις αυξάνουν την ένταση του μαγνητικού θορύβου, ενώ με τη σειρά τους οι θλιπτικές των μειώνουν.

3.2.2 Γωνιακές σημειακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Η παράμετρος του μαγνητικού θορύβου που μετρήθηκε ώστε να εκτιμηθεί η μαγνητική ανισοτροπία της εκάστοτε ζώνη συγκόλλησης σε όλα τα συγκολλημένα δοκίμια είναι η ενέργεια του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBNenergy).

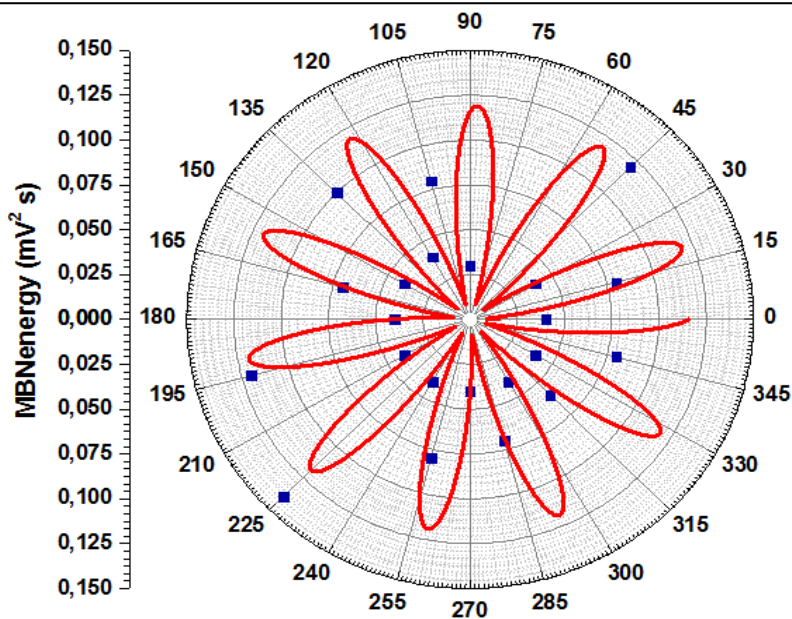
$$\text{MBNenergy} = a \cos^2(\theta + \Phi) + \beta$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ του εφαρμοζόμενου πεδίου και της διεύθυνσης της εφαρμοζόμενης τάσης και a , Φ , β είναι προσεγγιστικές παράμετροι του τελικού γραφήματος. Η παράμετρος a αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα που χαρακτηρίζει την ανισότροπη συμπεριφορά της γωνιακής μαγνητικής εξάρτησης. Η ανισότροπη συμπεριφορά προέρχεται από τη συνεισφορά του συνόλου των 180° - μαγνητικών

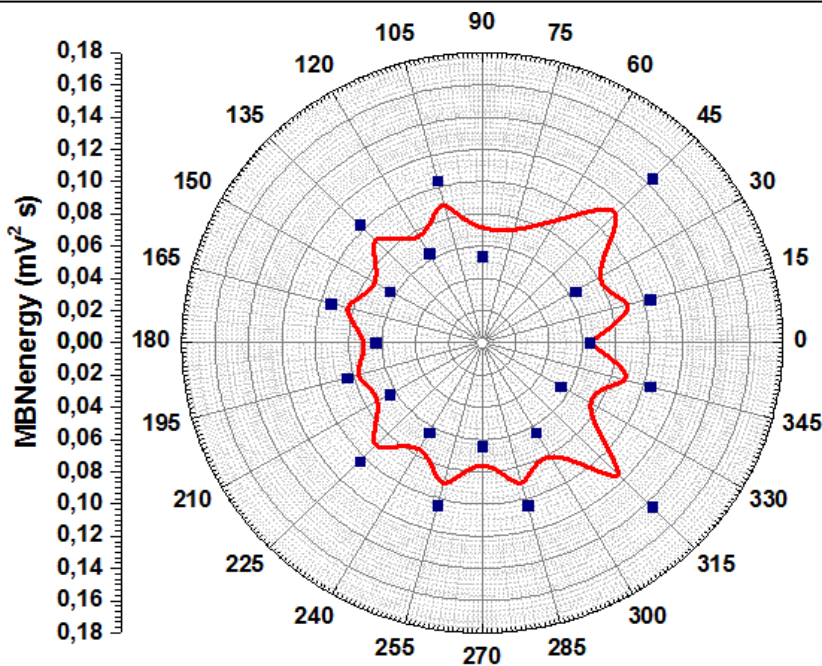
τοιχωμάτων στον προσδιορισμό της γωνίας του εύκολου άξονα μαγνήτισης. Αντίθετα, η παράμετρος β αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα που χαρακτηρίζει την ισότροπη συμπεριφορά της γωνιακής μαγνητικής εξάρτησης.

Στην εικόνα 3-2 παρουσιάζονται ενδεικτικά πολικά διαγράμματα της γωνιακής εξάρτησης του μαγνητικού θορύβου με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο για κάθε ζώνη συγκόλλησης για το συγκολλημένο δείγμα #4.

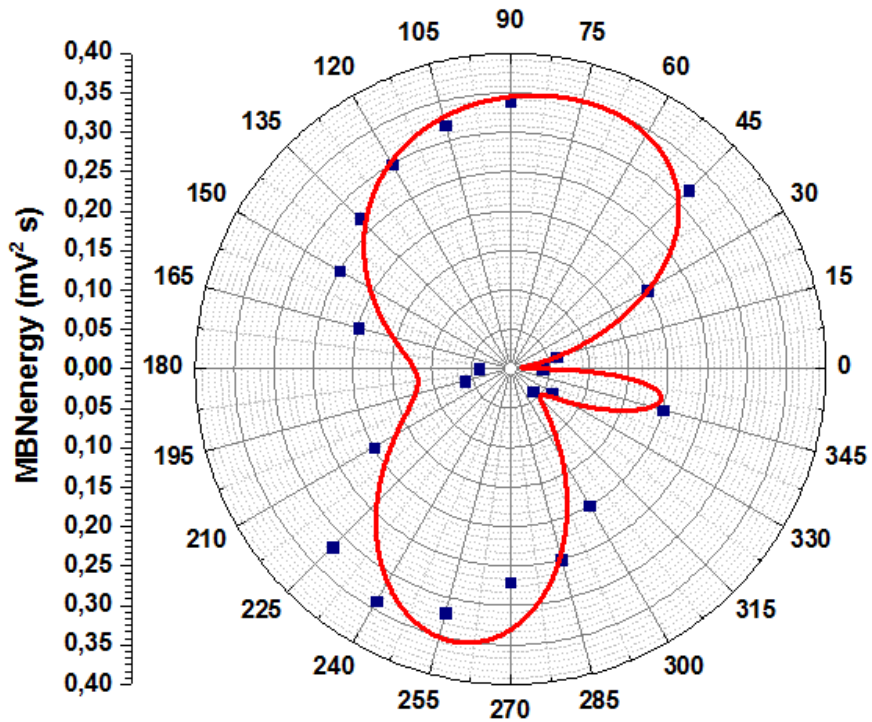
Βασικό Μέταλλο. Μέτρηση στην κάτω πλευρά του δοκιμίου #4



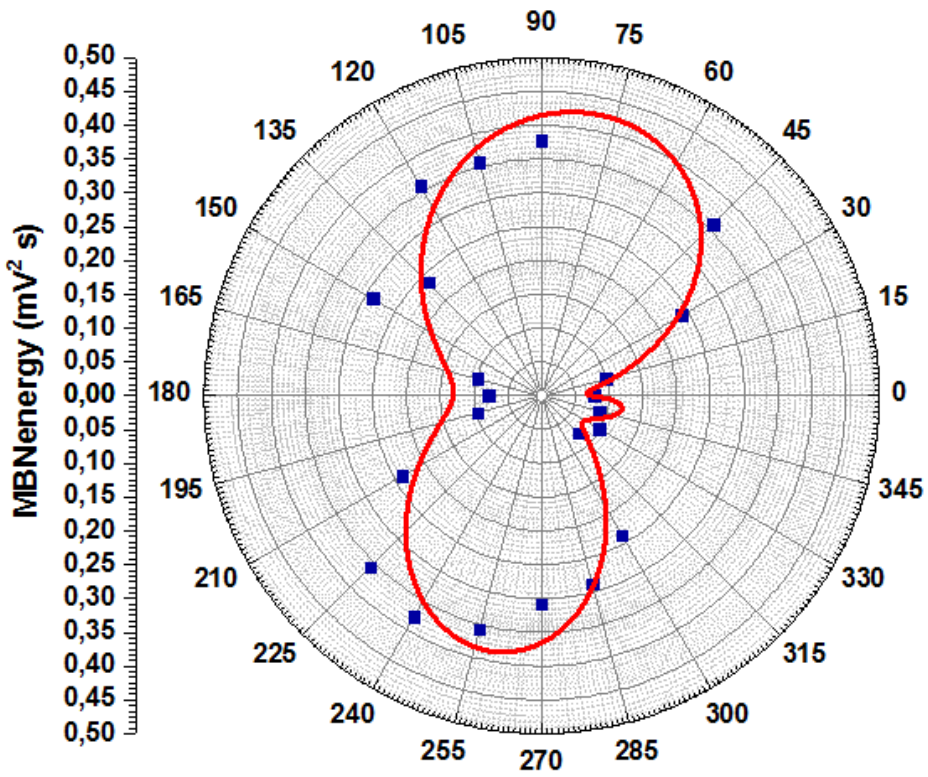
Βασικό Μέταλλο. Μέτρηση στην πάνω πλευρά του δοκιμίου #4



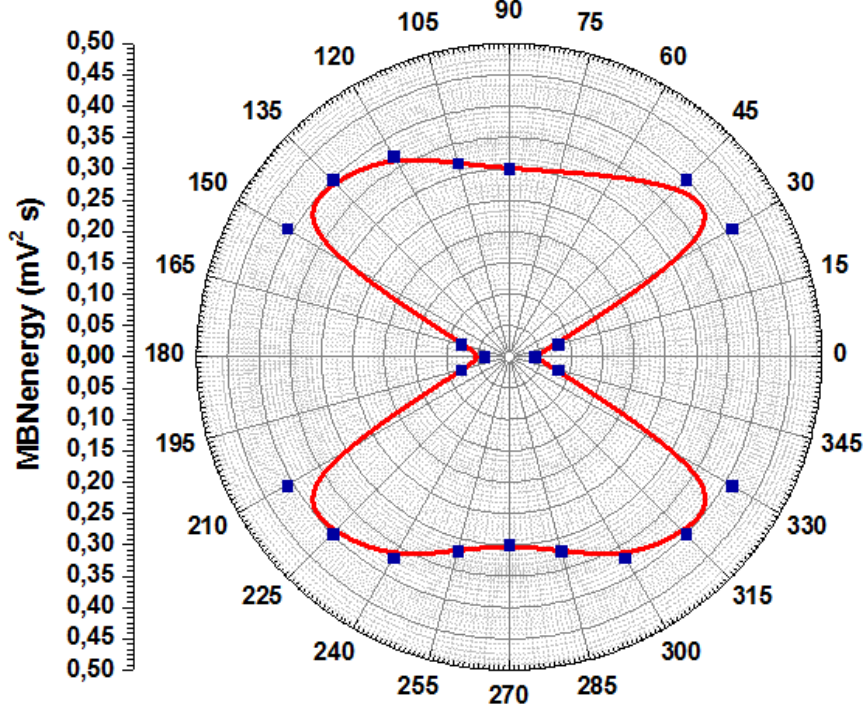
Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη. Μέτρηση στην κάτω πλευρά του δοκιμίου #4



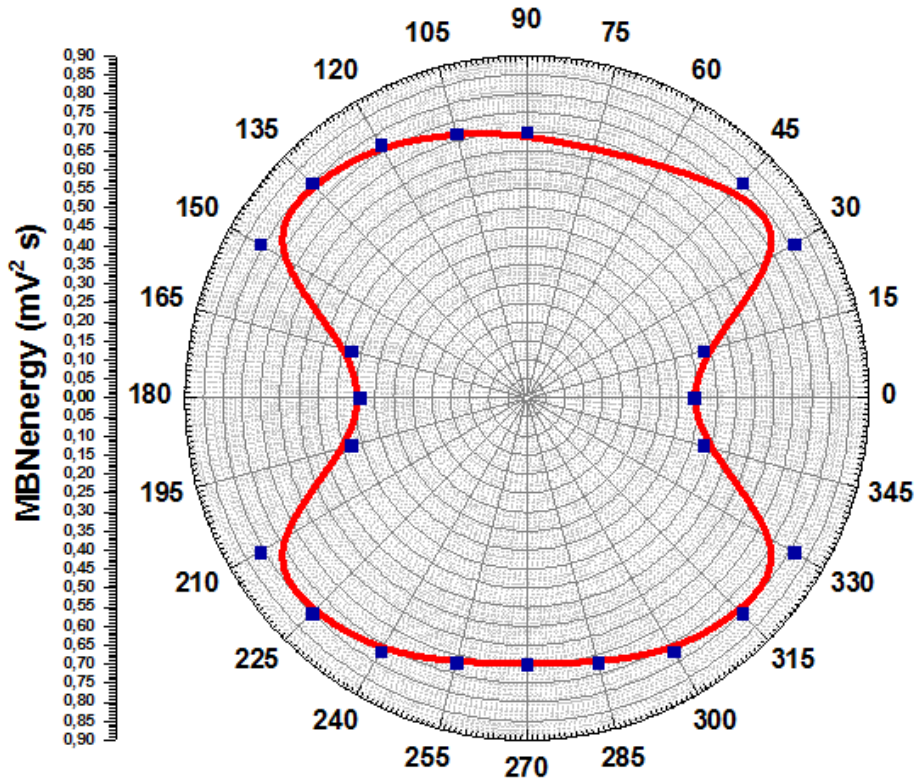
Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη. Μέτρηση στην πάνω πλευρά του δοκιμίου #4



Ζώνη Τήξης. Μέτρηση στην κάτω πλευρά του δοκιμίου #4



Ζώνη Τήξης. Μέτρηση στην πάνω πλευρά του δοκιμίου #4



Εικόνα 3-2: Πολικά διαγράμματα που απεικονίζουν τις γωνιακές μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως συνάρτηση της γωνίας μαγνήτισης στο βασικό μέταλλο (Base Metal, BM), στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ) και στη ζώνη τήξης (Fusion Zone, FZ) στο συγκολλημένο δοκίμιο #4.

Σε όλα τα παραπάνω πολικά διαγράμματα η γωνία των 90° αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση της συγκόλλησης. Είναι εμφανής η έντονη διακύμανση του μακροσκοπικού εύκολου άξονα μαγνήτισης που αποδίδει ανισότροπη μαγνητική συμπεριφορά σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το δοκίμιο #4.

