



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Εφαρμογή μεθόδων NDT για προσδιορισμό βλάβης
ερπυσμού σε κράματα υψηλών θερμοκρασιών**

ΥΠΟ

ΑΝΤΩΝΗ ΚΥΛΑΔΙΤΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού.

Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής : Δρ. Άννα Ζερβάκη

(Επιβλέπουσα) Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Γρηγόρης Χαιδεμενόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Σπύρος Καραμάνος

Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Εφαρμογή μεθόδων NDT για προσδιορισμό βλάβης ερπυσμού σε κράματα υψηλών θερμοκρασιών

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή μεθόδων μη καταστρεπτικού ποιοτικού ελέγχου (NDT) σε δείγματα κράματος PARALLOY H39WM το οποίο λειτουργεί σε θερμοκρασία 910 °C. Οι μέθοδοι που μελετώνται είναι η μέθοδος των υπερήχων (Ultrasonic testing), ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Penetration testing) και ο ραδιογραφικός έλεγχος (Radiographic testing). Η εφαρμογή του συγκεκριμένου κράματος είναι σε αυλούς μονάδων παραγωγής H₂ (reformers) σε δυλιστήρια. Τμήμα των αυλών, το οποίο παρουσιάζει βλάβη από ερπυσμό σε προχωρημένο στάδιο, εξετάστηκε με τις ανωτέρω μεθόδους και εν συνεχεία με καταστρεπτικό έλεγχο για την επιβεβαίωση των δοκιμών.

Abstract

This dissertation presents the application of non-destructive quality control (NDT) methods to PARALLOY H39WM alloy samples operating at 910 °C. The methods studied are those of Ultrasonic testing Penetration testing and Radiographic testing. The application of this alloy is in the tubes of H₂ production units in refineries. Part of the lumens, which is damaged by advanced creep, was examined by the above methods and then with a destructive test to confirm the tests.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια Δρ. Άννα Ζερβάκη, για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε για την διπλωματική εργασία καθώς και την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο των μη καταστρεπτικών ελέγχων. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την εταιρία Technology and Quality Control Centre [TQCC] και συγκεκριμένα τον κύριο Δημήτρη Πιττέρη, τον κύριο Κωνσταντίνο Κωτούζα και τον κύριο Πασχάλη Δαματόπουλο για την παροχή του απαραίτητου εξοπλισμού καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαιδεμενόπουλο και καθηγητή κ. Σπύρο Καραμάνο για την συμμετοχή τους και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Τέλος, οι μεγαλύτερες ευχαριστίες πάνε στην οικογένεια μου για την δυνατότητα των σπουδών που μου προσέφεραν και την υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια αυτών, και τους φίλους μου με τους οποίους πέρασα τόσο ωραία φοιτητικά χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	3
Ευχαριστίες.....	4
Ευρετήριο Εικόνων	6
Ευρετήριο Πινάκων	8
Λίστα Συμβόλων	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή- Σκοπός	10
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
2.1 Ερπυσμός.....	12
2.2 Τύποι Ερπυσμού.....	13
2.3 Χρονική Εξέλιξη Ερπυσμού	13
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά κραμάτων αντοχής σε ερπυσμό.....	14
2.5 PARALLOY H39WM	15
2.6 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι αναγνώρισης βλάβης ερπυσμού	17
2.7 Μέθοδος των Διεσδυτικών Υγρών	20
2.7.1 Γενικά.....	20
2.7.2 Βασική αρχή	20
2.7.3 Υλικά Εφαρμογής	21
2.7.4 Πλεονεκτήματα της μεθόδου.....	21
2.7.5 Μειονεκτήματα της μεθόδου	21
2.8 Μέθοδος της Ραδιογραφίας (RT)	22
2.8.1 Γενικά.....	22
2.8.2 Ραδιογραφικός έλεγχος με ακτίνες γ	23
2.8.3 Ραδιογραφικός έλεγχος με ακτίνες Χ.....	24
2.8.4 Σύγκριση ακτινών Χ και ακτινών γ	24
2.8.5 Έννοιες της Ραδιογράφησης	25
2.9 Μέθοδος των Υπερήχων (UT).....	27

2.9.1 Τύποι κυμάτων	28
2.9.2 Ανάκλαση του ήχου.....	29
2.9.3 Διάθλαση ήχου	31
2.9.4 Χαρακτηριστικά της δέσμης των Υπερήχων	32
2.10 Μέθοδος Phased Array	34
Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία	35
3.1 Το δοκίμιο και οι θέσεις δειγματοληψίας	35
3.2 Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (PT).....	39
3.3 Ραδιογραφικός Έλεγχος (RT).....	40
3.4 Έλεγχος με Υπερήχους (UT).....	41
3.4.1 Έλεγχος με την USN 52	41
3.4.2 Βαθμονόμηση Συσκευής	45
3.5 Έλεγχος με Phased Array.....	47
3.6 Μεταλλογραφικός Έλεγχος	48
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων	49
4.1 Έλεγχος με διεισδυτικά Υγρά	49
4.2 Ραδιογραφικός Έλεγχος	50
4.3 Έλεγχος με Υπερήχους.....	51
4.4 Phased Array.....	57
4.5 Μεταλλογραφικός Έλεγχος	58
Αποτελέσματα στο δοκίμιο Α στο 1 ^ο σημείο	58
Αποτελέσματα στο δοκίμιο Α στο 2 ^ο σημείο	60
Αποτελέσματα στο δοκίμιο Α στο 3 ^ο σημείο	61
Αποτελέσματα στο δοκίμιο Α στο 4 ^ο σημείο	62
Αποτελέσματα στο δοκίμιο Β στο 5 ^ο σημείο.....	63
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα- Προτάσεις.....	65
Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία.....	67

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα καμπύλης ερπυσμού.[2]	14
Εικόνα 2: Χρονική εξέλιξη των υλικών συναρτήσεων της αντοχής τους σε ερπυσμό [6].....	15
Εικόνα 3: Πίεση λειτουργίας συναρτήσεων της θερμοκρασίας για διαφορετικά κράματα [6].	16
Εικόνα 4: Μαύρη φάση: Καρβίδια του Cr, λευκή φάση: καρβίδια του Nb [7].....	16

Εικόνα 5: Διάγραμμα καμπύλης ερπυσμού με μεθόδους NDT. [8].....	19
Εικόνα 6: Το τριχοειδές φαινόμενο [10].	20
Εικόνα 7: Αρχή του ελέγχου υλικών με ραδιογραφία. [11]	23
Εικόνα 8: Λυχνία κενού (σωλήνας Coolidge) για παραγωγή ακτινών X [11].	24
Εικόνα 9: Αντίθεση και ευκρίνεια ραδιογραφίας [11].	25
Εικόνα 10: Φάσμα του ήχου. [9]	27
Εικόνα 11: Ακουστική εμπέδηση ήχου. [9]	30
Εικόνα 12: Διάθλαση και ανάκλαση του ήχου. [9]	31
Εικόνα 13: Πρώτη και δεύτερη κρίσιμη γωνία. [9]	32
Εικόνα 14: Δοκίμιο Α δειγματοληψίας.....	35
Εικόνα 15: Διαστάσεις δοκιμίου Α δειγματοληψίας.	36
Εικόνα 16: Δοκίμιο Β δειγματοληψίας.....	36
Εικόνα 17: Δοκίμιο Γ βαθμονόμησης.	37
Εικόνα 18: Θέσεις δειγματοληψίας στο δοκίμιο Α.	38
Εικόνα 19: Θέσεις δειγματοληψίας στο δοκίμιο Β.	38
Εικόνα 20: Φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά στο δοκίμιο Α.	39
Εικόνα 21: Συσσκευή προβολής των φιλμ της ραδιογραφίας.	40
Εικόνα 22: USN 52 συσκευή υπερήχων. [14].....	42
Εικόνα 23: Δίδυμη κεφαλή υπερήχων διαμηκών κυμάτων DA201.	43
Εικόνα 24:Κεφαλή υπερήχων διαμηκών κυμάτων MB2F.....	43
Εικόνα 25: Δίδυμη κεφαλή υπερήχων MSEB4.	44
Εικόνα 26: Γωνιακή κεφαλή εγκάρσιων κυμάτων 45 μοιρών.	44
Εικόνα 27: Δοκίμιο βαθμονόμησης V1.	45
Εικόνα 28: Δοκίμιο Γ βαθμονόμησης από το υλικό H39WM.....	46
Εικόνα 29: Βαθμονόμηση της συσκευής με τον σωλήνα H39WM.	46
Εικόνα 30: Συσσκευή phased array.	47
Εικόνα 31: Κεφαλή phased array και κάθετη κεφαλή PHOENIX.....	47
Εικόνα 32 : Εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια σωλήνα με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.	49
Εικόνα 33: Φιλμ ραδιογραφίας του δοκιμίου Α.	50
Εικόνα 34: Ένδειξη της συσκευής σε βάθος 8,4 mm και 7.4 mm στο δοκίμιο Α.....	51
Εικόνα 35: Ένδειξη στο δοκίμιο Β με την κεφαλή DA201.	53
Εικόνα 36: Ένδειξη στο 5 ^ο σημείο με την κεφαλή MB2F στο δοκίμιο Β.	54
Εικόνα 37: Ένδειξη στο δεύτερο δοκίμιο με την κεφαλή MSEB4 στο δοκίμιο Β.	56
Εικόνα 38: Δεδομένα κεφαλής phased array στο δοκίμιο Α.....	57
Εικόνα 39: Ένδειξη οθόνης συσκευής phased array στο 1 ^ο σημείο στο δοκίμιο Α.	57
Εικόνα 40: Κατάταξη σε επίπεδο ερπυσμού. [20]	58
Εικόνα 41: Αποτύπωση μικροδομής δείγματος x100.	59
Εικόνα 42: Ένδείξεις στα 7,9 και 8 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.	59
Εικόνα 43: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 1	60
Εικόνα 44: Ενδείξεις στα 7.5 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.	60
Εικόνα 45: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 2.....	61
Εικόνα 46: Ένδειξη στα 6.7 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.....	61
Εικόνα 47: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 3.....	62
Εικόνα 48: Ένδειξη στα 6.8 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.	62

Εικόνα 49: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 4.....	63
Εικόνα 50: Ανάπτυξη μακρορωγμών σε όλο το πάχος του δοκιμίου.	63
Εικόνα 51: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 5.....	64

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Σύσταση κραμάτων (%κ.β) [18].	15
Πίνακας 2: IQI table, κατά BS EN ISO 17636-1. [12].....	41
Πίνακας 3: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή DA201.	52
Πίνακας 4: Πίνακας τιμών για την κεφαλή Da201 στο δοκίμιο A.....	52
Πίνακας 5: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή MB2F.....	53
Πίνακας 6: Πίνακας τιμών για την κεφαλή MB2F στο δοκίμιο A.....	54
Πίνακας 7: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή MSEB4.....	55
Πίνακας 8: Πίνακας τιμών για την κεφαλή MSEB4 στο δοκίμιο A.....	55
Πίνακας 9: Τιμές μετρήσεων υπερήχων για το 1 ^ο σημείο στο δοκίμιο A.	59
Πίνακας 10: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 2 ^ο σημείο στο δοκίμιο A.	60
Πίνακας 11: Τιμές μετρήσεων υπερήχων για το 3 ^ο σημείο στο δοκίμιο A.	61
Πίνακας 12: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 4 ^ο σημείο στο δοκίμιο A.	62
Πίνακας 13: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 5 ^ο σημείο στο δοκίμιο B.	63
Πίνακας 14: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (Αυλός διαμέτρου 103,3 mm και πάχος 15,45 mm).....	65

Λίστα Συμβόλων

Fe	Σίδηρος
Cr	Χρώμιο
Ni	Νικέλιο
C	Άνθρακας
Si	Πιρίτιο
Mn	Μαγγάνιο
P	Φώσφορο
S	Θείο
Nb	Νιόβιο
Mo	Μολυβδαίνιο
O	Οξυγόνο

Cu	Χαλκός
P	Πίεση
S	Επιφανειακή τάση του υγρού διεισδυτή
θ	Γωνία επαφής
W	Το πλάτος του ρήγματος
m	Μέτρα
s	Δευτερόλεπτα
Hz	Hertz

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή- Σκοπός

Πολλά κατασκευαστικά στοιχεία που είναι εγκατεστημένα σε συμβατικά και πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χημικά εργοστάσια, διυλιστήρια κ.λπ., λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες επομένως, ο ερπυσμός αποτελεί σημαντικό παράγοντα που λαμβάνεται υπόψη τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά την λειτουργία τους. Η αστοχία των στοιχείων αυτών, από ερπυσμό μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις, τόσο στην ασφάλεια της αντίστοιχης κατασκευής όσο και σε ανθρώπινες απώλειες. Επομένως, η ανάπτυξη ασφαλών διαδικασιών σχεδιασμού, η μοντελοποίηση συμπεριφοράς υλικών και η αξιολόγηση των μεταβολών της μικροδομής σε τακτική βάση κατά την λειτουργία αποτελούν πεδία ερευνητικού ενδιαφέροντος και βιομηχανικής εφαρμογής.

Η αξιολόγηση της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής ενός στοιχείου που λειτουργεί υπό γνωστές συνθήκες για μεγάλο χρονικό διάστημα ονομάζεται υπολογισμός υπολειπόμενης ζωής [1]. Οι διαδικασίες αξιολόγησης περιλαμβάνουν μη καταστρεπτικές δοκιμές για εξέταση υλικού για τον προσδιορισμό της έκτασης της βλάβης ερπυσμού που έχει υποστεί κατά τον χρόνο λειτουργίας. Αυτές οι παρατηρήσεις στη συνέχεια χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αναλυτικές προβλέψεις για να εκτιμηθεί ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής που το στοιχείο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. [2]

Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι που χρησιμοποιούνται προσφέρουν μια άμεση και αξιόπιστη πηγή παροχής πληροφοριών. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομείται ταυτόχρονα χρόνος και χρήμα από την αντιμετώπιση προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν και εξασφαλίζεται ότι η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων συμβαδίζει με τα ενδεδειγμένα πρότυπα. Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών και των μαγνητικών σωματιδίων χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων. Η μέθοδος της ραδιογραφίας είναι από τις παλαιότερες μη καταστρεπτικές τεχνικές. Παρότι που υπάρχουν αρκετά θέματα ασφαλείας έχει την δυνατότητα της μόνιμης καταγραφής των αποτελεσμάτων του ελέγχου. Η μέθοδος των δινορευμάτων εφαρμόζεται για την εύρεση επιφανειακών και υποεπιφανειακών ελαττωμάτων κυρίως σε υλικά με επικάλυψη (μόνωση, μπογιά) και σε σωληνώσεις. Η μέθοδος των υπερήχων είναι από τις βασικότερες μεθόδους των ΜΚΕ επιτρέποντας την επιθεώρηση της εσωτερικής δομής του υλικού με άμεσα αποτελέσματα. Τέλος η μέθοδος phased array είναι σαν την μέθοδο των υπερήχων με την διαφορά ότι οι κεφαλές χρησιμοποιούν 16 έως 256 ενεργά στοιχεία το καθένα από τα οποία μπορεί να λειτουργήσει ξεχωριστά.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή μεθόδων μη καταστρεπτικού ποιοτικού ελέγχου (ΜΚΕ) σε τμήμα αυλού που ήταν τοποθετημένος reformer διυλιστηρίου και η επιβεβαίωση των μετρήσεων με καταστρεπτικό έλεγχο. Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε κράμα PARALLOY H39WM το οποίο λειτουργούσε για 40.000 ώρες σε θερμοκρασία 910 °C.

Η εργασία αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια ως εξής:

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας, η οποία περιλαμβάνει περιγραφή του φαινομένου του ερπυσμού, το υλικό του αυλού και στις μη καταστρεπτικές μεθόδους αναγνώρισης βλαβών ερπυσμού.

Στο 3^ο κεφάλαιο αρχικά αναφέρονται τα διαθέσιμα δοκίμια και οι θέσεις δειγματοληψίας στον αυλό. Στην συνέχεια γίνεται μία περιγραφή στις διαδικασίες ΜΚΕ ελέγχου με διεισδυτικά υγρά, ραδιογραφία και υπέρηχο και τέλος η διαδικασία προετοιμασίας δοκιμίων για μεταλλογραφικό έλεγχο.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η καταγραφή των αποτελεσμάτων των μη καταστρεπτικών ελέγχων της πειραματικής διαδικασίας και η σύγκριση αυτών με τα μεταλλογραφικά αποτελέσματα καθώς και αναλύσεις και σχόλια.

Στο 5^ο κεφάλαιο τα παραπάνω αποτελέσματα αξιολογούνται και σχολιάζονται και τέλος αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ερπυσμός

Ερπυσμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο επέρχεται σταδιακή πλαστική παραμόρφωση του υλικού υπό την επίδραση σταθερού φορτίου σε υψηλές θερμοκρασίες. Η παραμόρφωση αυτή λέγεται παραμόρφωση ερπυσμού. Με τον όρο υψηλή θερμοκρασία συνήθως εννοούμε περίπου 0.3 μεγαλύτερη της απόλυτης θερμοκρασίας τήξεως του υλικού (T_m), όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά δηλαδή σε ένα εύρος θερμοκρασιών 400 °C – 1000 °C .

Ερπυσμό μπορούν να παρουσιάσουν κατασκευές και εξαρτήματα μηχανών που λειτουργούν κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών , όπως για παράδειγμα πτερύγια αεροστροβίλων/ατμοστροβίλων, σε τμήματα λεβήτων αλλά και δίκτυα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Η παραμόρφωση που αναπτύσσεται εξελίσσεται μη γραμμικά με τον χρόνο και στα τελευταία στάδια εμφανίζονται ρωγμές και τελικά επέρχεται θραύση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αστοχίας από ερπυσμό αποτελεί η διάρρηξη χαλύβδινων αυλών (reformers) οι οποίοι λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ των 870 και 890 °C. Ταξινόμηση των βλαβών του ερπυσμού σε χάλυβες έχει γίνει με βάση την ποιοτική προσέγγιση των Neubauer και Wedel η οποία γίνεται με βάση την κατανομή των οπών, κενών που παρατηρούνται σε μια μεταλλογραφία.[2]

Η αστοχία τέτοιων εξαρτημάτων κατά την λειτουργία μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες και για τον λόγο αυτό ακολουθείται διαδικασία ανάπτυξης των μεθόδων ασφαλούς σχεδιασμού, των μοντέλων προσομοίωσης της συμπεριφοράς των υλικών και της αξιολόγησης της μικροδομής. Ειδικότερα, η αξιολόγηση περιλαμβάνει την εξέταση των δειγμάτων, την μελέτη των ιδιοτήτων του και τον προσδιορισμό της έκτασης του φαινομένου του ερπυσμού. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η παραμόρφωση του υλικού η οποία είναι χρονικά εξαρτώμενη καθώς όσο μεγαλύτερη διάρκεια έχει η έκθεση ενός εξαρτήματος στο προαναφερόμενο περιβάλλον προκαλεί και μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Η εξέλιξη του φαινομένου αποτυπώνεται σταδιακά και στη μικροδομή του υλικού. Αρχικά παρατηρείται γήρανση της μικροδομής, ενώ στη συνέχεια σχηματισμό οπών στα τριπλά σημεία των κόκκων. Με την εξέλιξη του φαινομένου οι οπές αυξάνονται, ενώνονται αποκτώντας προσανατολισμό και δημιουργούνται μικρορωγμές. Οι μικρορωγμές εξελίσσονται σταδιακά δημιουργώντας μακρορωγμές.

Παρακάτω παρατίθεται η κατάταξη των σταδίων του ερπυσμού όπου και διακρίνονται τρία στάδια ερπυσμού. Ο πρωτογενής , ο δευτερογενής και ο τριτογενής ερπυσμός. Η κατάταξη των σταδίων του ερπυσμού μας δίνει μια σαφή εικόνα για την εξέλιξη του ερπυσμού και τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής του υλικού.

