



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ
ΛΕΒΗΤΕΣ**

ΥΠΟ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΜΠΑΪΡΑΚΤΑΡΗ

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος 2021

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΛΕΒΗΤΕΣ

ΜΠΑΪΡΑΚΤΑΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπουσα: Δρ. Ζερβάκη Άννα

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπουσα)	Δρ. Άννα Ζερβάκη Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αλέξανδρος Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγήτρια κ. Αννα Ζερβάκη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Αλέξανδρο Κερμανίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική έχει ως σκοπό τη μελέτη της διάβρωσης του λέβητα. Αρχικά, γίνεται διεξοδική αναφορά στους λέβητες, στα είδη τους, στα υλικά κατασκευής τους αλλά και στην κατασκευαστική διαμόρφωση τους. Στην συνέχεια, αναλύονται τα είδη της διάβρωσης και η διάβρωση σε λέβητες. Ακόμα, γίνεται αναφορά στους τρόπους αντιμετώπισης της διάβρωσης σε λέβητες και ειδικότερα στην απαερίωση, στις μεμβράνες διαστολής και στην επεξεργασία του νερού. Η διπλωματική ολοκληρώνεται με την παρουσίαση πέντε μελετών (case studies), που αφορούν προβλήματα και προτάσεις αντιμετώπισης σε λέβητες, σε εγκαταστάσεις της ελληνικής βιομηχανίας.

Abstract

This thesis is written to study the corrosion of boiler. First of all, there is a reference at the boiler, its types, its construction materials and its construction configuration. Also there is a reference at the types of corrosion and the corrosion at the boilers. Furthermore, there is a reference on how to solve the problem of corrosion and especially deaeration, membrane contractors and water treatment are analyzed. Lastly there is a reference at five case studies about corrosion problems in the Greek industry.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	9
Κεφάλαιο 1: Λέβητες	10
1.1 Εισαγωγή	10
1.2 Είδη λεβήτων	11
1.3 Υλικά κατασκευής λεβήτων	12
Χάλυβας	13
Χάλυβες λεβητοποιίας	13
Λεπτόκοκκοι χάλυβες	14
Ανοξείδωτοι χάλυβες	14
Χαλυβδοσωλήνες λεβητοποιίας	15
Χυτοσίδηρος	15
Χαλκός και αλουμίνιο	16
1.4 Κατασκευαστική διαμόρφωση λεβήτων	17
Θάλαμος καύσης	18
Επιφάνειες συναγωγής	20
Κατασκευαστικές λεπτομέρειες χαλύβδινων λεβήτων	21
Κατασκευαστικές λεπτομέρειες χυτοσιδήρων λεβήτων	22
Λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών	23
Λέβητες συμπύκνωσης	23
Λέβητες στερεών καυσίμων	26
Ατμολέβητες	27
Αερολέβητες	29
Κεφάλαιο 2: Διάβρωση λεβήτων	31
2.1 Εισαγωγή	31
2.2 Είδη διάβρωσης	32

2.3	Φαινόμενα διάβρωσης σε λέβητες	35
	Επίθεση οξυγόνου (Oxygen attack)	35
	Επίθεση διοξειδίου του άνθρακα (carbon dioxide attack)	37
	Όξινη διάβρωση (Acidic corrosion)	38
	Γαλβανική διάβρωση	39
	Καυστική διάβρωση (caustic corrosion)	41
	Stress corrosion cracking	42
	Διάβρωση κάτω από τις επικαθίσεις στερεών	44
	Διάβρωση τέφρας γαιάνθρακα (coal ash corrosion)	45
	Διάβρωση τέφρας λαδιού (oil ash corrosion)	47
	Διάβρωση σημείου δρόσου (Dew point corrosion)	48
	Συνέπειες της διάβρωσης στη λειτουργία του λέβητα	50
	Κεφάλαιο 3: Προτάσεις για την αποφυγή διάβρωσης σε λέβητες	52
3.1	Εισαγωγή	52
3.2	Απαερίωση σε λέβητες	52
3.3	Μεμβράνες διαστολής	56
3.4	Επεξεργασία νερού του λέβητα	56
	Εξωτερική επεξεργασία νερού	57
	Εσωτερική επεξεργασία νερού	58
	Διατήρηση του pH στο νερό του λέβητα	60
	Κεφάλαιο 4: Case studies	62
4.1	Εισαγωγή	62
4.2	Πειραματικές διαδικασίες	62
4.3	Case study 1 – Αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή ατμολέβητα [23]	63
	I. Εισαγωγή	63
	II. Αποτελέσματα	64
	III. Συμπεράσματα	76
4.4	Case study 2 – Αστοχίας σωλήνων ατμού λόγω διάβρωσης [24]	77
	I. Εισαγωγή	77
	II. Αποτελέσματα	78
	III. Συμπεράσματα	82
4.5	Case study 3 - Αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή λέβητα [25]	83

I.	Εισαγωγή	83
II.	Αποτελέσματα	83
III.	Συμπεράσματα	90
4.6	Case study 4 -Αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα υπερθερμαντήρα λέβητα. [8]	92
I.	Εισαγωγή	92
II.	Αποτελέσματα	93
III.	Συμπεράσματα	94
4.7	Case study 5 – Αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα λέβητα [8]	95
I.	Εισαγωγή	95
II.	Αποτελέσματα	95
III.	Συμπεράσματα	96
	Συμπεράσματα	97
	Βιβλιογραφία	98

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τους ατμοπαραγωγούς λέβητες και την διάβρωση του υφίστανται αυτοί, όπως επίσης και τις πιο βασικές μεθόδους για την αποφυγή της.

Λέβητας ονομάζεται κάθε κλειστή μεταλλική συσκευή εντός της οποίας νερό ή άλλο υγρό θερμαίνεται και μετατρέπεται σε ατμό, οπότε ονομάζεται ατμολέβητας ή αν θερμαίνει το νερό, λέβητας νερού.

Η θερμότητα παράγεται από την καύση του καυσίμου, με το οποίο τροφοδοτείται ο λέβητας, χάρη στο εργαζόμενο μέσο, που ανακυκλοφορεί μέσα σε σωληνώσεις και μεταφέρει τη θερμότητα αυτή στο σημείο που θα καταναλωθεί, είτε για θέρμανση είτε για παραγωγή έργου. Για τους συνήθεις λέβητες σε συστήματα κεντρικής θέρμανσης, το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό.

Όμως, στην περίπτωση που ο χάλυβας του λέβητα αντιμετωπίζει πρόβλημα διάβρωσης, προκύπτουν πολλά προβλήματα, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μη καλή λειτουργία του λέβητα, αλλά και την αργοπορία των διαδικασιών και τη σπατάλη καυσίμων, άρα και μεγαλύτερο οικονομικό κόστος για την εταιρεία. Η διπλωματική ασχολείται με τα παραπάνω θέματα σε μια προσπάθεια συμβολής στην αντιμετώπιση του προβλήματος.