Αναλυτικότερα, η μέγιστη τιμή της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου παρουσιάζεται, όπως αναμένονταν, στη ζώνη τήξης, καθώς η ζώνη αυτή χαρακτηρίζονταν από τη μέγιστη ενεργό τιμή του θορύβου. Ακολούθως, η τιμές της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου παρουσιάζουν μια μείωση καθώς απομακρυνόμαστε από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ανάλογα με την πλευρά που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, μεταβάλλεται ο εύκολος άξονας μαγνήτισης, ακόμα και στην ίδια τη ζώνη συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, στο μέταλλο βάσης ο άξονας αναφέρεται στις 45° , στην κάτω πλευρά του δοκιμίου, ενώ στην πάνω πλευρά μετατοπίζεται στις 345° . Ομοίως, στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης παρουσιάζεται στις 90° , στην κάτω πλευρά του δοκιμίου, ενώ στην πάνω πλευρά μετατοπίζεται στις 240° . Τέλος, στη ζώνη τήξης, ο άξονας παρουσιάζεται στις 150° , στην κάτω πλευρά του δοκιμίου, ενώ στην πάνω πλευρά μετατοπίζεται στις 30° .

Η ανισοτροπική αυτή συμπεριφορά οφείλεται στο ονομαζόμενο μαγνητο-ελαστικό φαινόμενο (magneto-elastic effect). Ο χάλυβας, χαρακτηρίζεται ως θερμικά μαγνητοσυστολικός ($\lambda_{si} > 0$) για χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενου πεδίου. Ο εύκολος άξονας μαγνήτισης παρατηρείται, εν γένει, στην οικογένεια των $\langle 100 \rangle$ κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Η παρουσία τάσεων, είτε λόγω στατικής/δυναμικής καταπόνησης (π.χ. εφελκυσμός/κόπωση αντίστοιχα), είτε λόγω κάποιας θερμικής κατεργασίας (ανόπτηση, συγκόλληση), αναγκάζει τη διάταξη των μαγνητικών περιοχών να ανακατανεμηθεί, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια του μεταλλικού συστήματος (κυρίως η μαγνητοελαστική ενέργεια και η ενέργεια ανισοτροπίας). Η νέα αυτή διάταξη των μαγνητικών περιοχών προκύπτει είτε (α) με τον επαναπροσανατολισμό των διανυσμάτων της μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων, που περιγράφουν τις μαγνητικές περιοχές, όταν η διεύθυνσή τους διαφέρει από τη διεύθυνση της τάσης, είτε (β) Με την αύξηση των 180° μαγνητικών τοιχωμάτων. Γνωρίζουμε ότι, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση όπου ο αριθμός των 180° - μαγνητικών τοιχωμάτων είναι μέγιστος. Θεωρώντας τον εύκολο άξονα μαγνήτισης που περιγράφει την κατάσταση όπου καμία τάση δεν επενεργεί στο υλικό (initial easy magnetization axis) αποκλίνει από τη

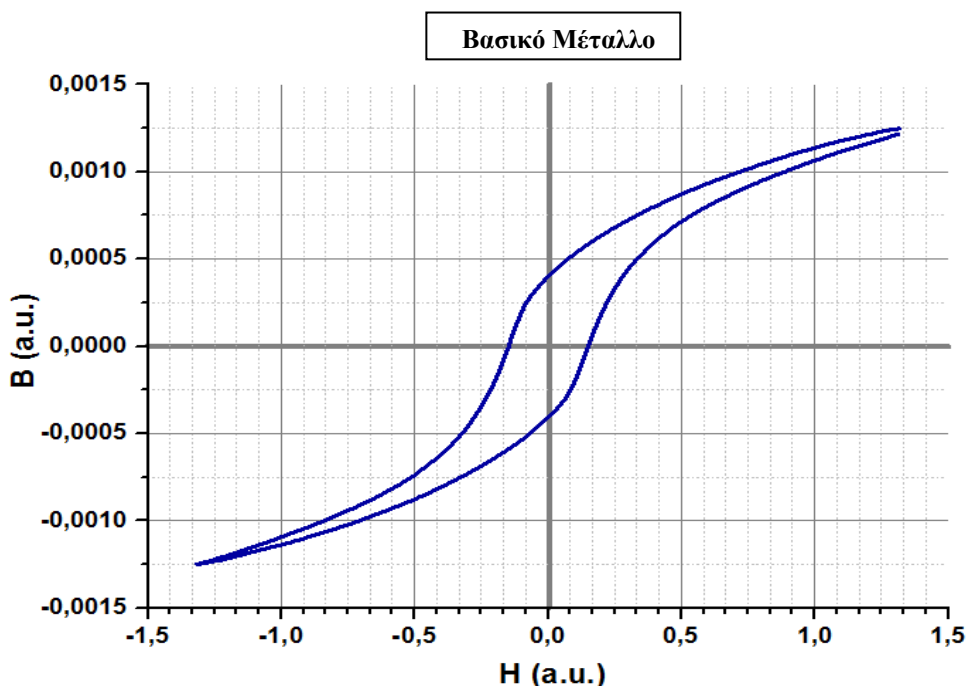
διεύθυνση των τάσεων που παρατηρούνται στη συνέχεια, συμπεραίνουμε ότι στην κατάσταση όπου εμφανίζονται τάσεις στο υλικό, ο αρχικός εύκολος άξονας μαγνήτισης θα περιστραφεί, προσεγγίζοντας τη διεύθυνση των τάσεων.

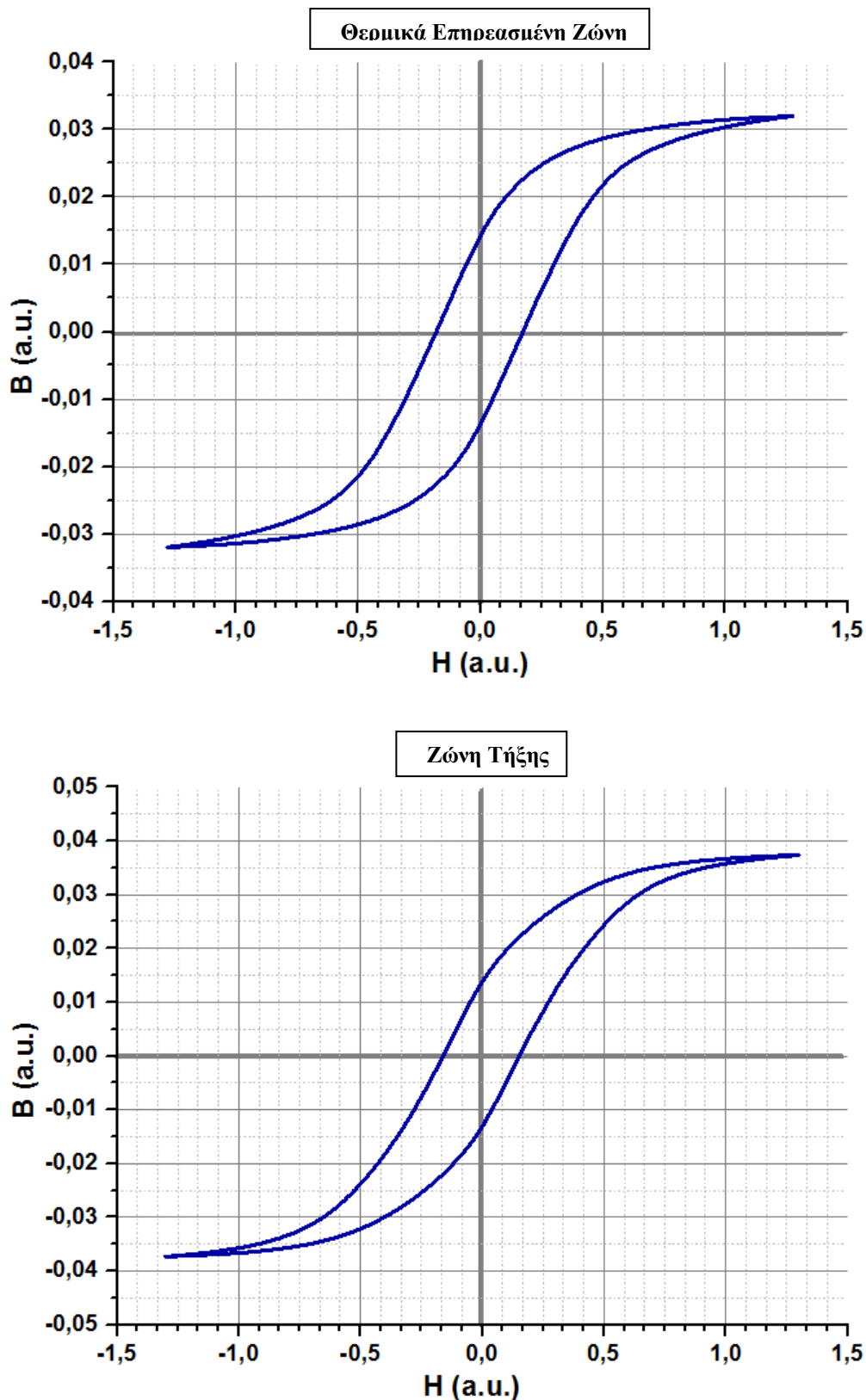
Η έντονα ανισότροπη συμπεριφορά του βασικού μετάλλου, τείνει να ομαλοποιηθεί στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη ζώνη τήξης, χωρίς ωστόσο τη καμπύλη προσαρμογής (fitting curve) δεν προκύπτει ένας τέλειος κύκλος που θα υποδείκνυε μια ισότροπη συμπεριφορά.

3.2.3 Μέτρηση βρόχων υστέρησης

Στην εικόνα 3-3 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις μαγνητικών βρόχων υστέρησης στην εκάστοτε ζώνη τη συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4. Να σημειωθεί ότι, για να λάβουμε τους βρόχους, κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές διατάξεις πηνίων διέγερσης και λήψης, καθώς οι γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμίων που αντιπροσώπευαν κάθε ζώνη της συγκόλλησης ήταν διαφορετικές. Οι παράμετροι για τη μέτρηση των βρόχων ήταν: συχνότητα διέγερσης $f=0.5\text{Hz}$ και πλάτος σήματος διέγερσης $V=2\text{Volt}$.

Αν και οι άξονες δεν είναι βαθμονομημένοι, μπορούμε να εξάγουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τη μεταβολή των διαφόρων μαγνητικών μεγεθών, όπως η μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) και το συνεκτικό πεδίο (H_c).



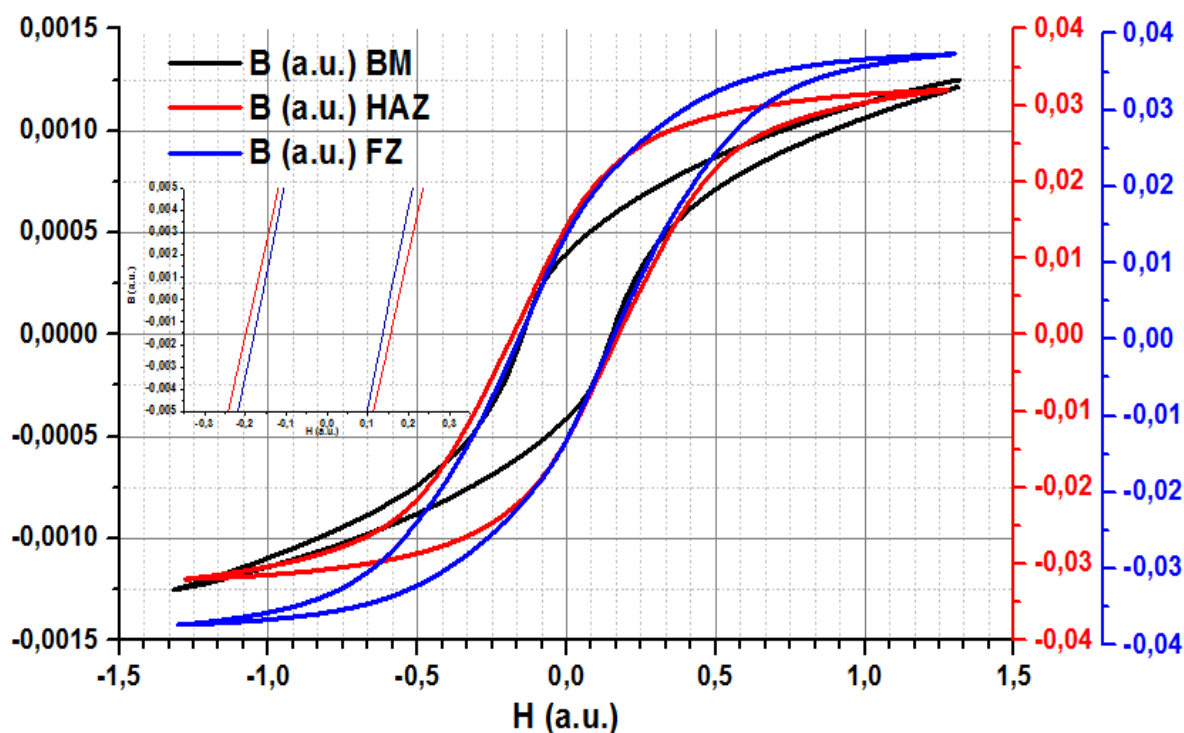


Εικόνα 3-3 : Μορφή των ελασσόνων βρόχων υστέρησης από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4.

Παρατηρούμε ότι, οι βρόχοι υστέρησης του αντιπροσωπεύουν το βασικό μέταλλο, τη θερμικά επηρεασμένη και τη ζώνη τήξης μεταβάλλονται σημαντικά σε κάθε θερμοδυναμικό σύστημα (εικόνα 3-3). Εμφανίζοντας σε μία γραφική παράσταση τους

βρόχους υστέρησης κάθε ζώνης συγκόλλησης (εικόνα 3-4) παρατηρείται ότι ο βρόχος υστέρησης του μετάλλου βάσης (μαύρη καμπύλη) είναι στενότερος, χαμηλότερος και με τη μικρότερη κλίση (στρεφόμενος προς τα δεξιά), συγκριτικά με τους υπόλοιπους. Επίσης, η πτώση των τιμών της μαγνητικής επαγωγής την κατάσταση μαγνητικού κορεσμού (B_s) καθώς το εξωτερικό πεδίο μειώνεται, είναι πιο απότομη.

