

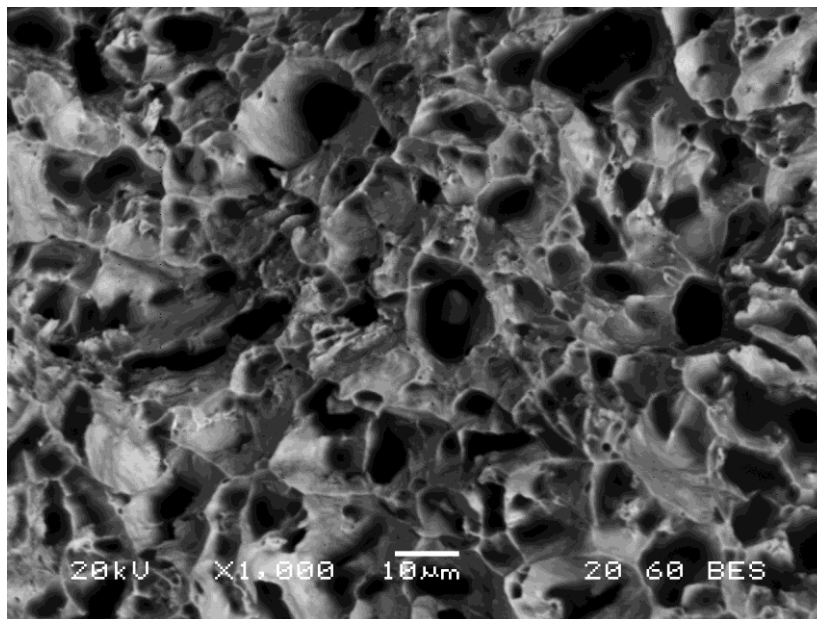


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΡΕΜΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Γ. ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΡΕΜΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Γ. ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Γ.Φούρλαρης

Η.Χαλικιά

Σπ.Παπαευθυμίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Καθηγήτρια ΕΜΠ

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



Περίληψη.....	1
Abstract	2
1 Θεωρητικό Μέρος	3
1.1 Γενικές πληροφορίες για τον χάλυβα.....	3
1.2 Οι ναυπηγικοί χάλυβες	3
1.2.1 Μετασχηματισμοί και Μικροδομή Ναυπηγικών Χαλύβων	5
1.2.2 Μέθοδοι Παρασκευής Ναυπηγικών Χαλύβων.....	11
1.2.3 Ποιοτική Κατάταξη Ναυπηγικών Χαλύβων	12
1.3 Η επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων	16
1.3.1 Η συγκόλληση GTAW-TIG	16
1.4 Αστοχίες κατά τη συγκόλληση.....	18
1.4.1 Πορώδες	20
1.4.2 Εγκλείσματα.....	21
1.4.3 Ανεπαρκής Διείσδυση της Κόλλησης	22
1.4.4 Ατελής Τήξη.....	23
1.4.5 Χτυπήματα του Τόξου.....	25
1.4.6 Υπερπληρώσεις	25
1.4.7 Υποκοπές.....	26
1.4.8 Ρωγμές του Κρατήρα.....	27
1.4.9 Υποπληρώσεις.....	28
1.4.10 Ελασματοποιήσεις.....	28
1.4.11 Αποφλοιώσεις (Delaminations).....	29
1.4.12 Lamellar Tears.....	30
1.4.13 Ρωγματώσεις	32
1.4.14 Η Παρουσία Υδρογόνου.....	35
1.4.15 Η Σύνθεση του Χάλυβα.....	36



1.4.16	Οι Τάσεις Συγκόλλησης	36
1.4.17	Ελασματική Ρωγμάτωση	37
1.4.18	Άλλα Είδη Ρωγματώσεων	38
1.5	Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι.....	39
1.5.1	Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Διεσδυτικά Υγρά.....	40
1.5.2	Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Υπερήχους.....	40
1.5.3	Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια.....	41
1.6	Μηχανικές Ιδιότητες.....	43
1.6.1	Διαδικασία Εφελκυσμού	43
1.6.2	Σκληρομέτρηση.....	47
2	Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	52
3	Πειραματική Διαδικασία	53
3.1	Υλικό	53
3.2	Προετοιμασία του υλικού για το μικροσκόπιο.....	54
3.2.1	Κοπή.....	54
3.2.2	Εγκιβωτισμός.....	55
3.2.3	Λείανση-Στίλβωση	56
3.2.4	Χημική Προσβολή.....	58
3.3	Μηχανική Προετοιμασία.....	60
4	Πειραματικό Μέρος.....	64
4.1	Μεταλλογραφία.....	64
4.2	Σκληρομετρήσεις.....	70
4.3	Μηχανικές Αντοχές.....	73
4.4	Μεταλλογραφία στις Θραύσεις.....	79
5	Συμπεράσματα.....	85
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	86



Παράρτημα 1 (Εικόνες).....	88
Παράρτημα 2 (Διαγράμματα).....	90
Παράρτημα 3 (Πίνακες)	91
Παράρτημα 4 (Σχήματα)	92
Παράρτημα 5 (Inspection Certificate).....	93
Παράρτημα 6 (Fabrication Work Order).....	95
Παράρτημα 7 (Fabrication Status Report).....	96
Παράρτημα 8 (Welding Procedure Specification)	97
Παράρτημα 9 (Work Instruction Sheet)	98
Παράρτημα 10 (AWS Class).....	100



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ.Γεώργιο Φούρλαρη, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ο οποίος δέχτηκε να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ για τον χρόνο που διέθεσε, για τις υποδείξεις και την καθοριστική συμβολή του σε κάθε ζήτημα που προέκυψε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η επιστημονική του καθοδήγηση και συνεργασία είναι οι δύο πιο σημαντικοί παράγοντες που συνέβαλαν στην ποιότητα και τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε στενή συνεργασία με τον Δρ.Μηχανικό Σκαρβέλη Παναγιώτη τον οποίο και ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθειά του, την οποία μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ για το χρόνο του και για τις συμβουλές του.



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη μελέτη και τη σύγκριση των ναυπηγικών χαλύβων A40 και AH36 με τη μέθοδο ηλεκτρικού τόξου TIG, μεταξύ των και μεταξύ αυτών και της πρακτικής τους εφαρμογής (συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο). Οι χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στάλθηκαν από το Ιαπωνικό ναυπηγείο Japan Marine United και η συγκολλήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν καθώς και οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι που εφαρμόστηκαν σε αυτές έγιναν στην APELLA S.A. Για την επίτευξη φυσικά του παραπάνω σκοπού, δημιουργήθηκε και ακολουθήθηκε αλληλουχία διεργασιών σύμφωνα με το AWS και τις προδιαγραφές του Ιαπωνικού νηογνώμονα NK, με βάση τα οποία οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την κλάση I.

Στόχος της μελέτης ήταν οι μηχανικές δοκιμές με την ελάχιστη τιμή συμμορφώσης το 80 % του UTS. Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας το προσδόκιμο αυτό ξεπεράστηκε καθώς επιτεύχθηκε το 100 % του UTS γεγονός που επιβεβαιώθηκε με τους μη καταστρεπτικούς ελέγχους που έγιναν στις συγκολλήσεις μας.

Διαπιστώθηκε, συμπερασματικά ότι η συγκόλληση ναυπηγικών χαλύβων A40 και AH36 με τη μέθοδο TIG είναι αποδεκτή και εναλλακτική της συγκόλλησης βυθιζομένου τόξου για τα ίδια υλικά.



Abstract

This thesis examines the study and comparison of shipbuilding steels A40 and AH36 with electric arc TIG method, among and between these and their practice implementation (submerged arc welding). The steels which were used were sent by the Japanese shipyard Japan United Marine and the welds as well as the non-destructive tests have been applied to in APELLA S.A. To achieve the above objective, a sequence of processes was created and followed in accordance with the AWS and the specifications of the Japanese classification society NK, which welds made under class I.

The aim of this study was the mechanical tests with minimal compression value the 80% of UTS. Finishing our study this expectancy was surpassed as the achievement as the 100% of UTS which confirmed with the non-destructive tests which were carried out in our welds.

In conclusion, it was noticed that the welding of the shipbuilding steels A40 and AH36 with electric arc TIG method is acceptable and alternative of the submerged arc welding for the same materials.

1 Θεωρητικό Μέρος

1.1 Γενικές πληροφορίες για τον χάλυβα

Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο και πιο διαδεδομένο υλικό των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στον χάλυβα επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων. Ο χάλυβας είναι ίσως το πιο σύνθετο μεταλλικό κράμα. Η ευρεία εμπειρική γνώση που έχει συσσωρευτεί, από το 2.000π.Χ που χρησιμοποιείται, δεν έχει οδηγήσει στην πλήρη κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του. Μόνο πρόσφατα, κατά τον 20^ο αιώνα, υπήρξε πρόοδος σε μια πιο επιστημονική προσέγγιση και ουσιαστική κατανόηση των χαλύβων, γεγονός που αποδεικνύεται με την ανάπτυξη νέων χαλύβων, όπως για παράδειγμα ανοξείδωτοι και πυρίμαχοι χάλυβες, οι οποίοι ανταποκρίνονται σε ειδικές απαιτήσεις.

1.2 Οι ναυπηγικοί χάλυβες

Οι κοινοί χάλυβες ή χάλυβες συνήθους αντοχής (Mild Steels) αποτελούν την πιο διαδεδομένη ομάδα ναυπηγικών χαλύβων, με ιδιότητες που εξαρτώνται κυρίως από τη χημική τους σύσταση και τη μικροδομή τους (συνήθως φερριτοπερλιτική) με όριο διαρροής τα 350MPa. Εκτός από άνθρακα, που περιέχεται σε ποσοστό κατά βάρος μέχρι και 0,23% οι χάλυβες αυτοί περιέχουν σε διάφορα ποσοστά μαγγάνιο, πυρίτιο, ενώ διάφορα άλλα στοιχεία μπορεί να συνυπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες. Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η καλή έως εξαιρετική συγκολλητότητά τους.

Σε ευρεία χρήση συναντώνται και οι χάλυβες υψηλής αντοχής (High Strength Steels), με όριο διαρροής που μπορεί να φτάσει τα 450MPa. Χρήση των χαλύβων αυτών οδηγεί σε δυνατότητα μείωσης των παχών των στοιχείων αντοχής, άρα και του βάρους μιας ναυπηγικής κατασκευής λόγω των υψηλότερων τιμών των



επιτρεπόμενων τάσεων. Η βασική διαφορά τους ,από τους συνήθεις χάλυβες έγκειται στην προσθήκη ειδικών στοιχείων όπως αλουμίνιο, νίβιο και βανάδιο, τα οποία βελτιώνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες καθώς καλύπτουν την απαίτηση ενός λεπτόκοκκου χάλυβα.

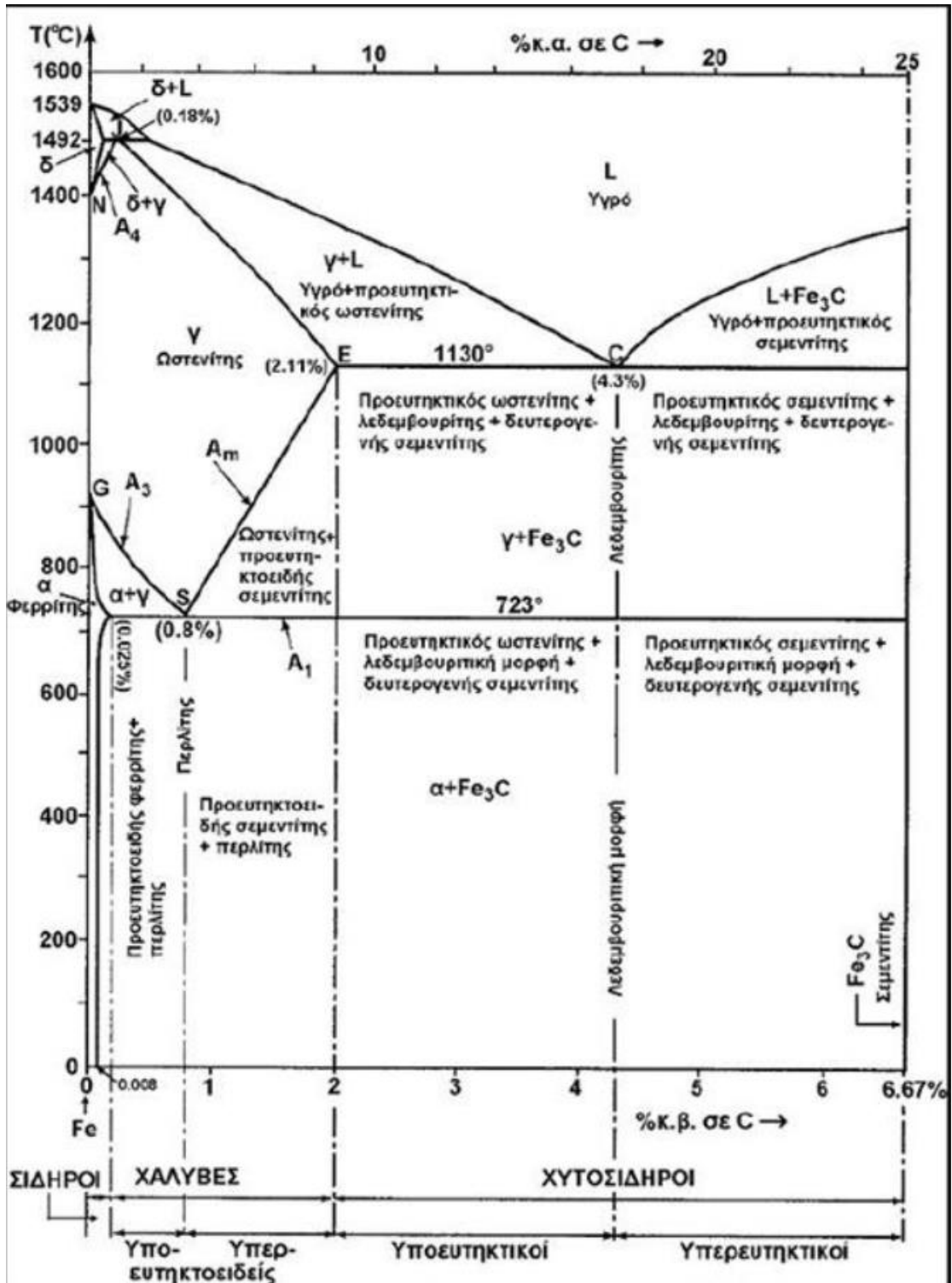
Σε ειδικές κατασκευές είναι δυνατή η χρήση μικροκραματοποιημένων χαλύβων υψηλής αντοχής (High Strength Low Alloy Steels) με όρια διαρροής από 415MPa μέχρι και 690MPa. Για την επίτευξη των υψηλών αυτών αντοχών ,οι χάλυβες αυτοί εμπεριέχουν ιδιαίτερα μικρο-συστατικά (χρώμιο,νικέλιο κ.λ.π) και υφίστανται ειδικές θερμικές κατεργασίες (συνήθως βαφή και επαναφορά) με σκοπό τη δημιουργία εξιζητημένων μικρογραφικών συστατικών που οδηγούν σε πολύ καλύτερη συγκολλητότητα. Οι λόγοι για του οποίους πραγματοποιούνται οι θερμικές κατεργασίες είναι :

- Για ελαχιστοποίηση των παραμενουσών τάσεων, που προέρχονται από άλλες θερμικές ή μηχανικές κατεργασίες.
- Για ομογενοποίηση, ώστε να πετύχουμε ομοιομορφία στην κατανομή των κραματικών στοιχείων στη μικροδομή και ομοιόμορφη γεωμετρία.
- Για να αυξηθεί η ολκιμότητα του υλικού και να αποκτήσει πλαστικότητα για περαιτέρω μηχανική κατεργασία διαμορφώσεως.
- Για αύξηση της δυσθραυστότητας ώστε να μπορεί το υλικό να αντέχει σε κρουστικές φορτίσεις λόγω μειωμένου μεγέθους κόκκου.
- Για αύξηση της σκληρότητας και του ορίου διαρροής.
- Για τροποποίηση της επιφάνειας με ή χωρίς προσθήκη κραματικών στοιχείων ώστε να βελτιωθεί η αντοχή στη φθορά, στην κόπωση και την διάβρωση.



1.2.1 Μετασχηματισμοί και Μικροδομή Ναυπηγικών Χαλύβων

Ο σίδηρος, ως μέταλλο, κατέχει ιδιαίτερη αναγνώριση και χρήση στον τομέα της βιομηχανίας. Πιο συγκεκριμένα, ο συνδυασμός του σιδήρου, ως στοιχείο κραμάτωσης, τον άνθρακα αποδίδουν κράματα τα οποία κατά 90% χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές παραγωγές, ενώ το υπόλοιπο 10% αφορά μαλακούς, ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, ανοξειδωτους χάλυβες και ισχυρά κραματωμένους χάλυβες. Εστιάζοντας στη μικροδομή του σιδήρου σε συνδυασμό με τον άνθρακα, προκύπτει το διμερές διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-C ή μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C, το οποίο περιλαμβάνει διφασικές και τριφασικές ισορροπίες. Το διάγραμμα αυτό δεν αποτελεί πραγματικό διάγραμμα ισορροπίας διότι το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης) δεν αποτελεί φάση ισορροπίας. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 1 ορίζονται τρεις περιοχές ως προς την περιεκτικότητα του άνθρακα. Δηλαδή ορίζεται η περιοχή καθαρού σιδήρου, η περιοχή των χαλύβων και η περιοχή των χυτοσιδήρων. Αρχικά ο καθαρός σίδηρος του εμπορίου περιέχει λιγότερο από 0,008 % κ.β C και αποτελείται από την φάση φερίτη (φάση α) στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι χάλυβες είναι κράματα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,008 % - 2,3 % κ.β. Πρακτικά αυτό το ποσοστό δεν ξεπερνά το 1 %. Τέλος οι χυτοσίδηροι είναι σιδηρούχα κράματα που περιέχουν από 2,3 % - 6,67 % κ.β C, στο εμπόριο δεν ξεπερνούν το 4,5 % κ.β.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) [1]

Οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του διαγράμματος Fe-C (Διάγραμμα 1) είναι οι εξής :

- ❖ A_0 → Θερμοκρασία του σημείου Curie του σεμεντίτη, ίση με $210\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ A_1 → Θερμοκρασία του σημείου τομής με τον οριζόντιο άξονα του ευτηκτοειδούς σημείου, σταθερή και ίση με $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ A_2 → Θερμοκρασία του σημείου Curie του φερίτη, δηλαδή σημείο Curie του Fe - α , ίση με $768\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ A_3 → Θερμοκρασία του σημείου τομής του GS ή θερμοκρασία πλήρους ωστενοποίησης. Για τον καθαρό σίδηρο είναι ίση με $910\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης είναι ίση με $723\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ A_4 → Θερμοκρασία του σημείου τομής με την NJ ή θερμοκρασία μετασχηματισμού ωστενίτη σε δ -φερίτη. Για τον καθαρό σίδηρο είναι ίση με $1.400\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για χάλυβα ευτηκτοειδούς σύστασης είναι ίση με $1.492\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ A_m → Θερμοκρασία του σημείου τομής με την SE. Για χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,8 % κ.β έως 2 % κ.β είναι θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης.

Οι θερμοκρασίες A_1, A_3, A_4 υστερούν κατά τη θέρμανση και την απόψυξη. Για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δείκτες c που δηλώνουν τη θέρμανση και r που δηλώνουν την απόψυξη. Έτσι, οι παραπάνω θερμοκρασίες μαζί με τους αριθμούς τοποθετούνται και τα αντίστοιχα γράμματα. Η διαφορά αυτών των θερμοκρασιών είναι μερικοί βαθμοί Κελσίου και εξαρτάται από την ταχύτητα θέρμανσης ή απόψυξης του χάλυβα.

Γενικά, το ποσοστό του άνθρακα και ο ρυθμός απόψυξης επιδρούν στη μικροδομή, η οποία με τη σειρά της καθορίζει την αντοχή και την σκληρότητα του χάλυβα. Οι περισσότεροι ναυπηγικοί χάλυβες αποψύχονται στον αέρα μετά την εν θερμώ έλαση ή την οποιαδήποτε άλλη θερμική κατεργασία τους. Μερικοί όμως ναυπηγικοί χάλυβες υψηλής αντοχής με όριο διαρροής πάνω από 350 MPa υφίστανται βαφή σε νερό από θερμοκρασία υψηλότερη εκείνης του μετασχηματισμού

και ακολούθως υπόκεινται σε επαναφορά με θέρμανση σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη εκείνης του ωστενιτικού μετασχηματισμού. Η θερμική αυτή κατεργασία οδηγεί σε ειδική μικροδομή, καλούμενη επαναφερμένος μαρτενσίτης (tempered martensite), με κύρια χαρακτηριστικά τις υψηλές τιμές αντοχής και δυσθραυστότητας.

Όσον αφορά στις καταστάσεις και στις μικροδομές αναλύονται τα εξής :

Υγρή Φάση (L) : Υγρό διάλυμα C και Fe

δ-φερρίτης : Κρυσταλλικό σύστημα στο κυβικό χωροκεντρωμένο (bcc). Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe. Η μέγιστη διαλυτότητα 0,1 % συμβαίνει στους 1492 °C. Λίγα άτομα C εισχωρούν στο πλέγμα bcc του Fe διότι τα κενά του bcc είναι μικρά. Δεν προκαλούν μεγάλες εσωτερικές παραμορφώσεις. Ο δ-Fe είναι σταθερός σε θερμοκρασία μεταξύ 1400 – 1539 °C. [1]

γ-φάση (ωστενίτης) : Κρυσταλλικό σύστημα στο κυβικό εδροκεντρωμένο (fcc). Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στον Fe. Η μέγιστη διαλυτότητα των 2 % κ.β C συμβαίνει στους 1130 °C. Το άτομο του C τοποθετείται ως ένθετο άτομο στη θέση του οκταεδρικού κενού του fcc πλέγματος, άρα και μεγαλύτερο ποσοστό του C περιέχεται στις θέσεις αυτές. Ο γ-Fe είναι σταθερός σε θερμοκρασίες μεταξύ 911-1400 °C. [1]

α-φάση (φερρίτης) : Κρυσταλλικό σύστημα είναι το κυβικό χωροκεντρωμένο (bcc). Τυχαίο στερεό διάλυμα παρεμβολής C στο πλέγμα bcc του Fe. Η μέγιστη διαλυτότητα είναι 0,025 % κ.β C συνίσταται στους 723 °C. Συμβαίνει ό,τι και για το ένθετο άτομο της δ-φάσης άρα και για μικρή διαλυτότητα του C στον bcc του Fe. Ο α-Fe είναι σταθερός σε θερμοκρασία μικρότερη των 911 °C. [1]

Καρβίδιο του σιδήρου ή σεμεντίτης (Fe₃C) : Κρυσταλλικό σύστημα είναι ορθορομβικό. Σκληρή και εύθραυστη μεσομεταλλική ένωση του C με τον Fe. Περιέχει 6,67 % κ.β C. Ονομάζουμε πρωτογενή σεμεντίτη αυτόν που εμφανίζεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της ευτηκτικής, δευτερογενή σεμεντίτη αυτόν που εμφανίζεται μεταξύ της ευτηκτικής και ευτηκτοειδούς θερμοκρασίας και τριτογενή σεμεντίτη αυτόν που εμφανίζεται κάτω από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία.

Τα δύο τελευταία είδη σεμεντίτη έχουν γενικά χαμηλά ποσοστά και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα. [1]

Γραφίτης (C) : Κρυσταλλικό σύστημα που ανήκει στο εξαγωνικό. Είναι μια από τις αλλοτροπικές μορφές άνθρακα. Είναι μαλακή και αποτελεί βασική φάση στα περισσότερα είδη των χυτοσιδήρων. Ο γραφίτης συναντάται σε διάφορες μορφολογίες όπω φυλλίδια, ροζέτες ,κονδυλώματα και σφαιρίδια, ανάλογα με την ταχύτητα απόψυξης και τα προστιθέμενα στοιχεία. [1]

Περλίτης (α -Fe₃C) : Σύνθετη ευτηκτοειδής δομή εναλλασσόμενων πλακών φάσης α και φάσης σεμεντίτη που παράγεται όταν αποψύχεται η γ -φάση περιέχουσα 0,8 % κ.β C κάτω από τους 723 °C. Ο περλίτης πυρηνοποιείται στα όρια των κόκκων της γ -φάσης. Δεν αποτελεί φάση αλλά μίγμα φάσεων α και σεμεντίτη με σύσταση 88,5 % κ.β α και 11,5 % κ.β σεμεντίτη. [1]

Λεδεμβουρίτης (γ +Fe₃C) : Είναι μια σύνθετη ευτηκτική δομή που αποτελείται από εναλλοσόμενες πλάκες γ -φάσης και φάσης σεμεντίτη που παράγεται κατά την πήξη του υγρού σύστασης 4,3 % κ.β C σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τους 1130°C. Δεν αποτελεί φάση αλλά ευτηκτικό μίγμα φάσεων και εμφανίζεται κυρίως κατα τη στερεοποίηση των χυτοσιδήρων. [1]

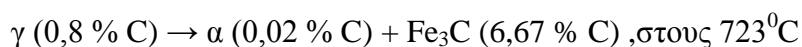
Λεδεμβουρητική Μορφή (περλίτης-σεμεντίτης) : Είναι σύνθετη δομή που αποτελείται από περλίτη και σεμεντίτη. Προέρχεται από λεδεμβουρίτη, κατόπιν μετασχηματισμού του ωστενίτη (μέσα στον λεδεμβουρίτη) σε περλίτη σε θερμοκρασία κάτω των 723 °C. [1]

Όσον αφορά στους μετασχηματισμούς στερεάς κατάστασης αναλύονται τα εξής :

Ευτηκτοειδής Μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερης σημασίας στην περίπτωση της μελέτης των χαλύβων. Είναι ο μετασχηματισμός του ωστενίτη (0,08% C) σε φερρίτη (0,02% C) και σεμεντίτη (6,7% C), σε θερμοκρασία 723°C. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται κάτω κρίσιμη θερμοκρασία (A_1).