Κεφάλαιο 1: Λέβητες

1.1 Εισαγωγή

Οι λέβητες είναι μηχανικές συσκευές, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί από όλους τους ανθρώπους για οικιακή χρήση. Επιστημονικά, ο λέβητας ορίζεται ως μια δεξαμενή, η οποία μεταβιβάζει θερμότητα από την καύση καυσίμου στο θερμαντικό μέσο. Συνδυάζει ένα καυστήρα, ο οποίος μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμική ενέργεια και έναν εναλλάκτη, ο οποίος μεταδίδει την παραγόμενη θερμότητα στο θερμαντικό μέσο (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Βιομηχανικός λέβητας [2]

Το συνηθέστερο θερμαντικό μέσο είναι το νερό. Σε αρκετά συστήματα, οι λέβητες ζεσταίνουν νερό χαμηλών θερμοκρασιών (σε όλα τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης). Σε αρκετά άλλα συστήματα όμως, αυξάνουν πολύ τη θερμοκρασία του νερού, σε σημείο που να το ατμοποιούν (κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και σε πλοία). Σπανιότερα, συναντούμε και τους λέβητες που χρησιμοποιούν ως κύριο μέσο τον αέρα, τον θερμαίνουν και διαμέσου

αεραγωγών, τον μεταφέρουν, ώστε να θερμάνουν χώρο ή να αποξηράνουν προϊόντα. Ακόμη πιο σπάνιοι είναι οι λέβητες, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως θερμαντικό μέσο το λάδι ή άλλα ρευστά, με ελάχιστες εφαρμογές. [1]

1.2 Είδη λεβήτων

Η κατασκευαστική διαμόρφωση του λέβητα εξαρτάται από το είδος του καυσίμου, το είδος του καυστήρα, από τα υλικά κατασκευής και από το φορέα θερμότητας. Οι λέβητες με βάση το καύσιμο διακρίνονται σε:

- 1) Ειδικούς λέβητες, οι οποίοι καίνε μόνο ένα συγκεκριμένο καύσιμο και δεν μπορούν να υποστούν μετατροπές για να χρησιμοποιηθούν άλλα καύσιμα. Τέτοιοι είναι λέβητες αερίων με καυστήρες, χωρίς ανεμιστήρα.
- 2) Λέβητες μετατρέπομενης καύσης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορα καύσιμα. Σε αυτούς, η μετάβαση από το ένα καύσιμο στο άλλο γίνεται με αφαίρεση και προσθήκη ορισμένων στοιχείων του λέβητα ή του καυστήρα.
- 3) Λέβητες εναλλακτικής καύσης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιούν διάφορα καύσιμα χωρίς να απαιτείται ειδική μετατροπή. Τέτοιοι είναι οι περισσότεροι σημερινοί λέβητες πετρελαίου, οι οποίοι χρησιμοποιούν αέρια καύσιμα, αλλάζοντας μόνο τον καυστήρα.

Από την άποψη του καυστήρα, διακρίνονται σε:

- 1) Λέβητες με καυστήρα χωρίς ανεμιστήρα (ατμοσφαιρικοί), τους οποίους καυστήρες συναντάμε μόνο σε λέβητες αέριων καυσίμων.
- 2) Λέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα χωρίς υπερπίεση, τους οποίους καυστήρες συναντάμε σε λέβητες αέριων καυσίμων.
- 3) Λέβητες με καυστήρα με ανεμιστήρα υπερπίεσης, οι οποίοι καυστήρες είναι όλοι σχεδόν οι σημερινοί καυστήρες υγρών καυσίμων αλλά και πολλοί αέριων καυσίμων.

Από την άποψη των υλικών κατασκευής διακρίνονται σε:

- 1) Χαλύβδινους λέβητες
- 2) Χυτοσιδήρους λέβητες

Από την άποψη του φορέα της θερμότητας διακρίνονται σε:

- 1) Λέβητες θερμού νερού με θερμοκρασία προσαγωγής μέχρι 100°C

- 2) Λέβητες υπέρθερμου νερού με θερμοκρασία προσαγωγής άνω των 100°C
- 3) Ατμολέβητες
- 4) Αερολέβητες

Οι τρεις τελευταίοι συναντώνται σε επαγγελματικές και βιομηχανικές χρήσεις

Για τις οικιακές εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί αέριο καύσιμο έχουν αναπτυχθεί, εκτός από τους κοινούς λέβητες και ειδικές κατασκευές, οι οποίες είναι:

- 1) Θερμαντήρες χώρων ανακυκλοφορίας, οι οποίοι είναι μονάδες πλήρως εξοπλισμένες με καυστήρα, εναλλάκτη θερμότητας, κυκλοφορητή, όργανα ελέγχου και ρύθμισης κλπ.
- 2) Θερμαντήρες συνδυασμένης λειτουργίας, οι οποίοι λειτουργούν ως θερμαντήρες χώρων ανακυκλοφορίας και ως ταχυθερμοσίφωνες. [1]

1.3 Υλικά κατασκευής λεβήτων

Η επιλογή του υλικού κατασκευής των λεβήτων εξαρτάται από την κατασκευαστική διαμόρφωση τους, τις κατασκευαστικές δυνατότητες και την επιδιωκόμενη ποιότητα. Οι λέβητες βασικά κατασκευάζονται από χάλυβα ή από χυτοσίδηρο, όμως κάποιες ειδικές κατασκευές που καίνε αέρια καύσιμα αλλά και ειδικά τμήματα λεβήτων κατασκευάζονται και από ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό, αλουμίνιο και κράματα τους ή και από κεραμικά ή άλλα πυρίμαχα υλικά. Η ποιότητα των υλικών κατασκευής, η οποία εκτός των άλλων επηρεάζει τη διάβρωση των λεβήτων αλλά και των παρελκόμενων τους, ουσιαστικά καθορίζει τη διάρκεια εκμετάλλευσης αλλά και τη λειτουργικότητα τους. Αυτό ισχύει κυρίως για τα μέρη τα οποία βρίσκονται σε επαφή με νερό.

Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι το βασικό υλικό όλων των κατασκευών και άρα και της κατασκευής των λεβήτων. Ο χαλύβδινος λέβητας κατασκευάζεται από χαλυβδόφυλλα και σωλήνες με ή χωρίς ραφή με συγκολλήσεις. Ο χάλυβας μπορεί να δέχεται υψηλότερες θερμικές φορτίσεις, οπότε για την ίδια ισχύ προκύπτει μικρότερο μέγεθος κατασκευής. Επίσης προκύπτουν μικρότερα πάχη και άρα ελαφρότερες κατασκευές. Για τη διάρκεια ζωής του λέβητα σημαντική, εκτός από την ποιότητα του χάλυβα, είναι και η ποιότητα των συγκολλητικών ραφών. Γενικά, ενώ οι λέβητες θερμού νερού με θερμοκρασία προσαγωγής μέχρι 100°C μπορούν να κατασκευάζονται από κοινούς χάλυβες, οι λέβητες υπέρθερμου νερού και οι ατμολέβητες πρέπει να κατασκευάζονται από χάλυβες ανθεκτικούς σε υψηλές θερμοκρασίες και μόνο κάποια δευτερεύοντα μέρη τους να κατασκευάζονται από κοινούς χάλυβες.

Χάλυβες λεβητοποιίας

Οι χάλυβες λεβητοποιίας είναι χάλυβες ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι οι βασικοί χάλυβες της λεβητοποιίας. Είναι τυποποιημένοι κατά DIN 17155. Στην πράξη χρησιμοποιούνται στους λέβητες θέρμανσης οι χάλυβες H I και H II (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση χαλύβων HI και HII κατά DIN 17155 [1]

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	V
HI	0.16	0.35	0.4-1.2	0.03	0.025	0.02	0.3	0.3	0.3	0.08	0.01	0.03	0.02
HII	0.2	0.4	0.5-1.4	0.03	0.025	0.02	0.3	0.3	0.3	0.08	0.01	0.03	0.02

Λεπτόκοκκοι χάλυβες

Οι λεπτόκοκκοι χάλυβες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην κατασκευή ατμολεβήτων και είναι τυποποιημένοι κατά DIN 17102 και κυρίως ο χάλυβας T StE 355 (Πίνακας 2) . Είναι χάλυβες εξελασμένοι εν θερμό και είναι κατάλληλοι για συγκολλήσεις.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση χάλυβα T StE 355 κατά DIN 17102 [1]

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Ni	Mo	Nb	V
T StE 355	0.18	0.1-0.5	0.9-1.55	0.03	0.025	0.02	0.3	0.2	0.3	0.08	0.05	0.1

Ανοξείδωτοι χάλυβες

Ανοξείδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ειδικών τμημάτων λεβήτων και στην κατασκευή θερμαντήρων νερού ανακυκλοφορίας και θερμαντήρων νερού συνδυασμένης λειτουργίας. Οι χάλυβες αυτοί πρέπει να είναι αποδεδειγμένα ανθεκτικοί σε διακρυσταλλική διάβρωση ακόμη και μετά τις συγκολλήσεις. Οι χάλυβες αυτοί είναι τυποποιημένοι κατά DIN 17440 (Πίνακας 3). Περιέχουν τουλάχιστον 12% κ.μ. Cr.