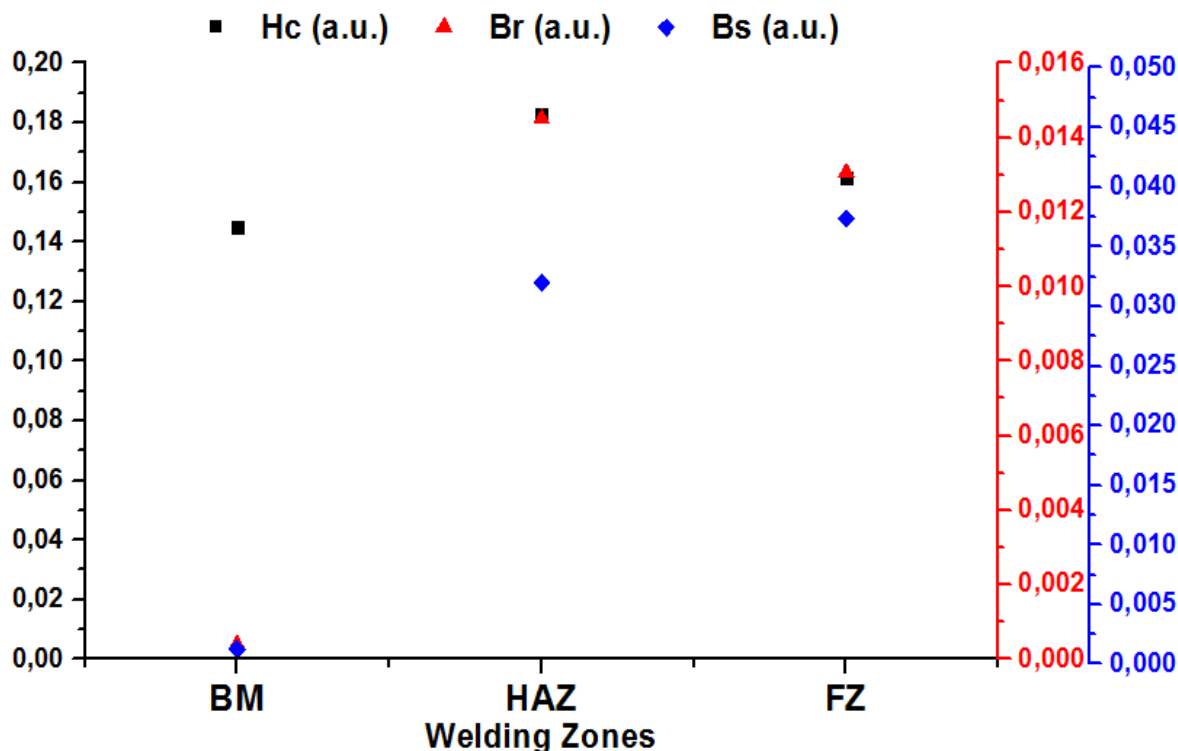
Αντίθετα, οι βρόχοι υστέρησης της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (κόκκινη καμπύλη) και της ζώνης τήξης (μπλε γραμμή) είναι υψηλότεροι και πλησιάζουν τον κατακόρυφο άξονα. Το εύρος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό του βρόχου του βασικού μετάλλου. Μάλιστα, ο βρόχος υστέρησης της ζώνης τήξης είναι στενότερος από αυτόν της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.



Εικόνα 3-4 : Σύγκριση ελασσόνων βρόχων υστέρησης από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4.

Στην εικόνα 3-5 παρουσιάζονται οι μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων (H_c , B_r , B_s) που προκύπτουν από τους αντίστοιχους βρόχους υστέρησης κάθε ζώνης συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το βασικό μέταλλο είναι μαλακότερο μαγνητικά, ενώ αντίθετα η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι σκληρότερη μαγνητικά. Επίσης, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη εμφανίζει υψηλότερη μαγνητική επαγωγή στην απουσία μαγνητικού πεδίου, ενώ η ζώνη τήξης εμφανίζει την υψηλότερη τιμή μαγνητικής επαγωγής κορεσμού.

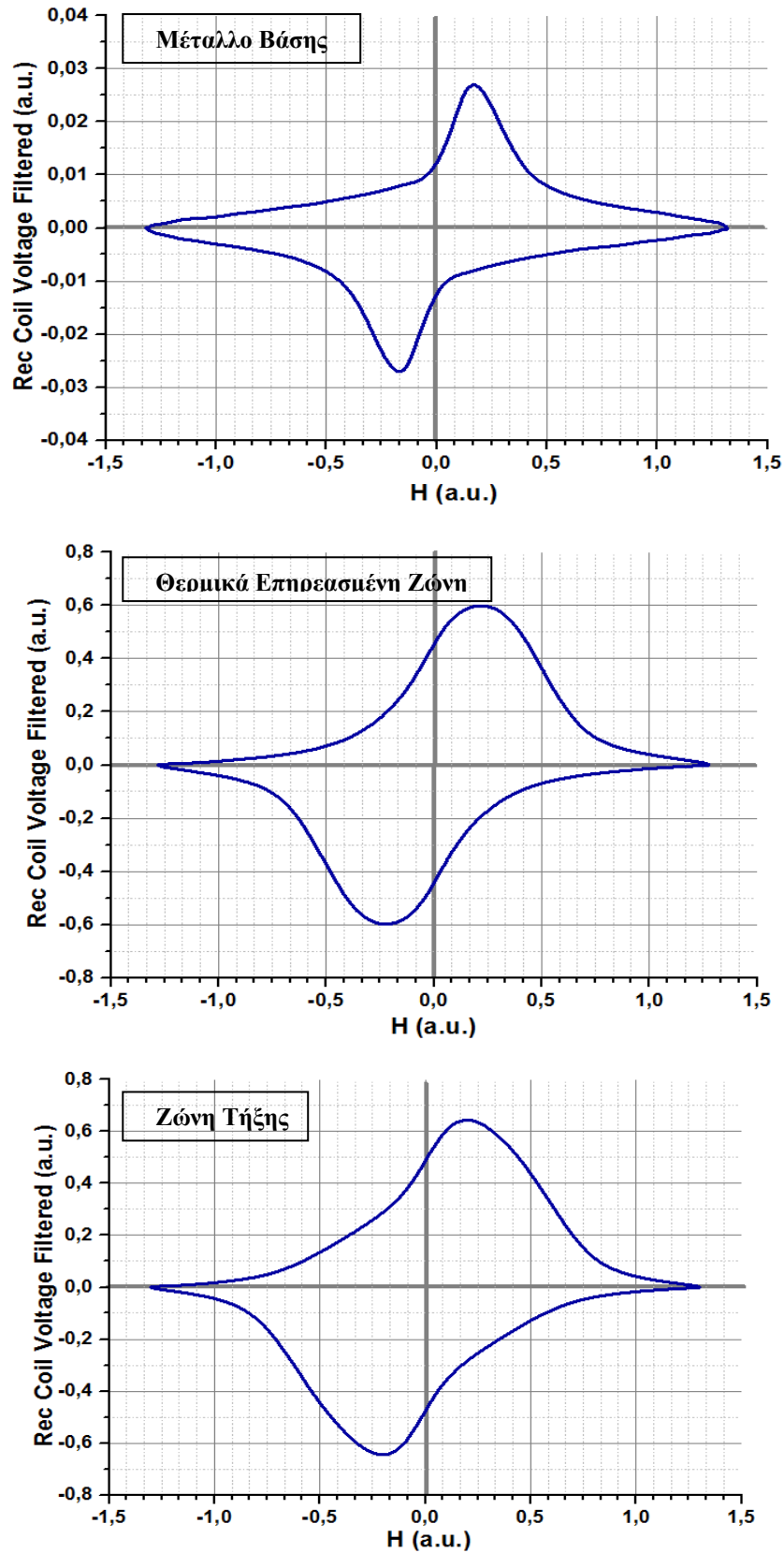
Να σημειωθεί ότι, η μορφή των βρόχων υστέρησης της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης τήξης που τείνει να γίνει τετράγωνη, υποδηλώνει ότι η μαγνητική μέτρηση πραγματοποιούνταν εκτός του εύκολου άξονα μαγνήτισης.



Εικόνα 3-5 : Μαγνητικές παράμετροι από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4.

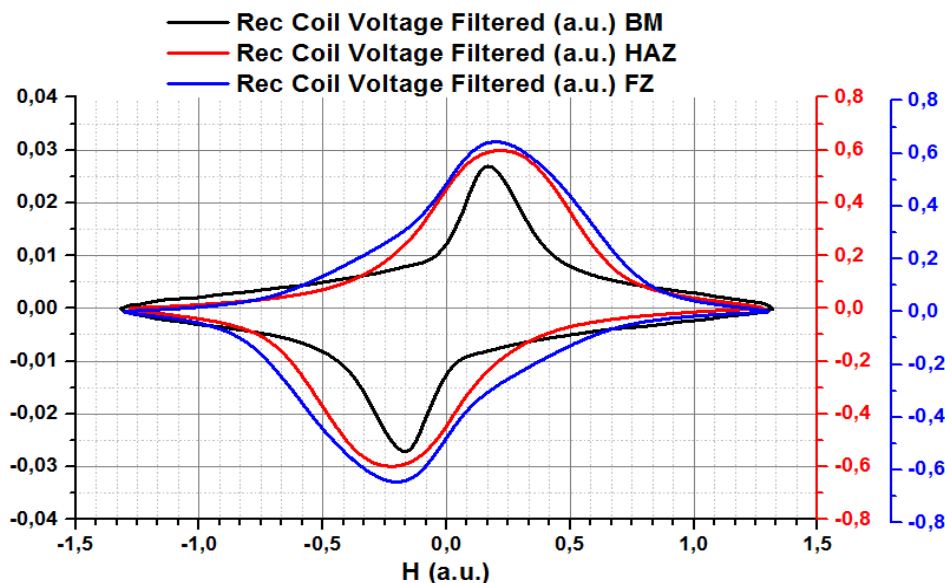
Αν και το εκάστοτε δείγμα τοποθετείται στο εσωτερικό της διάταξης των πηνίων, με τον άξονα της διάταξης παράλληλα στη διεύθυνση της συγκόλλησης η μέτρηση των ελάσσονων βρόχων υστέρησης δεν πραγματοποιείται πάντοτε στους εύκολους άξονες της μαγνήτισης, γεγονός που αποδεικνύεται από τη διακύμανση των μαγνητικών παραμέτρων. Η μεταβολές των τιμών είναι αποτέλεσμα της μαγνητικής ανισοτροπίας που παρουσιάζουν οι ζώνες τις συγκόλλησης.

Στην εικόνα 3-6 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, οι μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Είναι αξιοσημείωτη η μορφή της καμπύλης της μαγνητικής διαπερατότητας που περιγράφει τη διακύμανση της μαγνητική τιμής στην ανεπηρέαστη ζώνη της συγκόλλησης. Η πτώση της μαγνητικής διαπερατότητας στο μέταλλο βάσης δηλώνει ότι η μέτρηση του βρόχου δεν πραγματοποιείται στον εύκολο άξονα της μαγνήτισης.



Εικόνα 3-6 : Μορφή μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμι #4.

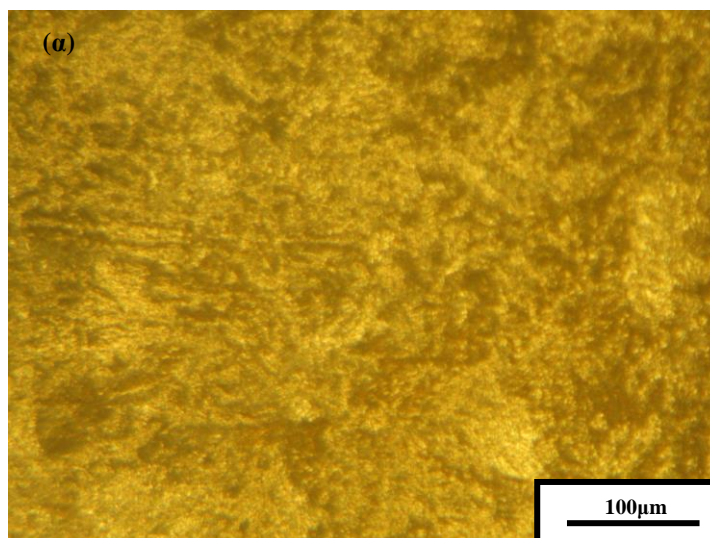
Στην εικόνα 3-7 παρουσιάζονται οι μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο για κάθε ζώνης συγκόλλησης.

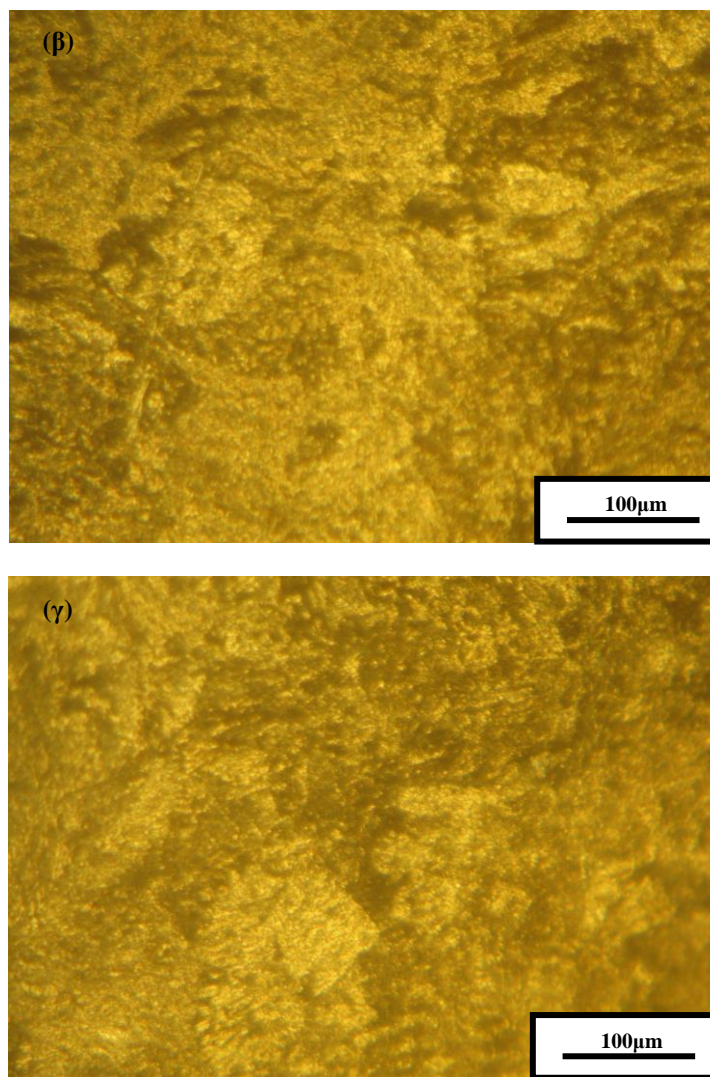


Εικόνα 3-7 : Μαγνητική διαπερατότητα από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δοκίμιο #4.

3.2.4 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω οπτικού μικροσκοπίου

Από τις εικόνες οπτικού μικροσκοπίου παρατηρούμε, στο μέταλλο βάσης του δοκιμίου #1 (εικόνα 3-8α), την ύπαρξη κόκκων σεμεντίτη ή μαρτενσίτη (μαύρη περιοχή) και την ανάπτυξη φερρίτη (ανοιχτόχρωμη περιοχή) στα όρια των κόκκων του. Ωστόσο, λόγω της μικρής μεγέθυνσης που επιλέχθηκε στο οπτικό μικροσκόπιο δεν διακρίνονται ευκρινώς. Είναι δυνατό όμως να παρατηρηθεί η ετεροτροπία στον προσανατολισμό ανάπτυξης των κόκκων. Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνα 3-8β) παρατηρούνται διευρυμένοι κόκκοι φερρίτη, όπως και στη ζώνη τήξης (εικόνα 3-8γ) βάσης του δοκιμίου #1.





