



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ
GRADE A, ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ
ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Βασίλη Γ. Δημητρακόπουλου

A. M. Φοιτητή: 07109062

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ GRADE A,
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ
ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Βασίλη Γ. Δημητρακόπουλου

A. M. Φοιτητή: 07109062

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 22/07/2016.

.....

.....

.....

Ε. Χριστοφόρου

Γ. Φούρλαρης

Σ. Παπαευθυμίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΙΟΥΛΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Copyright © Βασίλης Γ. Δημητρακόπουλος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

.....

Βασίλης Δημητρακόπουλος

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων - Μεταλλουργός

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Διερεύνηση συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα *grade A*, μελέτη της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας των συνδέσεων» εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2015-2016. Οι πειραματικές διαδικασίες και η προετοιμασία των δοκιμών έλαβαν μέρος στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλουργών - Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. και στη γραμμή παραγωγής της ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε. Τα δοκίμια και τα μηχανήματα κατεργασιών παραχωρήθηκαν από την Εταιρεία.

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν με κάθε τρόπο στην ολοκλήρωσή της.

- Τον κύριο Χριστοφόρου Ευάγγελο, καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος, για την καθοδήγηση και την υποστήριξη που υπέδειξε σε όλο το διάστημα που προηγήθηκε και ακολούθησε της εργασίας μου.
- Τους κυρίους Γεώργιο Φούρλαρη, καθηγητή ΕΜΠ και Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου, επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ, ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής καθώς και για την διασαφήνιση ορισμένων θεμάτων και την ανάλογη υπόδειξη εκ μέρους τους.
- Τον κύριο Γεώργιο Λαμπιδώνη, μηχανικό παραγωγής της ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε., που επέτρεψε την διεξαγωγή των δοκιμών συγκόλλησης στο εργοστάσιο της εταιρείας καθώς και τον εκεί εργαζόμενο συγκολλητή Ιωσήφ Ρούσσο. που με βοήθησαν στην ετοιμασία των δοκιμών και στην παροχή απαραίτητων εγγράφων, πιστοποιητικών και τεχνογνωσίας για τη διαδικασία συγκόλλησης.
- Την κυρία Βουρνά Ξένια, Δρ. Φυσικό, για την καθοδήγησή της, για τον χειρισμό των μηχανημάτων μηχανικών δοκιμών, καθώς επίσης για την θεωρητική και τεχνική κάλυψη επιστημονικών θεμάτων που προέκυψαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

- Την κυρία Μαγγιώρου Ελένη, διπλωματούχο Μηχανικό ΣΕΜΦΕ και υποψήφια διδάκτορα, για την πολύτιμη βοήθειά της σε όλη τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών καθώς και για το χειρισμό των μηχανημάτων που διεξάγουν πληροφορίες για την μικροδομή των μετάλλων.
- Όλο το προσωπικό του εργαστηρίου μεταλλογνωσίας για το ευχάριστο περιβάλλον και την ευγενή άμιλλα
- Τέλος, ένα πολύ μεγάλο και θερμό ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την στήριξη που μου προσέφερε και εξακολουθεί να προσφέρει σε όλα τα επίπεδα. Επίσης, στους φίλους μου, συμφοιτητές και μη.

Σας ευχαριστώ πολύ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας, καθώς και οι απαιτήσεις που δημιουργούνται από αυτή και τις συνθήκες της παγκόσμιας αγοράς, δημιουργούν την ανάγκη βελτιστοποίησης των παραγωγικών διαδικασιών. Σε συνδυασμό και με την αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα, η τεχνολογική εξέλιξη καθιστά επιτακτική την βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών των βιομηχανικών προϊόντων, από το σχεδιασμό μέχρι την τελική δοκιμή και τη λειτουργική χρήση.

Η επιδίωξη της αυτοβελτίωσης στον κλάδο των κατασκευών οδηγεί αρκετές εταιρείες στην έρευνα εναλλακτικών μοντέλων σχεδιασμού και παραγωγής. Η εταιρεία ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε., στο πλαίσιο τέτοιων ενεργειών έρευνας και ανάπτυξης, ερευνά, μεταξύ άλλων, εναλλακτικές διαδικασίες για τις συγκολλητές σύνδεσεις των ελασμάτων από κατασκευαστικό χάλυβα, ορίου διαρροής $\geq 235 \text{ N/mm}^2$. Ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης των ελασμάτων χρησιμοποιείται κατά κόρον στη γραμμή παραγωγής της Εταιρείας για την κατασκευή συγκολλητών διατομών κλειστού τύπου μεγάλου μήκους.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη, η πειραματική δοκιμή και η τελική σύγκριση δυο εναλλακτικών διαδικασιών συγκόλλησης πλήρους διείδυσης με την ημιαυτόματη μέθοδο συγκόλλησης σε αέρια προστατευτική ατμόσφαιρα δραστικού μίγματος αερίων (Gas metal arc welding, Metal active gas) σε ναυπηγικό χάλυβα Grade A. Δύο ξεχωριστές διαδικασίες συγκόλλησης δόθηκαν από την ενδιαφερόμενη Εταιρεία για ανάλυση. Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης κατηγορίας χαλύβων καθορίζονται από τους διεθνείς νηογνώμονες LRS/ABS/BV ενώ οι ανοχές στις γεωμετρικές διαστάσεις προδιαγράφονται με βάση τα EN 10029 & 10163.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν αρχικά η προσπάθεια συσχέτισμού της μαγνητικής διαπερατότητας με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων και τελικά η αξιολόγηση των δύο διαδικασιών συγκόλλησης. Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται ως ακολούθως:

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή στους καταστροφικούς και μη καταστροφικούς ελέγχους: Στο παρών κεφάλαιο ορίζεται η σημασία των καταστροφικών και μη καταστροφικών ελέγχων, περιγράφεται ο στόχος τους και μερικοί τρόποι πραγματοποίησής τους. Επίσης πραγματοποιείται μια πρώτη γνωριμία με το υλικό των πειραματικών διαδικασιών και δίνεται το κίνητρο της παρούσας εργασίας. Γενικές έννοιες στις συγκολλήσεις τόξου, μέθοδοι, τεχνολογία, μηχανές συγκόλλησης και αναλώσιμα. Στη συνέχεια δίνεται έμφαση στις συγκολλήσεις καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου με προστατευτικό αέριο MIG και MAG. Παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές μεταφοράς σταγόνας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής.

Κεφάλαιο 2 – Πειραματική διαδικασία: Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο προηγείται εισαγωγή, όπου περιγράφονται ο σκοπός της εργασίας. Στη συνέχεια αναλύονται το ληφθέν υλικό, οι τεχνικές παράμετροι της συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκε, οι βασικές αρχές και η διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας, της παρατήρησης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, της μικροσκληρομέτρησης, του εφελκυσμού και της βαθμονόμησης.

Κεφάλαιο 3 – Αναλύονται και παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων στις μεθόδους ελέγχου που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.

Κεφάλαιο 4 – Συζήτηση: Έγιναν οι σχετικές συγκρίσεις αποτελεσμάτων μεταξύ ζωνών συγκόλλησης κάθε δοκιμίου αλλά και συνολική σύγκριση μεταξύ δοκιμίων.

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα: Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

Κεφάλαιο 6 – Μελλοντική εργασία: Αναφέρεται συνοπτικά πως θα μπορέσει να συνεχιστεί η διερεύνηση (και η εμβάθυνση σε επιστημονικό επίπεδο) των διαδικασιών συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 7 – Αναφορές

ABSTRACT

The continuous evolution of technology and the requirements deriving from it, together with the world market's current state, dictate the need for optimization of production processes. When combined with increased competitiveness, technological development makes it imperative to optimize the production processes of industrial products, from design to final testing and functional use.

The pursuit of self-improvement in the construction industry lead companies in research of alternative design models and production optimization. The company ELLINIKI TECHNIKI SA, in such research and development operations, examines, inter alia, alternative welding procedures of structural steel plates with minimum yield point $\geq 235 \text{ N / mm}^2$. The examined connection type of plates is used extensively in the Company's production line during the manufacture of welded closed box sections of girders.

The object of this thesis was to study, test and compare two alternative full penetration welding procedures that use a semiautomatic welding process in gaseous active protective gas mixture atmosphere (Gas metal arc welding, Metal active gas) to weld shipbuilding steel type Grade A. Two separate welding processes were given by the interested Company for analysis. The chemical composition and mechanical properties of the steel type are defined by international classification societies LRS / ABS / BV and the specified dimension tolerances are based on EN 10029 & 10163.

The purpose of this thesis were initially the effort to correlate the magnetic permeability with the mechanical properties of the test pieces and finally the evaluation of two welding procedures. The thesis is structured as follows:

Chapter 1 - Introduction to destructive and non-destructive testing procedures: This chapter defines the importance of destructive and non-destructive testing, it gives a description of their goal and analyzes some methods. The material of the experiment's procedure and further motivation of this thesis are given in the first paragraphs. General concepts of arc welding, methods, technology, welding machines and consumables are described further on. More detail is given on the consumed

electrode welding method with shielding gas MIG and MAG. Finally, the various drop transfer techniques, advantages and disadvantages of each technique are described and developed.

Chapter 2 - Experimental procedure: This chapter begins with an introduction, where the aim of the thesis is described. Then the obtained material is analyzed, the technical parameters of the welding procedures are analyzed. Following are the basic principles and the process and execution of the magnetic permeability measurement tests, basic details on the observation via the scanning electron microscope, the hardness test procedure, the tensile test and the material's calibration.

Chapter 3 - The results are hereby analyzed, the measured values are presented via diagrams and boards. All the related methods are described in Chapter 2.

Chapter 4 - Discussion: Where the relevant results between welding zones of each separate specimen and the overall results between specimens are compared in detail.

Chapter 5 - Conclusions: In this chapter, all the conclusions made after the comparison of the results are summed up.

Chapter 6 - Future thesis: Brief reference on how to continue and develop the study of the performed welding procedures.

Chapter 7 – Citations, references

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	4
1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ _____	4
1.1.1.Ορισμοί, σκοπός και μέθοδοι των μη-καταστροφικών ελέγχων _____	4
1.1.2.Ορισμοί, σκοπός και μέθοδοι των καταστροφικών ελέγχων _____	19
1.2.ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ _____	25
1.2.1.Εισαγωγή, ιδιότητες και φυσικές έννοιες _____	25
1.2.2.Συγκολλήσεις τόξου με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου _____	34
1.3.ΜΗ ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ – ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ _____	39
1.3.1. Ιστορική αναδρομή των ναυπηγικών χαλύβων _____	40
1.3.2.Κατάταξη ναυπηγικών χαλύβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα _____	42
1.3.3. Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες _____	43
1.4.ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ _____	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	48
2.1.ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ _____	48
2.2.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ _____	48
2.2.1.Υλικό που παρελήφθη _____	48
2.2.2.Συγκόλληση δοκιμίων _____	49
2.2.3.Μαγνητικές μετρήσεις _____	54
2.2.4.Μικροδομικός χαρακτηρισμός με SEM _____	60
2.2.5.Χημική μικροανάλυση (EDS) _____	62
2.2.6.Μικροσκληρότητα _____	63
2.2.7.Καμπύλη βαθμονόμησης _____	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	65
3.1.ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ _____	65
3.3. ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡ. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) _____	67
3.3.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1 _____	67
3.4. ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ (EDS – ENERGY DISPERSIVE SPECTROSCOPY) _____	81
3.5.ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ _____	84
3.5.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1 _____	84
3.5.2 Συγκολλημένο δοκίμιο 2 _____	85
3.6.ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ _____	85

3.7. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	87
3.7.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1	87
3.7.2 Συγκολλημένο δοκίμιο 2	91
3.8. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΟΡΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΣΕ ΔΙΑΓΡ. ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜ.	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΘΕΣΕΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟΥ 3.1 ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	114

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μέθοδοι σύνδεσης των μετάλλων ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τις μεθόδους μηχανικής σύνδεσης που χρησιμοποιούν στοιχεία σύνδεσης όπως οι κοχλιώσεις, τις μεθόδους που χρησιμοποιούν ρητίνες και τις μεταλλουργικές μεθόδους οι συγκολλήσεις.

Η ανάπτυξη των μεθόδων συγκόλλησης και η βελτιστοποίηση της ποιότητας αλλά και της παραγωγικότητας αυτών, έχει οδηγήσει τεχνολογικά στην εξέλιξη νέων τεχνικών συγκόλλησης αλλά και στην αναβάθμιση των παλαιότερων. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των συγκολλήσεων διαδραματίζουν οι μη καταστροφικοί έλεγχοι αλλά και οι μηχανικές δοκιμές (καταστρεπτικές δοκιμές), καθώς επίσης οι μελέτες θραυστομηχανικής.

Η κρισιμότητα στον έλεγχο των συγκολλητών συνδέσεων έγκειται στη συνεχή προσπάθεια επίτευξης πλήρους και αναλυτικού ελέγχου για τον εντοπισμό ατελειών. Ο τελικός στόχος των ελέγχων είναι ο ακριβής προσδιορισμός και ο υπολογισμός των μηχανικών και των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων των συνδέσεων, αποφεύγοντας τις καταστρεπτικές δοκιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ

Στα ακόλουθα κεφάλαια αναλύονται οι μέθοδοι μη καταστροφικών αλλά και καταστρεπτικών ελέγχων που εφαρμόζονται στα υλικά και στις συγκολλήσεις αυτών.

1.1.1.Ορισμοί, σκοπός και μέθοδοι των μη-καταστροφικών ελέγχων

Ο όρος «μη καταστροφική αξιολόγηση» (Non Destructive Evaluation - NDE) περιλαμβάνει πολλές επιμέρους έννοιες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν διάφορες δραστηριότητες του εν λόγω πεδίου. Κάποιες απ' αυτές τις έννοιες είναι^[1]:

- Μη καταστροφικές δοκιμές (nondestructive testing, NDT)
- Μη καταστροφική επιθεώρηση (nondestructive inspection, NDI)
- Μη καταστροφική εξέταση (nondestructive examination, NDEx)

Όλοι αυτοί οι όροι είναι παρόμοιοι, εφόσον περικλείουν μετρήσεις που διεξάγονται σ' ένα αντικείμενο ώστε να προσδιοριστεί κάποιο χαρακτηριστικό του ή να επαληθευτεί αν αυτό περιέχει ανωμαλίες, ασυνέχειες ή γενικότερα ελαττώματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον μη καταστροφικό έλεγχο επιτρέπουν στον επιθεωρητή να αποφασίσει αν το υπό εξέταση αντικείμενο πληροί τις προδιαγραφές, είναι δηλαδή αποδεκτό ή απορριπτέο.

Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) στη σύγχρονη βιομηχανική δραστηριότητα αποτελούν ένα από τα βασικότερα πεδία του ποιοτικού ελέγχου και του προσδιορισμού της διάρκειας ζωής των κατασκευών^[2]. Η εφαρμογή τους προτιμάται συνήθως σε σύγκριση με τους καταστροφικούς ελέγχους επειδή το εξεταζόμενο δοκίμιο μένει ανεπηρέαστο, ακόμα και ύστερα από επαναλαμβανόμενες δοκιμές, ενώ δεν απαιτείται η δημιουργία πρόσθετων πρότυπων δοκιμίων για τις δοκιμές. Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για την διασφάλιση των εκτελούμενων εργασιών και κατ' επέκταση την επίτευξη υψηλών συντελεστών ασφαλείας για πολλά είδη κατασκευών. Συνήθως υπαγορεύονται από διεθνή πρότυπα και ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και

¹ Ε. Χριστοφόρου (2000): «Ηλεκτροτεχνία και ηλεκτρονική τεχνολογία», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

² Ε. Χριστοφόρου (2001): Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

διαδικασίες, εκτελούνται από εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό και έχουν στόχο τον εντοπισμό και την εξάλειψη επιφανειακών και κυρίως εσωτερικών ατελειών.

Κάθε μέθοδος των ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου ή την πιστοποίηση μιας διαδικασίας παραγωγής, συνηθίζεται δειγματοληπτικά ο έλεγχος πρώτα με Μη Καταστροφική μέθοδο και στη συνέχεια με Καταστροφική δοκιμή ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- στην αυτοκινητοβιομηχανία
- στην αεροδιαστημική
- στις κατασκευές
- στη βιομηχανία
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία
- στο σιδηρόδρομο
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιαγωγούς
- στα πάρκα αναψυχής
- στην ιατρική

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ΜΚΕ στη βιομηχανία μεταλλικών κατασκευών περιλαμβάνουν την τεχνική ραδιογραφίας με ακτίνες Χ και γ, καθώς επίσης τους υπερήχους και την θερμική τεχνική για την ανίχνευση εσωτερικών ατελειών (πόροι, ρωγμές, ατελείς τήξεις, εγκλείσματα κλπ.), την τεχνική των διεισδυτικών υγρών αποκλειστικά για επιφανειακές ατέλειες και τις αντίστοιχες των μαγνητικών σωματιδίων και δινορρευμάτων για επιφανειακές και υπό-επιφανειακές (βάθος μερικών μm) ατέλειες. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στο κάθε πεδίο προσφέρουν διαρκώς βελτιωμένη απόδοση των μεθόδων είτε διευκολύνοντας τη μέθοδο επιθεώρησης είτε προσφέροντας πιο αξιόπιστες και με αυξημένη διακριτική ικανότητα μετρήσεις και απεικονίσεις (π.χ. ψηφιακή ραδιογραφία, phased arrays UT κλπ.). Οι περιορισμοί χρήσης ισχύουν για όλες τις μεθόδους και αφορούν αδυναμίες ανίχνευσης συγκεκριμένων ατελειών λόγω γεωμετρίας, βάθους, μεγέθους, είδους κλπ. Έτσι συχνά επιλέγονται περισσότερες της μίας μέθοδοι ώστε να επιτυγχάνονται συμπληρωματικά και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η ανίχνευση των ατελειών θεωρείται συνήθως από τις πιο σημαντικές πλευρές του μη καταστροφικού ελέγχου. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι προσέγγισης του προβλήματος της ανίχνευσης των ατελειών σε ότι αφορά στην επιλογή της μεθόδου. Ο σημαντικότερος τρόπος είναι να θεωρηθεί ότι υπάρχουν μόνο 6 παράγοντες που υπεισέρχονται σε αυτήν τη διαδικασία που είναι οι εξής:

- Ο λόγος που πραγματοποιείται ο έλεγχος
- Ο τύπος των ατελειών που ενδιαφέρουν στο υλικό
- Το μέγεθος και ο προσανατολισμός της ατέλειας που είναι απορριπτέα
- Η προβλεπόμενη θέση της ατέλειας που ενδιαφέρει
- Το μέγεθος και η μορφή του υπό εξέταση αντικειμένου
- Τα χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να ελεγχθεί

Απαραίτητο επίσης είναι να συγκεκριμενοποιηθεί ποιοι τύποι ατελειών είναι οι ακατάλληλοι, το μέγεθος, ο προσανατολισμός τους καθώς και η θέση τους που θα μπορούσε να καταστήσει το υπό εξέταση αντικείμενο απορριπτέο. Οι περιορισμοί σε αυτά τα χαρακτηριστικά υπαγορεύονται συνήθως από κάποιο κώδικα ή απαίτηση ή πρότυπο.

Γενικά, οι ατέλειες, ως προς τις διαστάσεις τους, μπορούν να είναι δύο ειδών: δισδιάστατες και τρισδιάστατες. Επίσης, ως προς τη θέση τους στο υλικό, διαχωρίζονται σε επιφανειακές και σε εσωτερικές.

Στον πίνακα 1-1 αναφέρονται οι μέθοδοι με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να εντοπιστούν οι ατέλειες κάθε κατηγορίας. Δυο επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι το σχήμα και το μέγεθος του προς έλεγχο αντικειμένου. Ο πίνακας 1-2 συγκρίνει μεθόδους για διάφορα σχήματα. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι και οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου έχουν με τη σειρά τους ορισμένα χαρακτηριστικά ιδιαίτερης σημασίας τα οποία επιτρέπουν ή όχι τη χρησιμοποίησή τους σε συγκεκριμένα υλικά (πίνακας 1-3).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΑΤΕΛΕΙΩΝ

ΜΕΘΟΔΟΙ	Επίπεδες ατέλειες	Τρισδιάστατες ατέλειες	Επιφανειακές ατέλειες	Εσωτερικές ατέλειες
Οπτική ολογραφία	X	X	X	X (πιθανό)
Θερμική επιθεώρηση	X	X	X	X (πιθανό)
Μικροκύματα	X	X		X

Δινορεύματα	X	X	X	X
Εκτροπή ηλεκτρικού ρεύματος	X		X	X
Μαγνητικά σωματίδια	X	X	X	X (περιορ. χρήση)
Μαγνητικά πεδία	X		X	X
Ραδιογραφία νετρονίων		X		X
Ραδιογραφία ακτινών Χ		X		X
Υπέρηχοι	X	X	X	X
Διεισδυτικά υγρά		X	X	X
Ρεπλίκια	X	X (επιφανειακές)	X	X
Οπτικές μέθοδοι	X	X (επιφανειακές)	X	X

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

<u>Απλό σχήμα</u>
<p>Οπτική ολογραφία Θερμική επιθεώρηση Μικροκύματα Δινορεύματα Μαγνητικά πεδία Ραδιογραφία νετρονίων Ραδιογραφία ακτινών Χ Υπέρηχοι Διεισδυτικά υγρά Ρεπλίκια Οπτικές μέθοδοι</p>
<u>Πολύπλοκο σχήμα</u>

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΝΔΕ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΕΠΙΘΕΩΡΟΥΝ

Μέθοδος	Χαρακτηριστικά
Διεισδυτικά υγρά	Η ατέλεια πρέπει να βγαίνει στην επιφάνεια
Μαγνητικά σωματίδια	Το υλικό πρέπει να είναι μαγνητικό

Δινορεύματα	Το υλικό πρέπει να είναι μαγνητικό ή ηλεκτρικά αγώγιμο
Μικροκύματα	Να διαδίδονται σε αυτό τα μικροκύματα
Ραδιογραφία ακτινών Χ	Αλλαγές στο πάχος, την πυκνότητα ή τη σύνθεση
Ραδιογραφία νετρονίων	Αλλαγές στο πάχος, την πυκνότητα ή τη σύνθεση
Οπτική ολογραφία	Επιφανειακές οπτικές ιδιότητες

Μετρολογία και αξιολόγηση:

Οι διαστασιακές μετρήσεις είναι από τις πιο χρησιμοποιούμενες μη καταστροφικές δραστηριότητες. Εκτός από τις συμβατικές μεθόδους διαστασιολόγησης η σύγχρονη μετρολογία χρησιμοποιεί την τεχνολογία των λέιζερ, σύγχρονα οπτικά μέσα και ρομποτικά συστήματα. Επιπρόσθετα, εφαρμογή στο πεδίο της μετρολογίας έχουν και μέθοδοι όπως τα δινορεύματα, οι υπέρηχοι και η οπτική ολογραφία.

Προσδιορισμός θέσης ατελειών και αξιολόγηση:

Πολλές φορές τίθεται το πρόβλημα αν μια κατασκευή που αποτελείται από περισσότερα από δύο μέρη περιέχει ατέλειες στις περιοχές σύνδεσης και στις διεπιφάνειες δυο ή παραπάνω υλικών. Αυτού του είδους ο μη καταστροφικός έλεγχος καλείται προσδιορισμός θέσης. Οι πιο κοινές τεχνικές που καλύπτουν αυτό το πεδίο είναι οι ακτίνες Χ, η τομογραφία που πραγματοποιείται με τη βοήθεια ακτινών Χ και η ραδιογραφία νετρονίων.

Χαρακτηρισμός μικροδομής:

Ο χαρακτηρισμός της μικροδομής μπορεί να λάβει χώρα επί τόπου χωρίς να προκληθεί ζημιά στο υπό εξέταση αντικείμενο με χρήση της μεθόδου της ρεπλικας ή τεχνικών συμβατικής οπτικής μικροσκοπίας με κινητό εξοπλισμό που περιλαμβάνει υλικά και μέσα για στίλβωση, προσβολή και μικροσκόπιο. Ακόμα είναι δυνατό να εκτιμήσουμε τη μικροδομή συσχετίζοντας κάποιες πληροφορίες που λαμβάνονται από τις μη καταστροφικές δοκιμές (π.χ. η εκπομπή μιας τιμής ενέργειας (στην περιοχή των υπερήχων) έχει συσχετιστεί με τη μικροδομή του γκρίζου χυτοσιδήρου]. Τέλος, η μικροδομή εκτιμάται μέσα από τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων γιατί συνήθως υπάρχει σχέση μεταξύ δομής, ιδιοτήτων και απόκρισης μη καταστροφικής τεχνικής.

Εκτίμηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων:

Ο συγκεκριμένος είναι ένας από τους ταχέως αναπτυσσόμενους τομείς του πεδίου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι ιδιότητες αυτές εκτιμώνται έμμεσα από τη μελέτη της

μικροδομής. Εκτός από τις υπόλοιπες τεχνικές που εφαρμόζονται στα μέταλλα, τα μικροκύματα μπορούν να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες των μη μεταλλικών (διηλεκτρικών και μη αγώγιμων) υλικών.

Προσδιορισμός δυνάμεων-τάσεων και δυναμικής απόκρισης:

Η τάση σε μια περιοχή ενός αντικειμένου το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μεθόδων εύρεσης φοράς δύναμης όπως αυτές της φωτοελαστικής επικάλυψης, της ψαθυρής επικάλυψης, των δυναμοκυψέλων. Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στα υλικά όπως περίθλαση ακτίνων X, υπέρηχοι, και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Η δυναμική συμπεριφορά ενός αντικειμένου είναι δυνατό να εκτιμηθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, εφαρμόζοντας τεχνολογία εύρεσης φοράς τάσης όσο το αντικείμενο φορτίζεται δυναμικά. Επιπλέον επιταχυνσιόμετρα και ακουστικοί μορφομετατροπείς χρησιμοποιούνται ώστε να ληφθεί μια δυναμική απόκριση από την κατασκευή που υποβάλλεται στη φόρτιση. Η δυναμική απόκριση ονομάζεται «υπογραφή» και η εκτίμηση αυτής «ανάλυση υπογραφής». Η φύση αυτής της υπογραφής συσχετίζεται με διάφορα προβλήματα όπως ο μηχανικός θόρυβος, οι δονήσεις και η κατασκευαστική αστάθεια.

Στη συνέχεια αναλύονται τέσσερις χαρακτηριστικές μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων που είναι ευρέως διαδεδομένοι στη κατασκευαστική βιομηχανία: η ραδιογραφία ακτίνων X, τα διεισδυτικά υγρά, η μαγνητικές μέθοδοι (μαγνητικά σωματίδια) και οι υπέρηχοι.

Ραδιογραφία ακτίνων X:

Ραδιογραφία καλείται η μέθοδος ελέγχου με ακτίνες X και γ. Βασίζεται στη διαφορετική απορρόφηση της διεισδυτικής ιονίζουσας ακτινοβολίας X ή γ από το δοκίμιο. Η διαφορά πυκνότητας, η μεταβολή στο πάχος και η διαφορετική απορρόφηση έχουν ως αποτέλεσμα την απεικόνιση με διαφορετικό τρόπο στο μέσο αποτύπωσης. Οι ακτίνες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και τον εντοπισμό ατελειών σε συγκολλήσεις και διάφορα χυτά μεταλλικά αντικείμενα και η χρήση τους είναι επιτακτική καθώς τα αντικείμενα αυτά είναι μη-διαπερατά από το ορατό φως. Για την παραγωγή της ραδιενεργής ακτινοβολία γίνεται χρήση συγκεκριμένων ισότοπων. Η κατευθυνόμενη ακτινοβολία που δημιουργείται από τη συσκευή παραγωγής των ακτίνων X ή γ, αφού διέλθει από το εκτεθειμένο μεταλλικό δοκίμιο, προσπίπτει σε ένα φιλμ το οποίο καλείται ραδιογράφημα.

Οι σκιές στο ραδιογράφημα αποδεικνύουν την ύπαρξη ατελειών στο δοκίμιο, διότι η ακτινοβολία διαπερνά της ατέλειες με μεγαλύτερη ένταση. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ατέλειες είναι περιοχές ή σημεία χαμηλότερης πυκνότητας από αυτή του μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης.

Η ευαισθησία της μεθόδου είναι βασισμένη στη δυνατότητα διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας από τις ραδιενεργές πηγές (το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μπορεί να κατέβει στην τάξη της ατομικής ακτίνας ή της παραμέτρου κρυσταλλικού πλέγματος, δηλαδή κάποιων Angstrom) ακόμη και στα μεταλλικά υλικά. Όσο μικρότερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης των ακτίνων X στο υπό δοκιμή υλικό. Η πιο κοινή μέθοδος ελέγχου υλικών με τη χρήση της ραδιογραφίας ακτίνων X είναι χειροκίνητη, χρησιμοποιώντας κυρίως την τεχνολογία αναλογικής απεικόνισης (*film*), απαιτώντας την προσωρινή λήξη των λειτουργικών δραστηριοτήτων όπου χρησιμοποιούνται.

Η ανάπτυξη των ψηφιακών τεχνικών απεικόνισης, ευαίσθητων στα «σκληρά» μήκη κύματος οδήγησε σε μια μικρή επανάσταση στις ραδιογραφίες, καθώς οι ψηφιακές κάμερες, δεν απαιτούν την χρήση αναλογικών τεχνικών, μειώνοντας δραματικά τον χρόνο εργασίας για μια ραδιογραφία και βελτιώνοντας δραστικά τα λαμβανόμενα αποτελέσματα.

Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένες τεχνικές οι οποίες είναι ήδη σε λειτουργία σε εφαρμογές σωληνώσεων, όπως στα διυλιστήρια και στη μεταφορά πετρελαίου– φυσικού αερίου. Η λειτουργία τους είναι βασισμένη στις πηγές ακτίνων X μικρο-εστίασης, που χρησιμοποιούν και ψηφιακές κάμερες λήψης υψηλής ευκρίνειας. Λόγω του ελάχιστου ποσού της απαιτούμενης κατανάλωσης ενέργειας, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς παύση της γραμμής παραγωγής.

Ο περιορισμός της ευαισθησίας της ραδιογραφίας ακτίνων X είναι η διάθλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η καλύτερη ανάλυση που αναφέρθηκε ποτέ σε μη μεταλλικά υλικά ήταν της τάξης των 1 μm, ενώ οι βιομηχανικώς αποδεκτές και πρακτικά εφαρμόσιμες ευαισθησίες σε χαρακτηρισμούς μετάλλων είναι της τάξης των 10 μm.

Διεισδυτικά Υγρά:

Η επιθεώρηση με τη χρήση διεισδυτικών υγρών είναι μία μη καταστροφική μέθοδος αποκάλυψης των ασυνεχειών που φτάνουν μέχρι τις επιφάνειες των στέρεων υλικών χωρίς ουσιαστικό πορώδες. Είναι δυνατό με τα διεισδυτικά υγρά να προκύψουν ενδείξεις για ευρύ φάσμα μεγεθών των ατελειών, ανεξάρτητα και από τη διαμόρφωση του προς εργασία αντικειμένου και από τον προσανατολισμό των ατελειών. Τα υγρά αυτά διαποτίζονται σε διάφορους τύπους μικροσκοπικών επιφανειακών ατελειών σύμφωνα με το τριχοειδές φαινόμενο. Για αυτό το λόγο είναι ιδανική

μέθοδος για την ανίχνευση όλων των τύπων των επιφανειακών ρωγμών, πτυχών, πορώδους, περιοχών συστολής, λεπτών στρωμάτων και ασυνεχειών. Χρησιμοποιείται εκτενώς για την εξέταση κατεργασμένων και χυτών προϊόντων σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μετάλλων, στη μεταλλουργία κόνεων, στα κεραμικά, στα πλαστικά και στα γυάλινα αντικείμενα. Ο μεγαλύτερος περιορισμός είναι ότι αποκαλύπτονται μόνο ατέλειες που βγαίνουν στην επιφάνεια. Ένας άλλος παράγοντας που περιορίζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι η επιφανειακή σκληρότητα και το πορώδες. Αυτές οι επιφάνειες παράγουν υπερογκώδες φόντο που μπερδεύει στην παρατήρησή τους.

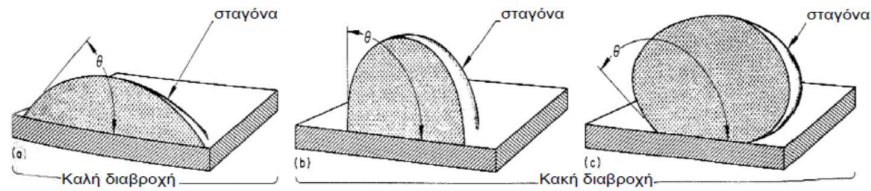
Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την αποτελεσματική διαβροχή της επιφάνειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο στρώμα από το διεισδυτικό υγρό το οποίο θα μετακινηθεί μέσα στις κοιλότητες. Οι κοιλότητες που ενδιαφέρουν είναι συνήθως πολύ μικρές, αόρατες με το ανθρώπινο μάτι. Η ικανότητα διείσδυσης του υγρού σε αυτές εξαρτάται περισσότερο από:

- Την καθαρότητα της επιφάνειας.
- Τη διαμόρφωση της κοιλότητας.
- Την καθαρότητα της κοιλότητας.
- Το μέγεθος του επιφανειακού ανοίγματος της κοιλότητας.
- Την επιφανειακή τάση του υγρού.
- Την ικανότητα του υγρού να διαβρέξει την επιφάνεια.
- Τη γωνία επαφής του υγρού.

Οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων ενός υγρού προκαλεί επιφανειακή τάση. Ένα παράδειγμα της επίδρασης της επιφανειακής τάσης είναι η τάση του ελεύθερου υγρού, όπως μια σταγόνα νερού, να γίνει σφαίρα. Η επιφανειακή τάση τότε αντισταθμίζεται από την εσωτερική υδροστατική πίεση του υγρού.

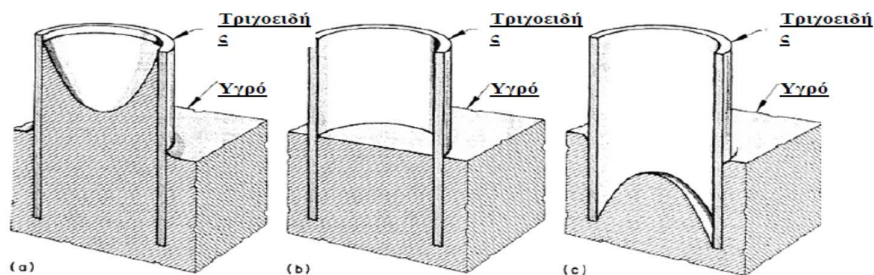
Όταν ένα υγρό έρχεται σε επαφή με μία επιφάνεια οι δυνάμεις συνοχής αντιμάχονται τις δυνάμεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του υγρού και της στερεής επιφάνειας. Αυτές οι δυνάμεις καθορίζουν και τη γωνία επαφής, η οποία αν είναι μικρότερη από 90° το υγρό διαβρέχει την επιφάνεια, έχει δηλαδή καλή ικανότητα διαβροχής, ενώ αν η γωνία είναι ίση ή μεγαλύτερη από 90° η ικανότητα αυτή είναι μικρή (εικόνα 1-1)^[*].

* Πηγή εικόνων 1-1, 1-2 : 16. Ε. Χριστοφόρου (2013): Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα «Ηλεκτροτεχνία και ηλεκτρονική τεχνολογία», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα



ΕΙΚΟΝΑ 1-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΜΙΑΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΜΙΑΣ ΣΤΕΡΕΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΓΩΝΙΑ θ , ΟΤΑΝ Η ΓΩΝΙΑ $\theta < 90^\circ$, Η ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΕΙΝΑΙ ΚΑΛΗ, ΟΤΑΝ Η ΓΩΝΙΑ $\theta \geq 90^\circ$, Η ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΕΙΝΑΙ ΦΤΩΧΗ.

Στενά συνδεδεμένη με την ικανότητα διαβροχής είναι και το φαινόμενο της τριχοειδούς ανύψωσης ή ταπείνωσης (εικόνα 1-2)^[3].



ΕΙΚΟΝΑ 1-2 ΑΝΥΨΩΣΗ Η ΤΑΠΕΙΝΩΣΗ, ΣΕ ΜΙΚΡΟΥΣ ΚΑΘΕΤΟΥΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΕΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ, ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΝΟΣ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ ΣΩΛΗΝΑ. (Α) ΟΤΑΝ $\theta < 90^\circ$ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΑΝΥΨΩΣΗ, (Β) ΟΤΑΝ $\theta = 90^\circ$ ΔΕΝ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΤΙΠΟΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΔΥΟ, (Γ) ΟΤΑΝ $\theta > 90^\circ$ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΤΑΠΕΙΝΩΣΗ.

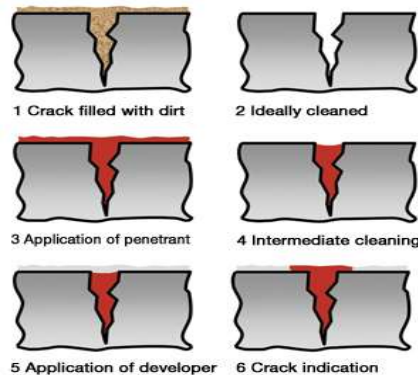
Αν η γωνία επαφής μεταξύ του υγρού και του τριχοειδούς σωλήνα είναι μικρότερη των 90° τότε ο υγρός μηνίσκος στο σωλήνα είναι κοίλος και το υγρό ανυψώνεται. Αν η γωνία είναι μεγαλύτερη των 90° το υγρό ταπεινώνεται και δε διαβρέχει το σωλήνα ενώ ο μηνίσκος είναι κυρτός. Αν πάλι η γωνία είναι ίση με 90° τίποτα από τα δύο δε συμβαίνει.

Το ιξώδες του υγρού έχει αμελητέα επίδραση στην διεισδυτικότητα του. Γενικά όμως υγρά με μεγάλο ιξώδες είναι ακατάλληλα για την εργασία αυτή επειδή δε ρέουν αρκετά γρήγορα και χρειάζονται πολύ χρόνο για να πληρώσουν τα κενά. Μια άλλη απαραίτητη ιδιότητα είναι η ικανότητα να διαλύει σημαντική ποσότητα κατάλληλου φθορίζοντος υλικού ή έγχρωμη συνθετική ένωση. Επίσης το διεισδυτικό υγρό θα πρέπει να αφαιρείται εύκολα με κατάλληλο διαλυτικό – αφαιρέτη ή γαλακτοματοποιητή χωρίς να κατακάθεται το χρώμα.

Όσο σημαντικό είναι το υγρό να εισέλθει στην επιφανειακή ατέλεια, το ίδιο σημαντικό είναι να συγκρατηθεί μέσα εκεί και να αναδυθεί μετά από την απομάκρυνση του εξωτερικού στρώματος και την επίδραση στη συνέχεια του διαλύτη ανάπτυξης. Αυτό συμβαίνει διότι μόλις η επιφάνεια ελευθερωθεί από το περιττό υγρό καθίσταται προσβάσιμη για το παγιδευμένο υγρό το οποίο υπό την επίδραση των δυνάμεων συνοχής απλώνεται στην καθαρή επιφάνεια μέχρι να επέλθει κάποια ισορροπία.