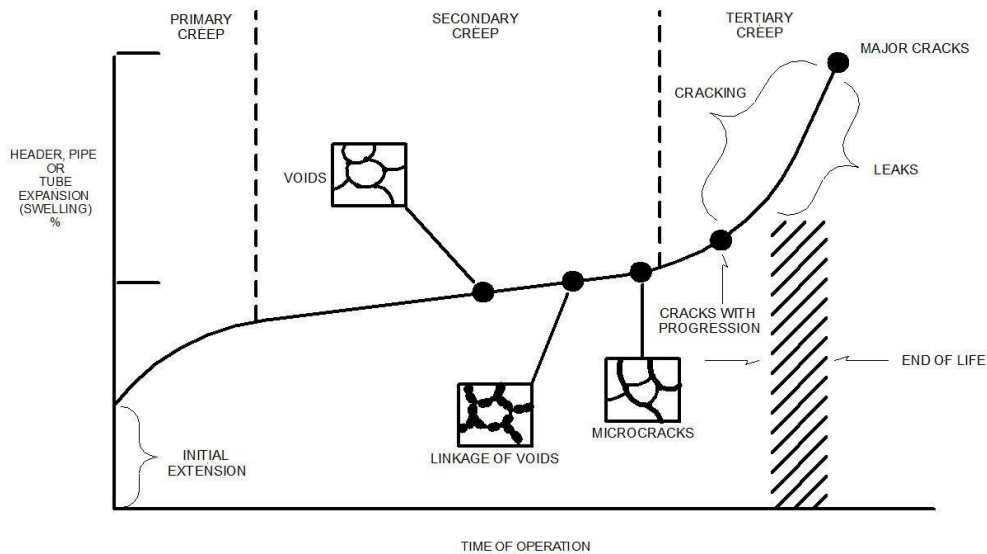
2.2 Τύποι Ερπυσμού

1. Γραμμοαταξιακός ερπυσμός: Κατά τον γραμμοαταξιακό ερπυσμό η πλαστική παραμόρφωση παράγεται με την ολίσθηση γραμμοαταξιών. Σε αυτό τον τύπο δύο λειτουργίες αναιρούνται, η αποκατάσταση αναιρεί την εργοσκήρυνση επιτρέποντας την ολίσθηση των αταξιών κάτω από σταθερή τάση και θερμοκρασία.
2. Ερπυσμός με διαχυτική ροή: Κατά τον ερπυσμό με διαχυτική ροή υπάρχει πλαστική παραμόρφωση χωρίς την ολίσθηση αταξιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιβαλλόμενη τάση δεν επαρκεί για να προκαλέσει ολίσθηση των αταξιών και επομένως η πλαστική παραμόρφωση προκαλείται από μεταφορά μάζας και συγκεκριμένα οπών. Στα σημεία όπου υποβάλλονται εφελκυστικές τάσεις υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση οπών ενώ τα σημεία που υποβάλλονται θλιπτικές τάσεις έχουν μικρότερη συγκέντρωση οπών από την μέση συγκέντρωση οπών του κρυστάλλου. [3]

2.3 Χρονική Εξέλιξη Ερπυσμού

Στην παρακάτω Εικόνα 1 ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος t σε λογαριθμική κλίμακα και ο κατακόρυφος είναι η παραμόρφωση ϵ του υλικού. Όπως διακρίνουμε στο διάγραμμα υπάρχουν τρία στάδια ερπυσμού.

- Το 1^ο στάδιο: ονομάζεται πρωτογενής ερπυσμός, όπου η ταχύτητα ερπυσμού μειώνεται με το χρόνο t . Κατά τον πρωτογενή ερπυσμό η πλαστική παραμόρφωση προκαλεί εργοσκήρυνση, την αντίσταση δηλαδή του υλικού σε περαιτέρω παραμόρφωση. Επιπλέον η πυκνότητα των αταξιών μειώνεται και η ταχύτητα παραμόρφωσης μειώνεται.
- Το 2^ο στάδιο: ονομάζεται δευτερογενής ή σταθερός ερπυσμός, όπου η ταχύτητα ερπυσμού παραμένει σταθερή με το χρόνο. Στο δεύτερο στάδιο η αποκατάσταση εξισορροπεί την εργοσκήρυνση. Η αποκατάσταση δηλαδή εκφράζει την εξασθένηση του υλικού και οφείλεται στην μείωση της πυκνότητας των αταξιών στα σύνορα των κόκκων του υλικού. Υψηλές θερμοκρασίες συμβάλουν στην αύξηση της διάχυσης με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενέργειας παραμόρφωσης.
- Το 3^ο στάδιο: ονομάζεται τριτογενής ή επιταχυνόμενος ερπυσμός, όπου έχουμε επιτάχυνση της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία του υλικού.[3]



Εικόνα 1: Διάγραμμα καμπύλης ερπυσμού.[2]

2.4 Βασικά χαρακτηριστικά κραμάτων αντοχής σε ερπυσμό

Τα κράματα Fe-25Cr-35Ni-C χρησιμοποιούνται ευρέως ως κατασκευαστικά υλικά στις πετροχημικές βιομηχανίες για την παραγωγή υδρογόνου από υδρογονάνθρακες. Οι αυλοί ενός reformer είναι από τα πιο κρίσιμα μέρη για ανάπτυξη ερπυσμού καθώς λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Γι αυτό τον λόγο τα βασικά χαρακτηριστικά των κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές είναι:

- Το υψηλό σημείο τήξεως.
- Κρυσταλλική δομή του υλικού. Τα μέταλλα με εδροκεντρώμενο σύστημα (FCC) παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από του χωροκεντρώμενου συστήματος (BCC) για δύο λόγους: Έχουν χαμηλότερο συντελεστή διάχυσης και επιπλέον υπάρχουν δομικοί περιορισμοί στην κίνηση των αταξιών.
- Μέγεθος κόκκου. Χονδρόκοκκα υλικά.
- Κατεργασία υλικού. Προτιμάται η δημιουργία δομής με όσο τον δυνατόν λιγότερα σύνορα κόκκων με αποτέλεσμα την λιγότερη ανάπτυξη μικροσπών στα σύνορα των κόκκων και αύξηση της διάρκειας ζωής του υλικού.
- Κραμάτωση. Βασικός ρόλος της προσθήκης κραματικών στοιχείων είναι η παρεμπόδιση της ολίσθησης των αταξιών. [3]

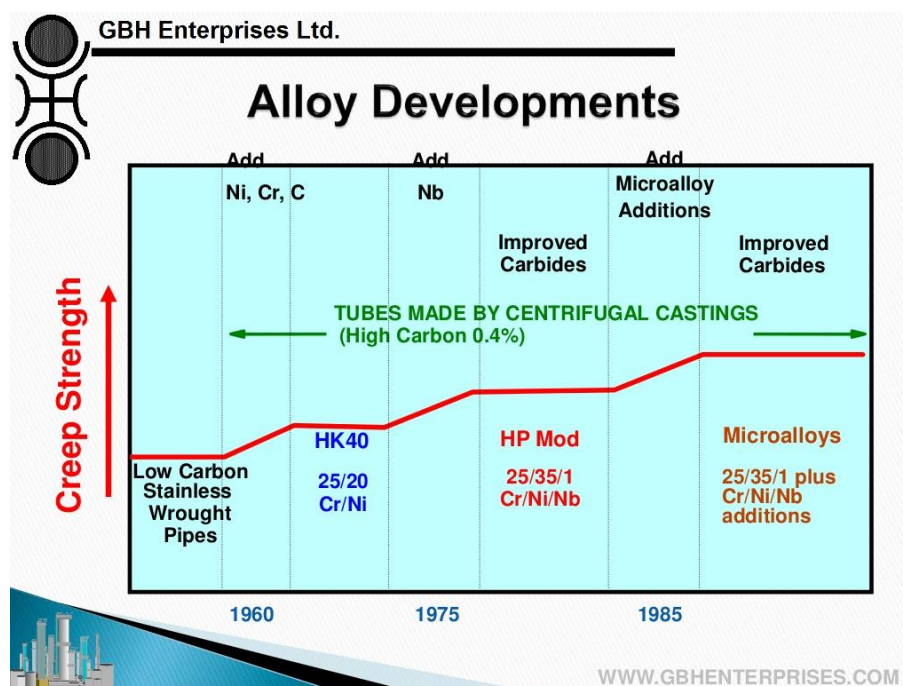
2.5 PARALLOY H39WM

Το κράμα PARALLOY H39WM κατασκευάστηκε με στόχο να βελτιώσει την απόδοση του HK40 που προηγήθηκε. Στον παρακάτω Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές στην σύσταση των κραμάτων HK40, HP και HP Microalloy.

Πίνακας 1: Σύσταση κραμάτων (%κ.β) [18].

Όνομα Κράματος	Εμπορική Ονομασία	Ni	Cr	Nb	C	W	Άλλα
H21	HK40	20%	25%	-	0.4%	-	-
H39W	HP Nb Mod	35%	25%	1%	0.4%	-	Επιπλέον Προσθήκες
H39WM	HP Microalloy	35%	25%	1%	0.4%	-	Επιπλέον Προσθήκες

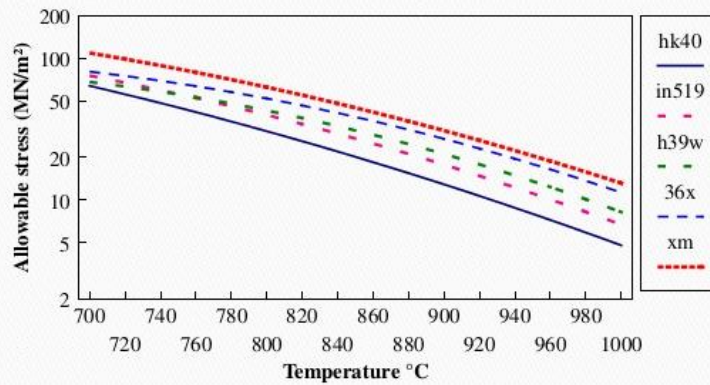
Το βασικό μειονέκτημα του χάλυβα HK40 είναι η χαμηλή αντίσταση σε ερπυσμό και η ψαθυροποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η προσθήκη Nb στον κράμα HK40 έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αντοχή σε ερπυσμό. Τέλος, όπως φαίνεται και από τις παρακάτω Εικόνα 2, Εικόνα 3, η προσθήκη και άλλων κραματικών στοιχείων και η δημιουργία της κατηγορίας των Microalloys έχει ως αποτέλεσμα την διπλάσια αντοχή σε ερπυσμό σε σχέση με τον χάλυβα HK40. Έτσι το κράμα H39WM έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε διπλάσιες πιέσεις λειτουργίας από το κράμα HK40 σε θερμοκρασίες μεταξύ των 700-1000 °C.



Εικόνα 2: Χρονική εξέλιξη των υλικών συναρτήσει της αντοχής τους σε ερπυσμό [6].

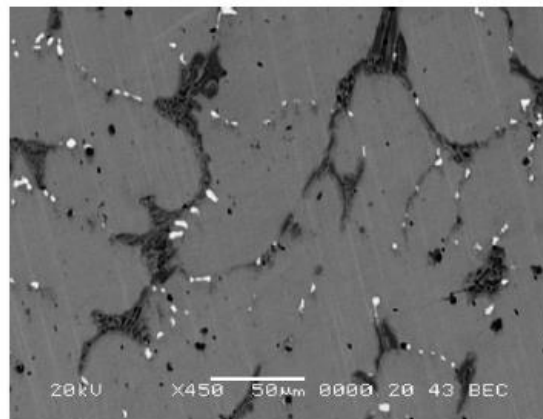
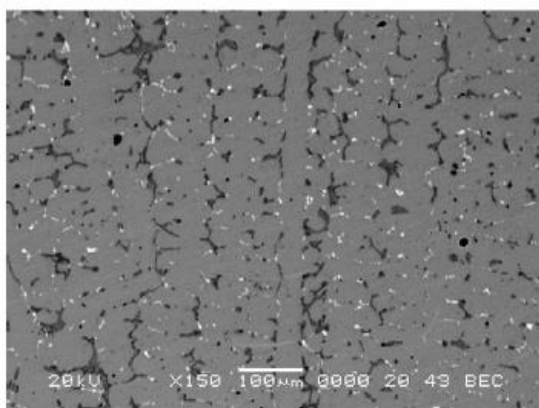


Material Types



Εικόνα 3: Πίεση λειτουργίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικά κράματα [6].

Πρόκειται για κράμα Fe-Ni-Cr το οποίο παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε ερυσμό. Επιπλέον παρουσιάζει αντίσταση στην διάβρωση ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μικροδομή του αποτελείται από ωστενιτική μήτρα με δενδριτική μορφή, με υψηλή περιεκτικότητα σε Cr, το οποίο είναι απαραίτητο για τον σχηματισμό του προστατευτικού film Cr_2O_3 . Αυτό το film βελτιώνει την αντίσταση του υλικού σε οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Συστατικά όπως το Cr, Nb, Mo σχηματίζουν καρβίδια τύπου M_7C_3 , M_{23}C_6 και το Nb σχηματίζει καρβίδια τύπου MC (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Μαύρη φάση: Καρβίδια του Cr, λευκή φάση: καρβίδια του Nb [7].

Η υψηλή περιεκτικότητα σε Ni προσφέρει αντοχή στην ωστενιτική δομή μέσω ελέγχου των ορίων του κόκκου ώστε το υλικό να παραμείνει όλκιμο καθώς και συμβάλει στην αντίσταση στην θερμική κόπωση. Με την άνοδο της θερμοκρασίας τα καρβίδια του Nb μετασχηματίζονται σε πυριτιούχες ενώσεις Nb-Ni-Si που είναι γνωστές ως G-φάση. Ο μετασχηματισμός σε G-φάση έχει αρνητικές επιπτώσεις καθώς η επιφάνεια αυτής της φάσης και της μήτρας είναι προτιμητέα για την ανάπτυξη ερπυσμού. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να παραληφθεί με την προσθήκη Ti το οποίο μειώνει το κλάσμα όγκου της G-φάσης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικές ιδιότητες σε ερπυσμό και κατασκευάζονται με φυγοκεντρική χύτευση. Παράγονται με αυτή την μέθοδο διότι έχουν υψηλή πυκνότητα, μειώνεται η πιθανότητα να υπάρχουν ατέλειες κατά την διαδικασία της χύτευσης και τέλος έχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Παρόλο που έχουν σχεδιαστεί για 100000 ώρες κανονική διάρκεια ζωής η πραγματική του διάρκεια είναι από 30000 έως 180000 ώρες ανάλογα με τις συνθήκες. Εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες η μικροδομή του υφίσταται υποβάθμιση. Τέλος το κράμα μπορεί να συγκολληθεί με την μέθοδο των επενδυμένων καλωδίων SMAW αλλά και με την μέθοδο συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου GTAW και με τηκόμενο ηλεκτρόδιο GMAW. [4], [5],[6],[7]

2.6 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι αναγνώρισης βλάβης ερπυσμού

Έχουν προταθεί αρκετές μη καταστρεπτικές μέθοδοι για την αναγνώριση βλαβών ερπυσμού και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται περιληπτικά παρακάτω. Οι έλεγχοι πραγματοποιούνται συνεχώς με προκαθορισμένη περιοδικότητα επιθεώρησης εξοπλισμού για τον εντοπισμό πιθανών οπών ή μικρορωγμών. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η μικροδομή ενός υλικού εξαρτάται έντονα από την σύνθεση του κράματος και ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής μιας μη καταστρεπτικής τεχνικής με βάση το συγκεκριμένο υλικό. Στην παρακάτω Εικόνα 5 παρουσιάζεται τον διάγραμμα της καμπύλης του ερπυσμού και της δυνατότητας εφαρμογής μεθόδων για τον εντοπισμό της βλάβης του ερπυσμού.

- **Φορητή Μεταλλογραφία (Replica)**

Η μεταλλογραφία της ρέπλικας είναι η πιο συνηθισμένη μη καταστρεπτική μέθοδος που χρησιμοποιείται η οποία αναπτύχθηκε ραγδαία την δεκαετία του 1980. Η επιφάνεια η οποία πρόκειται να ελεγχθεί χρειάζεται κατάλληλη προετοιμασία. Αυτή περιλαμβάνει τον καθαρισμό της επιφάνειας με λείανση και στίλβωση έτσι ώστε να γίνει όσο πιο λεία γίνεται, στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή του film. Το film προετοιμάζεται με κατάλληλο διαλύτη (ο διαλύτης εξαρτάται από το υλικό στο οποίο γίνεται η εφαρμογή) και στην συνέχεια εφαρμόζεται στην επιφάνεια ελέγχου μέχρι να στερεοποιηθεί. Έτσι αποτυπώνεται πάνω στο film εικόνα της επιφάνειας η οποία αφαιρείται και στην συνέχεια εξετάζεται με οπτικό μικροσκόπιο για μελέτη/ αξιολόγηση. Αυτή η τεχνική μπορεί να παρέξει ποσοτικά δεδομένα για ελαττώματα και οπές έως και 1 mm βάθος από την εξωτερική επιφάνεια του υλικού. [8]

- Υποεπιφανειακές μη καταστρεπτικές μέθοδοι

Ο **υπέρηχος** είναι παρόμοιας φύσης με τον ακουστικό ήχο, έχει όμως μικρότερα μήκη κύματος και είναι κατάλληλος για τον εντοπισμό ατελειών στα υλικά. Οι τεχνικές οι οποίες βασίζονται στις μετρήσεις της ηχούς του πίσω τοιχώματος, όπως είναι η ταχύτητα κύματος και η εξασθένηση κύματος, εξετάζουν από την φύση τους ολόκληρο τον όγκο του εξεταζόμενου υλικού δίνοντας αποτελέσματα κατά μέσο όρο για όλο το πάχος κι επομένως η τεχνική αυτή είναι ιδανική για την καταμέτρηση του ογκομετρικού ερπυσμού. Η **ραδιογραφία** όπως και ο υπέρηχος εξετάζει ολόκληρο τον όγκο του εξεταζόμενου υλικού και βασίζεται στην ικανότητα της ακτινοβολίας να διαπερνά σε διαφορετικό βαθμό τα υλικά και να τα αποτυπώνει σε ειδικό φιλμ. [8] , [9].

- Επιφανειακές μη καταστρεπτικές μέθοδοι

Η εφαρμογή των **μαγνητικών σωματιδίων (MT)** είναι προφανές ότι περιορίζεται μόνο στα σιδηρομαγνητικά υλικά (φερρίτης) και σε εκείνα τα υλικά όπου η φερριτική φάση εμφανίζεται. Περιορίζεται στον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών. Ενώ αυτή η τεχνική έχει χαρακτηριστεί ως πιο ελπιδοφόρα σε σχέση με αυτή των υπερήχων, υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με την επιλεκτικότητα τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παράγοντες όπως το ψυχρό περιβάλλον, η τοπική διαφορά σύστασης του υλικού και η παρουσία παραμενουσών τάσεων μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Αντίστοιχη μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων είναι τα **διεισδυτικά υγρά**. Η μέθοδος αυτή περιορίζεται στον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών και βασίζεται στην οπτική παρατήρηση. Τα διεισδυτικά υγρά έχουν δύο υποκατηγορίες τα ορατά διεισδυτικά υγρά και τα φθορίζοντα. Τα **δινορεύματα** εξαρτώνται επίσης από πολλούς παράγοντες όπως είναι η μικροδομή, η τραχύτητα της επιφάνειας, σκληρότητα, τοπικές παραλλαγές στην σύσταση του υλικού και στην διαπερατότητά του. Η τεχνική αυτή έχει την δυνατότητα να εντοπίσει ατέλειες μέσα στο υλικό αλλά σε μικρό βάθος λίγων mm. [8]

- **Διαφορά δυναμικού**

Για την παρακολούθηση της ανάπτυξης του ερπυσμού χρησιμοποιούνται μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού σε μια ηλεκτρική αντίσταση. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η τεχνική αυτή έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει βλάβη ερπυσμού από τα πρωταρχικά του στάδια. Για την τεχνική αυτή ενδείκνυται να χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα για την αποφυγή σφαλμάτων από τοπικές παραλλαγές με στόχο την καλή διείδυση.