Πίνακας 3: Χημική ανάλυση χάλυβα X6CrNiMoTi17122 κατά DIN 17440 [1]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
X6CrNiMoTi17122	0.08	1	2	0.045	0.03	16.5-18.5	10.5-13.5	2-2.5	0.7

Χαλυβδοσωλήνες λεβητοποιίας

Στη λεβητοποιία χρησιμοποιούνται χαλυβδοσωλήνες ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι χρησιμοποιημένοι χαλυβδοσωλήνες μπορούν να είναι σωλήνες με ραφή ή χωρίς ραφή. Οι χαλυβδοσωλήνες με ραφή είναι τυποποιημένοι κατά DIN 17177, ενώ οι χαλυβδοσωλήνες χωρίς ραφή είναι τυποποιημένοι κατά DIN 17175. Στην πράξη χρησιμοποιούνται στους λέβητες θέρμανσης οι χαλυβδοσωλήνες St 35.8 κατά DIN 17175 και St 37.8 κατά DIN 17177 (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Χημική ανάλυση χαλύβων St 35.8 και St 37.8 κατά DIN 17175 και κατά DIN 17177 αντίστοιχα. [1]

	C	Si	Mn	P	S
St 35.8	0.17	0.10-0.35	0.4-0.8	0.03	0.03
St 37.8	0.17	0.10-0.35	0.4-0.8	0.04	0.04

Χυτοσίδηρος

Ο χυτοσίδηρος είναι ένα υλικό με διεθνώς ευρεία χρήση στην κατασκευή λεβήτων. Η χρήση του υπάγεται κυρίως στην κατασκευή λεβήτων θερμού ή υπέρθερμου νερού και δεν χρησιμοποιείται στην κατασκευή ατμολεβήτων. Ο χυτοσίδηρος επιτρέπει την κατασκευή του λέβητα κατά στοιχεία (φέτες), πράγμα το οποίο επιτρέπει τη στενή διαβάθμιση της ισχύος με την προσθήκη στοιχείων καθώς και καλή ικανότητα προσαρμογής στις εκάστοτε απαιτήσεις θερμαντικής ισχύος. Η χύτευση επιπλέον επιτρέπει την κατάλληλη διαμόρφωση του λέβητα, ώστε ο μελετητής να επιτύχει βέλτιστη μετάδοση θερμότητας. Τα δομικά στοιχεία του λέβητα κατασκευάζονται γενικά από χυτοσίδηρο ποιότητας GG-20 κατά DIN 1691 (Πίνακας 5), ενώ τα στοιχεία τα οποία υφίστανται υψηλή θερμική καταπόνηση πρέπει να κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο ανώτερης αντοχής, GG-25 κλπ.

Πίνακας 5: Χημική ανάλυση και μηχανικές ιδιότητες χυτοσιδήρων GG-20 και GG-25 κατά DIN 1691. [1]

	C	Si	Mn	P	S	Tensile strength(N/mm ²)
GG-20	2.9-3.65	1.8-2.9	0.5-0.7	0.3	0.1	200
GG0-25	2.9-3.65	1.8-2.9	0.5-0.7	0.3	0.1	250

Πλεονεκτήματα χυτοσίδηρου

- 1) Η ανθεκτικότητα του σε διάβρωση, η οποία οφείλεται σε μια επιδερμίδα με υψηλή συγκέντρωση πυριτίου, η οποία δημιουργείται κατά τη χύτευση και η οποία είναι πολύ ανθεκτική σε χημικές επιδράσεις. Αποτέλεσμα είναι η μακροζωία του λέβητα
- 2) Ο χυτοσίδηρος λέβητας είναι λιγότερο θορυβώδης. Ο θόρυβος αποσβένεται από τα τοιχώματα του λέβητα, τα οποία είναι παχύτερα, ενώ στην απόσβεση συντελούν θετικά η δομή του χυτοσίδηρου καθώς και όλη η διαμόρφωση του λέβητα.
- 3) Η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και συναρμολόγησης μέσα στο λεβητοστάσιο.

Μειονέκτημα

Ο αυξημένος όγκος του λέβητα και άρα το αυξημένο βάρος του και το αυξημένο κόστος του.

Χαλκός και αλουμίνιο

Ο χαλκός και τα κράματα του χρησιμοποιούνται σε ειδικές συσκευές που καίνε αέρια καύσιμα. Στη λεβητοποιία επιτρέπεται να χρησιμοποιείται χαλκός ελεύθερος οξυγόνου. Επίσης επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται κράματα Cu-Zn (ορείχαλκος), κράματα χύτευσης Cu-Sn και Cu-Sn-Zn, κράματα χύτευσης Cu-Zn καθώς και χαλκός και κράματα χαλκού. Όπως και ο χαλκός, το αλουμίνιο και τα κράματα του χρησιμοποιούνται σε ειδικές συσκευές που καίνε καύσιμα. Στη λεβητοποιία επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται αλουμίνιο (Al 99.5) και κράματα αλουμινίου, καθώς και κράματα χύτευσης αλουμινίου. [1]

1.4 Κατασκευαστική διαμόρφωση λεβήτων

Ο λέβητας με την κατασκευή του πρέπει να επιτελέσει τις ακόλουθες εργασίες:

- 1) Μετατροπή της ενέργειας των καυσίμων σε θερμότητα.
- 2) Μετάδοση της εκλυόμενης θερμότητας στο φορέα μεταφοράς της (νερό, ατμός, αέρας).
- 3) Οδήγηση των καυσαερίων στο σύστημα απαγωγής τους (καπναγωγός κλπ.).

Είναι, δηλαδή, ο λέβητας αφ' ενός μια συσκευή διεργασίας, καθ' όσον σ' αυτόν λαμβάνει χώρα η καύση και αφ' ετέρου ένας εναλλάκτης θερμότητας, με την ιδιαιτερότητα της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία.

Όλες οι μεταβολές και οι βελτιώσεις που έχουν υποστεί οι λέβητες τον τελευταίο καιρό, έχουν ως στόχο αφ' ενός τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης και άρα την εξοικονόμηση καυσίμου και αφ' ετέρου τη βελτίωση της διάρκειας ζωής των λεβήτων. Επίσης, την εξέλιξη των λεβήτων επηρέασαν και η μείωση, στο ελάχιστο δυνατό, των παραγόμενων και αποβαλλόμενων ρύπων, καθώς και η κατασκευή λεβήτων χαμηλών θερμοκρασιών.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση του λέβητα εξαρτάται από:

- 1) Το είδος του καυσίμου,
- 2) Το είδος του συστήματος καύσης,
- 3) Τα υλικά κατασκευής,
- 4) Το φορέα μεταφοράς της θερμότητας και
- 5) Τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της λανθάνουσας ενθαλπίας των υδρατμών των καυσαερίων (λέβητες συμπύκνωσης).

Η διαμόρφωση του λέβητα επηρεάζεται από το είδος του συστήματος καύσης. Έτσι στα στερεά καύσιμα η καύση προχωρεί κατακόρυφα, στα υγρά καύσιμα η φλόγα είναι οριζόντια, ενώ στα αέρια ανάλογα με τον καυστήρα η φλόγα είναι οριζόντια ή κατακόρυφη.

Ο λέβητας μπορεί να λειτουργεί με φυσικό ελκυσμό, και άρα υποπίεση μέσα στη συσκευή ή με υπερπίεση. Η υποπίεση δημιουργείται από τον ελκυσμό της καπνοδόχου

και είναι αναγκαία για την υπερνίκηση των αντιστάσεων στη ροή των επιφανειών συναγωγής του λέβητα, η οποία υπερνίκηση στους λέβητες υπερπίεσης αναλαμβάνεται από τον ανεμιστήρα του καυστήρα. Η υποπίεση μέσα στο λέβητα θα πρέπει να παραμένει κατά το δυνατόν σταθερή, πράγμα δύσκολο, επειδή η καπνοδόχος εκτίθεται στις καιρικές επιδράσεις. Οι επιδράσεις, αυτές, αντιμετωπίζονται με ειδικά μέτρα (ασφαλείας ροής στους λέβητες ατμού).