Αν και σε μερικές περιπτώσεις το ποσό του διεισδυτικού υγρού είναι αρκετό, ώστε να γίνει η ανίχνευση με το μάτι, η ευαισθησία αυξάνεται δραματικά με τη χρήση του διαλύτη ανάπτυξης. Με το που απλώνεται ο διαλύτης ανάπτυξης σχηματίζει επιφανειακό στρώμα που μοιάζει με σφουγγάρι και περιέχει λεπτά τριχοειδή μονοπάτια σε τυχαία διάταξη. Αν ο διαλύτης ανάπτυξης είναι σωστά σχεδιασμένος τότε προσροφά το υγρό από την ατέλεια. Το διεισδυτικό υγρό συνεχίζει να μεταναστεύει υπό την τριχοειδή δράση και εξαπλώνεται μέσα στον διαλύτη ανάπτυξης ώσπου να επέλθει κάποια ισορροπία.

Τα στάδια εκτέλεσης της μεθόδου παρατίθενται αναλυτικά στην εικόνα 1-3, όπου απεικονίζονται αναλυτικά τα διαδοχικά βήματα που θα οδηγήσουν στην εμφάνιση των ατελειών στην επιφάνεια.



ΕΙΚΟΝΑ 1-3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ^[3]

Υπέρηχοι:

Οι υπέρηχοι είναι μηχανικά κύματα σε αντίθεση με το φως ή τις ακτίνες X που αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία συνίστανται από ταλαντώσεις ατομικών ή μοριακών μερών μιας ουσίας γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και συμπεριφέρονται ακριβώς όπως και τα ακουστικά κύματα. Διαδίδονται σε ελαστικά υλικά που μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια όχι

³ Πηγή εικόνας 1-3 : Website, <http://www.karldeutsch.de/>

όμως και στο κενό. Όπως και τα κύματα φωτός οι υπέρηχοι ανακλώνται από επιφάνειες, διαθλώνται όταν διασχίζουν ένα σύνορο μεταξύ δύο ουσιών που έχουν διαφορετικές χαρακτηριστικές ταχύτητες ήχου, και περιθλώνται σε όρια ή γύρω από εμπόδια.

Αποτελεί μια μέθοδο κατά την οποία ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας εισέρχονται στο υλικό για την ανίχνευση επιφανειακών και εσωτερικών ατελειών. Τα ηχητικά κύματα καθώς ταξιδεύουν μέσα στο υλικό, χάνουν ποσά ενέργειάς τους και ανακλώνται στις διεπιφάνειες. Η ανακλώμενη ακτίνα συλλέγεται και αναλύεται ώστε να προσδιοριστεί η παρουσία και η θέση μιας ατέλειας ή ασυνέχειας.

Ο βαθμός της ανάκλασης εξαρτάται κατά πολύ από τη φυσική κατάσταση της διεπιφάνειας (interface) και λιγότερο από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού. Για παράδειγμα, τα ηχητικά κύματα ανακλώνται σχεδόν πλήρως σε διεπιφάνειες μετάλλου – αερίου και μερικώς σε διεπιφάνειες μετάλλου – υγρού ή μετάλλου – στερεού.

Ρωγμές, πολύ λεπτά στρώματα, κενά (shrinkage) από συστολή, κοιλότητες, πόροι, ρινίσματα, και άλλες ασυνέχειες που αποτελούν επιφάνειες όπου τα μικροκύματα ανακλώνται, μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν. Εγκλείσματα και άλλες ανομοιογένειες προκαλούν μερική ανάκλαση και σκέδαση ή κάποιο άλλο φαινόμενο όταν εξετάζονται με μικροκύματα.

Οι περισσότερες συσκευές υπερήχων μετρούν ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα.

- Ανάκλαση των κυμάτων από διεπιφάνειες που αποτελούν σύνορο υλικών ή ασυνεχειών μέσα σε ένα υλικό
- Τον χρόνο της διάβασης του κύματος μέσα από το αντικείμενο από το σημείο εισόδου έως το σημείο εξόδου δηλαδή το μεταφορά
- Την εξασθένηση των κυμάτων λόγω απορρόφησης ή σκέδασης στο εσωτερικό του υλικού
- Χαρακτηριστικά της φασματικής εκπομπής (spectral response) για το διαδιδόμενο και το ανακλώμενο σήμα

Οι περισσότερες μετρήσεις με υπερήχους γίνονται στη περιοχή συχνοτήτων 0,1 – 25 MHz (πάνω από τις συχνότητες της ανθρώπινης ακοής που είναι από 20 Hz έως 20 KHz). Τα κύματα υπερήχων είναι μηχανικές ταλαντώσεις. Τα πλάτη των ταλαντώσεων στα μεταλλικά μέρη επιβάλλουν τάσεις μικρότερες του ορίου ελαστικότητας αποκλείοντας έτσι μόνιμες επιπτώσεις. Εκτός από τον εντοπισμό ατελειών, τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται στη μέτρηση πάχους και διάβρωσης, στον προσδιορισμό χαρακτηριστικών δεσμού και στην παρατήρηση φυσικών ιδιοτήτων, δομής, μεγέθους, κόκκων και ελαστικών σταθερών.

Οι υπέρηχοι διαδίδονται μέχρι ένα ποσοστό σε κάθε ελαστικό μέσο. Όταν τα ατομικά ή μοριακά μέρη ενός μέσου απομακρυνθούν από τη θέση ισορροπίας τους τότε αναπτύσσεται εσωτερική τάση ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία. Λόγω των ενδοατομικών αυτών δυνάμεων μεταξύ γειτονικών μονάδων, κάθε αλλαγή της θέσης προκαλεί ένα μηχανικό κύμα. Το πλάτος, και η ταχύτητα διαφέρουν για τα υγρά, τα στερεά και τα αέρια, λόγω της διαφορετικής απόστασης των σωματιδίων σε κάθε κατάσταση, οι οποίες επιδρούν με διαφορετικό μέτρο στην έλξη μεταξύ τους και τελικά στην ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Η σχέση ταχύτητας και συχνότητας είναι $V=f\lambda$ όπου V είναι η ταχύτητα (μέτρα ανά δευτερόλεπτο) f είναι η συχνότητα (σε Hertz) και λ είναι το μήκος κύματος (σε μέτρα ανά κύκλο).

Σε ότι αφορά τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται για τυχαίες διεγέρσεις με βάση την απομάκρυνση των ατόμων από τη θέση ισορροπίας, οι υπέρηχοι κατηγοριοποιούνται ως διαμήκη κύματα και εγκάρσια κύματα, Ακόμη η συσχέτιση του μήκους κύματος και του μέσου διάδοσης τα διαχωρίζει σε επιφανειακά κύματα και κύματα Lamb.

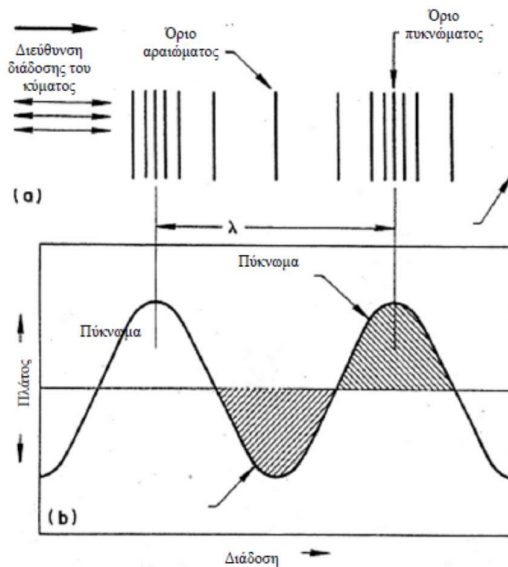
Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται μέσα στα υλικά σαν διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα όπου τα ατομικά μέρη που διαδίδουν το κύμα δονούνται προς τα εμπρός και προς τα πίσω ακολουθώντας τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ένα σχεδιάγραμμα του πλάτους της απομάκρυνσης σε συνάρτηση με την απόσταση της διάδοσης του κύματος μαζί με τα συνεπαγόμενα αραιώματα – κοιλάδες και πυκνώματα – όρη φαίνεται στην εικόνα 1-4.

Τα εγκάρσια κύματα αναπαρίστανται εύκολα με ένα σχοινί που ταλαντώνεται ρυθμικά έτσι ώστε το κάθε σημείο του δονείται και αυτό κάθετα στο επίπεδο διάδοσης του κύματος. Ένα τέτοιο κύμα φαίνεται στην εικόνα 1-5.

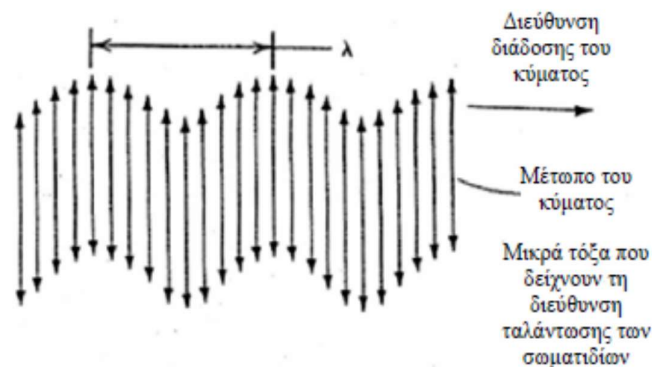
Σε αντίθεση με τα διαμήκη, τα εγκάρσια κύματα δεν μπορούν να υποστηριχθούν από τις ελαστικές συγκρούσεις γειτονικών ατομικών ή μοριακών μερών. Για τη διάδοσή τους είναι απαραίτητο κάθε μέρος να ασκεί σημαντική ελκτική δύναμη στα γειτονικά του και να τα συμπαρασύρει στην επαναλαμβανόμενη ανοδική και καθοδική του κίνηση. Η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων για το ίδιο υλικό είναι περίπου το 50% των διαμηκών. Στο νερό και στον αέρα είναι αδύνατο να υπάρξουν αυτού του είδους τα κύματα.

Ο συντονισμός των διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων προκαλεί τα ψευδο-διαμήκη και ψευδο-εγκάρσια κύματα. Τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας σε στερεά μέρη τα οποία έχουν σχετικά μεγάλο πάχος. Για την διάδοση αυτού του τύπου κύματος θα πρέπει αυτό να οδεύει κατά μήκος της επιφάνειας του κυματοδηγού, που θα χαρακτηρίζεται στη μια μεριά από τις ισχυρές ελαστικές δυνάμεις ενός στερεού και στην άλλη μεριά από τις πρακτικά

αμελητέες ελαστικές δυνάμεις μεταξύ μορίων αερίου. Στην περίπτωση αυτή, το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου υπερήχου είναι πολύ μικρότερο των διαστάσεων (κυρίως του πάχους) του ακουστικού κυματοδηγού. Η ταχύτητά τους στο ίδιο υλικό φθάνει το 90% των διαμήκων κυμάτων, ενώ υφίστανται κι αυτά εξασθένηση μέσα στο υλικό. Η περιοχή που τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται με αρκετή ενέργεια δεν είναι μεγαλύτερη από ένα μήκος κύματος κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου. Σε αυτό το βάθος η ενέργεια του κύματος φθάνει το 4% της ενέργειας επιφανείας και το πλάτος των ταλαντώσεων μειώνεται απότομα σε πολύ μικρές τιμές για μεγαλύτερο βάθος.

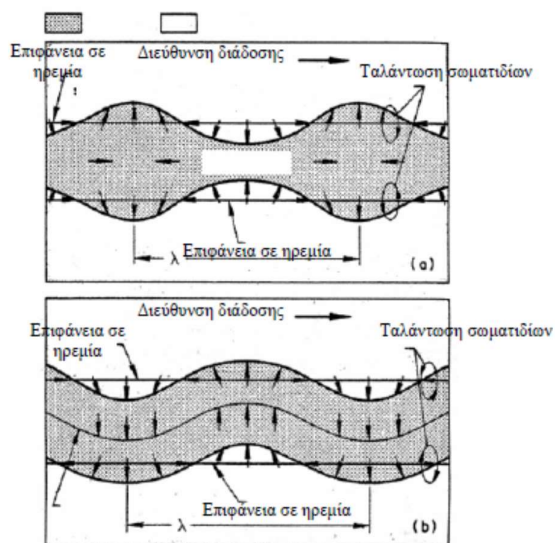


ΕΙΚΟΝΑ 1-4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ. (Α) ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΩΜΑΤΩΝ, (Β) ΠΛΑΤΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ.



ΕΙΚΟΝΑ 1-5 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.

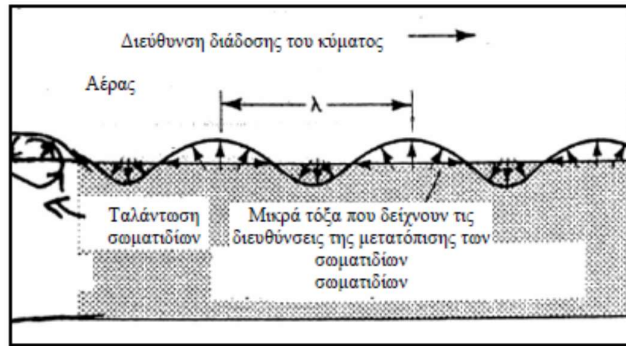
Τα επιφανειακά κύματα ακολουθούν περιμετρικές επιφάνειες και εμποδίζονται από απότομα σύνορα όπως για παράδειγμα τα όρια των πλευρών ενός κύβου. Αν όμως αυτά είναι στρογγυλοποιημένα, τότε η διάδοσή τους συνεχίζεται κανονικά. Χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση αντικειμένων με πολύπλοκες καμπύλες. Μια σχηματική αναπαράσταση είναι η αυτή της εικόνας 1-6.



ΕΙΚΟΝΑ 1-6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΜΑΤΩΝ RAYLEIGH ΠΟΥ ΔΙΑΔΙΔΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ, ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ – ΑΕΡΑ.

Τα κύματα Lamb ή κύματα πλάκας διαδίδονται σε πλάκες με πάχος μόνο μερικά μήκη κύματος. Το κύμα Lamb αποτελείται από μια σύνθετη ταλάντωση που λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το πάχος του υλικού. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του είναι η πυκνότητα, οι ελαστικές ιδιότητες, η δομή και το πάχος του δοκιμίου, καθώς επίσης και η συχνότητα. Η συμπεριφορά τους γενικότερα ομοιάζει με εκείνη που παρατηρείται στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα από κυματοδηγούς.

Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων Lamb: α) τα συμμετρικά και β) τα ασύμμετρα. Η κατηγοριοποίηση εξαρτάται από το αν η κίνηση είναι συμμετρική ή ασύμμετρη ως προς τον ουδέτερο άξονα του δοκιμίου όπως δείχνεται στην εικόνα 1-7.



ΕΙΚΟΝΑ 1-7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΜΑΤΩΝ LAMB. (Α) ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ. (Β) ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ.

Οι κυριότερες μεταβλητές στην επιθεώρηση με υπερήχους είναι η 1) ακουστική εμπέδηση, 2) η συχνότητα, 3) η γωνία πρόσπτωσης, 4) η πυκνότητα ακτίνας.

- 1) Όταν τα κύματα υπερήχων ταξιδεύοντας σε ένα μέσο προσκρούουν σε σύνορο ενός άλλου μέσου ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακουστικής ενέργειας ανακλάται πίσω ενώ η εναπομείνουσα ενέργεια διαδίδεται μέσα στο δεύτερο μέσο. Το χαρακτηριστικό μέγεθος από το οποίο εξαρτάται το ποσοστό ανάκλασης είναι η ακουστική εμπέδηση των δύο υλικών. Αν αυτές είναι ίδιες τότε δεν γίνεται ανάκλαση. Αν οι εμπεδήσεις διαφέρουν πολύ (π.χ. μεταξύ μετάλλου και αέρα) θα γίνει σχεδόν ολική ανάκλαση.
- 2) Η ευαισθησία ή αλλιώς η ικανότητα του συστήματος να εντοπίζει πολύ μικρές ασυνέχειες αυξάνεται σε σχετικά υψηλές συχνότητες (μικρά μήκη κύματος). Η αναλυτική ικανότητα του συστήματος στο να δώσει διαφορετικές ενδείξεις για ασυνέχειες οι οποίες βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη, στο ίδιο βάθος και σε πλάγια θέση, είναι ανάλογη της συχνότητας και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του παλμού ή του μήκους κύματος.
- 3) Μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κύματος είναι κάθετη ως προς την διεπιφάνεια η διάδοση και η ανάκλαση συμβαίνουν χωρίς αλλαγή της διεύθυνσης της ακτίνας. Σε κάθε άλλη περίπτωση εμφανίζονται τα φαινόμενα της διάθλασης και της αλλαγής της φύσης της κίνησης του κύματος.
- 4) Η πυκνότητα του κύματος έχει άμεση σχέση με το πλάτος των ταλαντώσεων των σωματιδίων. Η ακουστική πίεση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται συχνότερα να δηλώσει το μέγεθος των εναλλασσόμενων τάσεων που επιβάλλονται σε ένα υλικό από το διαδιδόμενο κύμα και εξαρτάται από το προϊόν της ακουστικής εμπέδησης και το πλάτος της κίνησης των σωματιδίων. Το ποσό της ακουστικής πίεσης υψωμένο στο τετράγωνο προσδιορίζει το ποσό της ενέργειας στο κύμα. Η πυκνότητα, η ενέργεια δηλαδή που μεταδίδεται σε μια κάθετη διατομή της ακτίνας, είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ακουστικής πίεσης.

Βασικές μέθοδοι επιθεώρησης με υπερήχους

Οι δύο κύριοι μέθοδοι επιθεώρησης με υπερήχους είναι η μέθοδος της διάδοσης και η μέθοδος της παλμικής ηχούς. Η κυριότερη διαφορά τους είναι ότι η μέθοδος διάδοσης εμπεριέχει μόνο τη μέτρηση της εξασθένησης του σήματος, ενώ η μέθοδος της παλμικής ηχούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης.

Η μέθοδος της παλμικής ηχούς, που είναι η πιο διαδεδομένη αποσκοπεί στην ανίχνευση των ήχων που παράγονται όταν ένας υπερηχητικός παλμός ανακλάται από μία ασυνέχεια ή μία διεπιφάνεια ενός δοκιμίου. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό της θέσης των ατελειών και για τη μέτρηση πάχους. Το βάθος της ατέλειας προσδιορίζεται από το χρόνο που μεσολαβεί από τον αρχικό παλμό μέχρι την παραγόμενη ηχώ από την ατέλεια. Το βάθος προκύπτει και από τη διαφορά των ήχων της ατέλειας και της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου. Το μέγεθος της ατέλειας εκτιμάται από τη σύγκριση του μεγέθους του ανακλώμενου σήματος και ενός ανακλαστή αναφοράς, γνωστού μεγέθους, ή από τη σύγκριση του ανακλώμενου σήματος της ατέλειας και της πίσω επιφάνειας που δεν έχει ατέλειες.

1.1.2.Ορισμοί, σκοπός και μέθοδοι των καταστροφικών ελέγχων

Οι καταστροφικοί έλεγχοι ή, όπως επίσης χαρακτηρίζονται, οι μηχανικές δοκιμές των υλικών εφαρμόζονται σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς όπως οι βιομηχανίες επεξεργασίας και διαμόρφωσης μετάλλου, βιομηχανίες πλαστικών και ελαστομερών προϊόντων, χημική βιομηχανία, δομικές κατασκευές, αεροπορία, αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.

Ο υπολογισμός της συμπεριφοράς ενός μεταλλικού υλικού καθώς και ο προσδιορισμός των αποδεκτών καταπονήσεων είναι εφικτοί μόνο όταν είναι γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Δηλαδή θα πρέπει να είναι γνωστό από ποιο φορτίο και πέρα το υλικό θα παραμορφωθεί κατά αναντίστροφο τρόπο προκαλώντας αλλαγές στη γεωμετρία του και ποιο είναι το οριακό φορτίο που είναι δυνατόν να αντέξει πριν την οριστική του θραύση. Οι μηχανικές δοκιμές πρέπει να είναι απλές, αναπαραγωγίσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα, κατά τον ίδιο τρόπο από όλους. Για το λόγο αυτό, εθνικοί οργανισμοί όπως η ASTM (American Society for Testing and Materials) και ο ISO (International Standardization Organization) κανονικοποιούν τις δοκιμές τους. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμίων και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και τη βαθμονόμηση τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πιο συνήθεις εφαρμογές στον καταστροφικό έλεγχο είναι η δοκιμή εφελκυσμού, η δοκιμή κάμψης, η δοκιμή σκληρότητας και η δοκιμή κάμψης. Στη συνέχεια θα αναλυθούν κατά σειρά.

Δοκιμή εφελκυσμού:

Η δοκιμή εφελκυσμού αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες δοκιμές προσδιορισμού των υλικών. Στην πιο απλή μορφή του, ο έλεγχος διεξάγεται με την αρπαγή των δύο άκρων ενός κατάλληλα σχεδιασμένου και προετοιμασμένου δοκιμίου και την προένταση του εντός του εύρους φόρτισης της μηχανής στην οποία διεξάγεται η δοκιμή. Μια εφελκυστική τάση εφαρμόζεται από τη μηχανή που έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή επιμήκυνση και τελικά θραύση του υπό εξέταση δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής γίνεται καταγραφή της επιμήκυνσης σε συνάρτηση με το εφαρμοζόμενο φορτίο, καθώς τα δεδομένα αυτά αποτελούν την ποσοτική μέτρηση του τρόπου με τον οποίο το δοκίμιο παραμορφώνεται υπό την εφαρμοζόμενη εφελκυστική δύναμη. Η σωστή εκτέλεση της δοκιμής εφελκυσμού και αποτύπωση του λόγου δύναμης προς επιμήκυνση μπορούν να ποσοτικοποιήσουν πολύτιμες και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τέτοιες μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από τη δοκιμή εφελκυσμού είναι:

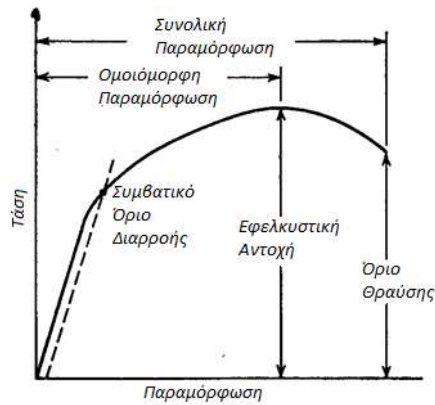
- Ιδιότητες ελαστικής παραμόρφωσης όπως μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson.^[**]
- Όριο διαρροής και μέγιστη εφελκυστική αντοχή.^[**]
- Ιδιότητες ολκιμότητας όπως επιμήκυνση θραύσης, μείωση διατομής.^[**]

Αυτά τα χαρακτηριστικά των υλικών που προκύπτουν από τις Δοκιμές Εφελκυσμού, χρησιμοποιούνται κατά των ποιοτικό έλεγχο στην παραγωγική διαδικασία, για την κατηγοριοποίηση των δομικών υλικών, για τον προσδιορισμό νέων αναπτυγμένων κραμάτων, για τον υπολογισμό της στατικής αντοχής κατά το σχεδιασμό των κατασκευών κ.α. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων, οι Δοκιμές Εφελκυσμού εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της ικανότητας της εκτελεσμένης συγκόλλησης να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές αντοχής της σύνδεσης.

Το κύριο προϊόν μιας Δοκιμής Εφελκυσμού, είναι η καμπύλη Φορτίου προς Επιμήκυνση η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε καμπύλη Τάσης προς Παραμόρφωση. Καθώς στη μηχανική των υλικών τόσο η τάση όσο και η παραμόρφωση, προκύπτουν από τη διαίρεση του φορτίου και της επιμήκυνσης αντίστοιχα με σταθερές μεταβλητές (που προκύπτουν από τη γεωμετρία του δοκιμίου), η καμπύλη Φορτίου-Επιμήκυνσης έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης που εφαρμόζεται στη Μηχανική. Η καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης (εικόνα 1-8) που προφανώς συσχετίζει το αίτιο της εφαρμοζόμενης Τάσης με το αποτέλεσμα της προκύπτουσας

^{**} Ορισμοί των εννοιών δίνονται στο Παράρτημα Ι - Ορισμοί περιοχών σε διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

Παραμόρφωσης είναι μοναδική για κάθε υλικό. Αν χρησιμοποιηθεί η πραγματική Τάση (η οποία βασίζεται στην τρέχουσα, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, διατομή του δοκιμίου), τότε προκύπτει ότι η καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης έχει αύξουσα μορφή μέχρι την τελική θραύση.



ΕΙΚΟΝΑ 1-8 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Δοκιμή Κάμψης

Η δοκιμή κάμψης εφαρμόζεται συνήθως για τον προσδιορισμό της ολκιμότητας υλικών και συγκολλητών συνδέσεων. Οι δοκιμές αυτές, διαφέρουν θεμελιωδώς από άλλες μηχανικές δοκιμές στο γεγονός ότι οι περισσότερες μηχανικές δοκιμές είναι σχεδιασμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να δίνουν ποσοτικά αποτελέσματα και να έχουν αντικειμενικό τελικό αποτέλεσμα. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης είναι της μορφής Pass/Fail με υποκειμενικό τελικό αποτέλεσμα (ο εκτελών τη δοκιμή αποφασίζει αν το δοκίμιο έχει υποστεί ρηγμάτωση).

Η δοκιμή καμπτικής ολκιμότητας αποτελεί μια οικονομική, απλή τεχνική ελέγχου χωρίς να απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και για το λόγο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα και σε μη-εξειδικευμένα εργαστήρια.

Οι δοκιμές κάμψης σε συγκολλήσεις εκτελούνται σύμφωνα με το EN ISO 5173 "Destructive tests on welds in metallic materials - Bend tests".

Το πάχος του δοκιμίου είναι συνήθως το πάχος του βασικού υλικού. Αν αυτό είναι μεγαλύτερο από 30 mm, τότε το δοκίμιο μπορεί να υποστεί μηχανουργική κατεργασία προκειμένου να αποκτήσει πάχος της τάξης των 30 mm. Στην πλευρά του δοκιμίου το οποίο κατά την κάμψη θα υποστεί εφελκυσμό, οι ακμές πρέπει να ομαλοποιηθούν σε συγκεκριμένη ακτίνα που δίνεται από το πρότυπο.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της δοκιμής, διαφορετικά δοκίμια πρέπει να τοποθετηθούν στη μηχανή δοκιμής με τρόπο τέτοιο ώστε τόσο το πρόσωπο όσο και η ρίζα της συγκόλλησης να βρεθούν υπό εφελκυστική καταπόνηση.

Αν απαιτείται ο προσδιορισμός της επιμήκυνσης κάμψης, θα πρέπει πριν τη δοκιμή, να προσδιοριστεί η ζώνη παραμόρφωσης στην περιοχή εφελκυσμού εφαρμόζοντας καλίμπρα μέτρησης με βαθμονόμηση ανά 5 mm. Η επιμήκυνση μετράται μετά την επίτευξη της απαιτούμενης γωνίας κάμψης. Το αρχικό μήκος επιμήκυνσης ορίζεται ως το πλάτος συγκόλλησης προσαναυξημένο με το πάχος του υλικού.

Συναντώνται τέσσερεις τύποι δοκιμών:

1. «Πρόσωπο» (Face): Λαμβάνεται εγκάρσια στον άξονα συγκόλλησης σε κατά συμβολή συγκολλήσεις στοιχείων πάχους ως $\sim 12\text{mm}$ και η δοκιμή γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε το «πρόσωπο» («καπάκι» - ενίσχυση) της συγκόλλησης να βρίσκεται σε εφελκυσμό (εξωτερική επιφάνεια κάμψης).
2. «Ρίζα» (Root): Λαμβάνεται εγκάρσια στον άξονα συγκόλλησης σε κατά συμβολή συγκολλήσεις στοιχείων πάχους ως $\sim 12\text{mm}$ και η δοκιμή γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε η ρίζα της συγκόλλησης να βρίσκεται σε εφελκυσμό (εξωτερική επιφάνεια κάμψης).
3. Πλευρικό (Side): Λαμβάνεται τμήμα ($\sim 10\text{mm}$) εγκάρσια, κατά το πλήρες πάχος του μετάλλου συγκόλλησης κατά συμβολή συγκολλήσεων πάχους $> \sim 12\text{mm}$ και κατά τη δοκιμή κάμπτεται το πλήρες πάχος της ραφής συγκόλλησης (πλευρά σε εφελκυσμό). Γι πλευρική δοκιμή κάμψης, πραγματοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί η ολκιμότητα συγκολλητών συνδέσεων στο εγκάρσιο επίπεδο.
4. Διάμηκες: Λαμβάνεται παράλληλα στον άξονα συγκόλλησης κατά συμβολή συγκολλήσεων πάχους ως $\sim 12\text{mm}$ και κατά τη δοκιμή κάμπτονται το «πρόσωπο» ή η ρίζα της συγκόλλησης.

Δοκιμές σκληρότητας

Ο όρος σκληρότητα, όπως χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, μπορεί να ερμηνευτεί ως την ικανότητα ενός υλικού να αντισταθεί στη μόνιμη δημιουργία κοιλότητας ή εσοχής ή παραμόρφωσης όταν έρθει σε επαφή με διεισδυτή υπό την εφαρμογή φορτίου. Γενικά, μια δοκιμή σκληρότητας περιλαμβάνει την πίεση ενός διεισδυτή με γνωστή γεωμετρία και γνωστές μηχανικές ιδιότητες, υπό γνωστό φορτίο στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού. Η σκληρότητα του υλικού ποσοτικοποιείται μέσω μιας ποικιλίας από κλίμακες όπου είτε άμεσα είτε έμμεσα προσδιορίζουν ουσιαστικά την πίεση επαφής που απαιτείται για την παραμόρφωση της επιφάνειας. Καθώς ο

διδυμής πιέζεται ώστε να εισχωρήσει στην υπό εξέταση επιφάνεια κατά τη δοκιμή, ως σκληρότητα μπορεί να οριστεί η ικανότητα του υλικού να αντισταθεί σε τοπικό θλιπτικό φορτίο.

Ο διεισδυτής μπορεί να είναι είτε σφαιρικός (Brinell test), είτε πυραμιδικός (Vickers and Knoop tests), είτε κωνικός (Rockwell test). Στις δοκιμές σκληρότητας κατά Brinell, Vickers, και Knoop, η τιμή σκληρότητας σχετίζεται με το εφαρμοζόμενο φορτίο και την επιφάνεια διείσδυσης και εκφράζεται σε kg/mm^2 ενώ, στη δοκιμή σκληρότητας κατά Rockwell, προσδιορίζεται το βάθος διείσδυσης για δεδομένο φορτίο και μετατρέπεται σε αριθμό που δεν ακολουθείται από μονάδες και που ανάστροφα σχετίζεται με το βάθος διείσδυσης.

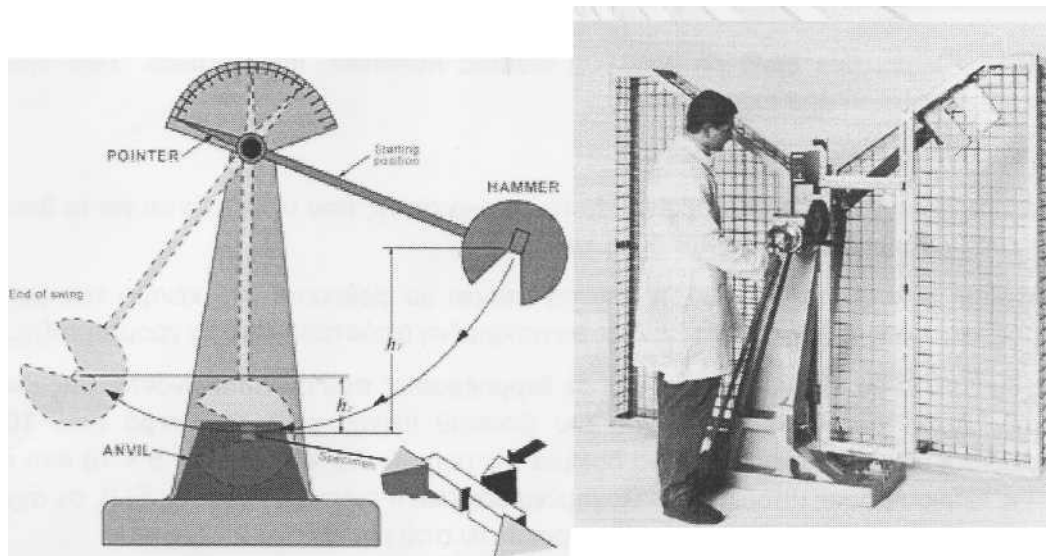
Η ερμηνεία της πληροφορίας της σκληρότητας του υλικού είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος της βιομηχανίας. Ένας μηχανικός που ασχολείται με τη θραυστομηχανική, θεωρεί ένα σκληρό υλικό ως ψαθυρό και συνεπώς λιγότερο αξιόπιστο σε κρουστικά φορτία. Στον αντίποδα, ένας μηχανικός που ασχολείται με τριβολογικά φαινόμενα, θεωρεί ένα υλικό με μεγάλη τιμή σκληρότητας ως επιθυμητή ιδιότητα για τη μείωση της φθοράς και των παραμορφώσεων σε μια σειρά από εφαρμογές. Ένας μεταλλουργός επιθυμεί χαμηλές σκληρότητες στην περίπτωση της εργοσκληρυνσης ενώ, ένας μηχανικός κατεργασιών επιθυμεί χαμηλές σκληρότητες προκειμένου να δώσει την επιθυμητή μορφή και σχήμα στην πρώτη ύλη του χωρίς αστοχίες και φθορά των εργαλείων κατεργασίας.

Η δοκιμή σκληρότητας είναι ίσως η πιο απλή και ταυτόχρονα γρήγορη μέθοδος χαρακτηρισμού μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, Είναι σχετικά οικονομική και δεν απαιτεί ιδιαίτερες συνθήκες προετοιμασίας του υλικού. Επιπλέον, θεωρητικές και εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει πως υπάρχει συσχετισμός των τιμών σκληρότητας με άλλες μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή του υλικού, το όριο διαρροής, η αντοχή σε κόπωση και ερπυσμό κ.α. Αυτοί οι συσχετισμοί επιτρέπουν την αξιοποίηση των μετρήσεων σκληρότητας κατά τον ποιοτικό έλεγχο ενδιάμεσων ή τελικών προϊόντων κατεργασίας.

Δοκιμές κρούσης

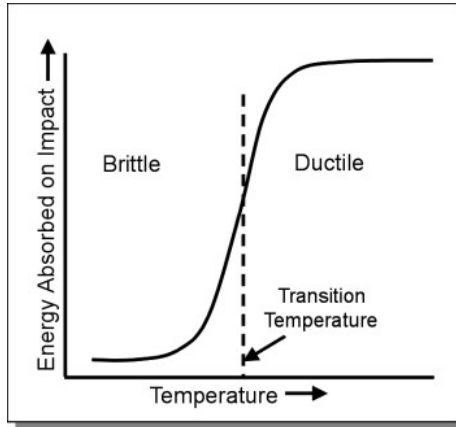
Η δοκιμή κρούσης πραγματοποιείται μέσω των δοκιμών Charpy ή Izod. Αυτές οι δοκιμές έχουν το όνομα των ανθρώπων που τις ανακάλυψαν και αναπτύχθηκαν στις αρχές του 1900 πολύ πριν την ανάπτυξη των θεωριών της θραυστομηχανικής. Οι ιδιότητες θραύσης, δεν χρησιμοποιούνται απευθείας στους υπολογισμούς της θραυστομηχανικής. Πρόκειται για οικονομικές δοκιμές που συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται ως τεχνικές ποιοτικού ελέγχου που σκοπό έχουν να προσδιορίσουν την ευαισθησία σε κρουστικά φορτία και να συγκρίνουν τη δυσθραυστότητα μεταξύ των υλικών.

Οι δύο αναφερόμενες δοκιμές χρησιμοποιούν διαφορετικών διαστάσεων δοκίμια και διαφορετικό τρόπο συγκράτησης των δοκιμίων κατά την κρούση. Ωστόσο, και οι δυο χρησιμοποιούν την ίδια διάταξη δοκιμής σε μορφή εκκρεμούς (εικόνα 1-9). Και στις δυο δοκιμές, προκαλείται θραύση του δοκιμίου υπό την εφαρμογή φορτίου που συγκεντρώνεται στην άκρη του εκκρεμούς. Ένα σημείο διακοπής χρησιμοποιείται προκειμένου να καταγράψει τη διαδρομή της ταλάντωσης του εκκρεμούς μετά τη θραύση του δοκιμίου. Η δυσθραυστότητα του υλικού προσδιορίζεται από τη μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνεται προκειμένου το δοκίμιο να αστοχήσει. Αυτό προσδιορίζεται εύκολα καταγράφοντας το ύψος από το οποίο αφήνεται το εκκρεμές και το ύψος που φτάνει ταλαντευόμενο το εκκρεμές μετά την κρούση στο δοκίμιο. Η διαφορά των δυο δυναμικών ενεργειών στις δυο διαφορετικές θέσεις του εκκρεμούς, δίνει την ενέργεια που απορροφήθηκε κατά την κρούση.



ΕΙΚΟΝΑ 1-9 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ.

Καθώς η δυσθραυστότητα των υλικών εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία οι δοκιμές κατά Charpy ή Izod συχνά επαναλαμβάνονται σε μεγάλο αριθμό υπό διαφορετικές θερμοκρασίες. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτουν οι καμπύλες δυσθραυστότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για κάθε υπό εξέταση υλικό (εικόνα 1-10). Όπως φαίνεται στην εικόνα 1-10, σε χαμηλές θερμοκρασίες το υλικό είναι πιο ψαθυρό και η δυσθραυστότητα χαμηλή. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, το υλικό είναι περισσότερο όλκιμο και η τιμή της δυσθραυστότητας υψηλή. Η θερμοκρασία μετάβασης είναι το σύνορο ουσιαστικά μεταξύ όλκιμης και ψαθυρής συμπεριφοράς και αποτελεί εξαιρετικά σημαντική πληροφορία κατά την επιλογή του υλικού της κατασκευής.



ΕΙΚΟΝΑ 1-10 ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ – ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.

Θραυστομηχανική

Γενικά, η δυσθραυστότητα ενός υλικού ορίζεται ως η ικανότητα του να απορροφήσει ενέργεια κατά την θραύση του. Η δυσθραυστότητα ενός υλικού παρουσία μίας εγκοπής (notch toughness) καθορίζει την ικανότητα ενός υλικού να απορροφήσει ενέργεια κατά την θραύση του υπό δυναμική φόρτιση παρουσία μιας εγκοπής. Εκτός από τις δοκιμές κρούσης έχουν αναπτυχθεί διάφορα άλλες δοκιμές για τον καθορισμό της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια κατά την θραύση του παρουσία μιας εγκοπής. Τέτοιες δοκιμές περιλαμβάνουν τα τεστ δυναμικής απόσχισης - dynamic tearing tests (e.g. DWTT) και τα τεστ επιφανειακής τάσης θραύσης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας - plane strain fracture toughness tests (π.χ. CTOD) κάτω από στατική ή δυναμική φόρτιση.

Η επιστήμη της θραυστομηχανικής μελετά την επίδραση παραμέτρων όπως η φόρτιση, το είδος των υπάρχοντων ελαττωμάτων, η γεωμετρία συγκεκριμένων εξαρτημάτων και η δυσθραυστότητα των υλικών, ώστε να εξετάσει εάν μία κατασκευή μπορεί να λειτουργήσει και για πόσο διάστημα με την ύπαρξη ελαττωμάτων.