Η αντίδραση αυτή παρίσταται ως εξής :



Όπως φαίνεται, η ανωτέρω αντίδραση, σε αντίθεση με τις προηγούμενες που εξετάστηκαν, λαμβάνει χώρα σε στερεή κατάσταση. Το μείγμα φερρίτη-σεμεντίτη, που παράγεται με βάση την ευτηκτοειδή αντίδραση, ονομάζεται περλίτης. Η ανάπτυξη του περλίτη κατά την ψύξη, ξεκινά από τα σύνορα των κόκκων του ωστενίτη και εξελίσσεται με τη μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη μέχρις ότου διασπασθεί το 100 % του ωστενίτη. Ένας χάλυβας με σύσταση ίση προς 0,8 % C λέγεται *ευτηκτοειδής χάλυβας* και αποτελείται από περλιτικούς κόκκους. Ένα χάλυβας με σύσταση μικρότερη από την ευτηκτοειδή (< 0,8 % C) λέγεται *υποευτηκτοειδής χάλυβας*. Κατά την αργή απόψυξη ενός τέτοιου χάλυβα, ο ωστενίτης δε διατηρείται σταθερός μέχρι του 723 °C, αλλά ένα ποσοστό του διασπάται σε φερρίτη (α) κατά το πέρασμα στη διφασική περιοχή $\alpha+\gamma$. Ο φερρίτης αυτός, ο οποίος προέρχεται από τη μερική διάσπαση του ωστενίτη, πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται προευτηκτοειδής φερρίτης. Όταν κατά την ψύξη φθάσουμε στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία (723 °C), ο εναπομένον ωστενίτης μετατρέπεται, σύμφωνα με την ευτηκτοειδή αντίδραση, σε περλίτη. Άρα ένας υποευτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Η θερμοκρασία στην οποία ξεκινά η διάσπαση του ωστενίτη σε φερρίτη ονομάζεται άνω κρίσιμη θερμοκρασία (A_3). Όταν η σύσταση ενός χάλυβα σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την ευτηκτοειδή (>0,8 % C), τότε ο χάλυβας ονομάζεται *υπερευτηκτοειδής*. Κατά την αργή απόψυξη ενός τέτοιου χάλυβα και πάλι ο ωστενίτης δε διατηρείται σταθερός μέχρι τους 723 °C, καθώς περνάμε κατά την ψύξη στη διφασική περιοχή $\gamma+Fe_3C$. Έτσι, ένα μέρος του αρχικού ωστενίτη θα διασπασθεί σε σεμεντίτη. Ο σεμεντίτης αυτός, επειδή σχηματίζεται πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται προευτηκτοειδής σεμεντίτης. Ο προευτηκτοειδής σεμεντίτης σχηματίζεται γύρω από τα όρια των κόκκων του ωστενίτη κατά την ψύξη. Ο εναπομείνων ωστενίτης διασπάται, όταν φθάσουμε στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, σε περλίτη. Επομένως, ένας υπερευτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από κόκκους περλίτη, στα όρια των οποίων υπάρχει προευτηκτοειδής σεμεντίτης.

1.2.2 Μέθοδοι Παρασκευής Ναυπηγικών Χαλύβων

Μέθοδοι Παρασκευής : Οι ναυπηγικοί χάλυβες παρασκευάζονται συνήθως με μια από τις ακόλουθες μεθόδους

- Ανοικτής Φλογοκαμίνου (Open Hearth Furnace)
- Βασικής Καμίνου Οξυγόνου (Basic Oxygen Furnace)
- Ηλεκτρικής Καμίνου (Electric Furnace)

Τελευταία ,μικρές ποσότητες ναυπηγικού χάλυβα παρασκευάζονται και με άλλες νεότερες μεθόδους,όπως με ανάτηξη σε κενό με τόξο, με ανάτηξη ηλεκτροσκωρίασης κ.λ.π.

Κατά την παρασκευή του χάλυβα η σημαντικότερη αντίδραση από μεταλλουργική σκοπιά είναι εκείνη όπου ο άνθρακας και το οξυγόνο ενώνονται και δημιουργείται αέριο (εξίωση Boudoir). Η διαδικασία αποξείδωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα από τον οποίο εξαρτάται η ποιότητα του ναυπηγικού χάλυβα. Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις ποιότητες :

- ❖ Ο πλήρως καθησυχασμένος χάλυβας (Killed Steel), ο οποίος είναι τελείως αποξείδωμένος και του οποίου η ομοιογενής μεταλλουργική δομή τον καθιστά κατάλληλο για παχιά ελάσματα. Η αποξείδωση επιτυγχάνεται με την προσθήκη στοιχείων όπως το πυρίτιο ή το αλουμίνιο.
- ❖ Ο περιθωριακός χάλυβας (Rimmed Steel),ο οποίος είναι ελάχιστα αποξείδωμένος και ο οποίος παράγεται συνήθως σε πάχη μέχρι 12,5mm. Η χρήση του στη ναυπηγική είναι περιορισμένη σε δευτερεύουσες κατασκευές.
- ❖ Ο ημικαθησυχασμένος χάλυβας (Semikilled Steel), στον οποίο προστίθεται μικρότερη ποσότητα αποξείδωμένου στοιχείου σε σύγκριση με τον πλήρως καθησυχασμένο. Είναι καλύτερης ποιότητας από τον περιθωριακό .Λόγω του χαμηλότερου κόστους του, εν συγκρίσει με τον καθησυχασμένο ,αποτελεί την ποιότητα των συνήθων ναυπηγικών χαλύβων.

Οι περισσότεροι ναυπηγικοί χάλυβες συνήθους αντοχής προσφέρονται στο εμπόριο αμέσως μετά την εν θερμώ εξέλασή τους. Όπου, όμως, απαιτείται χάλυβας

υψηλής δυσθραυστότητας προδιαγράφεται συνήθως και η θερμική κατεργασία της εξομάλυνσης. Επιπλέον είναι δυνατή η απαίτηση λεπτόκοκκου χάλυβα, κάτι που επιτυγχάνεται με την προσθήκη ποσοτήτων στοιχείων, όπως αλουμίνιο, νιόβιο και βανάδιο.

1.2.3 Ποιοτική Κατάταξη Ναυπηγικών Χαλύβων

Γενικά, η συνύπαρξη λεπτών κόκκων, πλήρους καθυσύχασης και εξομάλυνσης οδηγεί στην παρασκευή χάλυβα πολύ υψηλής ποιότητας.

Με βάση την τάση διαρροής, οι ναυπηγικοί χάλυβες κατατάσσονται σε :

- Κοινούς χάλυβες, με $300 \text{ N/mm}^2 > \sigma_0 > 200 \text{ N/mm}^2$.
- Χάλυβες υψηλής αντοχής, για τους οποίους $\sigma_0 > 300 \text{ N/mm}^2$. Οι ναυπηγικοί χάλυβες περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0,16-0,23 % και άλλα στοιχεία σε μικρότερες ποσότητες (μαγγάνιο, πυρίτιο και αλουμίνιο), οι δε νηογνώμονες προδιαγράφουν τα ανώτατα αποδεκτά όρια για την περιεκτικότητα των στοιχείων αυτών. (Πίνακας 3)

Νηογνώμονας	Κατηγορία Χάλυβα					
	A	B	D	E	CS	DS
ABS (American Bureau of Shipping)	235	235	235	235	235	235
BV (Bureau Veritas)	Ορίζεται μόνο η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό					
DNV (Det Norske Veritas)	235	235	235	235		
LRS (Lloyd's Register)	235	235	235	235		

Πίνακας 1. Τάσεις διαρροής κοινών χάλυβων

Νηογνώμονας	Κατηγορία Χάλυβα					
	AH32	AH36	DH32	DH36	EH32	EH32
ABS	314	353	314	353	314	353
BV	314	-	314	-	314	-
DNV	315	355	315	355	315	355
LRS	315	355	315	355	315	355

Πίνακας 2. Τάσεις διαρροής χαλύβων υψηλής αντοχής (N/mm²)

Κατηγορία Χάλυβα	Ποσοστιαίες Περιεκτικότητες (Μέγιστες Τιμές)					
	C	Mn	Si	S	P	Al
A	0,23	2,5xC	0,5	0,04	0,04	-
D	0,21	0,7-1,5	0,1-0,5	0,04	0,04	0,015
E	0,18	0,7-1,5	0,1-0,5	0,04	0,04	0,015
AH32	0,18	0,9-1,6	0,5	0,04	0,04	0,015
AH36	0,18	0,9-1,6	0,5	0,04	0,04	0,015
EH36	0,18	0,9-1,6	0,1-0,5	0,04	0,04	-

Πίνακας 3. Χημικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων

Κατηγορία Χάλυβα	Μηχανικές ιδιότητες	
	UTS	Charpy
A	395-480	-
D	395-480	4,8/0 °C
E	395-480	2,4/-40 °C
AH32	435-575	2,8/0 °C
AH36	480-605	3,5/0 °C
EH36	480-605	3,5/-40 °C

Πίνακας 4.Μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με ναυπηγικούς χάλυβες και πιο συγκεκριμένα με Mild Steel A40 και με High Tensile Steel AH32. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένοι χάλυβες είναι η σύνταξη μιας πτυχικής εργασίας με πρακτικό χαρακτήρα δηλαδή η διαδικασία συγκόλλησής τους και έπειτα η μελέτη της. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες χρησιμοποιούνται στο ναυπηγείο Japan Marine United Corporation και συγκεκριμένα τα φύλλα με τα οποία ασχοληθήκαμε χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή πλοίων τύπου Bulk Carrier 62.000 DWT.

Ο νηογνώμονας ο οποίος είναι είχε την επίβλεψη των προαναφερθέντων κατασκευών είναι ο NK και τα τα ανώτατα αποδεκτά όρια για την περιεκτικότητα των χημικών στοιχείων που αναφέρθηκαν στους πίνακες καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες :

Όσων αφορά τους Mild Steels A40

C<	Mn	Si	P<	S<	Al(cid)>	Cu<
0,21	0,90-1.60	0,50	0,035	0,035	0,015	0,35

Πίνακας 5.Χημική σύσταση % Mild Steel

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	%Elongation	Impacting Test Temperature (°C)
440-590	315	20	0

Πίνακας 6.Μηχανικές ιδιότητες Mild Steel

Όσων αφορά τους High Tensile Steels AH32

C<	Mn	Si	P<	S<	Al(cid)>	Cu<
0,18	0,70-1,60	0,50	0,035	0,035	0,015	0,35

Πίνακας 7.Χημική σύσταση % High Tensile Steel

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	%Elongation	Impacting Test Temperature (°C)
510-650	390	22	0

Πίνακας 8.Μηχανικές ιδιότητες High Tensile Steel

Οι ναυπηγικοί χάλυβες τους οποίους μελετήσαμε και κάναμε τα πειράματά μας είναι σε πραγματικές διαστάσεις πάχους 8,9mm. Η μέθοδος συγκόλλησης που εφαρμόστηκε είναι η TIG ή αλλιώς GTAW.

1.3 Η επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις τήξεως (fusion welding) είναι κατεργασίες μέσω των οποίων επιτυγχάνεται μια συνεχής σύνδεση δύο μεταλλικών στοιχείων μέσω της τήξης τους από κάποια πηγή θερμότητας με ή χωρίς τη χρήση πρόσθετου συγκολλητικού υλικού (filler). Η τεχνολογία των συγκολλήσεων τήξεως περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων συγκόλλησης, η πλειοψηφία των οποίων χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό τόξο ως πηγή θερμότητας για την τήξη των προς συγκόλληση μετάλλων.

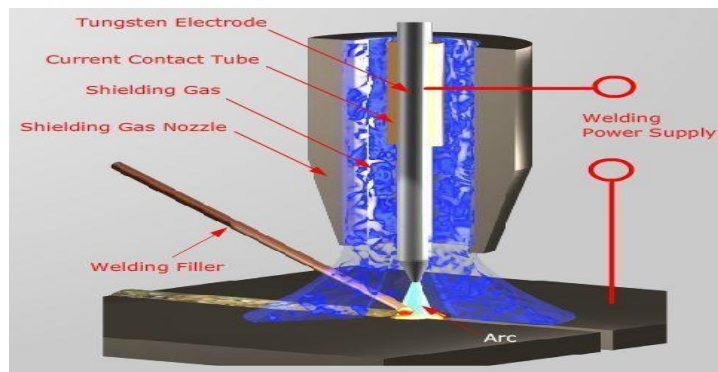
Στις περιπτώσεις αυτές αναφερόμαστε σε συγκολλήσεις τόξου (arc welding). Οι βασικότερες μέθοδοι συγκόλλησης είναι :

- ❖ Συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW)
- ❖ Συγκόλληση με σύρμα και αδρανές αέριο (MIG/GMAW)
- ❖ Συγκόλληση με μη αναλίσκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου (TIG/GTAW)
- ❖ Συγκόλληση με βυθισμένο τόξο (SAW) [4]

Στην παρούσα εργασία η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε είναι η TIG/GMAW.

1.3.1 Η συγκόλληση GTAW-TIG

Η συγκόλληση GTAW-TIG είναι μια μέθοδος κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός μη αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου από βολφράμιο (W) και του προς συγκόλληση μετάλλου. Η συγκόλληση προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου. Στη λίμνη συγκόλλησης προστίθεται, εάν απαιτείται, πρόσθετο συγκολλητικό υλικό, που προέρχεται από μια ράβδο συγκόλλησης. Η διαδικασία της συγκόλλησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα.1).



Σχήμα.1 Διαδικασία Συγκόλλησης TIG

Το αέριο προστασίας χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα και ειδικότερα από την αντίδραση του τηγμένου μετάλλου με το οξυγόνο και το άζωτο. Οι αντιδράσεις αυτές συνήθως οδηγούν στον σχηματισμό πόρων και εγκλεισμάτων που εξασθενούν την συγκόλληση. Το αέριο προστασίας τροφοδοτείται στην περιοχή της συγκόλλησης από τον πυρσό συγκόλλησης. Στις συγκολλήσεις TIG το αέριο προστασίας είναι αργό (Ar) ή ήλιο (He). Η χρήση του αργού είναι πιο διαδεδομένη λόγω της καταλληλότητάς του για την συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων και του μικρότερου κόστους σε σχέση με το ήλιο.

Στην συγκόλληση TIG δεν απαιτείται η χρήση επένδυσης ηλεκτροδίου. Έτσι αποφεύγονται όλα τα πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση της πάστας, όπως ο εγκλωβισμός της στην συγκόλληση καθώς και ο καθαρισμός της μετά το πέρας της συγκόλλησης.

Με την μέθοδο TIG είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων και των βιομηχανικών κραμάτων, όπως οι δομικοί χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου, τα κράματα χαλκού, τα κράματα νικελίου και άλλα.

Η μέθοδος TIG μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για διμεταλλικές συγκολλήσεις καθώς και για την επίστρωση σκληρών προστατευτικών επικαλύψεων πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα.

Η συγκόλληση TIG μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα, το πιο ρεύμα θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το προς συγκόλληση μέταλλο και την εφαρμογή. [4]

1.4 Αστοχίες κατά τη συγκόλληση

Ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια όσων αφορά στις συγκολλήσεις είναι εκείνο που πραγματεύεται την ανάπτυξη ασυνεχειών ή σφαλμάτων καθώς από αυτά καθορίζεται η επιτυχία και η αποδοχή μιας συγκόλλησης.

Τα ελατώματα ή σφάλματα των συγκολλητών συνδέσεων διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες :

- Υπομικροσκοπικά ελαττώματα, δηλαδή ατέλειες κρυσταλλογραφικού πλέγματος όπως οι αταξίες και τα κενά.
- Μικροσκοπικά ελαττώματα όπως τα μικροεγκλείσματα, οι διαφορισμοί στοιχείων και οι μικρορωγματώσεις.
- Μακροσκοπικά ελαττώματα όπως οι υποκοπές, η ατελής διείδυση, οι πόροι, οι σκουριές, η ατελής τήξη και οι ρωγματώσεις.

Τα αναφερθέντα ελαττώματα ασκούν επίδραση στις μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες των συνδέσεων, άρα στην ικανότητά τους για εργασία σε καθορισμένες συνθήκες φορτίσεων, θερμοκρασιών ή εκθετικών διαβρώσεων.

Ως *ασυνέχεια* ορίζεται η διακοπή της τυπικής δομής της συγκόλλησης. Μπορεί να είναι η απώλεια της ομοιομορφίας στα μηχανικά, μεταλλουργικά ή φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού συγκόλλησης. Η ασυνέχεια δεν αποτελεί απαραίτητα και ελάττωμα της συγκόλλησης.

Σύμφωνα με την American Welding Society ως *ελάττωμα* της συγκόλλησης ορίζεται μια ασυνέχεια ή πολλές ασυνέχειες που εκ φύσεως ή λόγω της συνολικής επίδρασης, καθιστούν το προϊόν ανίκανο να ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές και απαιτήσεις.

Με άλλα λόγια ,πολλά προϊόντα μπορεί να περιέχουν ατέλειες και να είναι αποδεκτά. Όμως κανένα προϊόν δεν πρέπει να εμφανίζει ελαττώματα στις συγκολλήσεις του. Η μοναδική διαφορά μεταξύ μίας ατέλειας και ενός ελαττώματος είναι όταν η ατέλεια γίνεται τόσο μεγάλη ή όταν υπάρχουν πολλές μικρές ατέλειες που καθιστούν τη συγκόλληση μη αποδεκτή σύμφωνα με τις τυποποιήσεις του κώδικα για το συγκεκριμένο προϊόν. Ορισμένοι κώδικες είναι περισσότερο αυστηροί από κάποιους άλλους και έτσι η ίδια συγκόλληση μπορεί να γίνεται αποδεκτή από ένα κώδικα και να απορρίπτεται από κάποιον άλλο.

Η ιδανική περίπτωση είναι η συγκόλληση να μην παρουσιάζει καμία ατέλεια, γεγονός που είναι πρακτικά αδύνατο. Η διαφορά μεταξύ του τι είναι αποδεκτό και τι είναι τέλειο είναι γνωστή ως *ανοχή*.

Κατά την αξιολόγηση των συγκολλήσεων είναι σημαντικό να σημειώνεται ο τύπος της ατέλειας ,το μέγεθος και η θέση αυτής. Καθένας από τους τρεις αυτούς παράγοντες ή και οι τρεις σε συνδιασμό με τις εφαρμοζόμενες τυποποιήσεις καθορίζουν εάν πρόκειται για ασυνέχεια ή ελάττωμα.

Οι δώδεκα πιο δημοφιλείς ατέλειες συγκόλλησης είναι οι παρακάτω :

- I. Πορώδες (Porosity)
- II. Εγκλείσματα (Inclusions)
- III. Ανεπαρκής Διείσδυση της Κόλλησης (Inadequate Joint Penetration)
- IV. Ατελής Τήξη (Incomplete Fusion)
- V. Χτυπήματα Τόξου (Arc Strikes)
- VI. Υπερπληρώσεις (Overlaps)
- VII. Υποκοπές (Undercuts)
- VIII. Ρωγμές στον Κρατήρα (Crater Cracks)
- IX. Ατελής Πλήρωση (Underfill)
- X. Υποπληρώσεις (Underfills)
- XI. Ελασματοποιήσεις (Laminations)
- XII. Αποφλοιώσεις (Delaminations)
- XIII. (Lamellar Tears)

1.4.1 Πορώδες

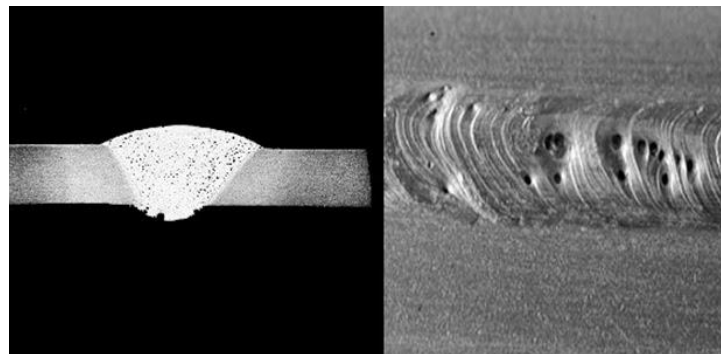
Το πορώδες προκύπτει από τη διάλυση αερίου στο λουτρό της τηγμένης κόλλησης που οδήγησε στο σχηματισμό φυσαλίδων οι οποίες εγκλωβίστηκαν κατά την ψύξη του υλικού (Εικόνα 1). Οι φυσαλίδες που ευνοούν την ανάπτυξη του πορώδους σχηματίζονται στο εσωτερικό του τηκόμενου μετάλλου και για αυτό το λόγο δε γίνονται αντιληπτές κατά την εμφάνισή τους. Οι σχηματιζόμενοι πόροι είναι είτε σφαιρικοί είτε κυλινδρικοί. Οι πόροι κυλινδρικού σχήματος καλούνται και σκωληκοειδείς πόροι. Τα στρογγυλεμένα άκρα τείνουν να μειώνουν τις αναπτυσσόμενες γύρω τους τάσεις. Έτσι παρουσιάζεται μικρή έως καθόλου απώλεια της αντοχής, εκτός εάν οι πόροι έχουν επεκταθεί.

Το φαινόμενο εμφάνισης πόρων προκαλείται συχνά λόγω εφαρμογής ακατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης ή λόγω της ακατάλληλης χημικής ισορροπίας μεταξύ του υλικού κόλλησης και του προς συγκόλληση υλικού. Η εφαρμογή ακατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει στη χρήση προστατευτικού αερίου που δεν προστατεύει σωστά το λουτρό συγκόλλησης. Επιπλέον το άζωτο από τον ατμοσφαιρικό αέρα διαλύεται στην κόλληση, εγκλωβίζεται και μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση πόρων. Το άζωτο και το υδρογόνο διαλυτοποιούνται στον ωστενίτη σε μεγαλύτερα ποσοστά από αυτά του φερίτη και κατά την απόψυξη στην φερίττική δομή αποβάλλεται η περίσσεια και δημιουργούνται οι πόροι.

Η μεγάλη ποσότητα θερμότητας που παράγεται κατά τη συγκόλληση μπορεί να οδηγήσει στην αποσύνθεση του χρώματος, των ακαθαρσιών, της σκουριάς ή των οξειδίων προκαλώντας έτσι την εμφάνιση υδρογόνου. Το υδρογόνο όπως και το άζωτο μπορεί να εγκλωβιστεί στην κόλληση κατά τη διάρκεια στερεοποίησής της και να οδηγήσει στο σχηματισμό πόρων. Κατά το σχηματισμό των πόρων το υδρογόνο μπορεί να διαχυθεί στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη της συγκόλλησης και να οδηγήσει στην εμφάνιση εσωτερικών ρωγμών σε ορισμένους χάλυβες.

Η εμφάνιση των πόρων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες :

- Ομοιόμορφα διασκορπισμένοι πόροι που προκαλούνται λόγω φτωχών μεθόδων συγκόλλησης ή λόγω λανθασμένων υλικών.
- Σύμπλεγμα πόρων που προκαλείται συχνά από τη λανθασμένη έναρξη και διακοπή της συγκόλλησης.
- Το γραμμικό πορώδες εμφανίζεται συχνά λόγω μόλυνσης στη σύνδεση ή στη ρίζα αυτής.
- Το σκωληκοειδές πορώδες προκαλείται συχνά λόγω μόλυνσης της ραφής. Το είδος αυτό είναι μοναδικό διότι ο σχηματισμός του εξαρτάται από το αέριο που διαφεύγει από το τηκόμενο υλικό με ρυθμό ίσο με το ρυθμό στερεοποίησης του υλικού.



Εικόνα 1. Πορώδες σε συγκόλληση

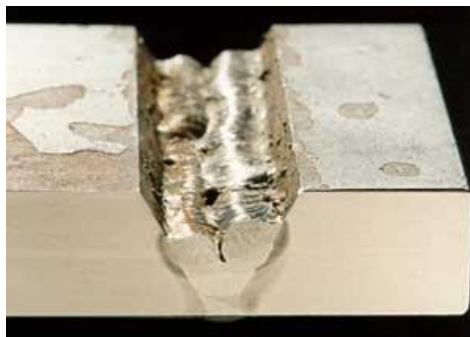
1.4.2 Εγκλείσματα

Τα εγκλείσματα είναι μη μεταλλικά υλικά όπως η σκουριά και τα οξείδια που παγιδεύονται στο τηγμένο μέταλλο μεταξύ των ραφών ή μεταξύ της κόλλησης και του προς συγκόλληση υλικού (Εικόνα 2). Τα εγκλείσματα σπάνια είναι ομοιόμορφα σχηματισμένα. Επιπλέον μπορούν να σχηματίζουν μια συνεχή γραμμή. Το γεγονός αυτό προκαλεί τη συγκέντρωση τάσεων και τη μείωση της αντοχής της κόλλησης. Αν και δεν είναι ορατά, η ανάπτυξή τους μπορεί να είναι αναμενόμενη εάν οι πρωτεύουσες ραφές δεν καθαρίστηκαν ορθά.

Τα διασκορπισμένα εγκλείσματα μπορεί να μοιάζουν με τους πόρους αλλά σε αντίθεση με αυτούς δεν έχουν γενικά σφαιρικό σχήμα. Τα εγκλείσματα αυτά μπορούν να προκύψουν από την ατελή απομάκρυνση της προϋπάρχουσας σκουριάς και από τον εσφαλμένο χειρισμό του τόξου συγκόλλησης .

Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα προκαλούνται κάτω από τις παρακάτω συνθήκες:

- ❖ Όταν η σκουριά ή/και τα οξειδία δεν έχουν χρόνο να βγούν στην επιφάνεια του τηγμένου μετάλλου .
- ❖ Εάν υπάρχουν εγκοπές μεταξύ των ραφών ή μεταξύ των ραφών και των προς συγκόλληση τεμαχίων που παγιδεύουν το υλικό και δεν του επιτρέπουν να βγει στην επιφάνεια .
- ❖ Εάν η ένωση σχεδιάστηκε με περιορισμένο χώρο για την ορθή οδήγηση του τήγματος.
- ❖ Συχνές εναύσεις λόγω μικρής θερμικής παροχής



Εικόνα 2.Εγκλείσματα παγιδευμένα στο τηγμένο μέταλλο

1.4.3 Ανεπαρκής Διείσδυση της Κόλλησης

Η ανεπαρκής διείσδυση της κόλλησης πραγματοποιείται όταν το βάθος διείσδυσης της κόλλησης είναι μικρότερο από το απαιτούμενο για την τήξη του υλικού μεταξύ των ελασμάτων (Εικόνα 3). Ένα ελάττωμα οδηγεί συνήθως στη

μείωση της διατομής της συγκόλλησης ή αποτελεί το αίτιο της συγκέντρωσης τάσεων που οδηγεί στην αστοχία λόγω κόπωσης.

Τα βασικά αίτια που οδηγούν στην ανεπαρκή διείσδυση της κόλλησης είναι τα παρακάτω :

- Η ακατάλληλη μέθοδος συγκόλλησης. Η πιο συνήθης αιτία είναι η λανθασμένη οδήγηση του τόξου .
- Η ανεπάρκεια ρεύματος συγκόλλησης. Τα ελάσματα μεγάλου πάχους ή υψηλής θερμικής αγωγιμότητας συνήθως προθερμαίνονται ώστε η θερμότητα της συγκόλλησης να μην απομακρύνεται τόσο γρήγορα από το μέταλλο που δε μπορεί να διεισδύσει στην ένωση .
- Η ακατάλληλη προετοιμασία της σύνδεσης. Το πρόβλημα αυτό προκαλείται όταν τα άκρα των προς συγκόλληση ελασμάτων δεν έχουν προετοιμαστεί ή προσαρμοστεί κατάλληλα .
- Ο ακατάλληλος σχεδιασμός της ένωσης



Εικόνα 3.Ανεπαρκής Διείσδυση της Κόλλησης

1.4.4 Ατελής Τήξη

Η ατελής σύντηξη είναι η απώλεια σύζευξης μεταξύ του τηγμένου μετάλλου πλήρωσης και του ήδη εναποτιθέμενου υλικού πλήρωσης ή/και του προς συγκόλληση υλικού (Εικόνα 4). Η απώλεια σύντηξης μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης και της

επιφάνειας της ένωσης ονομάζεται Lack of Sidewall Fusion. Και οι δύο τύποι προβλημάτων εμφανίζονται συνήθως σε όλο το μήκος της συγκόλλησης.