Διαφορετική είναι προφανώς η κατασκευαστική διαμόρφωση των λεβήτων ανάλογα με το φορέα μεταφοράς της θερμότητας. Έτσι οι αερολέβητες, στους οποίους η μετάδοση θερμότητας (συναγωγή) προς τον αέρα απαιτεί μεγαλύτερες επιφάνειες σε σύγκριση με τη μετάδοση θερμότητας προς το νερό ή τον ατμό, οδηγούνται σε εντελώς διαφορετικές κατασκευαστικές διαμορφώσεις. Φυσικά στη διαφορετική κατασκευαστική διαμόρφωση οδηγούν και οι διαφορετικές πιέσεις των φορέων μεταφοράς της θερμότητας. Ενώ στον αέρα η υπερπίεση είναι λίγα mbar, στο νερό και τον ατμό είναι τουλάχιστον λίγα bar, και φυσικά αυτά απαιτούν αυξημένα πάχη τοιχωμάτων και κατάλληλες διαμορφώσεις. [1,2]

Θάλαμος καύσης

Ο θάλαμος καύσης ως πρώτο σκοπό έχει την πραγματοποίηση βέλτιστης καύσης. Περαιτέρω πρέπει με τη μορφή και το μέγεθός του να παραλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερη θερμότητα, ώστε να είναι μικρές οι επιφάνειες συναγωγής. Επειδή η φλόγα αποδίδει πολλή θερμότητα με ακτινοβολία, τα τοιχώματα του χώρου καύσης πρέπει να είναι ανάλογα διαμορφωμένα, ώστε να την παραλάβουν (Εικόνα 2).

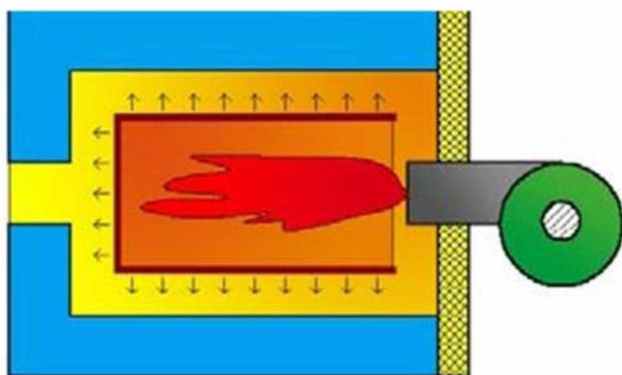
Έχει αποδειχθεί ότι ο θάλαμος καύσης πρέπει να έχει κάποιες ελάχιστες διαστάσεις, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη καύση. Το μήκος και η διάμετρος του θαλάμου καύσης πρέπει να είναι προσαρμοσμένα στη φλόγα του καυστήρα. Αν οι διαστάσεις του είναι μικρότερες από τις αναγκαίες, τότε επηρεάζεται η εξέλιξη της καύσης στη φλόγα. Λόγω των ψυχρότερων τοιχωμάτων, με τα οποία έρχεται σε επαφή η φλόγα, προκύπτει πρόωρη ψύξη της φλόγας, συνολικά ή σε μεμονωμένες περιοχές, με αποτέλεσμα την ατελή καύση και την αύξηση των ρύπων. Αν αντιθέτως ο θάλαμος καύσης είναι πολύ μεγάλος, η φλόγα περιβάλλεται από ψυχρότερες αέριες μάζες και υποψύχεται στις οριακές περιοχές της. Έτσι θα πρέπει να βρεθεί μια σωστή μέση τιμή.

Η θερμική φόρτιση των τοιχωμάτων πρέπει να βρίσκεται μέσα σε ορισμένα πλαίσια. Χαμηλή φόρτιση σημαίνει μεγάλες διαστάσεις και άρα αυξημένο κόστος, ενώ πολύ υψηλή φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή καταπόνηση και αστοχία των υλικών.

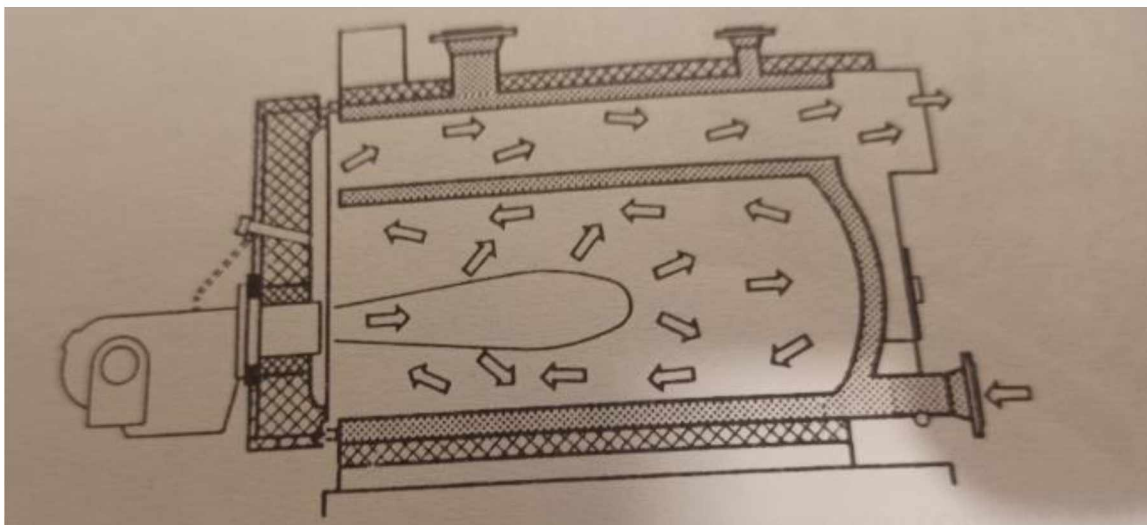
Η διαμόρφωση του χώρου καύσης είναι ανάλογη με το καιόμενο καύσιμο, αλλά εξαρτάται και από το υλικό κατασκευής. Έτσι οι χυτοσίδηροι λέβητες έχουν χώρο καύσης με κυματοειδείς επιφάνειες. Η μεγάλη επιφάνεια που δημιουργείται αυξάνει τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία. Αντίθετα οι χαλύβδινοι λέβητες έχουν λόγω κατασκευαστικής ευκολίας λείες επιφάνειες.

Οι περισσότεροι σύγχρονοι λέβητες πετρελαίου και αερίου με ανεμιστήρα, και ειδικά οι χαλύβδινοι κατασκευάζονται σύμφωνα με την αρχή της αναστροφής των καυσαερίων (Εικόνα 3). Με την κατασκευή αυτή αποφεύγονται οι εσωτερικές επενδύσεις των τοιχωμάτων. Κάθε χώρος καύσης αποτελείται από έναν κοίλο κύλινδρο με κλειστή την πίσω πλευρά. Έτσι τα καυσαέρια αναγκαστικά επιστρέφουν ρέοντας γύρω από τη φλόγα. Η φλόγα περιβάλλεται από τα δικά της καυσαέρια και έτσι εξατμίζονται και καίγονται τυχόν διαφυγόντα σταγονίδια καυσίμου. Επιπλέον με την αντιρροή δημιουργείται τύρβη στα όρια της φλόγας, η οποία φθάνει μέχρι τον πυρήνα της φλόγας και έτσι η περίσσεια καυσίμου, η οποία υπάρχει πάντοτε εκεί, αναμιγνύεται καλύτερα με την περίσσεια αέρα στο εξωτερικό περίβλημα της φλόγας.