1.2.ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΤΟΞΟΥ

1.2.1.Εισαγωγή, ιδιότητες και φυσικές έννοιες

Η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου είναι μία από τις πολλές μεθόδους συγκόλλησης τήξης που χρησιμοποιούνται για την συνένωση των μετάλλων. Μέσω της εφαρμογής έντονης θερμότητας, το μεταλλικό υλικό στην περιοχή της σύνδεσης ανάμεσα σε δύο μέρη τήκεται, και προκαλείται ανάμειξη των δύο μερών, είτε αυτογενώς, είτε μέσω ενδιάμεσου, τηκόμενου, μεταλλικού υλικού

πλήρωσης. Μετά την ψύξη και στερεοποίηση της τηγμένης περιοχής, προκύπτει ισχυρή μεταλλουργική σύνδεση. Λόγω του ότι η σύνδεση προέρχεται από την ανάμειξη του υλικού του ενός μέρους με υλικό του δεύτερου μέρους, με ή χωρίς τη χρήση ενδιάμεσου παρόμοιου υλικού, η τελική συγκολλητή σύνδεση έχει τη δυνατότητα να παρουσιάζει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες, στην περιοχή της συγκόλλησης, με αυτές του μετάλλου βάσης των δύο προς συγκόλληση μερών.^[4]

Η απαραίτητη έντονη θερμότητα που απαιτείται για την τήξη των μετάλλων, παράγεται με την βοήθεια ηλεκτρικού τόξου. Το τόξο δημιουργείται ανάμεσα στα μέρη που πρόκειται να συνδεθούν, και ένα ηλεκτρόδιο το οποίο κινείται, κατά μήκος της σύνδεσης, είτε χειροκίνητα, είτε μηχανικά.^[5]

Το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι:

- Μια ράβδος άνθρακα ή βολφραμίου, μοναδικός σκοπός της οποίας ράβδου είναι να μεταφέρει το ρεύμα και να διατηρεί το ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στο άκρο της και τα προς συγκόλληση μέρη.
- Μια ειδικά παρασκευασμένη ράβδος ή σύρμα, τα οποία όχι μόνο άγουν το ρεύμα και διατηρούν το τόξο αλλά επίσης τήκονται και παρέχουν μέταλλο πλήρωσης στην περιοχή της συγκόλλησης.

Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι ράβδος άνθρακα ή βολφραμίου (μη αναλυσκόμενη), και στην περιοχή της σύνδεσης απαιτείται υλικό πλήρωσης, αυτό το υλικό παρέχεται από ξεχωριστή ράβδο ή σύρμα μεταλλικού υλικού πλήρωσης. Το μεγαλύτερο μέρος εργασιών συγκόλλησης στα έργα μεταλλικών συγκολλητών κατασκευών όπου απαιτείται υλικό πλήρωσης, διεξάγεται με τον δεύτερο τύπο ηλεκτροδίων - αυτών που παρέχουν υλικό πλήρωσης και ταυτόχρονα αποτελούν τον αγωγό μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος.^{[6][7][8]}

Βασικό ηλεκτρικό κύκλωμα συγκόλλησης τόξου

Το βασικό κύκλωμα ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου εμφανίζεται στην εικόνα 1-11. Μία ηλεκτρική πηγή ικανή να παράγει εναλλασσόμενο (AC) ή συνεχές (DC) ρεύμα, εξοπλισμένη με όλα τα απαραίτητα χειριστήρια ελέγχου, συνδέεται μέσω καλωδίου γείωσης στα προς συγκόλληση μέρη και μέσω καλωδίου ικανού να μεταφέρει ρεύμα υψηλής έντασης με ένα ακροδέκτη που συγκρατεί το ηλεκτρόδιο και επιφέρει την ηλεκτρική επαφή με το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης. Όταν το

⁴ Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1990): «Εισαγωγή στη Μεταλλουργία, την Τεχνολογία και τον Έλεγχο των Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

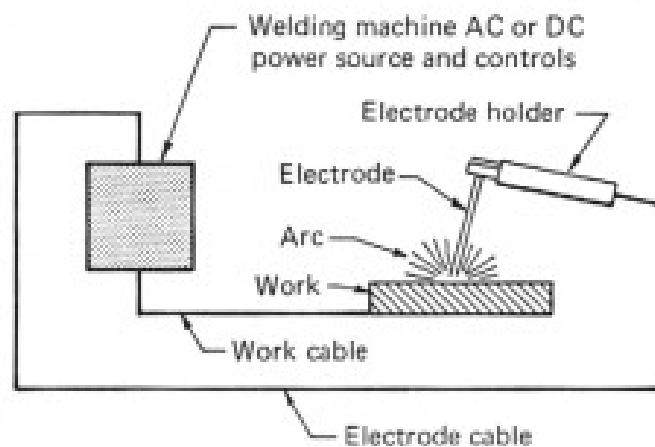
⁵ Σ. Σκολιανός (1991): «Σημειώσεις Χύτευση-Συγκολλήσεις», έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

⁶ Θ.Α. Διαμαντούδης (2000): «Συγκολλήσεις μετάλλων», Θεσσαλονίκη

⁷ Β.Ι. Παπάζογλου (1989): «Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

⁸ Γ. Παρίκος (μετάφραση, 2008): «Τεχνολογία Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα

ηλεκτρικό κύκλωμα ενεργοποιείται και το άκρο του ηλεκτροδίου έρχεται σε επαφή με τα προς συγκόλληση γειωμένα μέρη, και κατόπιν απομακρύνεται αλλά συγκρατείται κοντά στο σημείο της επαφής, δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο στο υπάρχον διάκενο. Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και με αυτόν τον τρόπο το τόξο παράγει υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 3500°C) στο άκρο του ηλεκτροδίου, θερμοκρασία υπέρ αρκετή για να προκαλέσει τήξη των περισσότερων μετάλλων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι μια σύνδεση τήξης και η μεταλλουργική ενοποίηση των προς συγκόλληση μερών.



ΕΙΚΟΝΑ 1-11 ΒΑΣΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΟΞΟΥ

Προστασία του τόξου

Η χρήση της θερμότητας που παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο για τη συγκόλληση μετάλλων προϋποθέτει περισσότερα από την απλή μετακίνηση του ηλεκτροδίου σε σχέση με τα προς συγκόλληση μέρη. Τα μέταλλα σε υψηλές θερμοκρασίες αντιδρούν χημικά με τα βασικά συστατικά του αέρα, δηλαδή με το οξυγόνο, το υδρογόνο και το άζωτο. Στην περίπτωση που το μέταλλο στο τηγμένο λουτρό έρθει σε επαφή με τον αέρα, σχηματίζονται οξείδια και νιτρίδια, τα οποία μετά την στερεοποίηση του τηγμένου λουτρού καταστρέφουν τις ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης. Για τον λόγο αυτό στις διάφορες μεθόδους ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου παρέχονται μέσα προστασίας και κάλυψης του τόξου και του τηγμένου λουτρού μέσω προστατευτικής ατμόσφαιρας που δημιουργείται από κατάλληλα αέρια, ατμοποιημένες ουσίες, ή συλλιπάσματα (πάστες). Η προστασία του τόξου επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές, όπως με χρήση κατάλληλης επικάλυψης (πάστας) στα ηλεκτρόδια (επικάλυψη που παράγει τους ατμούς της προστατευτικής ατμόσφαιρας), με ξεχωριστά παρεχόμενο ειδικό αδρανές αέριο, με ειδική κοκκώδη σκόνη

(συλλίπασμα), ή με τη χρήση υλικών μέσα στον πυρήνα κατάλληλα διαμορφωμένων ηλεκτροδίων, που παράγουν προστατευτικούς ατμούς.

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, ο στόχος της προστατευτικής ατμόσφαιρας είναι να αποτρέψει ή να ελαχιστοποιήσει την επαφή του τηγμένου μετάλλου με τον περιβάλλοντα αέρα. Επιπρόσθετα, η μέθοδος προστασίας του τόξου επηρεάζει τη σταθερότητα του τόξου καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του. Στην περίπτωση που η προστατευτική ατμόσφαιρα δημιουργείται από την επικάλυψη (πάστα) των ηλεκτροδίων, από υλικά στον πυρήνα ηλεκτροδίων, ή από ξεχωριστά παρεχόμενη κοκκώδη σκόνη, προκύπτει επί πλέον μία επιβελτιωτική λειτουργία για την περιοχή της συγκόλλησης. Δηλαδή, τα υλικά στον πυρήνα των ηλεκτροδίων μπορεί να προκαλούν αποξειδωτική επίδραση, ταυτόχρονα με την προστασία του τόξου, και τα υλικά από την επικάλυψη των ηλεκτροδίων ή από την ξεχωριστά παρεχόμενη σκόνη (όπως στη συγκόλληση βυθισμένου τόξου) μπορεί να προσθέτουν χρήσιμα κραματικά στοιχεία στην περιοχή της συγκόλλησης, προστατεύοντας ταυτόχρονα, πάντα, το τόξο και το λουτρό τήξης.

Φυσική του τόξου

Το τόξο είναι ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια μέσω μιας στήλης ιονισμένου αερίου, το οποίο αποκαλείται “πλάσμα”. Ο χώρος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων - ή στην περίπτωση του τόξου ηλεκτροσυγκόλλησης ο χώρος μεταξύ του ηλεκτροδίου και των βασικών μετάλλων - μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές παραγωγής θερμότητας: τη κάθοδο, την άνοδο, και το πλάσμα τόξου.

Το τόξο ηλεκτροσυγκόλλησης χαρακτηρίζεται ως τόξο ρεύματος υψηλής έντασης, χαμηλής διαφοράς δυναμικού το οποίο απαιτεί υψηλή συγκέντρωση ηλεκτρονίων που θα μεταφέρουν το ρεύμα. Τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από τη κάθοδο και ρέουν (μαζί με τα ανιόντα του πλάσματος) προς τη θετικά φορτισμένη άνοδο. Τα θετικά φορτισμένα κατιόντα ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα ανιόντα, δηλαδή τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα, είναι άτομα τα οποία έχουν προσλάβει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, επιπλέον από τα ηλεκτρόνια που απαιτούνται για να εξισορροπήσουν το θετικό φορτίο των σωματιδίων του πυρήνα των ατόμων, κι έτσι προκύπτει το αρνητικό φορτίο των ανιόντων. Τα κατιόντα αντίστοιχα, δηλαδή τα θετικά φορτισμένα ιόντα, είναι άτομα τα οποία έχουν χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, κι έτσι προκύπτει το θετικό φορτίο. Το ρεύμα μεταφέρεται κυρίως μέσω της κίνησης των ηλεκτρονίων, όπως ακριβώς συμβαίνει και στους στερεούς αγωγούς ρεύματος.

Τα αέρια που βρίσκονται στο τόξο καθώς και υλικό από το βασικό μέταλλο και το ηλεκτρόδιο παρέχουν μόρια και άτομα τα οποία διασπώνται (τα μόρια) και στη συνέχεια ιονίζονται (τα άτομα)

ώστε να προκύψουν φορτισμένα σωματίδια. Τα σωματίδια από τα μεταλλικά υλικά εκπέμπονται λόγω κρούσης και θερμότητας. Το ηλεκτροστατικό πεδίο, που υπάρχει λόγω της διαφοράς δυναμικού, προκαλεί εκπομπή σωματιδίων και καθορίζει τη κατεύθυνση της κίνησης τους.

Στη συνέχεια επιτελείται ο ιονισμός των ατόμων, όπου οι αντιδράσεις ιονισμού απαιτούν ενέργεια, που παρέχεται από το πεδίο του τόξου που με τη σειρά του τροφοδοτείται από την πηγή της συγκόλλησης. Η ενέργεια που απαιτείται για τον ιονισμό ενός ατόμου καλείται ενέργεια ιονισμού.

Στην περιοχή της καθόδου παράγεται θερμότητα κυρίως από την κρούση των κατιόντων στην επιφάνεια του υλικού της καθόδου. Η θερμότητα στην περιοχή της ανόδου παράγεται κυρίως μέσω των ηλεκτρονίων. Αυτά έχουν επιταχυνθεί (καθώς περνάνε διαμέσω του πλάσματος) από τη διαφορά δυναμικού του πεδίου του τόξου, και αποδίδουν την κινητική τους ενέργεια, με τη μορφή θερμότητας, καθώς συγκρούονται με την άνοδο.

Το πλάσμα, ή η στήλη τόξου, είναι ένα μείγμα από ουδέτερα και φορτισμένα άτομα αερίου. Στο μέσο του πλάσματος, ηλεκτρόνια, άτομα και ιόντα βρίσκονται σε επιταχυνόμενη κίνηση και διαρκώς συγκρούονται μεταξύ τους. Το θερμότερο μέρος του πλάσματος είναι η κεντρική στήλη του, όπου η κινητικότητα των σωματιδίων είναι εντονότερη. Η τυπική θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτή την περιοχή είναι περίπου 6000°C ενώ σε ειδικές εφαρμογές μπορεί να φτάσει και τους 30.000°C. Το εξώτερο μέρος της “φλόγας” του τόξου είναι ψυχρότερο, και αποτελείται από μόρια αερίου που ανασυντίθενται και τα οποία είχαν πρωτίτερα αποσυντεθεί στο κέντρο του τόξου.

Οι τρεις θερμοκρασιακές ζώνες στη συγκόλληση τόξου αναλύονται ως εξής:

- Άνοδος → έως 4.000°C
- Κάθοδος → έως 3.600°C
- Στήλη τόξου ή πλάσμα → έως 4.500– 30.000°C

Η κατανομή θερμότητας και η πτώση τάσης στις τρεις θερμοκρασιακές ζώνες μπορεί να μεταβάλλεται. Η διακύμανση του μήκους του τόξου επιφέρει την μεγαλύτερη επίδραση στο πλάσμα τόξου. Από σχετικά διαγράμματα και καμπύλες διαφοράς δυναμικού – έντασης ρεύματος για το τόσο ηλεκτροσυγκόλλησης ξεχωρίζουν δύο περιοχές: η περιοχή “Ayrton”, σε χαμηλές τιμές έντασης ρεύματος, όπου μικρή αύξηση της έντασης προκαλεί μεγάλη πτώση της τάσης. Αυτή η περιοχή δεν χρησιμοποιείται στις συγκολλήσεις. Η δεύτερη περιοχή, που αποκαλείται περιοχή “Ohm”, χρησιμοποιείται στις συγκολλήσεις. Σε αυτή την περιοχή, η συμπεριφορά του τόξου είναι γραμμική, και η αύξηση της έντασης προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της τάσης του τόξου, ενώ το τόξο

λειτουργεί σαν ωμική αντίσταση. Με σταθερή τιμή έντασης ρεύματος, για να μεταβληθεί το μήκος του τόξου, απαιτείται αντίστοιχα αύξηση ή μείωση της τιμής της διαφοράς δυναμικού. Επομένως ο παράγοντας που επηρεάζει το μήκος του τόξου είναι η διαφορά δυναμικού. Επίσης, είναι σημαντικό, να γνωρίζουμε ότι το σημείο λειτουργίας “Α” προκύπτει από την τομή της καμπύλης του τόξου με τη χαρακτηριστική καμπύλη της καμπύλης της πηγής του ρεύματος. Πιθανή αλλαγή του αερίου προστασίας του τόξου μπορεί να μεταβάλει την κατανομή θερμοκρασίας ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Η πρόσθεση ειδικών αλάτων στο πλάσμα μειώνει τη διαφορά δυναμικού του τόξου λόγω του αυξημένου ιονισμού που προκαλείται.

Η διαφορά στο ποσό θερμότητας που παράγεται ανάμεσα στην άνοδο και τη κάθοδο μπορεί να επηρεάσει και να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι τύποι τόξου.

Γενικά ισχύει ότι στην περιοχή της ανόδου παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας από ότι στη κάθοδο. Αυτή είναι η συνηθέστερη περίπτωση, και εξηγείται από το γεγονός ότι στη θετικά φορτισμένη άνοδο προσκρούουν τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, τα οποία λόγω της μικρής μάζας τους, επιταχύνονται σε πολύ υψηλές ταχύτητες (από τη διαφορά δυναμικού του πεδίου του τόξου). Αποκτούν έτσι πολύ υψηλά ποσά κινητικής ενέργειας που αποδίδουν προσκρούόμενα στην άνοδο με τη μορφή θερμότητας.

Μηχανισμοί μεταφοράς υλικού κατά την ηλεκτροσυγκόλληση

Στην ηλεκτροσυγκόλληση τόξου, το τόξο όχι μόνο παρέχει την απαραίτητη για την τήξη του ηλεκτροδίου και την δημιουργία του λουτρού τήξης θερμότητα, αλλά, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, πρέπει επίσης να αποτελέσει το μέσο μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου, από το άκρο του ηλεκτροδίου στην προς συγκόλληση περιοχή. Η μεταφορά αυτή επιτελείται κυρίως μέσω σταγόνων τηγμένου ηλεκτροδίου. Ο σχηματισμός αυτών των σταγόνων, το μέγεθος τους και ο τρόπος μεταφοράς τους στο λουτρό συγκόλλησης καθορίζονται από φυσικές και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Παράγοντες που επηρεάζουν την όλη διαδικασία είναι:

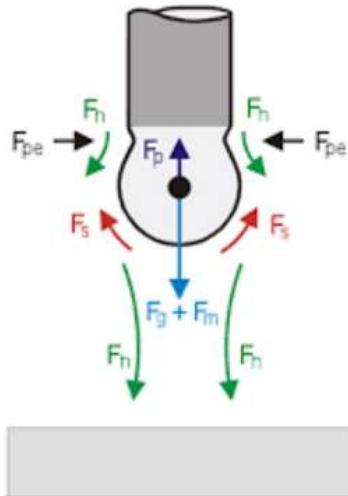
- Το ιξώδες και η επιφανειακή τάση. Το χαμηλό ιξώδες ή και η υψηλή θερμοκρασία οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές επιφανειακής τάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μικρότερων σταγόνων τηγμένου υλικού. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και με την παρουσία υψηλότερης συγκέντρωσης οξυγόνου.

- Τα αέρια της προστατευτικής ατμόσφαιρας. Στις υψηλές θερμοκρασίες, οι σταγόνες τηγμένου μετάλλου απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα αερίων. Τα αέρια κατόπιν, προκαλούν λόγω συστολής, “έκρηξη” των σταγόνων και κατακερματισμό τους.

Υπάρχουν, κυρίως, δύο μηχανισμοί μεταφοράς τηγμένου μετάλλου:

- Πρώτον, στην περίπτωση που δεν υφίστανται προϋποθέσεις αποδέσμευσης της τηγμένης σταγόνας από το άκρο του ηλεκτροδίου, η τηγμένη σταγόνα μετάλλου διογκώνεται μέχρι να έρθει σε επαφή με το τηγμένο μέταλλο στο λουτρό τήξης (πριν αποχωριστεί από το άκρο του ηλεκτροδίου), προκαλείται βραχυκύκλωμα μεταξύ του ηλεκτροδίου και του βασικού μετάλλου, και η μεταφορά επιτελείται με την βοήθεια της επιφανειακής τάσης.
- Δεύτερον, η μεταλλική σταγόνα εκτινάσσεται από το τηγμένο μέταλλο στο άκρο του ηλεκτροδίου με τη βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνητικού φαινομένου που αποκαλείται “pinch effect”: Σε κάθε αγωγό μέσω του οποίου διέρχεται ρεύμα, προκαλείται γύρω του μαγνητικό πεδίο. Αναπτύσσονται μηχανικές, ακτινικές δυνάμεις τότε, που τείνουν να περιορίσουν τη διατομή του αγωγού. Πρόκειται για δυνάμεις “Lorenz”, που στο αντικείμενο των συγκολλήσεων αποκαλούνται “pinch forces”, και είναι διαρκώς κάθετες στις δυναμικές γραμμές του ρεύματος. Οι δυνάμεις αυτές αυξάνονται ευθέως ανάλογα με το τετράγωνο της πυκνότητας ρεύματος, δηλαδή, ευθέως ανάλογα με το τετράγωνο της τιμής έντασης του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογα με τη διατομή του αγωγού ($F_{pe} = \text{current}^2 / \text{cross section}$). Ο περιορισμός της διατομής επεκτείνεται, ώσπου επιτελείται η αποδέσμευση της σταγόνας (εικόνα 1-12). Η σταγόνα εκτινάσσεται, λόγω και των αντίστοιχων συνιστωσών των δυνάμεων “pinch”, με υψηλή ταχύτητα και διατηρεί αυτή τη ταχύτητα, εκτός αν επιβραδυνθεί από τις βαρυτικές δυνάμεις. Μπορεί ακόμα και να επιταχύνεται από το ίδιο το “ρεύμα” του πλάσματος του τόξου. Τέτοια περίπτωση αποτελεί η συγκόλληση σε θέση PE^{***} ή overhead (θέση “ουρανό”). Κατά τη συγκόλληση σε θέση “πλάκα” (PA ή flat), η βαρύτητα παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη μεταφορά του τηγμένου μετάλλου. Για τιμές πυκνότητας ρεύματος πολύ υψηλές, το άκρο του ηλεκτροδίου αποκτά ένα μόνιμο αιχμηρό άκρο. Προκαλείται έτσι δημιουργία μικρών σταγόνων τηγμένου μετάλλου που αποδεσμεύονται με μεγάλη συχνότητα από το ηλεκτρόδιο. Το τόξο σε αυτή την περίπτωση αποκτά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, και αποκαλείται τόξο ψεκασμού (spray arc).

*** Βλέπε παράρτημα II – Θέσεις συγκόλλησης βάσει προτύπων



ΕΙΚΟΝΑ 1-12 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΑΓΟΝΩΝ (ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ PINCH EFFECT).

Αν το ηλεκτρόδιο είναι αναλίσκόμενο, και προστίθεται στη συγκόλληση, το άκρο του τήκεται υπό την θερμότητα του τόξου και τηγμένες σταγόνες του αποκολλούνται και μεταφέρονται στο λουτρό τήξης μέσα από τη στήλη του τόξου. Όταν το ηλεκτρόδιο είναι μη αναλίσκόμενο (ηλεκτρόδιο άνθρακα ή πιο συχνά βολφραμίου), δε μεταφέρονται τηγμένες σταγόνες στη συγκόλληση. Το προστιθέμενο υλικό (αν απαιτείται) τήκεται και προστίθεται στην περιοχή της συγκόλλησης από ξεχωριστή ράβδο ή σύρμα. Το ποσοστό της θερμότητας που αναπτύσσεται από το τόξο και καταλήγει στο λουτρό τήξης, είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση που για τη συγκόλληση χρησιμοποιούνται αναλίσκόμενα ηλεκτρόδια από ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μη αναλίσκόμενα. Το αποτέλεσμα είναι ότι στην περίπτωση συγκολλήσεων με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο επιτυγχάνονται υψηλότερα ποσοστά θερμικής απόδοσης, και οι σχηματιζόμενες θερμικά επηρεασμένες ζώνες (ΘΕΖ) είναι στενότερες. Τυπικές τιμές θερμικής απόδοσης για συγκολλήσεις “metal arc”, δηλαδή με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο κυμαίνονται μεταξύ 75 και 80%, ενώ για συγκολλήσεις με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο, αντίστοιχα 50 με 60%.^[9]

Μέθοδοι έναυσης τόξου

Προϋπόθεση για τη δημιουργία του τόξου είναι η ύπαρξη ιονισμένου μέσου για να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ενός κενού. Η απλή έναρξη του ρεύματος συγκόλλησης με την επαφή ενός ψυχρού ηλεκτροδίου πάνω στο προς συγκόλληση μέταλλο δεν θα προκαλέσει έναυση του τόξου συγκόλλησης. Πρέπει πρώτα να προηγηθεί το “άναμμα” του τόξου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την

⁹ Cynthia L. Jenney, Annette O'Brien, AWS (2001): “Welding Handbook, Volume 1”, American Welding Society editions, Miami

ύπαρξη μιας αρχικής διαφοράς δυναμικού αρκετά υψηλής ώστε να προκαλέσει εκκένωση, είτε με σύντομη επαφή του ηλεκτροδίου και των βασικών μετάλλων, ακολουθούμενη από απομάκρυνση του ηλεκτροδίου, σε κοντινή πάντα απόσταση, καθώς έχει προκύψει θέρμανση της περιοχής της επαφής (λόγω βραχυκυκλώματος), και σχηματισμός της υγρής φάσης και ατμών μετάλλου. Οι σχηματισμοί αυτοί ευνοούν την άμεση έναρξη διαδικασίας ιονισμού. Το τόξο στη συνέχεια επεκτείνεται έως ότου σταθεροποιηθεί και προκόψει θερμοδυναμική ισορροπία. Συχνά χρησιμοποιείται και υψίσυχο ρεύμα (μέθοδος συγκόλλησης TIG) που προκαλεί εκκένωση μέσω σπινθήρων, για συγκολλήσεις τόξου υπό προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου, αλλά η κοινότερη μέθοδος έναυσης ηλεκτρικού τόξου είναι η μέθοδος της “επαφής και απομάκρυνσης”.^{[10][11]}

Οι ηλεκτροσυγκολλήσεις τόξου μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα είτε με συνεχές (DC). Το συνεχές ρεύμα επίσης, μπορεί να είναι είτε σταθερό είτε παλμικό. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα, η πολικότητα μπορεί να είναι είτε ορθή, που σημαίνει ότι το ηλεκτρόδιο είναι αρνητικό, αποτελεί δηλαδή την κάθοδο, είτε ανάστροφη, που σημαίνει αντίστοιχα ότι το ηλεκτρόδιο είναι θετικό και αποτελεί την άνοδο. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα, η πολικότητα, και κατά συνέπεια η κατεύθυνση του ρεύματος μεταβάλλονται σύμφωνα με τη δεδομένη συχνότητα της πηγής. Αυτό συνεπάγεται ότι το ρεύμα στιγμιαία μηδενίζεται κατά τη μετάβαση από τη μία πολικότητα στην άλλη. Στιγμιαία τότε, εκμηδενίζεται (“σβήνει”) και το τόξο. Η συγκόλληση είναι εφικτή μόνο αν στην περιοχή υπάρχει ατμόσφαιρα σωματιδίων που ιονίζονται εύκολα, και η άμεση επανέναυση του τόξου είναι δυνατή. Εδώ συνεισφέρουν τα ήδη ιονισμένα σωματίδια από την προηγούμενη φάση λειτουργίας του τόξου. Θετικά επίσης συνεισφέρουν τετραγωνικές κυματομορφές εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και υψηλές τιμές διαφοράς δυναμικού (τάσης συγκόλλησης). Η επιλογή του τύπου ρεύματος καθώς και της πολικότητας που θα χρησιμοποιηθεί σε μία συγκόλληση, εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης που θα εφαρμοστεί, τον τύπο του ηλεκτροδίου, την προστατευτική ατμόσφαιρα του τόξου, και τα βασικά μέταλλα που πρόκειται να συγκολληθούν. Εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως ο σχεδιασμός της συγκολλητής σύνδεσης, η θέση συγκόλλησης, και το είδος της συγκόλλησης που θα πραγματοποιηθεί (συγκόλληση μετωπική ή γωνιακή, μερικής ή πλήρους διείσδυσης, εκτελούμενη από τη μία ή και από τις δύο πλευρές της κλπ.). Ανεξάρτητα από τον τύπο του ρεύματος, και κατά συνέπεια και του τόξου συγκόλλησης, οι ρυθμίσεις πρέπει να είναι τέτοιες

¹⁰ Annette O’Brien, AWS (2004): “Welding Handbook - 9th Edition, Volume 2”, American Welding Society editions, Miami

¹¹ ASM Handbook (1993), Vol. 6 “Welding Brazing and Soldering”, ASM International

ώστε να ακολουθούνται οι προδιαγραφόμενες από τις διαδικασίες συγκόλλησης παράμετροι (ένταση και τάση ρεύματος).

Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του τόξου

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αξίζει να επισημανθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του τόξου, κατά τη χρήση του στις εργασίες ηλεκτροσυγκόλλησης:

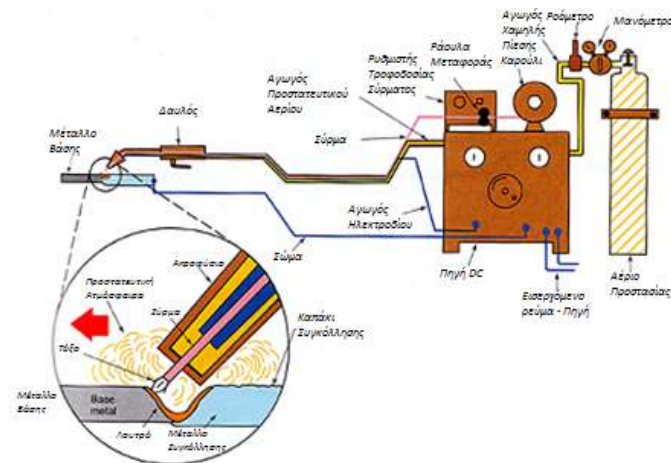
- Ο τύπος προστατευτικής ατμόσφαιρας. Τα χαρακτηριστικά του τόξου μεταβάλλονται ανάλογα αν η προστατευτική ατμόσφαιρα είναι κάποιο αέριο, ατμοί που προέρχονται από επικάλυψη ηλεκτροδίων, ή από σκόνη συγκόλλησης. Επίσης η σύσταση της προστατευτικής ατμόσφαιρας παίζει σημαντικό ρόλο.
- Τα βασικά υλικά. Ανάλογα με το είδος και την ποιότητα των βασικών υλικών προκύπτουν διαφορές στις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες, άρα και στη συμπεριφορά τους κατά τη συγκόλληση, και κατά συνέπεια και στη χρήση του τόξου για τη συγκόλληση τους.
- Τύπος ηλεκτροδίων. Η χρήση αναλισκόμενων ή μη ηλεκτροδίων, καθώς και ο τύπος του κάθε ηλεκτροδίου, επηρεάζουν σημαντικά το τόξο.
- Μήκος τόξου. Εξαρτάται από τη τάση συγκόλλησης, και έχει άμεσο αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του τόξου.
- Τύπος ρεύματος και πολικότητα. Επίσης, εδώ, ο αντίκτυπος είναι άμεσος, καθώς οι διάφορες κυματομορφές ρεύματος και πολικότητες που χρησιμοποιούνται παράγουν και αντίστοιχα, διαφορετικά τόξα.

1.2.2.Συγκολλήσεις τόξου με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου

Οι μέθοδοι συγκόλλησης τόξου με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου, διαχωρίζονται ανάλογα με το προστατευτικό αέριο που χρησιμοποιείται, και το είδος του ηλεκτροδίου (αναλισκόμενο ή μη αναλισκόμενο). Διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων συγκόλλησης: Στην πρώτη (gas shielded metal arc welding), το ηλεκτρόδιο που παράγει το τόξο είναι αναλισκόμενο και προστίθεται στη συγκόλληση. Στη δεύτερη (gas shielded tungsten arc welding), το ηλεκτρόδιο που παράγει το τόξο (ηλεκτρόδιο βολφραμίου) είναι μη αναλισκόμενο. Για κάθε κατηγορία έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές που έχουν να κάνουν κυρίως με το είδος και το τρόπο παροχής του προστατευτικού αερίου. Οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι:

Gas Metal Arc Welding

Ημι-αυτόματη συγκόλληση αερίου με σύρμα, που περεταίρω διαχωρίζεται ανάλογα με το αέριο σε αδρανούς (MIG) και ενεργού αερίου (MAG). Η πρώτη έχει εφαρμογή στη συγκόλληση ελαφρών και μη σιδηρούχων κραμάτων και υψηλά κραματωμένων χαλύβων. Η δεύτερη, κυρίως σε κατασκευαστικούς αλλά και υψηλά κραματωμένους χάλυβες. Η διάταξη των μηχανών συγκόλλησης της μεθόδου αναλύεται στην εικόνα 1-13. Οι δύο μέθοδοι είναι αυτή τη στιγμή οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες στην Ευρώπη, τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1980 και αναμένεται ότι η εξάπλωση τους θα συνεχιστεί, αν και όχι με τους αρχικούς ρυθμούς. Πρόκειται για μεθόδους υψηλής παραγωγικότητας, που όμως δεν έχει πάντα τα καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς ποιότητας. Η τεχνολογική έρευνα κατά συνέπεια εστιάζεται στη βελτίωση τους προς αυτή τη κατεύθυνση, και ήδη τα αποτελέσματα είναι εμφανή, καθώς οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές υψηλών ποιοτικών απαιτήσεων.



ΕΙΚΟΝΑ 1-13 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ. [12]

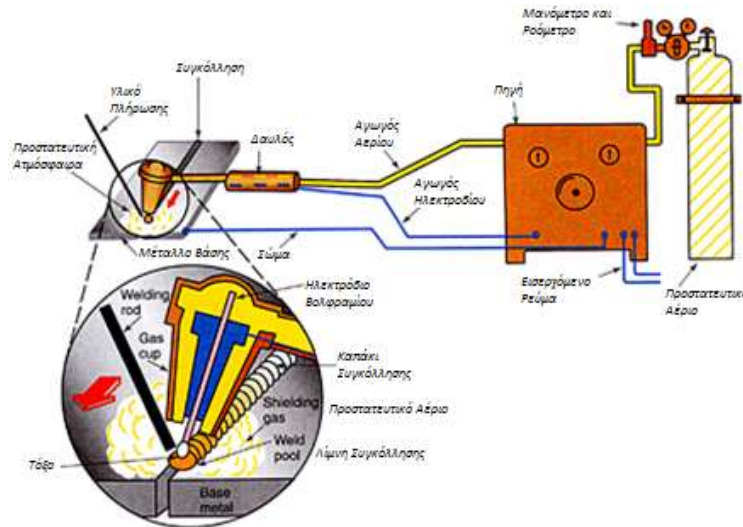
Gas Shielded Flux Cored Arc Welding

Ημιαυτόματη συγκόλληση αερίου με παραγεμιστό σύρμα. Πρόκειται για μία μέθοδο που αναπτύσσεται ταχύτατα, τάση που αναμένεται να συνεχιστεί καθώς συνδυάζει πλεονεκτήματα τόσο της αντίστοιχης μεθόδου με απλό σύρμα όσο και της μεθόδου συγκόλλησης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (π.χ. συγκόλληση υψηλής παραγωγικότητας σε συγκολλήσεις που εκτελούνται σε δύσκολες θέσεις συγκόλλησης). Η εξέλιξη της έγινε δυνατή τη δεκαετία του 1980, καθώς τότε ανακαλύφθηκαν τα παραγεμιστά σύρματα.

Tungsten Inert Gas

¹² Πηγή εικόνας 1-13 : Website, <http://www.twi-global.com/>

TIG Arc Welding - συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου. Αυτή η μέθοδος είναι μέθοδος υψηλών δυνατοτήτων όσο αφορά τις ποιοτικές απαιτήσεις της συγκόλλησης και χρησιμοποιείται κυρίως σε ανοξείδωτα και μη σιδηρούχα κράματα. Η διάταξη των μηχανών συγκόλλησης της μεθόδου αναλύεται στην εικόνα 1-14. Το πεδίο εφαρμογής της μεγαλώνει καθώς αναπτύσσονται βελτιωτικές τεχνικές για την αύξηση της παραγωγικότητας της (για παράδειγμα μέσω προσθήκης προθερμασμένου σύρματος συγκόλλησης - hot wire addition). Επίσης, η ανάπτυξη της τεχνολογίας του σχετικού εξοπλισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών (TIG pulse, TIG orbital) πάντα για συγκολλήσεις όπου απαιτούνται υψηλές προδιαγραφές ποιότητας.



ΕΙΚΟΝΑ 1-14 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ [12]

Plasma Arc Welding

Η συγκόλληση πλάσματος (PAW) είναι παρόμοια με τη μέθοδο TIG, της οποίας άλλωστε θεωρείται εξέλιξη. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη συγκόλληση ανοξείδωτων χαλύβων πάχους από 0.5 έως 10 mm, και δεν αναμένεται η εξάπλωση της στη συγκόλληση κοινών ανθρακούχων χαλύβων. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η χαμηλή θερμική παροχή της, η υψηλή ποιότητα της συγκόλλησης καθώς και το ότι δεν απαιτεί προσεκτική προετοιμασία της ένωσης. Ακόμα, παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία στη μεταβολή του μήκους του τόξου, υψηλή σταθερότητα τόξου και απουσία εγκλεισμάτων βολφραμίου στη παραγόμενη συγκόλληση.

Στις συγκολλήσεις τόξου με προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου τα προστατευτικά αέρια παίζουν σημαντικό ρόλο. Η πρωταρχική λειτουργία τους είναι η προστασία του τόξου, του τηγμένου

μετάλλου και του στερεού μετάλλου που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, καθώς και του ηλεκτροδίου βολφραμίου, όπου αυτό χρησιμοποιείται, από τις καταστρεπτικές συνέπειες που θα είχε η επαφή τους με τον περιβάλλοντα αέρα (κυρίως οξείδωση), και να παρέχουν ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του τόξου. Αν ο αέρας ερχόταν σε επαφή με το τηγμένο ή θερμό μέταλλο το οξυγόνο του θα οξειδωνε το μέταλλο ή θα κατέστρεφε το ηλεκτρόδιο βολφραμίου, το άζωτο του αέρα θα προκαλούσε πόρους, ανεπιθύμητες φάσεις ή και ευθραυστοποίηση της ζώνης συγκόλλησης, και η υγρασία του αέρα θα προκαλούσε πόρους ή και το φαινόμενο της ευθραυστοποίησης υδρογόνου. Η χημική σύσταση του προστατευτικού αερίου επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι σταγόνες τηγμένου ηλεκτροδίου μεταφέρονται στο λουτρό τήξης, κάτι που με τη σειρά του επηρεάζει τον αριθμό και το μέγεθος των “πιτσιλισμάτων” που προκύπτουν. Επίσης επηρεάζει την εξωτερική εμφάνιση της συγκόλλησης, τη γεωμετρία της, τη ταχύτητα προώθησης της, και παίζει σημαντικό ρόλο στη πιθανή καύση κραματικών στοιχείων και στο πιθανό σχηματισμό οξειδίων στην επιφάνεια της συγκόλλησης. Τα προστατευτικά αέρια είναι τις περισσότερες φορές είτε αδρανή είτε ενεργά και μπορεί να είναι καθαρά, να αποτελούνται δηλαδή από ένα στοιχείο ή μία χημική ένωση, ή μείγματα αερίων. Τα αδρανή δε λαμβάνουν μέρος στις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο τόξο και στο λουτρό τήξης, σε αντίθεση με τα ενεργά. Η ταξινόμηση των προστατευτικών αερίων ακολουθεί το πρότυπο EN ISO 14175 (Πίνακας 1-4). Το πρότυπο αναφέρεται ακόμα σε ιδιότητες των αερίων, στην ταξινόμηση τους, την καθαρότητα τους, το περιεχόμενο υγρασίας τους και στις μορφές παράδοσης τους.