- **Σκληρότητα**

Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη του φαινομένου του ερπυσμού. Μέσα σε αυτές είναι και οι μετρήσεις σκληρότητας κατά Vickers. Σε χάλυβες Cr-Mo έχει παρατηρηθεί μια γραμμική μείωση της σκληρότητας του υλικού μεταξύ του 20-90% της ζωής του σε ερπυσμό ενώ κατά τα τελικά στάδια υπάρχει μια δραματική μείωση. Αντίθετα στους ωστενιτικούς χάλυβες στο δεύτερο μέρος της ζωής του μετάλλου που παρουσιάζει ερπυσμό παρατηρείται μια αύξηση της σκληρότητας. Παρόλο που οι σκληρομετρήσεις μπορούν να συνδεθούν με τα στάδια ερπυσμού, δεν είναι το κύριο κριτήριο για την αξιολόγηση του ερπυσμού.

556

G. Sposito et al / NDT&E International 43 (2010) 555-567

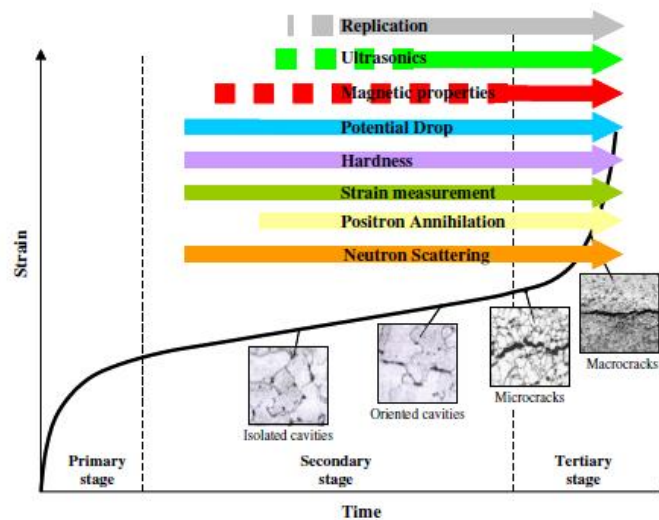


Fig. 1. Typical creep curve with evolution of microstructural damage. The indicated ranges of applicability of the various NDE techniques do not represent a quantitative assessment, but are intended only as a qualitative overview.

Εικόνα 5: Διάγραμμα καμπύλης ερπυσμού με μεθόδους NDT. [8]

Η παρούσα εργασία εστιάζει στις μεθόδους των διεισδυτικών υγρών, στην μέθοδο της ραδιογραφίας, στην μέθοδο των υπερήχων και στην μέθοδο phased array οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα στην συνέχεια.

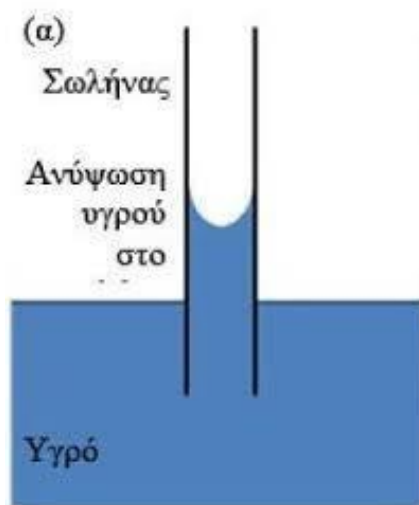
2.7 Μέθοδος των Διεισδυτικών Υγρών

2.7.1 Γενικά

Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (ΔΥ) είναι μια μέθοδος η οποία βασίζεται στην οπτική παρατήρηση και χρησιμοποιείται για να αποκαλύψει επιφανειακά ελαττώματα. Τα ΔΥ αυξάνουν την πιθανότητα παρατήρησης επιφανειακών βλαβών που δεν μπορούν να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια ενός προσροφητικού υγρού το οποίο εισχωρεί στην ρωγμή και με την τριχοειδή δράση κάνει την ρωγμή πιο ευδιάκριτη.

2.7.2 Βασική αρχή

Η βασική αρχή των διεισδυτικών υγρών βασίζεται στο φαινόμενο της διαβροχής. Έτσι υγρά με υψηλή διαβροχή έχουν την ικανότητα να καταλαμβάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια πάνω σε ένα στερεό σε αντίθεση με υγρά τα οποία έχουν μικρή διαβροχή και δεν διαβρέχουν μεγάλη επιφάνεια (όπως το μέλι και ο υδράργυρος). Για τον λόγο αυτό κατά την εφαρμογή των διεισδυτικών υγρών απαιτούνται υγρά τα οποία είναι λεπτόρρευστα. Το φαινόμενο που αξιοποιεί η μέθοδος των ΔΥ είναι αυτό του τριχοειδούς φαινομένου. Όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 6, όταν ένας λεπτός σωλήνας εισχωρήσει μέσα σε ένα υγρό τότε η στάθμη μέσα στον σωλήνα είναι σε μεγαλύτερο ύψος από την επιφάνεια του ρευστού.



Εικόνα 6: Το τριχοειδές φαινόμενο [10].

Η τριχοειδής δράση εξαρτάται από:

1. Την επιφανειακή τάση του διεισδυτή. Τα υγρά με μικρή επιφανειακή τάση παρουσιάζουν υψηλότερη τριχοειδή δράση.
2. Την γωνία επαφής του υγρού. Όσο μικρότερη είναι η γωνία επαφής τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής δράση.

3. Την διάμετρο του σωλήνα. Όσο μικρότερη τόσο μεγαλύτερη τριχοειδής δράση.

Υπάρχει ένας τύπος ο οποίος υπολογίζει ποσοτικά την πίεση του τριχοειδούς φαινομένου για την εφαρμογή σε ένα ρήγμα.

$$P = 2 \times S \times \cos\theta \div W \quad (1)$$

Η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη από μια ατμόσφαιρα επομένως μπορεί να εφαρμοστεί και σε κατακόρυφες θέσεις. [10]

2.7.3 Υλικά Εφαρμογής

Υλικά που μπορούν να ελεγχθούν με ΔΥ είναι σχεδόν όλα όσα έχουν σχετικά λεία επιφάνεια και χαμηλό πορώδες. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κατά κόρον σε μέταλλα αλλά και σε άλλα υλικά. Υλικά στα οποία δεν ενδείκνυται η χρήση ΔΥ είναι πορώδη κεραμικά, ξύλο και μέταλλα που κατασκευάζονται από χύτευση σε άμμο. Σε τέτοιου είδους υλικά θα υπάρξει προσρόφηση του ΔΥ σε πολλά σημεία (πόροι, τραχύτητα) και θα προκύψουν λανθασμένες ενδείξεις βλάβης που δεν θα επιτρέπουν την παρατήρηση των πραγματικών ατελειών. Αυτές είναι οι λεγόμενες μη σχετικές ενδείξεις.

2.7.4 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

- Δεν απαιτείται πολύπλοκος εξοπλισμός
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υλικά αγωγίμα και μη αλλά και σε σιδηρομαγνητικά είτε σε μη σιδηρομαγνητικά.
- Ανιχνεύει ταυτόχρονα ασυνέχειες διαφορετικού προσανατολισμού
- Δεν υπάρχουν περιορισμοί μεγέθους του ελεγχόμενου υλικού. [11]

2.7.5 Μειονεκτήματα της μεθόδου

- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πορώδη υλικά ούτε πάνω από επιστρώσεις χρώματος.
- Ανιχνεύει μόνο ασυνέχειες ανοιχτές στην επιφάνεια.
- Η μέθοδος χάνει εύκολα την ευαισθησία της και εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την φύση της ασυνέχειας και την καθαρότητα του εσωτερικού.
- Είναι λιγότερο ευαίσθητη από τα μαγνητικά σωματίδια και τα δινορεύματα.[11]

2.8 Μέθοδος της Ραδιογραφίας (RT)

2.8.1 Γενικά

Ο ραδιογραφικός έλεγχος είναι ο πλέον διαδεδομένος μη καταστρεπτικός έλεγχος για τα μεταλλικά υλικά. Πραγματοποιείται με την βοήθεια κάποιας πηγής ακτινών Χ ή γ. Εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος οι ακτίνες έχουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα και έτσι επιτρέπουν την εξέταση υλικών μεγάλου σχετικά πάχους. Με τον ραδιογραφικό έλεγχο μπορούν να ανιχνευτούν ασυνέχειες με αξιόλογο πάχος σε μια διεύθυνση παράλληλη με την δέσμη της ακτινοβολίας. Τρισδιάστατες ασυνέχειες, όπως πόροι και εγκλείσματα, που έχουν υπολογίσιμο πάχος σε όλες τις διευθύνσεις μπορεί να ανιχνευτούν αρκεί να έχουν πάνω από 1% διαφορά στην απορρόφηση της ακτινοβολίας σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο.

Οι ακτίνες Χ έχουν συχνότητα εκπομπής από $10^{17} - 10^{20}$ Hz και είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όμοια με αυτή του φωτός, με χαρακτηριστικά που τους επιτρέπουν να διαπερνούν κάθε μορφής μάζα. Οι ακτίνες Χ παράγονται όταν ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες προσκρούουν εν κενό σε ειδικά διαμορφωμένο στόχο. Ανάλογα με το μήκος της παραγόμενης ακτινοβολίας χωρίζονται σε :

- Ήπιας μορφής, όταν το μήκος κύματος είναι της τάξης των 10 nm
- Βαριάς μορφής, όταν το μήκος κύματος είναι της τάξης των 10^{-4} nm.

Παρόμοιας μορφής ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελούν και οι ακτίνες γ οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μη καταστρεπτικές δοκιμές. Διαφέρουν με τις ακτίνες Χ ως προς την συχνότητα εκπομπής ($10^{21} - 10^{24}$ Hz) και στον τρόπο παραγωγής τους, που οφείλεται σε εκπομπή από ραδιενεργούς πυρήνες.

Και οι δύο μορφές ακτινοβολίας μεταφέρονται σε ευθείες γραμμές, είναι αόρατες, έχουν κοινές ιδιότητες με την ορατή ακτινοβολία, αλλά είναι αδύνατο να εστιάσουν πάνω σε ένα συγκεκριμένο στόχο. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda = h \times c \div W \quad (2)$$

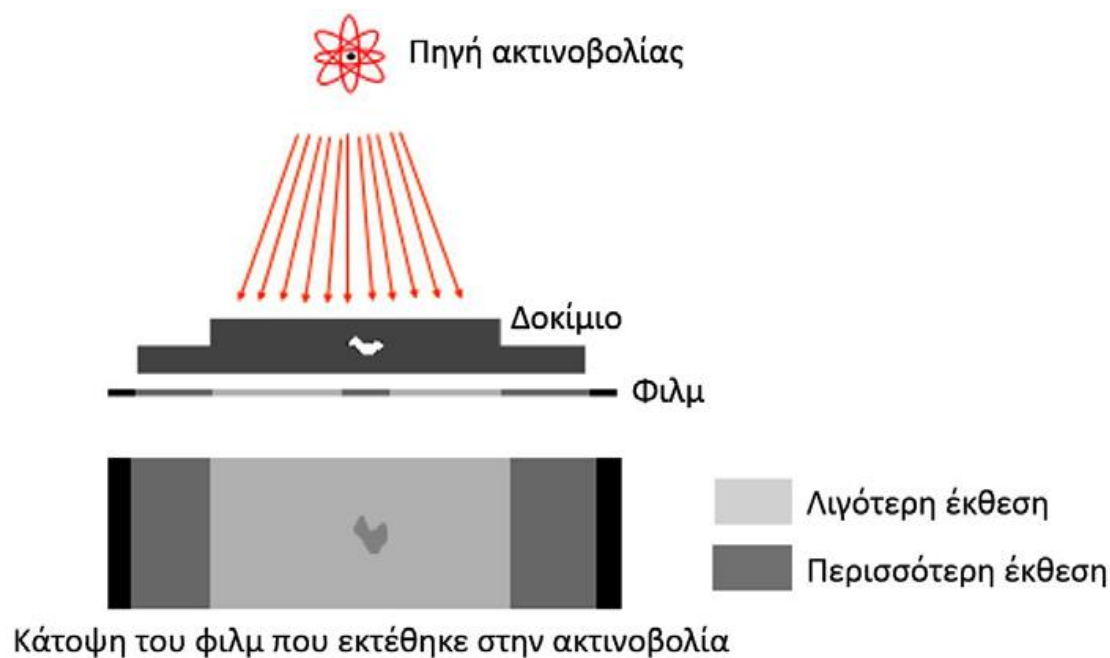
Όπου λ το μήκος κύματος, h η σταθερά του Planck ίση με $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, c η ταχύτητα του φωτός και W η ενέργεια της ακτινοβολίας.

Κατά την πορεία του μέσα από τα σώματα, οι ακτίνες απορροφώνται ολικά ή μερικά. Η ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας δίνεται από την σχέση:

$$I_e = I_o \times e^{-\mu s} \quad (3)$$

Όπου I_e η ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας, I_o η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, μ ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης και s το πάχος του σώματος.

Για την παραγωγή του ραδιογραφήματος ενός τεμαχίου, απαιτείται από μία πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία προσπίπτει και διαπερνά το υπό εξέταση τεμάχιο και εν συνεχεία προσβάλλει το ευαίσθητο φωτογραφικό φιλμ (Εικόνα 7). [11]



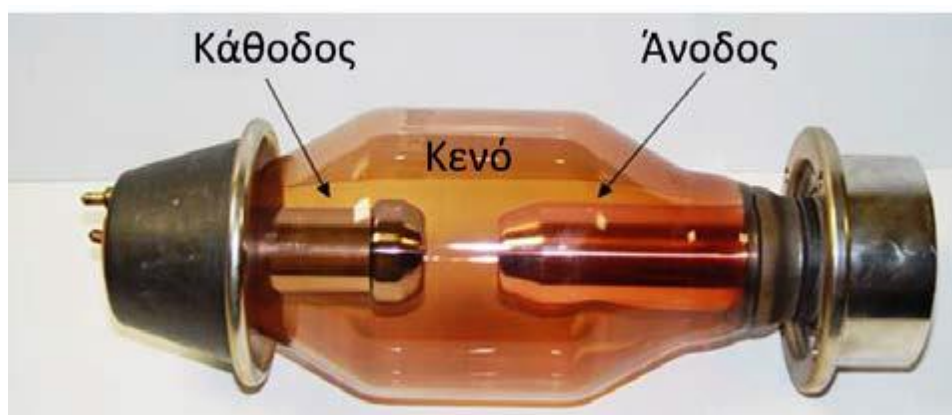
Εικόνα 7: Αρχή του ελέγχου υλικών με ραδιογραφία. [11]

2.8.2 Ραδιογραφικός έλεγχος με ακτίνες γ

Ως πηγή των ακτινών γ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα ραδιενεργά υλικά που εκπέμπουν σωμάτια α, σωμάτια β, ακτίνες γ και μερικές από αυτά και νετρόνια. Τα ραδιενεργά ισότοπα που είναι κατάλληλα για την παραγωγή των ραδιογραφήματων είναι σχετικά λίγα και περιορίζονται στα Cobalt-60, Iridium- 192 , Caesium-137, Iodine-24, Xenon-133 και Sodium-24. Οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται για τον έλεγχο της πηγής των ακτινών γ αποσκοπούν στον καλύτερο έλεγχο της πηγής εκπομπής, του χρόνου εκπομπής και κυρίως στην μόνωση του ραδιενεργού στοιχείου όταν αυτό βρίσκεται υπό χρήση.[11]

2.8.3 Ραδιογραφικός έλεγχος με ακτίνες X

Σε αντίθεση με τις ακτίνες γ για την παραγωγή των ακτινών X χρησιμοποιείται η αρχή του σωλήνα Coolidge (Εικόνα 8). Ο έλεγχος της παραγόμενης ακτινοβολίας και ο χρόνος προσβολής γίνεται υπό τον εξωτερικό έλεγχο της τάσης επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων, που προσπίπτουν πάνω στην ειδική επικλινή βάση από βολφράμιο (άνοδος). Η ραδιογραφική ταινία θα εμφανιστεί, στην πλευρά της εξόδου της ακτινοβολίας, με διαφορετική φωτεινότητα.



Εικόνα 8: Λυχνία κενού (σωλήνας Coolidge) για παραγωγή ακτινών X [11].

Σε κενό, αυτή εμφανίζεται σκοτεινότερη (μαύρη σκιά). Σε αύξηση πάχους η ταινία είναι φωτεινότερη (άσπρη σκιά). Κατά την ενεργειακή μετατροπή μόνο το 10% της προσπίπτουσας δέσμης μετατρέπεται σε ακτίνες X. Η μορφή της ανόδου μπορεί να είναι:

- Κωνική, για παραγωγή ακτινικής πανοραμικής δέσμης
- Επίπεδη για πανοραμική δέσμη προς τα πίσω
- Με μεταβατική διάταξη για προώθηση της δέσμης προς τα εμπρός[11]

2.8.4 Σύγκριση ακτινών X και ακτινών γ

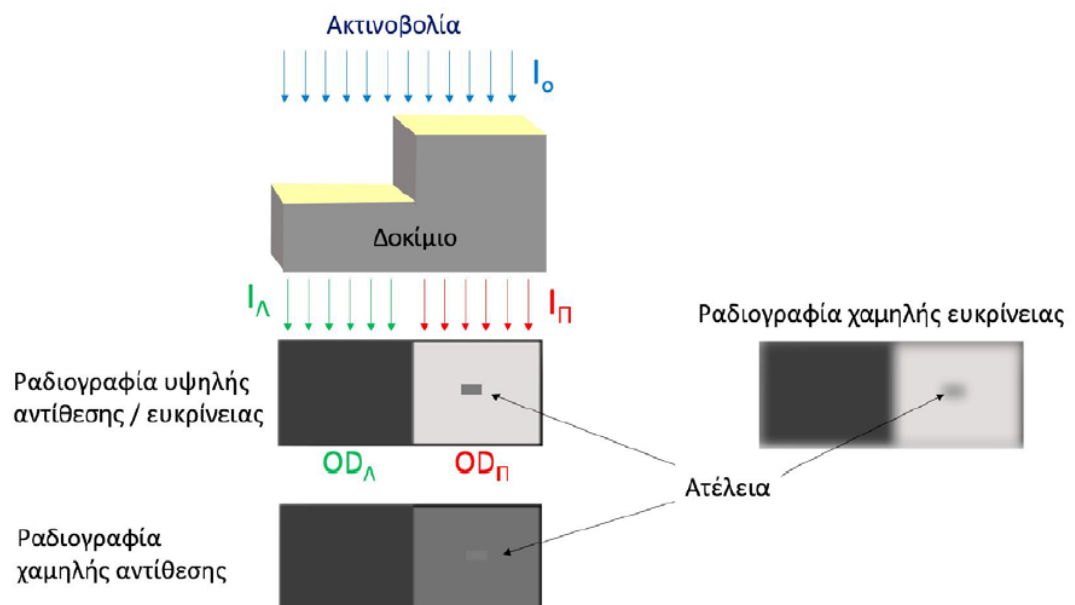
- Οι ακτίνες γ διεισδύουν περισσότερο.
- Για αλλαγή μήκους κύματος ακτινοβολίας γ , απαιτείται αλλαγή ισότοπου.
- Για σίδηρο, χρησιμοποιούνται ακτίνες X για πάχη μέχρι 50 mm, ενώ ακτίνες γ μέχρι 160 mm.
- Οι ακτίνες X δημιουργούν καλύτερη αντίθεση

- Οι ακτίνες X έχουν μεγαλύτερη ένταση από τις ακτίνες γ. Γι αυτό τον λόγο οι ακτίνες γ απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης
- Οι συσκευές των ακτινών γ είναι πιο ευκίνητες και λιγότερο ευαίσθητες
- Οι ακτίνες γ εκπέμπονται αυτόματα από τα ισότοπα(χωρίς ηλεκτρικές διασυνδέσεις)[12]

2.8.5 Έννοιες της Ραδιογράφησης

- Αντίθεση ραδιογραφικής εικόνας

Αντίθεση ραδιογραφικής εικόνας ονομάζεται η διαφορά πυκνοτήτων του φιλμ, σε γειτονικές περιοχές του ραδιογραφήματος. Αύξηση της αντίθεσης (contrast) σημαίνει και βελτίωση της ποιότητας (ευαισθησίας) της ραδιογραφικής εικόνας(Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Αντίθεση και ευκρίνεια ραδιογραφίας [11].