Μερικά αίτια ατελούς σύντηξης είναι τα παρακάτω :

- ❖ Η ανεπαρκής ανάδευση (Agitation) με την οποία δεν είναι δυνατή η διάσπαση των στρωμάτων των οξειδίων. Το βασικό μέταλλο ή το υλικό πλήρωσης μπορεί να λιώσουν αλλά ένα λεπτό στρώμα οξειδίων μπορεί να εμποδίσει τη σύζευξη.
- ❖ Οι ακατάλληλες μέθοδοι συγκόλλησης.
- ❖ Η λανθασμένη διαδικασία συγκόλλησης.
- ❖ Η ακατάλληλη προετοιμασία των άκρων συγκόλλησης.
- ❖ Ο ακατάλληλος σχεδιασμός της ένωσης. Η ατελής σύντηξη μπορεί να οφείλεται στην ανεπαρκή ποσότητα θερμότητας για την τήξη του βασικού μετάλλου ή στον περιορισμένο χώρο στην ένωση για τη λίμνη συγκόλλησης.
- ❖ Ο ανεπαρκής καθαρισμός της ένωσης.
- ❖ Ακατάλληλο μέταλλο προσθήκης.



Εικόνα 4. Ατελής Τήξη στη Συγκόλληση

1.4.5 Χτυπήματα του Τόξου

Τα χτυπήματα του τόξου είναι μικρά τοπικά σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκε τήξη της επιφάνειας μακριά από την ένωση (Εικόνα 5). Τα σημάδια αυτά μπορεί να προκαλούνται από τα κατά λάθος χτυπήματα του τόξου σε λάθος περιοχή ή/και από τη λανθασμένη ένωση επιφανειών. Αν και είναι σχετικά λεία σημάδια δε μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα. Επιπλέον θεωρούνται τοπικές ζώνες σκληρότητας και το εναρκτήριο σημείο ρωγμών.



Εικόνα 5.Χτυπήματα τόξου στη Συγκόλληση

1.4.6 Υπερπληρώσεις

Οι υπερπληρώσεις εμφανίζονται στις συγκολλήσεις σύντηξης όταν η αποτιθέμενη ποσότητα υλικού είναι μεγαλύτερη από αυτή που έχει σχεδιαστεί η ένωση να δεχτεί (Εικόνα 6). Το υλικό πλήρωσης ρέει πάνω από την επιφάνεια του προς συγκόλληση υλικού. Επιπλέον προκαλούνται με την λανθασμένη καθοδήγηση του τόξου και με το κράτημα του ηλεκτροδίου σε σχεδόν κατακόρυφη θέση.



Εικόνα 6. Υπερπληρώσεις στην ένωση της συγκόλλησης

1.4.7 Υποκοπές

Οι υποκοπές είναι το αποτέλεσμα του τόξου πλάσματος το οποίο αφαιρεί υλικό από την ένωση περισσότερο από το υλικό πλήρωσης που αποθέτει (Εικόνα 7). Μια βασική αιτία είναι το υπερβολικά χαμηλό ρεύμα. Επιπλέον προκαλούνται με λανθασμένες τεχνικές συγκόλλησης όπως η λανθασμένη γωνία ηλεκτροδίου ή τα υπερβολικά μεγάλα κορδόνια συγκόλλησης. Για την αποφυγή τους προτείνεται η εφαρμογή πολλαπλών αντί απλού πάσου, η αλλαγή του προστατευτικού αερίου και η βελτίωση των τεχνικών χειρισμού του τόξου συγκόλλησης.



Εικόνα 7. Υποκοπές στις Συγκολλήσεις

1.4.8 Ρωγμές του Κρατήρα

Πρόκειται για πολύ μικρές ρωγμές που αναπτύσσονται στον κρατήρα κατά τη συρρίκνωση και στερεοποίηση της λίμνης της συγκόλλησης (Εικόνα 8). Τα υλικά που τήκονται δύσκολα αποβάλλονται προς το κέντρο του κρατήρα κατά τη διάρκεια της ψύξης. Καθώς τα υλικά αυτά ψύχονται τελευταία διαχωρίζονται από το υπόλοιπο υλικό καθώς εξελίσσεται η ψύξη του μετάλλου συγκόλλησης. Οι υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της σμίκρυνσης οδηγούν στην ανάπτυξη ρωγμών. Να σημειώσουμε ότι οι ρωγμές στον κρατήρα μπορούν να περιοριστούν, αν όχι να απαλειφθούν, με τη σταδιακή διακοπή του τόξου στο τέλος της συγκόλλησης. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στο τόξο να επιμηκυνθεί, στο ρεύμα να μειωθεί σταδιακά και στον κρατήρα να γεμίσει και να ψυχθεί αργά.



Εικόνα 8. Ρωγμές στον Κρατήρα Συγκόλλησης

1.4.9 Υποπληρώσεις

Οι υποπληρώσεις εμφανίζονται στο αυλάκι συγκόλλησης όταν το μέταλλο συγκόλλησης δεν είναι αρκετό ώστε το τήγμα να βρεθεί στο ίδιο επίπεδο με τα προς συγκόλληση ελάσματα (Εικόνα 9). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης ή με την πραγματοποίηση περισσότερων πάσων.



Εικόνα 9.Υποπληρώσεις στη Συγκόλληση

1.4.10 Ελασματοποιήσεις

Οι ελασματοποιήσεις είναι πιο εκτεταμένες και εμπεριέχουν στρώματα μη μεταλλικών ανεπιθύμητων υλικών μεγαλύτερου πάχους και αυτή είναι η βασική τους διαφορά με το φαινόμενο Lamellar Tearing που θα αναφερθεί παρακάτω (Εικόνα 10). Εντοπίζονται κοντά στην περιοχή του κέντρου του ελάσματος και προκαλούνται από την ανεπαρκή απομάκρυνση των ακαθαρσιών (cropping).



Εικόνα 10.Ελασματοποιήσεις στη Συγκόλληση

1.4.11 Αποφλοιώσεις (Delaminations)

Όταν οι ελασματοποιήσεις (Laminations) τέμνουν την κόλληση της ένωσης είναι πιθανό ορισμένες από αυτές να ανοίξουν και να αποκολληθούν. Η μόλυνση του μετάλλου συγκόλλησης μπορεί να πραγματοποιηθεί εάν η ελασματοποίηση περιέχει μεγάλες ποσότητες σκουριάς, ακαθαρσιών ή άλλων ανεπιθύμητων υλικών (Εικόνα 11). Τέτοιου είδους μολύνσεις μπορεί να οδηγήσουν στην ανάπτυξη σκληροειδών πόρων ή σε σφάλματα απώλειας σύντηξης.

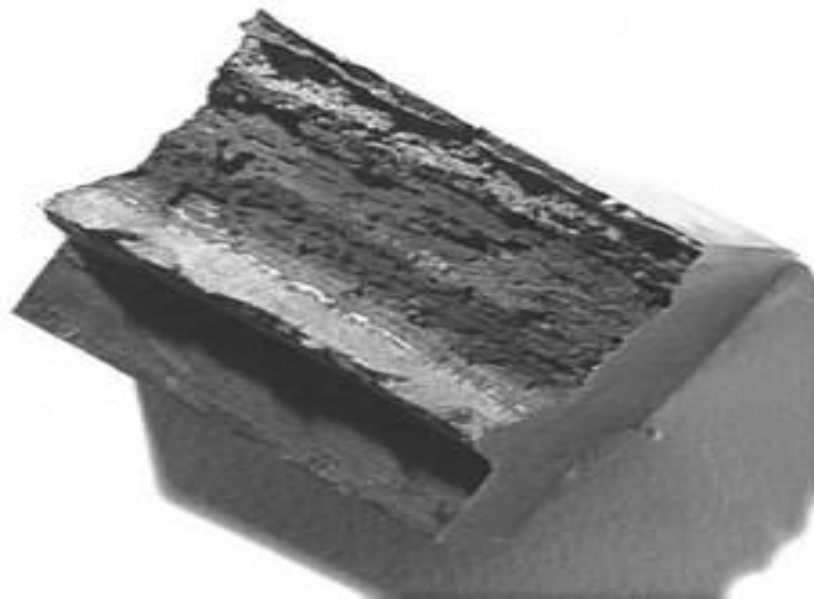


Εικόνα 11. Αποφλοιώσεις στη Συγκόλληση

1.4.12 Lamellar Tears

Τα ελαττώματα αυτά εμφανίζονται ως ρωγμές παράλληλες προς τα κάτω από την επιφάνεια του χάλυβα (Εικόνα 12). Γενικά δε βρίσκονται στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη και παρουσιάζουν μορφή σκαλοπατιών. Προκαλούνται συνήθως από τα λεπτά στρώματα των μη μεταλλικών εγκλεισμάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του προς συγκόλληση ελάσματος και που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή πλαστικότητα. Επιπλέον να σημειώσουμε ότι οι ρωγμές αυτές είναι ευδιάκριτες εάν τα άκρα των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι εκτεθειμένα.

Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι ο επανασχεδιασμός της ένωσης ώστε να επιβάλλονται οι μικρότερες δυνατές παραμορφώσεις σε κάθε σημείο του πάχους του τεμαχίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή μικρότερων συγκολλήσεων έτσι ώστε το κάθε διαδοχικό πάσο να επιδρά θερμικά στο προηγούμενο πάσο με τελικό στόχο τη μείωση της συνολικής τάσης στην τελική συγκόλληση.



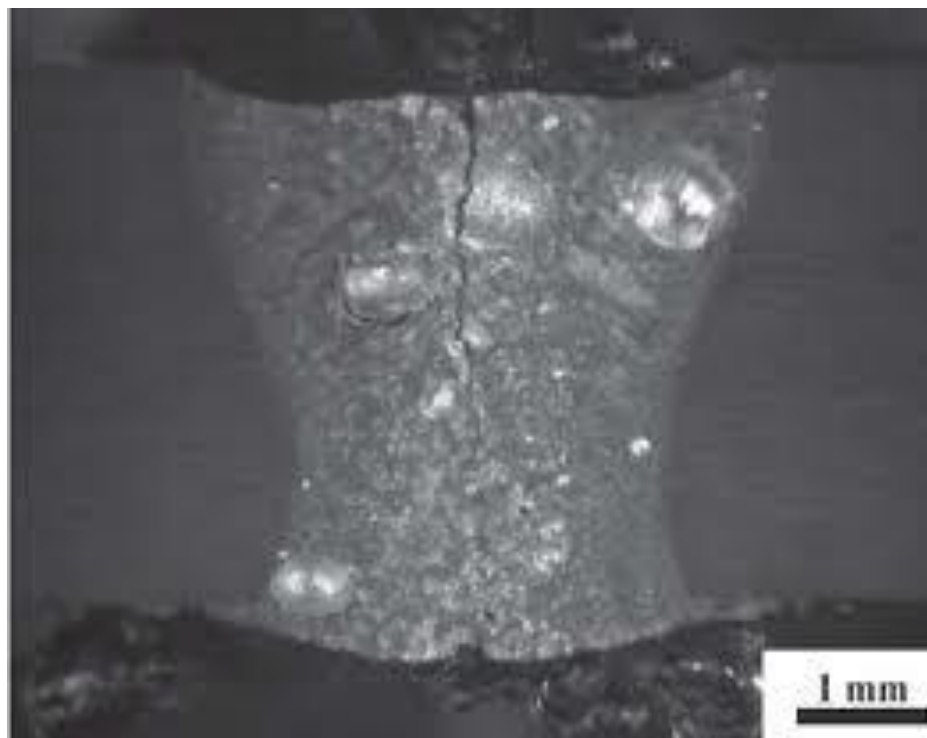
Εικόνα 12.Lamellar Tears

Παραπάνω αναφέραμε τα σημαντικότερα ελαττώματα που μπορεί να προκύψουν κατά την εκτέλεση συγκολλήσεων με διάφορες μεθόδους. Από αυτά τα ελαττώματα το πιο σημαντικό είναι το φαινόμενο εμφάνισης ρωγματώσεων καθώς ο βαθμός ανάπτυξής τους θα χαρακτηρίσει τη συγκόλληση ως επιτυχημένη ή αποτυχημένη, το προϊόν ως αποδεκτό ή απορριπτέο και θα καθορίσει το βαθμό στον οποίο η κατασκευή θα πληρεί τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Παρακάτω αναπτύσσεται το φαινόμενο ανάπτυξης ρωγματώσεων.

1.4.13 Ρωγματώσεις

Ως *Ρωγμάτωση* ορίζεται η πολύ λεπτή γραμμική θραύση μικρού ή μεγάλου μήκους ,που προκαλείται στην ίδια τη ραφή ή στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη ή ακόμη και στο γειτονικό προς τη ραφή μέταλλο βάσεως (Εικόνα 13).

Η ρωγμάτωση αυτή προκαλείται χωρίς ουσιαστική επίδραση εξωτερικών καταπονήσεων παρά μόνο κάτω από την πίεση των εσωτερικών δυνάμεων (τάσεων) ή τραβηγμάτων της ίδιας της συγκόλλησης. Οι ρωγματώσεις μπορούν να προκληθούν είτε κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της συγκόλλησης, οπότε τις ονομάζουμε *Εν Θερμώ* , με θερμοκρασία που κυμαίνεται από 900 έως 1000 °C, είτε κατά την ψύξη οπότε τις ονομάζουμε *Εν Ψυχρώ* ,με θερμοκρασία από 200 έως 400 °C.



Εικόνα 13.Ρωγμάτωση στη Συγκόλληση

1.4.13.1 Ρωγματώσεις Εν Θερμώ

Το βασικό χαρακτηριστικό μίας εν θερμώ ρωγμής είναι ότι σχεδόν πάντα εμφανίζεται στο μέταλλο της ραφής, περίπου στο μέσο και κατά μήκος αυτής. Η εμφάνιση των εν θερμώ ρωγματώσεων οφείλεται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο του Διαφορισμού. Το Θείο (S) και ο Φώσφορος (P) έρχονται σε σπουδαιότητα μετά τον Άνθρακα (C) σε ότι αφορά τη χημική σύνθεση των συγκολλησίμων ανθρακούχων χαλύβων. Το θείο και ο φώσφορος αποτελούν ακαθαρσίες μέσα στο χάλυβα ο οποίος σε περίπτωση υψηλής περιεκτικότητας σε αυτά τα δύο στοιχεία χάνει σε μεγάλο βαθμό τη συγκολλητικότητα του.

Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο σχηματισμό θειούχων και φωσφορούχων ενώσεων (ευτηκτικών) του σιδηρού των οποίων ενώσεων η θερμοκρασία στερεοποίησης είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη του χάλυβα, δηλαδή της τάξεως των 900 °C. Όταν λοιπόν μετά τη διέλευση του τόξου της συγκόλλησης το κυρίως μέταλλο στερεοποιείται πλήρως κάτω από τους 1400-1500 °C, οι θειούχες και φωσφορούχες ενώσεις παραμένουν ρευστές για πολύ χρόνο ακόμη σχηματίζοντας ρευστές λωρίδες γύρω από τους ήδη στερεοποιημένους κόκκους του κυρίως μετάλλου. Η τοπική αύξηση της συγκέντρωσης αυτής του θείου και του φωσφόρου γύρω από τους κόκκους του μετάλλου αποτελεί ένα είδος ασθένειας της δομής που ονομάζεται Διαφορισμός (Segregation). Ο διαφορισμός μειώνει αισθητά τη δυθραυστότητα του χάλυβα και τον καθιστά εύθραυστο. Συγχρόνως όμως προκαλεί την εμφάνιση ρωγμών στη ραφή της συγκόλλησης που είναι οι εν θερμώ ρωγματώσεις.

Ο λόγος που η ρωγμάτωση εμφανίζεται στο μέσον της ραφής είναι γιατί εκεί ακριβώς το εναποτιθέμενο μέταλλο στερεοποιείται τελευταίο και επομένως συγκεντρώνει τις ακαθαρσίες που με τη σειρά τους προκαλούν το διαφορισμό. Επιπλέον να σημειώσουμε ότι όσο πιο δύσκαμπτη είναι η κατασκευή τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγματώσεων εν θερμώ.

Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη των εν θερμώ ρωγματώσεων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράγοντες :

- Θα πρέπει να εκλέγεται συγκολλησίμος χάλυβας, δηλαδή χάλυβας με χαμηλές ποσοστιακές περιεκτικότητες σε θείο και φώσφορο ειδικά στις περιπτώσεις που η ποσοστιακή περιεκτικότητα άνθρακα είναι αυξημένη. Δεν θα πρέπει να συγκολλάται χάλυβας με $\%C > 0.4\%$.
- Οι ραφές θα πρέπει να εκτελούνται στην ορθή σειρά ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο οι αναπτυσσόμενες κατά τη συγκόλληση τάσεις.
- Θα πρέπει να πραγματοποιείται ορθός σχεδιασμός των άκρων των προς συγκόλληση ελασμάτων και των ραφών που θα πραγματοποιηθούν ώστε να αποφεύγονται οι μακρόστενες ραφές. Μια ικανοποιητική αναλογία ενός κορδονιού είναι η παρακάτω :

$$\text{Πλάτος} = (1 \text{ έως } 2) * \text{Ύψος}$$

- Με τη μείωση του ρεύματος αποφεύγεται η μεγάλη αραιώση του μετάλλου της ραφής και η υπερθέρμανση του μετάλλου βάσεως βελτιώνοντας έτσι την 'άμυνα' της συγκόλλησης κατά των εν θερμώ ρωγματώσεων .
- Τέλος να σημειώσουμε ότι θα πρέπει να δίνεται εξαιρετική προσοχή κατά την εκτέλεση του πρώτου κορδονιού διότι εάν παρουσιαστεί ρωγμάτωση σε αυτό τότε είναι βέβαιη η εξάπλωση της σε ολόκληρη τη ραφή .

1.4.13.2 Ρωγματώσεις Εν Ψυχρώ

Ο τύπος αυτός της ρωγμάτωσης ,που εμφανίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες (300 °C), είναι ο πλέον επικίνδυνος διότι πολλές φορές τα ρήγματα είναι αθέατα. Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι εμφανίζονται παραπλεύρως της ραφής της συγκόλλησης, δηλαδή στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη ή ακριβώς στη βάση της.

Η δημιουργία των ρωγματώσεων εν ψυχρό ή υδρογόνου όπως συχνά ονομάζονται προϋποθέτει την ύπαρξη των παρακάτω συνθηκών :

- ❖ Παρουσία αυξημένης ποσότητας υδρογόνου στη συγκόλληση.
- ❖ Σύνθεση των χαλύβων τέτοια ώστε να διευκολύνεται η δημιουργία μαρτενσίτη στις ταχύτητες ψύξης. Δηλαδή $C > 0.3 \%$

- ❖ Τάσεις συγκόλλησης σχετικά αυξημένες (δύσκαμπτες κατασκευές και κυρίως μεγάλα πάχη).

Στη συνέχεια εξετάζουμε χωριστά τον καθένα από τους παραπάνω παράγοντες.

1.4.14 Η Παρουσία Υδρογόνου

Το υδρογόνο προέρχεται από την υγρασία του περιβάλλοντος και των υλικών συγκόλλησης, από διάφορες οργανικές λιπαρές ουσίες κλπ. Στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το νερό (υγρασία) διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το μεν οξυγόνο προκαλεί το σχηματισμό διαφόρων οξειδίων με τα μεταλλικά στοιχεία του ρευστού μετάλλου της συγκόλλησης τα οποία και αποβάλλονται μέσω της σκουριάς (πάστας).

Αντίθετα το υδρογόνο παραμένει στο ρευστό μέταλλο και διαχέεται στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη μέσω της διεπιφάνειας. Για να εξηγήσουμε το φαινόμενο ανάπτυξης ρωγματώσεων πρέπει να γνωρίζουμε τη διαλυτότητα του υδρογόνου στις διάφορες μορφές του χάλυβα.

- ✓ $30 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$ ανά 100gr υγρού χάλυβα (θερμοκρασία $T > 1500 \text{ }^\circ\text{C}$).
- ✓ $5-15 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$ ανά 100gr σιδήρου γ (ωστενίτης)(θερμοκρασία $T = 900-1500 \text{ }^\circ\text{C}$).
- ✓ $2-3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$ ανά 100gr σιδήρου α (φερίτης) (θερμοκρασία $T < 900 \text{ }^\circ\text{C}$).
- ✓ $0 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$ ανά 100 gr μαρτενσίτη.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο ωστενίτης ,που όπως είναι γνωστό σχηματίζεται πρώτος κατά τη στερεοποίηση του ρευστού χάλυβα, έχει ικανοποιητική ικανότητα διαλύσεως του υδρογόνου. Αντίθετα ο μαρτενσίτης αδυνατεί να απορροφήσει και την ελάχιστη ποσότητα υδρογόνου.

Με την ψύξη του εναποτιθέμενου μετάλλου ο ωστενίτης μετατρέπεται σε φερρίτη ο οποίος έχει μικρή διαλυτότητα υδρογόνου αλλά σε κάθε περίπτωση το συγκρατεί. Εάν τη θέση του φερρίτη πάρει ο μαρτενσίτης, όπως συμβαίνει για τη Θερμικά

Επηρεαζόμενη Ζώνη στους σκληρούς χάλυβες, τότε εξαιτίας της αδυναμίας του να απορροφήσει το υδρογόνο, σχηματίζονται θύλακες των οποίων η πίεση προκαλεί τη ρωγμάτωση στη θερμοκρασία σχηματισμού του μαρτενσίτη δηλαδή περίπου στους 300 °C. Τη στιγμή αυτή το υδρογόνο αδυνατεί να εγκαταλείψει το μαρτενσίτη διότι η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή.

1.4.15 Η Σύνθεση του Χάλυβα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την εμφάνιση των εν ψυχρώ ρωγματώσεων είναι απαραίτητη η παρουσία του μαρτενσίτη ο οποίος από τη μια είναι ανελαστικός και από την άλλη αδυνατεί να απορροφήσει την ελάχιστη ποσότητα υδρογόνου. Έτσι οδηγείται στη ρωγμάτωση.

Συνεπώς επιρρεπείς στις εν ψυχρώ ρωγματώσεις είναι μόνο οι χάλυβες που η σύνθεση τους σχηματίζει κάτω από τις θερμικές συνθήκες της συγκόλλησης τη μαρτενσιτική δομή. Τέτοιοι χάλυβες είναι κυρίως οι ανθρακούχοι με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη από 0.25 %, οι διάφοροι κραματωμένοι ,οι χρωμονικελιούχοι και άλλοι. Αντίθετα, οι χάλυβες που από τη φύση τους διατηρούν ωστενιτική δομή, όπως οι ανοξείδωτοι, δε διατρέχουν τον κίνδυνο εμφάνισης εν ψυχρώ ρωγματώσεων και αυτός άλλωστε είναι ο λόγος που χρησιμοποιούνται ανοξείδωτα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση ανθρακούχων ή κραματωμένων χαλύβων.

1.4.16 Οι Τάσεις Συγκόλλησης

Εάν συνυπάρχουν οι προηγούμενες συνθήκες του υδρογόνου και του μαρτενσίτη τότε όσο μεγαλύτερες είναι οι αναπτυσσόμενες λόγω της συγκόλλησης τάσεις, τόσο αυξάνονται και οι πιθανότητες εμφάνισης των εν ψυχρώ ρωγματώσεων.

Πιο πάνω έγινε αναφορά στις συνθήκες που ευνοούν την ανάπτυξη των εν θερμό ρωγματώσεων. Είναι λοιπόν φυσικό να αναζητηθούν και οι τρόποι αποφυγής της

ανάπτυξης αυτής. Οι σημαντικότερες προφυλάξεις που πρέπει να λαμβάνονται είναι οι παρακάτω :

- Χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων ή συρμάτων συγκόλλησης των οποίων το ρευστό μέταλλο περιέχει ελάχιστο υδρογόνο.
- Εκλογή ενός μετάλλου βάσεως με όσο το δυνατόν χαμηλή περιεκτικότητα σε στοιχεία που ευνοούν τη μαρτενιτική δομή και κυρίως του άνθρακα.
- Προθέρμανση του μετάλλου βάσεως σε θερμοκρασία ανάλογη με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα και άλλα στοιχεία όπως του πάχους συγκόλλησης. Ο σκοπός της προθέρμανσης είναι διπλός. Περιορίζει από τη μία την έκταση και τη σκληρότητα του μαρτενσίτη και από την άλλη διευκολύνει την αποχώρηση του υδρογόνου κατά την ψύξη.
- Χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων που εναποθέτουν ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα ο οποίος συγκρατεί το υδρογόνο και εμποδίζει τη διάχυσή του στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη και επομένως την πρόκληση ρωγμάτωσης.
- Σχεδίαση και εκτέλεση της ραφής της συγκόλλησης κατά τρόπο που να περιορίζει κατά το δυνατό τις τάσεις συγκόλλησης.
- Σε περίπτωση ανάγκης υποβάλλουμε την κατασκευή σε μετέπειτα θερμική κατεργασία.
- Η ταχύτητα συγκόλλησης δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη και το ρεύμα συγκόλλησης όχι πολύ χαμηλό.

1.4.17 Ελασματική Ρωγμάτωση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ελασματική ρωγμάτωση παρατηρείται σε γωνιακές συγκολλήσεις οι οποίες καταπονούν τα ελάσματα στον εφελκυσμό και κατά την κατεύθυνση του πάχους. Έχουν κλιμακωτή όψη, βρίσκονται στο εσωτερικό του μετάλλου βάσεως και συχνά καταλήγουν στην επιφάνεια του ελάσματος ,συμβαίνουν δε σε ελάσματα που έχουν πάχος μεγαλύτερο από 20-25 mm.

Η κυριότερη αιτία πρόκλησής τους είναι οι υπάρχουσες στο μέταλλο βάσεως εστίες κακής συνοχής του μετάλλου αυτού. Η έλλειψη συνοχής οφείλεται σε

διάφορες ακαθαρσίες χύτευσης που παραμένουν στο χάλυβα. Επίσης το φαινόμενο του διαφορισμού είναι ακόμα μια αιτία ανομοιομορφίας της ύλης και μείωσης της αντοχής. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης αναπτύσσονται τάσεις οι οποίες στην περίπτωση των γωνιακών κυρίως ραφών τείνουν να ξεριζώσουν ένα τμήμα του μετάλλου βάσεως. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στις κατασκευές με μεγάλο βαθμό δυσκαμψίας οπότε και οι τάσεις συγκόλλησης είναι υψηλές και οδηγούν έτσι στην ελασματική ρωγμάτωση.