Εντελώς διαφορετική είναι η φιλοσοφία σχεδιασμού του θαλάμου καύσης των λεβήτων με ατμοσφαιρικό καυστήρα αερίου, οι οποίοι είναι ειδικοί λέβητες. Ο θάλαμος καύσης πρέπει να έχει επαρκείς διαστάσεις ώστε να εγκατασταθεί μέσα σ' αυτόν ο ατμοσφαιρικός καυστήρας αερίου. Επάνω από τον καυστήρα θα πρέπει να υπάρχει επαρκής χώρος, ώστε να εξελίσσεται άψογα η καύση, χωρίς επηρεασμό της φλόγας. Οι λέβητες αυτοί συνήθως είναι χυτοσίδηροι, υπάρχουν όμως και λέβητες από ανοξείδωτο χάλυβα. [1,2]



Εικόνα 2: Θάλαμος καύσης. [2]



Εικόνα 3: Αρχή του λέβητα με αναστροφή των καυσαερίων. [1]

Επιφάνειες συναγωγής

Ως επιφάνειες συναγωγής νοούνται τα μέρη του λέβητα τα οποία έρχονται σε επαφή με το νερό (ή αντίστοιχα τον αέρα) και παραλαμβάνουν θερμότητα αλλά δεν «βλέπουν» τη φλόγα. Η μετάδοση θερμότητας από τα καυσαέρια προς αυτές γίνεται βασικά με συναγωγή, ενώ τα καυσαέρια συνεχίζουν να αποδίδουν συνεχώς μειούμενο κλάσμα της θερμότητας με ακτινοβολία, οφειλόμενη στο περιεχόμενο διοξείδιο του άνθρακα και τον περιεχόμενο υδρατμό.

Οι επιφάνειες συναγωγής του λέβητα πρέπει να παραλάβουν όση θερμότητα δεν αποδόθηκε στο θάλαμο καύσης. Θα πρέπει λοιπόν να έχουν επαρκές μέγεθος, ώστε να παραλάβουν όσο το δυνατόν περισσότερη θερμότητα και να κατεβάσουν τη θερμοκρασία μέχρι την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή, χωρίς όμως να την παραβιάζουν, διότι σε διαφορετική περίπτωση προκύπτουν κίνδυνοι διάβρωσης.

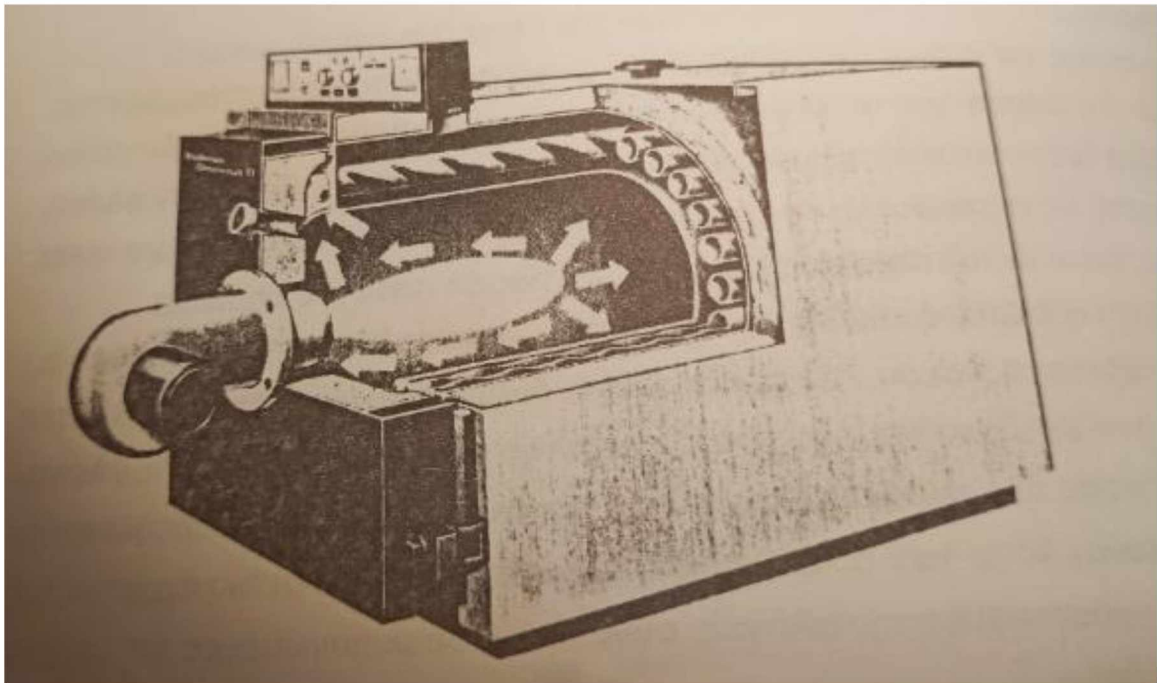
Οι επιφάνειες συναγωγής στους χαλύβδινους λέβητες είναι συνήθως σωλήνες, ενώ σε λίγες περιπτώσεις, στους λέβητες με ατμοσφαιρικό καυστήρα αερίου, μπορούν να είναι κανάλια ποικίλης μορφής. Στους σωλήνες η βελτίωση της συναγωγής μπορεί να γίνει είτε με συνεχείς μεταβολές της διεύθυνσης ή αυξομειώσεις της διατομής των σωλήνων, είτε με την τοποθέτηση μέσα στους σωλήνες διατάξεων αύξησης της τύρβης, όπως στροβιλιστήρες τοποθετημένοι στην είσοδο των σωλήνων ή απλές συρμάτινες ελικοειδείς σπείρες. [1,2]

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες χαλύβδινων λέβητων

Οι χαλύβδινοι λέβητες κατασκευάζονται από χαλυβδόφυλλα υψηλής ποιότητας και σωλήνες με ή χωρίς ραφή με ηλεκτροσυγκόλληση. Η κατασκευή πρέπει να είναι ελεγμένη και ιδιαίτερα τα μέρη τα οποία έρχονται σε επαφή με το μέρος πρέπει να ελέγχονται ως προς τη στεγανότητά τους. Οι χαλύβδινοι λέβητες παραδίδονται συνήθως ως μπλοκ.

Η κατασκευή από χαλυβδόφυλλα και σωλήνες επιτρέπει την παραγωγή σε σειρά ή μεμονωμένη. Οι διαστάσεις και η διαμόρφωση του λέβητα είναι ανάλογες με την ισχύ του. Τα βασικά μέρη του είναι:

- 1) Το σώμα του λέβητα, το οποίο αποτελείται από το χώρο καύσης, τις επιφάνειες συναγωγής, τις θύρες με τα κλείστρα, τα εξωτερικά τοιχώματα του λέβητα με το συλλέκτη και τον αγωγό καυσαερίων, τα καπάκια καθαρισμού, τις συνδέσεις με το δίκτυο και τις θέσεις μετρήσεων.
- 2) Το περίβλημα και
- 3) Ο πίνακας χειρισμού (Εικόνα 4). [1,2]