- Εύρος ραδιογραφικής εικόνας

Το εύρος της ραδιογραφικής εικόνας είναι το αντίστροφο της αντίθεσης. Ορίζεται ως το εύρος παχών που μπορούν να ραδιογραφηθούν με μία λήψη μέσα σε ένα αποδεκτό εύρος πυκνοτήτων (1.8 έως 4.0).

- Ευκρίνεια ραδιογραφικής εικόνας

Ραδιογραφική ευκρίνεια ορίζεται η απότομη μετάβαση από μια περιοχή συγκεκριμένης πυκνότητας σε μία άλλη (Εικόνα 9).

- Νόμος αντιστοιχίας

Ο νόμος αντιστοιχίας η ραδιογραφική έκθεση ορίζεται το γινόμενο των mA x χρόνο έκθεσης.

- Γεωμετρική δυσκρίνεια

Επειδή η πηγή των ακτινών X δεν είναι σημειακή αλλά βρίσκεται σε μία κοντινή απόσταση με το δοκίμιο και το φιλμ έχουμε τον σχηματισμό παρασκιάς (penumbra) γύρω από την σκιά (umbra) γεγονός που μειώνει την ευκρίνεια της εικόνας. Το μέγεθός της δίνεται από τον τύπο:

$$Ug = F \times t \div d \quad (4)$$

, όπου F η διάσταση της πηγής, t η απόσταση αντικειμένου φιλμ, d η απόσταση πηγής αντικειμένου.

- Μέτρηση του μεγέθους του εστιακού βάρους

Είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το μέγεθος του εστιακού βάρους διότι περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της γεωμετρικής δυσκρίνειας Ug και άρα παίζει ρόλο στην ελάχιστη αποδεκτή απόσταση πηγής- αντικειμένου.

- Κοκκώδες του φιλμ

Το κοκκώδες φιλμ επιφέρει δυσκρίνεια στην ραδιογραφική εικόνα, η οποία ονομάζεται δυσκρίνεια του φιλμ και συμβολίζεται με Uf. Το κοκκώδες φιλμ αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται φιλμ υψηλότερων ταχυτήτων είτε ακτινοβολία μεγαλύτερης συχνότητας.

- Νόμος των αντίστροφων τετραγώνων

Όταν ακτινοβολία σταθερής έντασης εκπέμπεται από πηγή μικρών σχετικά διαστάσεων, η εκπεμπόμενη δέσμη χάνει την ένταση της όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή και μάλιστα ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από αυτήν.

$$I1/I2 = D2^2/D1^2 \quad (5)$$

Ο υπολογισμός του είναι απαραίτητος για θέματα ασφαλείας.[12]

2.9 Μέθοδος των Υπερήχων (UT)

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 εκπέμπεται από έναν πομπό, ταξιδεύει στο υλικό και ανακλάται από επιφανειακές ή υποεπιφανειακές ασυνέχειες. Η ανακλώμενη δέσμη στην συνέχεια φθάνει στον δέκτη όπου μετατρέπεται σε σήματα ηλεκτρικής τάσης. Ηχητικά κύματα πάνω από το επίπεδο του φάσματος της ανθρώπινης ακοής (που βρίσκεται μεταξύ 20 Hz και 20 kHz) ονομάζονται υπέρηχοι(Εικόνα 10). Ο υπέρηχος είναι παρόμοιας φύσης με τον ακουστικό ήχο έχει όμως πολύ μικρότερα μήκη κύματος και είναι πιο κατάλληλος για την ανίχνευση ατελειών στα υλικά.

Κάθε κύμα ελαστικότητας έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά:

1. Την ταχύτητα διάδοσης του c σε [m/sec].
2. Την συχνότητα του κύματος f σε [Hz].
3. Το μήκος κύματος λ σε [m].

Η ταχύτητα διάδοσης είναι το γινόμενο της απόστασης που διανύει το κύμα σε κάθε ταλάντωση ενός μορίου επί τον αριθμό των ταλαντώσεων που συντελούνται στην μονάδα του χρόνου.

$$c = \lambda \times f \quad (6)$$

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται σε μη καταστρεπτικές δοκιμές σε συχνότητες από 100 kHz έως 25 MHz. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες όμως συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ 1 και 6 MHz. [9]



2.9.1 Τύποι κυμάτων

- Διαμήκη κύματα (longitudinal waves)

Η διεύθυνση της ταλάντωσης είναι η ίδια με την διεύθυνση της μετάδοσης του κύματος. Έχουν την δυνατότητα να μεταδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_L = \sqrt{E(1-\nu)/\rho(1+\nu)(1-2\nu)} = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητά του.

Χαρακτηριστικό των διαμηκών κυμάτων είναι ότι έχουν την μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από όλους τους τύπους κυμάτων. Αυτό συνεπάγεται ότι για δεδομένη συχνότητα έχουν το μεγαλύτερο μήκος κύματος και άρα την μικρότερη αποδυνάμωση αλλά χάνουν σε ευαισθησία.

- Εγκάρσια κύματα (transverse waves)

Η διεύθυνση ταλάντωσης είναι κάθετη προς την διεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Μεταδίδονται μόνο σε στερεά σώματα, διότι τα υγρά και τα αέρια δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε εγκάρσια φόρτιση. Η ταχύτητα μετάδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_T = \sqrt{G/\rho} \quad (8)$$

Όπου G το μέτρο διάτμησης του υλικού και ρ η πυκνότητά του.

Έχουν ταχύτητα διάδοσης την μισή των διαμηκών κυμάτων και γι αυτό τον λόγο έχουν μικρότερο μήκος κύματος άρα μεγαλύτερη αποδυνάμωση κερδίζουν όμως σε σχέση με τα διαμήκη στην περίπτωση διπλάσια ευαισθησία που έχουν, για συγκεκριμένη συχνότητα.

- Επιφανειακά κύματα (Rayleigh waves)

Πρόκειται για κύματα που μεταδίδονται μόνο στην επιφάνεια των στερεών σε βάθος περίπου ενός μήκους κύματος. Το κύμα Rayleigh φθίνει εκθετικά με το βάθος. Παραγωγή επιφανειακών κυμάτων γίνεται με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης ώστε το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να σχηματίζει γωνία 90° με τον κάθετο στην επιφάνεια άξονα. Μια μη καταστροφική τεχνική που βασίζεται στην χρήση κυμάτων Rayleigh είναι ιδιαίτερα επιθυμητή για την ανίχνευση επιφανειακών ελαττωμάτων, καθώς και βλάβης η οποία βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του υλικού, όπως για παράδειγμα βλάβη από μηχανική κόπωση.

- Κύματα πλάκας (Lamp waves)

Καθοδηγούμενα κύματα που διαδίδονται σε λεπτές πλάκες με δυο παράλληλες ελεύθερες επιφάνειες, όπου η τάση είναι μηδενική, ονομάζονται κύματα πλάκας ή κύματα Lamb. Τα κύματα Lamb δεν παρουσιάζουν μόνο διασπορά, αλλά επίσης για δεδομένη συχνότητα έχουν πολλαπλές τιμές ταχύτητας. Χωρίζονται σε συμμετρικούς και αντισυμμετρικούς ανάλογα με τον τύπο διάδοσης των κυμάτων. Οι συμμετρικοί τύποι διάδοσης η μέση μετατόπιση είναι κατά μήκος της πλάκας ενώ οι αντισυμμετρικοί τύποι διάδοσης παρουσιάζουν μέση μετατόπιση κατά το πάχος της πλάκας στην εγκάρσια διεύθυνση. [9], [11]

2.9.2 Ανάκλαση του ήχου

Όταν ένα κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια διαφορετικής ακουστικής αντίστασης τότε συμβαίνουν ταυτόχρονα ανάκλαση, διάθλαση και μετατροπή τύπου. Τα κύματα υπερήχων ανακλώνται από τα όρια ανάμεσα σε δύο διαφορετικά μέσα που βρίσκονται σε επαφή. Το κάθε μέσο έχει χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση (acoustic impedance) και οι ανακλάσεις συμβαίνουν με παρόμοιο τρόπο όπως εκείνες που παρατηρούνται στα ηλεκτρικά σήματα. Η ακουστική εμπέδηση εκφράζει την ταχύτητα παραμόρφωσης ($u = \theta u / \theta t$) του υλικού όταν σε αυτό επιβάλλεται μια τάση και ορίζεται ως ο λόγος της τάσης (με αρνητικό πρόσημο, δηλ. συμπίεση) προς την ταχύτητα παραμόρφωσης. Η ακουστική εμπέδηση Z ενός μέσου ικανού να διαδώσει ηχητικά κύματα δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \rho \times c \quad (9)$$

Υλικά με υψηλές τιμές ακουστικής εμπέδησης τα ονομάζουμε ηχητικά «σκληρά», σε αντίθεση με τα ηχητικά «μαλακά» υλικά χαμηλής ακουστικής εμπέδησης. Όλη σχεδόν η ακουστική ενέργεια που προσπίπτει σε μια διεπιφάνεια στερεού-αέρα ανακλάται εξαιτίας της μεγάλης αναντιστοιχίας στην ακουστική εμπέδηση ανάμεσα στον αέρα και το στερεό. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση ενός μέσου σύζευξης (coupling medium) με εμπέδηση κοντά σ' εκείνη του στερεού ώστε να διευκολύνει τη μετάδοση της ηχητικής ενέργειας από τον αισθητήρα στο υπό έλεγχο στερεό.

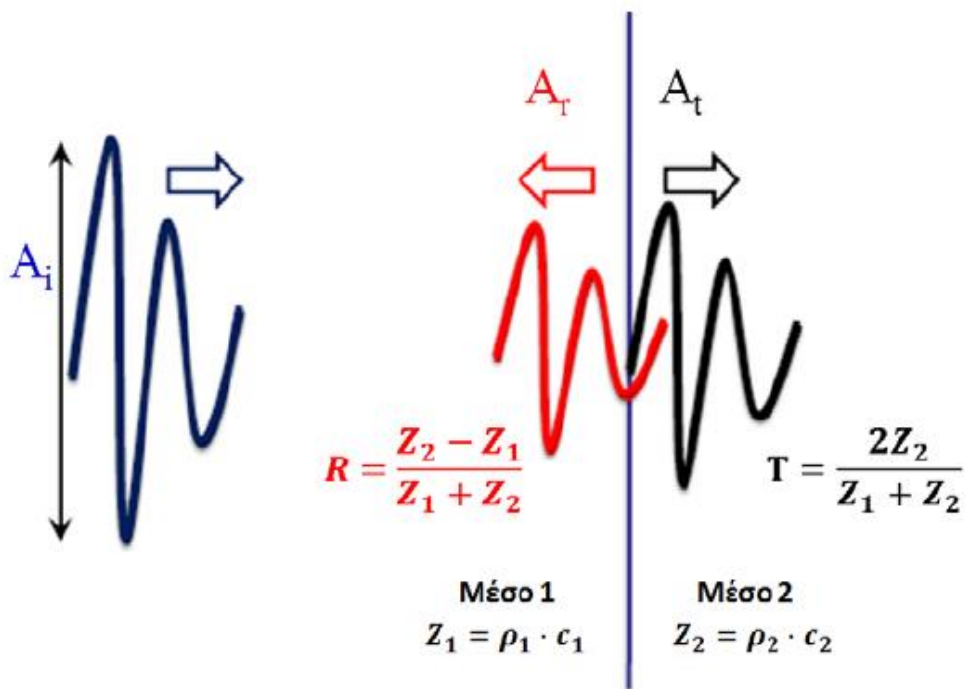
Ο συντελεστής ανάκλασης ορίζεται ως ο λόγος των ηχητικών πιέσεων των ανακλώμενων κυμάτων, P_r , ως προς τα προσπίπτοντα, P_i , η αντίστοιχα ο λόγος των πλατών των κυμάτων.

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (10)$$

Όμοια ο δείκτης μετάδοσης είναι:

$$T = \frac{Pt}{Pi} = \frac{At}{Ai} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (11)$$

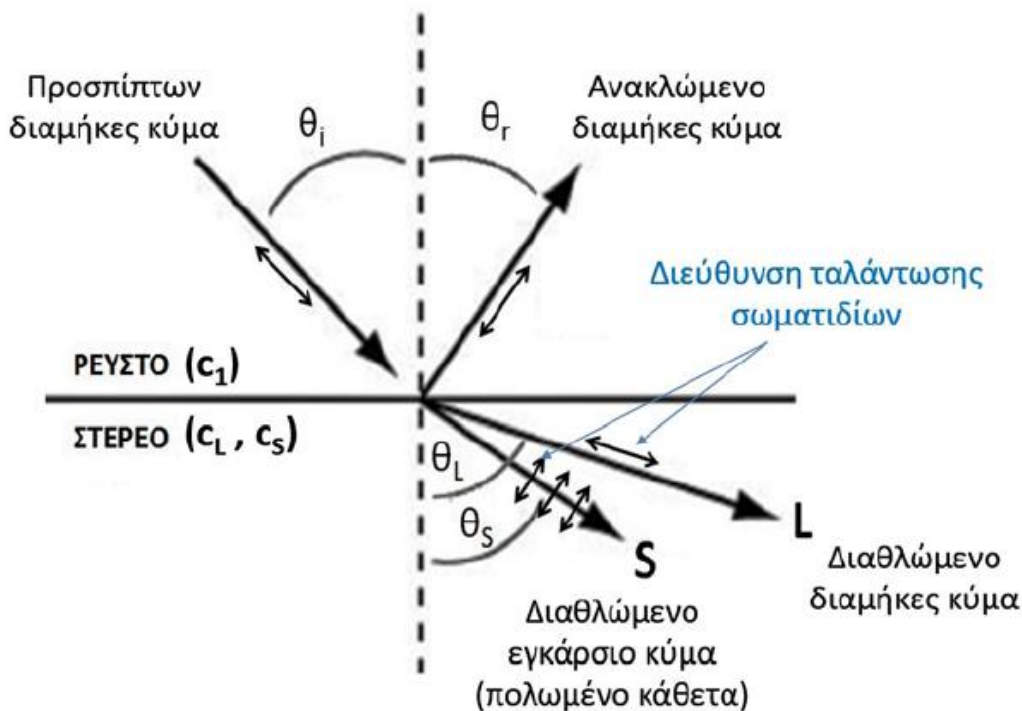
Όπου Z_1 είναι η ακουστική εμπέδηση του μέσου από το οποίο το ηχητικό κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια και Z_2 η ακουστική εμπέδηση του μέσου στο οποίο το ηχητικό κύμα μεταδίδεται μέσω της διεπιφάνειας (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Ακουστική εμπέδηση ήχου. [9]

2.9.3 Διάθλαση ήχου

Όταν μια δέσμη υπερήχων προσπίπτει σε διεπιφάνεια μεταξύ δύο μέσων υπό γωνία, το μέρος της δέσμης που θα μεταδοθεί μέσω της διεπιφάνειας στο δεύτερο μέσο θα υποστεί διάθλαση. Στην περίπτωση διεπιφάνειας ρευστού-στερεού θα μεταδοθούν στο στερεό δύο διαθλώμενες δέσμες, διότι μέρος της μεταδιδόμενης ενέργειας θα μετατραπεί σε κύματα εγκάρσιας μορφής. Έτσι λοιπόν, όταν προσπίπτει υπό γωνία ένα διάμηκες κύμα σε μια διεπιφάνεια ρευστού-στερεού θα μεταδοθεί στο στερεό ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο κύμα (Εικόνα 12). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται κυματική μετατροπή (mode conversion).



Εικόνα 12: Διάθλαση και ανάκλαση του ήχου. [9]

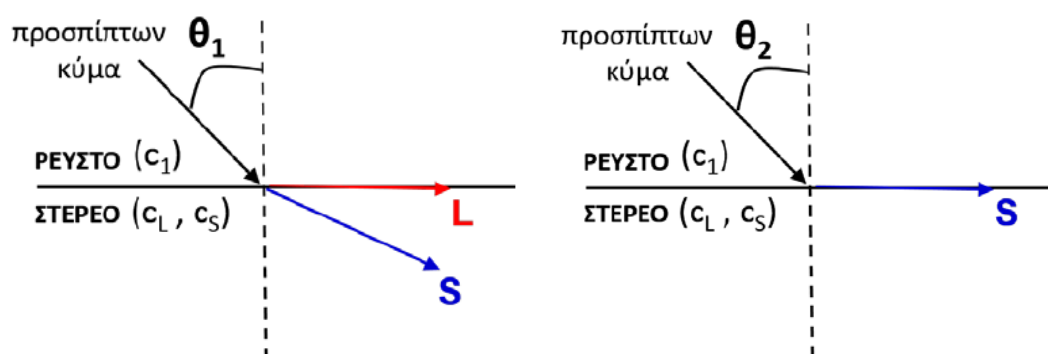
Η διεύθυνση διάδοσης των ακουστικών κυμάτων που διαθλώνται στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο μέσων δίνεται από τον νόμο του Snell:

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_L}{c_L} = \frac{\sin \theta_S}{c_S} \quad (12)$$

όπου, c_1 είναι η ταχύτητα του διαμήκους κύματος που προσπίπτει υπό γωνία θ_i στη διεπιφάνεια, c_L και c_S οι ταχύτητες του διαμήκους και εγκάρσιου κύματος που μεταδίδονται στο στερεό με γωνίες θ_L και θ_S , αντίστοιχα.

Αν το προσπίπτων κύμα προσεγγίζει την διεπιφάνεια σε ολοένα και αυξανόμενες γωνίες πρόσπτωσης, θα υπάρξει κάποια γωνία πάνω από την οποία δεν θα μεταδίδεται ακουστικό κύμα στο δεύτερο μέσο, το οποίο θεωρούμε ότι έχει υψηλότερες ταχύτητες ακουστικών κυμάτων. Αυτή η γωνία ονομάζεται κρίσιμη γωνία. Για την κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης, η διαθλώμενη γωνία βρίσκεται κατά μήκος της διεπιφάνειας και το διαθλώμενο κύμα δεν εισέρχεται στο στερεό (Εικόνα 13).

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης θ_1 είναι τέτοια ώστε $\theta_L = 90^\circ$, επιτρέποντας μόνο στο διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να διαδίδεται στο στερεό, ονομάζεται πρώτη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης.



Εικόνα 13: Πρώτη και δεύτερη κρίσιμη γωνία. [9]

Από τον νόμο του Snell συνεπώς η πρώτη κρίσιμη γωνία είναι:

$$\sin \theta_1 = \frac{c_1}{c_{L1}} \quad (13)$$

Εάν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη από την 1^η κρίσιμη γωνία, τότε στο υλικό μεταδίδεται μόνο το εγκάρσιο κύμα.

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης θ_2 είναι τέτοια ώστε $\theta_S = 90^\circ$, δεν υπάρχει κύμα που διαδίδεται στο στερεό. Η γωνία θ_2 ονομάζεται δεύτερη κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης (Εικόνα 13).