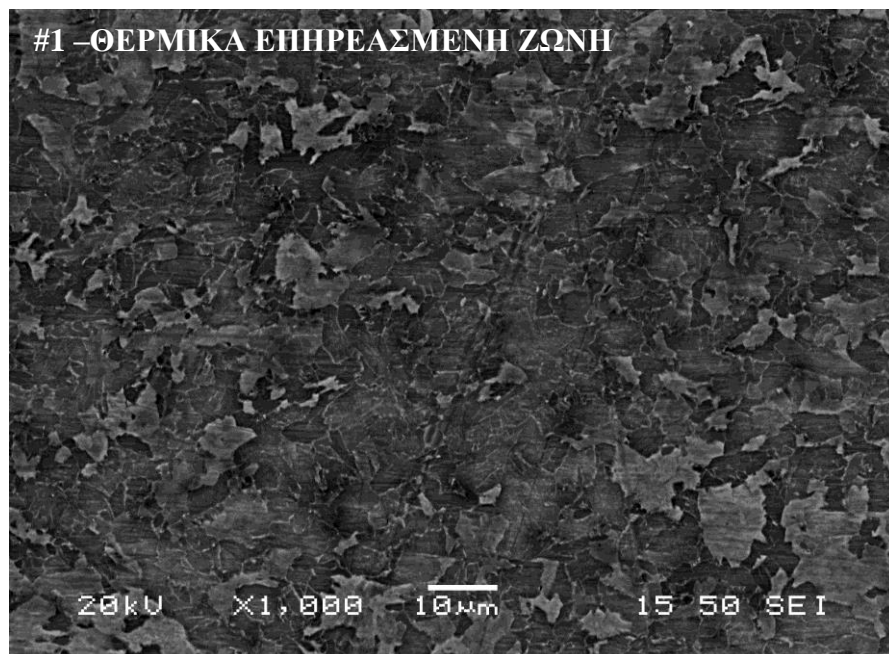
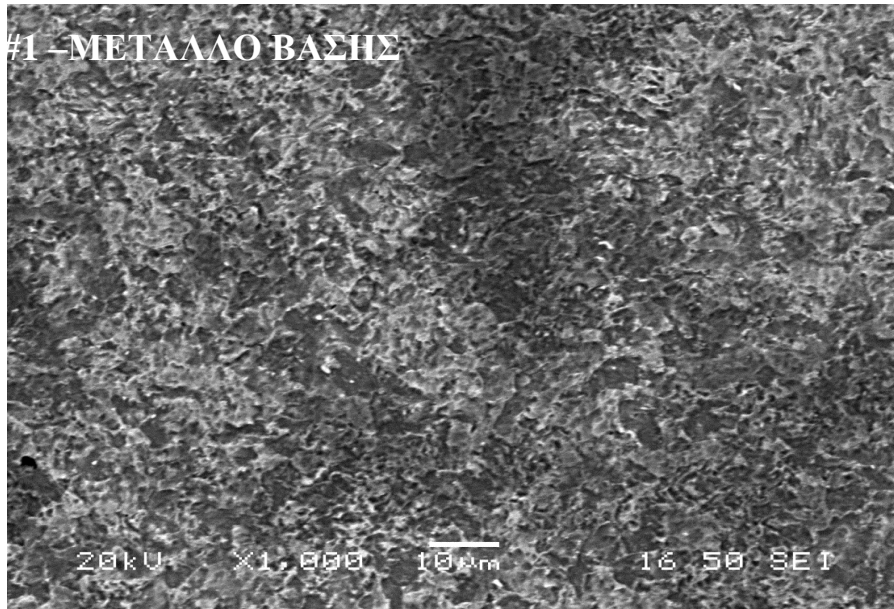
Εικόνα 3-8: Εικόνες οπτικού μικροσκοπίου από (α) το μέταλλο βάσης, (β) τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και (γ) τη ζώνη τήξης για το συγκολλημένο δείγμα #1.

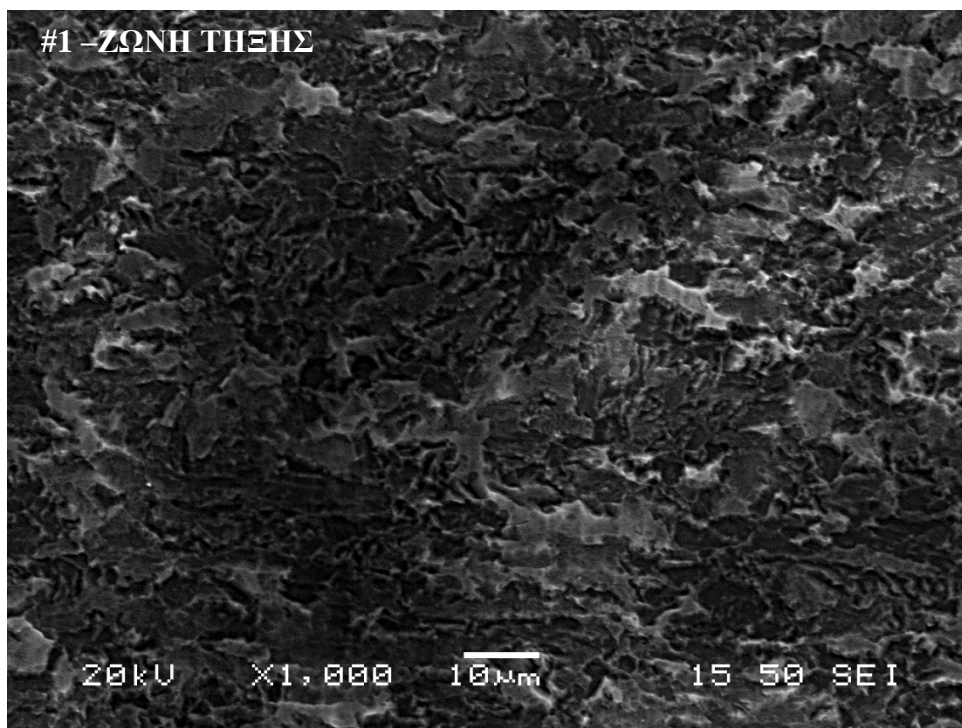
Η περιορισμένη αναλυτική ικανότητα του μικροσκοπίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή ευκρίνεια των εικόνων επιτρέπουν την λεπτομερή απεικόνιση των μικροδομικών χαρακτηριστικών της εκάστοτε ζώνης της συγκόλλησης, καθώς επίσης και του προσδιορισμού του μέσου μεγέθους των κόκκων σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Για το λόγω αυτό, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω μελέτη της κάθε ζώνης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης τόσο του δείγματος #1, όσο και των δειγμάτων #3 και #4.

3.2.5 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

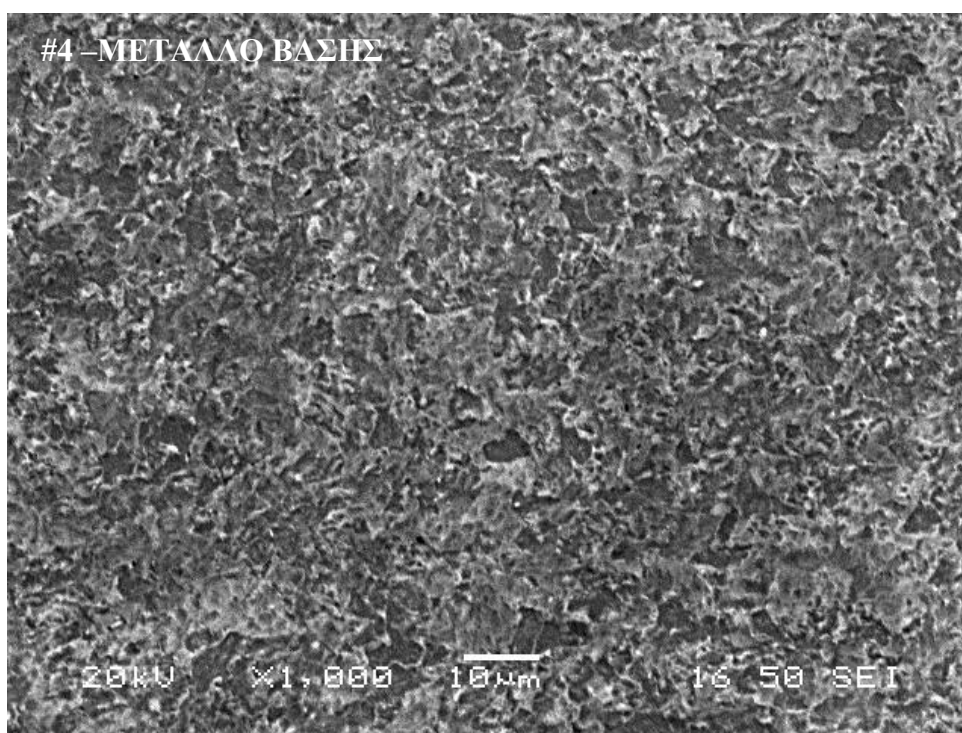
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι εικόνες που ελήφθησαν, μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, από τα συγκολλημένα δοκίμια #1, #4 και #5. Οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων από κάθε συγκολλημένο δείγμα περιλαμβάνουν κάθε ζώνη συγκόλλησης συμπεριλαμβανομένων των FZ, HAZ και BM. Η Ζώνη τήξης (FZ)

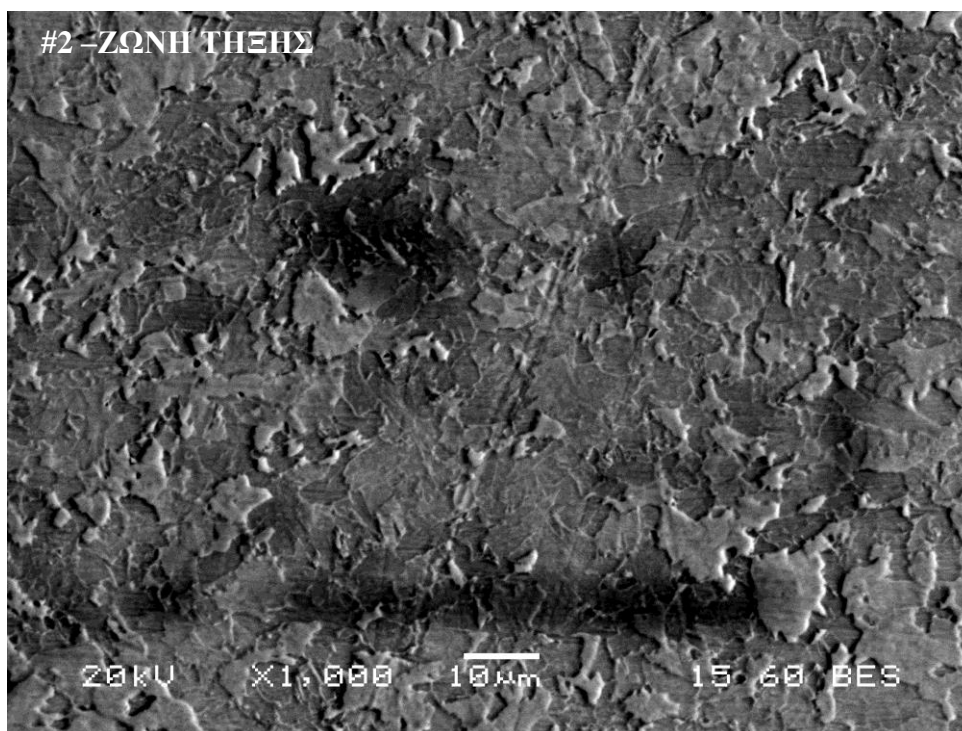
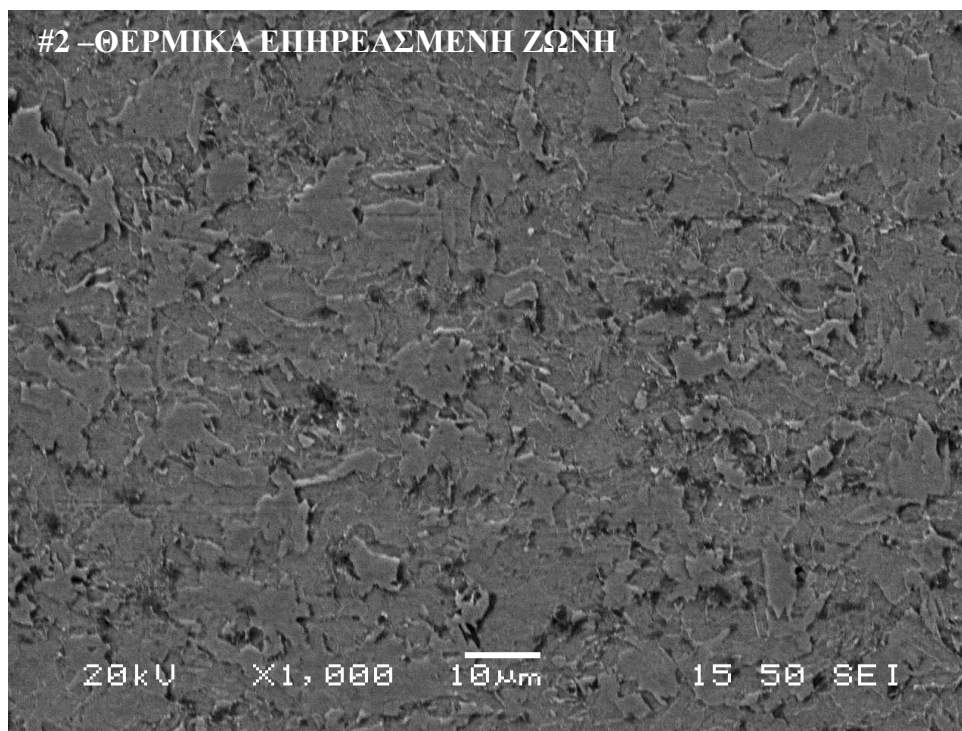
επανατήκεται και στερεοποιείται εκ νέου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης, ενώ η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) αν και δεν τήκεται υφίσταται μικροδομικές αλλαγές λόγω μετασχηματισμού φάσεων. Το μέταλλο βάσης είναι η περιοχή που παραμένει ανεπηρέαστη κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Το συνολικό πλάτος της FZ και της HAZ ήταν περίπου 12-15 mm και 25-30 mm, αντίστοιχα.