Το φαινόμενο ανάπτυξης της ελασματικής ρωγμάτωσης περιορίζεται ή αποφεύγεται με τους παρακάτω τρόπους :

- ❖ Με την αποφυγή κατά το δυνατόν της καταπόνησης των ελασμάτων κατά το πάχος τους.
- ❖ Εάν η καταπόνηση κατά το πάχος είναι υποχρεωτική τότε επιδιώκεται να περιορίζονται οι τάσεις της συγκόλλησης με προθερμάνσεις και μεταθερμάνσεις όπως και με την ορθή σχεδίαση και εκτέλεση των ραφών.
- ❖ Επιλέγεται ηλεκτρόδιο με αντοχή μικρότερη από αυτή του μετάλλου βάσης, αλλά με μεγαλύτερη επιμήκυνση από αυτό. Έτσι η παραμόρφωση του μετάλλου της ραφής περιορίζει την καταπόνηση του μετάλλου βάσης.
- ❖ Εάν δεν υπάρχει τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αφαιρείται το μέταλλο βάσης της επικίνδυνης περιοχής και στη συνέχεια πραγματοποιείται αναγόμωση για την αναπλήρωσή του.

1.4.18 Άλλα Είδη Ρωγματώσεων

1.4.18.1 Ρωγμάτωση του τέλους ενός κορδονιού

Εάν ο συγκολλητής δεν προσέξει κατά το τελείωμα ενός κορδονιού τότε δημιουργείται ένας κρατήρας του οποίου η επιφάνεια ρωγματώνεται τόσο περισσότερο όσο περισσότερο σκληρός είναι ο χάλυβας. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται διότι η διατομή του κορδονιού μειώνεται σημαντικά στο σημείο αυτό και τι κορδόνι δε μπορεί να υποστεί τις αναπτυσσόμενες τάσεις.

1.4.18.2 Ρωγμάτωση των μικροραφών συναρμολόγησης

Οι μικροραφές συναρμολόγησης πρέπει να εκτελούνται ορθά γιατί διαφορετικά μπορεί να αποτελέσουν το σημείο έναρξης ρωγμάτωσης. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους σκληρούς ανθρακούχους ή κραματωμένους χάλυβες. Τέλος να σημειώσουμε ότι όταν για τη συγκόλληση προβλέπεται προθέρμανση του μετάλλου βάσης, τότε οι μικροραφές θα πρέπει να γίνονται μετά την προθέρμανση και όχι σε ψυχρό μέταλλο βάσης.

1.5 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι

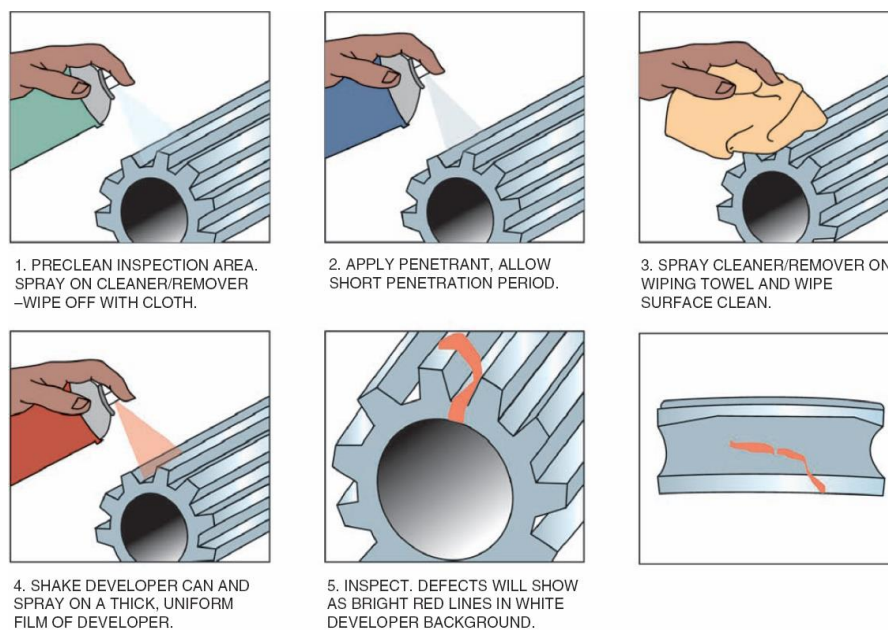
Με τον όρο "Μη Καταστροφικός Έλεγχος" εννοούμε όλες τις δραστηριότητες δοκιμών επιθεώρησης και ελέγχου μιας συγκόλλησης για την ανίχνευση και τον εντοπισμό μιας ασυνέχειας, ούτως ώστε να αξιολογηθεί αν είναι αποδεκτή με συγκεκριμένα πρότυπα και προδοαγραφές που διέπουν τη συγκεκριμένη συγκολλητή κατασκευή. Σε περίπτωση που η ασυνέχεια δεν είναι αποδεκτή τότε θεωρείται ως σφάλμα της συγκόλλησης (Weld Defect) και η συγκόλληση πρέπει να επισκευαστεί (Weld Repair). Ο όρος "μη καταστρεπτικός" σημαίνει απλά ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται αφού ολοκληρωθεί η συγκόλληση και χωρίς οποιαδήποτε καταστρεπτική επέμβαση στην κατασκευή. Οι σημαντικότερες τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου συγκολλήσεων είναι :

- Οπτικός Έλεγχος (Visual Inspection).
- Έλεγχος με Διεσδυτικά Υγρά (Penetrant Testing).
- Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particles Testing).
- Έλεγχος με Υπερήχους (Ultrasonic Testing).
- Έλεγχος με Δινορεύματα ή Επαγωγικά Ρεύματα (Eddy Current Inspection).
- Ραδιογραφικός Έλεγχος (Radiographic Testing).

Οι δύο τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου που έγιναν είναι : i)Έλεγχος με Διεσδυτικά υγρά και ii)Έλεγχος με Υπερήχους.

1.5.1 Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Διεσδυτικά Υγρά

Η πρώτη τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου που χρησιμοποιήσαμε ήταν αυτή του ελέγχου με διεσδυτικά υγρά (Σχήμα 2). Τα διεσδυτικά υγρά ενδείκνυνται για την ανίχνευση ασυνεχειών που είναι ανοιχτές στην επιφάνεια της συγκόλλησης όπως ρωγμές, πόροι και διαστρωματικές ρηγματώσεις. Η μέθοδος βασίζεται στη διείσδυση ενός υγρού (διεισδύτης) μέσα στην ασυνέχεια λόγω της τριχοειδούς έλξης. Στη συνέχεια με την εφαρμογή ενός κατάλληλου υγρού με μεγαλύτερο ειδικό βάρος από του διεισδυτή (εμφανιστής) αναγκάζουμε τον διεισδύτη να εξέλθει από την ασυνέχεια και να "εμφανίσει" τη θέση της. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχία της μεθόδου είναι ο καλός καθαρισμός της επιφάνειας.



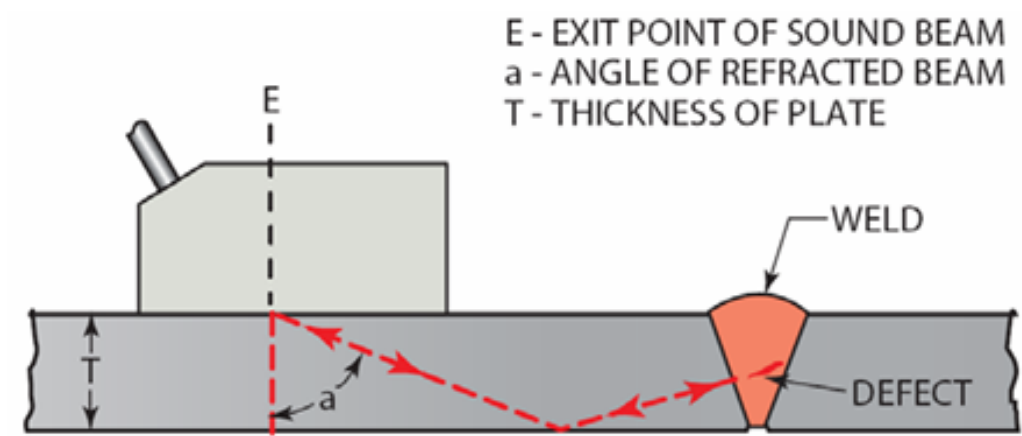
Σχήμα 2. Τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου με διεσδυτικά υγρά

1.5.2 Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Υπερήχους

Η δεύτερη τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου, η οποία έγινε με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, ήταν ο έλεγχος με υπερήχους (Σχήμα 3). Ο έλεγχος με υπερήχους είναι μια μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου που βασίζεται στην

ανάκλαση του ήχου από επίπεδες ασυνέχειες μέσα στο υλικό. Μια ηχητική δέσμη υψηλής συχνότητας (0,1-25MHz) εκπέμπεται από έναν πομπό, ταξιδεύει στο υλικό και ανακλάται από επιφανειακές ή υποεπιφανειακές ασυνέχειες. Η ανακλώμενη δέσμη στη συνέχεια φτάνει στον δέκτη, όπου μετατρέπεται σε σήματα ηλεκτρικής τάσης. Στα περισσότερα συστήματα ο πομπός και ο δέκτης συνδυάζονται στο ίδιο σύστημα (transducer). Η ανάλυση των σημάτων αυτών επιτρέπει τον εντοπισμό της ασυνέχειας. Η χρονική διαφορά μεταξύ εκπεμπόμενου και ανακλώμενου σήματος σχετίζεται με το μέγεθος τη ασυνέχειας. Η ανακλαστική ικανότητα των υπερήχων εξαρτάται από το είδος της διεπιφάνειας της ασυνέχειας.

Έτσι έχουμε σχεδόν ολική ανάκλαση σε διεπιφάνειες μετάλλου/αέρα ενώ μερική ανάκλαση σε διεπιφάνειες μετάλλου, υγρού και μετάλλου/στερεού. Ρωγμές ,διαστρωματικές ρηγματώσεις (laminations) και πόροι ανιχνεύονται εύκολα με ολική ανάκλαση, ενώ τα εγκλείσματα ανιχνεύονται με μερική ανάκλαση των υπερήχων.



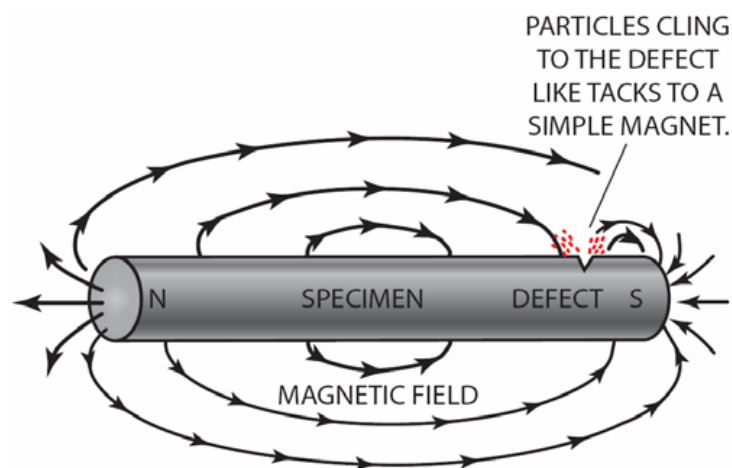
Σχήμα 3. Τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου με τη χρήση υπερήχων

1.5.3 Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια

Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια είναι μια μέθοδος μη καταστρεπτικού ελέγχου με την οποία εντοπίζονται τόσο επιφανειακές όσο και ελαφρώς

υποεπιφανειακές ατέλειες σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως τα περισσότερα σιδηρούχα κράμματα νικελίου και κοβαλτίου. Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κράμματα αλουμινίου, μαγνησίου και χαλκού καθώς και στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες. Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται, ατέλειες που είναι τοποθετημένες εγκάρσια στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, προκαλούν διαρροή του μαγνητικού πεδίου (πεδίο διαρροής, leakage field) γύρω από την ατέλεια (Σχήμα 4). Ο εντοπισμός του πεδίου διαρροής και επομένως της ατέλειας πραγματοποιείται με τη χρήση πολύ λεπτών μαγνητικών σωματιδίων (ρινισμάτων) τα οποία όταν εφαρμοστούν πάνω στην επιφάνεια του ελάσματος συγκεντρώνονται και παρακρατούνται από το πεδίο διαρροής.

Με τον τρόπο αυτό τα μαγνητικά σωματίδια σχηματίζουν το περίγραμμα της ατέλειας και επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης, του μεγέθους και του προσανατολισμού της ατέλειας. Για την μαγνήτιση της συγκόλλησης χρησιμοποιείται ένας πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης (yoke), ενώ τα μαγνητικά σωματίδια ταξινομούνται σε ξηρά και σε υγρά ανάλογα με τον φορέα.



Σχήμα 4. Τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια

Όλες οι τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου έγιναν στην APELLA S.A και τα αποτελέσματά τους παρατίθενται στο τέλος.

Αμέσως μετά την διαδικασία επιβεβαίωσης με τους μη καταστρεπτικούς ελέγχους έγιναν μηχανικές θραύσεις στα δοκίμιά μας.

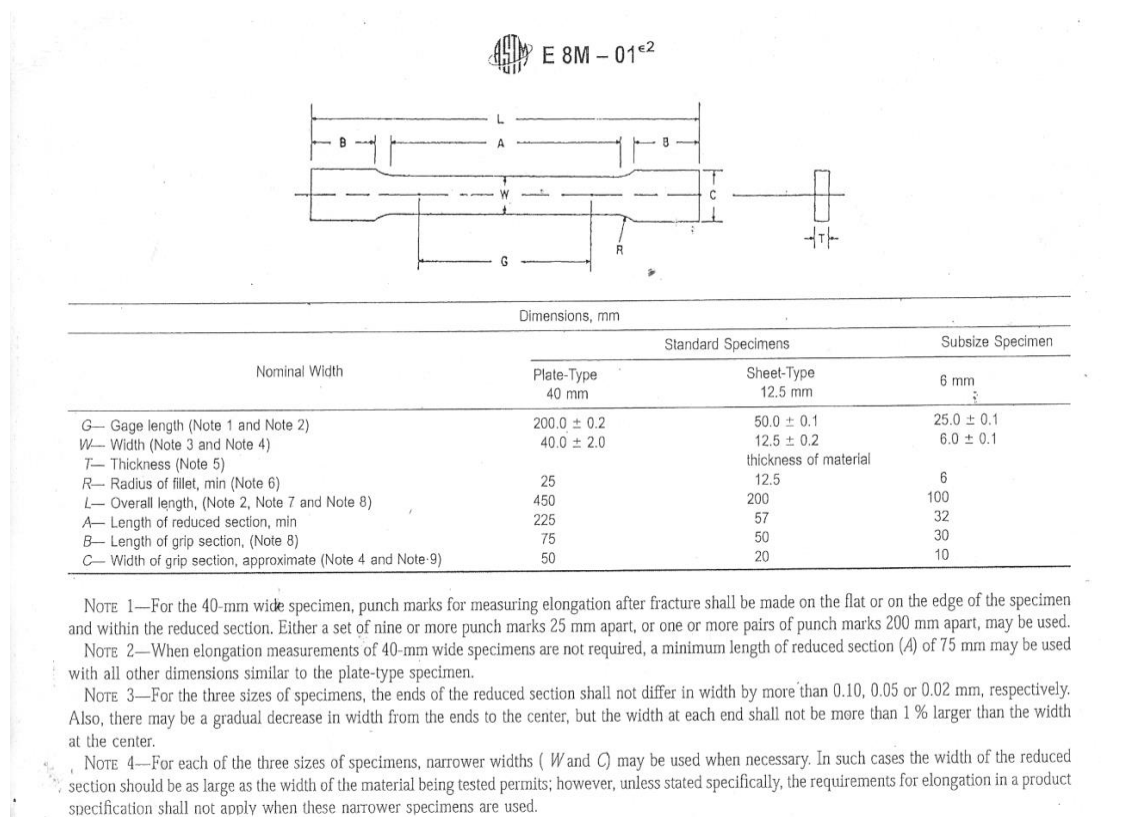
1.6 Μηχανικές Ιδιότητες

1.6.1 Διαδικασία Εφελκυσμού

Γενικά

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου σε εφελκυστική μονοαξονική φόρτιση σε συνδιασμό με την επιβαλλόμενη τάση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl. Το μηχάνημα εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε ,να προκαλεί την επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό, να μετράει το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό, καθώς επίσης και την προκαλούμενη επιμήκυνση.

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι καταστροφική,εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και θραύεται. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η αντίστοιχη επιμήκυνση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης.Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων σύμφωνα με πρότυπο Ε8Μ (Σχήμα 7). Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού ,έχουν πλατύτερη διατομή.



Σχήμα 7. Πρότυπο E8M για τα δοκίμια εφελκυσμού

Το απαιτούμενο φορτίο που παράγει μια ορισμένη επιμήκυνση καταγράφεται καθώς το δοκίμιο εφελκύεται με σταθερό ρυθμό. Προκύπτει έτσι η καμπύλη Τάσης- Παραμόρφωσης.

Από κάθε δοκιμή εφελκυσμού η καμπύλη $F=f(\Delta l)$ ή $\sigma=f(\epsilon)$, όπου "σ" είναι η ορθή εφελκυστική τάση από τη μηχανή του εφελκυσμού και "ε" η παραμόρφωση.

Η μηχανική τάση, σ σε MPa (N/mm^2), ορίζεται ως :

$$\sigma = F / A$$

όπου F (σε kN) είναι η δύναμη εφελκυσμού και A (σε mm^2) η αρχική διατομή του δοκιμίου.

Η παραμόρφωση είναι η αύξηση του μήκους του δοκιμίου ανά μονάδα μήκους δοκιμής. Η παραμόρφωση, ϵ , ή ολκιμότητα ($\epsilon\%$), ορίζεται ως :

$$\epsilon = l - l_0 / l_0$$

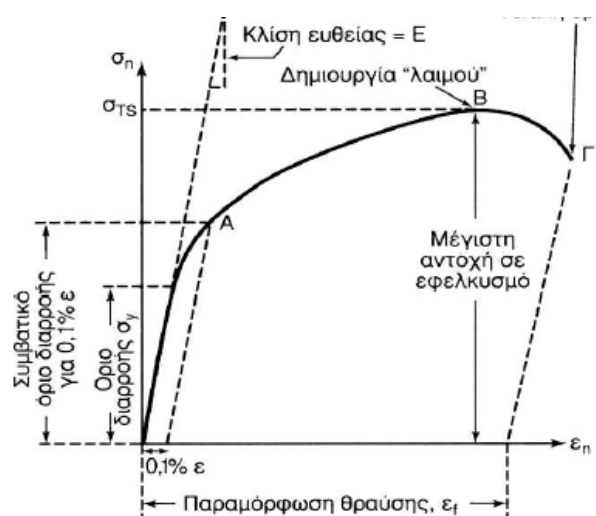
όπου l το μήκος του δοκιμίου για δεδομένο φορτίο και l_0 το αρχικό (μηδενική τάση) μήκος του δοκιμίου. Η καμπύλη του σχήματος, υποδιαιρείται σε δύο διακεκριμένες περιοχές :

- Ελαστική περιοχή
- Πλαστική περιοχή

Ελαστική χαρακτηρίζεται η προσωρινή παραμόρφωση που αναιρείται τελείως όταν πάψει να υπάρχει η αιτία (το φορτίο) που την προκάλεσε, το δε δοκίμιο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Η ελαστική περιοχή της καμπύλης του σχήματος είναι το αρχικό γραμμικό της τμήμα. **Πλαστική** είναι η μόνιμη παραμόρφωση που παραμένει και μετά την άρση της αιτίας που την προκάλεσε. Η πλαστική περιοχή είναι το μη γραμμικό τμήμα της καμπύλης και αρχίζει μόλις η ολική τάση υπερβεί το **όριο διαρροής**. Το σχήμα 10 συνοψίζει τις βασικές μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από ένα σχήμα εφελκυσμού. Η κλίση της εφαπτόμενης καμπύλης Τάσης-Παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι το **μέτρο ελαστικότητας**, **E**, ή μέτρο Young. Η γραμμικότητα της καμπύλης Τάσης-Παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι η γραφική παράσταση του **νόμου του Hooke** :

$$\sigma = E * \varepsilon$$

όπου E, το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό.



Σχήμα 8. Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίζονται από ένα πείραμα εφελκυσμού είναι :

- ❖ Μέτρο ελαστικότητας
- ❖ Όριο διαρροής
- ❖ Τάση θραύσης
- ❖ Ολκιμότητα

Το μέτρο ελαστικότητας E εκφράζει το βαθμό ακαμψίας του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής, όπως και το E , έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε μόνιμη παραμόρφωση και δείχνει την ευκολία με την οποία το μέταλλο μπορεί να διαμορφωθεί. Η μηχανική τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου, που ονομάζεται τάση θραύσης. Λίγο πριν και κατά την τάση θραύσης, το δοκίμιο αρχίζει να δημιουργεί "λαιμό", που ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μια μικρή περιοχή του δοκιμίου και η μηχανική τάση στο διάγραμμα του σχήματος (Σχήμα 10) μειώνεται. Αυτή η μείωση της τάσης συμβαίνει διότι η μηχανική τάση και η παραμόρφωση ορίζονται σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου. Η τάση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Μια άλλη σημαντική μηχανική ιδιότητα που προσδιορίζεται με τη δοκιμασία του εφελκυσμού είναι η **ολκιμότητα**, που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό πριν θραυστεί. Η ολκιμότητα εκφράζεται είτε επί τοις εκατό επιμήκυνση μέχρι τη θραύση ή επί τοις εκατό μείωση της διατομής μέχρι τη θραύση. Ο συνδυασμός ολκιμότητας και αντοχής καθορίζει τη δυσθραυστότητα, η οποία προσδιορίζεται από τη δοκιμή εφελκυσμού, ως το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης μέχρι το σημείο θραύσης. Η δυσθραυστότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια μέχρι τη θραύση.

Το **όριο διαρροής** είναι συνήθως η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να παραλάβει μια κατασκευή, διότι πέρα από αυτό υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Το όριο διαρροής εξαρτάται από τη φύση του υλικού και παίρνει διάφορες τιμές, από πολύ μικρές για κάποια πλαστικά έως πολύ μεγάλες για μεταλλικά υλικά όπως το τιτάνιο και διάφορα κράματα χάλυβα. Δεν έχουν όλα τα υλικά όριο διαρροής, παρά

μόνο τα σχετικά όλκιμα, όπως τα μέταλλα, τα κράματα και τα πολυμερή. Τα ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά και τα μεγάλης σκληρότητας κράματα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν ταχεία διάδοση ρωγμών και ψαθυρή αστοχία με θραύση αμέσως μόλις η τάση ξεπεράσει την ελαστική περιοχή. Τέλος, πολλές φορές σε διάφορα κράματα ή σε διάφορους τύπους χαλύβων παρατηρείται διαφορετικής μορφής καμπύλη $\sigma=f(\epsilon)$, στη γειτονιά του σημείου διαρροής, δηλαδή κατά το πέρασμα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, παρουσιάζεται μια ασυνέχεια του σημείου διαρροής και εμφανίζεται ένα ανώτερο και ένα κατώτερο σημείο διαρροής (πλατώ διαρροής). Το φαινόμενο αυτό πολλές φορές οφείλεται στην ύπαρξη διαταραχών στις διεπιφάνειες των κόκκων. Γενικά, τα κράματα είναι ανθεκτικότερα, αλλά λιγότερο όλκιμα από τα καθαρά μέταλλα. Η θερμοκρασία, οι προσμίξεις, η θερμομηχανική διαμόρφωση του υλικού, η ταχύτητα φόρτισης του υλικού και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο κράματα και μέταλλα. Για ασφάλεια χρησιμοποιείται ο λεγόμενος Συντελεστής Ασφαλείας, ο οποίος είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να υποβαθμίσει το όριο διαρροής κατά συγκεκριμένο ποσοστό, ανάλογα με τις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες. Κατά αυτό τον τρόπο ελαττώνεται η πιθανότητα αστοχίας υλικού σε περίπτωση καταπόνησης που θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή λόγω βλάβης, λάθους ή ατυχήματος.

1.6.2 Σκληρομέτρηση

Με τον όρο “**σκληρότητα**” ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα στην προσπάθειά διείσδυσης κάποιου άλλου σκληρότερου εισβολέα υπό φορτίο.

Γενικά, μια δοκιμή σκληρομέτρησης εκτελείται όταν ένας διεισδυτής προκαθορισμένης γεωμετρίας και γνωστών μηχανικών ιδιοτήτων πιέζει το δοκίμιο που εξετάζεται. Η σκληρότητα του υπό δοκιμήν υλικού καθορίζεται μέσω μιας βαθμονομημένης κλίμακας σκληρότητας, η οποία προκύπτει από δοκιμές σε πρότυπα υλικά. Η δοκιμή σκληρότητας αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο χαρακτηρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, καθώς :

- ✓ Είναι μια πολύ απλή μέθοδος, επομένως δεν χρειάζεται εξειδικευμένες γνώσεις.
- ✓ Δεν απαιτεί ειδικής μορφής δοκίμια ή δύσκολη προετοιμασία.
- ✓ Ο εξοπλισμός της δοκιμής είναι πολύ φθηνός.
- ✓ Είναι πολύ γρήγορη μέθοδος.
- ✓ Έχει πολύ καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα

Οι τυποποιημένες μέθοδοι μέτρησης σκληρότητας συνίσταται στη στατική ή κρουστική εφαρμογή ενός φορτίου μέσω ειδικού εξαρτήματος (διεισδυτής/indenter) της μηχανής δοκιμής στην επιφάνεια του προς σκληρομέτρηση αντικειμένου με αποτέλεσμα τη δημιουργία αποτυπώματος (depression, indentation). Από τις διαστάσεις του προσδιορίζεται η σκληρότητα.

Μέθοδος Σκληρομέτρησης Mohs

Η πρώτη ιστορικά επιστημονική μέθοδος μέτρησης σκληρότητας ήταν η μέθοδος με εγχάραξη του Mohs. Ο Mohs χρησιμοποίησε αυθαίρετα δέκα υλικά, που ήταν το ένα πιο σκληρό από το άλλο σύμφωνα με την καθημερινή εμπειρία, με πιο σκληρό το διαμάντι που του απέδωσε σκληρότητα 10 και πιο μαλακό την κιμωλία στην οποία απέδωσε σκληρότητα 1. Έτσι εάν ένα υλικό μπορεί να χαραχθεί από ένα άλλο που στην κλίμακα Mohs έχει για παράδειγμα σκληρότητα 7 (χαλαζίας), ενώ μπορεί να χαραχτεί εκείνο που έχει σκληρότητα 6 (άστριος), θα έχει σκληρότητα στην κλίμακα Mohs ίση με 6,5. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στην ορυκτολογία.