Από τον νόμο του Snell η δεύτερη κρίσιμη γωνία είναι:

$$\sin \theta_2 = \frac{c_1}{c_S} \quad (14)$$

2.9.4 Χαρακτηριστικά της δέσμης των Υπερήχων

Για την παραγωγή και λήψη κυμάτων υπερήχων, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας (transducer) για τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε ηχητικά κύματα και το αντίστροφο. Ένας τέτοιος αισθητήρας υπερήχων είναι μια συσκευή ικανή να παράγει και να λαμβάνει τις υπερηχητικές δονήσεις. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο που συνήθως είναι ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος, στερεωμένος σε μια κατάλληλη θήκη που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με ένα πομπό και έναν δέκτη. Η λειτουργία του αισθητήρα ως πομπού βασίζεται στην εφαρμογή στον κρύσταλλο μιας υψηλής τάσης και ηλεκτρικής εκκένωσης μικρής διάρκειας, προκαλώντας ραγδαία αλλαγή του σχήματός του με αποτέλεσμα να εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό. Κατά τη λειτουργία του αισθητήρα ως δέκτη, ηχητικά κύματα ή αντηχήσεις (echoes) που επιστρέφουν συμπιέζουν τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και υπόκειται σε επεξεργασία από το δέκτη. [13]

Το πεδίο ήχου ενός αισθητήρα έχει δύο διακεκριμένες ζώνες, τη ζώνη εγγύς πεδίου (near field), που βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τον αισθητήρα, και μακρινού πεδίου (far field), που βρίσκεται πέρα από την απόσταση του εγγύς πεδίου, N, όπου η πίεση του ηχητικού πεδίου μειώνεται σταδιακά έως ότου μηδενιστεί.

Για κυκλικό κρύσταλλο το μήκος της εγγύς ζώνης N δίνεται από τον τύπο:

$$N = \frac{D^2 f}{4c}, \text{ σε mm.} \quad (15)$$

Όπου D= διάμετρος του κρυστάλλου σε mm, f η συχνότητα διέγερσης σε MHz και c η ταχύτητα διάδοσης σε km/sec.

Για τετράγωνο κρύσταλλο έχουμε τον τύπο:

$$N = \frac{1.3Q^2 f}{4c}, \text{ σε mm.} \quad (16)$$

Όπου Q η λειτουργική πλευρά του κρυστάλλου σε mm.

Η επόμενη σημαντική ζώνη είναι η ζώνη διάβασης(transition zone), όπου η πίεση του ήχου παραμένει περίπου σταθερή στον άξονα αλλά μειώνεται κατά την απομάκρυνση του από αυτόν κατά:

$$\text{Sin } \theta = \frac{K c}{D f} \quad (17)$$

Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία απόκλισης και είναι χαρακτηριστική του κάθε κρυστάλλου και υλικού μετάδοσης.

K=0,7 για πίεση 50% της αρχικής, K=1,08 για πίεση 10% της αρχικής και K=1,22 για μηδενισμό της πίεσης.

Τέλος μια ακόμη χαρακτηριστική ζώνη είναι η Νεκρή ζώνη (Dead Zone). Κατά την μέθοδο με επαφή μια περιοχή του υλικού κοντά στον κρύσταλλο δεν μπορεί να εξεταστεί. Αυτό συμβαίνει μόνο για τις απλές κεφαλές επειδή τα σήματα που λαμβάνονται από ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια βρίσκονται στην οθόνη μέσα στο εύρος του αρχικού παλμού. Το φαινόμενο της νεκρής ζώνης μπορεί να εξουδετερωθεί με την χρήση δίδυμων κεφαλών (twin probes).[13],[14]

2.10 Μέθοδος Phased Array

Οι κεφαλές συστοιχίας διαφοράς φάσης αποτελούνται από μία κεφαλή που περιέχει μια συνδεσμολογία από 16 έως 256 μικρά αυτόνομα στοιχεία τα οποία μπορούν να πάλλονται ξεχωριστά σε αντίθεση με τις συμβατικές κεφαλές υπερήχων για μη καταστροφικούς ελέγχους που αποτελούνται συνήθως, από ένα ενεργό στοιχείο που παράγει και λαμβάνει υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα, ή από ένα ζεύγος στοιχείων, με το ένα στοιχείο να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μετάδοση ηχητικών κυμάτων και ένα αποκλειστικά για τη λήψη τους.

Οι συστοιχίες ανάλογα με την διάταξη των αυτόνομων στοιχείων μπορούν να καταταχθούν σε συστοιχίες λωρίδας (γραμμική συστοιχία), διδιάστατου πίνακα, δαχτυλιδιού (δακτυλιοειδής συστοιχία), κυκλικού πίνακα (κυκλική συστοιχία) ή σε συστοιχίες πιο περίπλοκων σχημάτων.

Κεφαλές Phased Array

Οι κεφαλές συστοιχιών διαφοράς φάσης σχεδιάζονται με δύο τρόπους:

- 1) για χρήση με άμεση επαφή (μεταξύ της κεφαλής και του δοκιμίου), ως ένα μέρος μιας συναρμολόγησης μιας δέσμης γωνίας με μία σφήνα.
- 2) για βύθιση, πετυχαίνοντας σύζευξη του ήχου με ένα μονοπάτι νερού, ακριβώς όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές κεφαλές.

Οι κεφαλές έχουν συνήθως συχνότητες εύρους από 2 MHz έως 10 MHz. Ένα σύστημα συστοιχίας διαφοράς φάσης περιλαμβάνει ένα εξελεγμένο όργανο που βασίζεται στον υπολογιστή, το οποίο είναι ικανό να οδηγήσει την κεφαλή, να λάβει και να ψηφιοποιήσει την επιστρεφόμενη ηχώ, και να κατασκευάσει το διάγραμμα των πληροφοριών της ηχούς σε διάφορες τυποποιημένες μορφές. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κεφαλές ανίχνευσης ελαττωμάτων, τα συστήματα συστοιχίας διαφοράς φάσης μπορούν να σαρώσουν μια δέσμη ήχου σε μία έκταση από γωνίες διάθλασης ή κατά μήκος ενός γραμμικού μονοπατιού, ή να εστιάσουν σε έναν αριθμό διαφορετικών βαθών, μεγαλώνοντας έτσι την ευελιξία και την ικανότητα του ελέγχου σε καταστάσεις επιθεώρησης. [15]

Στην συνέχεια της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Αρχικά παρουσιάζονται τα τμήματα του αυλού τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, στην συνέχεια η διαδικασία των διεισδυτικών υγρών μετά η διαδικασία της ραδιογραφίας και αυτή των υπερήχων. Τέλος γίνεται ο μεταλλογραφικός έλεγχος και πραγματοποιείται η καταγραφή των αποτελεσμάτων και η σύγκρισή τους.

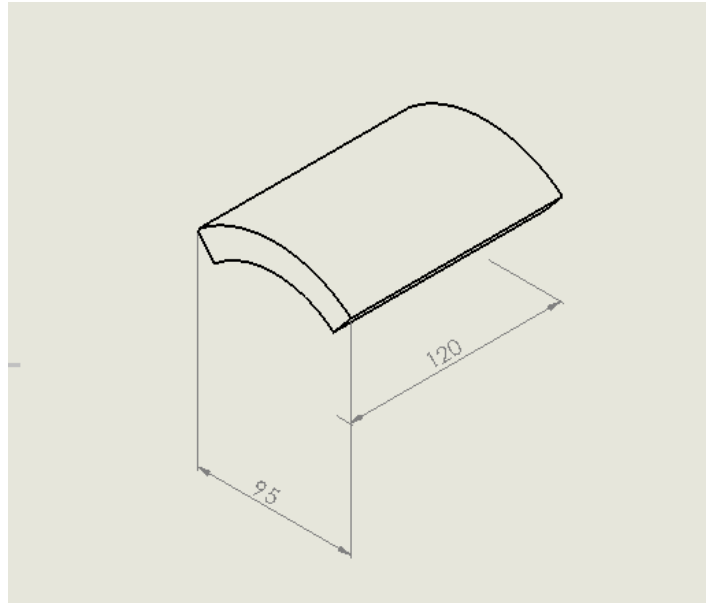
Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία

3.1 Το δοκίμιο και οι θέσεις δειγματοληψίας

Το πρώτο δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τις μετρήσεις προέρχεται από μέρος του σωλήνα στον οποίο έχει επιβεβαιωθεί από προηγούμενες μελέτες ότι έχει αστοχήσει λόγω ερπυσμού (Εικόνα 14). Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά και ραδιογραφικό έλεγχο πραγματοποιήθηκε σε ολόκληρο το δοκίμιο ενώ ο έλεγχος με υπερήχους πραγματοποιήθηκε σε 4 συγκεκριμένα σημεία τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος για να επιβεβαιωθούν οι μετρήσεις.



Εικόνα 14: Δοκίμιο Α δειγματοληψίας.



Εικόνα 15: Διαστάσεις δοκιμίου A δειγματοληψίας.

Το δεύτερο δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις προέρχεται από την περιοχή της ρωγμής, όπως φαίνεται και από την παρακάτω Εικόνα 16. Στο δοκίμιο αυτό έγινε μόνο έλεγχος με υπερήχους με σκοπό να γίνει μια σύγκριση με τον δοκίμιο A.



Εικόνα 16: Δοκίμιο B δειγματοληψίας

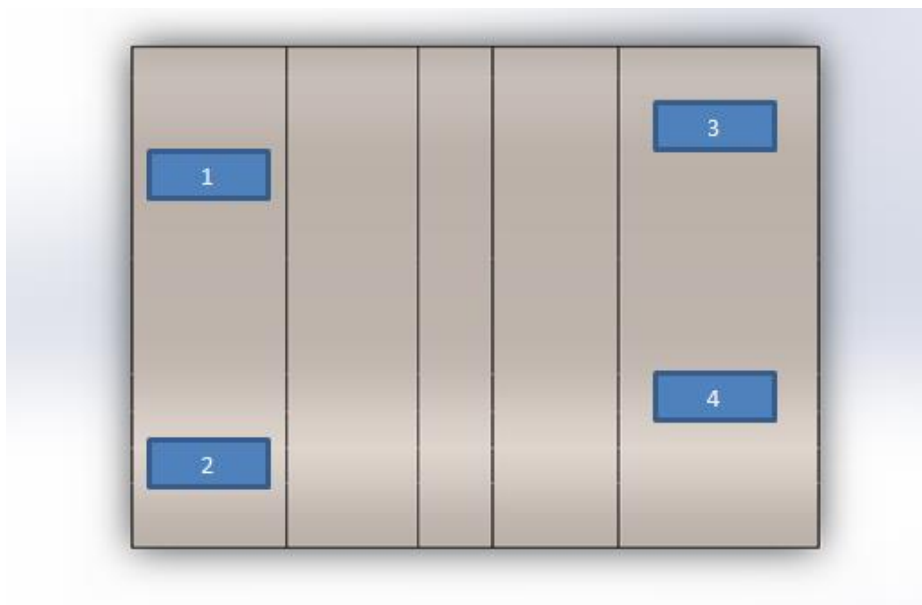
Τέλος, ένα τρίτο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε από τον αυλό. Το δοκίμιο της παρακάτω Εικόνα 17 είναι από το ίδιο υλικό με τον αυλό, με την διαφορά ότι δεν παρουσιάζει καμία βλάβη από ερπυσμό. Το δοκίμιο Γ χρησιμοποιήθηκε για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση της συσκευής των υπερήχων.



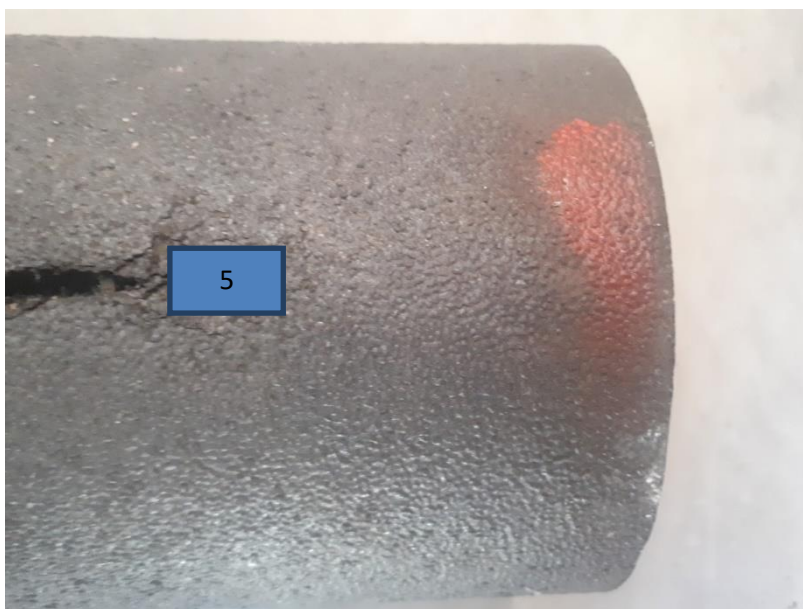
Εικόνα 17: Δοκίμιο Γ βαθμονόμησης.

Θέσεις Δειγματοληψίας

Για τον έλεγχο με υπερήχους, από το δοκίμιο Α επιλέχθηκαν 4 σημεία στα οποία έγιναν μετρήσεις(Εικόνα 18) καθώς επίσης και στο δοκίμιο Β ένα 5^ο σημείο από τον σωλήνα πολύ κοντά στην περιοχή της ρωγμής (Εικόνα 19) όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες.



Εικόνα 18: Θέσεις δειγματοληψίας στο δοκίμιο Α.



Εικόνα 19: Θέσεις δειγματοληψίας στο δοκίμιο Β.

3.2 Έλεγχος με Διεσδυτικά Υγρά (PT)



Εικόνα 20: Φθορίζοντα διεσδυτικά υγρά στο δοκίμιο A.

Βήματα μεθόδου

1. Προκαθαρισμός επιφάνειας

Το τεμάχιο μας πρέπει να είναι καθαρό διότι οποιαδήποτε ακαθαρσία (π.χ. λάδι, σκόνες) μπορεί να αποτρέψει την διείσδυση του υγρού σε μικρωγμές.

2. Εφαρμογή του διεσδυτή

Με σπρέι γίνεται ο χρωματισμός ολόκληρου του τεμαχίου με ειδικό υγρό. Στην συνέχεια υπάρχει ένας χρόνος διείσδυσης (χρόνος αναμονής) ο οποίος κυμαίνεται από 5 έως 20 λεπτά ανάλογα με το υλικό. Ο διεσδυτής που χρησιμοποιήσαμε ήταν διαλυτός στο νερό.

3. Καθαρισμός πλεονάζοντα διεσδυτή

Μετά τον χρόνο διείσδυσης το τεμάχιο πλένεται με νερό χαμηλής πίεσης για να αφαιρεθεί ο πλεονάζοντας διεσδυτής. Υψηλή πίεση έχει κίνδυνο της αφαίρεσης διεσδυτή μέσα από τις ρωγμές με αποτέλεσμα να χαθούν ενδείξεις.

4. Ξήρανση δοκιμίου

Το τεμάχιο μετά τον καθαρισμό του πάλι ξηραίνεται για να μην υπάρχει υγρασία στην επιφάνεια του.

5. Εφαρμογή εμφανιστή

Κατά το τελευταίο στάδιο με ειδικό σπρέι γίνεται η εφαρμογή του εμφανιστή σε όλο το τεμάχιο, αφήνεται να στεγνώσει για μικρό χρονικό διάστημα και οδηγείται στον σταθμό παρατήρησης(Εικόνα 20).

3.3 Ραδιογραφικός Έλεγχος (RT)

Πραγματοποιήθηκε ραδιογραφικός έλεγχος σε εξωτερικό συνεργάτη καθώς δεν υπήρχε ο απαραίτητος εξοπλισμός στην εταιρία . Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε και εν συνεχεία αξιολογήθηκε ο ραδιογραφικός έλεγχος έγινε με βάση το πρότυπο BS EN ISO 17636-1. Προκειμένου να πετύχουμε το ραδιογράφημα που θέλουμε κατασκευάζεται ένα διάγραμμα έκθεσης. Αυτό έχει σαν τετμημένη το πάχος του υλικού σαν τεταγμένη τον χρόνο έκθεσης και υπάρχουν διάφορες καμπύλες που σου δείχνουν τα KV που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι με βάση το διάγραμμα οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε το ραδιογράφημα ήταν:

- Πάχος δοκιμίου 15,5 mm
- Χρόνος έκθεσης: 2 min
- Τάση: 180 kV

Με βάση τον παρακάτω Πίνακα 2 ανάλογα με το πάχος του υλικού επιλέχθηκε και το αντίστοιχο σύρμα για τον έλεγχο ποιότητας του ραδιογραφήματος. Έτσι επιλέχθηκε IQI : W11(Image Quality Indicator). Το film προβάλλεται σε μία ειδική συσκευή προβολής film ραδιογραφίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Το γεγονός ότι πάνω στο φιλμ εμφανίζονται 3 γραμμές υποδεικνύει ότι οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ήταν σωστές. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ποιότητα και η ευαισθησία του ραδιογραφήματος να είναι σωστή για να εμφανιστεί αποτελεσματικά το δοκίμιο πάνω στο film.



Εικόνα 21: Συσκευή προβολής των φιλμ της ραδιογραφίας.

Table B.1 — Wire IQI

Image quality class A				IQI value
Nominal thickness t mm				
		to	1,2	W 18
above	1,2	to	2,0	W 17
above	2,0	to	3,5	W 16
above	3,5	to	5,0	W 15
above	5,0	to	7	W 14
above	7	to	10	W 13
above	10	to	15	W 12
above	15	to	25	W 11
above	25	to	32	W 10
above	32	to	40	W 9
above	40	to	55	W 8
above	55	to	85	W 7
above	85	to	150	W 6
above	150	to	250	W 5
above	250			W 4

Οι παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα της μεθόδου θα περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο 4.

3.4 Έλεγχος με Υπερήχους (UT)

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με κανονική συσκευή υπερήχων (USN 52) καθώς και με συσκευή Phased Array (Sonatest PA). Γνωρίζοντας ότι οι ρωγμές στον ερπυσμό αναπτύσσονται στην ακτινική διεύθυνση, η πιο σωστή επιλογή κεφαλής υπερήχων ήταν η γωνιακή. Η δέσμη υπερήχων της γωνιακής κεφαλής προσπίπτει κάθετα πάνω στην ακτινική ρωγή παρουσιάζοντας πιο ακριβείς ενδείξεις στην οθόνη.

3.4.1 Έλεγχος με την USN 52

Η USN 52 (Εικόνα 22) είναι μία συσκευή συμβατικού υπερήχου με δυνατότητα καταγραφής μόνο A-scan. Η πιο συχνή είναι η σάρωση A-scan κατά την οποία η οριζόντια κλίμακα της οθόνης (άξονας X) δείχνει την θέση της κεφαλής και η κάθετη το ύψος του σήματος δηλαδή την ένταση της ηχούς. Γωνιακοί ανακλαστήρες 45 μοιρών ήταν η αρχική επιλογή για τον εντοπισμό σφαλμάτων στο δοκίμιο. Ο αυλός είναι ένας υψηλά κραματωμένος χάλυβας που είχε ως αποτέλεσμα την

αποδυνάμωση του σήματος των γωνιακών κεφαλών , λόγω του φαινομένου της σκέδασης, κι έτσι δεν επιστρέφουν αποτελέσματα στην οθόνη της συσκευής. Η επόμενη επιλογή ήταν οι κάθετες κεφαλές οι οποίες μεταδίδουν διαμήκη κύματα τα οποία έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης, μικρότερη αποδυνάμωση αλλά και μικρότερη ευαισθησία.



Εικόνα 22: USN 52 συσκευή υπερήχων. [14]

- DA 201 (Εικόνα 23)

Η πρώτη κεφαλή με την οποία πραγματοποιήθηκε έλεγχος στο δοκίμιο είναι μια κάθετη δίδυμη κεφαλή με συχνότητα διάδοσης κύματος 5 MHz (εικόνα 23). Έχει διάμετρο κρυστάλλου 12,5 mm και το υλικό σύζευξης μεταξύ της κεφαλής και του δοκιμίου ήταν γλυκερίνη. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι δίδυμες κεφαλές είναι ότι δεν έχουν νεκρή ζώνη (dead zone) οπότε έχουν την δυνατότητα να φανερώσουν ενδείξεις στην οθόνη και σε πολύ μικρά βάθη.

Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος:

Από τον τύπο: $c = \lambda \cdot f$ υπολογίζεται ότι το μήκος κύματος για αυτή την κεφαλή είναι 1 mm.

Επομένως το μικρότερο ανιχνεύσιμο σφάλμα με αυτή την κεφαλή είναι διαμέτρου $d_{\min} = \lambda/2$ δηλαδή 0,5mm.



Εικόνα 23: Δίδυμη κεφαλή υπερήχων διαμηκών κυμάτων DA201.

- MB2F (Εικόνα 24)

Η MB2F είναι μία μονή κεφαλή συχνότητας 2 MHz και διαμέτρου κεφαλής 10 mm. Το μήκος κύματος αυτής της κεφαλής είναι 2,9 mm καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης μέσα στο υλικό. Επομένως το μικρότερο ανιχνεύσιμο σφάλμα είναι διαμέτρου 1,4 mm. Σε αντίθεση με την DA201 η MB2F παρουσιάζει νεκρή ζώνη.

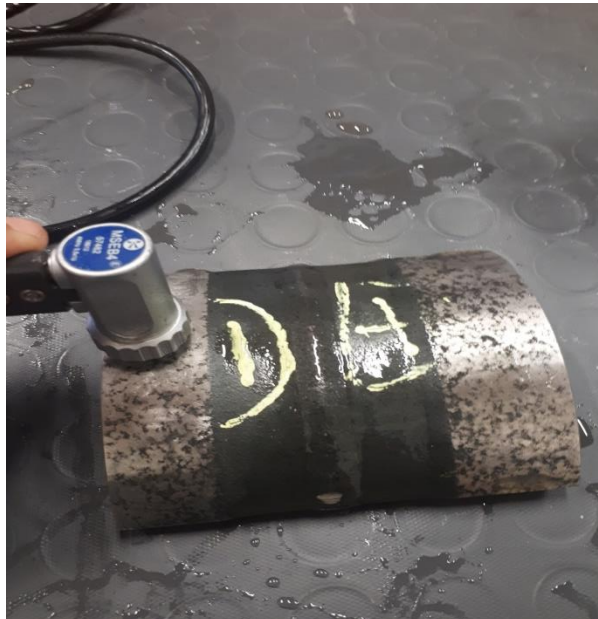


Εικόνα 24:Κεφαλή υπερήχων διαμηκών κυμάτων MB2F.

- MSEB4 (Εικόνα 25)

Η τελευταία κεφαλή με την οποία πραγματοποιήθηκε έλεγχος στα εξεταζόμενα τμήματα είναι η δίδυμη κεφαλή MSEB4 (Εικόνα 25). Η κεφαλή έχει συχνότητα εκπομπής των 4 MHz και η διάμετρος της είναι 15 mm. Το

μήκος κύματος υπολογίζεται στα 1,4 mm και έτσι η διάμετρος του μικρότερου ανιχνεύσιμου σφάλματος είναι 0,7 mm.



Εικόνα 25: Δίδυμη κεφαλή υπερήχων MSEB4.

- Γωνιακές κεφαλές (Εικόνα 26)

Όπως επισημάνθηκε οι γωνιακές κεφαλές θεωρητικά είναι οι ιδανικές για την ακριβή καταγραφή ενδείξεων στο δοκίμιο που παρουσιάζει πρόβλημα ερπυσμού. Στην περίπτωση αυτή δεν κατέγραψαν κάποια ένδειξη κι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γωνιακές κεφαλές εκπέμπουν εγκάρσια κύματα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη αποδυνάμωση ειδικά σε υψηλά κραματωμένους χάλυβες εξαιτίας του φαινομένου της σκέδασης.

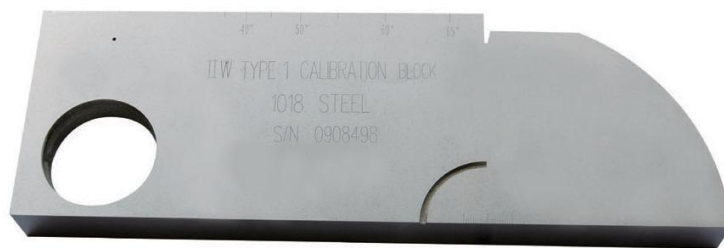


Εικόνα 26: Γωνιακή κεφαλή εγκάρσιων κυμάτων 45 μοιρών.

3.4.2 Βαθμονόμηση Συσκευής

Για να μπορέσει η συσκευή υπερήχων να πραγματοποιήσει έλεγχο σε οποιαδήποτε δοκίμιο είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση της.

1. Σύνδεση κεφαλής με την συσκευή.
2. Καθορισμός στις ρυθμίσεις της συσκευής για τον τύπο της κεφαλής (Κάθετη/ Γωνιακή).
3. Επιλογή τύπου κεφαλής (Single/ Twin).
4. Επιλογή ταχύτητας διάδοσης ($c= 5920 \text{ m/s}$) για το δοκίμιο βαθμονόμησης(calibration block) V1.(Εικόνα 27)
5. Range 100%.
6. Delay 0.
7. Reject 0.
8. Αύξηση του probe zero από το 0 μέχρι οι παλμοί να εμφανίζονται στις επιθυμητές θέσεις.



Εικόνα 27: Δοκίμιο βαθμονόμησης V1.

Αφού έχει πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση της συσκευής με το δοκίμιο της παραπάνω Εικόνα 27 στην συνέχεια γίνεται η βαθμονόμηση της με ένα καθαρό από σφάλματα δοκίμιο του οποίου το υλικό είναι το ίδιο με αυτό των αυλών. Το δοκίμιο Γ στην Εικόνα 28 αποτελεί το δοκίμιο βαθμονόμησης από τον υλικό H39WM. Η διαφορά στην ακουστική αντίσταση μεταξύ του δοκιμίου βαθμονόμησης V1 και του υλικού είναι ο κύριος λόγος για να πραγματοποιηθεί αυτή την διαδικασία. Ο τύπος που προσδιορίζει το πραγματικό πάχος ενός δοκιμίου για να εμφανιστεί ακριβώς στην οθόνη της συσκευής είναι:

$$\text{Πραγματικό Πάχος} = \frac{(\text{Ταχύτητα Υλικού}) \times (\text{Πάχος που καταγράφεται στην οθόνη})}{\text{Ταχύτητα του δοκιμίου βαθμονόμησης}} \quad (18)$$

$$\text{Actual Thickness} = \frac{(\text{Material Velocity}) \times (\text{Timebase Reading})}{\text{Calibration block velocity}}$$



Εικόνα 28: Δοκίμιο Γ βαθμονόμησης από το υλικό H39WM.

Στην παρακάτω Εικόνα 29 παρουσιάζεται η βαθμονόμηση της συσκευής υπερήχων με την βοήθεια του δοκιμίου Γ. Διακρίνεται στην οθόνη της συσκευής ένας παλμός υψηλού σήματος στα 17 mm όσο δηλαδή το πάχος του δοκιμίου Γ της βαθμονόμησης.



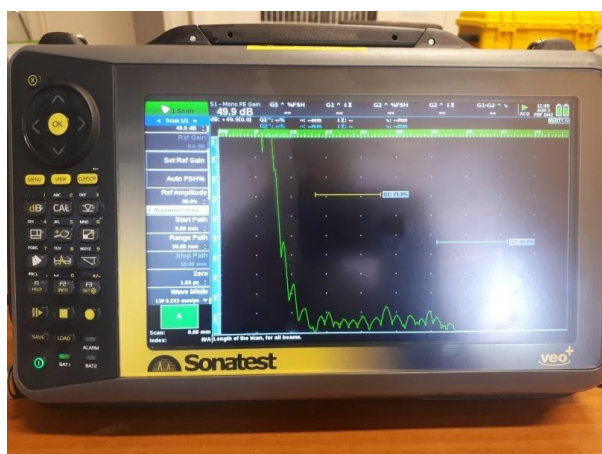
Εικόνα 29: Βαθμονόμηση της συσκευής με τον σωλήνα H39WM.

3.5 Έλεγχος με Phased Array.

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος του δοκιμίου με την συσκευή phased array της Sonatest (Εικόνα 30). Όπως και στον συμβατικό υπέρηχο έτσι και στο phased array πριν γίνει ο έλεγχος προηγήθηκε η βαθμονόμηση της συσκευής.

1. Εισαγωγή τύπου κεφαλής.
2. Εισαγωγή ταχύτητας διάδοσης.
3. Range, delay, reject.
4. Αλλαγή των kV για καλύτερες ενδείξεις στην οθόνη.
5. Smoothing καμπύλης (απαλλαγή από μικροθορύβους που επιστρέφουν ηχώ).

Ως κεφαλή χρησιμοποιήθηκε μια κεφαλή συμβατικού υπερήχου χαμηλών MHz διότι η αποδυνάμωση του ήχου ήταν μεγάλη. Η κάθετη κεφαλή PHOENIX (Εικόνα 31) αποτελεί μία κεφαλή συχνότητας 1 MHz με διάμετρο κρυστάλλου 20 mm. Δεν υπήρχε η δυνατότητα χρησιμοποίησης της κεφαλής phased array της Εικόνα 31 καθώς ήταν μεγάλη για το δοκίμιο και επίσης η καμπυλότητα του δοκιμίου δεν εξυπηρετούσε την αποτελεσματική επαφή κεφαλής δοκιμίου.



Εικόνα 30: Συσκευή phased array.



Εικόνα 31: Κεφαλή phased array και κάθετη κεφαλή PHOENIX.

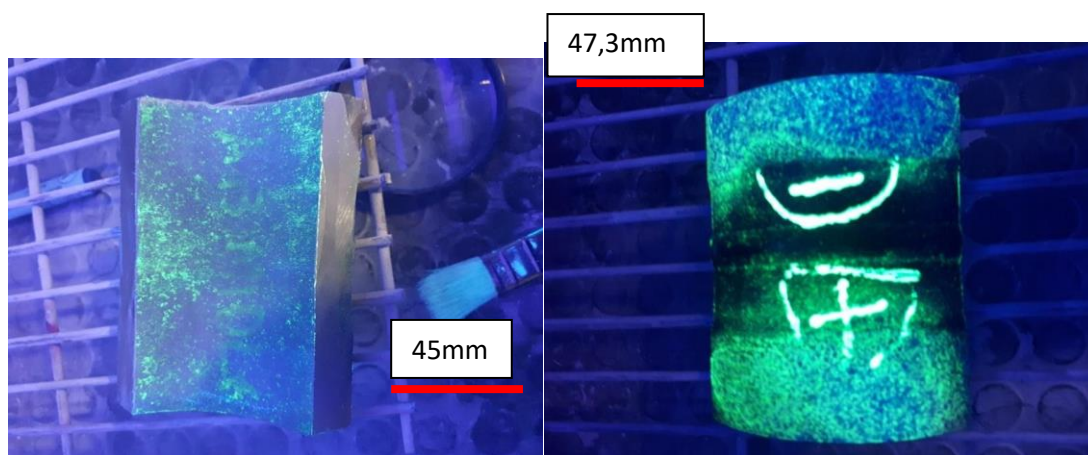
3.6 Μεταλλογραφικός Έλεγχος

Από τον αυλό που εξετάστηκε επιλέχθηκαν δοκίμια για μεταλλογραφικό έλεγχο. Σε κάθε ένα από τα 5 σημεία που έγινε έλεγχος με τις κεφαλές των υπερήχων στο δοκίμιο A και δοκίμιο B , πραγματοποιήθηκε εγκάρσια τομή στο κέντρο των δοκιμίων δηλαδή στο κέντρο της δέσμης. Για τον έλεγχο της μικροδομής προετοιμάστηκαν δοκίμια με την κλασσική μεταλλογραφική διαδικασία. Συγκεκριμένα η κοπή των δοκιμίων έγινε με την βοήθεια του κοπτικού τροχού του εργαστηρίου Struers Accutom-5. Στην συνέχεια τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη και λειάνθηκαν με χαρτιά SiC με μέγεθος κόκκου 80, 120,320,500,800,1000 grit. Η στίλβωση έγινε με διαμαντόπαστα κοκκομετρίας 3 μm. Για την χημική προσβολή χρησιμοποιήθηκε αντιδραστήριο marbles. Τα βασικά συστατικά είναι υδροχλωρικό οξύ, CuSO4 και νερό. Σε 10 gr CuSO4 προστίθενται 50 ml νερό και 50 ml υδροχλωρικό οξύ.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

4.1 Έλεγχος με διεισδυτικά Υγρά

Κατά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά, στην εσωτερική επιφάνεια (Εικόνα 32) όπου είναι γνωστό ότι το πρόβλημα του ερπυσμού άρχισε να αναπτύσσεται με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών δεν υπήρχαν κάποιες σοβαρές ενδείξεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εξεταζόμενο δοκίμιο Α βρίσκεται στο δεύτερο στάδιο της καμπύλης του ερπυσμού το οποίο επιβεβαιώνεται με τον μεταλλογραφικό έλεγχο. Οι μικροσπές στα σύνορα των κόκκων είναι σε πολύ μικρή κλίμακα για να εισχωρήσει ο διεισδυτής και να φανερώσει ενδείξεις διακριτές με το γυμνό μάτι. Το ίδιο συμβαίνει και στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου όπου δεν παρατηρείται κάποια σχετική ένδειξη.



Εικόνα 32 : Εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια σωλήνα με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.

4.2 Ραδιογραφικός Έλεγχος

Με την μέθοδο της ραδιογραφίας δεν καταγράφηκε κάποιο ελάττωμα στο εσωτερικό του δοκιμίου. Κύρια χρησιμότητα του ραδιογραφικού ελέγχου είναι για τον έλεγχο συγκολλήσεων όπου με την μέθοδο αυτή μπορούν να φανούν στο φιλμ πόροι, εγκλείσματα, μακρορωγμές καθώς και ασυνέχειες που σχετίζονται με τις συνθήκες συγκόλλησης όπως ατελής διείσδυση, υποκοπή και ρήγμα κρατήρα. Στο δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 4 λήψεις μία με ολόκληρο το δοκίμιο και 3 με διαφορετική γωνία της πηγής για να αποτυπώσει τυχόν μακρορωγμές οι οποίες είναι σε άλλη διεύθυνση από αυτή της πηγής. Σε κανένα φιλμ δεν αποτυπώθηκε κάποιο ελάττωμα που αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να αποτυπώσει μικρορωγμές και συγκέντρωση μικροσπών στα όρια των κόκκων τα οποία είναι τα αρχικά στάδια βλάβης ερπυσμού(Εικόνα 33).

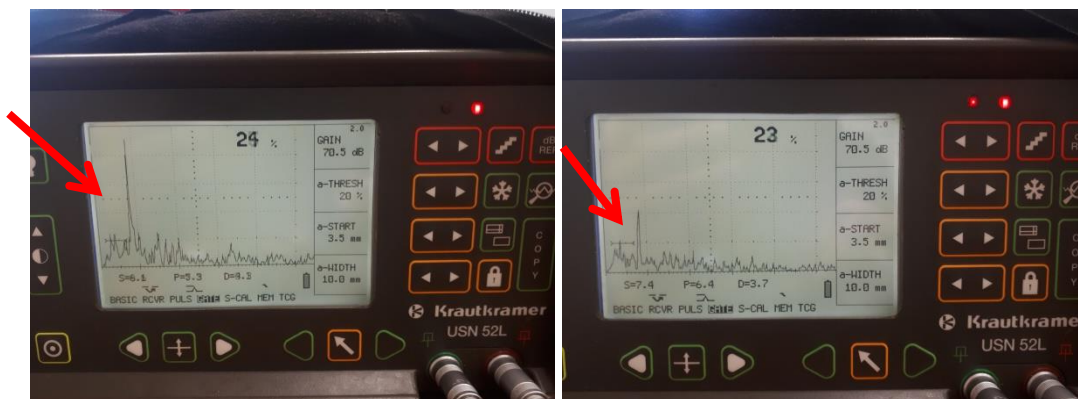


Εικόνα 33: Φιλμ ραδιογραφίας του δοκιμίου Α.

4.3 Έλεγχος με Υπερήχους

Κεφαλή DA201

Με την κεφαλή DA201 παρατηρήθηκε ότι διακρίνεται εύκολα η ηχώ του πίσω τοιχώματος (back wall echo). Βέβαια το σήμα του BWE είναι αρκετά αποδυναμωμένο κοντά στο 60% χρησιμοποιώντας ένα gain 75.5 dB όσο δηλαδή και στο καλιμπράρισμα της συσκευής. Η Εικόνα 34 δείχνει δύο λήψεις της κεφαλής. Στο σημείο που βρίσκεται το βέλος οι ενδείξεις της συσκευής υπερήχων είναι 8,4 και 6,7 mm. Σε όλο το πάχος του δοκιμίου παρατηρήθηκε ότι η οθόνη δείχνει κάποιες μικρές ενδείξεις οι οποίες όμως δεν έχουν μεγάλο ύψος σήματος και μπορούν να θεωρηθούν ως θόρυβος που μπορεί να οφείλεται σε ελαττωματική επιστροφή γλυκερίνης πάνω στο δοκίμιο καθώς επίσης και σε επιστροφή ηχού στα όρια των κόκκων. Τέλος, φανερώνεται μια ένδειξη μεγαλύτερης ηχού η οποία είναι και πιθανό σημείο μικρορωγμής καθώς δεν εξαφανίζεται το BWE.



Εικόνα 34: Ένδειξη της συσκευής σε βάθος 8,4 mm και 7.4 mm στο δοκίμιο A.

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακας 4 με την κεφαλή DA201 και στα 4 σημεία του δοκιμίου A παρατηρούνται κάποιες ενδείξεις με ύψος σήματος στο 18-28 % σε ένα εύρος από 7,1 μέχρι 8,4 mm ξεκινώντας από την πάνω επιφάνεια του μετάλλου. Στον παρακάτω Πίνακας 3 πραγματοποιείται μία καταγραφή των συνθηκών ελέγχου. Η συσκευή υπερήχου είναι η USN 52. Για κεφαλή ελέγχου χρησιμοποιήθηκε η κάθετη δίδυμη κεφαλή DA201 με γωνία εκπομπής 0 μοίρες, διαμέτρου κρυστάλλου 12,5 mm και συχνότητας 5 MHz.

Πίνακας 3: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή DA201.

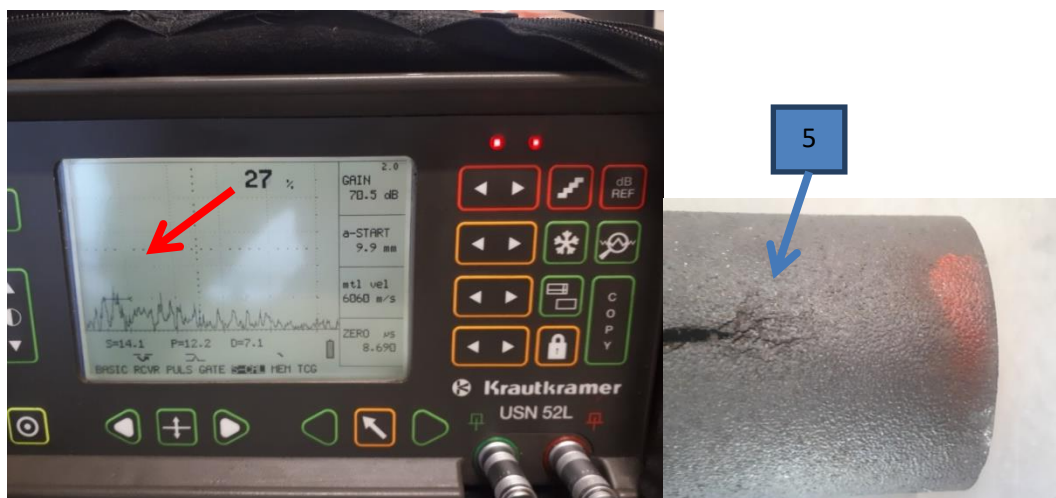
Component	A13 Middle		
Flaw Detector	USN 52	Serial No	EB43553
Probe	DA201		
Angle(deg)	Type	Crystal Diameter (mm)	Frequency MHz
0	Twin	12,5	5
Reference Blocks:	1)Standard V1 block	2)Calibration H39WM tube	
Test sensitivity used:	1st Back Wall Echo to 100%		
Couplant:	glycerin		
Gain (dB)	75,5		
a-tresh (%)	20		

Στον παρακάτω Πίνακας 4 παρουσιάζονται οι τιμές για τα τέσσερα σημεία του δοκιμίου με την κεφαλή DA201. Στην στήλη Soundpath (mm) καταγράφονται το βάθος του δοκιμίου στο οποίο η οθόνη αποτύπωσε μια σημαντική ένδειξη. Στην δίπλα στήλη το ύψος του παλμού και στην τελευταία στήλη η απόκλιση του παλμού από τον παλμό με την ηχώ του πίσω τοιχώματος.