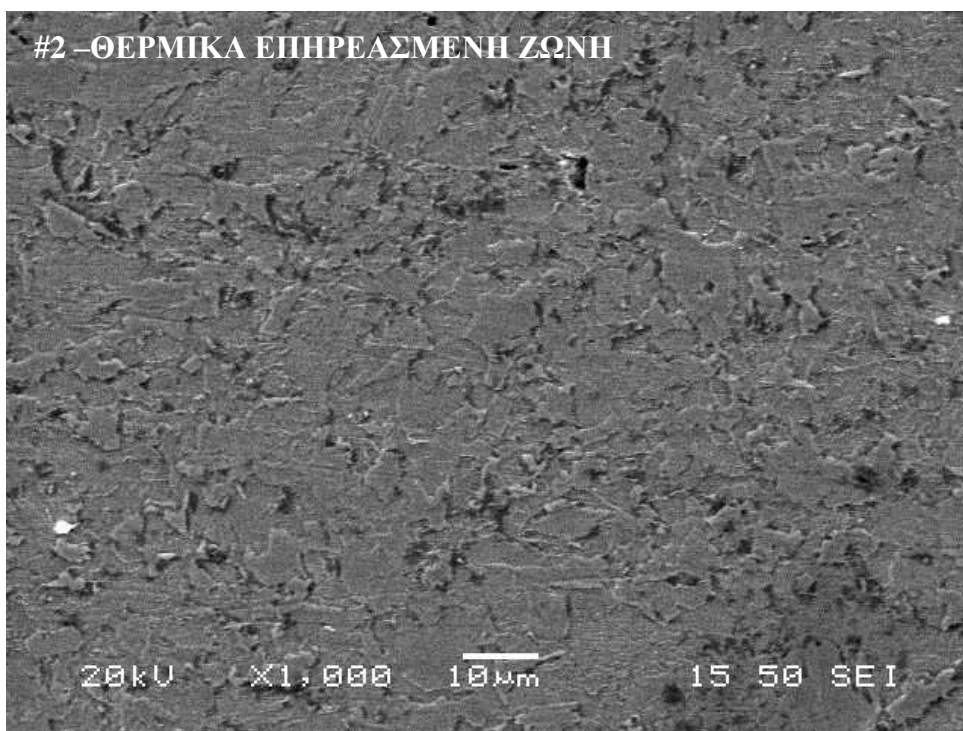
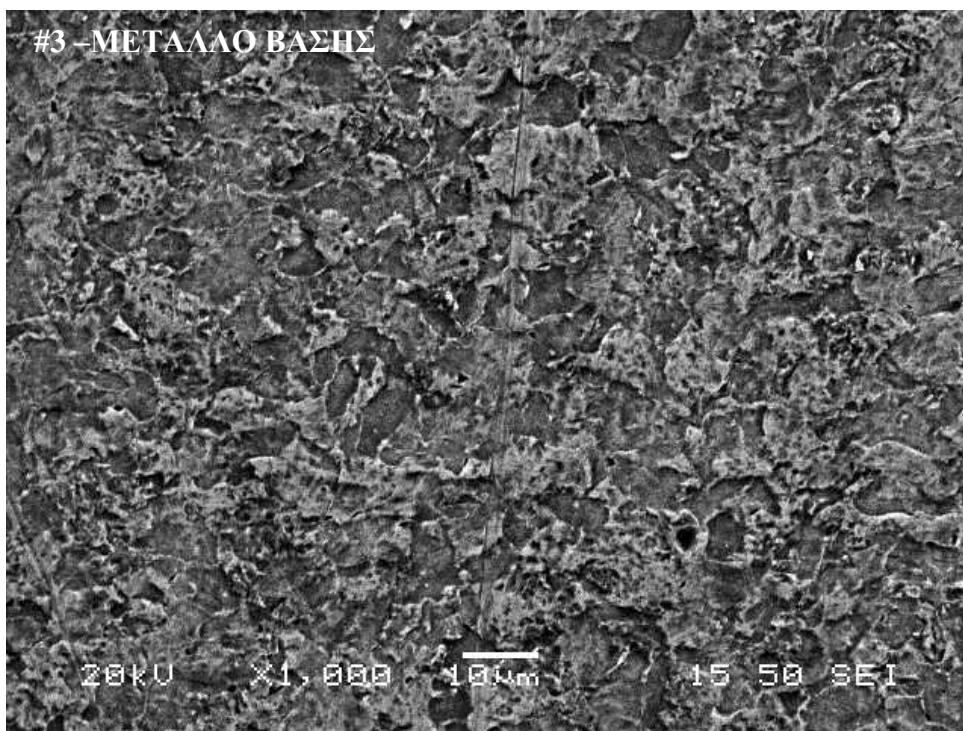


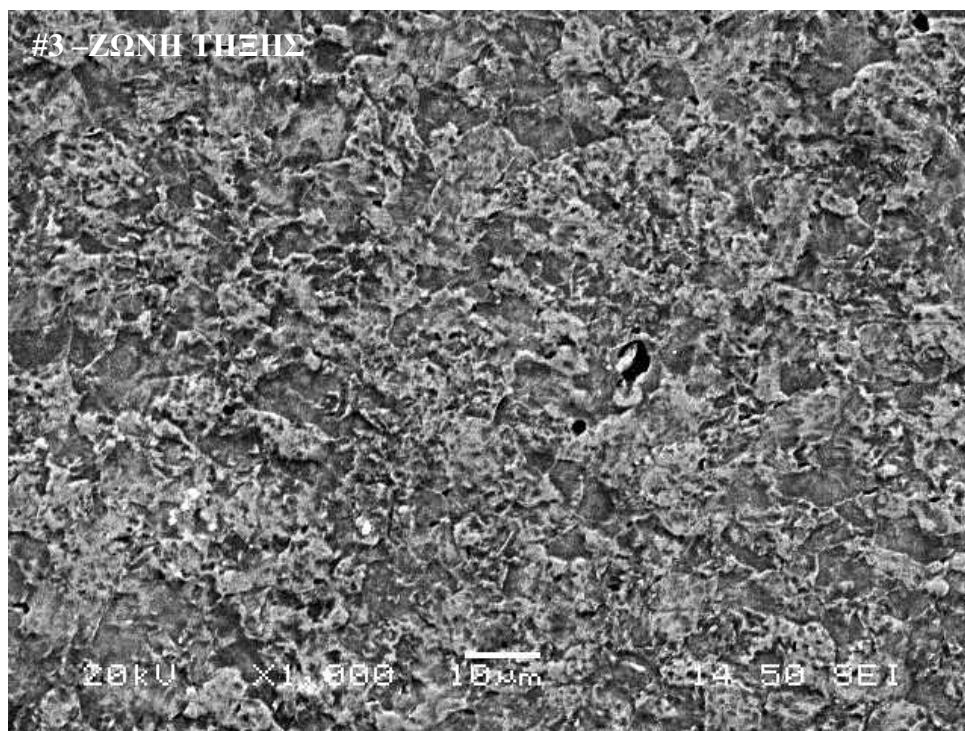
Εικόνα 3-9: Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης από κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το συγκολλημένο δείγμα #1.





Εικόνα 3-10: Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης από κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το συγκολλημένο δείγμα #4.





Εικόνα 3-11: Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης από κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το συγκολλημένο δείγμα #5.

Σε κάθε συγκολλημένο δείγμα που παρατηρήθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι εμφανές ότι απουσιάζει η τυπική δενδριτική δομή στη ζώνη τήξης, η οποία παρουσιάζει μια χοντρόκοκκη μορφολογία. Η ζώνη αυτή αποτελείται κυρίως από βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite), ενώ στα όρια των κόκκων του εμφανίζει προευθηκτοειδή φερρίτη και φερρίτη Widmanstätten.

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη μπαινίτη (bainite), πολυγωνικό φερρίτη (polygonal ferrite) και βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite). Το μέγεθος των κόκκων μεταβάλλεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη ζώνη τήξης. Η χοντρόκοκκη μορφολογία της ζώνης αυτής οφείλεται στην υψηλή θερμική ισχύ της διαδικασίας της συγκόλλησης.

Σε ό,τι αφορά το μέταλλο βάσης, αν και αναμένονταν να παρατηρηθεί η τυπική φερριτοπερλιτική δομή, οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων έδειξαν ότι η ζώνη αυτή αποτελείται από μπαινίτη και βελονοειδή φερρίτη και χαρακτηρίζεται από λεπτοκρυσταλλική μορφολογία. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές [76-80] η τελική αυτή μικροδομή του παρόντος χάλυβα μπορεί να είναι αποτέλεσμα της βελτιωμένης ταχύτητας απόψυξης και της μείωσης της κατώτερης θερμοκρασίας απόψυξης (cooling interrupt temperature). Σύμφωνα με τις ίδιες αναφορές, ο βελονοειδής φερρίτης βελτιώνει

τη σκληρότητα του χάλυβα, ενώ η λεπτοκρυσταλλική μορφολογία του μεγιστοποιεί την αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών μέσω της εμφάνισης σπηλαιώσεων.

3.2.6 Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

Μέσω γενικευμένων και σημειακών χημικών μικροαναλύσεων προσδιορίστηκε, τόσο σε περι-κρυσταλλικές όσο και σε ενδο-κρυσταλλικές θέσεις, η κατά βάρος περιεκτικότητα των κύριων κραματικών στοιχείων του υλικού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης και εμφανίζονται στον πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Κατά βάρος χημική σύσταση κάθε ζώνη της συγκόλλησης του συγκολλημένου δοκιμίου #5.

| Ανιχνεύσιμα Στοιχεία | wt% | | |
|-------------------------|---------------|-----------------------------|------------|
| | Μέταλλο Βάσης | Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | Ζώνη τήξης |
| C | 0.067 | 0.067 | 0.067 |
| Mn | 1.318 | 1.297 | 1.270 |
| Ti | 0.015 | 0.010 | 0.006 |
| Si | 0.104 | 0.136 | 0.206 |
| Nb | 0.047 | 0.040 | 0.028 |
| Cr | 0.164 | 0.147 | 0.127 |
| Mo | 0.240 | 0.121 | 0.017 |
| V | 0.050 | 0.034 | 0.014 |
| Al | 0.023 | 0.020 | 0.019 |

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 3-1, διαπιστώνεται ότι ο χάλυβας περιέχει Nb, V και Ti ως μικρο-κραματικά στοιχεία. Τα χημικά αυτά στοιχεία αποτελούν και στοιχεία σκλήρυνσης (precipitate hardening elements) καθώς προσδίδουν στο μεταλλικό υλικό ένα συνδυασμό υψηλής αντοχής και βελτιωμένης δυσθραυστότητας. Επίσης, μειώνουν τη θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμών φάσεων, μέσω του σχηματισμού καρβιδίων, που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό λεπτοκρυσταλλικών μπαινιτικών μικροδομών που προσδίδουν μέγιστη αντοχή στη ζώνη της συγκόλλησης [81].

Η αυξημένη ποσοστιαία συμμετοχή του Si και του Al στο χάλυβα, πιθανόν να οφείλεται στην προσπάθεια της μείωσης της παρουσίας ακαθαρσιών (P, S) στο χάλυβα κατά την παραγωγική διαδικασία [81].

Συγκρίνοντας, τη χημική σύσταση του μετάλλου βάσης, με αυτή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης τήξης, παρατηρείται ότι η παρουσία του Nb, V και Ti αυξάνεται σημαντικά πλησιάζοντας το ποσοστό του 50% στη ζώνη τήξης.

3.2.7 Μικρο-σκληρομετρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας, με τη μέθοδο Vickers, σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του συγκολλημένου υλικού #2. Σε κάθε σημείο λαμβάνονταν 10 μετρήσεις με σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας της μέτρησης. Στον πίνακα 3-2 και πίνακα 3-3 παρουσιάζονται οι τιμές της μικροσκληρότητας της εκάστοτε ζώνης συγκόλλησης, καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

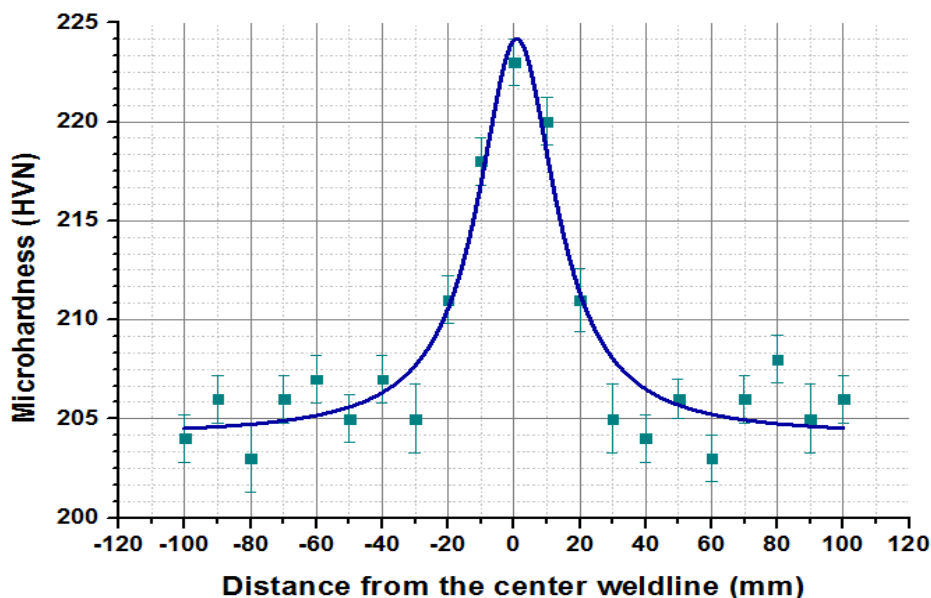
Πίνακας 3-2: Τιμές μικροσκληρότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για τα συγκολλημένα δοκίμια στην κάθετη διατομή του συγκολλημένου δοκιμίου #2.

| | Μέταλλο Βάσης | Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | Ζώνη Τήξης |
|------------------------|---------------|--------------------------|------------|
| Μικροσκληρότητα | 193,5 | 202,5 | 214,3 |
| Τυπική απόκλιση | ± 5,3 | ± 1,7 | ± 6,2 |

Πίνακας 3-3: Τιμές μικροσκληρότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για τα συγκολλημένα δοκίμια στην επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου #2.

| | Μέταλλο Βάσης | Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη | Ζώνη τήξης |
|------------------------|---------------|--------------------------|------------|
| Μικροσκληρότητα | 207,5 | 214,8 | 218,8 |
| Τυπική απόκλιση | ± 7,4 | ± 4,4 | ± 5,6 |

Η κατανομή των τιμών της μικροσκληρότητας σε όλη την επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #2 παρουσιάζεται στην εικόνα 3-12.



Εικόνα 3-12: Κατανομή των τιμών της μικροσκληρότητας Vicker's στην επιφάνεια του συγκολλημένου δείγματος #2.

Οι τιμές της μικροσκληρότητας μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από τη ζώνη τήξης προς το μέταλλο της βάσης. Η σκληρότητα της ζώνης τήξης έχει την υψηλότερη τιμή πιθανόν λόγω της παρουσίας προϊόντων μετασχηματισμού φάσεων κατώτερου ενεργειακού δυναμικού (lower temperature transformation products) όπως είναι ο μπαινίτης και ο φερρίτης Widmanstätten.

3.2.8 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ - ϵ %)

Στον πίνακα 3-4, ποσοτικοποιούνται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (σ - ϵ %) του συγκολλημένου δοκιμίου #5.