Μέθοδοι Σκληρομέτρησης Γενικά

Ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου (στατικά ή κρουστικά) ,οι μέθοδοι σκληρομέτρησης διακρίνονται σε στατικές και δυναμικές. Οι συνηθέστερες στατικές δοκιμές σκληρομέτρησης είναι τρεις :

- Η μέθοδος Brinell
- Η μέθοδος Vickers
- Η μέθοδος Rockell

Η Μέθοδος Brinell

Σύμφωνα με αυτή τη δοκιμή σφαιρικός διεισδυτής από σκληρό χάλυβα με διάμετρο D πιέζεται με σταθερό φορτίο P κάθετα προς την επιφάνεια του δοκιμίου. Μετά την αποφόρτιση και εφόσον ελήφθη πρόνοια ώστε η φόρτιση να διαρκέσει αρκετά ώστε να δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο, μετρείται η διάμετρος d της σχηματισθείσας ουλής. Η σκληρότητα κατά Brinell έχει διαστάσεις τάσης και ισούται με το λόγο του φορτίου P προς το εμβαδό του σφαιρικού τμήματος της επιφάνειας της ουλής : πDh ,όπου h το βάθος της ουλής.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι

$$h = [D - D\sqrt{(D^2 - d^2)}] / 2$$

$$\text{Ο τύπος της σκληρότητας Brinell : } BHN = 2 * P / \pi * D * [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}]$$

$$P \text{ (kp) } D, d \text{ (mm) } BHN \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

$$\text{Σημειώνεται ότι } 1 \text{kp/mm}^2 = 9,807 \text{ MPa}$$

Η εμπειρία έχει δείξει ότι για να είναι σαφής ο προσδιορισμός των διαστάσεων της ουλής θα πρέπει $d / D = 0,2 - 0,7$ ή ισοδύναμα $h / D = 0,01 - 0,15$.

Από τις πιο πάνω σχέσεις προκύπτει ότι για δεδομένη διάμετρο διεισδυτή D , το επιβαλλόμενο φορτίο P θα πρέπει να υπακούει σε κάποιον περιορισμό. Ο Meyer απέδειξε τη συνθήκη γεωμετρικής ομοιότητας που απαιτείται για τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με διαφορετικά μεγέθη διεισδυτών :

$$d_1 / D_1 = d_2 / D_2 = \text{σταθερό}$$

Από τη συνθήκη αυτή και τον ορισμό της σκληρότητας κατά Brinell προκύπτει τελικά ότι :

$$P_1 / D_1^2 = P_2 / D_2^2 = \lambda = \text{σταθερό}$$

Στην πράξη χρησιμοποιούνται διεισδυτές με διαμέτρους $D = 10 \text{ mm}$, $D = 5 \text{ mm}$ και $D = 2,5 \text{ mm}$ και για τη σταθερά λ έχουμε $\lambda = 30$, $\lambda = 10$ και $\lambda = 5$. Έτσι προκύπτουν 9 συνδυασμοί P και D που μπορούν να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρος

των συνήθων μετρήσεων. Η συνηθέστερη επιλογή είναι $D = 10 \text{ mm}$ και $\lambda = 30$ ($P = 3000 \text{ kp}$) για σχετικά σκληρά υλικά ενώ $\lambda = 5$ ($P = 500 \text{ kp}$) για μαλακά κράματα. Για να αποφευχθεί η υπερβολική παραμόρφωση του διεισδυτή σε δοκιμές με πολύ σκληρά υλικά, αντί χαλύβδινης σφαίρας χρησιμοποιούμε σφαίρα μαρτεσιτικού χάλυβα. Τις διαστάσεις της διαμέτρου της ουλής τις μετράμε σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και παίρνουμε το μέσο όρο. Για ένα τυπικό πείραμα κάνουμε τουλάχιστον 12 διαδοχικές σκληρομετρήσεις στο υπό εξέταση δοκίμιο σε θέσεις που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από το διπλάσιο της διαμέτρου του χρησιμοποιούμενου διεισδυτή για να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση στη διαμόρφωση του περιγράμματος των ουλών .

Η Μέθοδος Vickers

Η δοκιμή αυτή στηρίζεται στις ίδιες βασικές αρχές με τη δοκιμή Brinell. Η βασική διαφορά είναι στο διεισδυτή που εδώ είναι από διαμάντι και έχει σχήμα κανονικής τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία απέναντι εδρών $\alpha = 136$ μοίρες. Η σκληρότητα κατά Vickers έχει διαστάσεις τάσης και ορίζεται ως ο λόγος του επιβαλλόμενου φορτίου P προς το εμβαδόν $S = d^2 / [2 \cdot \sin(\alpha/2)]$ της παράπλευρης επιφάνειας του αποτυπώματος της ουλής .

$$HV = 2 \cdot P / d^2 \cdot \sin(136/2) \approx 1,8544 P/d^2$$

$$P \text{ (kp)} \quad d \text{ (mm)} \quad HV \text{ (kp / mm}^2\text{)}$$

$$\text{Σημειώνεται ότι } 1 \text{ kp / mm}^2 = 9,807 \text{ MPa}$$

Η επιλογή της γωνίας των 136 μοιρών έγινε ούτως ώστε η δοκιμή Vickers να αντιστοιχεί σε δοκιμή Brinell με $d / D = 3 / 8$. Από τη γεωμετρία προκύπτει ότι ο λόγος του βάθους διείσδυσης h προς τη μέση τιμή των μηκών των διαγωνίων της βάσης του αποτυπώματος $d = (d_1 + d_2) / 2$ είναι 1 προς 7. Ο αδαμάντινος διεισδυτής επιτρέπει τη μέτρηση πολύ σκληρών υλικών. Τα φορτία που χρησιμοποιούνται κυμαίνονται συνήθως από 1 έως 120 kp. Τα μικρά βάθη διείσδυσης που οφείλονται στην αμβλεία γωνία των 136 μοιρών επιτρέπουν τη σκληρομέτρηση λεπτών δοκιμίων. Η σκληρότητα κατά Vickers και Brinell περίπου συμπίπτουν μέχρι εκεί που μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος Brinell.

Στις συνήθεις συσκευές δοκιμίων το σύστημα επιβολής του φορτίου είναι μηχανικό (με σύστημα μοχλών). Η μέτρηση των διαστάσεων της φωτιζόμενης ουλής μπορεί να γίνει είτε σε μια γυάλινη οθόνη με σταυρόνημα και βερνίλερο είτε στην οθόνη Η/Υ με χρήση ειδικού λογισμικού. Για ένα τυπικό πείραμα κάνουμε τουλάχιστον 3 διαδοχικές σκληρομετρήσεις στο υπό εξέταση δοκίμιο σε θέσεις που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από το διπλάσιο της πλευράς της βάσης του χρησιμοποιούμενου διεισδυτή για να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση στη διαμόρφωση του περιγράμματος των ουλών.

Η Μέθοδος Rockwell

Η μέθοδος Rockwell είναι μια απλή και γρήγορη μέθοδος κατά την οποία ως αριθμός σκληρότητας χρησιμοποιείται το βάθος του διεισδυτή μετρημένο με μονάδα μέτρησης τα 2 μικρά (0,002 mm). Κατά συνέπεια η σκληρότητα Rockwell έχει διαστάσεις μήκους, σε αντίθεση με τις Brinell και Vickers που έχουν διαστάσεις τάσης. Κατά τη μέθοδο αυτή το φορτίο επιβάλλεται σε 2 στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο όπου το επιβαλλόμενο φορτίο είναι 10 kp (minor load) δημιουργείται μια μικρή ουλή που ισοδυναμεί με τοπική λείανση και το βάθος της λαμβάνεται ως βάθος αναφοράς. Κατά το δεύτερο στάδιο επιβάλλεται ένα μεγαλύτερο φορτίο (major load) το οποίο είναι συνήθως 60, 100 ή 150 kp (ανάλογα και με το είδος του διεισδυτή) για συγκεκριμένο χρόνο. Η σκληρότητα Rockwell είναι η διαφορά του βάθους διείσδυσης της πρώτης φόρτισης από το βάθος διείσδυσης μετά την αφαίρεση του 2^{ου} φορτίου σε χιλιοστά (mm). Το βάθος διείσδυσης μετρείται με ειδικό μικρόμετρο ενσωματωμένο στη συσκευή σκληρομέτρησης.

Χρησιμοποιούνται 2 είδη διεισδυτών :

- ✓ Κώνος από διαμάντι με γωνία κορυφής 120 μοιρών και ελαφρά στρογγυλεμένη κορυφή (Μέθοδοι Rockwell C, Rockwell A και Rockwell D)
- ✓ Χαλύβδινη σφαίρα με διάμετρο 1,6 mm ή 3,18 mm ή 6,35 mm ή 12,7 mm (Μέθοδοι Rockwell B, Rockwell E, Rockwell M και Rockwell R αντιστοίχως).



2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση των ναυπηγικών χαλύβων A40 και AH36 με τη μέθοδο ηλεκτρικού τόξου TIG, μεταξύ των και μεταξύ αυτών και της πρακτικής τους εφαρμογής (συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο). Για την επίτευξη του σκοπού, δημιουργήθηκε και ακολουθήθηκε αλληλουχία διεργασιών σύμφωνα με το AWS και τις προδιαγραφές του Ιαπωνικού νηογνώμονα NK, με βάση τα οποία οι συγκολλήσεις θα πρέπει να ανήκουν στην κλάση I (Παράρτημα 10) και ο έλεγχός τους θα πρέπει να γίνει με μηχανικές δοκιμές με ελάχιστη τιμή συμμόρφωσης το 80 % του UTS.

3 Πειραματική Διαδικασία

3.1 Υλικό

Παρελήφθησαν τέσσερα φύλλα χάλυβα διαστάσεων 300mm x 200mm τα οποία στάλθηκαν από το ναυπηγείο Japan Marine United Corporation. Πιο συγκεκριμένα είχαμε στη διάθεσή μας δύο φύλλα Mild Steel από την JFE Steel Corporation και δύο φύλλα High Tensile Steel AH36 από την Henan Bebon Iron and Steel Co. Η χημική σύσταση των χαλύβων όπως αυτή δίνεται από τις κατασκευάστριες εταιρείες παρουσιάζεται στον Πίνακα 9 :

	Mild Steel A40	High Tensile AH36
Chemical Element	Rate %	Rate %
C	0.16-0.18	0.18
Si	0.40 max	0.50
Mn	0.70-0.90	0.90-1.60
S	0.040 max	0.035
P	0.040 max	0.035

Πίνακας 9.Ονομαστική χημική σύσταση χαλύβων A40 και AH36

3.2 Προετοιμασία του υλικού για το μικροσκόπιο

Προετοιμάσαμε δείγματα ,ένα από το κάθε φύλλο χάλυβα προκειμένου να γίνει εξακρίβωση της χημικής σύστασης που αναφέρθηκε παραπάνω. Η πλήρης μεταλλογραφική μελέτη έγινε χρησιμοποιώντας το SEM-EDS το XRD και το οπτικό μικροσκόπιο. Για να γίνει η μελέτη των δοκιμίων στο SEM-EDS απαιτείται η κατάλληλη προετοιμασία τους.

3.2.1 Κοπή

Πριν από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία για την αποκάλυψη της δομής, πραγματοποιείται εγκάρσια τομή στη διεύθυνση έλασης των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος. Η μικροδομή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγή κατά τη διαδικασία της κοπής παρά σε κάποιο άλλο βήμα της προετοιμασίας. Η αλλαγή μπορεί να επέλθει από υπερβολική θερμότητα, μηχανική παραμόρφωση ή και τα δύο. Οι λεγόμενες "τεχνητές μικροδομές" που προκύπτουν σε αυτήν την περίπτωση είναι πιθανόν να μην επιτρέψουν την αποκάλυψη της πραγματικής δομής. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει η ζώνη παραμόρφωσης να αφαιρεθεί με μεγάλη προσοχή, με την χρήση λειαντικού τροχού εκχόνδρισης.

Η καλύτερη τεχνική κοπής του χάλυβα είναι ο αποξεστικός τροχός. Παρέχει επιφάνειες που είναι λείες, με ελάχιστη παραμόρφωση και δεν παρουσιάζονται αλλαγές στη δομή από υπερθέρμανση. Τα δοκίμια τέμνονται με τροχούς από αλούμινα (Al_2O_3), με την απαιτούμενη ελαστικότητα του συνδετικού υλικού. Το δοκίμιο διατηρείται κρύο κατά τη διάρκεια της κοπής, με τη συνεχή ροή λαδιού διαλυτού στο νερό. Επιλέγουμε τη δύναμη κοπής που θα εφαρμόσουμε, καθώς και τη σκληρότητα του υλικού κοπής. Επιλέγουμε τροχό ο οποίος αποσυντίθεται γρήγορα και αποκαλύπτει νέους κοπτικούς κόκκους. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη δύναμη κοπής, στην αφθονία του ψυκτικού υγρού και στη σταθερή συγκράτηση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κοπής. Όλες οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν την τελική δομή του υλικού που θα παρατηρήσουμε στο μικροσκόπιο. Τα κοπτικά που υπάρχουν διαθέσιμα στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας φαίνονται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14. Κοπτικά Εργαλεία Εργαστηρίου

3.2.2 Εγκιβωτισμός

Μετά την κοπή των δοκιμίων στο κατάλληλο μέγεθος ακολουθεί ο εγκιβωτισμός τους. Για τον εγκιβωτισμό του δοκιμίου επιλέγουμε ένα υλικό που μπορεί να χυτευθεί, έτσι ώστε να μην επηρεασθεί η επιφάνεια του δοκιμίου από θερμότητα ή πίεση. Συνήθως χρησιμοποιείται ρητίνη. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε η ρητίνη Acryfix. Για την παρασκευή της αναμειγνύονται 2 μέρη σκόνης με 1 μέρος καταλύτη. Τοποθετούμε το δοκίμιο μέσα σε ένα ειδικό κυλινδρικό καλούπι, προσθέτουμε το μίγμα που ετοιμάσαμε και περιμένουμε έως ότου στερεοποιηθεί η ρητίνη. Αφαιρούμε το καλούπι από το δοκίμιο το οποίο είναι πλέον έτοιμο για τις περαιτέρω διεργασίες.

3.2.3 Λείανση-Στίλβωση

Όπως αναφέραμε παραπάνω ανεξαρτήτως της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για το κόψιμο του υλικού, η δομή της επιφάνειας έχει αλλοιωθεί σε κάποιο βαθμό. Το κατεστραμμένο στρώμα απομακρύνεται χρησιμοποιώντας σταδιακά λειαντικούς τροχούς με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους (Εικόνα 15). Για τα σιδηρούχα υλικά χρησιμοποιούμε χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Με πρώτο μέγεθος κόκκου 200grit και με ακολουθία 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 και 2000 grit. Κατά τη διάρκεια της λείανσης είναι απαραίτητη η συνεχόμενη παροχή νερού για τον καθαρισμό του δίσκου και την ψύξη του δοκιμίου.

Για να έχουμε ένα επίπεδο δοκίμιο με ελάχιστη παραμόρφωση συγκρατούμε το δοκίμιο με τα ακροδάκτυλα, όσο το δυνατόν πιο κοντά στον λειαντικό τροχό, χρησιμοποιούμε μέτρια δύναμη και μετακινούμε το δοκίμιο διαδοχικά από το κέντρο προς την άκρη του χαρτιού και αντίστροφα. Εξετάζουμε την επιφάνεια περιοδικά για να καθορίσουμε εάν έχουν εξαλειφθεί οι γρατζουνιές από τον προηγούμενο δίσκο. Η λείανση συνεχίζεται δύο με τρεις φορές από τον χρόνο που απαιτείται για την εξαφάνιση των προηγούμενων γρατζουνιών προκειμένου να εξασφαλιστεί η εξάλειψη της ζώνης παραμόρφωσης. Αν κατά τη διάρκεια της λείανσης προκύψει κάποιο σφάλμα πρέπει να αυξηθεί η ασκούμενη δύναμη και να μην χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκος δίσκος. Το δοκίμιο πρέπει να παραμείνει στον δίσκο που δημιουργήθηκε το ελάττωμα ή να επιστρέψει στον προηγούμενο. Το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται κατά 90° ή/και 180° μεταξύ των σταδίων. Κατά την αλλαγή των χαρτιών το δοκίμιο πρέπει να είναι υγρό για να αποφύγουμε τυχόν ολίσθηση. Επίσης πρέπει να ξεπλένεται πριν προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, για να μην μολυνθούν τα λειαντικά χαρτιά με κόκκους από τους πιο χονδρόκοκκους λειαντικούς τροχούς. Μετά την τελική λείανση το δοκίμιο καθαρίζεται με βαμβάκι και νερό ,περιχύνεται με οινόπνευμα και στεγνώνεται με ρεύμα θερμού αέρα.



Εικόνα 15.Λειαντικός δίσκος

Η στίλβωση γίνεται σε δύο πάνινους τροχούς (Εικόνα 16). Ο πρώτος περιέχει κόκκους καρβιδίου του πυριτίου διαμέτρου 3 μm και ο δεύτερος κόκκους 1 μm . Για σιδηρούχα υλικά το γυάλισμα απαιτεί μικρό χρόνο, με σχετικά μεγάλη ασκούμενη δύναμη και μικρή περιστροφική ταχύτητα της τάξης των 200 rpm. Κατά τη διάρκεια του γυαλίσματος περιστρέφουμε το δοκίμιο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Κατά τη μετάβαση από τον ένα δίσκο στον άλλο το δοκίμιο καθαρίζεται με ένα βρεγμένο βαμβάκι και ξεπλένεται με οινόπνευμα. Επίσης το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται αντίστροφα από το δίσκο, γιατί αλλιώς δημιουργείται το φαινόμενο της "ουράς του κομήτη". Το δοκίμιο στεγνώνεται στο τέλος της διαδικασίας με ρεύμα θερμού αέρα.



Εικόνα 16. Συσκευή στίλβωσης

Μετά τις παραπάνω ενέργειες το τελευταίο στάδιο για την προετοιμασία των δειγμάτων μας για το οπτικό μικροσκόπιο είναι η χημική προσβολή.

3.2.4 Χημική Προσβολή

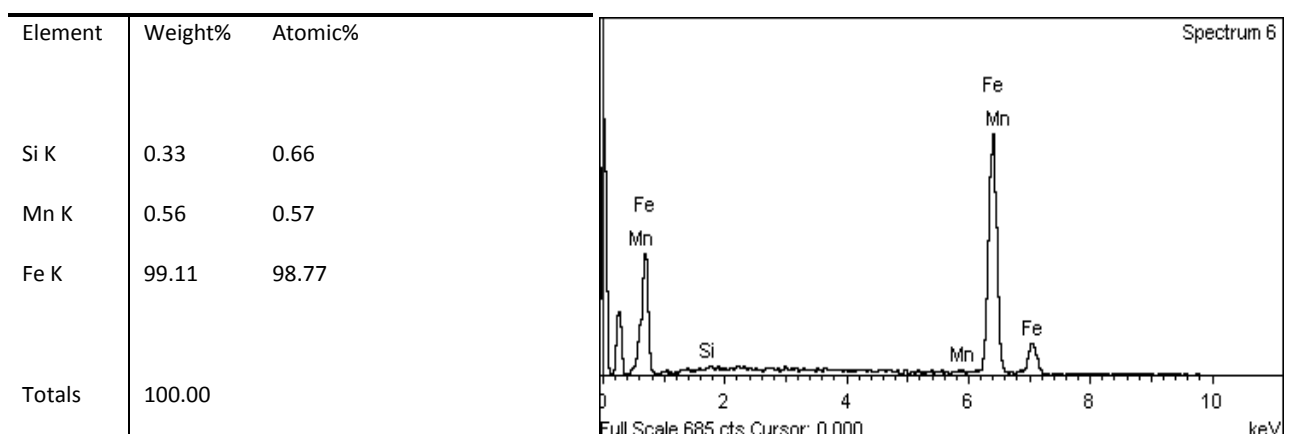
Η χημική προσβολή χρησιμοποιείται στην μεταλλογραφία, για την αποκάλυψη της μικροδομής ενός δοκιμίου και την παρατήρηση του στο μικροσκόπιο. Το δοκίμιο, για να είναι κατάλληλο για χημική προσβολή, πρέπει να έχει μια προσεκτικά στιλβωμένη επίπεδη επιφάνεια, ελεύθερο από τη σκόνη και τα έλαια. Παρά το ότι μερικές πληροφορίες μπορούν να συλλεχθούν από το γυαλισμένο δοκίμιο, η μικροδομή συνήθως αποκαλύπτεται μόνο μετά τη χημική προσβολή. Μόνο χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν διαφορά στην αντανακλαστικότητα τους 10% ή περισσότερο, είναι δυνατόν να είναι ορατά χωρίς προσβολή.

Αυτό ισχύει για μικροδομικά χαρακτηριστικά με μεγάλες χρωματικές διαφορές ή με σχηματική διαφοροποίηση στη σκληρότητά τους οι οποία προκαλεί το σχηματισμό της ανάγλυφης επιφάνειας. Ρωγμές, πόροι, οπές και με μεταλλικά εγκλείσματα μπορούν επίσης να παρατηρηθούν χωρίς χημική προσβολή.

Ένα δοκίμιο το οποίο είναι μόνο γυαλισμένο, συχνά δεν αποκαλύπτει τη μικροδομή του, διότι το φως αντανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις ομοιόμορφα. Το ανθρώπινο μάτι δε μπορεί να ξεχωρίσει πολύ μικρές διαφορές στην αντανακλαστικότητα, οπότε πρέπει να δημιουργηθεί στην εικόνα αντίθεση (contrast). Παρ'ότι αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως χημική προσβολή (etching) και αναφέρεται πάντα στην επιλεκτική χημική διαλυτοποίηση των διαφόρων δομικών χαρακτηριστικών. Οι μεταλλογραφικές μέθοδοι αντίθεσης συμπεριλαμβάνουν ηλεκτροχημικές και χημικές τεχνικές προσβολής. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Nital ($H_2O + HNO_3$) 2%.

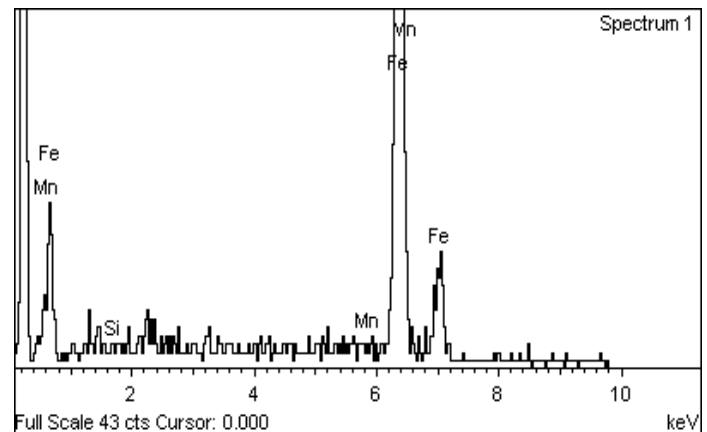
Τα αποτελέσματα από την παρατήρηση των δοκιμίων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες καθώς και τα αποτελέσματα για την επαλήθευση του ποσοστού του άνθρακα που περιέχεται στον χάλυβές μας :

Για τον Mild Steel έχουμε τα παρακάτω στοιχεία :



Για τον High Tensile Steel έχουμε τα παρακάτω στοιχεία :

Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.61	1.21
Mn K	0.37	0.38
Fe K	99.01	98.41
Totals	100.00	



3.3 Μηχανική Προετοιμασία

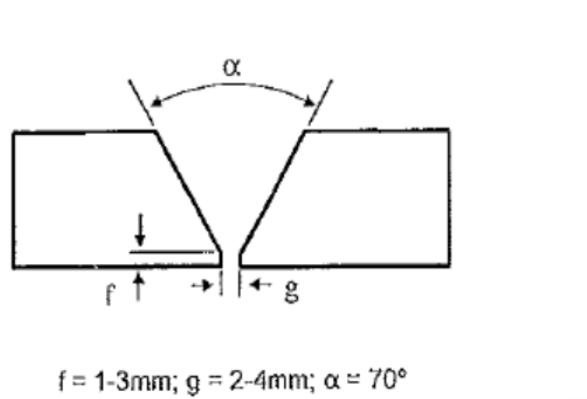
Στη συνέχεια κάναμε μηχανική προετοιμασία στα προς συγκόλληση δοκίμιά μας μέσω CNC για τη δημιουργία κατάλληλης λοξοτομής σύμφωνα με το WPS που μας είχε σταλεί από το ναυπηγία και το οποίο αφορούσε τα είδη των χαλύβων που μελετήσαμε και το WPS που δημιουργήθηκε για την παρούσα εργασία (Παράρτημα 8). Τα φύλλα του χάλυβα που μελετήσαμε είχαν πάχος 8mm οπότε σύμφωνα με το WPS έπρεπε να γίνει μια λοξοτομή 60° με ένα πάτημα της τάξης του 1mm. Οι λοξοτομές έγιναν στην APELLA S.A με τη χρήση του CNC Horizontal Lathe, HAAS SL-30 με Max Cutting (\varnothing 17" x 34"). Η διαδικασία της λοξοτομής έγινε με βάση το Welding Procedure Specification που δημιουργήθηκε κατά το σχεδιασμό και επισυνάπτεται στο τέλος της εργασίας. Τα φύλλα του χάλυβά μας είχαν διαστάσεις 200mmX300mm και προκειμένου να γίνουν οι λοξοτομές κόπηκαν αρχικά στη μέση οπότε και προέκυψαν δυο κομμάτια για το κάθε φύλλο χάλυβα με διαστάσεις 200mm X 150mm το κάθε ένα.

Στη συνέχεια με τη χρήση κοπτικού άκρου TiALN που χρησιμοποιήθηκε έγινε η λοξοτομή που απαιτούνταν για να προετοιμαστούν τα φύλλα του χάλυβα για συγκόλληση. Το κοπτικό άκρο καθώς και η κεφαλή φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 17. Κοπτικό άκρο TiAlN

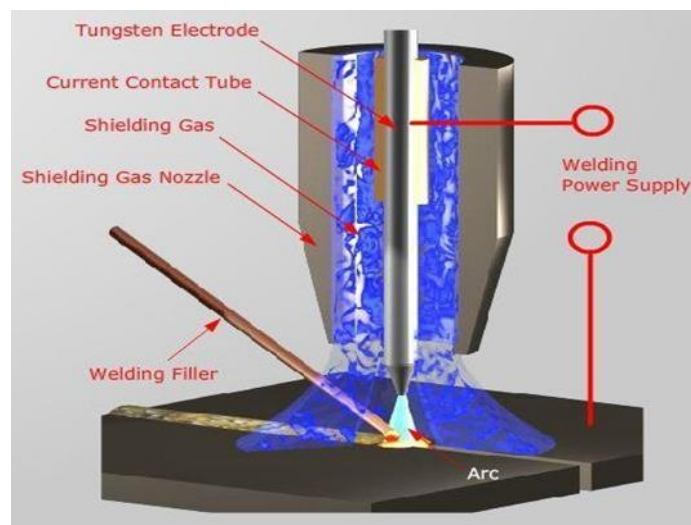
Η λοξοτομή που έγινε στα δοκίμιά μας και αναφέρθηκε παραπάνω φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5) :



Σχήμα 5 .Απεικόνιση λοξοτομής

Η λοξοτομή στα δοκίμιά μας έγινε λόγω του διαστασιολογικού περιορισμού της μεθόδου TIG.