Πίνακας 4: Πίνακας τιμών για την κεφαλή Da201 στο δοκίμιο A.

Position	Soundpath(mm)	H (%)	Απόκλιση (%)
1	8,4	18	50,6
2	7,1	24	58,2
3	7,1	22	58,2
4	7,4	28	56,5

Τέλος για την κεφαλή DA201 πραγματοποιήθηκε έλεγχος και στο 5° σημείο στο δοκίμιο B πολύ κοντά στην ρωγμή. Από την παρακάτω Εικόνα 35 φαίνεται ότι το back wall echo δεν υπάρχει στην οθόνη πλέον καθώς και μια ισχυρή ένδειξη στα 14,1 mm.



Εικόνα 35: Ένδειξη στο δοκίμιο B με την κεφαλή DA201.

Κεφαλή MB2F

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος στα ίδια σημεία στα δοκίμια μας με μια διαφορετική κεφαλή την MB2F. Όπως φαίνεται και από τον παρακάτω Πίνακας 5 πρόκειται για μια μονή κάθετη κεφαλή με διάμετρο κρυστάλλου 10 mm και συχνότητας 2 MHz.

Πίνακας 5: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή MB2F.

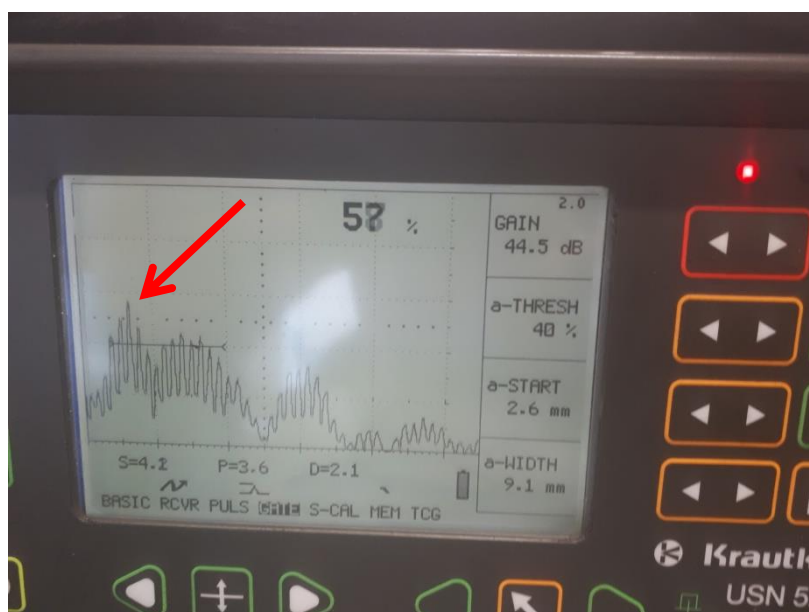
Component	A13 Middle		
Flaw Detector	USN 52	Serial No	EB43553
Probe	MB2F		
Angle(deg)	Type	Crystal Diameter (mm)	Frequency MHz
0	Single	10	2
Reference Blocks:	1)Standard V1 block	2)Calibration H39WM tube	
Test sensitivity used:	1st Back Wall Echo to 100%		
Couplant:	glycerin		
Gain (dB)	36,5		
a-tresh (%)	10		
πάχος σωλήνα (mm)	17		

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι τιμές για τα τέσσερα ίδια σημεία του δοκιμίου αυτή την φορά με την κεφαλή MB2F. Παρατηρείται και με αυτή την κεφαλή ότι οι τιμές που καταγράφονται βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους από 7,1 μέχρι 8,4 mm για το δοκίμιο A.

Πίνακας 6: Πίνακας τιμών για την κεφαλή MB2F στο δοκίμιο A.

Position	Soundpath(mm)	H (%)	Απόκλιση (%)
1	8,4	29	50,6
2	7,1	22	65,2
3	7,1	27	58,2
4	8,4	26	60,1

Για το 5ο σημείο στο δεύτερο δοκίμιο, στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται η ένδειξη της οθόνης όπου παρατηρούμε κι εδώ ότι η ηχώ του back wall echo έχει μειωθεί πάρα πολύ και παρατηρούνται πολλές κορυφές στο εσωτερικό του δοκιμίου με υψηλότερη στα 4,1 mm.



Εικόνα 36: Ένδειξη στο 5^ο σημείο με την κεφαλή MB2F στο δοκίμιο B.

Κεφαλή MSEB4

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την κεφαλή MSEB4. Από τον Πίνακα 7 παρατηρείται ότι πρόκειται για μία κάθετη και δίδυμη κεφαλή με διάμετρο κρυστάλλου 15 mm και συχνότητας 4 MHz. Το υλικό σύζευξης όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις είναι γλυκερίνη για καλύτερη επαφή της κεφαλής με το δοκίμιο και την αποφυγή αέρα στην διεπιφάνεια.

Πίνακας 7: Πίνακας δεδομένων για την κεφαλή MSEB4.

Component	A13 Middle		
Flaw Detector	USN 52	Serial No	EB43553
Probe	MSEB4		
Angle(deg)	Type	Crystal Diameter (mm)	Frequency MHz
0	Twin	15	4
Reference Blocks:	1)Standard V1 block	2)Calibration H39WM tube	
Test sensitivity used:	1st Back Wall Echo to 100%		
Couplant:	glycerin		
Gain (dB)	50,5		
a-tresh (%)	16		
πάχος σωλήνα (mm)	17		

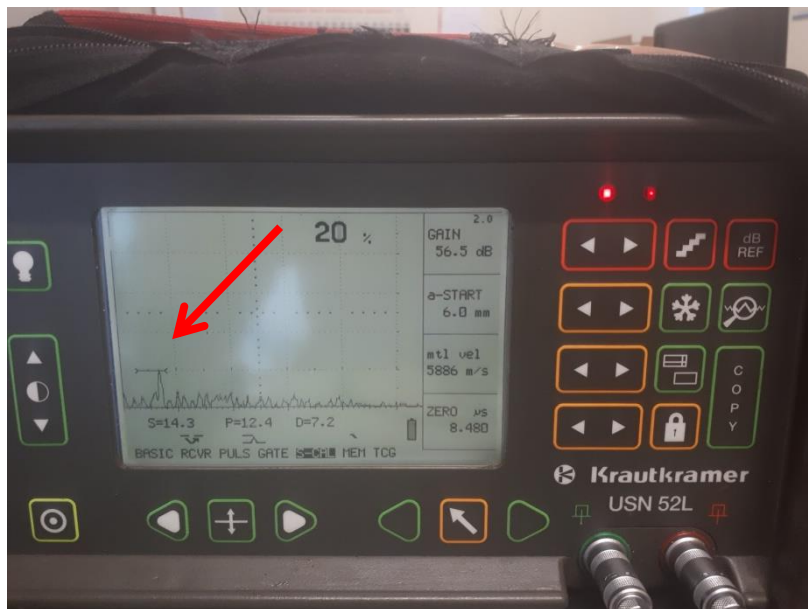
Στον παρακάτω Πίνακας 8 παρουσιάζονται οι τιμές για τα τέσσερα ίδια σημεία του δοκιμίου αυτή την φορά με την κεφαλή MSEB4.

Πίνακας 8: Πίνακας τιμών για την κεφαλή MSEB4 στο δοκίμιο A.

Position	Soundpath(mm)	H (%)	Απόκλιση (%)
1	7,8	24	54,1
2	7	29	58,8
3	9	21	60,1

4	6,6	22	61,1
---	-----	----	------

Για το 5^ο σημείο στο δοκίμιο B, στην Εικόνα 37 παρατηρείται ότι το back wall echo δεν εμφανίζεται καθόλου στην οθόνη ενώ καταγράφεται μια ένδειξη χαμηλής έντασης στα 14,3 mm βάθος.



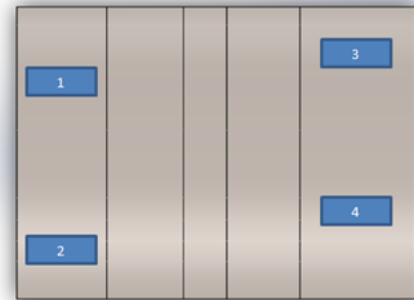
Εικόνα 37: Ένδειξη στο δεύτερο δοκίμιο με την κεφαλή MSEB4 στο δοκίμιο B.

Όλα αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων των υπερήχων θα συγκριθούν στο επόμενο κεφάλαιο 4.5 στον μεταλλογραφικό έλεγχο με σκοπό την επιβεβαίωση των μετρήσεων.

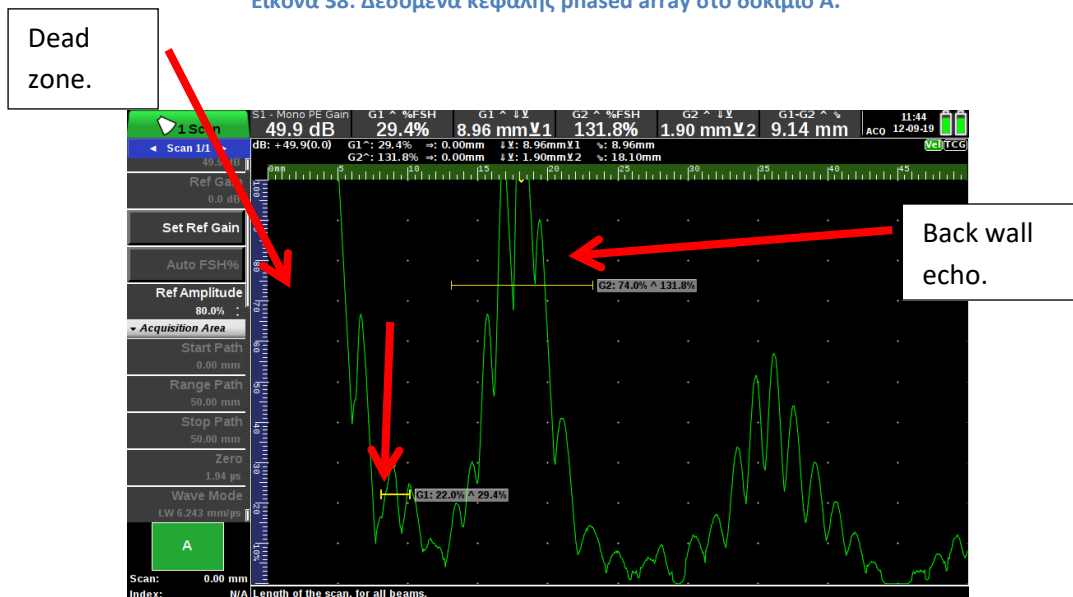
4.4 Phased Array

Ο έλεγχος με την συσκευή phased array δεν επέφερε κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η κεφαλή phased array καθώς και οι ίδιες κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν στον συμβατικό υπέρηχο. Η κεφαλή η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν μονή και διαμέτρου 20 mm ενώ η συχνότητα του σήματος ήταν 1 MHz. Από τον υπολογισμό το μήκος της νεκρής ζώνης (dead zone) είναι 8 mm. Έτσι η κεφαλή αυτή δεν έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει πιθανά σφάλματα σε βάθος μικρότερο από 10 mm από την επάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνα 38, Εικόνα 39) καταγράφηκαν κάποιες πιθανές ενδείξεις σε ένα εύρος από 8,9 έως 10 mm βάθος όμως δεν γίνεται να επιβεβαιωθούν καθώς ο θόρυβος της κεφαλής ήταν μεγάλος, πράγμα το οποίο μπορεί να επιβεβαιωθεί από την καμπύλη της ηχού πίσω τοιχώματος.

Component	A13 Middle			Position	Soundpath (mm)	H (%)	Ποσοστό Απόκλισης (%)
Flaw Detector	Sonatest Phased Array	Serial No	-	1	8,9	29	42,39
Probe	Phoenix 1Mhz			2	8,6	19,5	44,34
Angle(deg)	Type	Crystal Diameter (mm)	Frequency MHz	3	9,9	23	35,92
0	Single	20	1	4	9,3	20	39,81
Reference Blocks:	1)Standard V1 block 2)Calibration H39WM tube						
Test sensitivity used:	1st Back Wall Echo to 100%						
Couplant:	glycerin						
Gain (dB)	50						
a-tresh (%)	10						
πάχος σωλήνα (mm)	17						



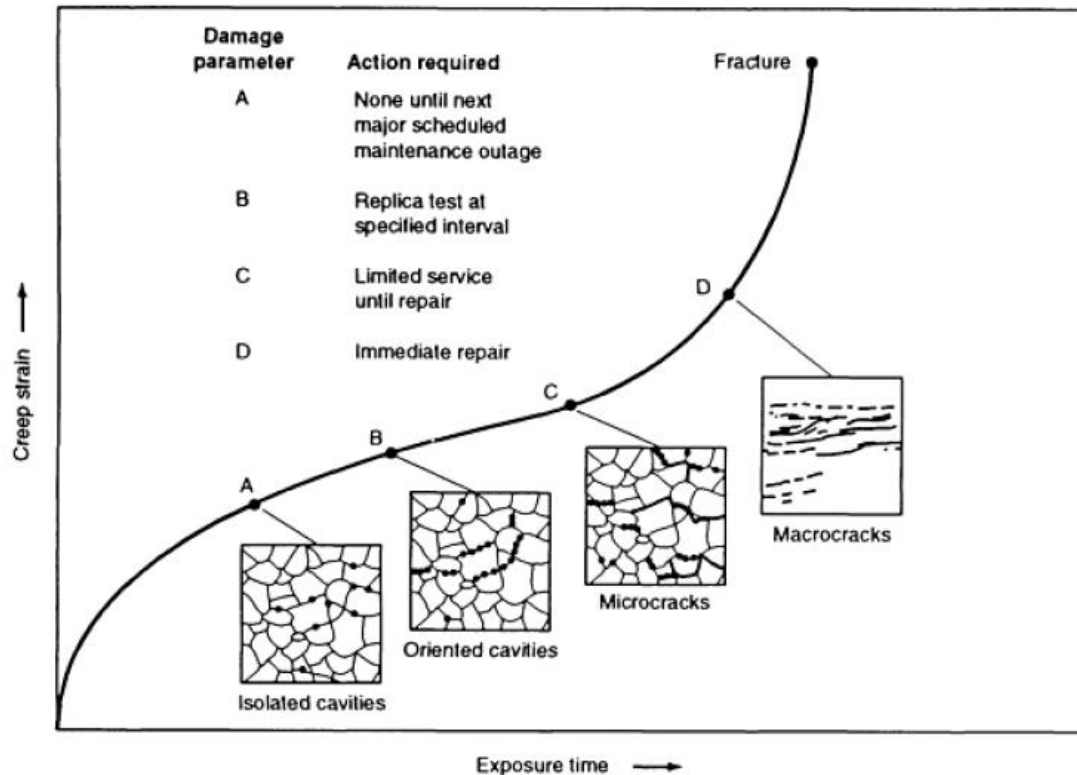
Εικόνα 38: Δεδομένα κεφαλής phased array στο δοκίμιο A.



Εικόνα 39: Ενδειξη θόνης συσκευής phased array στο 1^ο σημείο στο δοκίμιο A.

4.5 Μεταλλογραφικός Έλεγχος

Τα πέντε δοκίμια τα οποία προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία στα δύο τμήματα των αυλών μελετήθηκαν σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο για τον χαρακτηρισμό της κατάστασης ερπυσμού και την σύγκριση με τις μετρήσεις που έγιναν με τον υπέρηχο. Η μελέτη βασίστηκε στο ακόλουθο διάγραμμα για την ποιοτική κατάταξη σε επίπεδα του φαινομένου του ερπυσμού που υπέστησαν τα δείγματα (Εικόνα 40).



Εικόνα 40: Κατάταξη σε επίπεδο ερπυσμού. [20]

Αποτελέσματα στο δοκίμιο A στο 1^ο σημείο

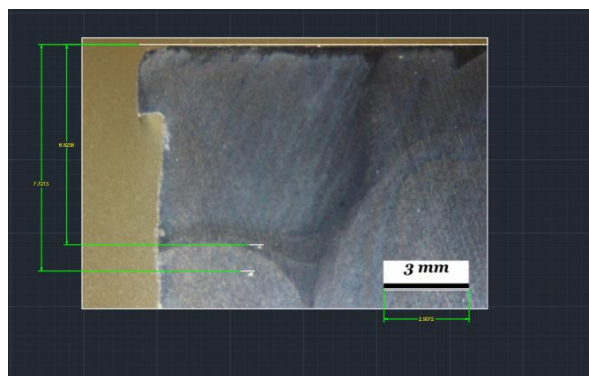
Στην παρακάτω φωτογραφία παρατηρήθηκε κάποια χαρακτηριστικά του ερπυσμού όπως μικροοπές στα τριπλά σημεία των κόκκων. Σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 40 και με βάση τα αποτελέσματα της μεταλλογραφίας στην παρακάτω Εικόνα 41, το δείγμα έχει υποστεί πρωτογενή ερπυσμό και βρίσκεται στο επίπεδο A με απομονωμένες οπές. Η μεταλλογραφία δείχνει την ύπαρξη δενδριτικής ωστενιτικής μήτρας με την παρουσία καρβιδίων τύπου M_7C_3 , $M_{23}C_6$. Το βέλος απεικονίζει στην παρακάτω φωτογραφία τα πρωτογενή καρβίδια.



Εικόνα 41: Αποτύπωση μικροδομής δείγματος x100.

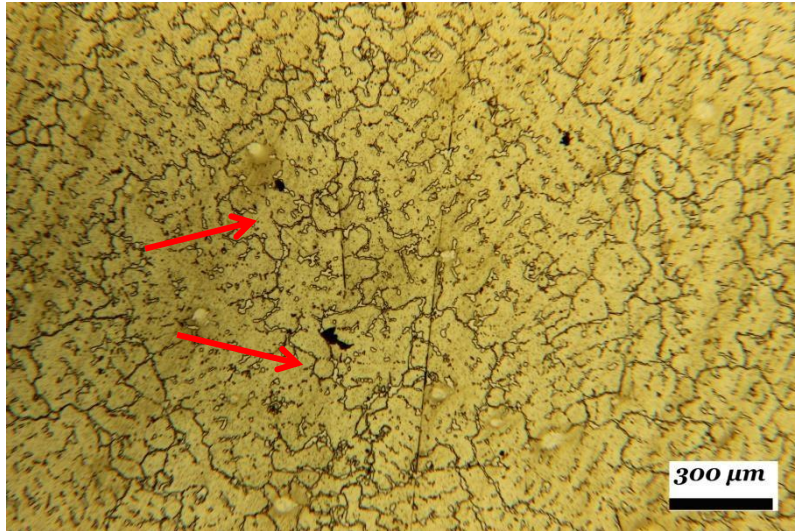
Με βάση τους υπολογισμούς με την βοήθεια του AutoCad αυτά τα δύο σημεία βρίσκονται στα 7,9 και 8 mm, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 42, Εικόνα 43 . Οι ενδείξεις αυτές είναι πάρα πολύ κοντά στις τιμές οι οποίες καταγράφηκαν για το 1^ο σημείο με τις κεφαλές υπερήχων οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 9.