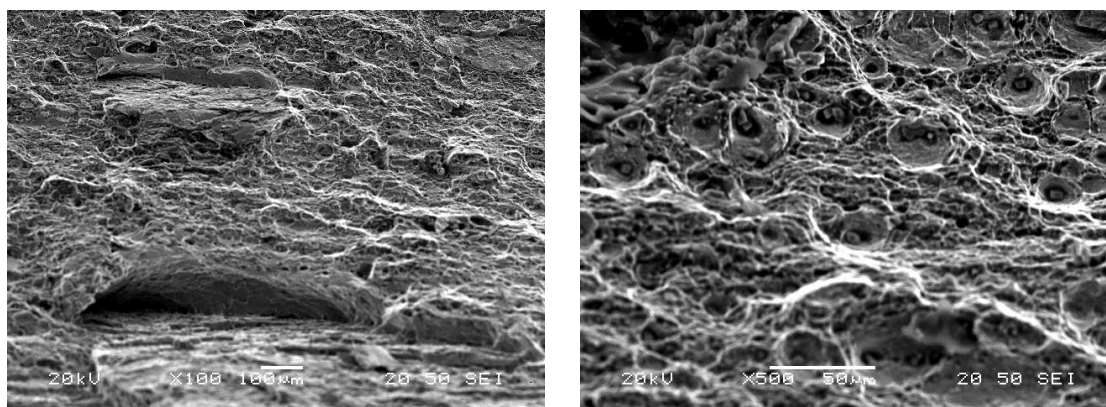
Πίνακας 3-4: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

| Όριο Διαρροής (Yield Strength, YS) (MPa) | Μέγιστη Εφελκυστική Τάση Θραύσης (Ultimate Tensile Strength, UTS) (MPa) | Ολκιμότητα (Elongation) % | YS/ UTS |
|--|---|---------------------------------|---------|
| 490 | 552 | 21 | 0.89 |

Το συγκολλημένο δείγμα #5 εφελκυσμού έσπασε έξω από τη ζώνη της συγκόλλησης, γεγονός που υποδηλώνει ότι, η πτώση της μηχανικής σκληρότητας (σε αντιδιαστολή με τη μαγνητική σκληρότητα) στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποπαράγραφο, δεν είναι επιζήμια.

3.2.9 Θραυστογραφίες

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η θραυστιγενής επιφάνεια του συγκολλημένου δοκιμίου #5, όπως προέκυψε από τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (εικόνες 3-13).



Εικόνα 3-13 : Εικόνες της θραυστιγενούς επιφάνειας του συγκολλημένου δοκιμίου #5. Οι εικόνες ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Όπως προκύπτει, οι θραυσιγενείς επιφάνειες του συγκολλημένου δοκιμίου #5 εμφανίζουν ένα μικτό τύπο θραύσης, δηλαδή παρουσιάζονται περιοχές όλκιμης και ψαθυρής θραύσης. Χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης είναι η εμφάνιση κρατήρων (dimples), ενώ της ψαθυρής θραύσης είναι η εμφάνιση αποσχίσεων (river patterns) και σπηλαιώσεων (cleavages). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η θραύση του συγκολλημένου δοκιμίου επήλθε στο μέταλλο βάσης και όχι στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Οι κρατήρες που εμφανίζονται παρουσιάζουν κυκλικό άνοιγμα διακυμαινόμενου εύρους και κατανέμονται ετερότροπα στην επιφάνεια. Η μορφολογία της κορυφογραμμής των σπηλαιώσεων παρουσιάζεται έντονα παραμορφωμένη. Είναι εμφανές ότι το ποσοστό της όλκιμης θραύσης είναι υψηλότερο από αυτό της ψαθυρής και αυτό οφείλεται στην παρουσία των κόκκων μπαινίτη στη φερριτική μήτρα, καθώς παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην παραμόρφωση υπό συνθήκες δυναμικής καταπόνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η συσχέτιση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με τις τιμές των τιμών της μικροσκληρότητας σε συγκολλημένα δείγματα που προέρχονταν από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε.. Επιπλέον, κρίθηκε αναγκαίο να προσδιοριστεί και η ποιότητα του χάλυβα στην οποία ανήκουν τα υπό εξέταση δείγματα, ώστε να πραγματοποιηθεί μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη του υλικού.

4.2 Προσδιορισμός της ποιότητας του χάλυβα στην οποία ανήκουν τα υπό εξέταση συγκολλημένα δοκίμια

Όπως προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις της μικροσκληρότητας και της καμπύλης τάσεως – παραμόρφωσης (σ - $\epsilon\%$), τον προσδιορισμό, μέσω EDS, της ποσοστιαίας συμμετοχής των κραματικών στοιχείων του χάλυβα και τέλος το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό των συγκολλημένων δοκιμίων, τα δείγματα που μας δόθηκαν από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. ανήκουν στην ποιότητα API 5L X65.

Συγκεκριμένα, στους πίνακες που ακολουθούν, παρατίθενται οι πειραματικές και εργαστηριακές μετρήσεις και οι υποδεικνυόμενες τιμές σύμφωνα με το πρότυπο API 5L. Από τη σύγκριση των θεωρητικών τιμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται η προαναφερόμενη ποιότητα του χάλυβα.

Πίνακας 4-1: Συγκριτικός πίνακας μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών (σύμφωνα με το πρότυπο API 5L) τιμών της ποσοστιαίας συμμετοχής κραματικών στοιχείων στο χάλυβα X65.

| Ανιχνεύσιμα Στοιχεία | wt% | |
|----------------------|---------------|-------------|
| | Μέταλλο Βάσης | API 5L |
| C | 0.067 | 0.220 (max) |
| Mn | 1.318 | 1.450 (max) |
| Ti | 0.015 | 0.060 (max) |
| Si | 0.104 | - |
| Nb | 0.047 | - |
| Cr | 0.164 | - |
| Mo | 0.240 | - |
| V | 0.050 | - |
| Al | 0.023 | - |

Πίνακας 4-2: Συγκριτικός πίνακας μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών (σύμφωνα με το πρότυπο API 5L) τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων στο χάλυβα X65.

| | #5 | API 5L | |
|--|-------|--------|-----|
| | | max | min |
| Όριο Διαρροής (Yield Strength, YS) (MPa) | 490 | 600 | 448 |
| Μέγιστη Εφελκυστική Τάση Θραύσης (Ultimate Tensile Strength, UTS) (MPa) | 552 | 758 | 531 |
| Ολκιμότητα (Elongation, ε) (%) | 21 | - | - |
| YS/ UTS | 0.89 | 0.93 | - |
| Hardness | 207.5 | 350 | - |

4.3 Συσχέτιση της κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά των συγκολλημένων δοκιμίων

Η χωρική κατανομή του μαγνητικού θορύβου παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και δεν εμφανίζει ομότροπες περιοχές ανάπτυξής του, ώστε να μπορούν να διαχωριστούν οι εκάστοτε ζώνες της συγκόλλησης σε όλα τα δοκίμια που μετρήθηκαν (#1, #4 και #5).

Παρατηρώντας τη μικροδομή της εκάστοτε ζώνης της συγκόλλησης για το δείγμα #4 και ποσοτικοποιώντας το κλάσμα όγκου συμμετοχής της κάθε φάσης σε κάθε ζώνη, καταλήγουμε στα αποτελέσματα που παρατίθενται στον πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Κλάσμα όγκου συμμετοχής των φάσεων που παρατηρούνται, με το λογισμικό Image Analyzer, σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης στο δείγμα #4.

| #4 | Επί τοις εκατό συμμετοχή φάσεων | | | | |
|------------|---------------------------------|------------|------------------------|--------------------------|----------------------|
| | Βελονοειδής Φερρίτης | Μπαινίτης | Φερρίτης Widmanstätten | Προεττηκτοειδής Φερρίτης | Πολυγωνικός Φερρίτης |
| BM | 49,0 ± 8,7 | 51 ± 7,6 | - | - | - |
| HAZ | 35,0 ± 9,4 | 14,5 ± 5,5 | - | - | 50,5 ± 3,6 |
| FZ | 95,8 ± 4,1 | - | 2,5 ± 0,6 | 1,6 ± 0,2 | - |

Η παρουσία βελονοειδούς φερρίτη σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλές τιμές του μαγνητικού θορύβου. Επιπλέον η παρουσία φερρίτη Widmanstätten στη ζώνη τήξης οδηγεί στις σχετικά υψηλότερες τιμές της μαγνητικής απόκρισης, λόγω της γωνιώδους μορφολογίας του. Να σημειωθεί ότι στη ζώνη αυτή παρουσιάζονται και οι μέγιστες τιμές της μικροσκληρότητας. Ωστόσο, η αυξημένη ποσοστιαία συμμετοχή του μπαινίτη στο μέταλλο βάσης και η μείωση του ποσοστού του βελονοειδούς φερρίτη συνδυαζόμενη με την παρουσία πολυγωνικού φερρίτη στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, έχει ως αποτέλεσμα τις σχετικά χαμηλότερες τιμές του θορύβου στις ζώνες αυτές.

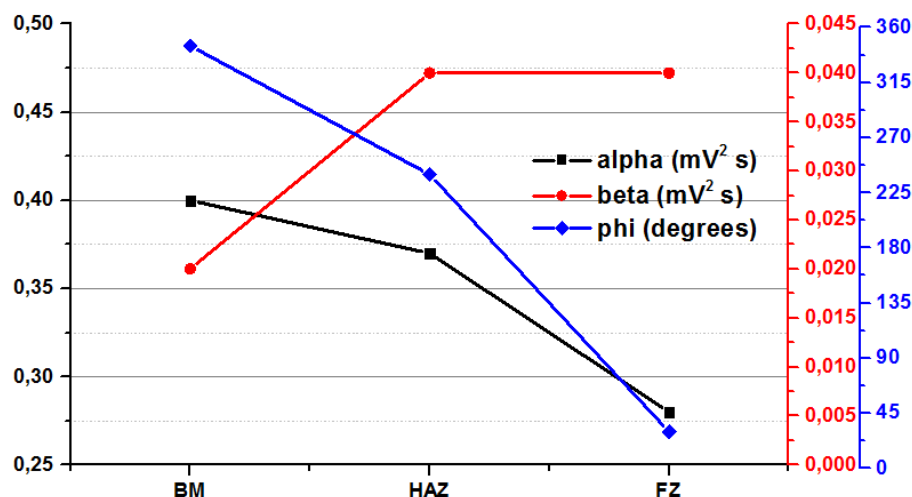
Η διεύρυνση των κόκκων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη οδηγεί στην μείωση των τιμών της μικροσκληρότητας, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στη ζώνη τήξης. Το εμβαδόν των

ορίων των κόκκων μειώνεται, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται το πλήθος των σημείων αγκύρωσης (pinning sites ή pinning centers) κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης. Συνεπώς, κατά την κίνηση τους τα μαγνητικά τοιχώματα συναντούν λιγότερα εμπόδια.

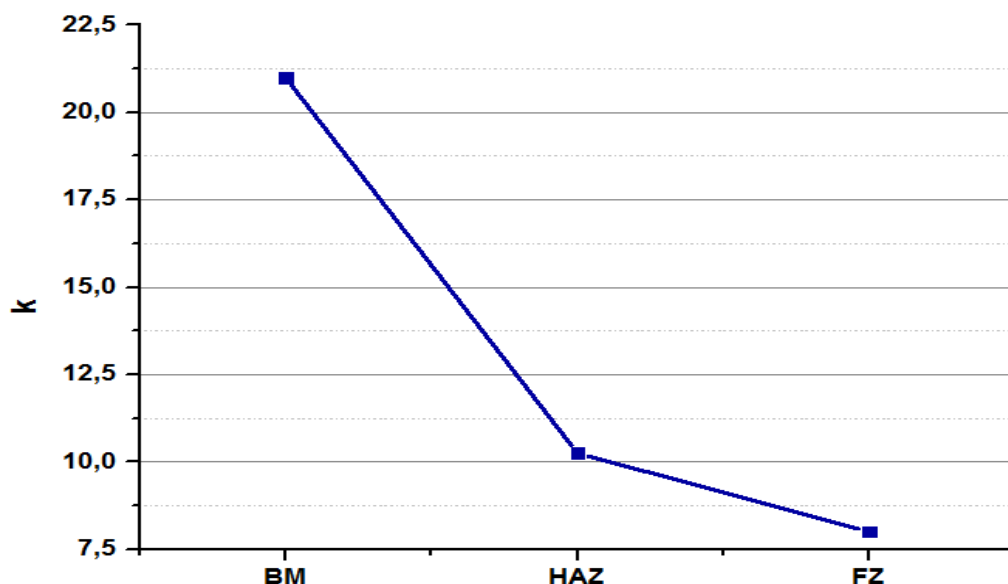
Ο μαγνητικός όμως θόρυβος δεν παρουσιάζει ευαισθησία ως προς τις μικροδομικές αλλαγές και την μορφολογική ανομοιογένεια των κόκκων. Η μέτρηση επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία τάσεων σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Ως εκ τούτου, εκτός από τις τάσεις που αναπτύσσονται στο δείγμα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το προφίλ του μαγνητικού θορύβου, αλλοιώνεται από τις τάσεις που προστίθενται στις ήδη υπάρχουσες και προέρχονται από την επιφανειακή λείανση που υπέστη το δείγμα μετά την κοπή του από το χαλυβδοσωλήνα. Επίσης, κατά μορφοποίηση του δείγματος εφελκυσμού πιθανόν να προστέθηκαν τάσεις στο δείγμα.

Οι εσωτερικές αυτές τάσεις, σε συνδυασμό με τη μαγνητική ανισοτροπία σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης έχουν ως αποτέλεσμα τις εντονότερες διακυμάνσεις του μαγνητικού θορύβου. Παρατηρώντας ωστόσο τις μεταβολές των παραμέτρων α και β της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου (εικόνα 4-1), καθώς επίσης και του παράγοντα ανισοτροπίας k (εικόνα 4-2), είναι εμφανές ότι στο βασικό μέταλλο η παράμετρος ανισοτροπίας (α) είναι υψηλότερη και μειώνεται σταδιακά καθώς κινούμαστε προς τη ζώνη τήξης. Αντίστοιχα, ο αριθμός των μαγνητικών τοιχωμάτων που συμβάλουν στη διαδικασία της μαγνήτισης είναι (β) υψηλότερος στις επηρεασμένες ζώνες της συγκόλλησης. Στην εικόνα 4-1 παρουσιάζεται επίσης και η διακύμανση του εύκολου άξονα μαγνήτισης σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Είναι εμφανές ότι κατά τη μέτρηση της γραμμικής απόκρισης του μαγνητικού θορύβου το πεδίο εφαρμόζονταν εκτός του εύκολου άξονα μαγνήτισης.