Στη συνέχεια και αφού όλα τα φύλλα του χάλυβα είχαν προετοιμαστεί έγινε η συγκόλλησή τους στην APELLA S.A με μηχανή συγκόλλησης της KEMPRI και πιο συγκεκριμένα την Master Tig AC/DC 3.500 W. Επιλέχτηκε να γίνει συγκόλληση με τάση της τάξης των 110 A και προστατευτικό αέριο με παροχή 6 lt/min. Το προστατευτικό αέριο ήταν Αργό Ar 99.999 %. Η οπτική αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6) :



Σχήμα 6 .Οπτική αναπαράσταση συγκόλλησης TIG

Η διαδικασία της συγκόλλησης από τη λοξοτομή μέχρι και τη ραφή της συγκόλλησης φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες :



18. Λοξοτομές δοκιμίων έτοιμα προς συγκόλληση

Εικόνα 19. Συγκολλημένα δοκίμια High Tensile Steel



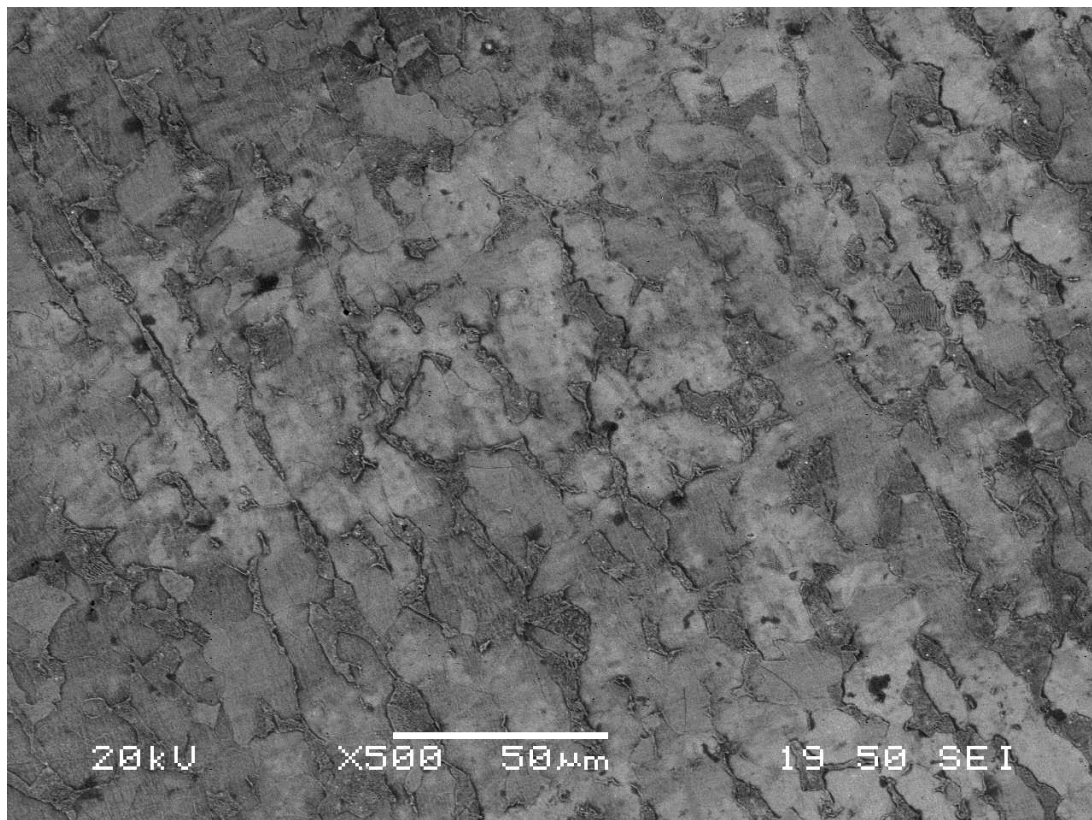
Αμέσως μετά τη συγκόλληση των δοκιμίων μας έγινε και NDT προκειμένου να ελεγχθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων. Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν ήταν μη καταστρεπτικός έλεγχος με διεισδυτικά υγρά και μη καταστρεπτικός έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκολλήσεις ήταν αποδεκτές και έτσι συνεχίσαμε την πειραματική μας διαδικασία.

4 Πειραματικό Μέρος

4.1 Μεταλλογραφία

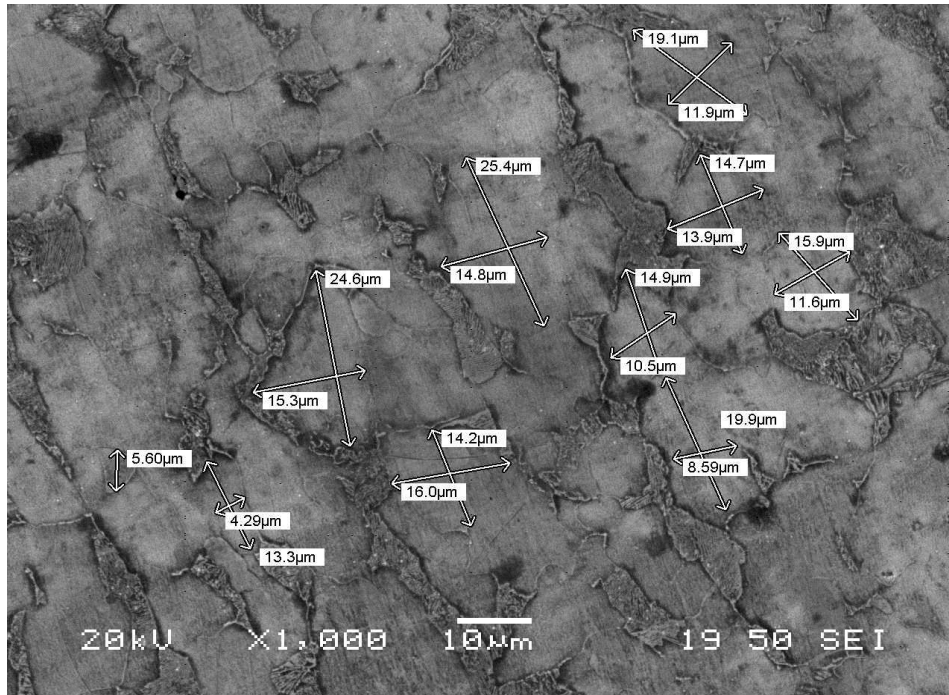
Πραγματοποιήθηκε παρατήρηση της μικροδομής των δοκιμίων αμέσως μετά τη συγκόλληση τους με τη χρήση εικόνων που παραλήφθηκαν από το SEM. Συγκεκριμένα από το ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης – SEM τύπου JEOL6380LV που βρίσκεται στη σχολή Μηχανικών Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών. Παρακάτω γίνεται παράθεση και σχολιασμός των εν λόγω εικόνων.

Για τον Mild Steel οι μικρογραφίες που ελήφθησαν είναι οι εξής :



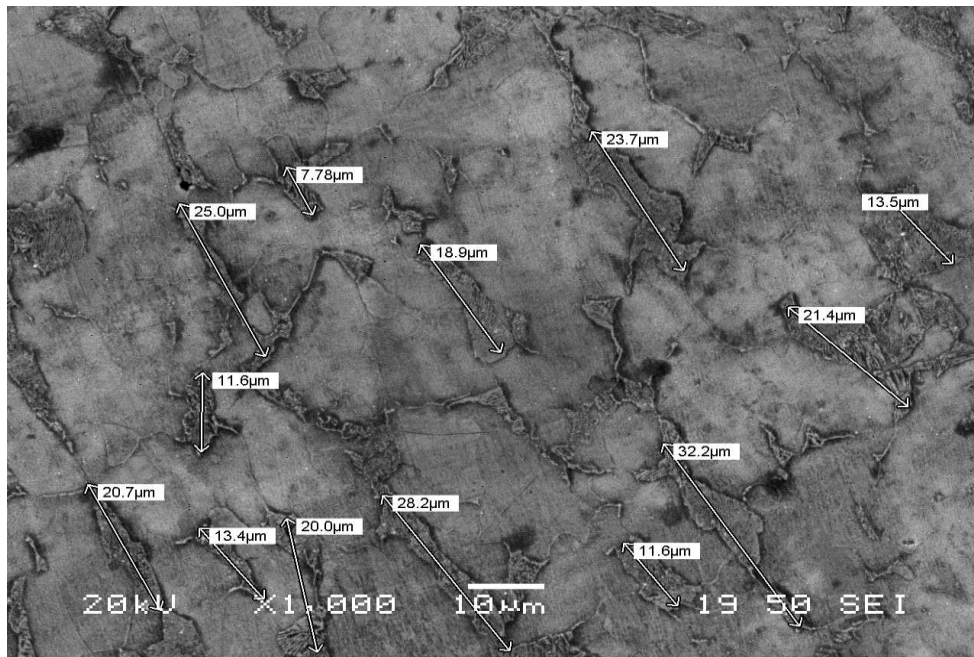
Εικόνα 20. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x500 για τον Mild Steel

Στη συγκεκριμένη μικρογραφία παρατηρείται ανάπτυξη α -Fe (φερρίτη) στα όρια των κόκκων γ -Fe (ωστενίτη) που οδηγεί σε ένα δίκτυο κόκκων κατά μήκος των ορίων κόκκων του α , στο οποίο τα διαφασικά όρια α - γ είναι μη συνεκτικά. Πιο χαρακτηριστικά οι κόκκοι του φερρίτη διακρίνονται και μετρώνται στη συνέχεια.(Εικόνα 21)



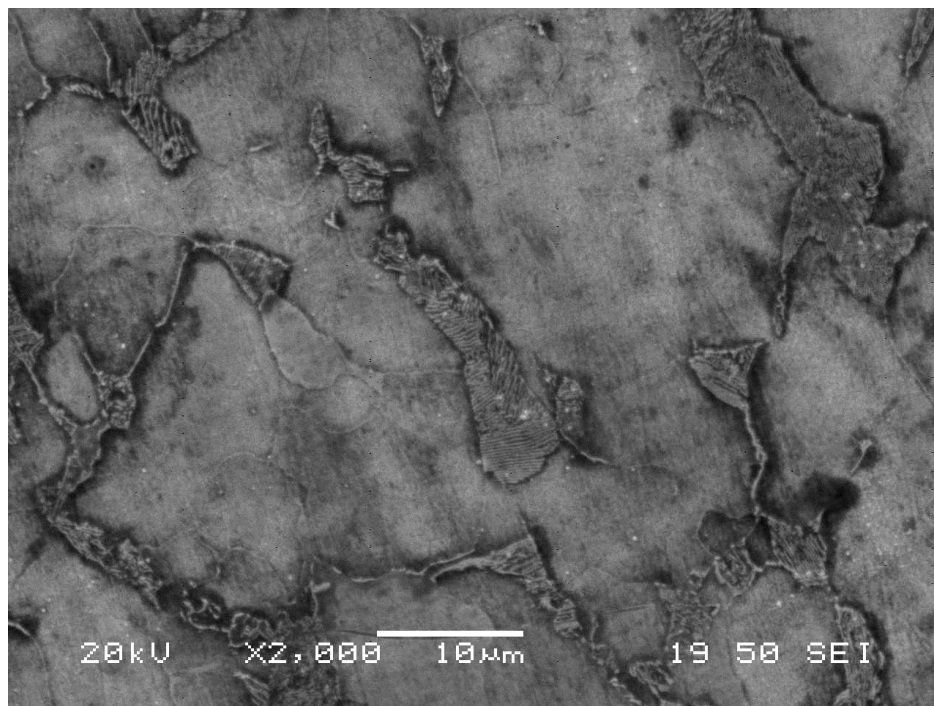
Εικόνα 21. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000 στους κόκκους του φερρίτη

Παρατηρούνται ανάμεσα στους κόκκους του φερρίτη και οι κόκκοι του περλίτη αντίστοιχα.(Εικόνα 22)



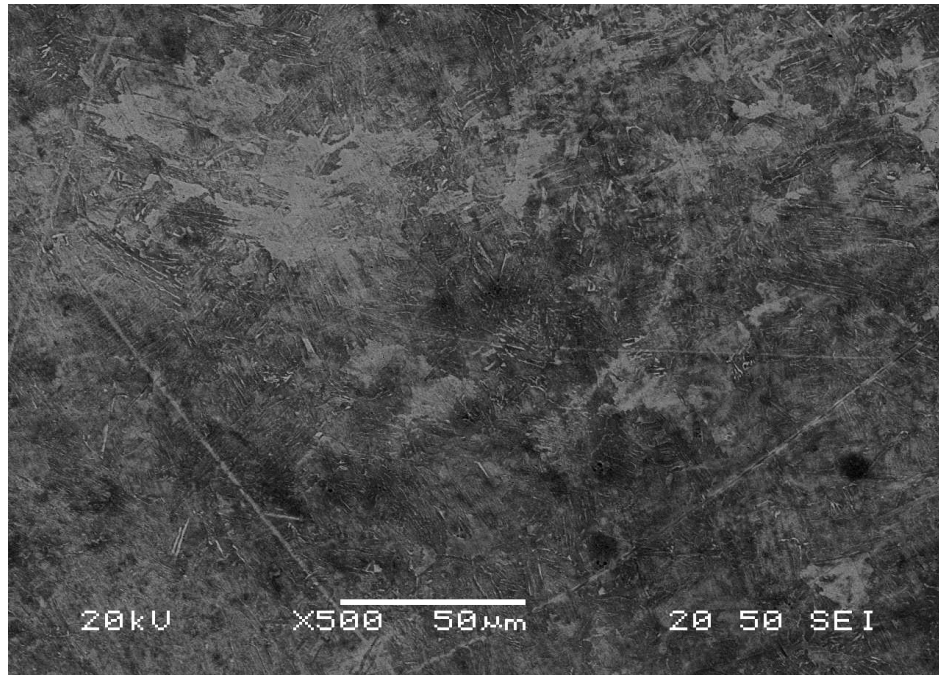
Εικόνα 22. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000 στους κόκκους του περλίτη

Δεν υπάρχει δεδομένη σχέση κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού μεταξύ μητρικής και προϊόντων φάσεων με συνέπεια ο μετασχηματισμός να προχωρήσει σε ένα επίπεδο συνήθειας μη-πολυεδρικό. (Εικόνα 23)

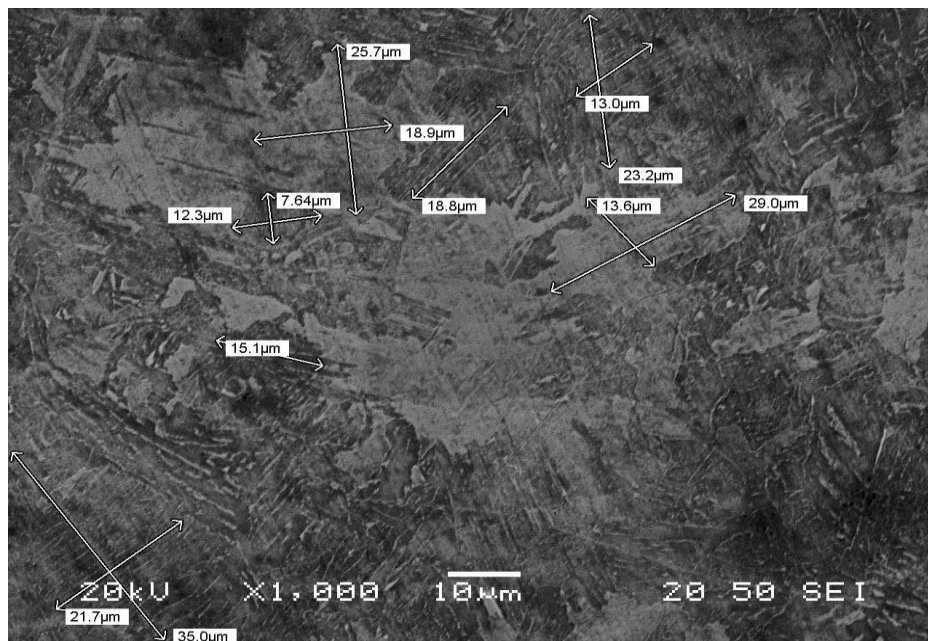


Εικόνα 23. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x2000 στους κόκκους του περλίτη

Για τον High Tensile Steel οι μικρογραφίες που ελήφθησαν παραθέτονται στη συνέχεια και παρατηρείται μικρότερο μέγεθος κόκκων και η απουσία της τυπικής φερριτοπερλιτικής δομής.

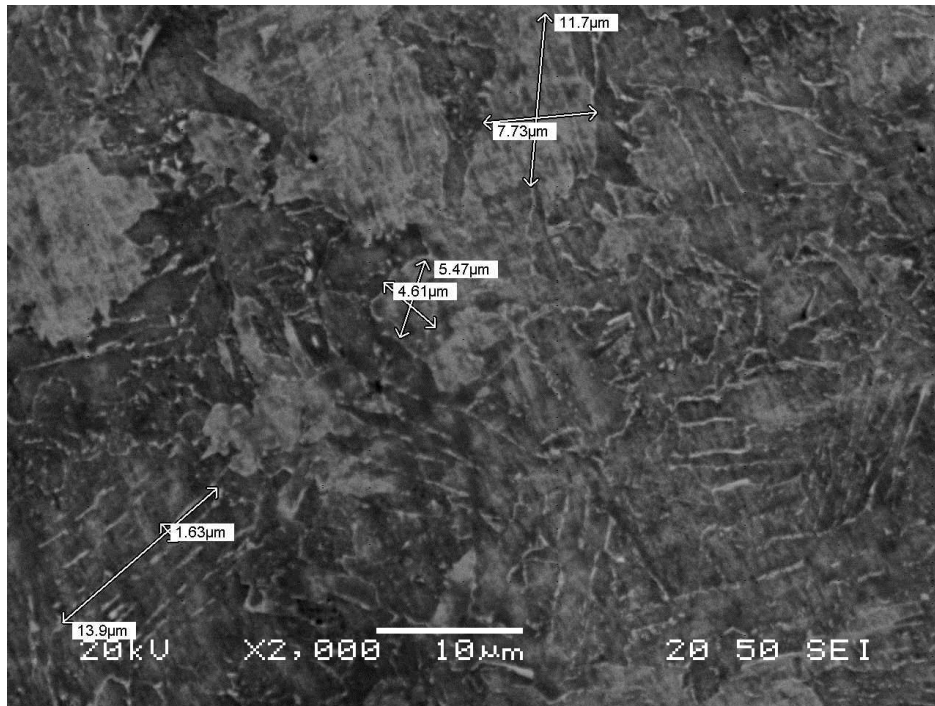


Εικόνα 24. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x500



Εικόνα 25. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000

Παρατηρώντας την παραπάνω μικρογραφία (Εικόνα 25) διαφαίνεται η δενδριτική ανάπτυξη που προσεγγίζει τη μορφολογία του σκελετοειδούς φερρίτη καθώς επίσης γίνονται εύκολα αντιληπτά τα όρια των κόκκων του ωστενίτη που μετασχηματίστηκαν.

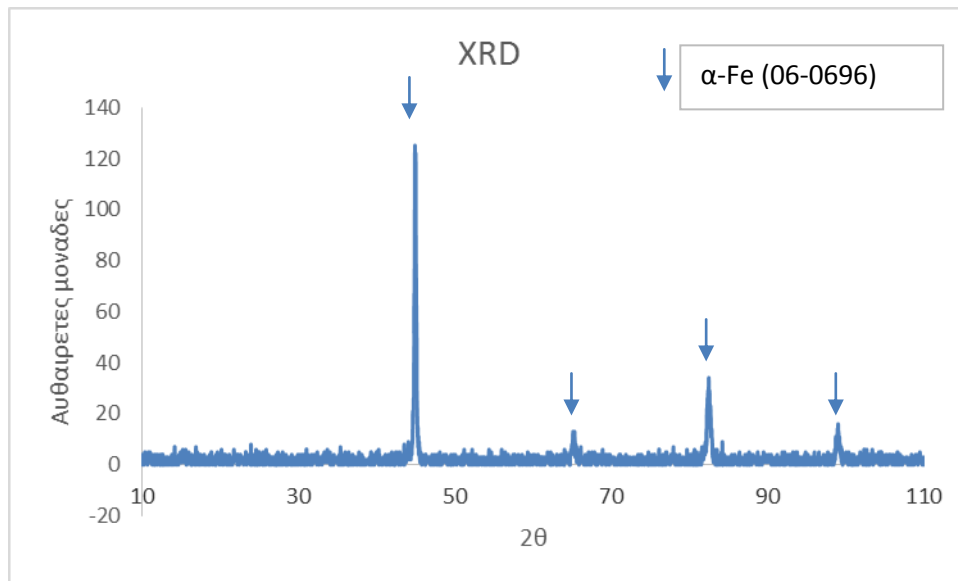


Εικόνα 26. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x2000

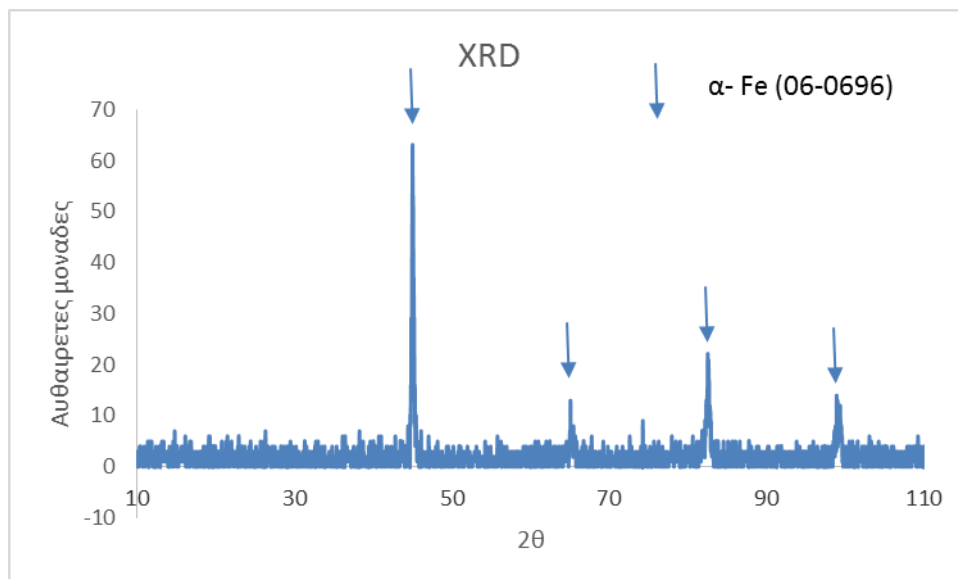
Στην παραπάνω μικρογραφία (Εικόνα 26) παρατηρείται η μορφολογία της διεπιφάνειας της ζώνη τήξης με τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ).

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από το XRD με σκοπό την ταυτοποίηση των συμμετέχουσων φάσεων είναι τα παρακάτω

Για τον Mild Steel είναι :



Για τον High Tensile Steel είναι :



Και στα δύο διαγράμματα ξεχωρίζει η φάση α -Fe στο κυβικό χωροκεντρομένο κρυσταλλικό σύστημα. Η καρτέλα και για τα δύο διαγράμματα είναι η 06-0696.

4.2 Σκληρομετρήσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μέθοδος σκληρομέτρησης που χρησιμοποιήσαμε είναι η σκληρομέτρηση Vickers με σταθερή δύναμη στα 98N. Το μηχάνημα με το οποίο γίνονται οι σκληρομετρήσεις στο εργαστήριο φαίνεται στο σχήμα 11. Οι μετρήσεις παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα :

Για τον Mild Steel

Μετρήσεις	Μέσος Όρος Διαστάσεων Διαγωνίων (mm)	Σκληρότητα (Vickers)
Μέτρηση 1 ^η	0,33	170
Μέτρηση 2 ^η	0,325	176
Μέτρηση 3 ^η	0,335	165
Μέτρηση 4 ^η	0,315	187
Μέτρηση 5 ^η	0,335	165
Μέτρηση 6 ^η	0,335	165
Μέτρηση 7 ^η	0,325	176
Μέτρηση 8 ^η	0,315	187
Μέτρηση 9 ^η	0,335	165
Μέτρηση 10 ^η	0,325	176
Μέτρηση 11 ^η	0,33	170
Μέτρηση 12 ^η	0,315	187

Πίνακας 10.Σκληρομετρήσεις για τον Mild Steel

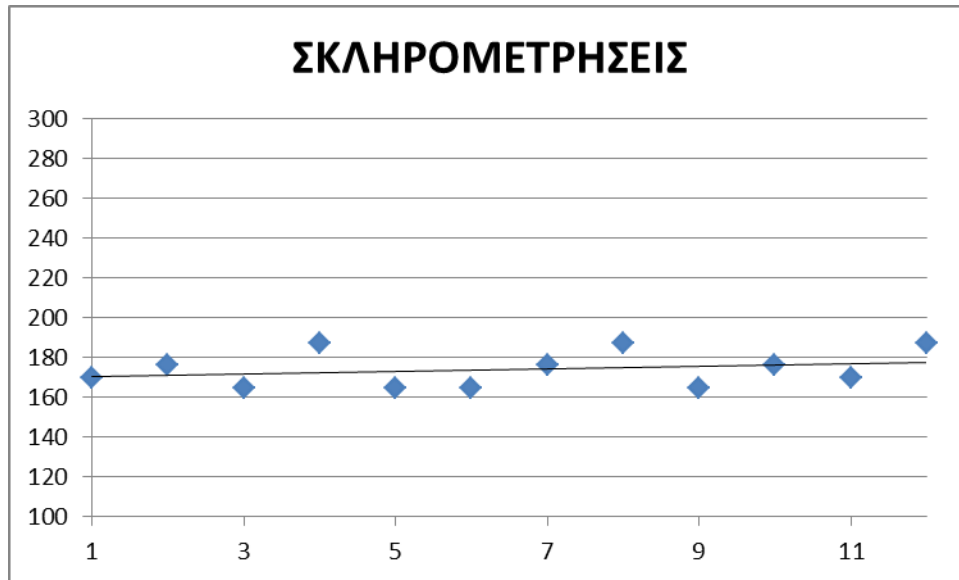
Για τον High Tensile Steel

Μετρήσεις	Μέσος Όρος Διαστάσεων Διαγωνίων (mm)	Σκληρότητα
Μέτρηση 1 ^η	0,325	176
Μέτρηση 2 ^η	0,32	181
Μέτρηση 3 ^η	0,33	170
Μέτρηση 4 ^η	0,325	176
Μέτρηση 5 ^η	0,305	199
Μέτρηση 6 ^η	0,325	176
Μέτρηση 7 ^η	0,33	170
Μέτρηση 8 ^η	0,325	176
Μέτρηση 9 ^η	0,325	176
Μέτρηση 10 ^η	0,32	181
Μέτρηση 11 ^η	0,32	181
Μέτρηση 12 ^η	0,305	199

Πίνακας 11. Σκληρομετρήσεις για τον High Tensile Steel

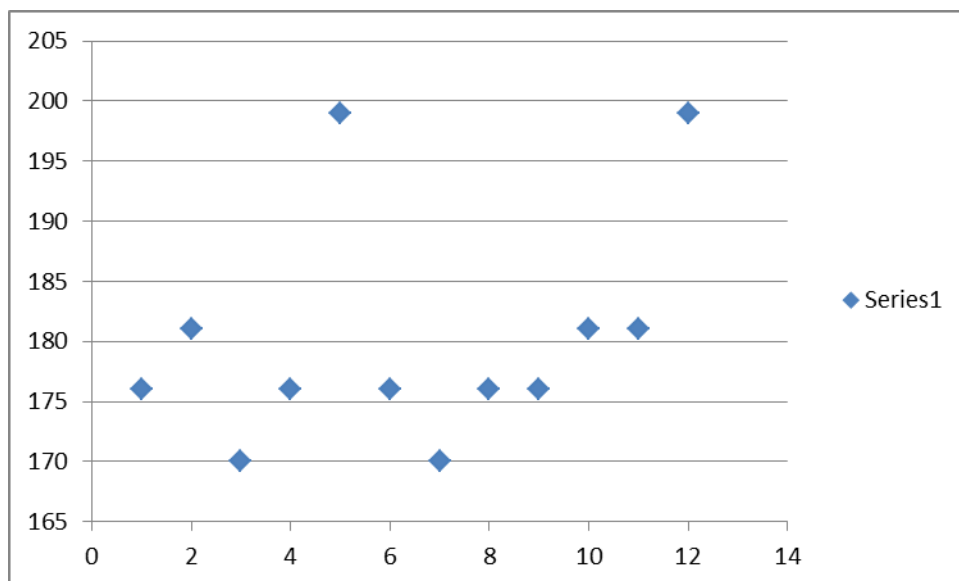
Τα διαγράμματα από τις τιμές που πήραμε για τις σκληρομετρήσεις μας φαίνονται παρακάτω.