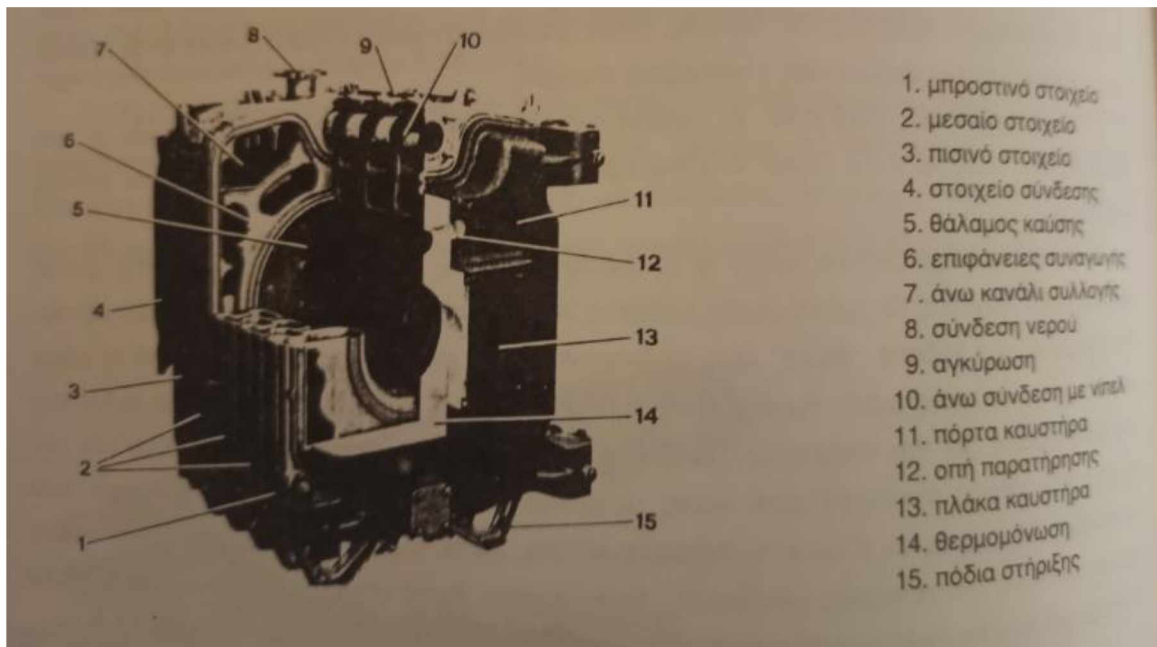


Εικόνα 4: Χαλύβδινος λέβητας [1]

Κατασκευαστικές λεπτομέρειες χυτοσιδήρων λεβήτων

Χαρακτηριστικό των χυτοσιδήρων λεβήτων είναι η κατασκευή τους σε στοιχεία. Τα στοιχεία, διατεταγμένα σε σειρά, δημιουργούν το χώρο καύσης, τις επιφάνειες συναγωγής, τις διόδους του καυσαερίου και τα κανάλια συλλογής (Εικόνα 5). Όλα τα στοιχεία είναι όμοια εκτός από το εμπρόσθιο, όπου υπάρχουν οι απαραίτητες πόρτες, το οπίσθιο στοιχείο με τη διάταξη σύνδεσης με την καπνοδόχο και πιθανώς κάποιο μεσαίο στοιχείο. Η σύνδεση με το δίκτυο θερμαντικού νερού γίνεται σε ένα ακραίο ή ειδικό μεσαίο στοιχείο.

Η κατασκευή σε στοιχεία προσφέρει επίσης το πλεονέκτημα ότι ο χώρος καύσης και οι επιφάνειες συναγωγής αυξάνουν ή μειώνονται ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων και άρα αυξάνει ή μειώνεται και η ισχύς του λέβητα. Ακόμη προσφέρει το πλεονέκτημα της δυνατότητας συναρμολόγησης του λέβητα μέσα στο λεβητοστάσιο, πράγμα πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις δυσπρόσιτων λεβητοστασίων. Φυσικά είναι δυνατή η αποσυναρμολόγηση για συντήρηση ή αντικατάσταση κάποιου στοιχείου. Η χύτευση προσφέρει στο σχεδιαστή μηχανικό και το πλεονέκτημα να επιλέξει τη μορφή των στοιχείων, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί κατά την κρίση του η μετάδοση θερμότητας. Έτσι οι διαμορφώσεις των στοιχείων είναι ποικίλες. [1,2]



Εικόνα 5: Χυτοσίδηρος λέβητας [1]

Λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών

Ως λέβητας χαμηλών θερμοκρασιών θεωρείται ο λέβητας ο οποίος μπορεί να λειτουργεί συνεχώς με θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας από 35°C έως 45°C και που μπορεί να επιτρέψει συμπύκνωση υδρατμών. Στους λέβητες αυτούς περιλαμβάνονται οι λέβητες συμπύκνωσης των υδρατμών των καυσαερίων, οι οποίοι χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα.

Οι λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών γενικά λόγω της κατασκευής και της ρύθμισης τους λειτουργούν με μέγιστη θερμοκρασία νερού 75°C και ελάχιστη τη θερμοκρασία δωματίου, χωρίς να εμφανίζονται συμπυκνώσεις. Προφανώς οι λέβητες αερίου είναι καταλληλότεροι για λειτουργία ως λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών. Οι χαμηλές θερμοκρασίες νερού μειώνουν τις θερμικές απώλειες ετοιμότητας και καυσαερίων, βελτιώνοντας σημαντικά τον ετήσιο βαθμό εκμετάλλευσης.

Οι λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών είναι κατάλληλοι για εφαρμογές με χαμηλή θερμοκρασία νερού, όπως είναι η ενδοδαπέδια θέρμανση ή σε εγκαταστάσεις θέρμανσης με συνδυασμό με αντλίες θερμότητας.

Οι λέβητες χαμηλών θερμοκρασιών διαφέρουν κατασκευαστικά από τους συμβατικούς λέβητες μόνο κατά ορισμένες λεπτομέρειες. Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες αφορούν διαμορφώσεις του θαλάμου καύσης και των καναλιών συναγωγής, οι οποίες έχουν ως στόχο υψηλότερες θερμοκρασίες των καυσαερίων στις επιφάνειες επαφής με τα τοιχώματα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος συμπύκνωσης υδρατμών. Σε περίπτωση σημαντικής πιθανότητας ανεπιθύμητης συμπύκνωσης, τη λύση αποτελούν υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση. [1,2]

Λέβητες συμπύκνωσης

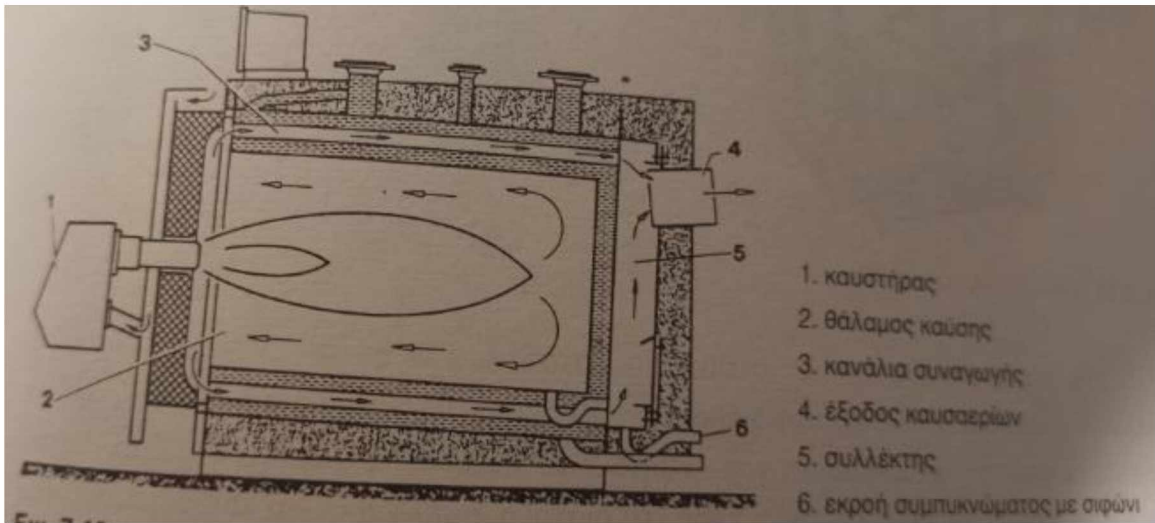
Οι λέβητες συμπύκνωσης αναπτύχθηκαν για την εκμετάλλευση της ενθαλπίας συμπύκνωσης των υδρατμών των καυσαερίων, δηλαδή της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου. Πρόκειται βασικά για λέβητες οι οποίοι καίνε αέρια καύσιμα, υπάρχουν όμως και ορισμένοι λέβητες πετρελαίου. Τα αέρια καύσιμα έχουν το πλεονέκτημα αυξημένης περιεκτικότητας υδρογόνου, ενώ δεν περιέχουν θείο, τα οξείδια του οποίου, τα παραγόμενα κατά την καύση, προκαλούν διάβρωση σε περίπτωση συμπύκνωσης.