Σύμβολο		Στοιχεία σε ποσοστό κατά όγκο					χαμηλής Δραστηκότητας
Κύρια Ομάδα	Υπο-Ομάδα	Οξειδωτικά		Αδρανή		καθαριστικά	N ₂
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	
I	1			100			
	2				100		
	3				0,5 < He < 95		
M1	1	0,5 < CO ₂ < 5		πλήρωση ^a		0,5 < H ₂ < 5	
	2	0,5 < CO ₂ < 5		πλήρωση ^a			
	3		0,5 < O ₂ < 3	πλήρωση ^a			
	4	0,5 < CO ₂ < 5	0,5 < O ₂ < 3	πλήρωση ^a			
M2	0	5 < CO ₂ < 15		πλήρωση ^a			
	1	15 < CO ₂ < 25		πλήρωση ^a			
	2		3 < O ₂ < 10	πλήρωση ^a			
	3	0,5 < CO ₂ < 5	3 < O ₂ < 10	πλήρωση ^a			
	4	5 < CO ₂ < 15	0,5 < O ₂ < 3	πλήρωση ^a			
	5	5 < CO ₂ < 15	3 < O ₂ < 10	πλήρωση ^a			
	6	15 < CO ₂ < 25	0,5 < O ₂ < 3	πλήρωση ^a			
	7	15 < CO ₂ < 25	3 < O ₂ < 10	πλήρωση ^a			
M3	1	25 < CO ₂ < 50		πλήρωση ^a			
	2		10 < O ₂ < 15	πλήρωση ^a			
	3	25 < CO ₂ < 50	2 < O ₂ < 10	πλήρωση ^a			
	4	5 < CO ₂ < 25	10 < O ₂ < 15	πλήρωση ^a			
	5	25 < CO ₂ < 50	10 < O ₂ < 15	πλήρωση ^a			
C	1	100					
	2	πλήρωση	0,5 < O ₂ < 30				
R	1			πλήρωση ^a		0,5 < H ₂ < 15	
	2			πλήρωση ^a		15 < H ₂ < 50	
N	1						100
	2			πλήρωση ^a			0,5 < N ₂ < 5
	3			πλήρωση ^a			5 < N ₂ < 50
	4			πλήρωση ^a		0,5 < H ₂ < 10	0,5 < N ₂ < 5
	5					0,5 < H ₂ < 50	πλήρωση
O	1		100				
Z	Μείγματα αερίων που δεν περιλαμβάνουν τα παραπάνω αέρια ^b						

^a Για τις ανάγκες αυτής της κατηγορίας το Αργό μπορεί να αντικατασταθεί εν μέρη ή τελείως από το Ήλιο

^b Δύο μείγματα αερίων με την ίδια κατηγοριοποίηση κατά Z μπορεί να μην είναι εναλλάξιμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ [****]

**** Πηγή: ISO 14175 : 2008, πρότυπο κατηγοριοποίησης και περιγραφής αναλωσίμων συγκόλλησης

1.3.ΜΗ ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ – ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Σήμερα ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα υλικά στον κόσμο με ετήσια παραγωγή πάνω από 1,3 δισεκατομμύρια τόνους. Από αυτήν την ποσότητα πάνω από 95% είναι μη κραματωμένοι χάλυβες που είναι και το κύριο υλικό για κτίρια, υποδομές, εργαλεία, πλοία, αυτοκίνητα, μηχανήματα, συσκευές και όπλα. Οι λόγοι που οδήγησαν στην διαδεδομένη χρήση αυτών των χαλύβων είναι το χαμηλό τους κόστος, η ευκολία παραγωγής τους και το μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων που επιτυγχάνονται, καθιστώντας τους την καλύτερη λύση για μια μεγάλη σειρά εφαρμογών.

Στην Ευρώπη οι μη κραματωμένοι κατασκευαστικοί χάλυβες παράγονται κυρίως ώστε να ικανοποιούν το πρότυπο EN 10025-2 "Hot rolled products of structural steels. Part 2 Technical delivery conditions for non-alloy structural steels". Παρόμοιοι τύποι χάλυβα είναι επίσης χαμηλότερης κατηγορίας και περιλαμβάνονται στο EN 10028-2 "Flat products made of steels for pressure purposes. Part 2 Non-alloy and alloy steels with specified elevated temperature properties", EN 10208-2 "Steel pipes for pipelines for combustible fluids Technical delivery conditions Part 2. Pipes of requirement class B", EN 10216-2 "Seamless steel tubes for pressure purposes Technical delivery conditions Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties" και στο EN 10217-2 "Welded steel tubes for pressure purposes Technical delivery conditions Part 2: Electric welded non-alloy and alloy steel tubes with specified elevated temperature properties".

Οι μη κραματωμένοι χάλυβες έχουν οριστεί σύμφωνα με το EN 10027-1 ως εξής:

Κοίλες διατομές για μεταλλικές κατασκευές παράγονται επίσης από παρόμοιους χάλυβες σύμφωνα με το EN 10219 και EN 10210.

Κατηγοριοποίηση (π.χ. S 235 JR, S355 K2 G3 ...)

- Τα πρώτα γράμματα "S", "P" or "L": "structural", "pressure vessel" ή "ripping"
- Τα τρία επόμενα νούμερα XXX δίνουν το ελάχιστο εγγυημένο όριο διαρροής σε N/mm²
- Το επόμενο γράμμα "J", "K" or "L": το ελάχιστο όριο αντοχής σε κρούση (J): J > 27J, K > 40J, L > 60J
- Το επόμενο γράμμα ή νούμερο: θερμοκρασία της δοκιμής κρούσης: R: +20°C, 0: 0 °C, 2: -20°C, 3: -30 °C, 4: -40°C, 5: -50°C, 6: -60 °C

- Τέταρτο γράμμα κατάσταση παράδοσης: N- normalized steel, M- thermomechanically treated steel, Q-hardened and tempered steel.

Οι ναυπηγικοί κατηγοριοποιούνται ξεχωριστά και με βάση τα ελάχιστα κριτήρια αποδοχής από τους μεγαλύτερους διεθνείς οίκους πιστοποίησης και νηογνώμονες, συμπεριλαμβανομένων των ABS, Bureau Veritas, DNV, Germanischer Lloyds, Lloyds Register, RINA, Russian Register of Shipping και άλλων.

Κραματικά στοιχεία των ναυπηγικών χαλύβων

Τα τελευταία χρόνια στη ναυπηγική παρατηρείται μία αύξηση της χρήσης χαλύβων υψηλής αντοχής έναντι των κοινών χαλύβων, εξαιτίας των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων που έχουν οι πρώτοι, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μικρότερες διατομές στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση του βάρους της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ευελιξίας και της ταχύτητας του πλοίου.

Οι ποιότητες του ναυπηγικού χάλυβα συνήθους αντοχής που προδιαγράφονται από τον Αμερικανό Νηογνώμονα, περιέχουν άνθρακα από 0,16 – 0,23 % και διάφορα άλλα κραματικά στοιχεία όπως: Μαγγάνιο (Mn), Θείο (S), Φώσφορο (P), κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών (ελασμάτων, μορφοσιδήρων κ.λ.π.) χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις αντοχής. Αντίθετα, οι ποιότητες του ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής περιέχουν άνθρακα μέχρι 0,18 % και κάμποσα άλλα στοιχεία όπως: Μαγγάνιο (Mn), Φώσφορο (P), Θείο (S), Πυρίτιο (Si), Νικέλιο (Ni), Χρώμιο (Cr), Μολυβδαίνιο (Mo), Χαλκό (Cu), Βαννάδιο (V), κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών με ιδιαίτερες απαιτήσεις αντοχής.

1.3.1. Ιστορική αναδρομή των ναυπηγικών χαλύβων

Από την αρχή του 20ου αιώνα, οπότε ο σίδηρος αντικαταστάθηκε τελείως από το χάλυβα, ο τελευταίος παραμένει το σημαντικότερο ναυπηγικό υλικό για την υλοποίηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

Κατά τη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών χρήσης του χάλυβα ως ναυπηγικού υλικού, το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής του ήταν το όριο διαρροής ή η τάση θραύσης. Ωστόσο, στη δεκαετία 1942-52 αναφέρθηκαν τουλάχιστον 200 περιπτώσεις πλοίων που υπέστησαν θραύση, ενώ 52 πλοία κόπηκαν στα δύο. Οι περισσότερες των αστοχιών αυτών προκλήθηκαν από λάθη στη σχεδίαση ή από λανθασμένες πρακτικές συγκόλλησης. Η έκταση των καταστροφών αποτέλεσε την αφορμή για την ανάπτυξη νέων τύπων χαλύβων άνθρακα-μαγγανίου, με βελτιωμένη αντοχή σε

φαθυρή θραύση. Έτσι, δίνεται για πρώτη φορά σημασία στις ιδιότητες δυσθραυστότητας και της αντίστασης στη διάδοση προϋπαρχουσών ρωγμών.

Σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη νέων χαλύβων υψηλής αντοχής και καλής δυσθραυστότητας προέκυψε από την ανάγκη κατασκευής υποβρυχίων που να λειτουργούν σε ολοένα μεγαλύτερα βάθη. Στη δεκαετία του 1940 και στις αρχές της δεκαετίας του 1950 τα υποβρύχια κατασκευάζονταν από χάλυβες υψηλής τάσης θραύσης (high-tensile strength, HTS steel), με όριο διαρροής 350 MPa. Οι χάλυβες αυτοί αντικατέστησαν τους μαλακούς χάλυβες που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε και που παρουσίαζαν όριο διαρροής ~ 225 MPa. Από το τέλος της δεκαετίας του 1950 κυριαρχεί η χρήση του χάλυβα HY-80 με όριο διαρροής 560 MPa. Περαιτέρω εξελίξεις του χάλυβα αυτού υψηλής αντοχής περιλαμβάνουν τους τύπους HY-100 και HY-130 με όρια διαρροής 690 MPa και 900 MPa αντίστοιχα. Όλοι οι χάλυβες της σειράς HY έχουν αποκτήσει τις ιδιότητές τους από σειρά μεταλλουργικών διαδικασιών οι οποίες απαιτούν πολύ αυστηρές προδιαγραφές και ελέγχους για τη συγκόλλησή τους, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ρωγμών.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 και των αρχών της δεκαετίας του 1970 σημειώθηκαν σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία βελτίωσης μιας άλλης ομάδας χαλύβων, των φερριτικών. Την ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή έδωσαν η βιομηχανία κατασκευής θαλάσσιων εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου, που αναζητούσε χάλυβες υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας, που παράλληλα θα παρουσίαζαν και καλή συγκολλησιμότητα. Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής παρουσιάζει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, μεγαλύτερη σκληρότητα, υψηλότερη αντοχή και καλή συγκολλησιμότητα. Επίσης, εμφανίζει την ίδια αντοχή σε μηχανική κόπωση και διάβρωση.

Σήμερα είναι δυνατή η παραγωγή τέτοιων χαλύβων με χαρακτηριστικά αντοχής και δυσθραυστότητας ίδια ή καλύτερα εκείνων του χάλυβα HY-80. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό μεθόδων παρασκευής, ακριβούς προσθήκης μικρών ποσοτήτων βελτιωτικών-κραματικών στοιχείων και κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φερριτικής μικροδομής που οδηγεί σε πολύ καλύτερη συγκολλησιμότητα. Αυτή η ομάδα χαλύβων έχει ονομαστεί “μικρο-κραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής” (high strength low alloy steels - HSLA), και θεωρείται ένα από τα πολλά υποσχόμενα υλικά στις ναυπηγικές εφαρμογές.

Ανάμεσα στα στοιχεία προσθήκης είναι το μαγγάνιο Mn, σε ποσοστό έως 1.5%, το νιόβιο Nb, το βανάδιο V, το τιτάνιο Ti, σε συνολικό ποσοστό έως 0.1%, ο χαλκός Cu, ο φώσφορος P, κ.ά. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται από 400-650 MPa, ενώ η επιμήκυνσή τους έως τη θραύση είναι

σημαντική, από 14% έως 27%. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων, ενώ η ικανότητα μορφοποίησής τους εν ψυχρώ είναι μικρή.

Οι βελτιωμένες ιδιότητες των χαλύβων HSLA οδηγούν στη μείωση του κόστους συντήρησης και σε πολλές περιπτώσεις και του κόστους κατασκευής-λόγω του μικρότερου απαιτούμενου πάχους-αν και είναι ακριβότεροι από τους κοινούς χάλυβες. Επίσης, αν και ανθεκτικότεροι και σκληρότεροι σε σχέση με τους απλούς χάλυβες, οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν ικανοποιητική ολκιμότητα και επιπροσθέτως διαμορφώνονται και συγκολλούνται σχετικά εύκολα. Επιπλέον, επειδή πολλοί χάλυβες HSLA έχουν βελτιωμένη αντίσταση σε διάβρωση, επιτυγχάνεται ίδιος χρόνος ζωής για μικρότερο πάχος, ή μεγαλύτερος χρόνος ζωής για ίδιο πάχος σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες. Επίσης η αντοχή σε κόπωση και σε φθορά κατά τη διάρκεια ζωής είναι πολύ καλή.

1.3.2. Κατάταξη ναυπηγικών χαλύβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ναυπηγικοί χάλυβες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Κοινούς χάλυβες – Με τις κωδικές ονομασίες A, B, D, DS, και E και ελάχιστο όριο διαρροής 235 MPa.
2. Χάλυβες υψηλής αντοχής – Με τις κωδικές ονομασίες AH, DH, και EH και ελάχιστο όριο διαρροής 315 ή 350 MPa.

Η χημική σύσταση των κοινών ναυπηγικών χαλύβων δίδεται στον πίνακα 1-5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-5 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΑ.

	A	B	D	E	AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40
C	0,21	0,21	0,21	0,18	0,18
Mn	όχι λιγότερο από 2,5 φορές την % κ.β περιεκτικότητα σε C	min 0,80	min 0,80	min 0,80	0,90 – 1,60
P	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
S	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Si	max 0,50	max 0,35	0,10 - 0,35	0,10 - 0,35	0,50
Al	-	-	min 0,020	min 0,020	0,015
Nb	-	-	-	-	0,02 - 0,05
V	-	-	-	-	0,05 - 0,10
Ti	-	-	-	-	0,02

Cu	-	-	-	-	0,35
Cr	-	-	-	-	0,20
Ni	-	-	-	-	0,40
Mo	-	-	-	-	0,08

Οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων παρουσιάζονται στον πίνακα 1-6.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-6 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ.

	όριο διαρροής σγ (MPa)	όριο εφελκυστικής αντοχής UTS (MPa)	ολκιμότητα ε (%)	Δυσθραυστότητα (J) t ≤ 50 mm		
				θ (° C)	διαμήκης	εγκάρσια
A	>235	400 - 520	22	+20		
B				0	27	20
D				-20	27	20
E				-40	27	20
AH32, DH32, EH32	315 - 350	440 – 590	22	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
AH36, DH36, EH36	>350	490 – 620	21	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
AH40, DH40, EH40	>390	510 – 660	20	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

1.3.3. Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες

Μαγγάνιο

Το Μαγγάνιο (Mn) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνει την περιοχή του ωστενίτη, ελαττώνοντας παράλληλα τις θερμοκρασίες πραγματοποίησης του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού (A1) και ωστενιτοποίησης (A3). Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 1.65%. Υψηλά όμως ποσοστά μαγγανίου οδηγούν στο σχηματισμό MnS, που βελτιώνει μεν την ολκιμότητα του χάλυβα, λόγω παρεμποδιστικού σχηματισμού FeS, αλλά ευνοεί τη διάβρωση οπών. Η επίδραση του μαγγανίου στις μηχανικές ιδιότητες είναι ελάχιστη. Χρησιμοποιείται για τη σκλήρωση στερεού διαλύματος και έχει μια μικρή επίδραση στην ευθραυστότητα.

Πυρίτιο

Το Πυρίτιο (Si) είναι α-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνουν την περιοχή του φερρίτη. Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 0.5%. Χρησιμοποιείται για την αποξείδωση σε κατάσταση τήγματος. Το πυρίτιο αυξάνει την αντίσταση στο σχηματισμό ψαθυρών οξειδίων.

Άνθρακας

Ο άνθρακας (C) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο περιέχεται στους ανθρακούχους χάλυβες σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 2.06%. Υψηλά ποσοστά άνθρακα προσδίδουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά μειώνουν τη δυσθραυστότητα. Ο άνθρακας είναι ένα ισχυρό μέσο σκλήρωσης στερεού διαλύματος (solid solution strengthening), ενώ έχει δυσμενή επίδραση στη μηχανουργική κατεργασιμότητα του χάλυβα.

1.4.ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η φερριτική μήτρα των ναυπηγικών χαλύβων στη μικροδομή τους, τους προσδίδει φερρομαγνητική συμπεριφορά. Είναι γνωστό, ότι η επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, προσανατολίζει τις μαγνητικές περιοχές παράλληλα προς επιβαλλόμενο πεδίο.

Συγκεκριμένα, οι μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) των οποίων τα μαγνητικά δίπολα είναι ευνοϊκά προσανατολισμένα στο πεδίο, επεκτείνονται σε βάρος των περιοχών με διαφορετικό προσανατολισμό. Η ανάπτυξη αυτή των ευνοϊκά προσανατολισμένων περιοχών πραγματοποιείται με τη μετατόπιση των μαγνητικών τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών. Στα πρώτα στάδια της μαγνήτισης, η μετακίνηση αυτή γίνεται με ιδιαίτερη δυσκολία και μπορεί να απαιτηθεί μεγάλη αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκειμένου να προκληθεί μια μικρή μαγνήτιση. Αυτό φαίνεται από τη μικρή κλίση της γραφικής παράστασης της μαγνητικής επαγωγής B συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , η οποία εκφράζει τη μαγνητική επιδεκτικότητα χ του σιδηρομαγνητικού υλικού. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου, η ανάπτυξη των περιοχών αυτών γίνεται ευκολότερα, οπότε και αυξάνεται η αντίστοιχη κλίση της γραφικής

παράστασης και η μαγνητική επιδεικτικότητα.^{[13][14][15][16]} Όταν ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων περιοχών και αυξηθεί περαιτέρω η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, αρχίζει να λαμβάνει χώρα περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, γεγονός που απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη ενέργεια από αυτή για την ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων μαγνητικών περιοχών, με αποτέλεσμα η κλίση της καμπύλης B ως προς H να μειώνεται. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου όλες σχεδόν οι περιοχές προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο, οπότε και το υλικό αποκτά μια μέγιστη μαγνητική επαγωγή B_s (E saturation point), η οποία ονομάζεται μαγνητική επαγωγή κορεσμού. Η καμπύλη OAE της εικόνας 1-15 αποτελεί την καμπύλη της αρχικής μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού.

Μειώνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου έως ότου μηδενισθεί, η καμπύλη της μεταβολής της μαγνήτισης δεν ακολουθεί αυτή της αρχικής μαγνήτισης (υστερητική συμπεριφορά). Όταν η ένταση του πεδίου μηδενιστεί παραμένει στο υλικό μια ποσότητα μαγνητικής επαγωγής που ονομάζεται παραμένουσα επαγωγή B_r (σημείο F residual magnetism). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση. Η παραμένουσα επαγωγή κατά το μηδενισμό της έντασης του εξωτερικού πεδίου, σημαίνει ότι παραμένει στο υλικό ένας αριθμός μαγνητικών περιοχών προσανατολισμένες παράλληλα στη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για το μηδενισμό της επαγωγής του υλικού απαιτείται η εφαρμογή ενός αντίθετου πεδίου έντασης H_c , το οποίο ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (σημείο G coercive force). Εάν η ένταση του αντίθετου πεδίου αυξηθεί ακόμα περισσότερο τελικά το υλικό θα φθάσει στη κατάσταση μαγνητικού κορεσμού στο αντίθετο πεδίο (σημείο I). Με την απομάκρυνση του αντίθετου πεδίου η μαγνητική επαγωγή παίρνει τη τιμή της παραμένουσας επαγωγής (σημείο J) και στη συνέχεια εάν εφαρμοστεί θετικό πεδίο η καμπύλη B-H θα ακολουθήσει την JKΕ ολοκληρώνοντας έναν πλήρη κύκλο. Η κλειστή καμπύλη EFGIJKΕ ονομάζεται βρόχος υστέρησης και σε οποιαδήποτε περαιτέρω επιβολή στο υλικό ενός μεταβαλλόμενου πεδίου η μαγνητική επαγωγή θα ακολουθεί το βρόχο αυτό. Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης

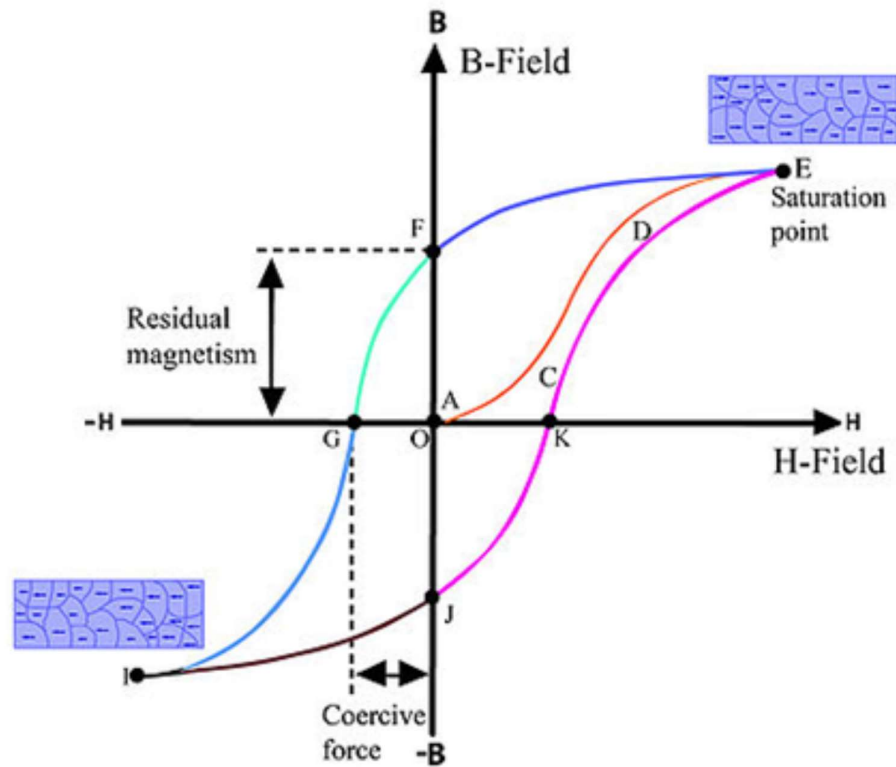
¹³ J.A. Pérez-Benítez, J.H. Espina-Hernández, P. Martínez-Ortiz, A.F. Chávez-González, J.M. De La Rosa: Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 347, 2013, pp. 51-60.

¹⁴ 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.

¹⁵ 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.

¹⁶ 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.

αποτελεί μέτρο των απωλειών ενέργειας σε ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού.^{[17][18][19]}



ΕΙΚΟΝΑ 1-15 Βρόχος υστέρησης της μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής (MAGNETIC INDUCTION **B**) με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (MAGNETIC FIELD, **H**) σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Η κυκλική μαγνήτιση και απομαγνήτιση, μέχρι τη μαγνήτιση κορεσμού (MAGNETIC SATURATION), οδηγεί στη χαράξη του βρόχου υστέρησης (HYSTERESIS LOOP). Η καμπύλη ΟΑ είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης (VIRGIN CURVE).

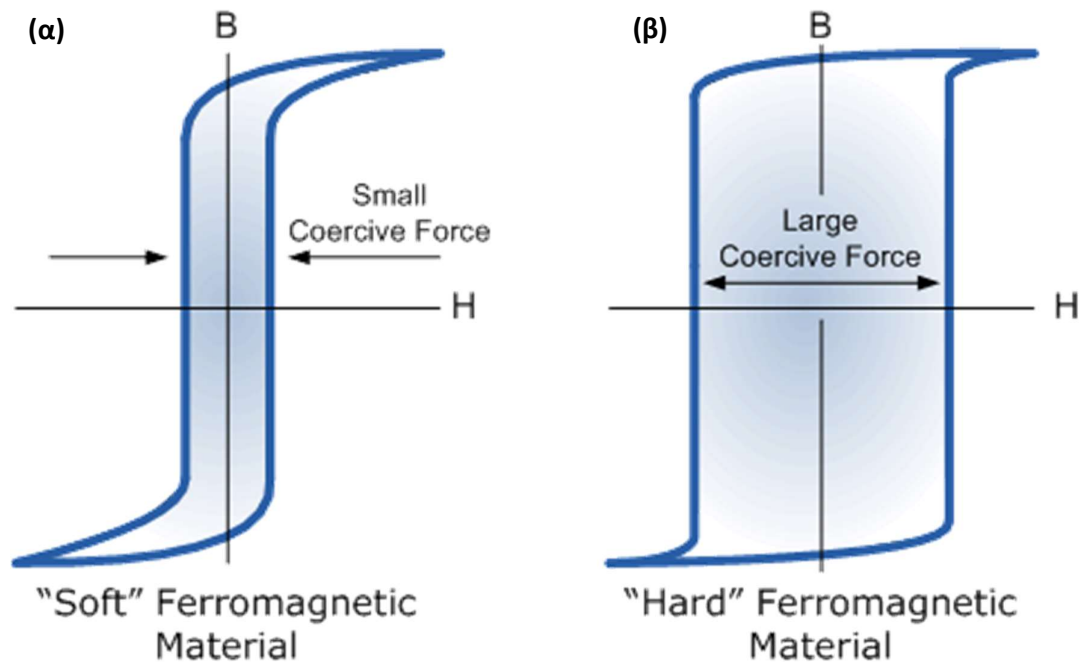
Ειδικότερα, από την παρατήρηση του βρόχου υστέρησης εξάγουμε συμπεράσματα που σχετίζονται με τη μαγνητική σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού (εικόνα 1-16). Ένα μαλακό μαγνητικό υλικό μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται εύκολα και ο βρόχος υστέρησης του είναι στενότερος σε σύγκριση με ένα σκληρό μαγνητικό υλικό με μικρές τιμές της έντασης του συνεκτικού πεδίου H_c

¹⁷ 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.

¹⁸ 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.

¹⁹ G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš: Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels, NDT & E International, vol. 54, 2013, pp. 107-114.

για τις οποίες μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή του υλικού. Για το λόγο αυτό τα μαλακά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες μετασχηματιστών, κινητήρων και γεννητριών. Αντιθέτως, τα σκληρά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, παρουσιάζουν διευρυμένους βρόχους υστέρησης και μεγάλες τιμές έντασης του συνεκτικού πεδίου, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σαν μόνιμοι μαγνήτες.^{[20][21][22][23][24][25]}



ΕΙΚΟΝΑ 1-16 ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ (Α) ΜΑΛΑΚΟΥ ΚΑΙ (Β) ΣΚΛΗΡΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.

²⁰ 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

²¹ 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

²² 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

²³ 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

²⁴ 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

²⁵ 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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1.ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη, η πειραματική δοκιμή και η τελική σύγκριση δυο εναλλακτικών διαδικασιών συγκόλλησης πλήρους διείδουσας με την ημι-αυτόματη μέθοδο συγκόλλησης σε αέρια προστατευτική ατμόσφαιρα δραστικού μίγματος αερίων (Gas metal arc welding, Metal active gas) σε κοινό χάλυβα Grade A (ναυπηγικής).

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη και η μέτρηση διαζωνικής απόκρισης της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας σε συγκόλληση ναυπηγικού χάλυβα τύπου Grade A. Η μέτρηση έγινε σε δύο ξεχωριστά δοκίμια με διαφορετικές διαδικασίες συγκόλλησης για το καθένα, τα οποία συγκολλήθηκαν με ημιαυτόματη μέθοδο συγκόλλησης με σύρμα σε προστατευτική ατμόσφαιρα ενεργού αερίου. Τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων συγκρίθηκαν και συσχετίστηκαν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων βαθμονόμησης, των δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού, της μικροσκληρομέτρησης και της παρατήρησης στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης για να προσδιορισθούν και να αξιολογηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων για την απαιτούμενη χρήση που ορίζεται από την εταιρεία ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.

2.2.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.2.1.Υλικό που παρελήφθη

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις διαδικασίες συγκόλλησης και τους πειραματικούς ελέγχους πάρθηκαν από ένα έλασμα διαστάσεων 2000 επί 6000 mm και με πάχος 6 mm. Στο παράρτημα III παρατίθεται το πιστοποιητικό ελέγχου κατηγορίας 3.1 που έχει εκδώσει το χαλυβουργείο παραγωγής και περιλαμβάνει τη χημική ανάλυση καθώς και τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληπτικά στην παρτίδα παραγωγής που περιλαμβάνει και το συγκεκριμένο έλασμα. Από το αρχικό έλασμα κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής δύο δοκίμια, τα οποία θα ονομάζονται αντίστοιχα «δοκίμιο 1» και «δοκίμιο 2». Τα δείγματα είχαν το καθένα διαστάσεις 200 επί 300 mm. Με τη σειρά τους το δοκίμιο 1 και το δοκίμιο 2 κόπηκαν στη μέση, με τον άξονα κοπής να είναι παράλληλος με τη μεγαλύτερη διάσταση (300mm), για να ενωθούν αργότερα με τις διαδικασίες συγκόλλησης που θα αναλυθούν στην παράγραφο 2.2.2. Η επιφάνεια του αρχικού ελάσματος έχει υποστεί αμμοβολή για τον καθαρισμό από ακαθαρσίες και οξείδια.

Ως προς τη χημική ανάλυση του παρεληφθέντος υλικού, περιέχονται 0.15% άνθρακας C, 0.64% μαγγάνιο Mn, 0.21% πυρίτιο Si, 0.008% θείο S, 0.007% φώσφορο P, 0.026 χρώμιο Cr, 0.008 νικέλιο Ni, 0.008 Χαλκός Cu και σε πολύ μικρότερα ποσοστά υπολείπονται αλουμίνιο, άζωτο, βανάδιο, μολυβδαίνιο, τιτάνιο και άλλα. Το ισοδύναμο άνθρακα είναι 0,26.

2.2.2.Συγκόλληση δοκιμίων

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ημιαυτόματη μέθοδος συγκόλλησης με σύρμα σε προστατευτική ατμόσφαιρα ενεργού αερίου (135^[*], Metal Active Gas / MAG). Η μηχανή συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία είναι η Fronius TransPuls Synergic 5000. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής παρατίθενται στο πίνακα 2-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ ΜΗΧΑΝΗΣ TRANSPULS SYNERGIC 5000

Τάση παροχής	3 x 400 V
Ανοχή απόκλισης τάσης	+ 15 % / - 15 %
Συχνότητα παροχής	50 / 60 Hz
Ασφάλεια έντασης παροχής	35 A
Ένταση έναρξης, συνεχής (100 %)	18 - 29,5 A
Primary continuous power (kVA)	13,1 kVA
Φ συνημίτονο	0,99
Βαθμός απόδοσης	90%
Εύρος έντασης ρεύματος συγκόλλησης MIG/MAG	3 - 500 A
Εύρος έντασης ρεύματος συγκόλλησης TIG	3 - 500 A
Εύρος έντασης ρεύματος συγκόλλησης με αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο	10 - 500 A
Κύκλος καθήκοντος 10 min/40° C (104° F)	40 % στα 500 A

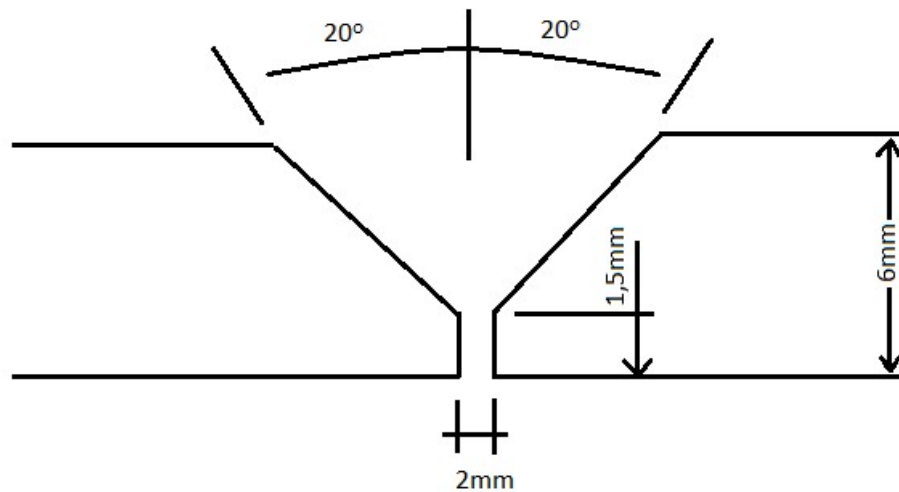
* Κωδικοποίηση μεθόδου με βάση το πρότυπο EN 4063

Κύκλος καθήκοντος at 10 min/40° C (104° F)	100 % στα 360 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	70 V
Τάση εργασίας MIG/MAG	14,2 - 39,0 V
Τάση εργασίας TIG	10,1 - 30,0 V
Τάση εργασίας για ηλεκτρόδιο	20,4 - 40,0 V
Κλάση προστασίας	IP 23
Τύπος ψύξης	AF
Κλάση μόνωσης	F
Εξωτερικές διαστάσεις l/w/h mm	625/290/475
Εξωτερικές διαστάσεις l/w/h (inches)	24.6/11.4/18.7
Βάρος σε kg	35,6
Βάρος σε lb	78.5
Σήμανση συμμόρφωσης	CE
Σήμανση συμμόρφωσης	CSA

Το υλικό πλήρωσης για τις συγκολλήσεις είναι το Carbofil 1, η κατηγοριοποίηση του υλικού κατά το γερμανικό πρότυπο DIN 1.5125 είναι 8559 SG2, ενώ κατά τα αμερικανικά πρότυπα AWS SFA-5.18 είναι το E70 S-6. Ως προς τη χημική ανάλυση του σύρματος, σύμφωνα με τον κατασκευαστή και τα πρότυπα παραγωγής, πρέπει να περιέχει λιγότερο από 0,14% άνθρακα ($C < 0,14$), μαγγάνιο που κυμαίνεται μεταξύ 1,3 και 1,6% (Mn 1,3-1,6), πυρίτιο που κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1% (Si 0,7-1), φώσφορο λιγότερο από 0,025% ($P < 0,025$) και θείο επίσης λιγότερο από 0,025% ($S < 0,025$). Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες που προδιαγράφονται για το υλικό αυτό, το μέταλλο συγκόλλησης θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα όριο διαρροής μεγαλύτερο από 390MPa, μέγιστη εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται μεταξύ 510-610 MPa, επιμήκυνση σε μονοαξονικό εφελκυσμό μεγαλύτερη από 25% και τιμή κρούσης μεγαλύτερη από 90J σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (στους +20°C). Η διάμετρος του σύρματος ήταν 1,6mm.

Η προετοιμασία των δοκιμίων και οι παράμετροι συγκόλλησης αναλύονται παρακάτω στα εξής βήματα:

- Οι ακμές σύνδεσης και στα δύο δοκίμια προετοιμάστηκαν με τροχό λείανσης σύμφωνα με την εικόνα 2-1. Η φρέζα στο κάθε μέλος έχει κλίση περίπου 20 μοίρες και το συνολικό άνοιγμα της φρέζας είναι 6 χιλιοστά. Το διάκενο μεταξύ των μελών είναι 2 χιλιοστά.

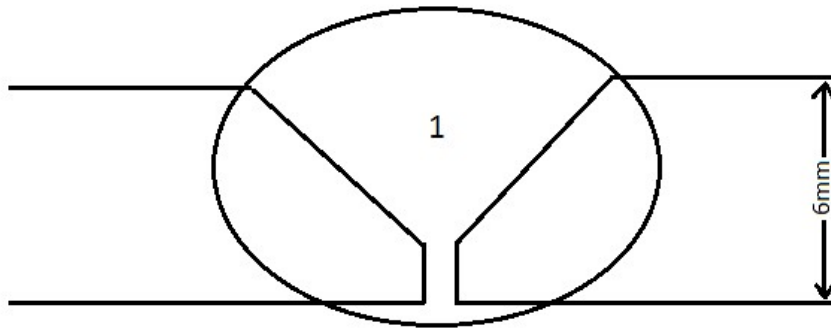


ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 1 ΚΑΙ 2

Οι αρχικές παράμετροι χαρακτηρίζονται βασικά από τη μέθοδο συγκόλλησης που είναι η 135, το πάχος του δοκιμίου που είναι 6mm, η θέση συγκόλλησης που είναι «πλάκα» ή PA κατά το EN 6947, ο τύπος ένωσης που είναι μετωπική με μονή φρέζα από της δύο πλευρές και πλήρους διείδυσης, το μέταλλο βάσης που είναι ναυπηγικός χάλυβας τύπου Grade A.

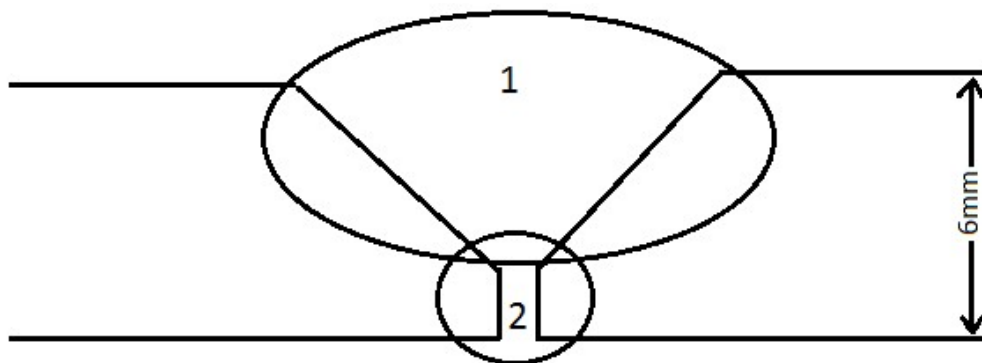
- Η ρυθμίσεις της εισερχόμενης θερμότητας και η αλληλουχία των κορδωνιών που επιβλήθηκαν στο πρώτο δοκίμιο, αναλύονται: στον συνολικό αριθμό πάσων που ήταν 1, στη διάμετρο του υλικού πλήρωσης που ήταν 1,6mm, στην ένταση του ρεύματος συγκόλλησης που μετρήθηκε κατά μέσο όρο στα 200 A με απόκλιση ± 10 A, στην τάση του ρεύματος συγκόλλησης που μετρήθηκε κατά μέσο όρο στα 22V με απόκλιση ± 0.8 V, στην ταχύτητα προώθησης που μετρήθηκε στα 270mm/min, στο αέριο προστασίας που ήταν μίγμα αργού και διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστά 80% και 20% αντίστοιχα, ο τύπος πολικότητας που ήταν ανάστροφος, η χρήση κάλυψης της ρίζας που στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μπάρα χαλκού (copper backing), καθώς και οι θερμικές κατεργασίες πριν ή και μετά τη συγκόλληση που στην προκειμένη περίπτωση δεν

απαιτούνταν. Ο συνολικός αριθμός και η θέση των πάσων φαίνεται στην εικόνα 2-2.



ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΚΟΡΔΩΝΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1

- Οι ρυθμίσεις της εισερχόμενης θερμότητας και η αλληλουχία των κορδωνιών που επιβλήθηκαν στο πρώτο δοκίμιο, αναλύονται στις ακόλουθες παραμέτρους: στον συνολικό αριθμό πάσων που ήταν 2, στη διάμετρο του υλικού πλήρωσης που ήταν 1,6mm, στην ένταση του ρεύματος συγκόλλησης που μετρήθηκε κατά μέσο όρο στα 200 A με απόκλιση ± 10 A, στην τάση του ρεύματος συγκόλλησης που μετρήθηκε κατά μέσο όρο στα 20V με απόκλιση ± 0.8 V, στην ταχύτητα προώθησης που μετρήθηκε στα 300mm/min, στο αέριο προστασίας που ήταν μίγμα αργού και διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστά 80% και 20% αντίστοιχα, ο τύπος πολικότητας που ήταν ανάστροφος, η χρήση κάλυψης της ρίζας που στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε μπάρα χαλκού αλλά το δοκίμιο τροχίστηκε και συγκολλήθηκε από την αντίθετη πλευρά, καθώς και οι θερμικές κατεργασίες πριν ή και μετά τη συγκόλληση που στην προκειμένη περίπτωση δεν απαιτούνταν. Ο συνολικός αριθμός και η θέση των πάσων φαίνεται στην εικόνα 2-3.