Ο παράγοντας ανισοτροπίας k παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του στο βασικό μέταλλο, ενώ λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του στη ζώνη τήξης. Η διακύμανση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς η μορφή των γωνιακών μετρήσεων τείνει να έχει κυκλική μορφή στη ζώνη τήξης, το οποίο αποτελεί ένδειξη αποκατάστασης της ισότροπης μαγνητικής συμπεριφοράς.



Εικόνα 4-1: Μεταβολές των παραμέτρων α και β της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.



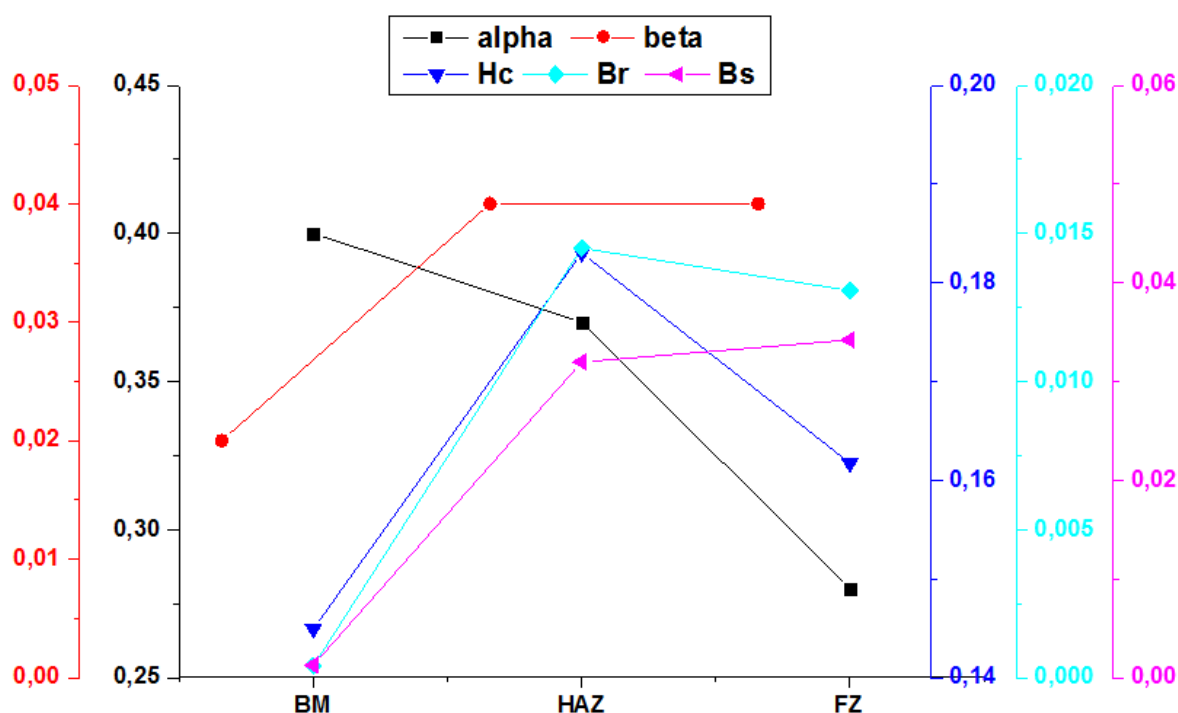
Εικόνα 4-2: Διακύμανση του παράγοντα ανισοτροπίας (k) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.

Είναι εμφανές ότι ο παράγοντας ανισοτροπίας παρουσιάζει μια μονοτονική συμπεριφορά με το αντίστροφο της μικροσκληρότητας και κατ' επέκταση με το μέσο μέγεθος του κόκκου σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Συνεπώς, δεν είναι η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου που μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης συγκόλλησης αλλά το πλήθος των μαγνητικών τοιχωμάτων 180° που συμβάλλουν στη διαδικασία της μαγνήτισης και σχετίζονται με την ισότροπη μαγνητική συμπεριφορά.

Ωστόσο και παράγοντας ανισοτροπίας είναι μια ευαίσθητη προσδιορισθείσα τιμή στις εσωτερικές τάσεις που παρουσιάζει το υπό εξέταση φερρομαγνητικό υλικό.

4.4 Συσχέτιση της κατανομής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen με τις μεταβολές άλλων μαγνητικών παραμέτρων

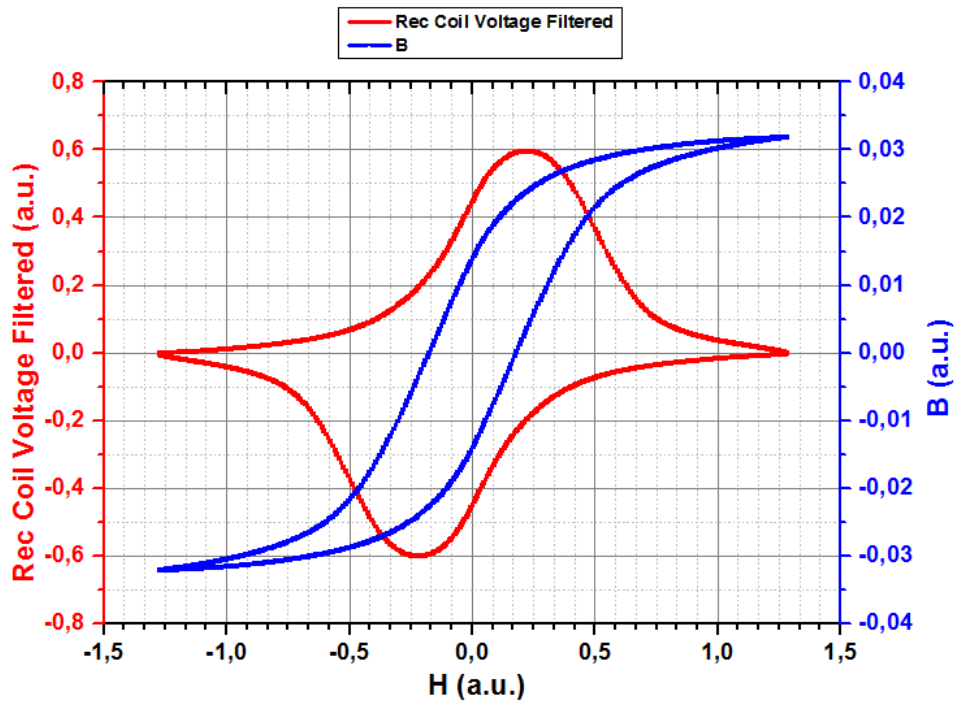
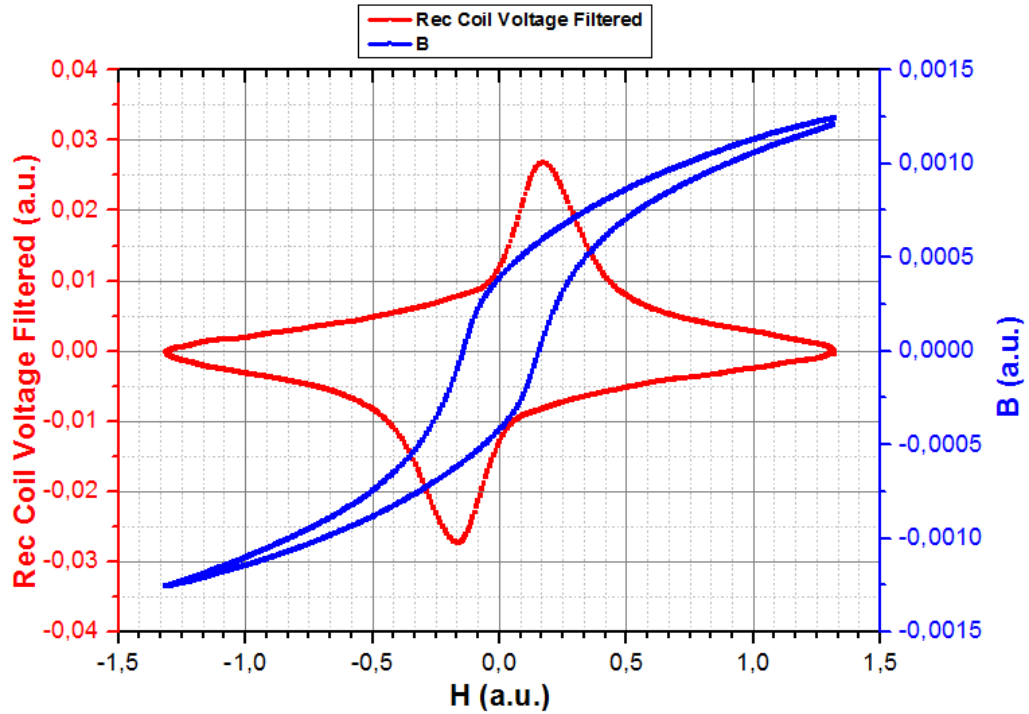
Η παράμετρος ισότροπης μαγνητικής συμπεριφοράς σχετίζεται άμεσα με τις μαγνητικές παραμέτρους που προκύπτουν από το βρόχο υστέρησης (εικόνα 4-3). Ωστόσο, η συσχέτιση σν είναι μονοτονική. Συνεπώς, δεν είναι η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου που μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης συγκόλλησης αλλά το πλήθος των μαγνητικών τοιχωμάτων 180° που συμβάλλουν στη διαδικασία της μαγνήτισης και σχετίζονται με την ισότροπη μαγνητική συμπεριφορά.

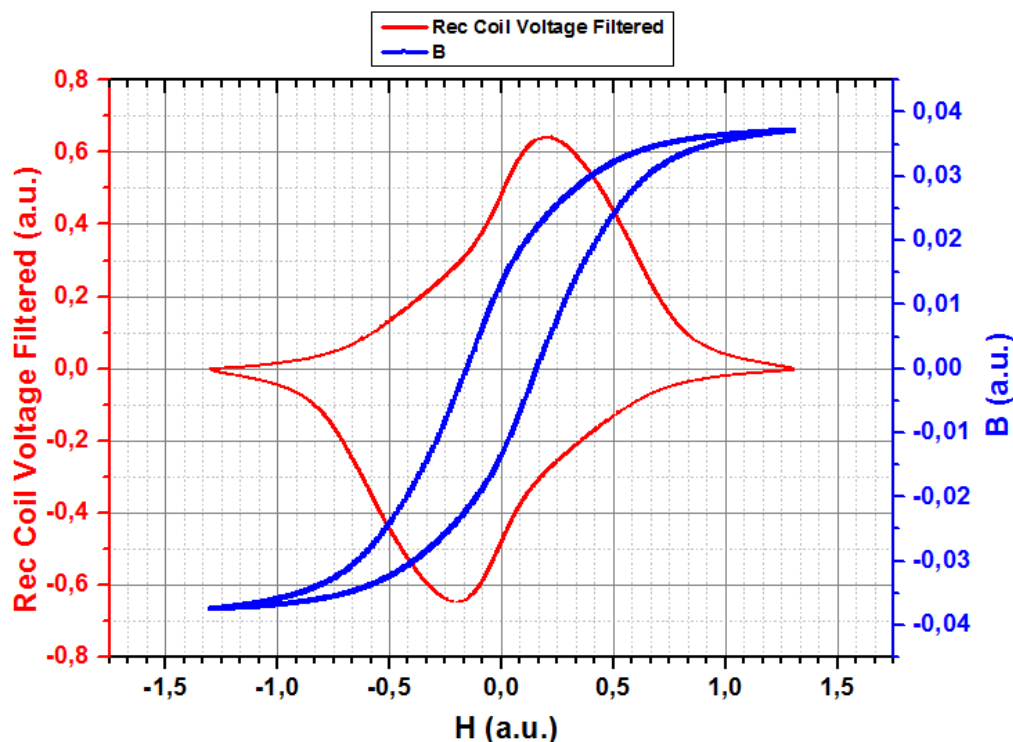


Εικόνα 4-3: Συσχέτιση της διακύμανσης των τιμών του συνεκτικού πεδίου, της παραμένουσας μαγνήτισης και της μαγνητικής διαπερατότητας με τις παραμέτρους α και β της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου Barkhausen σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.

Στην εικόνα 4-4 παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι βρόχοι υστέρησης και η μαγνητική διαπερατότητα σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το δοκίμιο #4. Είναι εμφανές ότι, όταν ο βρόχος υστέρησης εμφανίζει απότομη αλλαγή στην καμπύλωσή του τότε ο βρόχος της μαγνητικής διαπερατότητας εμφανίζεται με τη σειρά του πιο «τραχύς». Αντίστοιχα, όταν ο βρόχος υστέρησης εμφανίζει πιο ομαλή καμπύλωση, ο βρόχος της μαγνητικής διαπερατότητας διευρύνει τις κορυφές του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, είναι ανεμπόδιστη καθώς το πλήθος των ορίων των κόκκων που συναντά είναι μικρότερο. Ωστόσο, όταν

εφαρμόζονται υψηλά μαγνητικά πεδία, την κίνηση αυτή, ακολουθεί η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων παράλληλα στη διεύθυνση του πεδίου. Η κίνηση αυτή είναι απότομη και μη ομαλή και γι' αυτό ο βρόχος εμφανίζεται πιο γωνιώδης.





Εικόνα 4-4: Συσχέτιση βρόχων υστέρησης με τους βρόχους της μαγνητικής διαπερατότητας σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης για το δοκίμιο #4.

4.5 Συνοπτικά συμπεράσματα

Τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μαγνητική τεχνικής του θορύβου Barkhausen, με αυτά που προέρχονται από τις πειραματικές μετρήσεις των βρόχων υστέρησης και των τιμών της μικροσκληρότητας, καθώς επίσης και από το μικροδομικό χαρακτηρισμό των υπό εξέταση δειγμάτων, επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία της μαγνητικής απόκρισης της παραμέτρου της ενέργειας του μαγνητικού θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των μαγνητικών μετρήσεων κρίνεται αναγκαίος ο ακριβής προσδιορισμός της χημικής σύστασης των υπό εξέταση δοκιμίων μέσω φασματοσκοπίας μάζας. Με αυτό τον τρόπο θα διαπιστωθεί αν το ποσοστό του ισοδύναμου άνθρακα του κράματος είναι ανάλογο με αυτό προβλέπει το πρότυπο API 5L για την ποιότητα X65.

Επίσης, για την μείωση των τάσεων που έχουν προστεθεί στα συγκολλημένα δοκίμια από τον τόρνο, προτείνεται η διεργασία της αποτατικής απόπτωσης (stress relief annealing). Με αυτό τον τρόπο η μέτρηση της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου θα δώσει, με τη σειρά της, αξιόπιστα αποτελέσματα.