Για τον Mild Steel το διάγραμμα που προκύπτει από τις σκληρομετρήσεις που καταγράψαμε είναι το παρακάτω :



Διάγραμμα 2.Μεταβολή Σκληρομετρήσεων Mild Steel

Για τον High Tensile Steel το διάγραμμα που προκύπτει από τις σκληρομετρήσεις που καταγράψαμε είναι το παρακάτω :



Διάγραμμα 3.Μεταβολή Σκληρομετρήσεων High Tensile Steel

4.3 Μηχανικές Αντοχές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφού τα δοκίμια συγκολλήθηκαν κόπηκαν προκειμένου να γίνει η διαδικασία του εφελκισμού. Σύμφωνα με το πρότυπο Ε8Μ κόπηκαν και εφελκίστικαν έξι συνολικά δοκίμια. Τρία για τον Mild χάλυβα και τρία για τον High Tensile χάλυβα. Οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι το βήμα στη διαδικασία εφελκυσμού ήταν 0,02 mm.

Είδος Χάλυβα	Mild Steel	High Tensile Steel
Μέγεθος 1 ^{ου} Δοκιμίου (mm)	8,39 x 6,13	8,19 x 5,95
Μέγεθος 2 ^{ου} Δοκιμίου (mm)	8,28 x 5,96	8,16 x 5,96
Μέγεθος 3 ^{ου} Δοκιμίου (mm)	8,35 x 5,96	8,17 x 5,98

Πίνακας 12. Διαστάσεις Δοκιμίων Εφελκυσμού

Τα δοκίμια υπέστησαν θραύση που έχει κυρίως όλκιμα χαρακτηριστικά. Ο λαιμός που δημιουργείται κατά τον εφελκισμό των δοκιμίων είναι ένα ακόμη στοιχείο που δείχνει την όλκιμη θραύση τους. Η δημιουργία του λαιμού οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ξεπεραστεί η αντοχή του υλικού οι παραμορφώσεις παύουν να κατανέμονται ομοιόμορφα με αποτέλεσμα σε κάποια διατομή του δοκιμίου οι παραμορφώσεις βαθμιαία να γίνονται πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες διατομές.

Η επιμήκυνση και η παραμόρφωση μετρήθηκε με εκτενσιόμετρο όπως φαίνεται και στις εικόνα 27 .



Εικόνα 27 Εκτενσιόμετρο κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού

Από τις εικόνες διαφέρεται επίσης και η δημιουργία λαιμού στα δοκίμια.



Εικόνα 28 Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό δοκιμίου High Tensile Steel



Εικόνα 29 Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό δοκιμίου Mild Steel



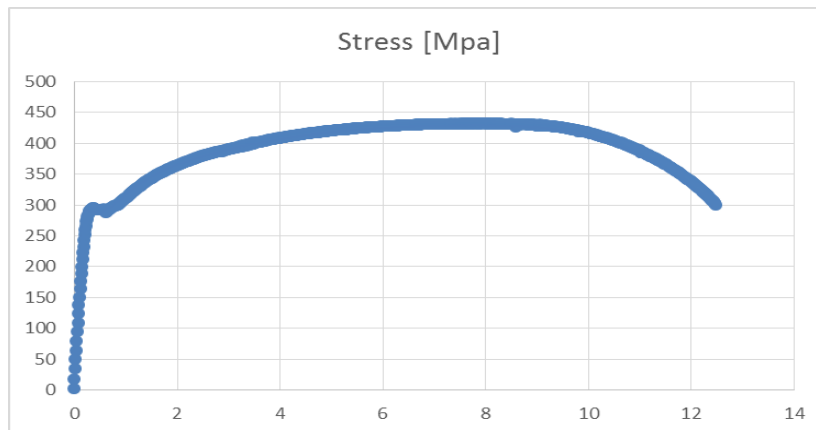
Εικόνα 30 Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό δοκιμίου High Tensile Steel

Για το κάθε ένα από τα δοκίμια τα στοιχεία φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Για τον Mild Steel :

Δοκίμιο 1^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :

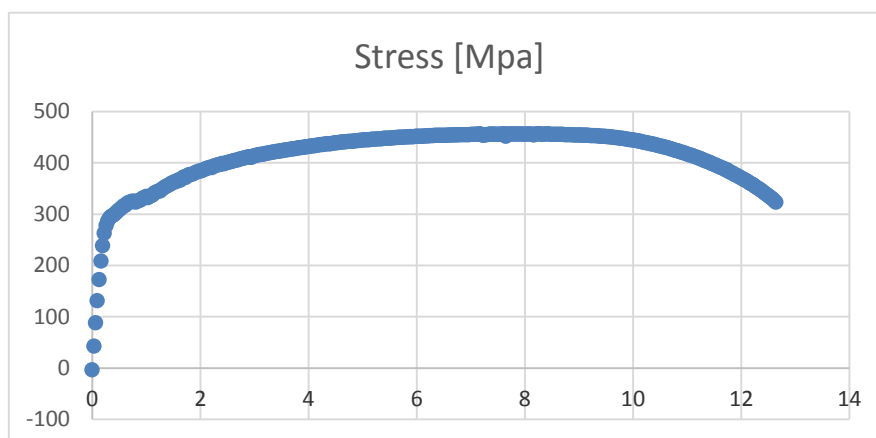


Διάγραμμα 4.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 1^{ου} δοκιμίου Mild Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το ανώτατο όριο αντοχής 431 MPa και το όριο διαρροής είναι 276 MPa.

Δοκίμιο 2^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :

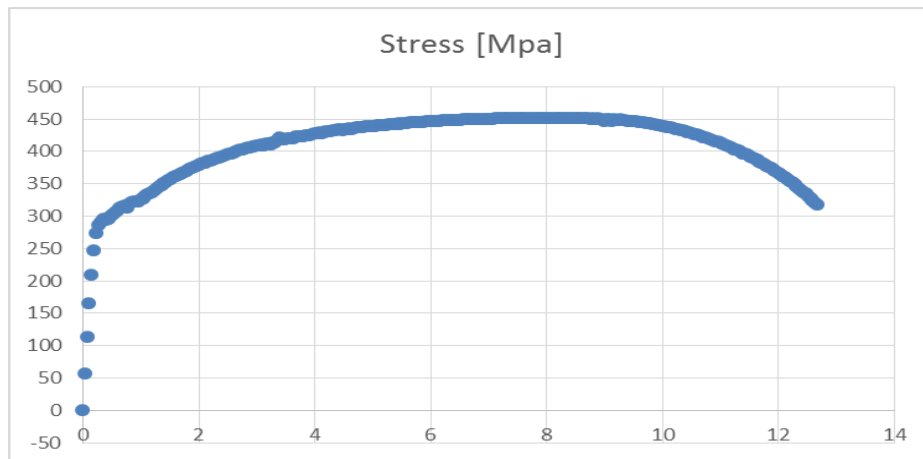


Διάγραμμα 5.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 2^{ου} δοκιμίου Mild Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το ανώτατο όριο αντοχής είναι 455 MPa και το όριο διαρροής είναι 262 MPa.

Δοκίμιο 3^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :



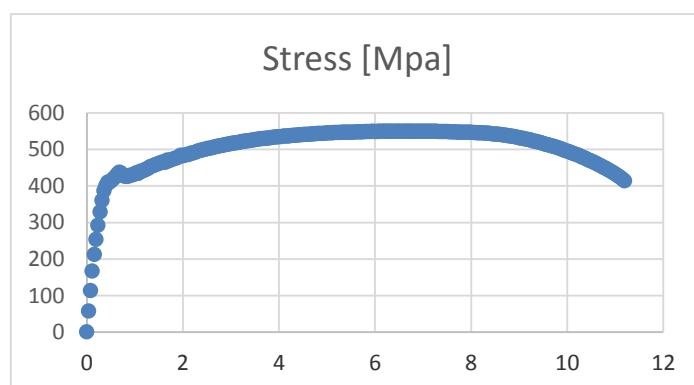
Διάγραμμα 6.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 3^{ου} δοκιμίου Mild Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το ανώτατο όριο αντοχής είναι 450 MPa και το όριο διαρροής είναι 273 MPa.

Για τον High Tensile Steel :

Δοκίμιο 1^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :

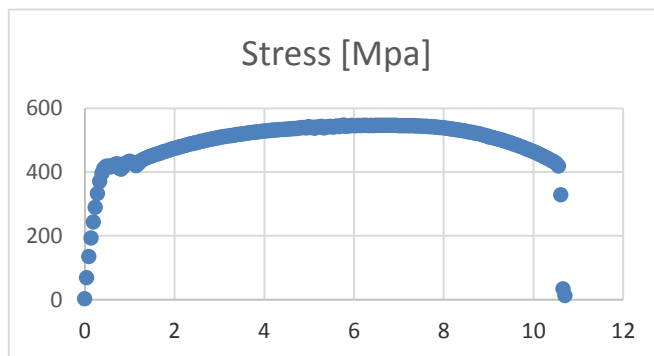


Διάγραμμα 7.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 1^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το μέγιστο όριο αντοχής είναι 550 MPa και το όριο διαρροής είναι 386 MPa.

Δοκίμιο 2^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :

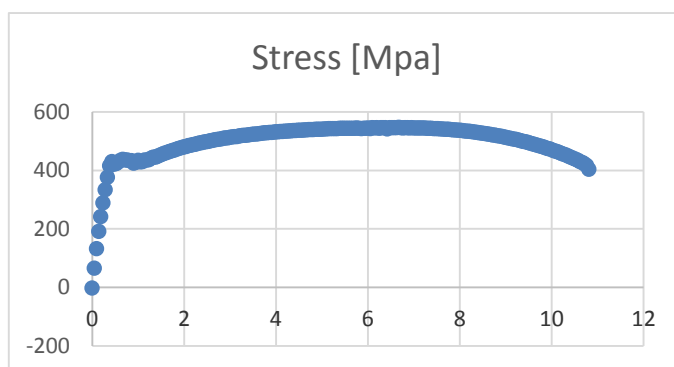


Διάγραμμα 8.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 2^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το μέγιστο όριο αντοχής είναι 546 MPa και το όριο διαρροής είναι 396 MPa.

Δοκίμιο 3^ο

Το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι το εξής :



Διάγραμμα 9.Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 3^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το μέγιστο όριο αντοχής είναι 542 MPa και το όριο διαρροής είναι 376 MPa.

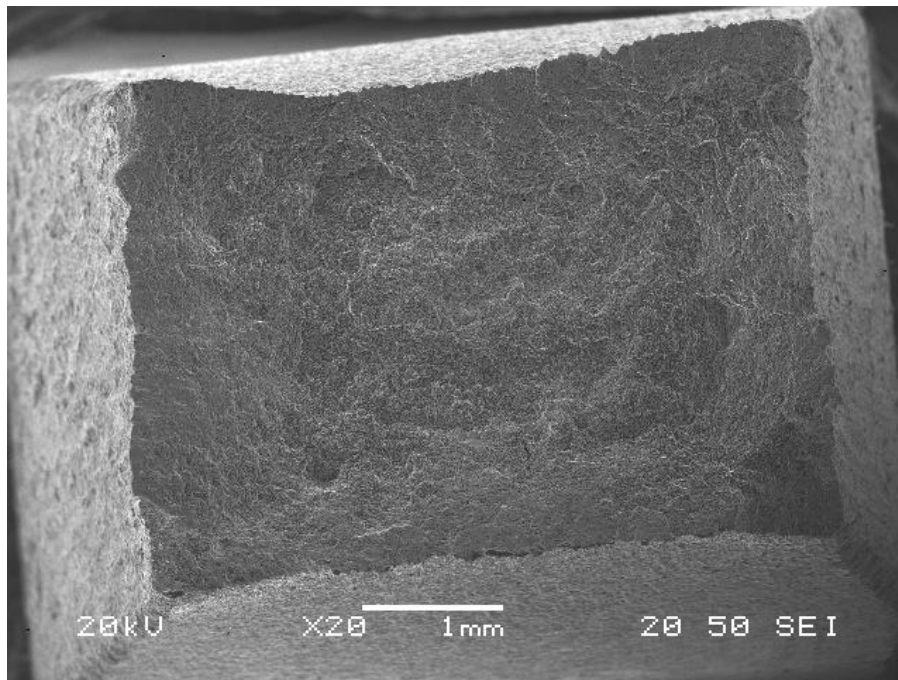
Είδος Χάλυβα	UTS (MPa)	σ (Τυπική Απόκλιση)	Re (MPa)	σ (Τυπική Απόκλιση)	ϵ
A40	431		276		12,4768
	455	15,14376	262	7,371115	12,6447
	450		273		12,6804
AH36	550		386		11,1967
	546	4	396	10	10,7052
	542		376		10,7663

Πίνακας 13. Συνοπτικές τιμές εφελκισμών

4.4 Μεταλλογραφία στις Θραύσεις

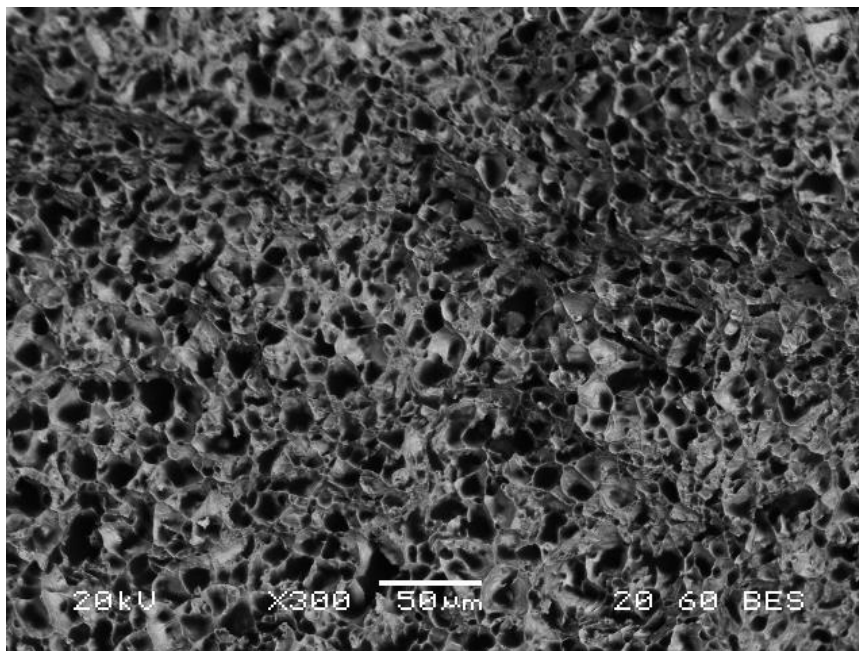
Αμέσως μετά τη διαδικασία εφελκυσμού έγιναν μεταλλογραφικές παρατηρήσεις στις θραύσεις. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες που λήφθηκαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Πιο συγκεκριμένα για τον Mild Steel βλέπουμε το λαιμό που δημιουργήθηκε κατά τον εφελκυσμό (Εικόνα 31).

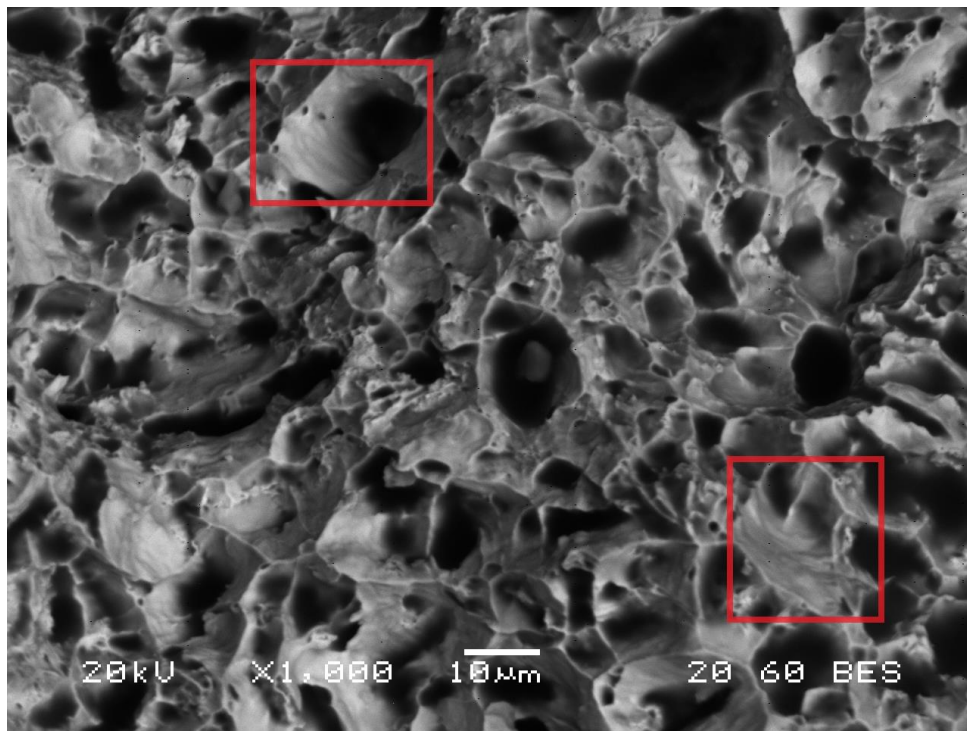


Εικόνα 31. Δημιουργία λαμού κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου Mild Steel

Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες που αφορούν τον Mild Steel η λήψη των οποίων έγινε στο SEM με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES backscattered electron image).



Εικόνα 32. Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x300 της μικροδομής της θραύσης

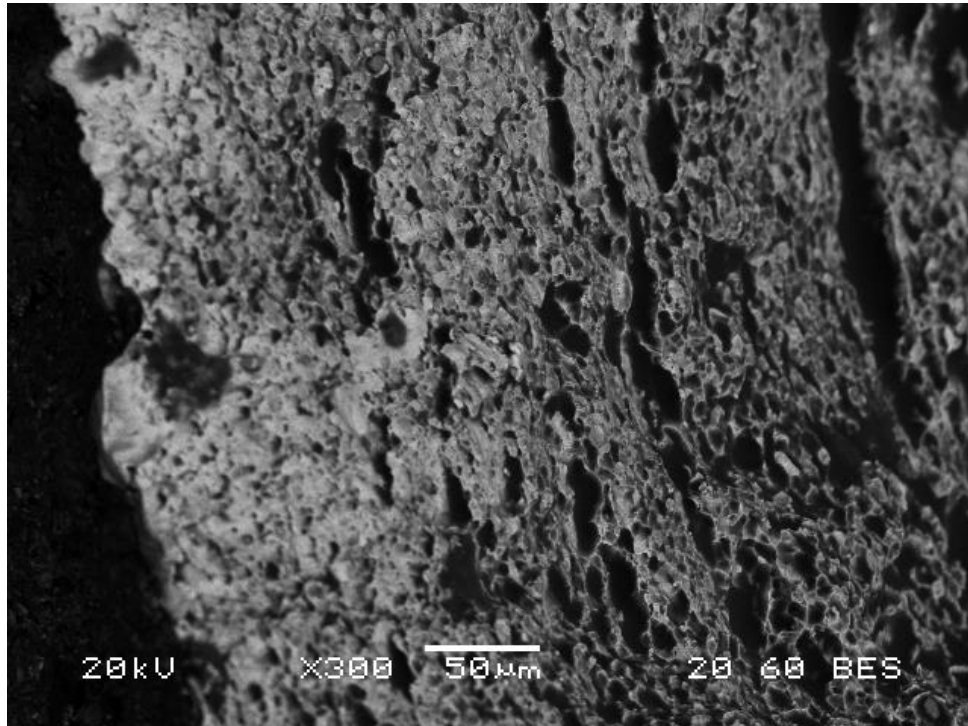


Εικόνα 33 Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x1000 της μικροδομής της θραύσης

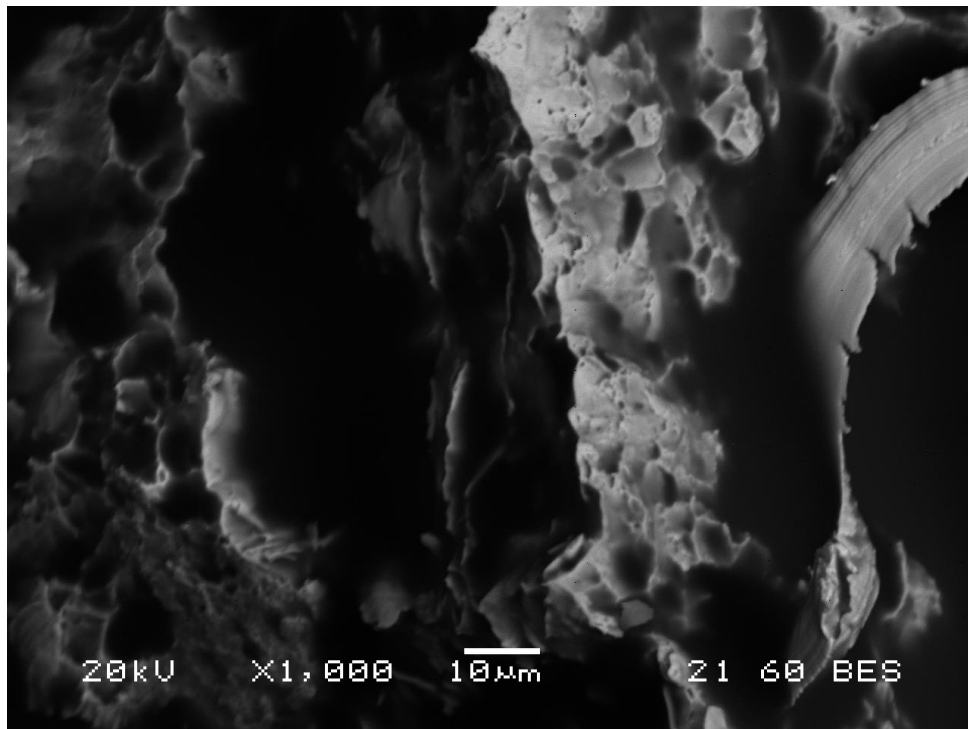
Παρατηρώντας τη μικρογραφία της Εικόνας 32 και της Εικόνας 33 διακρίνουμε ότι εμφανίζεται κυψελωτή μορφολογία η οποία προέρχεται από τη θραύση με συνένωση μικροκενών. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 32 παρατηρείται πάνω αριστερά μια στένωση μικροκενών που οδήγησε σε όλκιμη αστοχία. Επιπρόσθετα παρατηρείται σχισμός κατά τόπους στη φάση του σεμεντίτη ο οποίος είναι μέσα στον περλίτη σε μορφή πλάκας. Επιπρόσθετα στη μικρογραφία της Εικόνας 33 διακρίνονται έντονα τα επίπεδα ολίσθησης που δημιουργήθηκαν κατά τις θραύσεις.

Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός των μεταλλογραφικών παρατηρήσεων που αφορούν τους High Tensile Steels. Και σε αυτή την περίπτωση έγινε θραύση η οποία επήλθε με συνένωση μικροκενών. Στη συνέχεια παραθέτονται εικόνες από το SEM

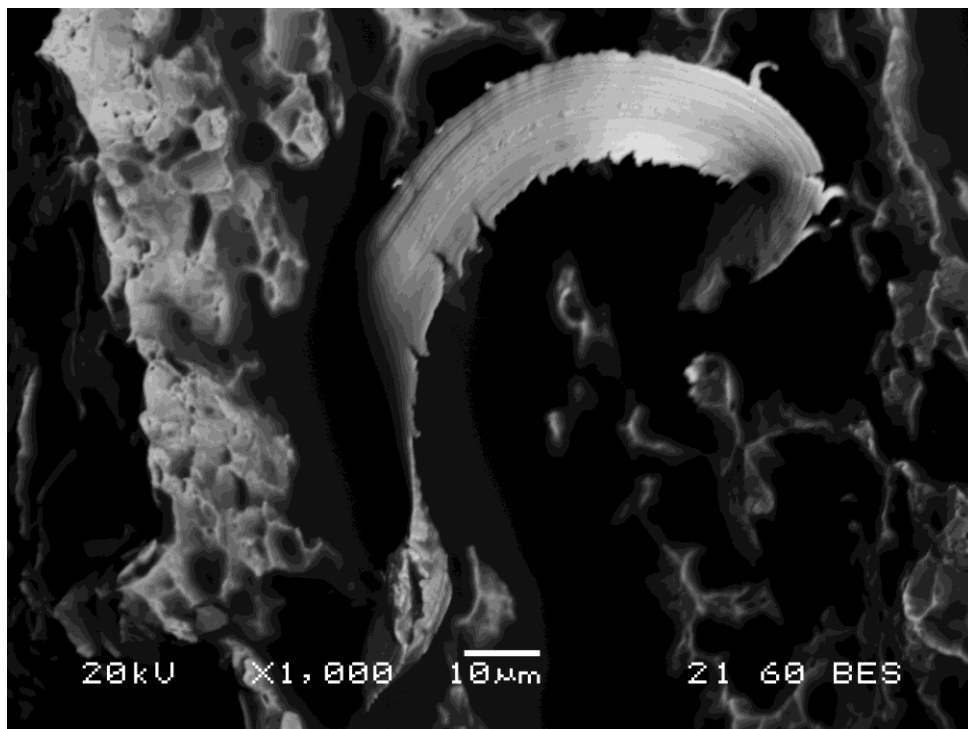
οι οποίες είναι και αυτές με τη με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES backscattered electron image).



Εικόνα 34. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x300 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel



Εικόνα 35. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel



Εικόνα 36. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel



Παρατηρώντας την Εικόνα 35 και 36 διαφαίνεται ότι τα θραυστογραφικά χαρακτηριστικά της ανοιχτόχρωμης περιοχής είναι πολύ μικρότερα από την σκουρόχρωμη γεγονός που παραπέμπει στη φάση του περλίτη.



5 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική παρουσίασε την παραγωγική διαδικασία που απαιτείται στη συγκόλληση ναυπηγικών χαλύβων, σύμφωνα με τον Ιαπωνικό νηογνώμονα NK και το AWS.

Η πιστή τήρηση της διαδικασίας και οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν, οδήγησαν στη συμμόρφωση των εν λόγω συγκολλήσεων με τις προδιαγραφές.