ΕΙΚΟΝΑ 2-3: ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΚΟΡΔΩΝΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2

Στις εικόνες 2-4 και 2-5 απεικονίζεται ο πίνακας ελέγχου της μηχανής συγκόλλησης με τις δεδομένες ενδείξεις των ρυθμίσεων συγκόλλησης που καταγράφονται κατά τη διαδικασία συγκόλλησης.



ΕΙΚΟΝΑ 2-4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΤΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΨΟΣ ΤΟΞΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ



ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Σημαντική παράμετρος στο δοκίμιο 2 ήταν επίσης η θερμοκρασία μεταξύ των πάσων 1 και 2. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν περίπου στους 150°C, ενώ ο χρόνος που μεσολάβησε μεταξύ των πάσων ήταν περίπου 15 λεπτά. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε ειδική κιμωλία ένδειξης θερμότητας τύπου TEMPIDIC.

2.2.3.Μαγνητικές μετρήσεις

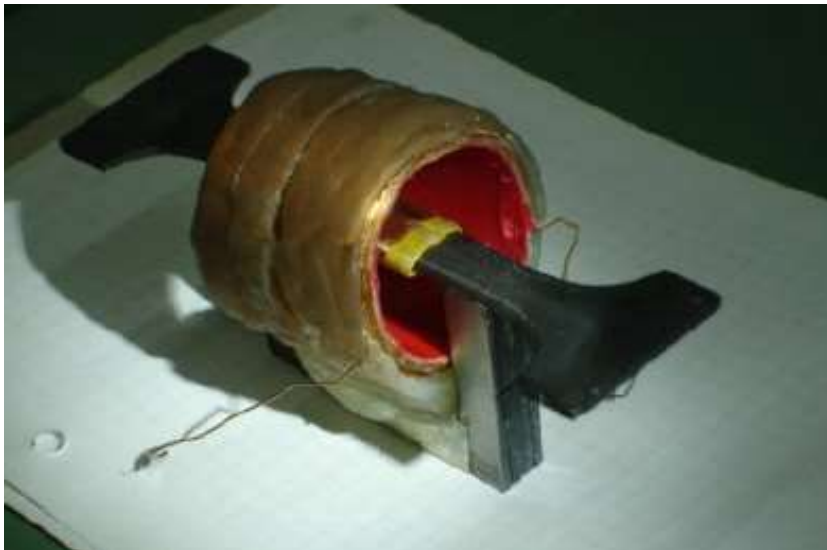
Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων της μαγνητικής διαπερατότητας, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας (Εικόνα 2-6).

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 δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγο αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις δεν περιγράφονται από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.



ΕΙΚΟΝΑ 2-6: ΥΣΤΕΡΗΣΙΟΓΡΑΦΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ.

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 από το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα (Εικόνα 2-7). Έτσι, το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα με τον ηλεκτρομανήτη (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος.



ΕΙΚΟΝΑ 2-7: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΠΗΝΙΩΝ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΙΟΓΡΑΦΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ.

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

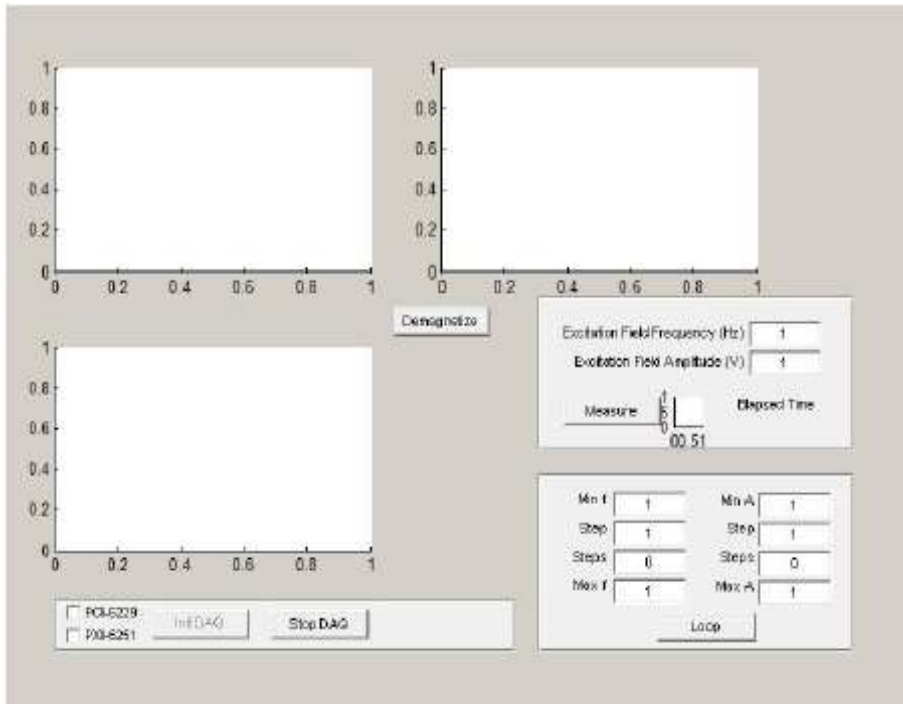
Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα και ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή: Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ), μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την 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 επιτυγχάνονται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων, η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για το συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην εικόνα 2-8.

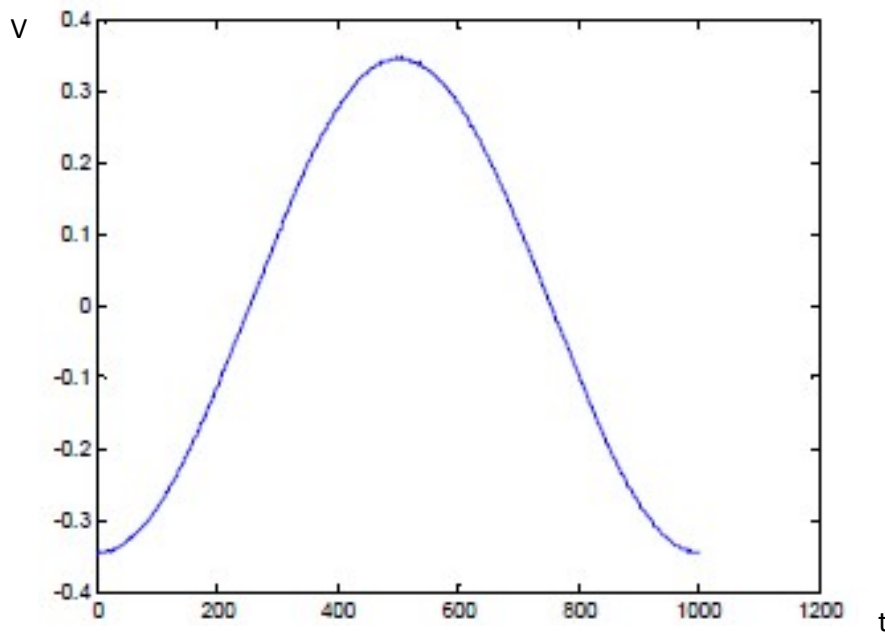
Το σήμα διέγερσης (Εικόνα 2-9) δημιουργείται από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης του Matlab. Μέσω της πλατφόρμας αλληλεπίδρασης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να επιλέξει τις επιθυμητές τιμές του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης, ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.

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, το οποίο 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 2-9).

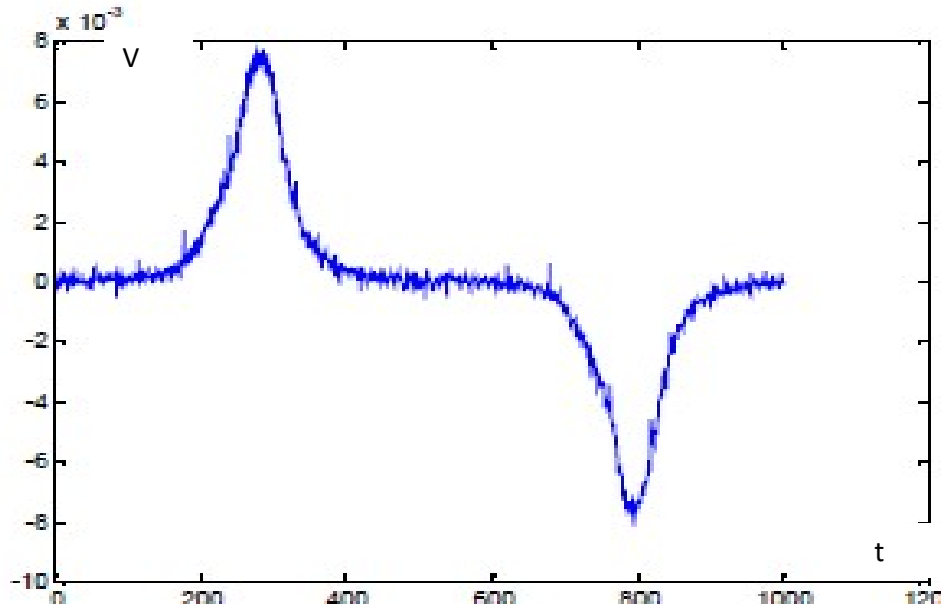
Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης, και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπερπαρατό φιλτράρισμα των σημάτων (Εικόνα 2-10) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (Εικόνα 2-11).



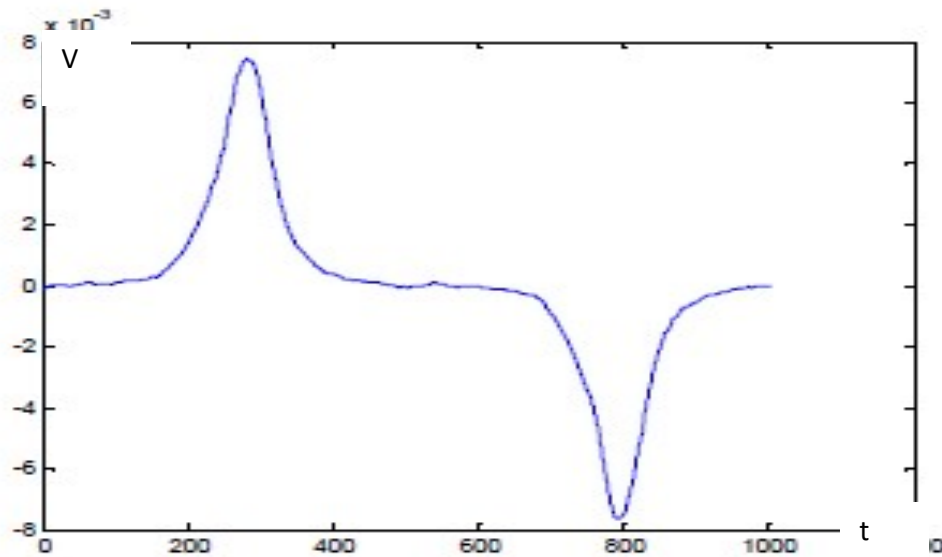
ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ (GRAPHICAL USER INTERFACE) ΤΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΙΟΓΡΑΦΟΥ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ.



ΕΙΚΟΝΑ 2-9: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΙΒΑΛΛΕΤΑΙ ΣΤΟ ΠΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΙΟΓΡΑΦΟΥ.



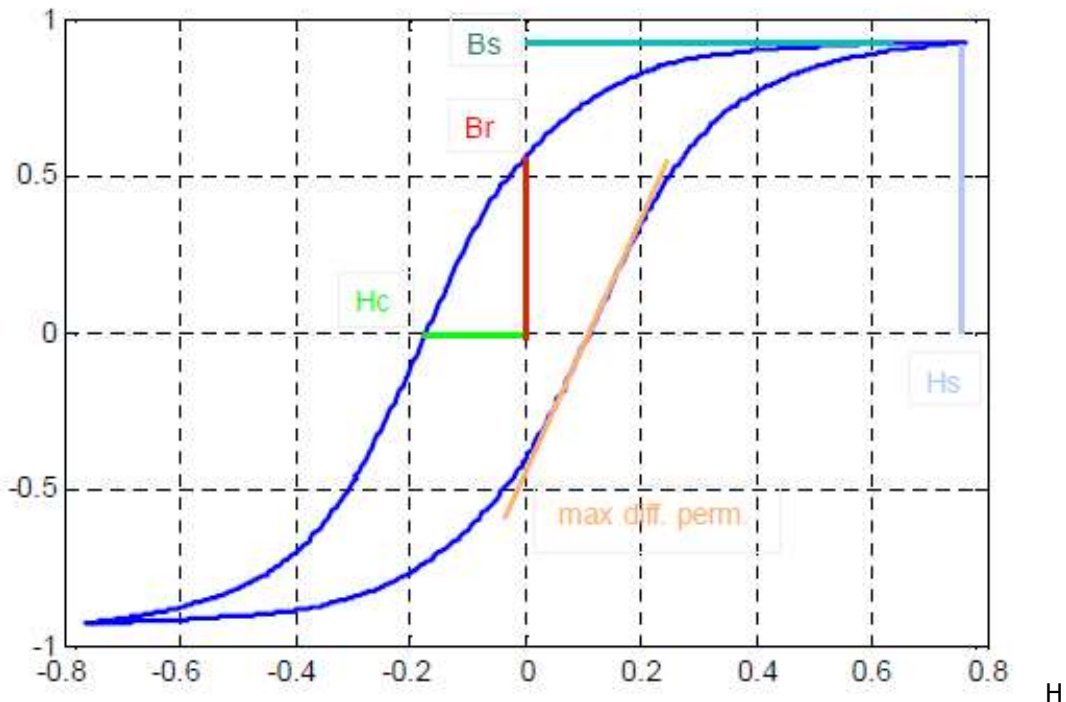
ΕΙΚΟΝΑ 2-10: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ, ΜΕΣΩ ΚΑΡΤΑΣ, ΑΠΟ ΤΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ ΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΙΟΓΡΑΦΟΥ.



ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΑ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ.

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα, με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντάς 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.

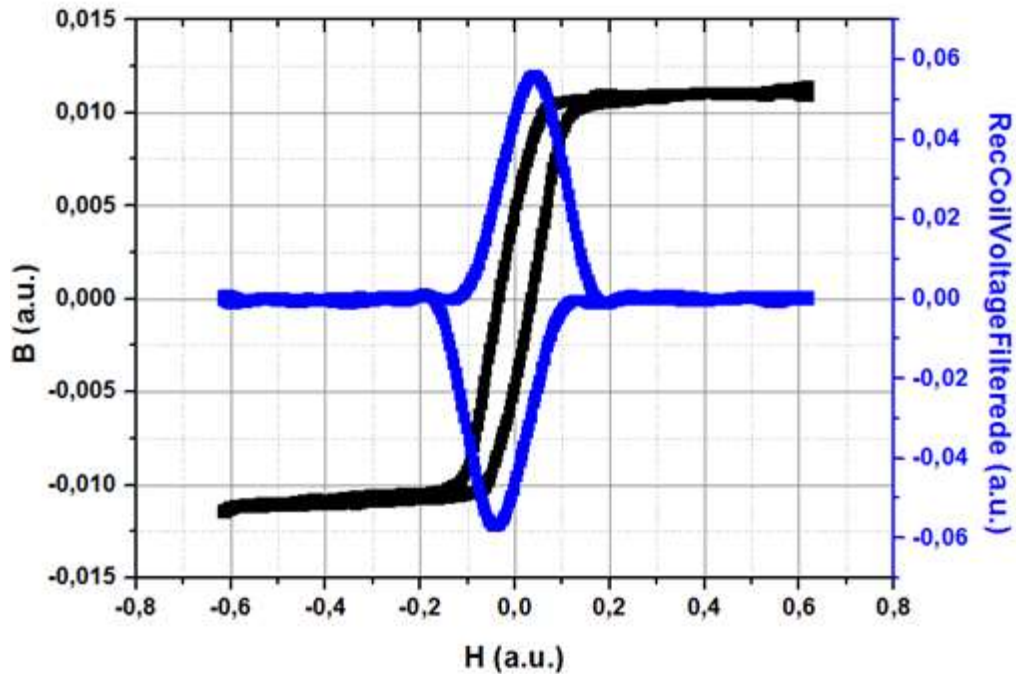


ΕΙΚΟΝΑ 2-12: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ.

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων (Εικόνα 2.10, 2.11, 2.12) που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (Εικόνα 2-13) προσδιορίζονται και οι παράμετροι, των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται, και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού.

Ο βρόχος της τάσης εξόδου ως προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογος με τη μεταβολή της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού ως προς το επιβαλλόμενο πεδίο. Ο βρόχος αυτός λαμβάνονταν μετά την επεξεργασία των δειγμάτων και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.13. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας λαμβάνονταν υπόψη ως η μαγνητική παράμετρος της μέτρησης.



ΕΙΚΟΝΑ 2-13: ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ) ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ).

2.2.4.Μικροδομικός χαρακτηρισμός με SEM

Προετοιμασία δείγματος

Η μελέτη της μικροδομής των δειγμάτων, που είχαν παραμορφωθεί στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope), που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπος Jeol GSM 6380-LV (Εικόνα 2-14). Μέσω εικόνας δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η μορφολογία και η κατανομή των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού, ενώ μέσω εικόνας οπισθοσκεδαζόμενων 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 οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων)
- Απόσταση εργασίας (Working distance): 15mm



ΕΙΚΟΝΑ 2-14: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM) ΤΥΠΟΥ JEOL GSM 6380-LV.

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης πραγματοποιήθηκαν σημειακές χημικές μικροανάλυσεις στην επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της σημειακής μικρο-ανάλυσης ήταν η εξέταση της περιεκτικότητας του πυριτίου εντός κόκκων, αλλά και στα όριά τους.

Τα δείγματα για να εξεταστούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρειάστηκε να προετοιμαστούν κατάλληλα. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας ήταν η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και, τέλος, η χημική προσβολή.

Κοπή δοκιμίων: Από το κέντρο των δοκιμίων που είχαν παραμορφωθεί ελαστικά και πλαστικά κόπηκαν μικρότερα παραλληλεπίπεδα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών της μικροδομής τους.

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.

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 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 ξεπλένονταν 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.

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.

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 προσβολή 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.

2.2.5.Χημική μικροανάλυση (EDS)

Με χρήση των συνδυασμένων τεχνικών ηλεκτρονικής μικροσκοπίας/ φασματοσκοπίας ακτίνων X (SEM-EDS ή TEM-EDS) προσδιορίσθηκε σε πολύ μικρό χρόνο, ημιποσοτικά, η συγκέντρωση όλων των στοιχείων με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 11. Η χημική μικροανάλυση πραγματοποιήθηκε

στις τρεις ζώνες συγκόλλησης (μέταλλο βάσης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, μέταλλο συγκόλλησης) συνολικά για κάθε ένα από τα συγκολλημένα δοκίμια, με διαφορετικά δείγματα μετρήσεων. Το όριο ανίχνευσης της μεθόδου ήταν περίπου 1% κ.β.

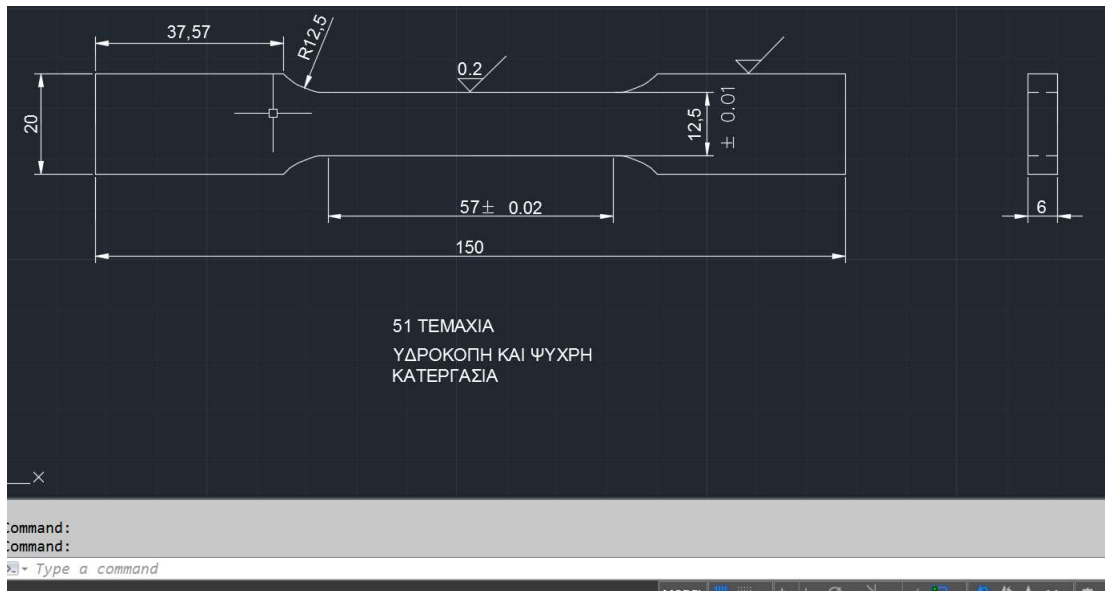
2.2.6.Μικροσκληρότητα

Από το υλικό αναφοράς κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής μικρότερα παραλληλεπίπεδα δείγματα διαστάσεων (2cm x 1cm x 0.05cm), τα οποία λειάνθηκαν με χαρτί SiC 800 και 1200 grit για να διασφαλιστεί η ανάγκη της επιτεδότητας. Η επιφάνεια έπρεπε να είναι λεία και στυλνή για τη σωστή διείδυση της διαμαντένιας πυραμίδας. Για τις μέτρησεις μικροσκληρότητας χρησιμοποιήθηκε το σκληρόμετρο του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας τύπου Karl Frane GMBH και για τη λήψη των αντιπροσωπευτικών μετρήσεων εφαρμόστηκε φορτίο 196N για 20s. Από το ρομβοειδές αποτύπωμα της διαμαντένιας πυραμίδας μετρήθηκαν με αναλογικό τρόπο ο μέσος όρος των διαγωνίων του και με τη χρήση του κατάλληλου πίνακα μετατροπής, πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχιση της ένδειξης αυτής με την τιμή σκληρότητας. Για τη λήψη της τιμής της μακροσκληρότητας ελήφθησαν από την επιφάνεια του δείγματος 10 ανεξάρτητες μετρήσεις και κατόπιν εξήχθη ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση αυτών. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκαν τόσες μετρήσεις είναι για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σφάλματος κατά την μέτρηση. Σημειώνεται ότι προνοήθηκε με ειδική καναβομέτρηση η απόσταση του κάθε αποτυπώματος από το άλλο να υπερβαίνει τουλάχιστον κατά τρεις φορές τη διαγώνιο της πυραμίδας ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση μικροπλαστικών πεδίων παραμόρφωσης του κάθε αποτυπώματος

2.2.7.Καμπύλη βαθμονόμησης

Η διαδικασία ήταν η ακόλουθη: Από το υλικό αναφοράς κόπηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8 δείγματα εφελκυσμού τα υποβλήθηκαν σε δοκιμασίες εφελκυσμού και θλίψης εντός της ελαστικής περιοχής. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο μηχάνημα INSTRON. Τα δείγματα δοκιμάστηκαν σε διάφορα προκαθορισμένα επίπεδα ελαστικής παραμόρφωσης και ταυτόχρονα καταγράφονταν, σε κάθε επίπεδο, η αντίστοιχη απόκριση του μαγνητικής διαπερατότητας. Η μετρήσιμη παράμετρος ήταν η ενεργός τιμή του μαγνητικής διαπερατότητας. Να σημειωθεί ότι σε κάθε επίπεδο παραμόρφωσης λαμβάνονταν πέντε μετρήσεις της ενεργού τιμής με το εφαρμοζόμενο πεδίο παράλληλο στη διεύθυνση της έλασης.

Το σχέδιο κοπής και κατεργασίας δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα Autodesk AutoCAD 2016 και παραδόθηκε σε ηλεκτρονική μορφή προς χρήση στη μηχανή υδροκοπής. Το σχέδιο κοπής απεικονίζεται στην εικόνα 2-15.



ΕΙΚΟΝΑ 2-15: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ASTM E8 ΣΤΟ AUTOCAD 2016.

Η τελική τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας ελήφθη από το μέσο όρο αυτών των πέντε μετρήσεων για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τοποθέτηση του αισθητήρα, πριν από τη λήψη των πέντε μετρήσεων, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη επαφή με την επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα συγκολλημένα ελάσματα μελετήθηκε η μικροδομή τους, πραγματοποιήθηκε η μεταλλογραφική τους παρατήρηση, οι μετρήσεις ως προς τη μαγνητική τους διαπερατότητα, ελήφθησαν μετρήσεις μικρο-σκληρομετρήσεις κατά Vickers (HVN) και έγιναν πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού του συγκολλημένου δείγματος και του μετάλλου βάσης. Τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων και τεχνικών παρατίθενται στο κεφάλαιο αυτό, ενώ η σύγκριση και ο συσχετισμός με τις μαγνητικές μετρήσεις της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας αναπτύσσονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.1. ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Με βάση τις ποιοτικές απαιτήσεις της Εταιρείας και τα πρότυπα που ακολουθεί στην παραγωγή και τη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου, θα πρέπει να προηγηθεί όλων των ελέγχων και των μετρήσεων ο οπτικός έλεγχος στα δοκίμια. Οι εικόνες 3-1 και 3-2 δείχνουν τα συγκολλημένα δοκίμια αμέσως μετά την συγκόλληση και την κοπή στις απαιτούμενες διαστάσεις για τους ελέγχους που θα ακολουθήσουν στα επόμενα βήματα. Ο οπτικός έλεγχος αφορά στον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών και σφαλμάτων, την παχυμέτρηση και την συνολική εικόνα της συγκόλλησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικοί έλεγχοι με τις μεθόδους των διεισδυτικών υγρών και της ραδιογραφίας ακτίνων x. Τους ελέγχους τους πραγματοποίησε πιστοποιημένη εταιρεία μη καταστροφικών ελέγχων.



ΕΙΚΟΝΑ 3 -1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΥΔΡΟΚΟΠΗ)



ΕΙΚΟΝΑ 3-2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΥΔΡΟΚΟΠΗ)

Ο ποιοτικός έλεγχος των συγκολλήσεων ήταν υποχρεωτικός για την αποφυγή αλλοίωσης των μετρήσεων από τις επιφανειακές και τις εσωτερικές ατέλειες των συγκολλήσεων, ειδικά στην περίπτωση των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού. Με βάση την αναφορά ελέγχων των επιθεωρητών, και τα δύο δοκίμια πληρούσαν το επίπεδο αποδοχής σφαλμάτων και ατελειών «B» του κώδικα EN ISO 5817 / έκδοση του 2014. Συνοπτικά, με βάση το πρότυπο EN ISO 5817, το επίπεδο B δεν επιτρέπει κανενός είδους και διάστασης ρωγμή, δεν επιτρέπει επιφανειακούς πόρους, ενώ επίσης δεν επιτρέπει μεταξύ άλλων την ατελή τήξη και την ατελή διείσδυση, τη συνεχόμενη υποκοπή και το πορώδες στην περιοχή της ρίζας.

Τα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου για το δοκίμιο 1 και το δοκίμιο 2 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΟΡΙΑ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.

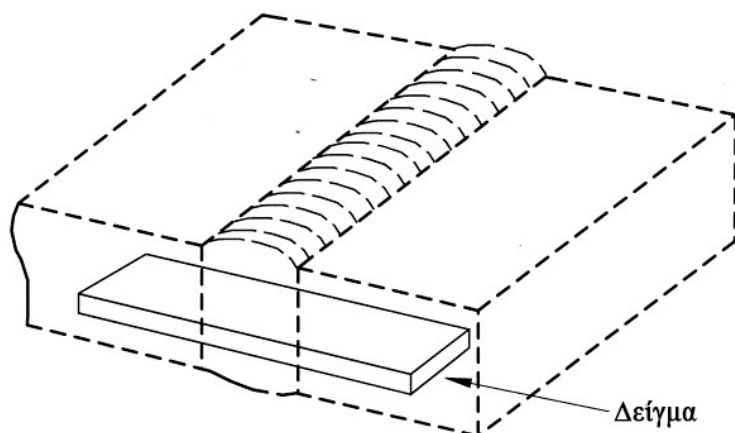
Περιγραφή ατέλειας	Ελάχιστο επιτρεπτό όριο σφαλμάτων για πάχος 6mm	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2
Ρωγμές	0	0	0
Επιφανειακοί πόροι	0	0	0
Διακοπτόμενη Υποκοπή	0,3mm	0	0
Συνεχής Υποκοπή	0	0	0
Εξέχων μέταλλο συγκόλλησης	1,9mm	1,3mm	1,1mm
Ευθυγραμμία σύνδεσης	0,6mm	0,5mm	0,5mm

3.3. ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Τα συγκολλημένα δοκίμια μελετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης για τον εντοπισμό και το χαρακτηρισμό της μικροδομής τους. Για την προετοιμασία των δειγμάτων τα συγκολλημένα ελάσματα κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής σε διαστάσεις τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η παρατήρησή τους στο μικροσκόπιο λήψη μικρο-σκληρομετρήσεων.

Για την ολοκληρωμένη παρατήρηση των δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, απομονώθηκε από το κάθε συγκολλημένο έλασμα μία περιοχή εκατέρωθεν της ραφής με πλάτος ικανό ώστε να συμπεριλαμβάνει όλες τις περιοχές της συγκόλλησης, δηλαδή μέταλλο βάσης (MB), θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) και ζώνη τήξης (ΖΤ).

Συνολικά κόπηκαν και προετοιμάστηκαν δύο δοκίμια από την κάθε διαδικασία συγκόλλησης (ένα για παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και ένα για μικρο-σκληρομετρήσεις) και δύο δοκίμια που περιλάμβαναν μόνο το MB (μακριά από την περιοχή της συγκόλλησης).



ΕΙΚΟΝΑ 3-3 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΣΤΟ SEM

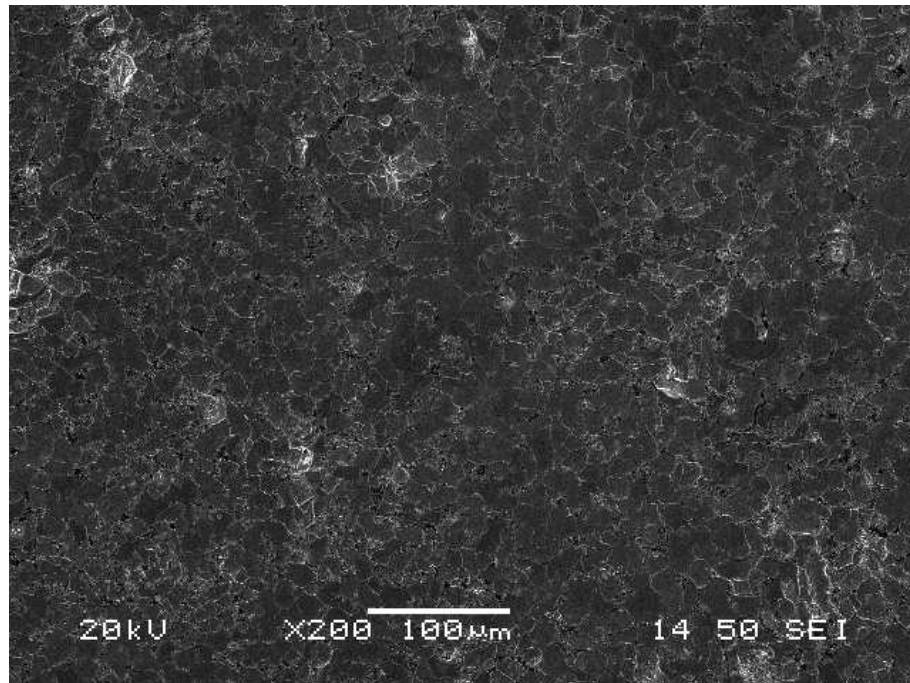
3.3.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1

Ελέγχοντας το πρώτο συγκολλημένο δοκίμιο, παρατηρήθηκε ότι στο μέταλλο βάσης (εικόνες 3.4 – 3.7) κυριαρχεί η φερριτοπερλιτική μικροδομή, με αναλογία 30% περλίτη και 70% προευκτοειδή φερρίτη. Ο περλίτης χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία ως προς τον προσανατολισμό και τη

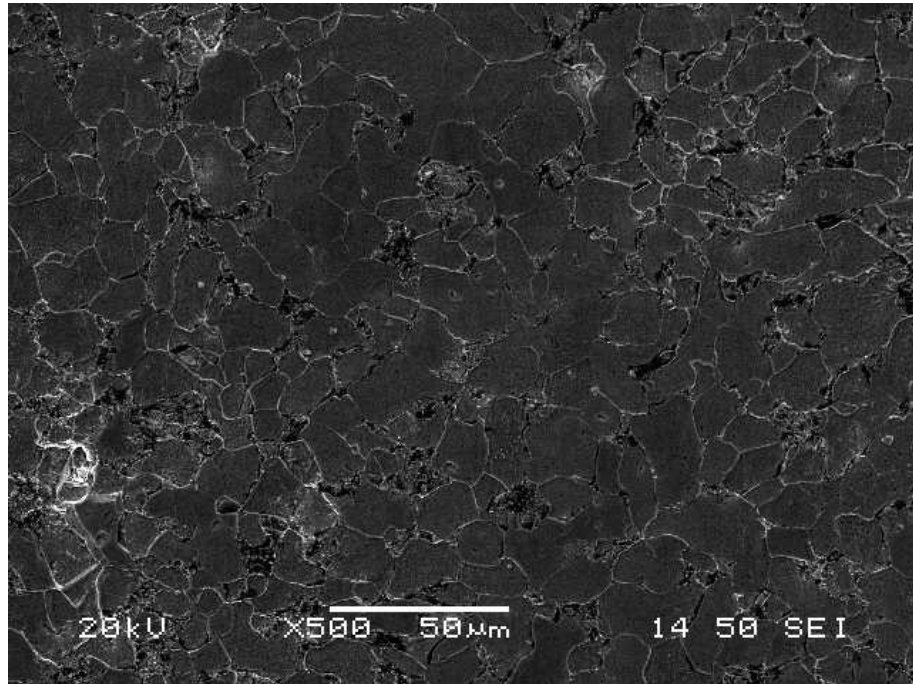
μορφολογική ετερογένεια, καθώς δεν παρατηρήθηκε να ακολουθεί την πολυγωνική ισαξονική δομή. Επίσης είναι εμφανή τα σημάδια της κατεργασίας της έλασης που παρέμειναν από την παραγωγή του χάλυβα, καθώς οι ναυπηγικοί κατασκευαστικοί χάλυβες είναι στην πλειονότητά τους θερμομηχανικά κατεργασμένοι.

Οι κόκκοι του φερρίτη είναι ισαξονικοί και πολυγωνικοί. Οι περλιτικοί κόκκοι είναι πλακοειδούς μορφολογίας με ετερότροπο προσανατολισμό ανάπτυξης.

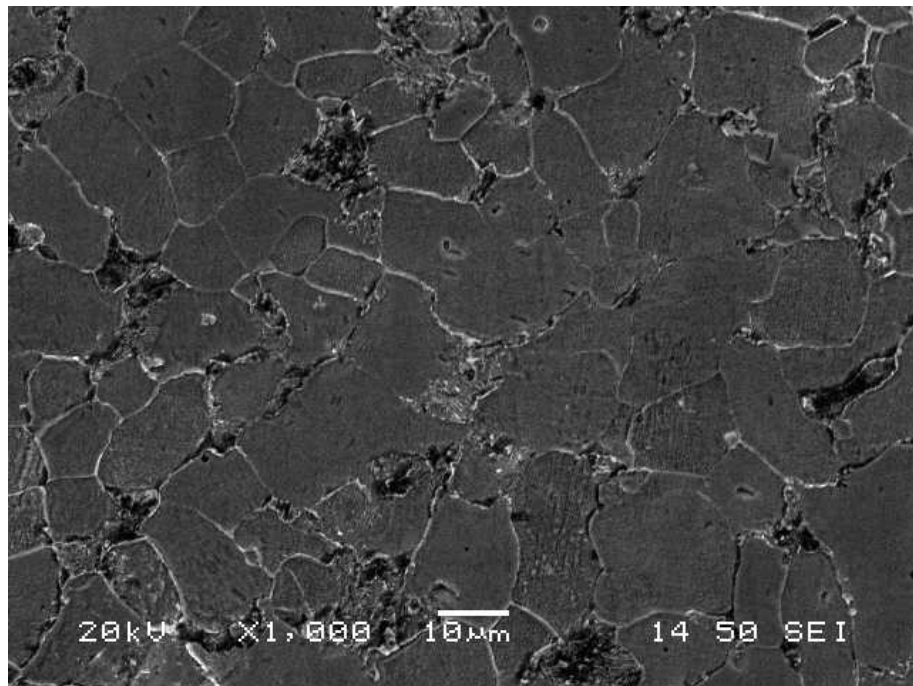
Το μέσο μέγεθος κόκκου που προσδιορίστηκε ήταν $12\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ (αριθμός κοκκομετρίας n κατά ASTM είναι ίσος με 10).



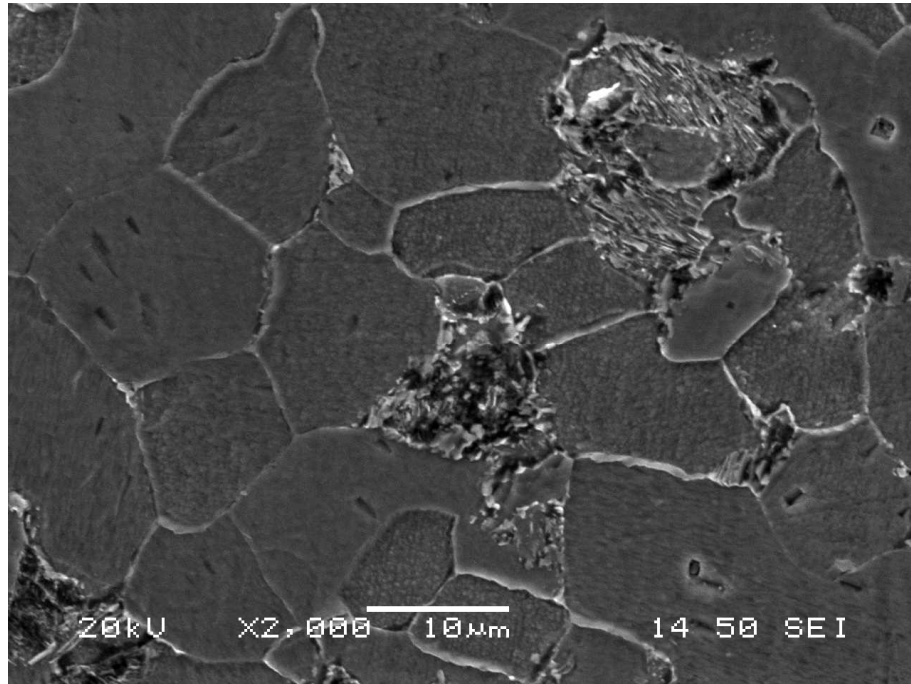
ΕΙΚΟΝΑ 3-4: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ X200



ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ X500



ΕΙΚΟΝΑ 3-6: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ X1.000



ΕΙΚΟΝΑ 3-7: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ2.000

Κατευθυνόμενοι προς το κέντρο της συγκολλητής σύνδεσης, εστίασαμε στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη (εικόνες 3-8 – 3-12). Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή την ζώνη λόγω του μεγάλου κινδύνου υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων του δείγματος, η οποία οφείλεται στην ακούσια θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται κατά τη συγκόλληση.