Σε ένα λέβητα συμπύκνωσης μπορούμε να εκμεταλλευτούμε περίπου το 50% έως 80% της λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών επιτυγχάνοντας βαθμό απόδοσης μέχρι 107% περίπου.

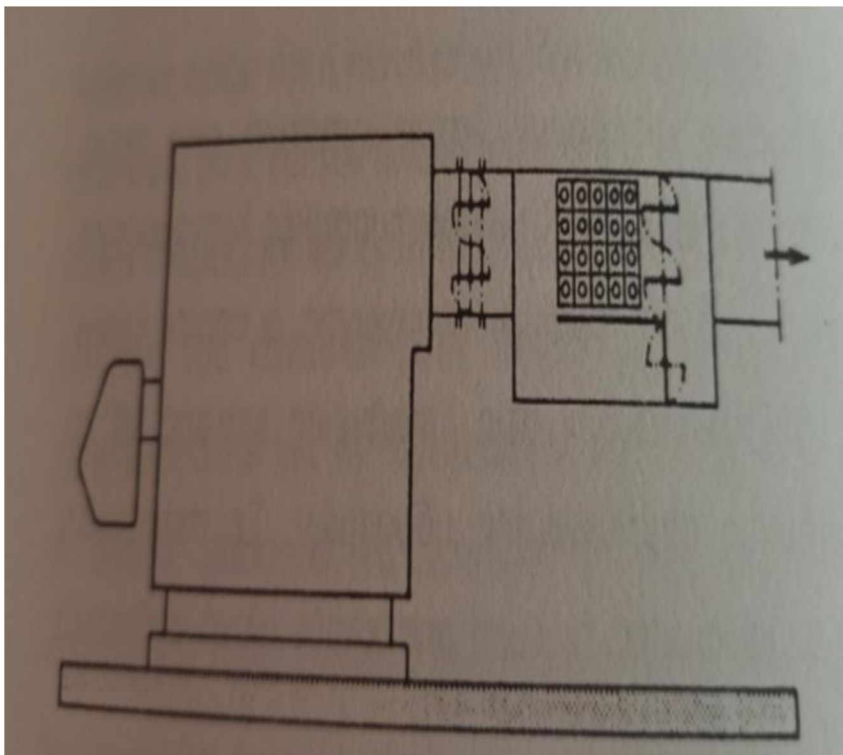
Τα συμπυκνώματα και μάλιστα τα προερχόμενα από την καύση υγρών καυσίμων θα πρέπει να εξουδετερώνονται πριν να αποχετευτούν. Για να χρησιμοποιηθούν λέβητες συμπύκνωσης θα πρέπει η θερμοκρασία του νερού να είναι χαμηλότερη από το σημείο δρόσου, το οποίο είναι περίπου 55°C για το φυσικό αέριο και 48°C για το πετρέλαιο.

Από κατασκευαστική άποψη διακρίνουμε δύο δυνατότητες:

- 1) Συμπύκνωση των υδρατμών μέσα στο ίδιο τον λέβητα (Εικόνα 6), η οποία απαιτεί κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος καυστήρα, λέβητα, συστήματος ρύθμισης και καπνοδόχου, η οποία θα πρέπει να μην είναι ευαίσθητη στην υγρασία. Απαιτεί δηλαδή συνολική κατασκευή ανθεκτική στη διάβρωση ή προστατευμένη έναντι διάβρωσης. Οι επιφάνειες συναγωγής αναγκαστικά θα είναι επαυξημένες σε σύγκριση με τους συμβατικούς λέβητες για να παραληφθεί η επιπλέον θερμότητα. Οι επιφάνειες είναι λείες, για να διευκολύνουν την απορροή του συμπυκνώματος. Ακόμη απαιτείται μια κατάλληλη διάταξη συλλογής και αποχέτευσης του συμπυκνώματος σε κατάλληλη θέση στο λέβητα (Εικόνα 6). Συχνά η κατασκευαστική διαμόρφωση ενός λέβητα συμπύκνωσης είναι διαφορετική από τις συμβατικές διαμορφώσεις των λεβήτων.
- 2) Συμπύκνωση των υδρατμών σε πρόσθετο εναλλάκτη (Εικόνα 7), όπου εδώ έχουμε συμβατική κατασκευή λέβητα και προσθήκη ενός εναλλάκτη από υλικά ανθεκτικά σε διάβρωση. Ο πρόσθετος εναλλάκτης μπορεί είτε να παραδίδεται από τον κατασκευαστή του λέβητα είτε να είναι ξεχωριστός. Ο πρόσθετος εναλλάκτης πρέπει να είναι εφοδιασμένος με διάταξη συλλογής και αποχέτευσης του συμπυκνώματος (Εικόνα 7). **[1,2]**



Εικόνα 6: Λέβητας συμπύκνωσης υδρατμών στον ίδιο το λέβητα [1]



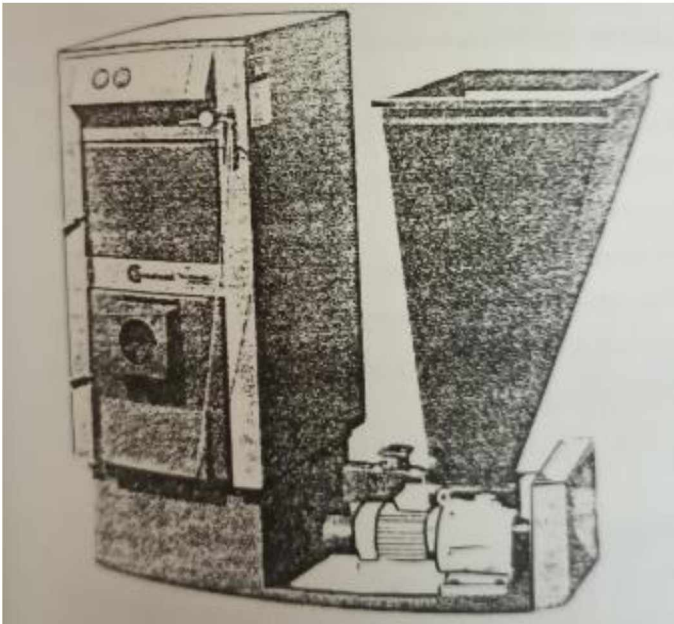
Εικόνα 7: Λέβητας συμπύκνωσης υδρατμών σε πρόσθετο εναλλάκτη. [1]

Λέβητες στερεών καυσίμων

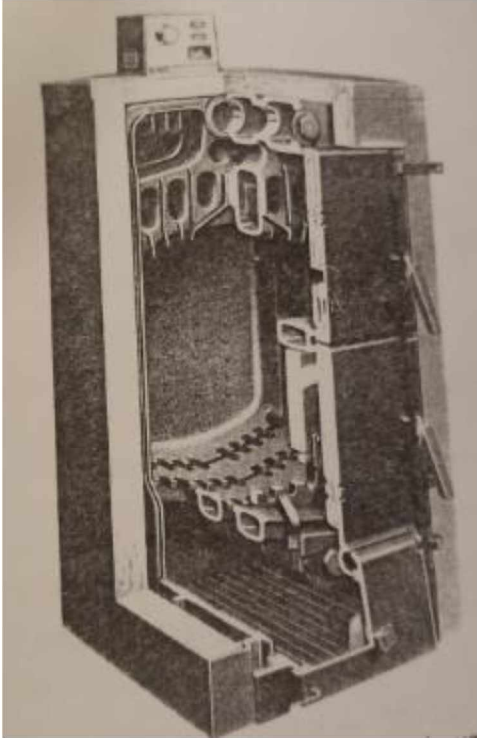
Τα στερεά καύσιμα καίγονται κυρίως σε ειδικούς λέβητες, οι οποίοι συνήθως αποτελούν ιδιοκατασκευές. Υπάρχουν όμως και παραγωγές σε σειρά, ορισμένες από τις οποίες αφορούν λέβητες που μπορούν να καίνε εναλλακτικά πετρέλαιο (Εικόνα 8).