Πίνακας 9: Τιμές μετρήσεων υπερήχων για το 1^ο σημείο στο δοκίμιο Α.



		Τιμές Μετρήσεων Υπερήχων			
		ΜΕΤΡ1	ΜΕΤΡ2	ΜΕΤΡ3	ΜΕΤΡ4
Δοκίμιο Α-13	Σημείο 1	8,4	8,4	7,8	8,9
	Σημείο 2	7,1	7,1	7	8,6
	Σημείο 3	7,1	7,1	9	9,9
	Σημείο 4	7,4	7,4	6,6	9,3
Δοκίμιο 2ο	Σημείο 5	14,1	4,1	14,3	-

Εικόνα 42: Ένδείξεις στα 7,9 και 8 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.

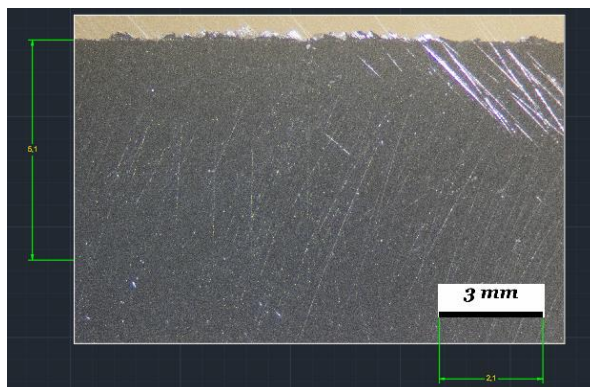


Εικόνα 43: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 1 .

Αποτελέσματα στο δοκίμιο Α στο 2^ο σημείο

Για το 2^ο σημείο πάλι αναζητήθηκε σε όλο το δοκίμιο σημεία στα οποία μπορούσε ο υπέρηχος να δείξει μια ένδειξη στην οθόνη. Πράγματι όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 44) με την βοήθεια του AutoCad υπολογίστηκε ότι στα 7,5 mm υπάρχει μικροσπές οι οποίες φαίνονται στην οθόνη με χαμηλή ισχύ σήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος τους είναι της τάξης κάποιων μικρομέτρων όπως φαίνεται και από την παρακάτω Εικόνα 45. Η απόκλιση με τις τιμές που καταγράφηκαν είναι πολύ μικρή της τάξεως των δεκάτων του χιλιοστού.

Πίνακας 10: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 2^ο σημείο στο δοκίμιο Α.



		Τιμές Μετρήσεων Υπερήχων			
		DA201	MB2F	MSEB4	PA
Δοκίμιο Α-13	Σημείο 2	7,1	7,1	7	8,6
	Σημείο 3	7,1	7,1	9	9,9
	Σημείο 4	7,4	7,4	6,6	9,3
Δοκίμιο 20	Σημείο 5	14,1	4,1	14,3	-

Εικόνα 44: Ενδείξεις στα 7.5 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.



Εικόνα 45: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 2.

Αποτελέσματα στο δοκίμιο A στο 3^ο σημείο

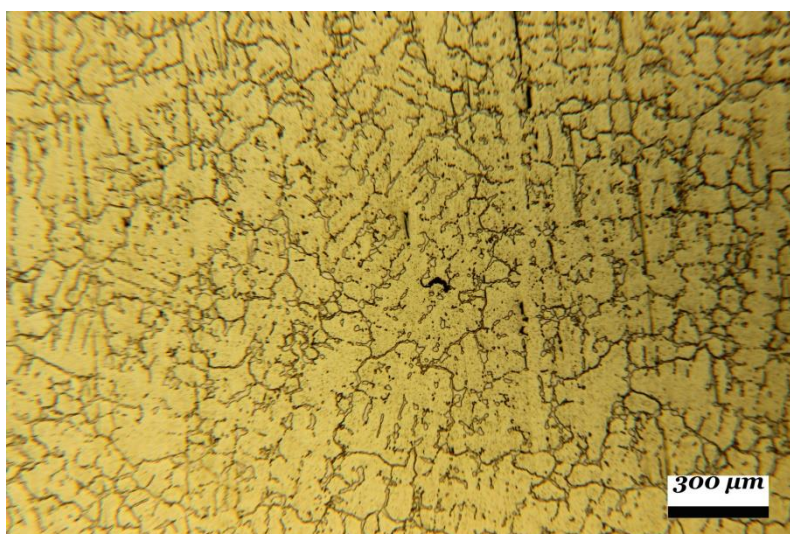
Στο σημείο 3^ο παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μια μεγάλη ένδειξη στα 6,7 mm (Εικόνα 46) από το πάνω μέρος της επιφάνειας που συμπίπτει με τις τιμές που καταγράφηκαν με τον υπέρηχο. Το μέγεθος της βέβαια είναι αρκετά μικρό γι αυτό τον λόγο η ένδειξη στην οθόνη ήταν χαμηλής ισχύος χωρίς να εξαφανίζεται η ηχώ του πίσω τοιχώματος σε καμία από τις τρεις κεφαλές DA201, MB2F, MSEB4.

Πίνακας 11: Τιμές μετρήσεων υπερήχων για το 3^ο σημείο στο δοκίμιο A.



		Τιμές Μετρήσεων Υπερήχων			
		DA201	MB2F	MSEB4	PA
Δοκίμιο A-13	Σημείο 1	8,4	8,4	7,8	8,9
	Σημείο 2	7,1	7,1	7	8,6
	Σημείο 3	7,1	7,1	9	9,9
	Σημείο 4	7,4	7,4	6,6	9,3
Δοκίμιο 2ο	Σημείο 5	14,1	4,1	14,3	-

Εικόνα 46: Ένδειξη στα 6.7 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.



Εικόνα 47: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 3.

Αποτελέσματα στο δοκίμιο A στο 4^ο σημείο

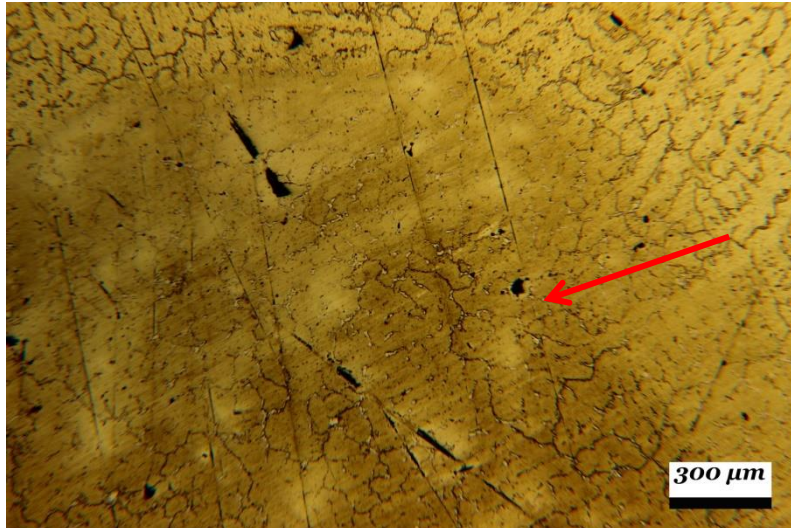
Για το 4^ο σημείο παρατηρείται μια μικροοπή στα 6.8 mm της οποίας το μέγεθος είναι ικανό να επιστρέψει σήμα που φαίνεται στην οθόνη(Εικόνα 48,Εικόνα 49). Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν με τον υπέρηχο έδειξαν ένα εύρος 6,6 έως 7,4 με τον υπέρηχο και 9,3 με την συσκευή phased array, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 12. Έτσι συμπεραίνεται ότι οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν για τον συμβατικό υπέρηχο κατέγραψαν αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά του μεταλλογραφικού ελέγχου. Η συσκευή phased array έδειξε μια τιμή στα 9,3 mm που οφείλεται στο μέγεθος της κεφαλής το οποίο δεν είναι κατάλληλο για τον έλεγχο.

Πίνακας 12: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 4^ο σημείο στο δοκίμιο A.



		Τιμές Μετρήσεων Υπερήχων			
		DA201	MB2F	MSEB4	PA
Δοκίμιο A-13	Σημείο 1	8,4	8,4	7,8	8,9
	Σημείο 2	7,1	7,1	7	8,6
Δοκίμιο 20	Σημείο 3	7,4	7,4	6,6	9,3
	Σημείο 5	14,1	4,1	14,3	-

Εικόνα 48: Ένδειξη στα 6.8 mm από το επάνω μέρος της επιφάνειας.



Εικόνα 49: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 4.

Αποτελέσματα στο δοκίμιο Β στο 5^ο σημείο

Για το σημείο 5^ο στο δοκίμιο Β, με βάση την Εικόνα 40, βρίσκεται στο στάδιο D του ερπυσμού έχοντας πλέον στο εσωτερικό του αναπτυχθεί μακρορωγμές και στην κοντινή περιοχή του είχε αναπτυχθεί η ρωγμή μέχρι την εξωτερική επιφάνεια του αυλού (Εικόνα 50, Εικόνα 51). Γι αυτό τον λόγο οι μακρορωγμές ξεκινούν από την εξωτερική έως την εσωτερική επιφάνεια του δοκιμίου. Το σημαντικό που παρατηρείται με τον υπέρηχο που πραγματοποιήθηκε είναι ότι σε όλες τις κεφαλές δεν εμφανιζόταν το back wall echo στην οθόνη. Αυτό επιβεβαιώνεται με το μέγεθος των μακρορωγμών στο εσωτερικό του δοκιμίου όπου είναι αρκετά μεγάλες έτσι ώστε ο υπέρηχος να επιστρέφει δυνατό σήμα σε βάθος λιγότερο των 15,45 mm που είναι και το πάχος του δοκιμίου.

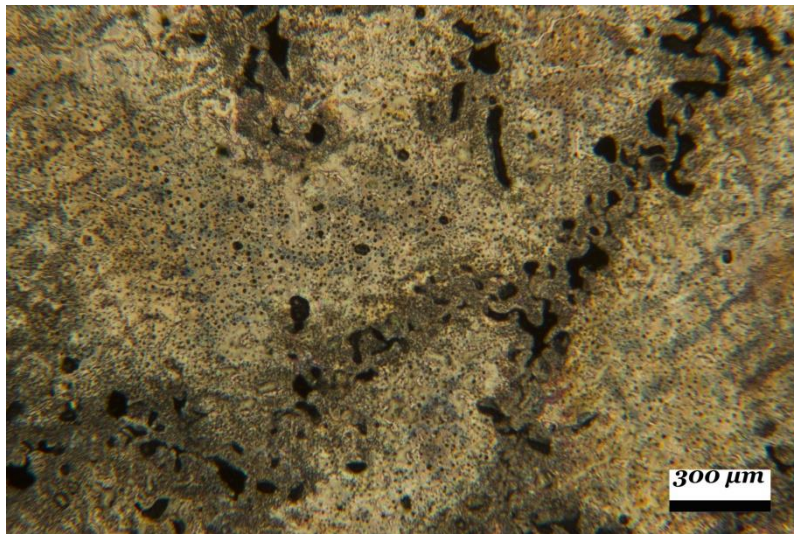
Πίνακας 13: Τιμές μετρήσεων Υπερήχων για το 5^ο σημείο στο δοκίμιο Β.



		Τιμές Μετρήσεων Υπερήχων			
		DA201	MB2F	MSEB4	PA
δοκίμιο Α-13	Σημείο 1	8,4	8,4	7,8	8,9
	Σημείο 2	7,1	7,1	7	8,6
	Σημείο 3	7,1	7,1	9	9,9
	Σημείο 4	7,4	7,4	0,0	7,3
Δοκίμιο 2ο	Σημείο 5	14,1	4,1	14,3	-

Εικόνα 50: Ανάπτυξη μακρορωγμών σε όλο το πάχος του δοκιμίου.

Σύμφωνα με την παρακάτω Εικόνα 51 , αποδεικνύεται η ύπαρξη μακρορωγμών με αποτέλεσμα η μικροδομή να οδηγεί στην κατάταξη ερπυσμού στο τελευταίο επίπεδο D.



Εικόνα 51: Μικροδομή δείγματος στο σημείο 5.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα- Προτάσεις

Από τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Στον παρακάτω Πίνακας 14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, το μέγεθος της βλάβης του ερπυσμού ανάλογα με την Εικόνα 40 και η διακριτική ικανότητα της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (Αυλός διαμέτρου 103,3 mm και πάχος 15,45 mm).

Μη καταστρεπτική μέθοδος	Στάδιο ερπυσμού	Πεδίο Εφαρμογής	Διακριτική Ικανότητα (mm)
Διεισδυτικά Υγρά (PT)	Τελικό στάδιο ερπυσμού D	Επιφανειακή μέθοδος	0.2 - 0.5
Ραδιογραφικός Έλεγχος (RT)	Τελικό στάδιο ερπυσμού D	Ογκομετρική υποεπιφανειακή μέθοδος	0.2 - 0.5
Υπέρηχοι (UT)/ Phased array (PA)	Στο αρχικό στάδιο A,B επηρεάζεται από τον θόρυβο, στα τελικά στάδια έχει αξιόπιστα αποτελέσματα	Ογκομετρική υποεπιφανειακή μέθοδος	0.5

Καταστρεπτική μέθοδος	Στάδιο ερπυσμού	Πεδίο Εφαρμογής	Διακριτική Ικανότητα
Μεταλλογραφικός έλεγχος	Ικανοποιητικά σε όλα τα στάδια του ερπυσμού	Σημειακή σε οποιοδήποτε πάχος του υλικού (τομή κατά το πάχος)	2 μm

- Με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών δεν υπήρχαν ενδείξεις στο δοκίμιο A. Το δοκίμιο A, όπως επιβεβαιώθηκε και από τον μεταλλογραφικό έλεγχο βρίσκεται στο πρώτο στάδιο του ερπυσμού, δεν έχουν αναπτυχθεί μακρορωγμές αλλά παρουσιάζει μεμονωμένες μικροσπές στο εσωτερικό του. Έτσι η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει την βλάβη αυτή στον αυλό. Η μέθοδος έχει την δυνατότητα να αποκαλύψει «βλάβες» οι οποίες είναι επιφανειακές.
- Με την μέθοδο της ραδιογραφίας δεν υπήρχαν ενδείξεις για την ανίχνευση βλάβης στο δοκίμιο A καθώς οι μικροσπές οι οποίες υπάρχουν στο δοκίμιο είναι πολύ μικρές για την διακριτική ικανότητα της ραδιογραφίας.

- Με την μέθοδο των υπερήχων επιβεβαιώθηκε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει μικροοπές στο εσωτερικό του χωρίς όμως την δυνατότητα να υπολογιστεί το μέγεθος τους καθώς αυτές είναι πολύ μικρές για την διακριτική ικανότητα των υπερήχων. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος που πραγματοποιήθηκε επιβεβαίωσε την ύπαρξη μικροοπών στο εσωτερικό του δοκιμίου A και την κατάταξή του στο στάδιο A του ερπυσμού. Σημαντική είναι η διαφορά στα σήμα μεταξύ του δοκιμίου A και του δοκιμίου B κοντά στην ρωγμή όπου το B είναι στο τελικό στάδιο του ερπυσμού και δεν επιστρέφεται σήμα από το πίσω μέρος της επιφάνειας (back wall echo).
- Η κεφαλή που χρησιμοποιήθηκε με την συσκευή phased array δεν κατέγραψε σωστές ενδείξεις.

Προτάσεις για επόμενη εργασία:

- Έλεγχος με κεφαλή phased array των δοκιμίων που εξετάστηκαν.
- Σε αυλούς μεγάλου μήκους που υπάρχουν σε διυλιστήρια, η εφαρμογή επιφανειακών μεθόδων στο εσωτερικό του αυλού είναι πολύ δύσκολη. Η μέθοδος των δινορευμάτων έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει έλεγχο στο εσωτερικό αυλών. Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου των eddy current (δινορεύματα) σε δοκίμια που παρουσιάζουν ερπυσμό σε 2^ο και 3^ο στάδιο είναι πολύ σημαντική.
- Εφαρμογή της μεθόδου TOFD (Time of flight diffraction) που είναι μια μέθοδος υπερήχων με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

- [1]: Ashok Kumar Ray, Samarendra Kumar Sinha, Yogendra Nath Tiwari, Jagannathan Swaminathan, Gautam Das, Satyabrata Chaudhuri, Raghubir Singh, 'Analysis of failed reformer tubes', *Engineering Failure Analysis* 10 ,2003, 351–362.
- [2]: Damir Hodžid, Ismar Hajro, ' Assessment of microstructure degradation of creep exposed boiler steels', *11th International Research/Expert Conference*, September 05-09 2007.
- [3]: Γρηγόρης Ν. Χαιδεμενόπουλος, *Φυσική Μεταλλουργία*, εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [4]: M. Santos, M. Guedes, R. Baptista , V. Infante, R.A. Claudio, 'Effect of severe operation conditions on the degradation state of radiant coils in pyrolysis furnaces', *Engineering Failure Analysis*, Volume 56, October 2015, Pages 194-203.
- [5]: Ashok Kumar Ray, Samarendra Kumar Sinha, Yogendra Nath Tiwari, Jagannathan Swaminathan, Gautam Das, Satyabrata Chaudhuri, Raghubir Singh, 'Analysis of failed reformer tubes', *Engineering Failure Analysis*, Volume 10, [Issue 3](#), June 2003, Pages 351-362.
- [6]: Gerard B.Hawkings, *Steam Reforming: 'Tube Design'*, https://www.academia.edu/10165708/Steam_Reforming_Tube_Design.
- [7]: Walenty Jasinski, 'Degradation of iron superalloys H39WM catalytic pipe in steam reforming conditions', *West Pomeranian University of Technology in Szczecin* (2010).
- [8]: G. Sposito, C.Ward, P.Cawley, P.B.Nagy , C.Scruby, 'A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels', *NDT & E International*, Volume 43, [Issue 7](#), October 2010, Pages 555-567.
- [9]: Μ.Κ Κωτούζας, Δ.Γ. Πιπτέρης, 'Υπερήχοι, Ultrasonic Testing, Σημειώσεις Θεωρίας', Βόλος 2013-2014.
- [10]: Μ.Κ Κωτούζας, Δ.Γ. Πιπτέρης, 'Διεισδυτικά Υγρά, Penetration Testing, Σημειώσεις Θεωρίας', Βόλος 2013-2014.
- [11]: Charles J. Hellier, 'Handbook of Non Destructive Evaluation', March 14, 2001.
- [12]: Μ.Κ Κωτούζας, Δ.Γ. Πιπτέρης, 'Βιομηχανική Ραδιογραφία, Radiography Testing, Σημειώσεις Θεωρίας', Βόλος 2013-2014 (Edition 2).
- [13]: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/cc_pt_index.htm

[14]: <https://www.olympus-ims.com/en/>

[15]: Κωνσταντίνος Κωτούζας, Δημήτρης Πιπτέρης, 'Τεχνική Ελέγχου Phased Array, Σημειώσεις Θεωρίας', Βόλος 2014-2015 (Edition 2).

[16]: Ming Song, Tong Xu, Keyi Yuan, Haiyang Yu, Chao Sun , 'Creep failure of a steam pipe girth weld and NDT strategy on creep damage', Engineering Failure Analysis, Volume 104, October 2019, Pages 673-681.

[17]: E494-15, 'Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials', American Society for Testing and Materials. Philadelphia, West Conshohocken, PA : ASTM, 2010. - 15 p.

[18]: John Jones, Terry Barker, Jurgen Huber, David Pool , 'Improve coil efficiency by using paralloy "P.E.P" tubes' , DONCASTERS PARALLOY, May 1999.

[19]: VGB-TW 507 – Guidelines for the assessment of microstructure and damage development of creep exposed materials for pipes and boiler components, VGB Technical Association of Large Power Plant Operators, 1992.