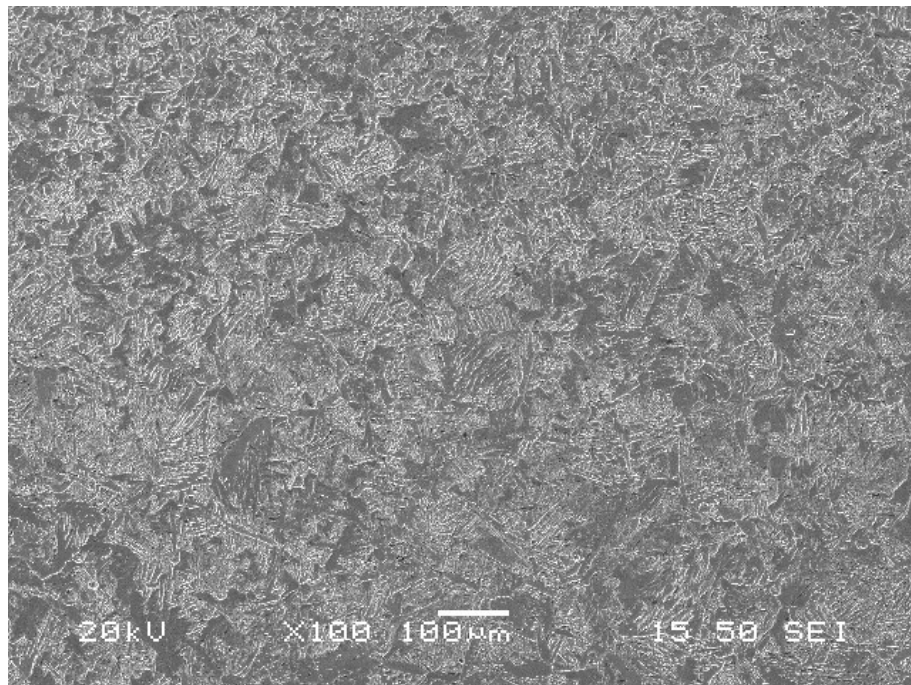
Γενικά, παρατηρήθηκε αλλαγή της διεύθυνσης προσανατολισμού των κόκκων ως προς το μέταλλο βάσης. Σημαντική παρατήρηση ήταν η απουσία εναρκτήριων σημείων ρωγμών στον προευτηκτοειδή φερρίτη, που ως μαλακότερος από τον περλίτη, απορροφά όλες τις μηχανικές τάσεις. Επίσης μεγάλης σημασίας είναι η εύρεση του σχηματισμένου φερρίτη Widmanstätten, ο σχηματισμός του οποίου αποδίδεται στη μεγάλη ταχύτητας ψύξης του θερμικά αγωγίμου υλικού στις συνθήκες συγκόλλησης που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.2.2. "Συγκόλληση δοκιμίων". Ο σχηματισμένος φερρίτης παρουσιάζει βελονοειδή μορφή πιθανώς λόγω της αύξησης των κόκκων ωστενίτη κατά την υπερθέρμανση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, όταν η ωστενιτοποίηση συμβεί σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, τότε ο προευτηκτοειδής φερρίτης παίρνει βελονοειδή μορφή αντί της συνήθους ισοαξονικής - πολυεδρικής²⁶. Σημαντικοί παράγοντες στην ανάπτυξη του φερρίτη Widmanstätten είναι επίσης η ύπαρξη μαγγανίου και ο σχετικά γρήγορος ρυθμός απόψυξης. Η υπερθέρμανση συσχετίζεται άμεσα με την εισερχόμενη θερμότητα (heat input, HI).

²⁶ Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1993): «Γενική Μεταλλογνωσία II», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

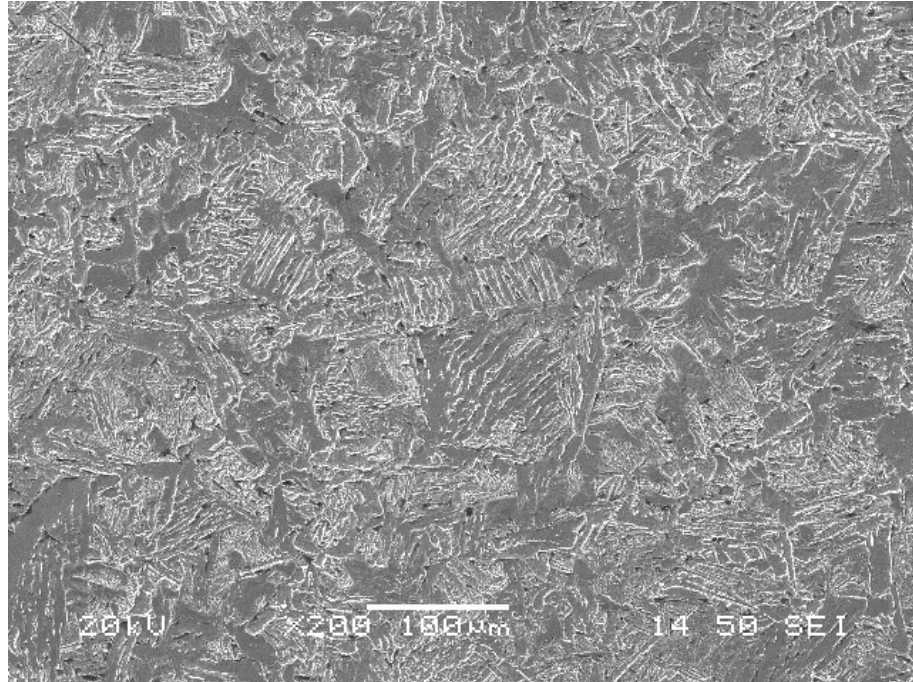
Τέλος, η παρουσία του φερρίτη Widmanstätten οδηγεί συνήθως σε μείωση της δυσθραυστότητας, η οποία μπορεί να διαπιστωθεί όμως μόνο με δοκιμή κρούσης κατά Charpy ή Izod.

Επιπρόσθετα εντοπίστηκε σχηματισμένος κατώτερος μπαινίτης ως φάση εκτός ισορροπίας. Ο σχηματισμός μπαινίτη υποδεικνύει τη θέρμανση σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν απόψυξη σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550°C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη Ms (περίπου 250°C).

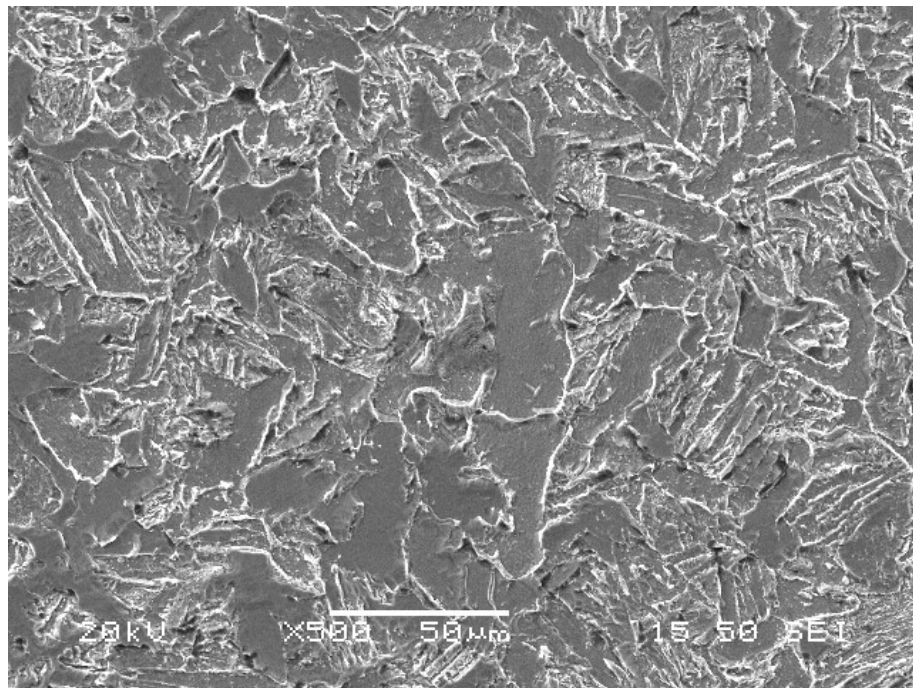
Ο σχηματισμός του μπαινίτη ξεκινά με τη διάτμηση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη και την πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη στην ωστενιτική περιοχή σε καθορισμένες προτιμητέες διευθύνσεις μέσα στα οκταεδρικά επίπεδα του fcc πλέγματος. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η καθίζηση σεμεντίτη ενδοκρυσταλλικά στο φερρίτη, με παράλληλο εμπλουτισμό του ωστενίτη σε άνθρακα. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε C οδηγεί σε καθίζηση σεμεντίτη (Fe₃C) και μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη και το σχηματισμό του κατώτερου μπαινίτη.



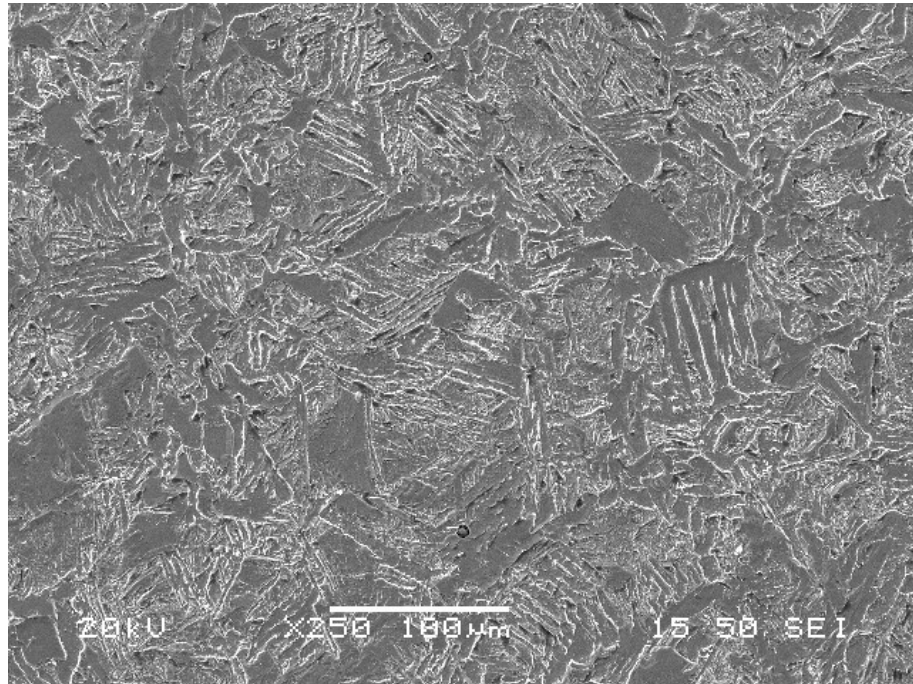
ΕΙΚΟΝΑ 3-8: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x100



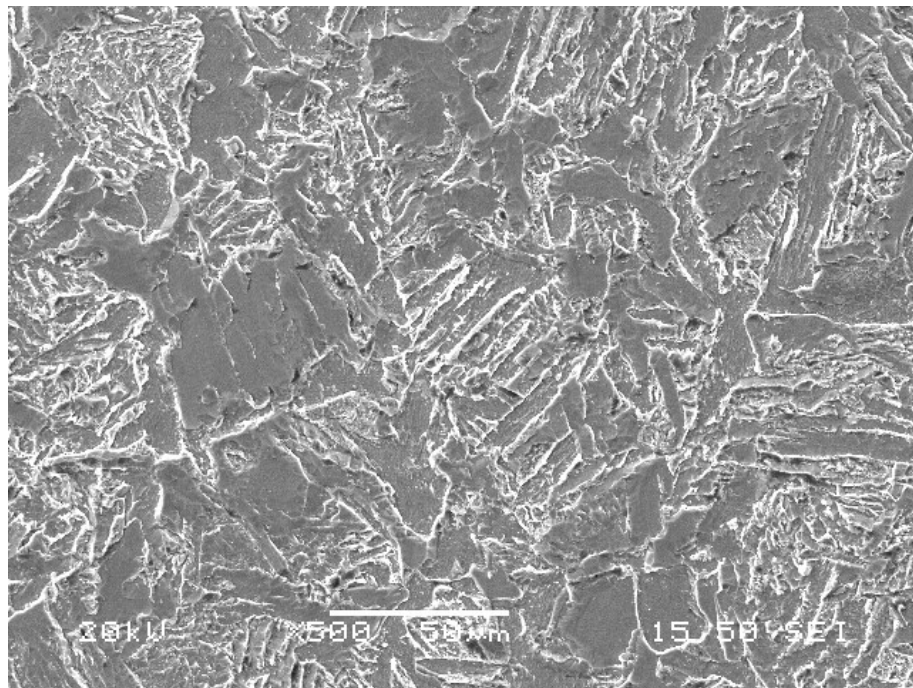
ΕΙΚΟΝΑ 3-9: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x200



ΕΙΚΟΝΑ 3-10: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x500



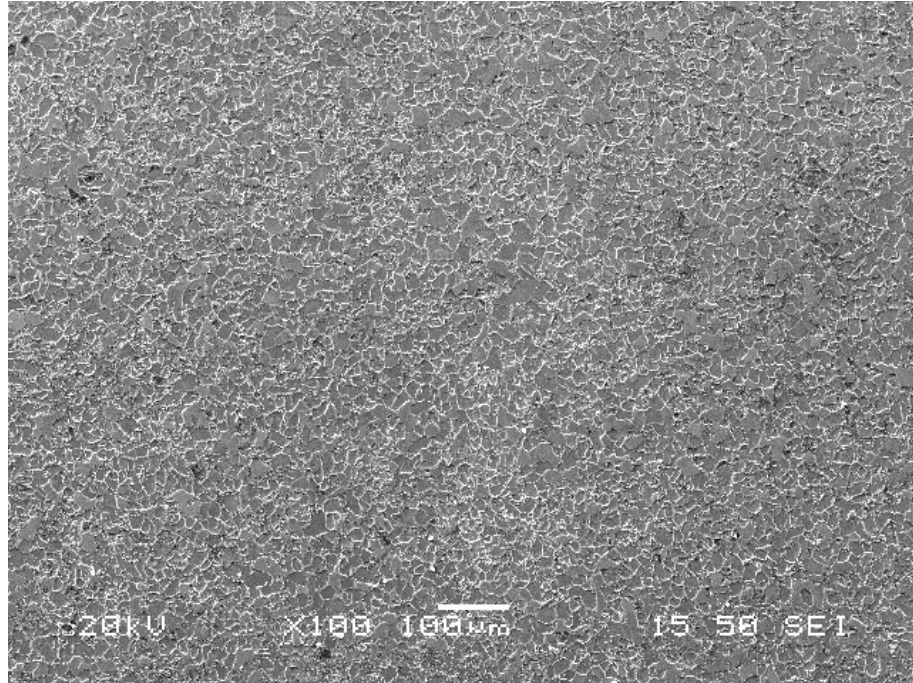
ΕΙΚΟΝΑ 3-11: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x250



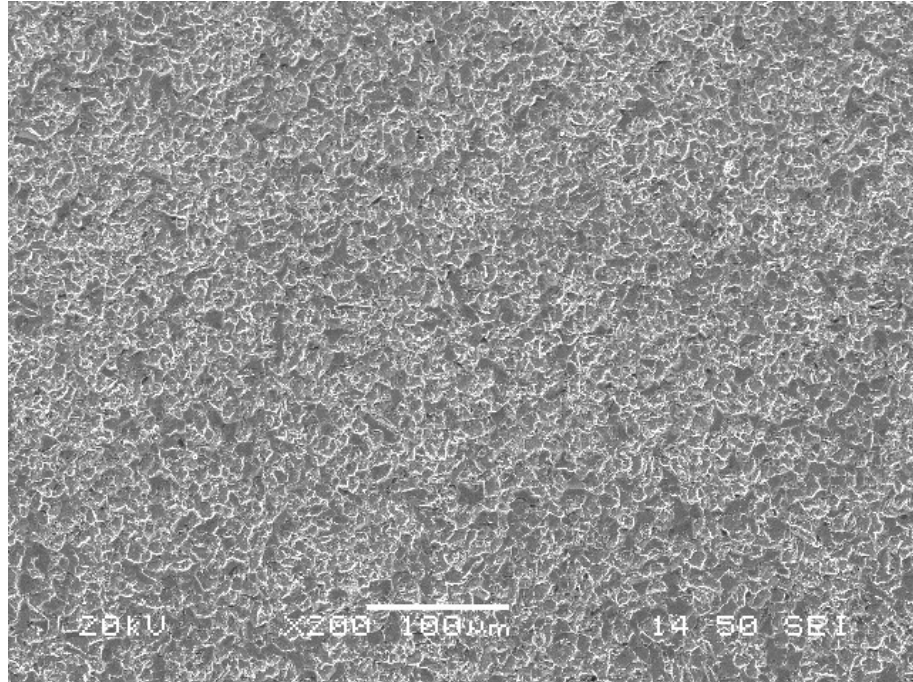
ΕΙΚΟΝΑ 3-12: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x500

Στη ζώνη τήξης (εικόνες 3-13 – 3-15) ξεχώρισαν η μικτή δομή διευρυμένου κολονοειδούς μορφολογίας φερρίτη στα όρια των κόκκων, βελονειδούς φερρίτη και μικρό κλάσμα όγκου

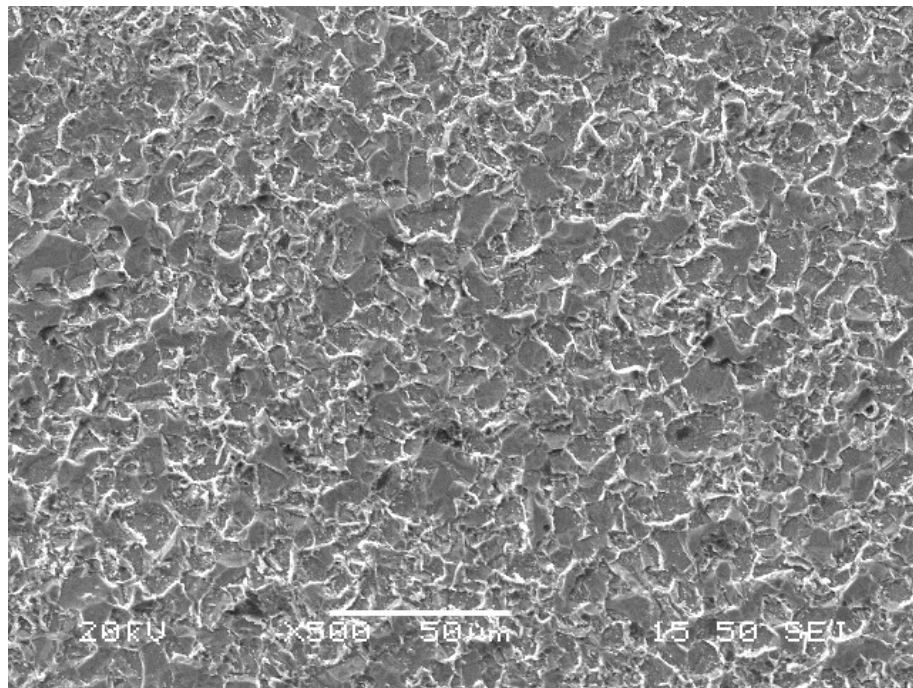
συμμετοχής μπαινίτη. Ο φερρίτης που παρατηρήθηκε χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητα του. Επίσης παρουσιάζει χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές που κλείνουν περισσότερο σε γωνιώδη συμμετρία, ενώ απουσιάζουν οι ισαξονικοί φερριτικοί κόκκοι που υπονοεί συνθήκες συμμετοχής αλλοτροπικών μορφών.



ΕΙΚΟΝΑ 3-13: ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ100



ΕΙΚΟΝΑ 3-14: ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ200

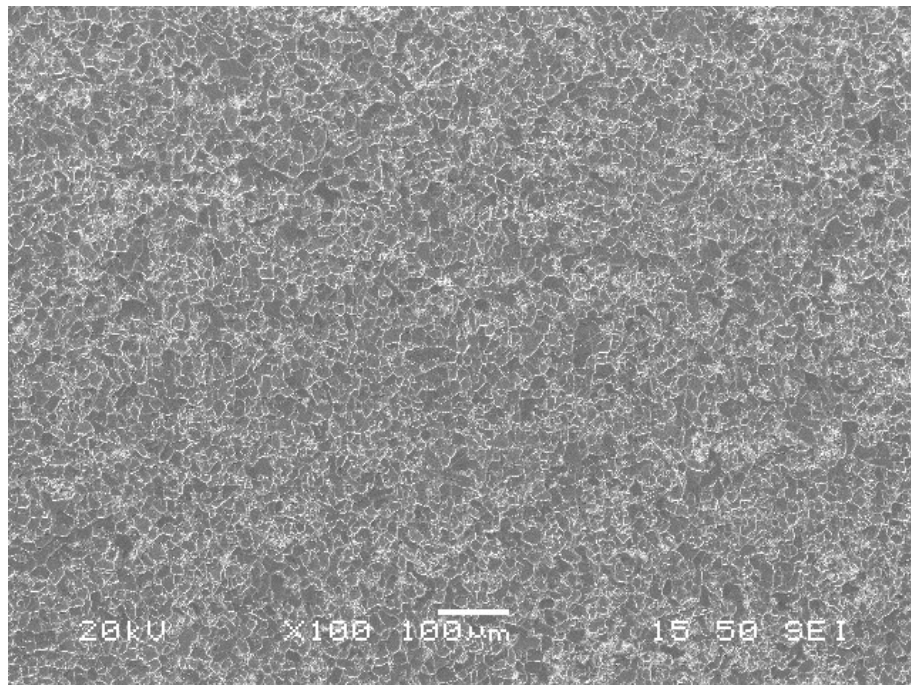


ΕΙΚΟΝΑ 3-15: ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ500

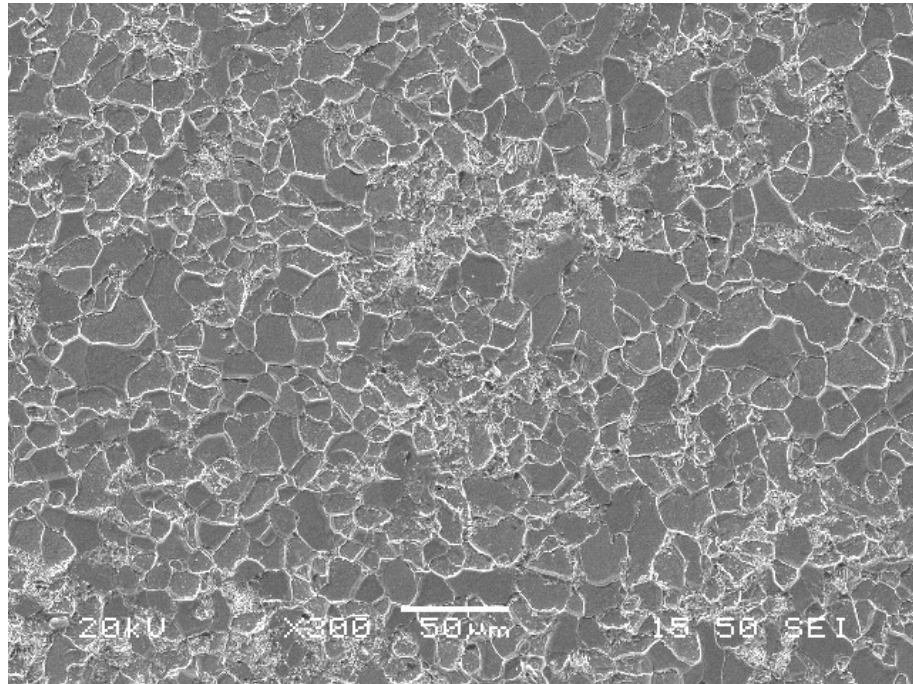
3.3.2 Συγκολλημένο δοκίμιο 2

Ελέγχοντας το δεύτερο συγκολλημένο δοκίμιο, παρατηρήθηκε ότι στο μέταλλο βάσης (εικόνες 3-16 – 3-18) επικρατεί η φερριτοπερλιτική δομή (30% περλίτης- 70% φερρίτης). Όπως και στο συγκολλημένο δίκιμο η συνδυασμένη συμμετοχή του προευτηκτοειδή φερρίτη και του περλίτη χαρακτηρίστηκε από πυκνή επιστοίβαξη πλακιδίων. Οι κόκκοι του φερρίτη είναι ισαξονικοί και πολυγωνικοί. Οι περλιτικοί κόκκοι είναι πλακοειδούς μορφολογίας με ετερότροπο προσανατολισμό ανάπτυξης.

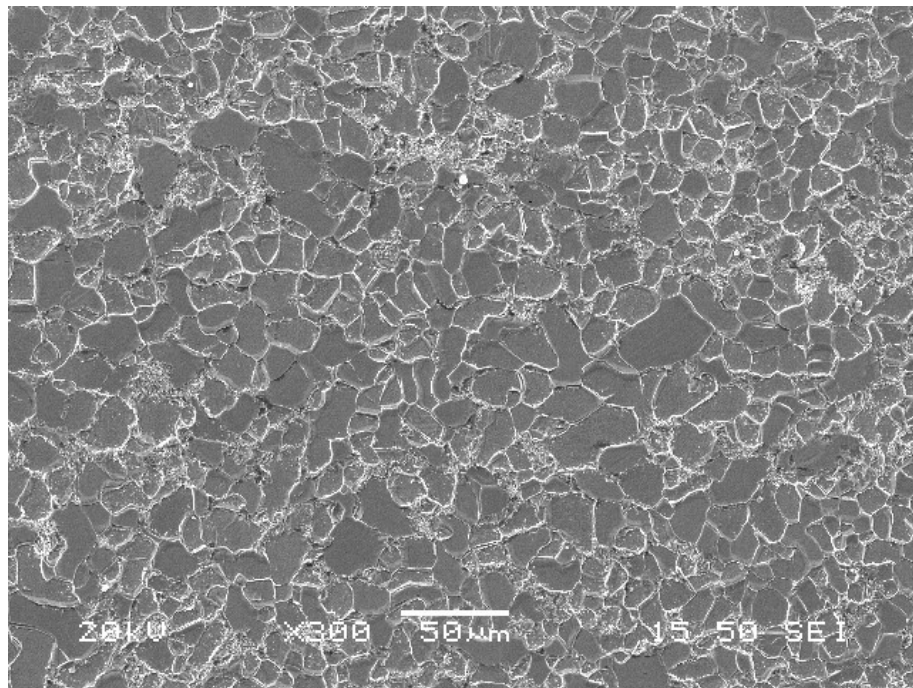
Οι προκύπτουσες συνθήκες γειννίασης μεταξύ των δύο μικροδομικών φάσεων δημιουργούν ισχυρά κέντρα αγκύρωσης καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αναντιστοιχίας πλέγματος και ανισοτροπίας προσανατολισμού. Οι φερριτικοί πολυγωνικοί και ισαξονικοί κόκκοι χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια στην κατανομή του μέσου μεγέθους τους, το οποίο προσδιορίστηκε στα $12 \mu\text{m} \pm 7 \mu\text{m}$. (αριθμός κοκκομετρίας n κατά ASTM είναι ίσος με 10).



ΕΙΚΟΝΑ 3.16: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x100



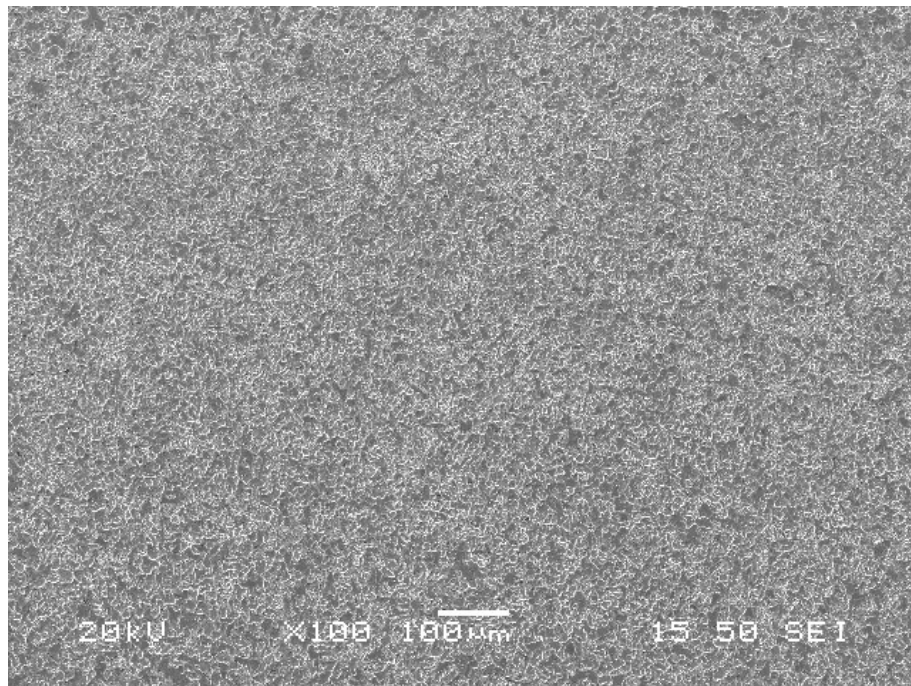
ΕΙΚΟΝΑ 3-17: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x300



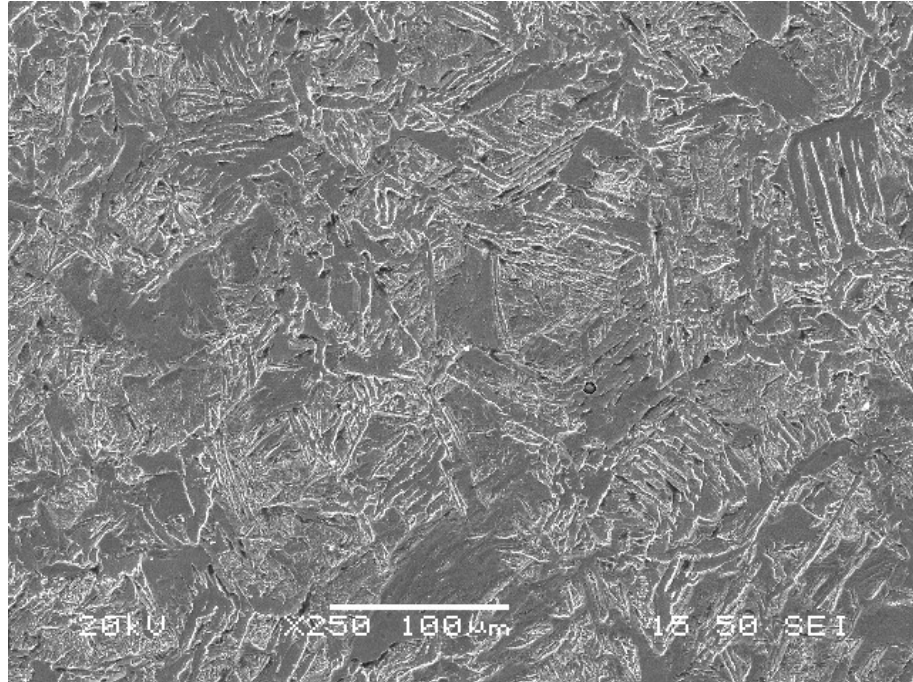
ΕΙΚΟΝΑ 3 -18: ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x300

Εστιάζοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του δεύτερου συγκολλημένου δοκιμίου (εικόνες 3-19 – 3-21), ξεχωρίσαμε το σχηματισμό τριών φάσεων: πολυγωνικού φερρίτη διακουμινόμενου μεγέθους, περλίτη και μπαινίτη.

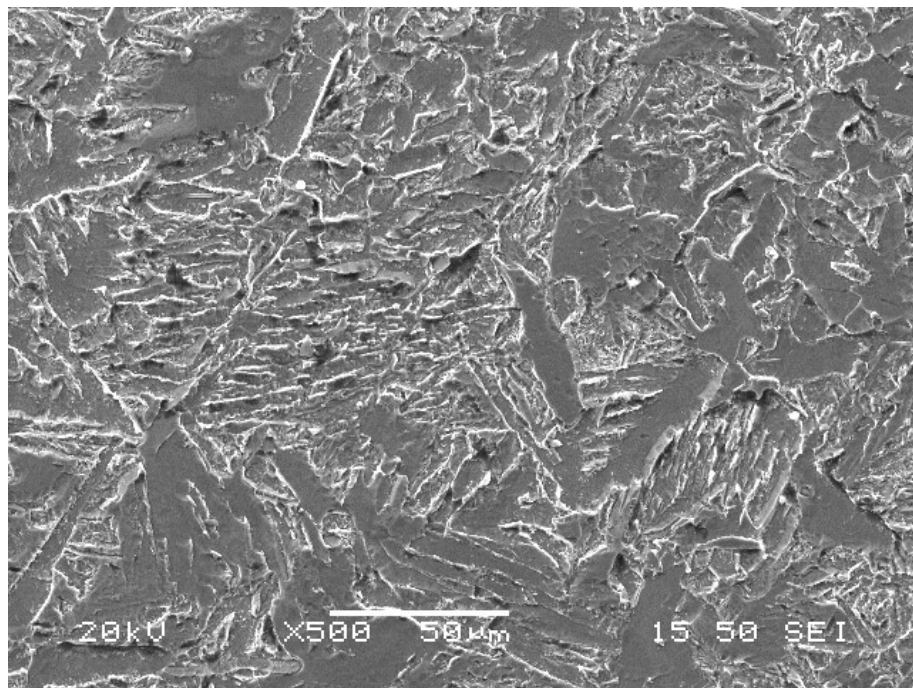
Ο σχηματισμός μπαινίτη υποδεικνύει τη θέρμανση σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν απόψυξη σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550°C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη Ms (περίπου 250°C). Ο σχηματισμός ξεκινά με τη διάτμηση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη και την πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη στην ωστενιτική περιοχή σε καθορισμένες προτιμητέες διευθύνσεις μέσα στα οκταεδρικά επίπεδα του fcc πλέγματος. Παράλληλα ο ωστενίτης εμπλουτίζεται σε άνθρακα. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε C οδηγεί σε καθίζηση σεμεντίτη (Fe_3C) και μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη και το σχηματισμό του ανώτερου μπαινίτη. Καθώς ο ρυθμός απόψυξης αυξάνεται, παρατηρούνται φάσεις εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας όπως είναι ο φερρίτης Widmanstätten.



ΕΙΚΟΝΑ 3-19: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x100



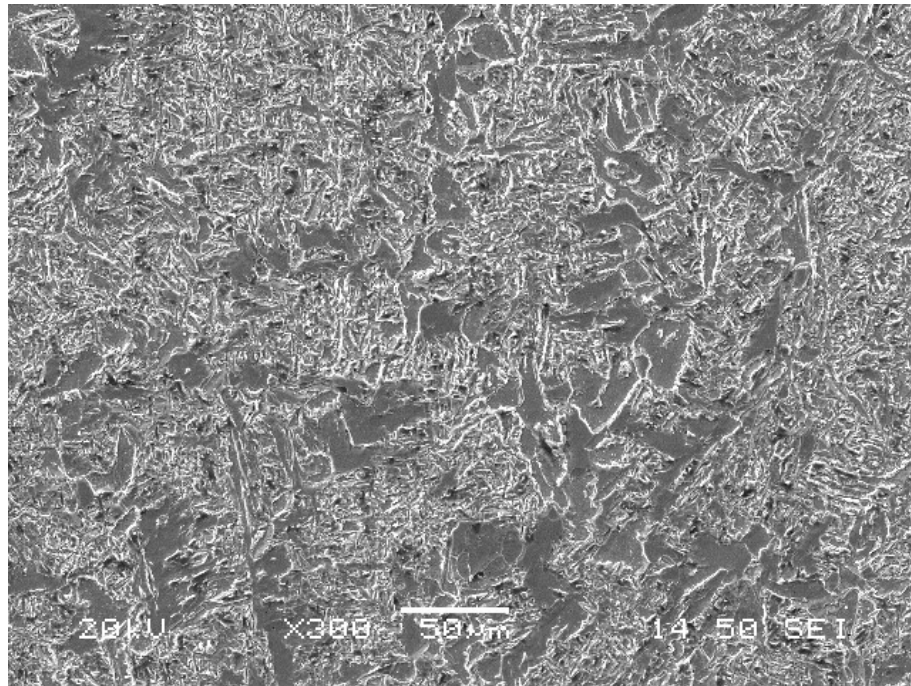
ΕΙΚΟΝΑ 3-20: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x250



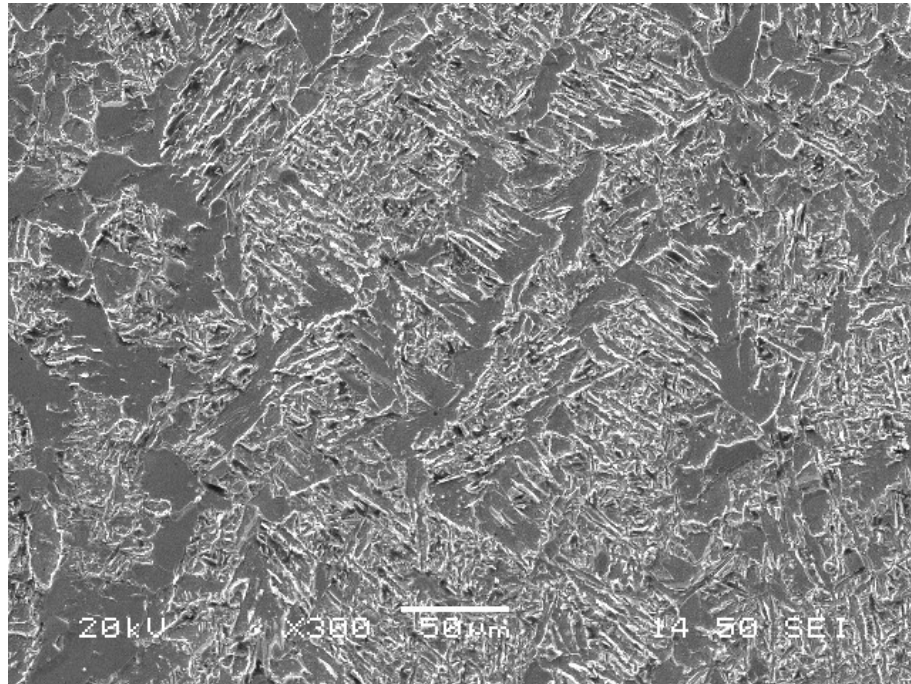
ΕΙΚΟΝΑ 3-21: ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ x500

Στη ζώνη τήξης (εικόνες 3-22 – 3-23) ξεχώρισαν τρεις φάσεις: μικτή δομή διευρυμένου κολονοειδούς μορφολογίας φερριτή στα όρια των κόκκων, βελονοειδούς φερριτή και μικρό κλάσμα

όγκου συμμετοχής μπαινίτη. Ο φερρίτης που παρατηρήθηκε χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητα του. Γενικά το δείγμα παρουσίασε στη ζώνη τήξης χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές που κλείνουν περισσότερο σε γωνιώδη συμμετρία, ενώ απουσιάζουν οι ισαξονικοί φερριτικοί κόκκοι που υπονοεί συνθήκες συμμετοχής αλλοτροπικών μορφών.