Ως εκ τούτου η συγκόλληση ναυπηγικών χαλύβων (A40 και AH36) με τη μέθοδο TIG είναι αποδεκτή και εναλλακτική της συγκόλλησης βυθιζομένου τόξου για τα ίδια υλικά, οδηγώντας στο 100 % του UTS.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Βαμβακούσης Ιωάννης-Νικόλαος, Μελέτη ετερογενούς συγκόλλησης βιομηχανικών κραμάτων με έμφαση στα συστήματα χάλυβα-αλουμινίου, Πειραιάς 2014
2. Φωτόπουλος Νικόλαος, Μελέτη μετωπικών συγκολλήσεων ναυπηγικού χάλυβα DH36 με τις μεθόδους GMAW και FCAW, Αθήνα 2010
3. Παπαντωνίου Βασίλης, Συγκόλληση ανοξείδωτου χάλυβα στη ναυπηγική, Αθήνα 2010
4. Γρηγόρης.Ν.Χαϊδεμενόπουλος, Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις Εκδ.Τζιόλα
5. Δρ.Στέργιος Μαρόπουλος, Τεχνολογία Συγκολλήσεων
6. Δρ.Γεώργιος Φούρλαρης, Μετασχηματισμοί Φάσεων
7. Θ.Διαμαντούδης, Συγκολλήσεις Μετάλλων Εκδ.Παπασωτηρίου 2000
8. Χρυσουλάκης και Δ.Παντελής, Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών Εκδ.Παπασωτηρίου 1996
9. Ever-library.gr, Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο Πειραια
10. Jinhua Teng et al., *Repair of arc welded AH36 joint by underwater friction stitch welding*, Materials and Design 118(2017) 266-278
11. K.R.Jagtap et al., *Effect of Welding Parameters on Tensile & Yield Strength of IS 2062 grade Steel Using Desing of Experiment Approach*, Materials Today : Proceedings 4 (2017) 7875-7883
12. Hee Seon Bang, Han Sur Bang, You Chul Kim, Sung Ming Joo, *Analysis of residual stress on AH32 butt joint by hybrid CO₂ laser-GMA welding*, Computational Materias Science 49 (2010) 217-221
13. B.T.Timofeev & V.A.Fedorova, *Corrosion and mechanical strength of NPP material welded joints*, Int.J.Pres.Ves. & Piping 64 (1995) 25-42
14. Ebrahim Harati et al., *Effect of HFMI treatment procedure on weld toe geometry and fatigue properties of high strength steel welds*, Procedia Structural Integrity 2 (2016) 3484-3490
15. Yangbo Liu et al., *Improving fatigue strength of bainite/martensite dual-phase steels in very high cycle fatigue regime by refining microstructures*, Theoretical & Applied Mechanics Letters 2, 031005 (2012)



16. X.Su, P.Clayton, *Surface-initiated rolling contact fatigue of pearlitic and low carbon bainitic steels*, *Wear* 197 (1996) 137-144
17. Mohammed Asif M et al., *The impact of heat input on the strength, toughness, microhardness, microstructure and corrosion aspects of friction welded duplex stainless steel joints*, *Journal of Manufacturing Processes* 18(2015) 92-106
18. Zuheir Barsoum et al., *Fatigue properties of cut and welded high strength steel-Quality aspects in design and production*, *Procedia Engineering* 213 (2018) 470-476
19. International Organization for Standardization, *Welding-Quality assurance requirements for welded structures Part I*, Revision of ISO 3834:1978
20. International Organization for Standardization, *Fusion welding of metallic materials-Complete quality systems Part II*, Draft International Standard ISO/DIS 3834-3
21. International Organization for Standardization, *Fusion welding of metallic materials-Standard quality systems Part II*, Draft International Standard ISO/DIS 3834-3

Παράρτημα 1 (Εικόνες)

- ❖ Εικόνα 1. Πορώδες σε συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 2. Εγκλείσματα μεταξύ της κόλλησης και του προς συγκόλληση υλικού
- ❖ Εικόνα 3. Ανεπαρκής διείσδυση της κόλλησης
- ❖ Εικόνα 4. Ατελής τήξη στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 5. Χτυπήματα τόξου στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 6. Υπερπληρώσεις στη συγκόλληση τήξης
- ❖ Εικόνα 7. Υποκοπές στις συγκολλήσεις
- ❖ Εικόνα 8. Ρωγμές στον κρατήρα συγκόλλησης
- ❖ Εικόνα 9. Υποπληρώσεις στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 10. Ελασματοποιήσεις στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 11. Αποφλοιώσεις στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 12. Lamellar Tears
- ❖ Εικόνα 13. Ρωγμάτωση στη συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 14. Κοπτικά εργαλεία εργαστηρίου
- ❖ Εικόνα 15. Λειαντικοί δίσκοι
- ❖ Εικόνα 16. Συσκευή στίλβωσης
- ❖ Εικόνα 17. Κοπτικό άκρο TiALN
- ❖ Εικόνα 18. Λοξοτομές δοκιμίων έτοιμα προς συγκόλληση
- ❖ Εικόνα 19. Συγκολλημένα δοκίμια High Tensile Steel
- ❖ Εικόνα 20. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x500 για τον Mild Steel
- ❖ Εικόνα 21. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000 στους κόκκους του φερρίτη
- ❖ Εικόνα 22. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000 στους κόκκους του περλίτη

- ❖ Εικόνα 23. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x2000 στους κόκκους του περλίτη
- ❖ Εικόνα 24. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x500
- ❖ Εικόνα 25. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x1000
- ❖ Εικόνα 26. Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM x2000
- ❖ Εικόνα 27. Εκτενσιόμερο κατά την διάρκεια του εφελκυσμού
- ❖ Εικόνα 28. Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό High Tensile Steel
- ❖ Εικόνα 29. Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου Mild Steel
- ❖ Εικόνα 30. Δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό High Tensile Steel
- ❖ Εικόνα 31 Ηλεκτρονική μικρογραφία SEM X 20 με την δημιουργία λαιμού κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου Mild Steel
- ❖ Εικόνα 32. Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x300 της μικροδομής της θραύσης
- ❖ Εικόνα 33. Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x1000 της μικροδομής της θραύσης
- ❖ Εικόνα 34. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x300 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel
- ❖ Εικόνα 35. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel
- ❖ Εικόνα 36. Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της θραύσης για τον High Tensile Steel



Παράρτημα 2 (Διαγράμματα)

- Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα (Fe-C)
- Διάγραμμα 2. Μεταβολή σκληρομετρήσεων για τον Mild Steel
- Διάγραμμα 3. Μεταβολή σκληρομετρήσεων για τον High Tensile Steel
- Διάγραμμα 4. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 1^{ου} δοκιμίου Mild Steel
- Διάγραμμα 5. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 2^{ου} δοκιμίου Mild Steel
- Διάγραμμα 6. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 3^{ου} δοκιμίου Mild Steel
- Διάγραμμα 7. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 1^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel
- Διάγραμμα 8. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 2^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel
- Διάγραμμα 9. Γραφική παράσταση Τάσης-Παραμόρφωσης 3^{ου} δοκιμίου High Tensile Steel



Παράρτημα 3 (Πίνακες)

- ✓ Πίνακας 1. Τάσεις διαρροής κοινών χαλύβων
- ✓ Πίνακας 2. Τάσεις διαρροής χαλύβων υψηλής αντοχής
- ✓ Πίνακας 3. Χημικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων
- ✓ Πίνακας 4. Μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων
- ✓ Πίνακας 5. Χημική σύσταση % του Mild Steel
- ✓ Πίνακας 6. Μηχανικές ιδιότητες του Mild Steel
- ✓ Πίνακας 7. Χημική σύσταση του High Tensile Steel
- ✓ Πίνακας 8. Μηχανικές ιδιότητες του High Tensile Steel
- ✓ Πίνακας 9. Ονομαστική χημική σύσταση χαλύβων A40 και AH36
- ✓ Πίνακας 10. Σκληρομετρήσεις για τον Mild Steel
- ✓ Πίνακας 11. Σκληρομετρήσεις για τον High Tensile Steel
- ✓ Πίνακας 12. Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού

Παράρτημα 4 (Σχήματα)

- ❖ Σχήμα 1. Διαδικασία συγκόλλησης TIG
- ❖ Σχήμα 2. Τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου με διεισδυτικά υγρά
- ❖ Σχήμα 3. Τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου με τη χρήση υπερήχων
- ❖ Σχήμα 4. Τεχνική με καταστρεπτικού ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια
- ❖ Σχήμα 5. Απεικόνιση λοξοτομής
- ❖ Σχήμα 6. Οπτική αναπαράσταση συγκόλλησης TIG
- ❖ Σχήμα 7. Πρότυπο E8M για τα δοκίμια εφελκυσμού
- ❖ Σχήμα 8. Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης



高松製鉄所 (京浜地区) : 〒210-0868 神奈川県川崎市磯子区高島1番地1 East Japan Works (Keihin) 1-1, Ohi-Shi-Naka, Kawasaki 210-0868 Japan

検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE



JFE 株式会社 東日本製鉄所(京浜地区)
JFE Steel Corporation East Japan Works(Keihin)
Certificate No. : 160912-1523
Date : 2016-09-12
Ship No. : 4021
Construction No. : 34
Order No. : 6DM8091

高松製鉄所
Customer's Control No. F7866119
JFE SHOGI TRADE CORPORATION
Reference No. : AA1 -1
Commodity : HOT ROLLED STEEL PLATE
Specified Roll No. : NK GRADE KA36 (K36A)

品番 Item No.	鋼種 Steel Grade	規格 Specified Value (Standard)	厚さ Thickness (mm)	長さ Length (mm)	幅 Width (mm)	重量 Weight (kg)	検査項目 Inspection Items	検査結果 Inspection Results	検査位置 Inspection Position	検査方法 Inspection Method	検査器具 Inspection Tools	検査者 Inspector	検査日 Inspection Date
07068	OGPL K36A F7	0.28 X 1470 X 4410	1	40711	31134	72121	0.11	3	49 27 34	IC 391	502 26	119	122
07071	OGPL K36A F7	0.28 X 2000 X 4010	1	50411	30134	92111	0.11	3	48 26 34	IC 394	508 26	119	122

検査項目: 1. 鋼種と規格の適合性 2. 厚さの適合性 3. 長さの適合性 4. 幅の適合性 5. 重量の適合性 6. 検査位置の適合性 7. 検査結果の適合性 8. 検査方法の適合性 9. 検査器具の適合性 10. 検査者の適合性 11. 検査日の適合性

検査結果: 合格

検査位置: 1. 鋼種と規格の適合性 2. 厚さの適合性 3. 長さの適合性 4. 幅の適合性 5. 重量の適合性 6. 検査位置の適合性 7. 検査結果の適合性 8. 検査方法の適合性 9. 検査器具の適合性 10. 検査者の適合性 11. 検査日の適合性

検査方法: 目視検査、厚さ計、長さ計、幅計、重量計、検査位置計、検査結果計、検査方法計、検査器具計、検査者計、検査日計

検査器具: 目視検査、厚さ計、長さ計、幅計、重量計、検査位置計、検査結果計、検査方法計、検査器具計、検査者計、検査日計

検査者: 検査者


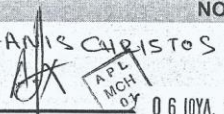
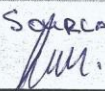
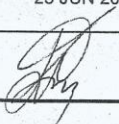


検査日: 検査日

東日本製鉄所 (京浜地区) : 〒210-0868 神奈川県川崎市磯子区高島1番地1 East Japan Works (Keihin) 1-1, Ohi-Shi-Naka, Kawasaki 210-0868 Japan

東日本製鉄所(京浜地区)品質保証部
Quality Assurance Section
East Japan Works (Keihin)





Παράρτημα 6 (Fabrication Work Order)








FABRICATION WORK ORDER			
 <small>AVIATION PRODUCTS - SERVICES SA</small>	No 23 06 2017 <small>Day Month Year</small>	PRIORITY LEVEL <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 30px; height: 30px; margin: 0 auto; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">C</div>	DEADLINE 23/06/2017
ISSUE DATE	CUSTOMER	DEPARTMENT / SHOP	
23 JUN 2017	NTUA	RESEARCH	
ITEM DESCRIPTION			
FABRICATION OF V-GROOVE ON MILD STEEL PLATES (MACHINERY) & PERFORM WELDING			
P/N	S/N	MANUFACTURER / TYPE	
N/A	N/A	N/A	
WORK TO BE PERFORMED			
PERFORM CUTTING AND V-GROOVE FORMING IN STEEL PLATES PERFORM WELDING I.A.W. WPS			
ATTACHMENTS (Technical data, manuals, CMMs, drawings)			
WPS			
NOTES / REMARKS			
MACHINERY	ARFANIS CHRISTOS  06 ΙΟΥΝ. 2017		WELDING SOURLANTZIS GEORGIOS  06 ΙΟΥΝ. 2017
REQUESTED BY	PLANNER	TECH. DIRECTOR	ENGINEERING
NAME P. SKARVELIS	NAME N/R	NAME P. VAGIAKAKOS	P. SKARVELIS
DATE 23 JUN 2017	DATE 23 JUN 2017	DATE 23 JUN 2017	23 JUN 2017
SIGN. 	SIGN.	SIGN. 	SIGN. 
COST OF MATERIALS	LABOUR HOURS	CNC HOURS	CONSUMABLES
GOE	4h	4h	N/A
Issue: 00 – 20/02/2015 Rev: 01 – 15/04/2016		ASP-9100-1-F1	



Παράρτημα 7 (Fabrication Status Report)

FABRICATION STATUS REPORT

Fabrication WO	Description	ERD#	P.L. ENG 02 WPS #	Shop
23-06-2017	V-Groove on steel plates	N/A	201712301	Workshop 2 welding
PHASE 1	Description Drawings	Check <input checked="" type="checkbox"/>	Name/Signature P. Samvelis 	Date 23 JUN 17
Notes:	AS PER WPS			
PHASE 2	Description Outsourcing	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A			
PHASE 3	Description Raw Materials / Tooling	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A : Provided by NTUA			
PHASE 4	 Description WPS Initiation	Check <input checked="" type="checkbox"/>	Name/Signature P. Samvelis 	Date 23 JUN 17
Notes:				
PHASE 5	 Description WPS Completion	Check <input checked="" type="checkbox"/>	Name/Signature C. ARFANIS 	Date 06 IOYΛ. 2017
Notes:				
PHASE 6	Description Codification / Marking	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A			
PHASE 7	Description Final Inspection	Check <input checked="" type="checkbox"/>	Name/Signature P. Samvelis 	Date 06 IOYΛ. 2017
Notes:				
PHASE 8	Description CoC Issue	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A			
PHASE 9	Description Packaging / Storage	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A			
PHASE 10	Description Delivery	Check <input type="checkbox"/>	Name/Signature	Date
Notes:	N/A			
Remarks:	4 plates will be formed with V-groove for welding, 2 weld pieces will be delivered. 			



Παράρτημα 8 (Welding Procedure Specification)

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

Company Name <u>APELLA SA</u>		By: <u>REQUESTED BY ΑΣΤΥΑ</u>	
Welding Procedure Specification No. <u>WT04001</u>		Date: <u>23 JUL 17</u>	Supporting PQR No.(s): <u>FW023062017</u>
Revision No. <u>N/A</u>		Date: -	
Welding Process(es) <u>GTAW</u>		Types <u>FLAT POSITION (1G) - DCEN - W-THRO3</u> electrode	
CODE: ASME IX <input type="checkbox"/>	API 1104 <input type="checkbox"/>	AWS D1.1 <input type="checkbox"/>	Other <input checked="" type="checkbox"/> <u>AWS D17.1</u>
BASE METALS			
P-No. _____	Group No. <u>IIA</u>	to P-No. _____	Group No. <u>II B</u>
Specification type and grade <u>AH 36</u>		to Specification type and grade <u>MILD STEEL (SFS2)</u>	
Chem. Analysis and Mech. Prop. <u>Microalloyed (Mn min addition)</u>		to Chem. Analysis and Mech. Prop. <u>MILD-PLAIN STEEL</u>	
Base Metal: Groove <u>PERFORMED - FLAT POSITION</u>	Fillet _____		
Deposited Weld Metal <u>ER70S-2</u>			
Pipe Dia. Range: Groove <u>N/A</u>	Fillet _____		
Other _____			
JOINTS			
Joint Design <u>GROOVE (G-1)</u>		Details	
Backing: Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		Type <u>AP 99.999/1</u>	
a = <u>60-70°</u>	b = <u>8 mm</u>		
c = <u>2 min max</u>	d = <u>2 min</u>		
Sampling prior welding for determine welding parameters.			
FILLER METALS			
F-No. <u>AWS A5.18</u>	<u>ER70S-2</u>	WELDING PARAMETERS	
A-No. _____		min:	max:
Spec. No. (SFA) <u>5.18</u>		GAS FLOW RATE	
AWS No. (Class) <u>A</u>		min:	max:
Size of filler metals <u>2.6 mm</u>			
Electrode-Flux (Class) <u>W-THRO3 (RSD)</u>			
Flux Trade Name _____	<u>N/A</u>		
Consumable Insert _____	<u>N/A</u>		
Other _____	<u>PERFORM NDT</u>		
APPROVAL			
Name <u>P. Diamantidis</u>	Unit/Dept. <u>ENGINEERING</u>		
Signature	Date <u>23 JUL 2017</u>		



Παράρτημα 9 (Work Instruction Sheet)



PART-145 Approved Maintenance Organization EL-145.032

101 Chr. Mpeka St.
19004 Spata
ATTIKI-GREECE

WORK INSTRUCTION SHEET (WIS)

MACHINE AND WELDING SHOP

WIS No: 2017173001

1	CUSTOMER WORK ORDER	23-06-2017	8	MANUAL Ref	WPS	DATE	Rev
2	CUSTOMER NAME	APELLA	9	ENG. DRAW ref.	DATE	DATE	Rev
3	PART NUMBER	NO APPL	10	WORK DESCRIPTION	MANUFACTURING	REPAIR	OTHER
4	N. S. N (if applicable)	N/A			MODIFICATION	OTHER	V
5	SERIAL No	N/A	11	ISSUE DATE	23 JUN 2017		
6	DESCRIPTION	V-GROOVE AT STEEL PLATES	12	REMARKS	PERFORM V-GROOVE ON STEEL PLATES FOR WELDING I.A.W. WPS		
7	QUANTITY	EA (4)					

Issue: 01 - 20/02/2015
Rev: 00 - 20/02/2015

ASP-9100-1-F3

Rev.00 01 NOV 2012
FORM 0039

Page 1 Of 2



WORK INSTRUCTION SHEET Continued W.O.:

2017173001

Page : 2 of 2

WORK STEPS	WORK REQUIREMENTS	MECHANIC	INSPECTOR / CRS
GENERAL:	<p>WARNING : Be sure before start working you take all necessary safety measures.</p> <p>CAUTION : Check that all the mech. equipment to be used is in good condition and the measurement tools are tested and calibrated.</p>		
1. PREPARATIONAL PROCEDURES:	<p>Engineering drawings are available.</p> <p>The proper raw materials are available according drawings specs.</p> <p>The proper manufacture machine has been selected and prepared accordingly before machining is starting.</p>	<p>APL MCH 23 OCT. 2017</p> <p>APL MCH 23 OCT. 2017</p> <p>APL MCH 23 OCT. 2017</p>	<p>APL MCH 23 OCT. 2017</p> <p>APL MCH 23 OCT. 2017</p> <p>APL MCH 23 OCT. 2017</p>
2. MACHINING :	<p>Drilling</p> <p>Milling</p> <p>Turning</p> <p>Deburring</p> <p>Welding</p> <p>Sanding</p> <p>Other</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p>
3. NDT :	<p>Execute NDT inspection methods according CMM's specs. <i>UVS Specs</i></p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>
4. MARKING :	<p>Choose the digits right size and fonts</p> <p>Stamp the correct part number and APL number.</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p>
5. CORROSION PREVENTION :	<p>Execute the appropriate anti-corrosion treatment according CMM's specs.</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>
6. FINAL INSPECTION:	<p>Execute the items final inspection according to engineering drawings.</p> <p>Dimensional inspection</p> <p>Hardness /conductivity inspection <i>HV_{0.05} : 220-240</i></p> <p>Paint application</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p>	<p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p> <p>N/A</p>

Issue: 01 - 20/02/2015
Rev.: 00 - 20/02/2015

ASP-9100-1-F3

Παράρτημα 10 (AWS Class)

Table 7.1
Acceptance Criteria (in [mm])

Discontinuity	Class A	Class B	Class C
Cracks	None	None	None
Overlap (Cold Lap)	None	None	None
Incomplete Fusion	None	None	None
Incomplete Penetration^a	None	None	None
Porosity—Surface			
Individual size maximum	0.25 T or 0.030 [0.76], whichever is less	0.33 T or 0.060 [1.5], whichever is less	0.50 T or 0.090 [2.3], whichever is less
Spacing minimum	8 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	4 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	2 times the size of the larger adjacent imperfection ^b
Accumulated length in any 3 in [75 mm] of weld maximum	1 T or 0.12 [3.1], whichever is less	1.33 T or 0.24 [6.1], whichever is less	2 T or 0.36 [9.1], whichever is less
Porosity—Subsurface			
Individual size maximum	0.33 T or 0.060 [1.5], whichever is less	0.50 T or 0.090 [2.3], whichever is less	Not applicable
Spacing minimum	4 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	2 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	Not applicable
Accumulated length in any 3 in [75 mm] of weld maximum	1.33 T or 0.24 [6.1], whichever is less	2 T or 0.36 [9.1], whichever is less	Not applicable
Inclusions			
Individual size maximum	0.33 T or 0.060 [1.5], whichever is less	0.50 T or 0.090 [2.3], whichever is less	Not applicable
Spacing minimum	4 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	2 times the size of the larger adjacent imperfection ^b	Not applicable
Accumulated length in any 3 in [75mm] of weld—maximum	1.33 T or 0.24 [6.1], whichever is less	2 T or 0.36 [9.1], whichever is less	Not applicable
Undercut			
For the full length of weld maximum depth	0.002 [0.051]	0.015 T or 0.002 [0.051], whichever is greater	0.025 T or 0.002 [0.051], whichever is greater
Individual defect, maximum depth	0.07 T or 0.030 [0.76], whichever is less	0.10 T or 0.050 [1.3], whichever is less	0.20 T or 0.070 [1.8], whichever is less
Accumulated length in any 3 in [75mm] of weld maximum	0.20 [5.1]	0.60 [15]	1.00 [25]
Face or Root Underfill (Groove Welds)			
For the full length of weld — maximum depth	0.005 [0.13]	0.015 T or 0.005 [0.13] whichever is greater	0.025 T or 0.005 [0.13] whichever is greater
Individual defect — maximum depth	0.07 T or 0.030 [0.76] whichever is less	0.10 T or 0.050 [1.3] whichever is less	0.20 T or 0.070 [1.8] whichever is less
Accumulated length in any 3 in [75 mm] of weld — maximum	0.20 [5.1]	0.60 [15]	1.00 [25]
Craters			
Maximum depth	0.20 T or 0.03 [0.8] whichever is less	0.20 T or 0.05 [1.3] whichever is less	0.20 T or 0.05 [1.3] whichever is less
Maximum length	1 T	1 T	2 T
Are Strikes / Gouge Marks	Unacceptable	Unacceptable	No stated requirement

(Continued)

Table 7.1 (Continued)
Acceptance Criteria (in [mm])

Discontinuity	Class A	Class B	Class C
Maximum Weld Reinforcement – machine welds			
Material to 0.375 [9.5] and under	1/3 T or 0.030 [0.76] whichever is greater	No stated requirement	No stated requirement
Material greater than 0.375 [9.5]	0.125 [3.2]	No stated requirement	No stated requirement
Melt-Through Welds	See Annex A	See Annex A	See Annex A
Maximum Weld Reinforcement—manual welds			
Material up to 0.125 [3]	1 T	No stated requirement	No stated requirement
Material over 0.125 to 0.510 [3 to 13]	1/3 T or 0.100 [2.5], whichever is greater	No stated requirement	No stated requirement
Material greater than 0.510 [12.9]	0.170 [4.3]	No stated requirement	No stated requirement
Mismatch between Members after welding	Refer to Paragraph 7.3.2.1 & Figure 7.2. Includes A, B, & C Class of Welds		
Weld Profiles	Requirements of Figure 7.1	Requirements of Figure 7.1	Requirements of Figure 7.1
Angular Peaking	Requirements of 7.3.2.2	Requirements of 7.3.2.2	Requirements of 7.3.2.2
Fillet Weld Size – when fillet weld size is stated on the drawing			
Minimum size	As shown by the welding symbol	As shown by the welding symbol	As shown by the welding symbol
Fillet Weld Size – minimum size when fillet weld size is not stated on the drawing			
Minimum size – single side fillet	1.5 T	1.5 T	1.5 T
Minimum size – double side fillet	1 T	1 T	1 T
Fillet Weld Size – maximum			
Material up to 0.090 [2.3]	2 times the minimum fillet weld size	2 times the minimum fillet weld size	2 times the minimum fillet weld size
Material 0.091 to 0.156 [2.31 to 4.0]	1.5 times the minimum fillet weld size	1.5 times the minimum fillet weld size	1.5 times the minimum fillet weld size
Material 0.157 to 0.750 [4.01 to 19]	1.25 times the minimum fillet weld size	1.25 times the minimum fillet weld size	1.25 times the minimum fillet weld size
Material greater than 0.751 [19]	1.1 times the minimum fillet weld size	1.1 times the minimum fillet weld size	1.1 times the minimum fillet weld size
Discoloration^c—Titanium			
Bright Silver	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Silver	Acceptable ^d	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Light Straw	Acceptable ^d	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Dark Straw	Acceptable ^d	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Bronze	Acceptable ^d	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Brown	Acceptable ^d	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Violet	Reject ^e	Acceptable ^d	Acceptable ^d
Blue	Reject ^e	Reject ^{e,s}	Reject ^{e,s}
Green	Reject ^e	Reject ^h	Reject ^h
Gray	Reject [#]	Reject [#]	Reject [#]
White	Reject [#]	Reject [#]	Reject [#]

(Continued)

**Table 7.1 (Continued)
Acceptance Criteria (in [mm])**

Discontinuity	Class A	Class B	Class C
Discoloration—Stainless Steel, Nickel, and Cobalt Alloys			
All oxidation colors, except for Black	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Black discoloration or the presence of scale	Reject	Reject	Reject
Discoloration—Steel			
All oxidation colors, except for Black	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Black	Reject	Reject	Reject

^a For groove weld only.

^b Discontinuity of size 0.005 in [0.13 mm] or less shall not be used in the determining compliance to the spacing requirements.

^c Discoloration comes in various shades, tones, and hues.

^d Discoloration must be removed prior to additional welding.

^e On the weld and in the HAZ up to 0.030 in [0.76 mm] beyond the weld. This color is acceptable on base metal outside of 0.030 in [0.76 mm] from the toe of the weld.

^f Blue and Green discoloration is rejectable if additional welding is to be performed. Blue and green discoloration is acceptable on finish welds but must be removed prior to subsequent processing per 6.15.1.

^g Rejectable discoloration may be accepted if it can be proven that embrittlement has not occurred. This proof must be provided through direct testing, such as microhardness. Test method and acceptance criteria used for acceptance must be approved by the engineering authority.