Μέσω της κατάλληλης «μαγνητικής βαθμονόμησης» ενός μη συγκολλημένου δοκιμίου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων που ενυπάρχουν στα συγκολλημένα δοκίμια με τη χρήση της μη καταστροφικής τεχνικής του μαγνητικού θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] N. Francis, R. Rube, V. Simone: “New approach for shipyard pipe production line optimisation, Ocean Engineering and Coastal Resources.” London: Taylor & Francis, 2008, Volume I, pp. 469-476.
- [2] L. Ellyn, T. Watne: “Development of Integrated Shipyard Pipe Production Facility”, Journal of Ship Production, 2009, pp.187-191.
- [3] M.P. Grover: “Fundamentals of Modern Manufacturing”, John Willey&Sons, INC., New York 2009.
- [4] S. Helber: “Performance Analysis of Flow-Lines with Nonlinear Flow of material”, Volume 473, Springer-Verlag, 2009.
- [5] F. Minami, Y. Nakano, S. Suzuki, T. Shiwaku, Y. Moriya, Y. Hagiwara, M. Toyoda: “Fracture toughness evaluation of multipass weld HAZ considering the strength mismatch effect”, Welding International, 1995, pp. 546–553.
- [6] Zhixiong Zhu, Lenka Kuzmikova, Huijun Li, Frank Barbaroa: “Effect of inter-critically reheating temperature on microstructure and properties of simulated inter-critically reheated coarse grained heat affected zone in X70 steel”, Materials Science & Engineering, A605, 2014, pp. 8–13.
- [7] P.H. Chan, K.Y. Tshai, M. Johnson, S. Li: “Finite element analysis of combined static loadings on offshore pipe riser repaired with fibre-reinforced composite laminates”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33, 2014, pp. 514-525.
- [8] A. Hosseini, D. Cronin, A. Plumtree: “Crack in corrosion defect assessment in transmission pipelines, Journal of Pressure Vessel Technology”, Transactions of the ASME, 135, 2013, 021701.
- [9] R. Mohsin, Z.A. Majid, M.Z. Yusof: “Multiple failures of API 5L X42 natural gas pipe: Experimental and computational analysis”, Engineering Failure Analysis, 34, 2013, pp. 10-23.
- [10] A.J. Slifka, E.S. Drexler, D.G. Stalheim, A.E. Stevenson, L.E. Hayden: “The effect of microstructure on the hydrogen-assisted fatigue of pipeline steels”, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2013.
- [11] L.L.S. Mathias, D.F.B. Sarzosa, C. Ruggieri: “Evaluation of ductile tearing of X-80 pipeline girth welds using SE(T), SE(B) and C(T) fracture specimens”,

- American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 2013.
- [12] Ι. Χρυσουλάκης , Δ.Ι. Παντελής: “Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
- [13] Γ. Δ. Παπαδημητρίου: “Γενική Μεταλλογνωσία”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989.
- [14] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος: “Φυσική μεταλλουργία”, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2007.
- [15] D. William, Jr. Callister: “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2008.
- [16] Ε. Χριστοφόρου: Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [17] J.A. Pérez-Benítez , J.H. Espina-Hernández, P. Martínez-Ortiz, A.F. Chávez-González, J.M. De La Rosa: “Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model”, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 347, 2013, pp. 51-60.
- [18] A. Ktena, E. Hristoforou, G.J.L. Gerhardt, F.P. Missell, F.J.G. Landgraf, D.L. Rodrigues Jr, M. Alberteris-Campos: “Barkhausen noise as a microstructure characterization tool”, *Physica B: Condensed Matter*, to be published.
- [19] P. Wang, X. Ji, L. Zhu, G. Tian, E. Yao: “Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network”, *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 201, 2013, pp. 421–427.
- [20] N. Kasai, H. Koshino, K. Sekine, H. Kihira, M. Takahashi: “ Study on the effect of elastic stress and microstructure of low carbon steels on Barkhausen noise”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, 2013, pp. 277-285.
- [21] O. Stupakov: “Local Non-contact Evaluation of the ac Magnetic Hysteresis Parameters of Electrical Steels by the Barkhausen Noise Technique”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, to be published.
- [22] C.H. Henager Jr., J.S. McCloy, R. Ramuhalli, D.J. Edwards, S. Hu, Y. Li: “Investigation of magnetic signatures and microstructures for heat-treated ferritic/martensitic HT-9 alloy”, *Acta Materialia*, vol. 61, 2013, pp. 3285-3296.
- [23] F.A. Franco, M.F.R. González, M.F. De Campos, L.R. Padovese: “Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, 2013, pp. 93-103.

- [24] G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš : “Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels”, *NDT & E International*, vol. 54, 2013, pp. 107-114.
- [25] P. Haušild, K. Kolařík, M. Karlík: “Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement”, *Materials & Design*, vol. 44, 2013, pp. 548-554.
- [26] H. Wang, C. Li, T. Zhu, B. Cai, G. Huo, N. Mohamed: “Effect of ball scribing on magnetic Barkhausen noise of grain-oriented electrical steel”, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 29, 2013, pp. 673-677.
- [27] L. Batista, U. Rabe, S. Hirsekorn: “Magnetic micro- and nanostructures of unalloyed steels: Domain wall interactions with cementite precipitates observed by MFM”, *NDT & E International*, vol. 57, 2013, pp. 58-68.
- [28] J. Pal'a, J. Bydžovský: “Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 46, 2013, pp. 866-870.
- [29] T.W. Krause, L. Clapham, A. Pattantyus, D.L. Atherton: “Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise”, *Journal of Applied Physics*, vol. 79, 1996, pp. 4242-4252.
- [30] T.W. Krause, L. Clapham, D.L. Atherton: “Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise”, *Journal of Applied Physics*, vol. 75, 1994, pp. 7983-7988.
- [31] T.W. Krause, K. Mandal, D.L. Atherton: “Modeling of magnetic Barkhausen noise in single and dual easy axis systems in steel”, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 195, 1999, pp. 193-205.
- [32] C.G. Stefanita, D.L. Atherton, L. Clapham: “Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel”, *Acta Materialia*, vol. 48, 2000, pp. 3545-3551.
- [33] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: “Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel, *NDT & E International*”, vol. 34, 2004, pp. 507-514.
- [34] C.G. Stefanita, L. Clapham, J.K. Yi, D.L. Atherton: “Analysis of cold rolled steels of different reduction ratio using the magnetic Barkhausen noise technique”, *Journal of Materials Science*, vol. 36, 2001, pp. 2795-2799.

- [35] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: “Influence of Lüders bands on magnetic Barkhausen noise and magnetic flux leakage signals”, *Journal of Materials Science*, vol. 37, 2002, pp. 2441-2446.
- [36] M. Caldas-Morgan, L.R. Padovese: “Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method”, *NDT and E International*, vol. 45, 2012, pp. 148-155.
- [37] A. Bükki-Deme, I.A. Szabó, C. Cserhádi: “Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, 2010, pp. 1748-1751.
- [38] O. Stupakov, T. Uchimoto, T. Takagi: “Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, 2010, art. no. 195003.
- [39] M. Alberteris Campos, J. Capó-Sánchez, J. Pérez Benítez, L.R. Padovese: “Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise”, *NDT & E International*, vol. 41, 2008, pp. 656-659.
- [40] J.H. Espina-Hernández, J.A. Pérez-Benítez, F. Caleyó, T. Baudin, A.L. Helbert, J.M. Hallen: “Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, 2013, art. no. 392001.
- [41] F. Kováč, M.D. Džubinský, Y. Sidor: “Columnar grain growth in non-oriented electrical steels”, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 269, 2004, pp. 333–340.
- [42] A. Martínez-de-Guerenu, K. Gurruchaga, F. Arizti: “Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops”, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, 2007, pp.e842 - e845.
- [43] K. Gurruchaga, A. Martínez-De-Guerenu, M. Soto, F. Arizti: “Magnetic Barkhausen noise for characterization of recovery and recrystallization”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, 2010, pp. 513-516.
- [44] E. Hristoforou, H. Chiriac and V. Nagacevschi : “Fast Discrete Wavelet Transform for B-H Loop Tracing”, *Sensors & Actuators A*, vol. 76, 1999, pp. 442 – 447.
- [45] R. Ranjan, D.C. Jiles, O. Buck, R.B. Thompson: “Grain size measurement using magnetic and acoustic Barkhausen noise”, *Journal of Applied Physics*, vol.61, 1987, pp. 3199-3201.

- [46] A. Bükki-Deme, I.A. Szabó, C. Cserhádi: “Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 322, 2010, pp. 1748-1751.
- [47] C. Gatelier-Rothea, J. Chicois, R. Fougères, P. Fleischmann: “Characterization of pure iron and (130 p.p.m.) carbon-iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: Study of the influence of stress and microstructure,” *Acta Materialia*, vol. 46, 1998, pp. 4873-4882.
- [48] J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, J. Capó-Sánchez: “Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: Influence of applied tensile stress and grain size,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 231, 2001, pp. 299-306.
- [49] M. Blaow, J.T. Evans, B.A. Shaw: “Magnetic Barkhausen noise: The influence of microstructure and deformation in bending,” *Acta Materialia*, vol. 53, 2005, pp. 279-287.
- [50] O. Saquet, J. Chicois, A. Vincent: “Barkhausen noise from plain carbon steels: Analysis of the influence of microstructure,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 269, 1999, pp. 73-82.
- [51] L. Clapham, C. Jagadish, D.L. Atherton: “The influence of pearlite on Barkhausen noise generation in plain carbon steels,” *Acta Metallurgica Et Materialia*, vol. 39, 1991, pp. 1555-1562.
- [52] A. Sorsa, K. Leiviskä, S. Santa-aho, M. Vippola, T. Lepistö: “An Efficient Procedure for Identifying the Prediction Model Between Residual Stress and Barkhausen Noise,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, to be published.
- [53] P. J. Wang, X. Yan, L. Zhu, H. Wang, G. Tian, E. Yao: “Investigation of temperature effect of stress detection based on Barkhausen noise,” *Sensors & Actuators, A: Physical*, vol. 194, 2013, pp. 232-239.
- [54] P. Wang, L. Zhu, Q. Zhu, X. Ji, H. Wang, G. Tian, E. Yao: “An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory,” *NDT & E International*, vol. 55, 2013, pp. 9-14.
- [55] M. Vashista, S. Paul: “Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics,” *Materials & Design*, vol. 30, 2009, pp. 1595-1603.

- [56] M. Blaow, J.T. Evans, B.A. Shaw: “Magnetic Barkhausen noise: The influence of microstructure and deformation in bending,” *Acta Materialia*, vol. 53, 2005, pp. 279-287.
- [57] M. Lindgren, T. Lepistö: “Effect of pre-straining on Barkhausen noise vs. stress relation,” *NDT & E International*, vol. 34, 2001, pp. 337-344.
- [58] X. Kleber, A. Vincent: “On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel,” *NDT & E International*, vol. 37, 2004, pp. 439-445.
- [59] K. Mandal, M.E. Loukas, A. Corey, D.L. Atherton: “Magnetic Barkhausen noise indications of stress concentrations near pits of various depths,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 175, 1997, pp. 255-262.
- [60] S. Desvaux, M. Duquennoy, J. Gualandri, M. Ourak: “The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect,” *NDT & E International*, vol. 37, 2004, pp. 9-17.
- [61] D.M. Stewart, K.J. Stevens, A.B. Kaiser: “Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel,” *Current Applied Physics*, vol. 4, 2004, pp. 308-311.
- [62] V. Moorthy, B.A. Shaw, P. Mountford, P. Hopkins: “Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel,” *Acta Materialia*, vol. 53, 2005, pp. 4997-5006.
- [63] J. Gauthier, T.W. Krause, D.L. Atherton: “Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique,” *NDT & E International*, vol.31, 1998, pp. 23-31.
- [64] I. Altpeter, G. Dobmann, M. Kröning, M. Rabung, S. Szielasko: “Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the IInd and IIIrd order,” *NDT & E International*, vol. 42, 2009, pp. 283-290.
- [65] M.F. de Campos, M.J. Sablik, F.J.G. Landgraf, T.K. Hirsch, R. Machado, R. Magnabosco, C.J. Gutierrez, A. Bandyopadhyay: “Effect of rolling on the residual stresses and magnetic properties of a 0.5% Si electrical steel,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 320, 2008, pp. e377-e380.
- [66] M. Küpferling, F. Fiorillo, V. Basso, G. Bertotti, P. Meilland: “Barkhausen noise in plastically deformed low-carbon steels,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 320, 2008, pp. e527-e530.

- [67] J.A. Perez-Benitez, J. Capó-Sánchez, L.R. Padovese: “A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel,” *NDT & E International*, vol. 41, 2007, pp. 53-58.
- [68] A.M. Campos, J. Capó-Sánchez, J. Pérez Benítez, L.R. Padovese: “Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise,” *NDT and E International*, vol. 41, 2008, pp. 656-659.
- [69] J. Perez-Benitez, L.R. Padovese: “Study of the influence of simultaneous variation of magnetic material microstructural features on domain wall dynamics,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 322, 2010, pp. 3101-3105.
- [70] O. Stupakov, T. Takagi, T. Uchimoto: “Alternative magnetic parameters for characterization of plastic tension,” *NDT & E International*, vol. 43, 2010, pp. 671-676.
- [71] O. Stupakov, J. Pal'a, I. Tomáš, J. Bydžovský, V. Novák: “Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 462, 2007, pp. 351-354.
- [72] D. O’Sullivan, M. Cotterell, D.A. Tanner, I. Mészáros: “Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques,” *Nondestruct. Test. Eval. Int.*, vol.37, 2004, pp. 489–496.
- [73] V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, R. Baldev: “Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 171, 1997, pp. 179-189.
- [74] T. Liu, H. Kikuchi, Y. Kamada, K. Ara, S. Kobayashi, S. Takahashi: “Comprehensive analysis of Barkhausen noise properties in the cold rolled mild steel,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 310, 2007, pp. e989-e991.
- [75] S.P. Sagar, N. Parida, S. Das, G. Dobmann, D.K. Bhattacharya: “Magnetic Barkhausen emission to evaluate fatigue damage in a low carbon structural steel,” *International Journal of Fatigue*, vol. 27, 2005, pp. 317-322.
- [76] B. Beidokhti, A.H. Koukabi, A. Dolati: “Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, 2009, pp. 4027–4035.

- [77] S.D. Bholea, J.B. Nemadeb, L. Collinsc, C. Liua: “Effect of nickel and molybdenum additions on weld metal toughness in a submerged arc welded HSLA line-pipe steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, 2006, pp. 92–100.
- [78] H. Motohashi, N. Hagiwara, T. Masuda: “Tensile properties and microstructure of weld metal in MAG welded X80 pipeline steel”, *Welding International*, vol. 19, 2005, pp. 100–108.
- [79] M. Rrahim, M. Hamit, I. Shefik: “Correlation of microstructure and hardness of two-pass submerged arc welds of line pipe steel X65”, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol. 4, 2009, pp. 347–355.
- [80] J.B. Ju, J.S. Lee, J.I. Jang, W.S. Kim, D. Kwon: “Metallurgical and mechanical features of API 5L X65 pipeline steel weldment, Proceedings of ASME IPC02, 4th international pipeline conference”, 2002.
- [81] D. Ren, F. Xiao, P. Tian, X. Wang, B. Liao: “Effects of welding wire composition and welding process on the weld metal toughness of submerged arc welded pipeline steel, *International Journal of Minerals*”, *Metallurgy and Materials*, vol. 16, 2009, pp. 65–70.