ΕΙΚΟΝΑ 3-22: ΖΩΝΗ ΤΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ300

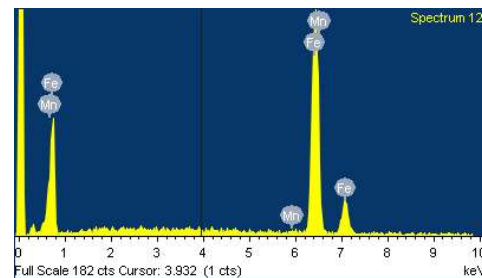


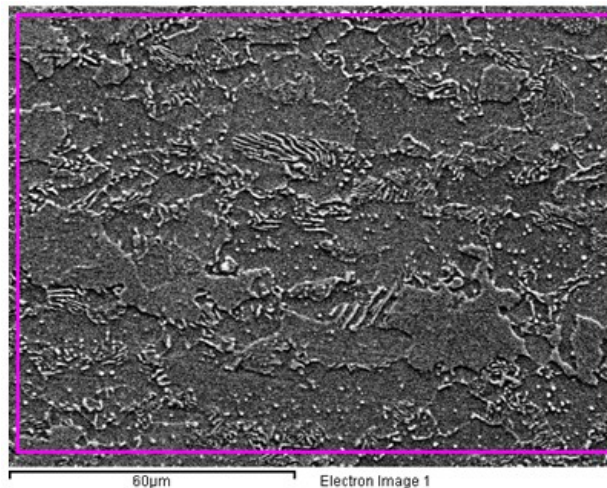
ΕΙΚΟΝΑ 3-23: ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2, ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ Χ300

3.4. ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ (EDS – ENERGY DISPERSIVE SPECTROSCOPY)

Από τα αποτελέσματα της χημικής μικροανάλυσης, παρατηρούμε ότι στο μέταλλο βάσης το υπό εξέταση συγκολλημένο δείγμα χαρακτηρίζεται από διακυμαινόμενη ανακατανομή των χημικών στοιχείων από ενδοκρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας σε περικρυσταλλικές περιοχές (partitioning).

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας γενικευμένης χημικής ανάλυσης στην επιφάνεια του δείγματος. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn είναι 0.57 wt% και του Si είναι 0.21 wt%.

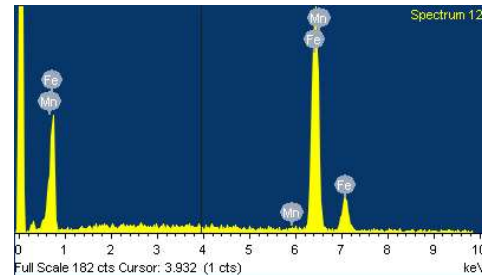
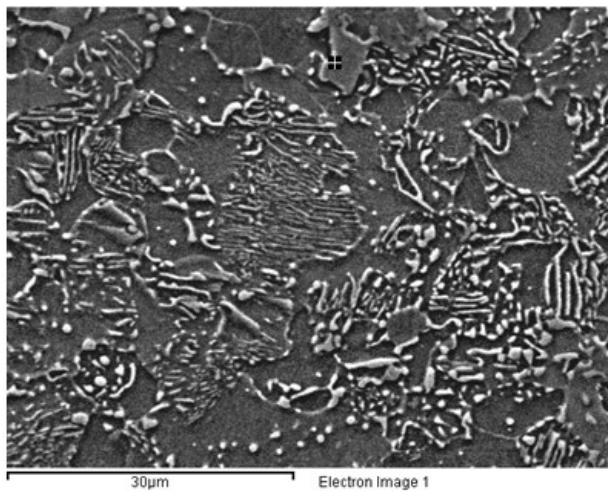




Element	Weight%	Atomic%
Si	0.21	0.42
Mn	0.57	0.58
Fe	99.22	99.01
Totals	100.00	

ΕΙΚΟΝΑ 3-24: ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ.

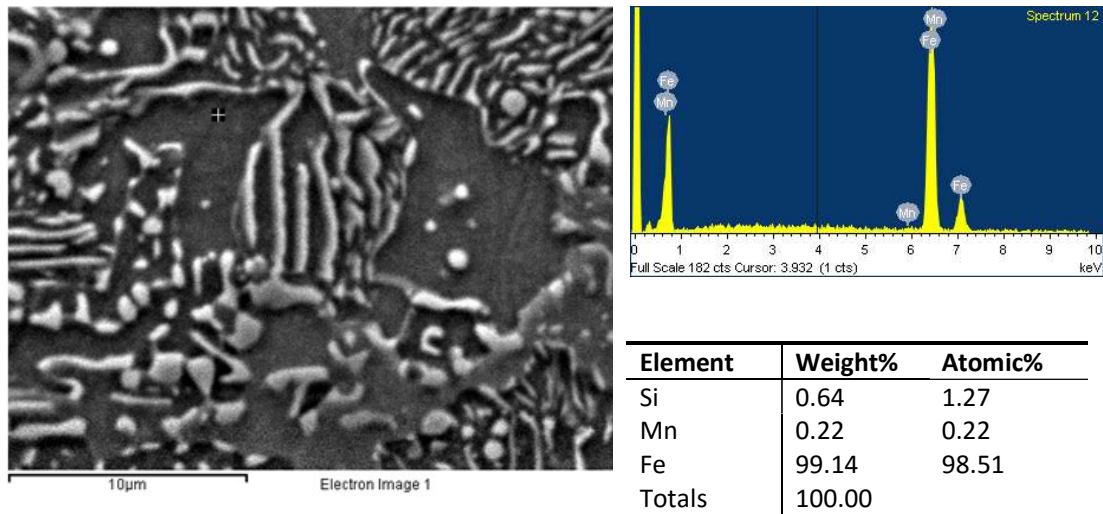
Μέσω της σημειακής χημικής μικροανάλυσης προσδιορίστηκε, τόσο σε περι-κρυσταλλικές όσο και σε ενδο-κρυσταλλικές θέσεις, η κατά βάρος περιεκτικότητα των κύριων κραμματικών στοιχείων του υλικού. Σημειώνεται ότι, οι μετρήσεις παραγματοποιήθηκαν σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης, ακριβώς όπως έγινε και κατά τη μικροσκοπική παρατήρηση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.



Element	Weight%	Atomic%
Si	0.42	0.82
Mn	0.52	0.53
Fe	99.06	98.65
Totals	100.00	

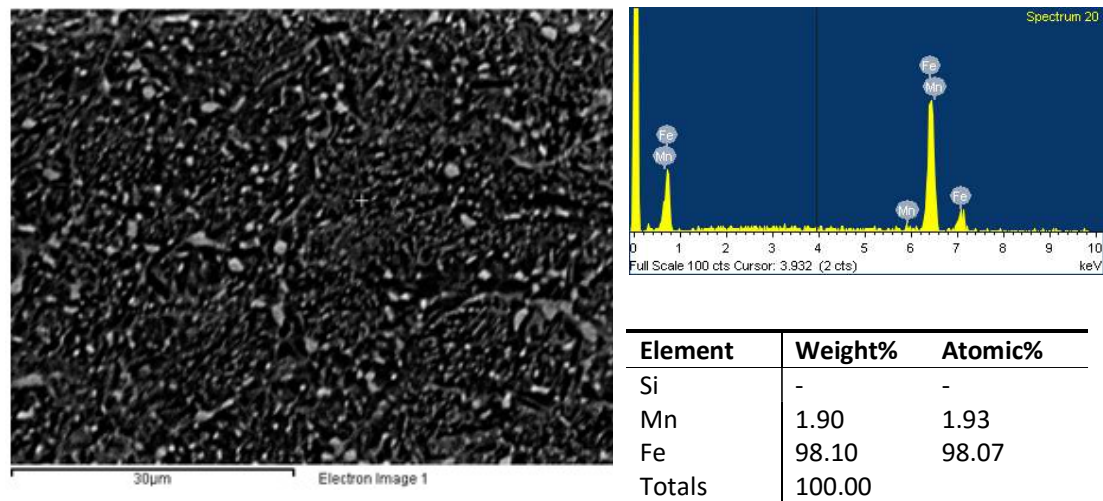
ΕΙΚΟΝΑ 3-25: ΣΗΜΙΑΚΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) παρατηρείται έντονη ανακατανομή των κραματικών στοιχείων στις περικρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας, ως αποτέλεσμα του ταχύτατου ρυθμού ψύξης.



ΕΙΚΟΝΑ 3-26: ΣΗΜΙΑΚΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ.

Στη ζώνη τήξης, όπου τα θερμικά φαινόμενα είναι εντονότατα, η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn αυξάνεται σημαντικά, ενώ του Si ελαχιστοποιείται.



ΕΙΚΟΝΑ 3-27: ΣΗΜΙΑΚΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 1

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Si (wt%)	0.35 ± 8	0.67 ± 9	-
Mn (wt%)	0.57 ± 7	0.31 ± 4	2.01 ± 7

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-4 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΧΗΜΙΚΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 1

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Si (wt%)	0.40 ± 7	0.71 ± 12	0,10 ± 4
Mn (wt%)	0.52 ± 7	0.22 ± 9	2.08 ± 10

3.5.ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

Πριν από τη μικροσκληρομέτρηση απαιτήθηκε η λείανση και η στίλβωση των δοκιμίων. Κάθε αποτύπωμα του διεισδυτή απέχει 0,01mm (10μm) κατά τη διάμετρο του δοκιμίου. Για τη δοκιμή επιλέχθηκε φορτίο 300 g και χρόνος επιβολής πλήρους φορτίου 15 sec. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο δοκίμια, ένα από κάθε συγκόλληση και σε κάθε ένα από αυτά έγιναν μετρήσεις σε 2 διευθύνσεις.

3.5.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1

Για το πρώτο δοκίμιο η μέση τιμή σκληρότητας που προέκυψε για το μέταλλο βάσης ήταν 178 HVN. Η τιμή αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η σκληρότητα του φερρίτη είναι γύρω στα 80-100 HV και του περλίτη γύρω στα 200 HV.

Στη ζώνη τήξης, λόγω της ταχείας απόψυξης του τήγματος, έχουν σχηματιστεί κόκκοι υπό μορφή βελόνων. Οι βελόνες, με φορά αντίθετη προς τη ροή της θερμότητας, είναι τόσο λεπτότεροι, όσο η ταχύτητα απόψυξης είναι μεγαλύτερη. Η αργή απόψυξη ευνοεί τους μεγάλους και χονδρούς δενδρίτες και οδηγεί σε φτωχότερες μηχανικές ιδιότητες της ζώνης τήξης. Γενικά ο ρυθμός ψύξης είναι πιο αργός για μεγάλες θερμικές παροχές και μικρό πάχος ελασμάτων. Επίσης ισχύει ότι η παρουσία κατάλληλου αερίου προστασίας θα οδηγήσει σε λεπτότερες δομές σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης που δεν κάνουν χρήση αερίου προστασίας ή κάνουν χρήση πιο δραστικού μίγματος αερίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-5 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 1

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Μέση Τιμή Μίκροσκληρότητας	178±7	195±7	328,1±10

Οι τιμές της σκληρότητας στη ζώνη τήξης φτάνουν σχεδόν το 185% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο μέταλλο βάσης, δίνοντας μέση τιμή 328,1 HVN.

3.5.2 Συγκολλημένο δοκίμιο 2

Στο δεύτερο δοκίμιο που πραγματοποιήσαμε μικροσκληρομέτρηση, η μέση τιμή σκληρότητας που προέκυψε για το μέταλλο βάσης ήταν 178 HVN. Η τιμή αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η σκληρότητα του φερρίτη είναι γύρω στα 80-100 HV και του περλίτη γύρω στα 200 HV. Η κατανομή των τιμών της μικροσκληρότητας αναδεικνύει την πτώση του κλάσματος όγκου συμμετοχής του μπαινίτη καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο της συγκόλλησης. Οι τιμές της σκληρότητας στη ζώνη τήξης φτάνουν σχεδόν το 175% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο μέταλλο βάσης, δίνοντας μέση τιμή 310 HVN.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-6 ΔΙΑΖΩΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 2

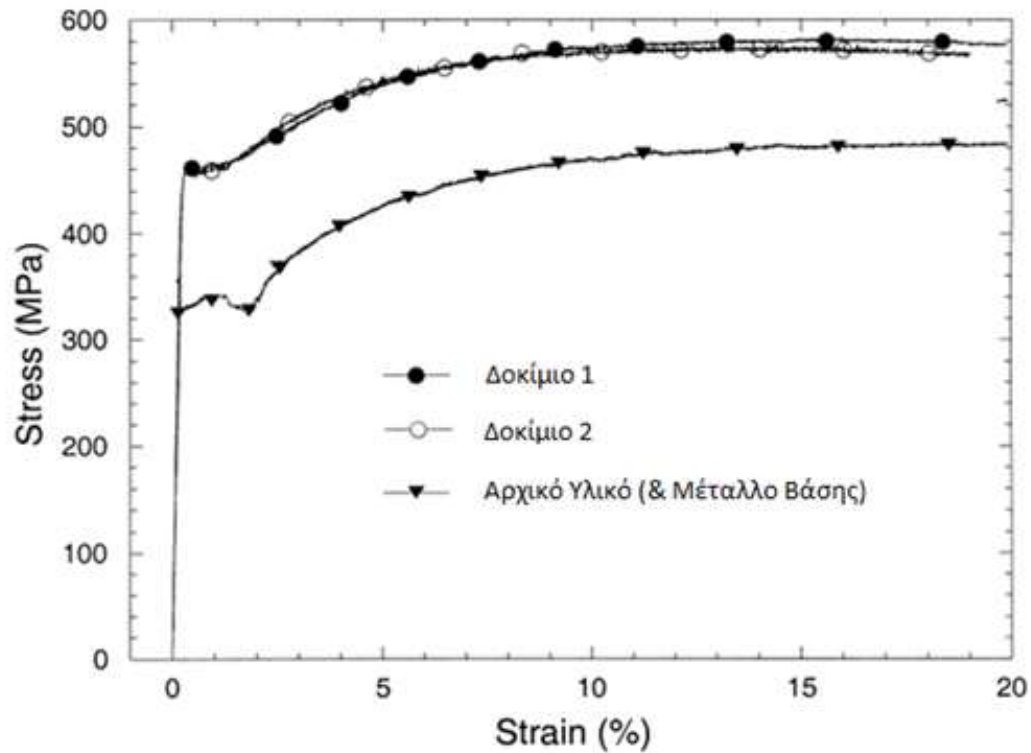
	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Μέση Τιμή Μίκροσκληρότητας	178±7	181±9	310,2±7

3.6.ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

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. Το δοκίμια εφελκυσμού προετοιμάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8.

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 – παραμόρφωση.



ΕΙΚΟΝΑ 3-28: ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ 1 ΚΑΙ 2 ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα σημεία αναφοράς των δειγμάτων ως προς τη μελέτη σχεδιασμού κατασκευών, δηλαδή το όριο διαρροής και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή, καθώς και η μέτρηση της συνολικής επιμήκυνσης, από την οποία προκύπτει η ολκιμότητα των δειγμάτων, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-7 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ 1 ΚΑΙ 2 ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

	Δείγμα αναφοράς (Μέταλλο Βάσης)	Συγκολλημένο δείγμα 1	Συγκολλημένο δείγμα 2
Όριο Διαρροής (MPa)	334	460	460

Μέγιστη Εφελκυστική Τάση Θραύσης (MPa)	500	580	575
Ολκιμότητα (%)	44	32	32
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	190	211	211

3.7. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.7.1 Συγκολλημένο δοκίμιο 1

Είναι εμφανές ότι, με τη μείωση της απόστασης από την κεντρική γραμμή της συγκόλλησης, η κλίση του βρόχου υστέρησης μειώνεται, δηλαδή ο μαγνητικός βρόχος παρουσιάζεται να «γέρνει» προς τα δεξιά ^{[27][28][29][30][31]}. Η κλίση αυτή είναι ανάλογη με τη μαγνητική διαπερατότητα της ζώνης της συγκόλλησης. Συνεπώς, όταν η κλίση του βρόχου μειώνεται, το υλικό γίνεται σκληρότερο μαγνητικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους του βρόχου υστέρησης (2·Hc). Με τη σειρά της, η διεύρυνση του βρόχου επιβεβαιώνει τη μαγνητική σκληρότητα του υλικού. Επίσης, η τιμή της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής μειώνεται καθώς αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από την κεντρική γραμμή της συγκόλλησης, δηλαδή εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου, το μέταλλο βάσης έχει «καλύτερη» μαγνητική συμπεριφορά ως προς τις άλλες ζώνες της συγκόλλησης.

²⁷ 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

²⁸ 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

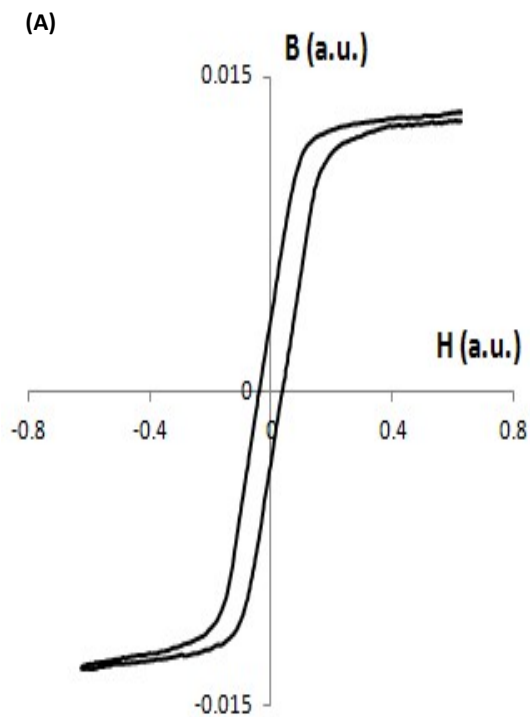
²⁹ A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: Influence of Lüders bands on magnetic Barkhausen noise and magnetic flux leakage signals, *Journal of Materials Science*, vol. 37, 2002, pp. 2441-2446

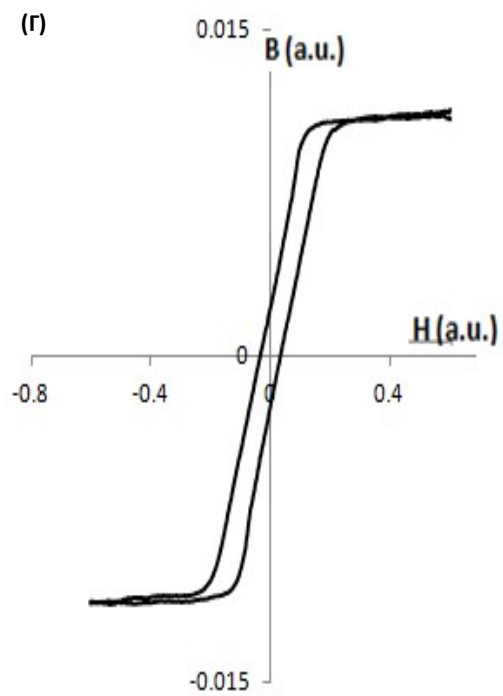
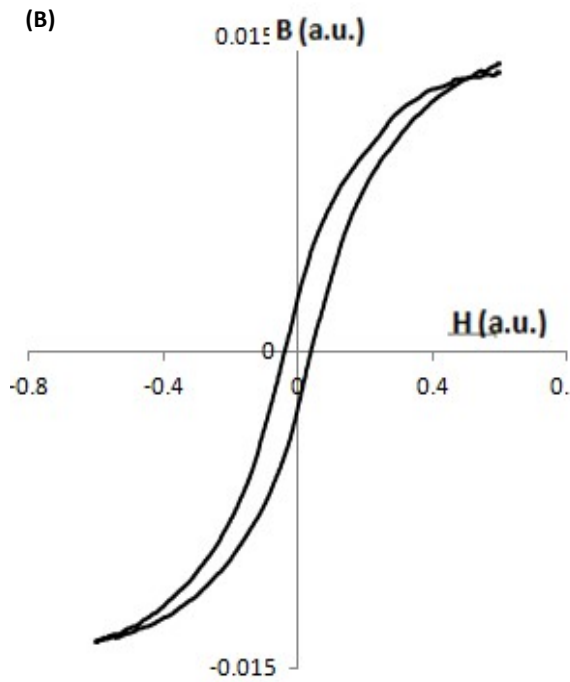
³⁰ M. Caldas-Morgan, L.R. Padovese: Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method, *NDT and E International*, vol. 45, 2012, pp. 148-155

³¹ 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

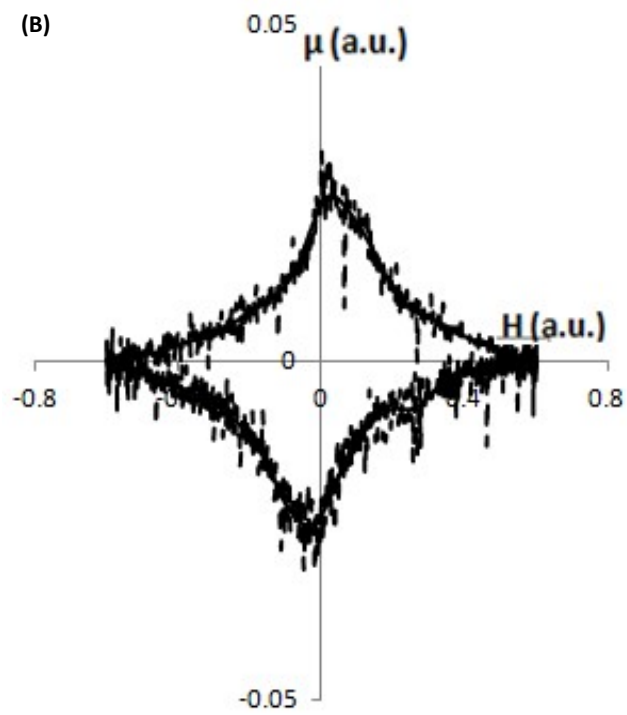
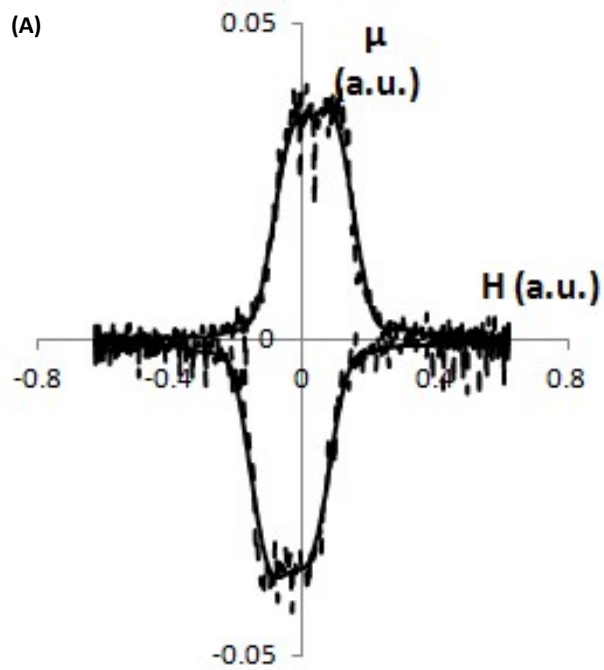
Ο σχηματισμός φάσεων εκτός θερμοδυναμική ισορροπίας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη ζώνη τήξης έχει ως αποτέλεσμα τις απότομες μετακινήσεις των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της απομαγνήτισης που οδηγούν σε ένα πιο γωνιώδη βρόχο υστέρησης, μειώνοντας την κλίση του και κατ' επέκταση και την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας. Επίσης η μαγνητική σκλήρωση είναι συνακόλουθη με την αύξηση της τιμής του συνεκτικού πεδίου.

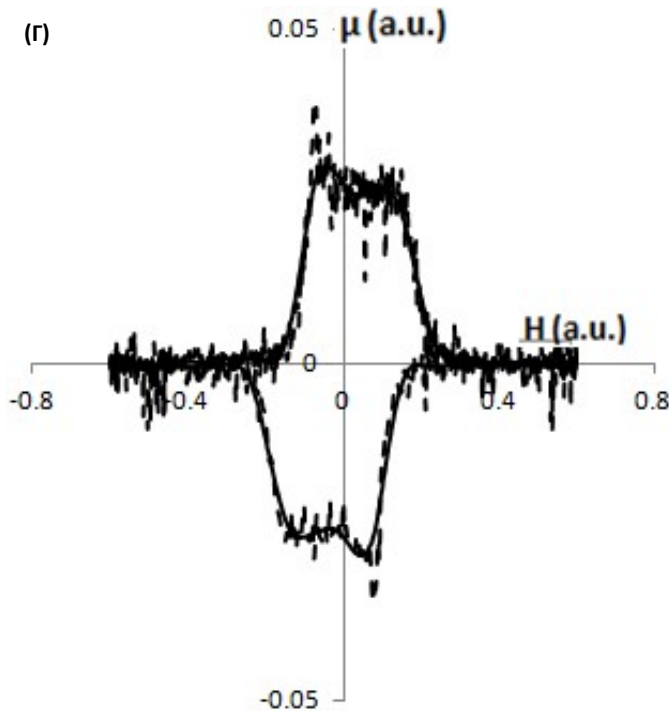
Οι μεταβολές των μαγνητικών τιμών, είναι αποτέλεσμα μικροδομικών αλλαγών που συμβαίνουν στις ζώνες της συγκόλλησης καθώς και μεταβολών στην μορφολογία των συμμετεχόντων φάσεων. Πιθανή ανατατανομή των διαταραχών και αύξηση της πυκνότητάς τους, σχηματισμός φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας και μείωση του μεγέθους των κόκκων οδηγούν σε μαγνητική αποτόνωση της ζώνης της συγκόλλησης.





ΕΙΚΟΝΑ 3-29: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ1 (Α) ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ (Β) ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (Γ) ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣΗΣ.





ΕΙΚΟΝΑ 3-30: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 1 (Α) ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ (Β) ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (Γ) ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ.

3.7.2 Συγκολλημένο δοκίμιο 2

Παρατηρώντας τα γραφήματα των βρόχων διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου πεδίου, είναι εμφανής η μείωση των τιμών της στη ζώνη τήξης. Οι βρόχοι αυτοί είναι πεπλατυσμένοι και παρουσιάζουν απότομες μεταβολές. ^{[32][33][34]}

Στη ζώνη τήξης ο βρόχος της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας γίνεται πιο ευρής και λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή τοπικού μεγίστου. Είναι χαρακτηριστική, η εμφάνιση διπλής κορυφής στο βρόχο της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας. Η πρώτη από αριστερά κορυφή σχετίζεται με την περιστροφή των μαγνητικών διπόλων στον εύκολο άξονα μαγνήτισης και στην πιθανή πυρήνωση 180° μαγνητικών περιοχών, λόγω της ενδοκρυσταλλικής περιστροφής των

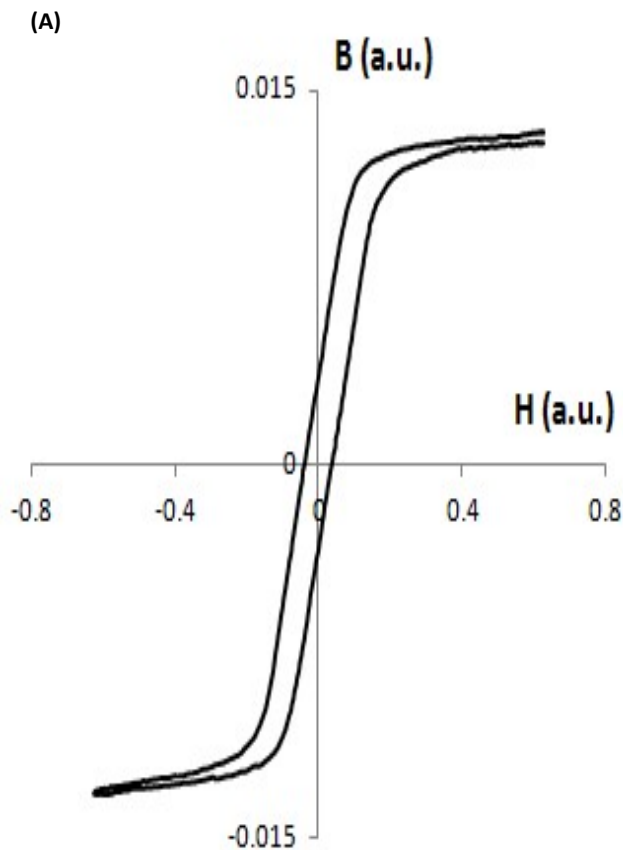
³² M. Alberteris Campos, J. Capó-Sánchez, J. Pérez Benítez, L.R. Padovese: Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise, *NDT & E International*, vol. 41, 2008, pp. 656-659

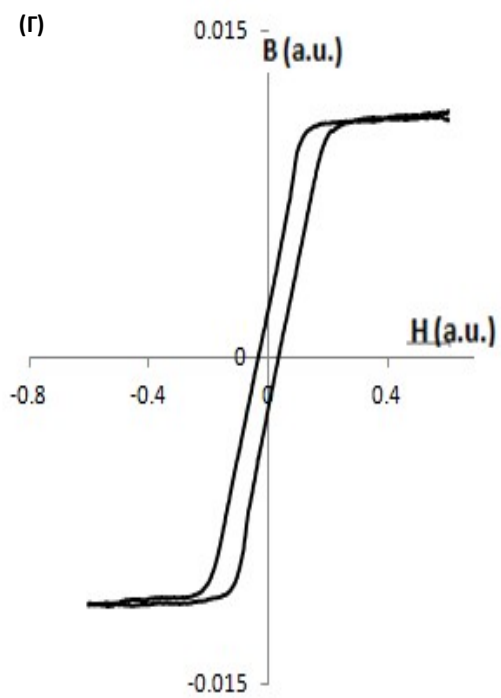
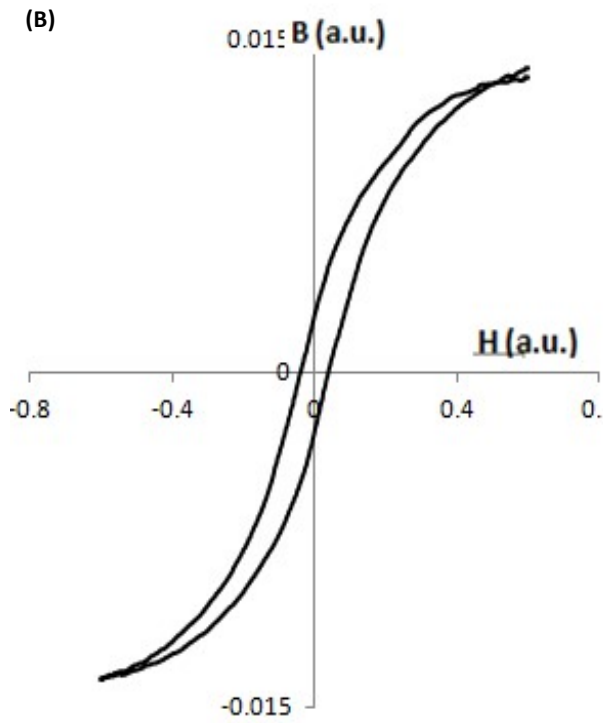
³³ F. Kováč, M.D. Džubinský, Y. Sidor: Columnar grain growth in non-oriented electrical steels, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 269, 2004, pp. 333-340

³⁴ A. Martinez-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

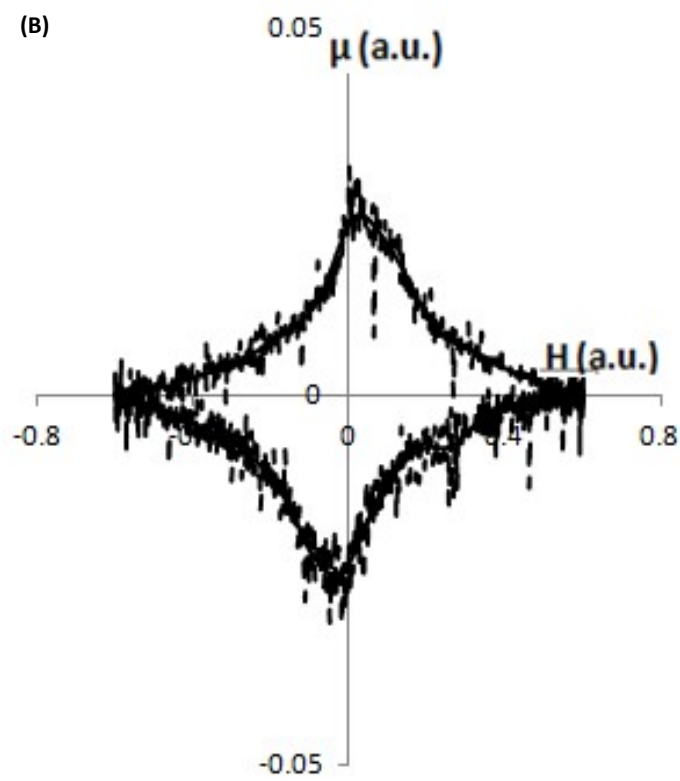
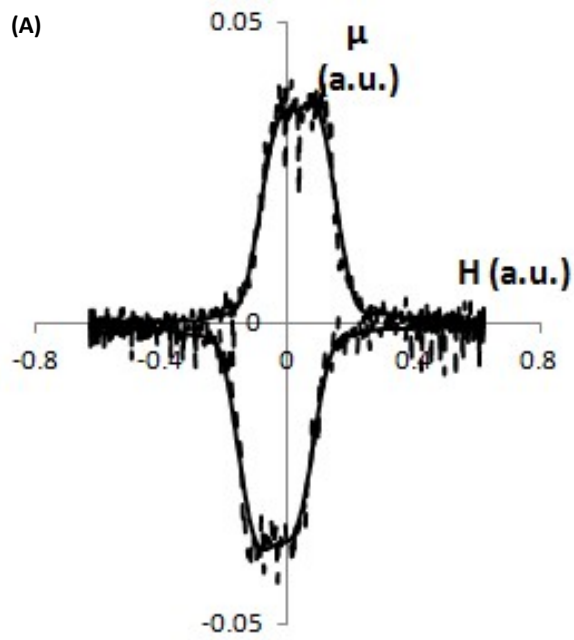
μαγνητικών διπόλων. Η δημιουργία των περιοχών αυτών και η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων συντελεί στην ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής και μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας. Η δεύτερη από αριστερά κορυφή, σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των 180° μαγνητικών τοιχωμάτων με τα σημεία αγκύρωσης (εμπόδια στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων). Η αλληλεπίδραση αυτή πραγματοποιείται εντός των κόκκων.

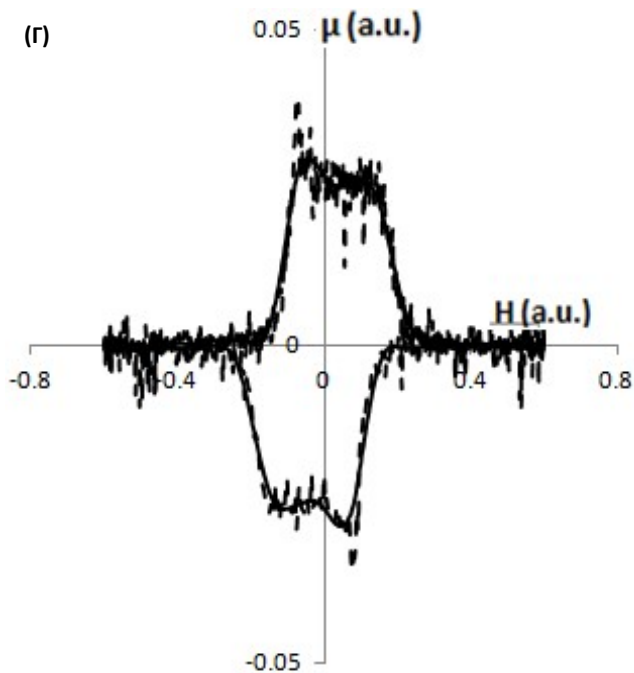
Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ο βρόχος παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές τοπικού μεγίστου. Μορφολογικά είναι πεπλατυσμένος και στα σημεία καμπής παρουσιάζεται γωνιώδης. Η μορφολογία αυτή του βρόχου οφείλεται στην αύξηση των εσωτερικών τάσεων, της πυκνότητας των διαταραχών, στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων και στο σχηματισμό φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας, συγκρίνοντας ως προς το μέταλλο βάσης.





ΕΙΚΟΝΑ 3-31: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Α) ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ (Β) ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (Γ) ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ.

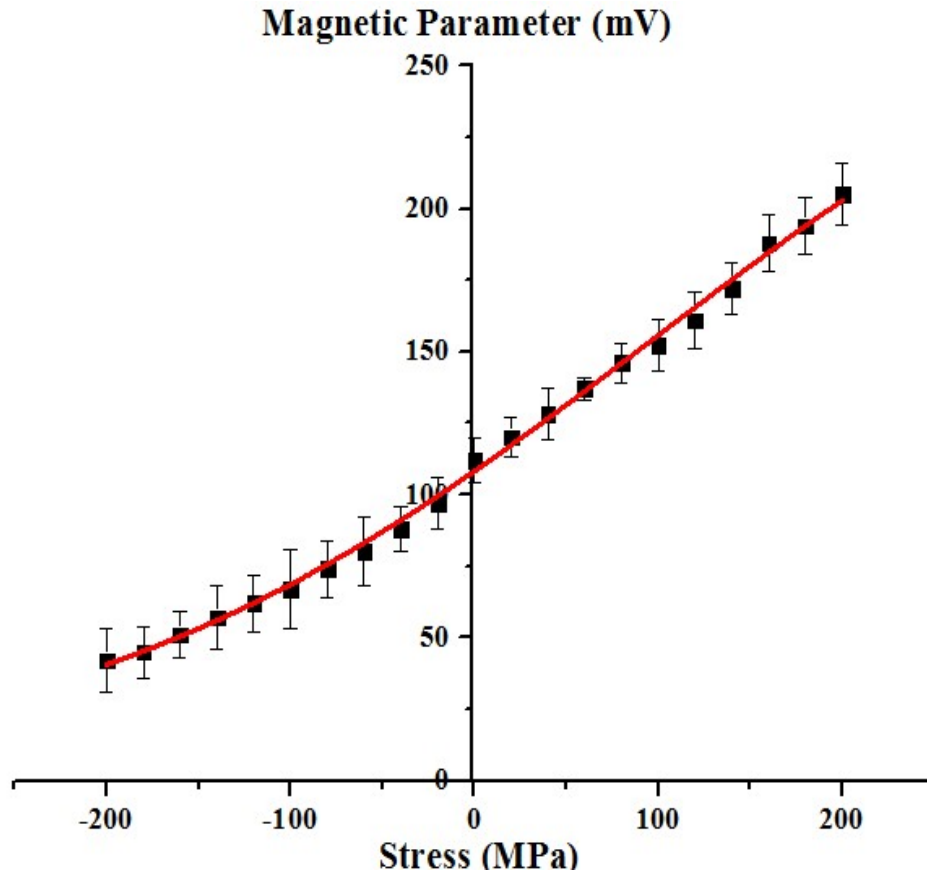




ΕΙΚΟΝΑ 3-32: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Α) ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ (Β) ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (Γ) ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ.

3.8.ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Αρχικά διαμορφώθηκαν δοκίμια εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σταδιακές δυναμικές εφελκυστικές και θλιπτικές καταπονήσεις εντός της ελαστικής περιοχής, σε προεπιλεγμένα βήματα παραμορφωσιμότητας παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης. Η απόκριση την μαγνητικής διαπερατότητας μετρήθηκε στο μήκος στένωσης του δοκιμίου (gauge length) και ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων τιμών θεωρήθηκε η μαγνητική παράμετρος που αντιστοιχεί στη μετρούμενη παραμόρφωση. Για τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) στον αριθμό δοκιμές καταπονήσεων σε κάθε προεπιλεγμένο βήμα παραμόρφωσης και ο μέσος όρος των τιμών του μαγνητικού θορύβου αντιπροσώπευε τη μαγνητική παράμετρο της παραμόρφωσης αυτής. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών δυναμικής καταπόνησης εξήχθη η καμπύλη βαθμονόμησης.



ΕΙΚΟΝΑ 3-33: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 2 (Α) ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ (Β) ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (Γ) ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΗΞΗΣ.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας παρουσιάζουν μια συνεχή μονοτονική συμπεριφορά με τις τιμές των τάσεων. Η σταθερή αυτή ποιοτική αναλογία δηλώνει ότι η αυτή η μαγνητική παράμετρος, ως ενδογενής ιδιότητα του υλικού, προσεγγίζει αξιόπιστα την κατανομή των παραμενουσών τάσεων.

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 ανακατανομηθεί, 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οπτικός έλεγχος

Ο ποιοτικός έλεγχος των συγκολλήσεων ήταν υποχρεωτικός για την αποφυγή αλλοίωσης των μετρήσεων από τις επιφανειακές και τις εσωτερικές ατέλειες των συγκολλήσεων, ειδικά στην περίπτωση των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού. Με βάση την αναφορά ελέγχων των επιθεωρητών, και τα δύο δοκίμια πληρούσαν το επίπεδο αποδοχής σφαλμάτων και ατελειών Β του κώδικα EN ISO 5817 / έκδοση του 2014.

Από τον οπτικό έλεγχο προκύπτει ότι για το δοκίμιο 1 και το δοκίμιο 2 μετρήθηκε μια ατέλεια στη γεωμετρία των μετωπικών συνδέσεων τις τάξης του 0,5mm ως προς την ευθυγραμμία σύνδεσης. Η απόκλιση αυτή είναι μικρότερη των μεγίστου ορίου των 0,6mm που ορίζει το πρότυπο, οπότε είναι αποδεκτή και για τα δύο δοκίμια.

Ως προς την παχυμέτρηση στο καπάκι και τη ρίζα συγκόλλησης:

- Το δοκίμιο 1 παρουσιάζει μέγιστο ύψος στο καπάκι συγκόλλησης 1,3mm
- Το δοκίμιο 2 παρουσιάζει μέγιστο ύψος στο καπάκι συγκόλλησης 1,1mm

Συγκρίνοντας τις τιμές των δοκιμίων, παρατηρήθηκε ότι οι διαστάσεις του μετάλλου συγκόλλησης που εξέχουν από το υπόλοιπο υλικό βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια του επιπέδου Β στο πρότυπο και προδιαγράφουν ότι το μέγιστο ύψος από το καπάκι πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του $1\text{mm} + 10\% X$ το πλάτος του μετάλλου συγκόλλησης.

Η γεωμετρία της ρίζας στο δοκίμιο 1 είναι γωνιώδης σε σύγκριση με το δοκίμιο 2, του οποίου η ρίζα ουσιαστικά αποτελεί το δεύτερο κορδόνι. Βάσει του προτύπου είναι αποδεκτές και οι δύο γεωμετρίες, όμως στο δοκίμιο 1 πιθανότατα οι απότομες αλλαγές γεωμετρίας θα αποτελέσουν σημεία συγκέντρωσης τάσεων κατά τη λειτουργία, θα εμφανίσουν πρόωρα ρωγμές και τελικά η σύνδεση θα αστοχήσει λόγω κόπωσης.

Μαγνητική μέτρηση

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των μαγνητικών μετρήσεων, και στα δύο δοκίμια (Δοκίμιο 1 και Δοκίμιο 2) παρατηρήθηκε μεταβολή του σχήματος των βρόχων υστέρησης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη τήξης ως προς το μέταλλο βάσης (MB).

Στις μετρήσεις της περιοχής της θερμικά επηρεασμένης ζώνη (ΘΕΖ), η κλίση του βρόχου υστέρησης μειώθηκε ενώ το συνεκτικό πεδίο αυξήθηκε. Παρατηρείται ωστόσο, μια «ομαλοποίηση» της καμπυλότητας του μαγνητικού βρόχου.

Όσον αφορά στη ζώνη τήξης (ΖΤ), αυξήθηκε η κλίση του βρόχου οδηγώντας στην αύξηση της τιμής της παραμένουσας μαγνήτισης, ενώ αντίστοιχα μειώθηκε το συνεκτικό πεδίο.

Συγκριτικά, τα δύο δοκίμια εμφάνισαν παρόμοια αποτελέσματα μετρήσεων άρα και συμπεριφορά στις μαγνητικές μετρήσεις, οπότε οι προκύπτουσες μετρήσεις διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας των δειγμάτων παρουσιάζουν διαφορές διαζωνικά αλλά αμελητέες διαφορές σε σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων.

Μελέτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Μέταλλο βάσης

Στο πρώτο δοκίμιο, παρατηρήθηκε ότι στην περιοχή του μετάλλου βάσης κυριαρχεί η φερριτοπερλιτική μικροδομή με αναλογία 30% περλίτη και 70% προευτηκτοειδή φερρίτη, ενώ οι κόκκοι είναι ισαξονικοί και πολυγωνικοί φερριτικοί. Από την άλλη, οι περλιτικοί κόκκοι είναι πλακοειδούς μορφολογίας. Ξεχωρίζει επίσης η ετεροτροπία στον προσανατολισμό ανάπτυξης των περλιτικών κόκκων. Ο περλίτης χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία ως προς τον προσανατολισμό και τη μορφολογική ετερογένεια, καθώς δεν παρατηρήθηκε να ακολουθεί την πολυγωνική ισαξονική δομή. Στο λεπτοκρυσταλλικό περλίτη τα πλακίδια του σεμεντίτη δε χαρακτηρίζονται από παραλληλία. Το μέσο μέγεθος κόκκου που παρατηρήθηκε μετράται στα 12μm με εύρος απόκλισης $\pm 2 \mu\text{m}$. Ο αριθμός κοκκομετρίας n είναι ίσος με 10.

Στο δεύτερο δοκίμιο, παρατηρήθηκε ότι στην περιοχή του μετάλλου βάσης επικρατεί η φερριτοπερλιτική δομή (30% περλίτης) και στην προκειμένη περίπτωση ο περλίτης έχει πλακοειδή μορφολογία. Η συνδυασμένη συμμετοχή του προευτηκτοειδή φερρίτη και του περλίτη χαρακτηρίστηκε από πυκνή επιστοιβάξη πλακιδίων. Οι προκύπτουσες συνθήκες γειννίας μεταξύ των δύο μικροδομικών φάσεων δημιουργούν ισχυρά κέντρα αγκύρωσης καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αναντιστοιχίας πλέγματος και ανισοτροπίας προσανατολισμού. Οι φερριτικοί πολυγωνικοί και ισαξονικοί κόκκοι χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια στην κατανομή του μέσου μεγέθους τους, το οποίο προσδιορίστηκε στα 14 μm με εύρος απόκλισης $\pm 7 \mu\text{m}$.

Δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές στη σύγκριση των στοιχείων παρατήρησης του μετάλλου βάσης στο δοκίμιο 1 και στο δοκίμιο 2.

Θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Στο δοκίμιο 1 παρατηρήθηκε αλλαγή της διεύθυνσης προσανατολισμού των κόκκων ως προς το μέταλλο βάσης. Σημαντική ένδειξη ήταν η απουσία εναρκτήριων σημείων ρωγμών στον προευκτοειδή φερρίτη, που ως μαλακότερος από τον περλίτη, απορροφά όλες οι μηχανικές τάσεις. Επίσης μεγάλης σημασίας είναι η εύρεση του σχηματισμένου φερρίτη Widmanstätten. Ο σχηματισμένος φερρίτης παρουσιάζει βελονοειδή μορφή πιθανώς λόγω της αύξησης των κόκκων ωστενίτη κατά την υπερθέρμανση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, όταν η ωστενιτοποίηση συμβεί σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, τότε ο προευκτοειδής φερρίτης παίρνει βελονοειδή μορφή αντί της συνήθους ισοαξονικής - πολυεδρικής. Επιπρόσθετα εντοπίστηκε σχηματισμένος κατώτερος μπαινίτης ως φάση εκτός ισορροπίας. Ο σχηματισμός μπαινίτη υποδεικνύει τη θέρμανση σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν απόψυξη σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550°C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη Ms (περίπου 250°C). Ο σχηματισμός του μπαινίτη ξεκινά με τη διάτμηση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη και την πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη στην ωστενιτική περιοχή σε καθορισμένες προτιμητέες διευθύνσεις μέσα στα οκταεδρικά επίπεδα του fcc πλέγματος. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η καθίζηση σεμεντίτη ενδοκρυσταλλικά στο φερρίτη, με παράλληλο εμπλουτισμό του ωστενίτη σε άνθρακα. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε C οδηγεί σε καθίζηση σεμεντίτη (Fe_3C) και μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη και το σχηματισμό του κατώτερου μπαινίτη.

Στο δοκίμιο ξεχωρίσαμε το σχηματισμό τριών φάσεων: πολυγωνικού φερρίτη διακυμαινόμενου μεγέθους, περλίτη και μπαινίτη. Ο σχηματισμός μπαινίτη υποδεικνύει τη θέρμανση σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν απόψυξη σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550°C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη Ms (περίπου 250°C). Ο σχηματισμός ξεκινά με τη διάτμηση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη και την πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων φερρίτη στην ωστενιτική περιοχή σε καθορισμένες προτιμητέες διευθύνσεις μέσα στα οκταεδρικά επίπεδα του fcc πλέγματος. Παράλληλα ο ωστενίτης εμπλουτίζεται σε άνθρακα. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε C οδηγεί σε καθίζηση σεμεντίτη (Fe_3C) και μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη και το σχηματισμό του ανώτερου μπαινίτη. Καθώς ο ρυθμός απόψυξης αυξάνεται, παρατηρούνται φάσεις εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας όπως είναι ο φερρίτης Widmanstätten.

Και στα δύο δοκίμια είναι εμφανής η παρουσία του προευκτοειδή φερρίτη, του φερρίτη Widmanstätten και του μπαινίτη. Η διαφορά στις θερμικές κατεργασίες που προέκυψαν από τις

διαφορετικές διαδικασίες συγκόλλησης για το κάθε δοκίμιο οδήγησαν σε διαφορετικούς ρυθμούς απόψυξης, οπότε ως αποτέλεσμα πήραμε χαμηλότερο μπαινίτη για το δοκίμιο 1 και ανώτερο μπαινίτη για το δοκίμιο 2.

Ζώνη τήξης

Στη ζώνη τήξης του πρώτου δοκιμίου ξεχώρισαν η μικτή δομή διευρυμένου κολονοειδούς μορφολογίας φερρίτη στα όρια των κόκκων, βελονειδούς φερρίτη και μικρό κλάσμα όγκου συμμετοχής μπαινίτη. Ο φερρίτης που παρατηρήθηκε χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητα του. Επίσης παρουσιάζει χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές που κλείνουν περισσότερο σε γωνιώδη συμμετρία, ενώ απουσιάζουν οι ισαξονικοί φερριτικοί κόκκοι που υπονοεί συνθήκες συμμετοχής αλλοτροπικών μορφών.

Στη ζώνη τήξης του δεύτερου δοκιμίου ξεχώρισαν τρεις φάσεις: μικτή δομή διευρυμένου κολονοειδούς μορφολογίας φερρίτη στα όρια των κόκκων, βελονειδούς φερρίτη και μικρό κλάσμα όγκου συμμετοχής μπαινίτη. Ο φερρίτης που παρατηρήθηκε χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητα του. Γενικά το δείγμα παρουσίασε στη ζώνη τήξης χαρακτηριστικές μορφολογικές δομές που κλείνουν περισσότερο σε γωνιώδη συμμετρία, ενώ απουσιάζουν οι ισαξονικοί φερριτικοί κόκκοι που υπονοεί συνθήκες συμμετοχής αλλοτροπικών μορφών.

Συγκρίνοντας τα δύο δοκίμια ως προς την εικόνα της ζώνης τήξης αυτών, δεν επισημαίνεται κάποια διαφορά ως προς τα μικροδομικά χαρακτηριστικά.

Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

Για το δοκίμιο 1 και το δοκίμιο 2 παρατηρούμε ότι το υπό εξέταση δείγμα χαρακτηρίζεται από διακυμαινόμενη ανακατανομή των χημικών στοιχείων από ενδοκρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας σε περικρυσταλλικές περιοχές (partitioning).

Μέσω της γενικευμένης χημικής μικροανάλυσης προέκυψε ότι η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn είναι 0.57 wt%, η οποία συμβαδίζει με τη χημική ανάλυση του μετάλλου βάσης από το πιστοποιητικό δοκιμών του αρχικού υλικού.

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) παρατηρήθηκε έντονη ανακατανομή των κραματικών στοιχείων στις περικρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας, ως αποτέλεσμα του ταχύτατου ρυθμού ψύξης. Λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που δίνεται στο κρυσταλλικό σύστημα της θερμικά

επιηρεασμένης ζώνης ώστε να αποψυχθεί, τα κραματικά στοιχεία δεν διαθέτουν τον απαιτούμενο χρόνο ώστε να πραγματοποιηθεί ομοιόμορφη διάχυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Στη ζώνη τήξης, όπου τα θερμικά φαινόμενα είναι εντονότατα, η κατά βάρος περιεκτικότητα του Mn αυξάνεται σημαντικά, ενώ του Si ελαχιστοποιείται. Αυτό οφείλεται επίσης στην κραματική σύνθεση του υλικού πλήρωσης το οποίο διαθέτει περίπου 1,3 έως 1,6 % Mn και στη λειτουργία του Si ως στοιχείο ευχυτότητας. Παρατηρήσαμε ότι στη ζώνη τήξης το πυρίτιο είναι ελάχιστο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ζώνες συγκόλλησης και συγκεντρώνεται σχεδόν αποκλειστικά περικρυσταλλικά.

Μικροσκληρομέτρηση

Και για τα δύο δοκίμια η μέση τιμή σκληρότητας που προέκυψε για το μέταλλο βάσης ήταν 178 HVN.

Για το δοκίμιο 1 η μέση σκληρότητα στη θερμικά επιηρεασμένη ζώνη μετρήθηκε στα 195 HVN με τυπική απόκλιση ± 7 μονάδες, ενώ στη ζώνη τήξης η μέση μικροσκληρότητα μετρήθηκε στα 328,1 HVN με τυπική απόκλιση ± 10 . Οι τιμές της σκληρότητας στη ζώνη τήξης φτάνουν σχεδόν το 185% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο μέταλλο βάσης.

Στο δοκίμιο 2 η μέση σκληρότητα στη θερμικά επιηρεασμένη ζώνη μετρήθηκε στα 181 HVN με τυπική απόκλιση ± 9 μονάδες, ενώ στη ζώνη τήξης η μέση μικροσκληρότητα μετρήθηκε στα 310,2 HVN με τυπική απόκλιση ± 7 . Οι τιμές της σκληρότητας στη ζώνη τήξης φτάνουν σχεδόν το 175% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο μέταλλο βάσης.

Το δοκίμιο 1 εμφανίζει πολύ υψηλότερες τιμές σκληρότητας από το δοκίμιο 2 στη θερμικά επιηρεασμένη ζώνη και στη ζώνη τήξης, ενώ και τα δύο δοκίμια απέκτησαν υψηλές τιμές σκληρότητας ως προς το αρχικό υλικό. Αυτό οφείλεται στον ταχύ ρυθμό απόψυξης του υλικού μετά τη συγκόλληση, που ουσιαστικά λειτούργησε ως μηχανισμός βαφής του υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης.

Μετρήσεις μονοαξονικού εφελκυσμού

Στο αρχικό δείγμα ή δείγμα αναφοράς του ναυπηγικού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, μετρήθηκαν όριο διαρροής 334 MPa, όριο θραύσης 500 MPa, ολκιμότητα 44% και μέτρο ελαστικότητας 190 GPa.

Στο πρώτο και στο δεύτερο δοκίμιο, οι μετρήσεις του ορίου διαρροής (460 MPa), της ολκιμότητας (32%) και του μέτρου ελαστικότητας (211 GPa) ταυτίζονται, ενώ η τιμή του ορίου θραύσης μεταξύ

των δύο δοκιμών διαφέρει ελάχιστα. Τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης του κάθε δοκιμίου ακολουθούν σχεδόν πανομοιότυπες με δύο μικρές διαφορές. Πρώτον, το δοκίμιο 2 φτάνει νωρίτερα από το δοκίμιο 1 στην τιμή της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής ως προς την επιμήκυνση. Δεύτερον, το δοκίμιο 2 φαίνεται να έχει χαμηλότερη αντοχή ως προς τη δυσθραυστότητα σε σύγκριση με το δοκίμιο 1, συσχετίζοντας τις περιοχές (εμβαδόν) που διαγράφονται κάτω από τις καμπύλες του κάθε δοκιμίου. Η καμπύλη του δοκιμίου 1 εμπεριέχει μεγαλύτερη επιφάνεια από την καμπύλη του δοκιμίου 2, οπότε το δοκίμιο ήταν πιθανότατα πιο δύσθραυστο από το δοκίμιο 2. Για την ακριβή μέτρηση και αξιολόγηση της δυσθραυστότητας θα πρέπει να πραγματοποιηθεί δοκιμή κρούσης. Και τα δύο συγκολλημένα δοκίμια παρουσίασαν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες αλλά αντίθετα μειωμένη ολκιμότητα ως προς αρχικό υλικό. Η μείωση της ολκιμότητας δεν είναι επιθημητή, παρόλα αυτά υπερκαλύπτει το ελάχιστο επιτρεπτό όριο ολκιμότητας 25% που προδιαγράφεται από τα διεθνή πρότυπα κατασκευής των μηχανημάτων που αξιοποιούν ως υλικό το ναυπηγικό χάλυβα Grade A.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Και τα δύο δοκίμια, που συγκολλήθηκαν με βάση τις δεδομένες διαδικασίες συγκόλλησης, παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες στις μαγνητικές μετρήσεις και τη δοκιμή εφελκυσμού, ωστόσο η κύρια διαφορά παρατηρείται στα αποτελέσματα της διαζωνικής απόκρισης μαγνητικής διαπερατότητας, της μικροσκοπικής μετρήσης και στην παρατήρηση της μικροδομής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Το μέταλλο βάσης παρουσίαζε υψηλές μαγνητικές τιμές διαπερατότητας. Εφόσον το μέταλλο βάσης αποτελεί τη θερμικά ανεπηρέαστη ζώνη της συγκόλλησης, δεν αναμενόταν καμία αλλαγή στη μικροδομή και στη μορφολογία των κόκκων. Η προηγούμενη υπόθεση επιβεβαιώνεται με τη μεταλλογραφική παρατήρηση του συγκολλημένου δείγματος, κυρίως μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Το μέταλλο βάσης χαρακτηρίζεται από ισαξονικούς φερριτικούς και περλιτικούς κόκκους. Ο περλίτης ως μικροδομικό συστατικό αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη. Σε αντίθεση με το φερρίτη που παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά, ο σεμεντίτης, ως καρβίδιο αποτελεί ισχυρό σημείο αγκύρωσης για τα μαγνητικά δίπολα κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης, που συμβάλλει στις υψηλές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας στη ζώνη αυτή.^{[35][36][37]}

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη χαρακτηρίζεται από ισχυρή διαβάθμιση συγκέντρωσης χημικών στοιχείων (partitioning). Θα αναμένονταν η παρουσία υψηλότερων τιμών μαγνητικής διαπερατότητας από το βασικό μέταλλο, εξαιτίας της απουσίας περλίτη, συγκριτικά με το αρχικό υλικό. Εν αντιθέσει, η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη τιμή. Μέσω του μεταλλογραφικού χαρακτηρισμού στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, παρατηρούμε της παρουσία μπαινίτη. Ο μπαινίτης μειώνει σημαντικά το ενεργειακό φράγμα που απαιτείται να υπερβούν τα μαγνητικά δίπολα για να προσανατολιστούν στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο, ελαχιστοποιώντας έτσι τη μαγνητική απόκριση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Τέλος, η ζώνη τήξης παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας καθώς χαρακτηρίζεται από βελονοειδείς ομάδες φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας, μη-ομότροπα προσανατολισμένων. Η σταυροειδής αυτή μορφολογία, με τις γωνιώδεις μη ισαξονικές απολήξεις συντελεί, στην ιδιαιτέρως χαμηλές τιμές της μαγνητικής απόκρισης.

³⁵ SERWAY, "Physics For Scientists & Engineers", Saunders College Publishing (Ελληνική έκδοση 1990). § 30-9

³⁶ 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

³⁷ YOUNG H., "University Physics", Addison-Wesley (Εκδόσεις Παπαζήση 1990). § 28-8

Η δοκιμή μικροσκληρομέτρησης και των δύο δοκιμών είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας του συγκολλημένου δείγματος στην περιοχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης τήξης. Το πρώτο δοκίμιο, έχοντας στη σύνθεσή του κατώτερο μπαινίτη, παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη σε σύγκριση με το δεύτερο δοκίμιο, το οποίο εμφάνισε ανώτερο μπαινίτη στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η ζώνη τήξης του δοκίμιου 1 είχε μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας από αυτή του 2, γεγονός που οφείλεται στον ταχύτερο ρυθμό απόψυξης στην πρώτη περίπτωση, που οδήγησε στη συγκέντρωση περισσότερων παραμενουσών τάσεων.

Συγκεκριμένα, το τηκόμενο υλικό στη ζώνη τήξης, λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας, τείνει να διασταλεί. Καθώς ψύχεται, η συνεπακόλουθη συστολή του παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων της θερμαινόμενης ζώνης εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση (στα επίπεδα του ορίου διαρροής), η οποία οδηγεί τελικά στην εμφάνιση της παραμένουσας τάσης. Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι αποτέλεσμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο συγκολλημένο υλικό λόγω της διαμήκουσ συστολής. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών τιμών της εφελκυστικής τάσης στην περιοχή γύρω από τη ραφή της συγκόλλησης, που σταδιακά μειώνονται, για να γίνουν θλιπτικές σε απόσταση από την γραμμή συγκόλλησης ίση προς μερικές φορές το πλάτος του μετάλλου κόλλησης. Συνεπώς, οι εφελκυστικές τάσεις στη ζώνη τήξης αντισταθμίζονται από τις θλιπτικές τάσεις που παρουσιάζονται στο βασικό μέταλλο. Οι γεινιάζουσες, στη ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένες ζώνες, αποτελούν τις περιοχές ομαλής μετάβασης.

Οι παραμένουσες τάσεις, όντας εφελκυστικές, είναι ανεπιθύμητες σε κατασκευές που φέρουν δυναμικές καταπονήσεις και κυκλική φόρτιση σε εφελκυστικά αλλά και θλιπτικά φορτία, καθώς δρουν προσθετικά στις τάσεις που φέρει η κατασκευή κατά τη λειτουργία της. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος είναι η αύξηση της εισερχόμενης θερμότητας κατά τη συγκόλληση ή η πραγματοποίηση αποτατικής ανόπτησης μετά τη συγκόλληση ώστε να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν οι παραμένουσες τάσεις.

Κυριότερο συμπέρασμα όλων, ως προς το συσχετισμό των κύριων βρόγχων υστέρησης με τις υπόλοιπες μετρήσεις και παρατηρήσεις, είναι ότι οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μέσω του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου στις μικροδομές των δύο δοκιμών σε ΘΕΖ και ΖΤ δεν αποτυπώθηκαν στις μαγνητικές μετρήσεις.

Η γεωμετρία της συγκόλλησης στο δοκίμιο 1 είχε γωνιώδη μορφή που οφείλεται σε ανεπαρκή ή ακατάλληλη προετοιμασία της χάλκινης υποστήριξης (copper backing). Οι γωνίες στη ρίζα της συγκόλλησης θα αποτελούσαν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και μακροπρόθεσμα αιτία έναρξης ρωγμών κόπωσης κατά τη λειτουργία. Το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί με τη χρήση τροχού λείανσης για την εξομάλυνση των γωνιών ή την προληπτική κατεργασία της μπάρας χαλκού ώστε να δημιουργηθεί κατάλληλη εγκοπή (λούκι) που να δίνει κατάλληλη κοίλη (convex) μορφή στη ρίζα της συγκόλλησης.

Κρίνοντας από το χρόνο και τη διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων, για το δοκίμιο 1 χρειάστηκε περίπου ο μισός χρόνος (25 λεπτά) από την προετοιμασία της σύνδεσης μέχρι τη συγκόλληση, ενώ αντίστοιχα για το δοκίμιο 2 χρειάστηκαν περίπου 50 λεπτά. Οικονομοτεχνικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος παραγωγής των συγκολλητών συνδέσεων για την τελική επιλογή της καταλληλότερης διαδικασίας συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιέχουν πολύτιμες πληροφορίες προς αξιοποίηση στο σχεδιασμό και τη γραμμή παραγωγής της ενδιαφερόμενης Εταιρείας, η οποία παρείχε το υλικό και τα μέσα για την επιτυχή ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας. Μέσω των συγκρίσεων των αποτελεσμάτων και του τελικού συμπεράσματος που προκύπτει, είναι πλέον εφικτή η επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας συγκόλλησης σε συνάρτηση με το αντίστοιχο κόστος παραγωγής. Ωστόσο, για την περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων θα πρότεινα σε μελλοντική μεταπτυχιακή εργασία μου την μελέτη της συμπεριφοράς των δοκιμίων στη θραύση.

Αρχικά, αναγκαία κρίνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας στο συγκολλημένο υλικό, με σκοπό τη συσχέτιση της διακύμανσης των τιμών της μαγνητικής απόκρισης με της παρουσία των παραμενουσών τάσεων σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης και τις μεταβολές τόσο σε επίπεδο μικροδομής όσο και σε επίπεδο μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων.

Κρίνεται χρήσιμη η εξέταση του δείγματος μετά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων (κόπωσης) και ερπυσμού καθώς αποτελέσματα μπορούν να συσχετίσουν άμεσα με αυτά του εφελκυσμού και των μαγνητικών αποκρίσεων των μαγνητικών μετρήσεων.

Ενδιαφέρον επίσης προκαλεί η δοκιμή δυσθραυστότητας (charpy tests) καθώς αποτελούν χρήσιμο υλικό ως προς τη συγκριτική μελέτη με την αντοχή του συγκολλημένου υλικού και της μαγνητική απόκρισης αυτού.

Με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων δύναται να προσδιοριστούν οι παραμένουσες τάσεις στο συγκολλημένο υλικό και να προκύψουν συγκριτικά αποτελέσματα με τις υπάρχουσες μετρήσεις.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν ακόμη να πραγματοποιηθούν και άλλες συγκολλήσεις π.χ. αυτογενείς συγκολλήσεις τήξης ή υψηλής ενέργειας και εφαρμογή των αντίστοιχων μαγνητικών τεχνικών και μεθόδων περίθλασης με στόχο τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων σε συνδυασμό με τη μεταλλογραφική ανάλυση των αναπτυσσόμενων δομών και τη μηχανική απόκριση των ιδιοτήτων των συγκολλημένων υλικών.

Τέλος, δύναται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της αναπτυσσόμενης μικροδομής εντός της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, μέσω γεωμετρικών μοντέλων σε συνδυασμό με αριθμητικά, θερμομηχανικά και μεταλλουργικά μοντέλα (τα οποία διερευνώνται από τη διεθνή

επιστημονική κοινότητα), με στόχο τον πλήρη δομικό χαρακτηρισμό των ζωνών της συγκόλλησης, ώστε να είναι δυνατό να προσδιοριστεί η καμπύλη βαθμονόμησης της μαγνητικής τεχνικής του θορύβου Barkhausen που αφορά τις παραπάνω ζώνες. Με τον τρόπο αυτό θα είναι εφικτός ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε λιγότερο χρόνο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ε. Χριστοφόρου (2000): «Ηλεκτροτεχνία και ηλεκτρονική τεχνολογία», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
2. Ε. Χριστοφόρου (2001): Διδακτικές σημειώσεις στο μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
3. Πηγή εικόνας 1-3 : Website, <http://www.karldeutsch.de/>
4. Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1990): «Εισαγωγή στη Μεταλλουργία, την Τεχνολογία και τον Έλεγχο των Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
5. Σ. Σκολιανός (1991): «Σημειώσεις Χύτευση-Συγκολλήσεις», έκδοση Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
6. Θ.Α. Διαμαντούδης (2000): «Συγκολλήσεις μετάλλων», Θεσσαλονίκη
7. Β.Ι. Παπάζογλου (1989): «Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
8. Γ. Παρίκος (μετάφραση, 2008): «Τεχνολογία Συγκολλήσεων», εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
9. Cynthia L. Jenney, Annette O'Brien, AWS (2001): "Welding Handbook, Volume 1", American Welding Society editions, Miami
10. Annette O'Brien, AWS (2004): "Welding Handbook - 9th Edition, Volume 2", American Welding Society editions, Miami
11. ASM Handbook (1993), Vol. 6 "Welding Brazing and Soldering", ASM International
12. Πηγή εικόνας 1-13 / 1-14 : Website, <http://www.twi-global.com/>
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš : Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels, NDT & E International, vol. 54, 2013, pp. 107-114.

20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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
26. Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1993): «Γενική Μεταλλογνωσία II», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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
33. 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.
34. A. Martinez-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.
35. SERWAY, "Physics For Scientists & Engineers", Saunders College Publishing (Ελληνική έκδοση 1990). § 30-9

36. 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
37. YOUNG H., "University Physics", Addison-Wesley (Εκδόσεις Παπαζήση 1990). § 28-8
38. Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1989): «Γενική Μεταλλογνωσία Ι», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – Ορισμοί περιοχών σε διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης ^[38]

Όριο αναλογίας: Είναι η οριακή τάση, πάνω από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ανάλογη προς την αντίστοιχη τάση. Στην περιοχή αναλογίας ισχύει ο νόμος του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$).

Μέτρο ελαστικότητας: Χαρακτηριστική σταθερά υλικού. Υπολογίζεται ως ο λόγος τάση / παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.

Λόγος Poisson: είναι ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης προς την αξονική στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος σ - ϵ όταν το υλικό υποβάλλεται σε απλή μονοαξονική φόρτιση.

Όριο διαρροής: Είναι η τάση για την οποία έχουμε σημαντική παραμόρφωση χωρίς μεγαλύτερη αύξηση της τάσης.

Μέγιστη εφελκυστική αντοχή (όριο θραύσης): Είναι η μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης.

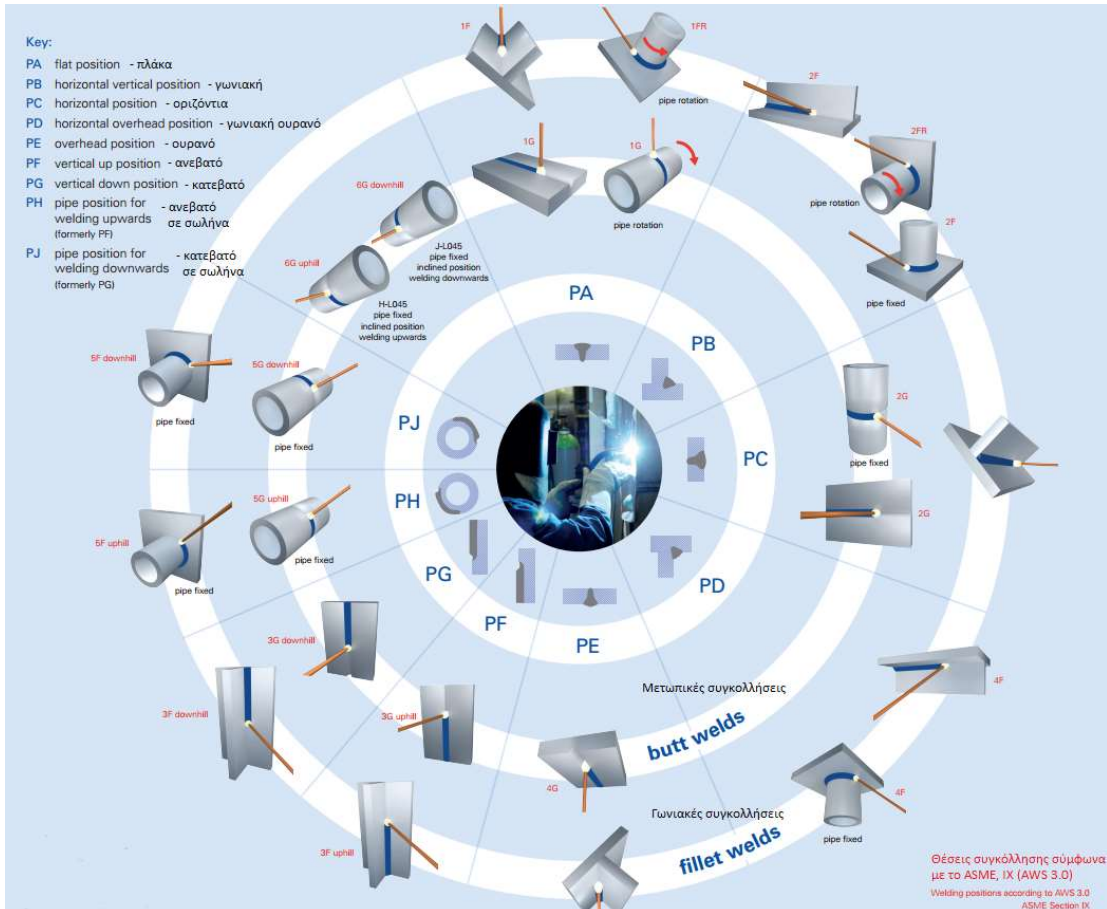
Ολκιμότητα: Είναι η ικανότητα ενός μετάλλου να παραμορφώνεται πλαστικά, ανεξάρτητα από το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάστηκαν για να προκληθεί η μόνιμη αυτή παραμόρφωση. Στη δοκιμή εφελκυσμού η ολκιμότητα μετριέται σε δύο μεγέθη:

- 1) Την παραμένουσα επιμήκυνση μετά τη θραύση, εκφρασμένη σαν ποσοστό του αρχικού μήκους.
- 2) Τη μείωση της διατομής του δοκιμίου στο σημείο που έσπασε, εκφρασμένη σαν ποσοστό της αρχικής διατομής

³⁸ 9. Γ.Δ. Παπαδημητρίου (1989): «Γενική Μεταλλογνωσία Ι», εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – Θέσεις συγκόλλησης βάσει προτύπων

Οι θέσεις συγκόλλησης κωδικοποιούνται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Οι κυριότεροι κώδικες που εφαρμόζονται όσον αφορά την κωδικοποίηση των θέσεων συγκόλλησης είναι το EN ISO 6947/2011 και το Αμερικανικό πρότυπο ASME Section IX. Στην εικόνα ΙΙ.1 φαίνονται αναλυτικά οι θέσεις βάσει των προαναφερθέντων προτύπων.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III - Πιστοποιητικό υλικού 3.1 ναυπηγικού χάλυβα

УКРАИНА
UKRAINE



П.А.О. "АЛЧЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ"
PJSC "ALCHEVSK IRON & STEEL WORKS"

94202 г. Алчевск, ул. Шмидта, 4
тел.: (06442) 7-34-25, 7-33-20, 7-33-82
факс: (06442) 7-33-76

94202, Ukraine, Alchevsk, Schmidt str. 4,
Tel: (06442) 7-34-25, 7-33-20, 7-33-82
Fax: (06442) 7-33-76

ЗАВОДСКОЙ СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА №
MILL'S QUALITY CERTIFICATE №

24861

Дата 18.04.2014 Страница 1 из 2 страниц
Date Sheet 1 of 2 sheets

Свидетельство о приемочных испытаниях
Inspection certificate

EN 10204/3.2

Контракт № 2000-207/1пст-026/0109-0у-997

Заводской заказ №

317B

Customer: Corporation "Industrial Union of Donbass"
Заказчик: Корпорация "Індустріальна Спілка Донбасу"

LOT: 1

Вагон № 57023765 Количество листов 77 Количество пачек 15 Количество мест 15
RW-car № No of plate No of pack No of packages

Наименование товара: Горячекатаный стальной лист с обрезными кромками						Стандарт:		
Description of goods: Hot rolled steel plates with sheared edges						Правила ДНВ Часть 2, Гл.2, Разд.1		
Марка стали NVA						Standard:		
Grade of steel						DNV Rules Pt.2, Ch.2, Sec. 1		
Состояние поставки: горячекатаный						EN 10029-2010 B.N		
Delivery condition: as-rolled						EN 10163-2004 part 2, class B, subclass 3		
№ позиц Item	Номера плавков Cast №	Номера партий Test №	Размеры, мм Dimensions, mm			Количество товара шт/мест Quantity/pcs	Количество пачек шт/мест Quantity/pcs	Теоретический вес, тн Theoretical weight, tn.
			Толщина Thickness	Ширина Width	Длина Length			
5	14K12140	319	8	2000	8000	7	2	7,035
2	14K12140	322	6	2000	8000	60	10	45,240
7	14K22118	311	10	2000	8000	10	3	12,560
Total:						77	15	64,835

ЗАВОДСКОЙ СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА № 24861

Дата 18.04.2014

Страница 2 из 2 страниц

MILL'S QUALITY CERTIFICATE №

Date

Sheet 2 of 2 sheets

Выплавка : конвертерный способ производства

Способ разлива: непрерывнолитые слэбы

Steelmaking process : basic oxygen steel making

Casting method: continuous cast slabs

Номер плавки Cast №	Химический состав, % Chemical composition, %															
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N	V	Mo	Ti	As	Nb	Seq
	X 100		X 1000			X 100			X 1000						X 100	
14K12140	15	64	21	8	7	2.6	0.8	0.8	30	5.1	1.4	2.2	1.9	2	1.2	26
14K22118	14	68	21	11	10	3.1	1.2	1.6	29	5.5	1.5	2.1	1.6	2	0.8	25

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ TEST RESULTS

№ партии Test №	Испытание на растяжение и ударный изгиб Tensile and impact test							Экземпляр Values			
	Размеры образца Dimensions of specimen		Отбор образца Specimen	Температура испытаний Test temperature C°	Предел текучести Yield point ReH MPa	Предел прочности Tensile strength point Rm MPa	Относительное удлинение Elongation A Lo=200 %	Энергия удара KV Impact Energy Относительное сужение Reduction Area			
	Толщина, мм Thickness, mm	Ширина, мм Width, mm	Направление Direction					1=J 2=(%)			
								1	2	3	Сред./Ave
319	8	25	T	+20	292	459	27.5				
322	8	25	T	+20	308	465	27.5				
311	10	25	T	+20	282	431	27.5				

Маркировка: сделано в Украине, марка стали, размеры, № плавки, № партии, Greece, 74631, тов. знак комбината

Marking: made in Ukraine, grade of steel, dimensions, cast №, test №, Greece, 74631, mark of the works

Клеймовка: № плавки, № партии, марка стали, тов. знак комбината, XCV, K клеймо

Hard stamp: cast №, test №, grade of steel, mark of the works, XCV, K stamp

Цветная маркировка: одна красная полоса по торцам листа

Color marking: one red strip on transversal edges of the plate

This is to certify that the material described above has been made by an approved process and has been satisfactorily tested in accordance with DNV Rules for Classification.

This certificate is issued in accordance with the survey arrangement authorised by DNV in MSA No.R-1731, which is controlled by regular auditing.

07.05.2014
V. HRECHKA
SURVEYOR TO DNV



Подпись
Signature