Σε αυτούς τους λέβητες καίγονται ξύλο, ξυλάνθρακας, λιγνίτης καθώς και πυρήνες καρπών. Σε ορισμένες κατασκευές το καύσιμο προσάγεται στο θάλαμο καύσης του λέβητα με τη βοήθεια μηχανισμού (Εικόνα 8), ενώ σε άλλες με την κατασκευαστική διαμόρφωση καταβάλλεται προσπάθεια να μην απαιτείται βοηθητική ενέργεια. Στους τελευταίους λέβητες ο θάλαμος καύσης έχει μεγάλο μέγεθος και αποτελεί συγχρόνως χώρο αποθέματος, ο οποίος γεμίζεται κατά καιρούς (Εικόνα 9).

Για την καύση των στερεών απαιτείται μια σχάρα, μέσα από την οποία παρέχεται ο αναγκαίος αέρας καύσης. Η καύση μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να υποβοηθείται από ανεμιστήρα, οπότε επιτυγχάνεται ακριβέστερη ρύθμιση της ισχύος του λέβητα. Κάτω από τη σχάρα υπάρχει επαρκής χώρος συγκέντρωσης της στάχτης. [1,2]



Εικόνα 8: Λέβητα πετρελαίου. [1]



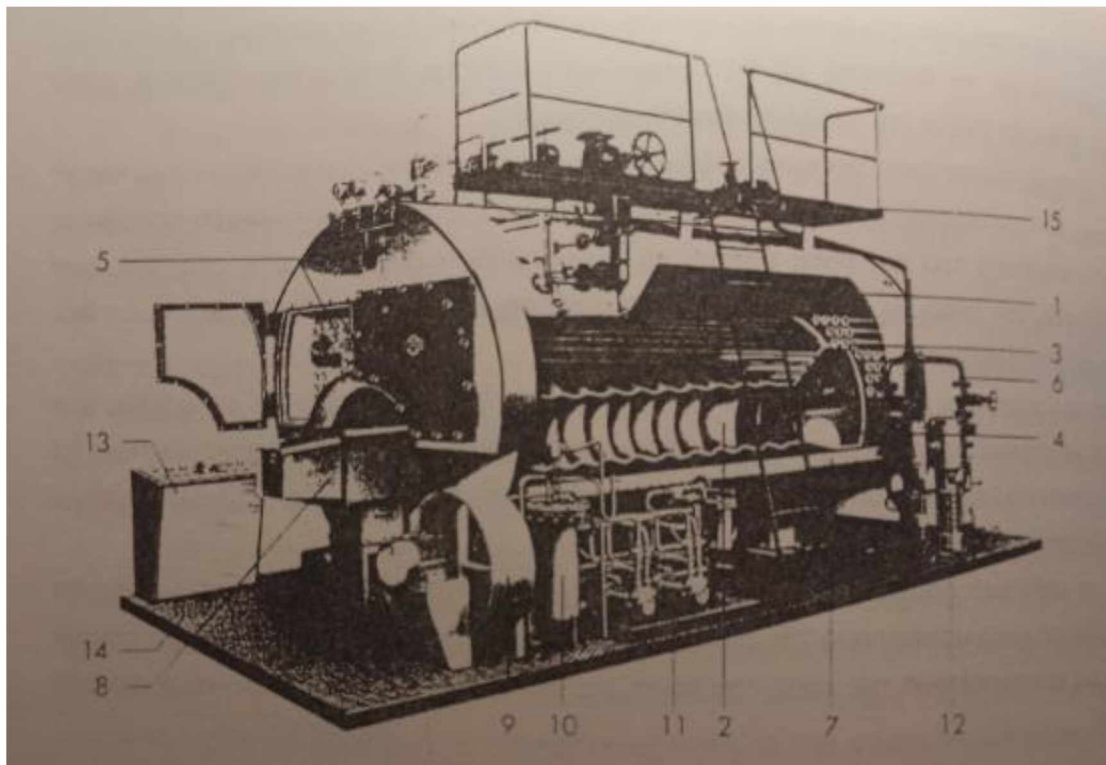
Εικόνα 9: Λέβητας στερεών καυσίμων. [1]

Ατμολέβητες

Σε επαγγελματικές και βιομηχανικές χρήσεις χρησιμοποιείται στη θέρμανση συχνά ως φορέας θερμότητας ο ατμός, ιδίως αν ο ατμός είναι αναγκαίος και για κάποια παραγωγική διεργασία. Αποδίδει τη θερμότητα σε αερόθερμα.

Ο ατμός ως φορέας θερμότητας παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, οφειλόμενα στα μεγάλα ποσά ενθαλπίας τα οποία μεταφέρει και τους υψηλούς συντελεστές συναγωγής κατά τη συμπύκνωση στις συσκευές. Ο ατμός διανέμεται με ειδικά δίκτυα σωληνώσεων, λόγω του ότι στο λέβητα επιστρέφονται συμπυκνώματα.

Η κατασκευαστική διαμόρφωση των ατμολεβήτων εξαρτάται από το μέγεθος τους. Έτσι μικροί ατμολέβητες είναι αεριαυλωτοί (Εικόνα 10). Σ' αυτούς τα καυσαέρια ρέουν μέσα στους σωλήνες, ενώ το θερμαινόμενο και εξατμιζόμενο νερό περιβάλλει το θάλαμο καύσης και τους σωλήνες. Οι μεγάλοι ατμολέβητες κατασκευάζονται υδραυλωτοί. Σ' αυτούς το νερό θερμαίνεται, εξατμίζεται και υπερθερμαίνεται ρέοντας μέσα στους σωλήνες, οι οποίοι σχηματίζουν με τη βοήθεια ελασμάτων τους χώρους καύσης και ροής των καυσαερίων. [1]



- | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1. κέλυφος λέβητα | 6. έξοδος καυσαερίων | 11. τροφοδοσία πετρελαίου |
| 2. θάλαμος καύσης | 7. μόνωση με περίβλημα | 12. αντλίες τροφοδοσίας |
| 3. σωλήνες καυσαερίων | 8. καυστήρας | 13. πίνακας χειρισμού |
| 4. οπίσθιος θάλαμος αντιστροφής | 9. ανεμιστήρας αέρα καύσης | 14. πλαίσιο έδρασης |
| 5. εμπρόσθιος θάλαμος αντιστροφής | 10. προθερμαντήρας πετρελαίου | 15. εξέδρα |

Εικόνα 10: Αεριαυλωτός Ατμολέβητας [1]

Αερολέβητες

Οι αερολέβητες χρησιμοποιούνται σε συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα (Εικόνα 11). Ο θερμός αέρας διανέμεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα στο θερμαινόμενο χώρο είτε άμεσα, είτε έμμεσα μέσω αεραγωγών.

Πλεονεκτήματα της θέρμανσης με θερμό αέρα είναι:

- 1) Μικρός μεταβατικός χρόνος θέρμανσης
- 2) Ανανέωση αέρα (προσαγωγή φρέσκου αέρα)
- 3) Περιορισμένος θόρυβος σε συσκευές αερίου με ατμοσφαιρικό καυστήρα
- 4) Ελάχιστη ηλεκτρική ενέργεια, ιδίως για συσκευές αερίου με ατμοσφαιρικό καυστήρα
- 5) Κανένας κίνδυνος παγώματος
- 6) Πολύ καλός βαθμός απόδοσης
- 7) Μείωση της θερμοκρασιακής στρωμάτωσης στο ελάχιστο με απλά μέτρα
- 8) Δυνατότητα χρήσης πρόσθετων συσκευών προετοιμασίας αέρα, όπως φίλτρα, υγραντήρες, ψύκτες και διατάξεις ανάκτησης.
- 9) Δεν απαιτείται λεβητοστάσιο για ισχύς μέχρι 45 kW
- 10) Δεν απαιτείται κατασκευή κλασικής καπνοδόχου για ορισμένες συσκευές αερίου

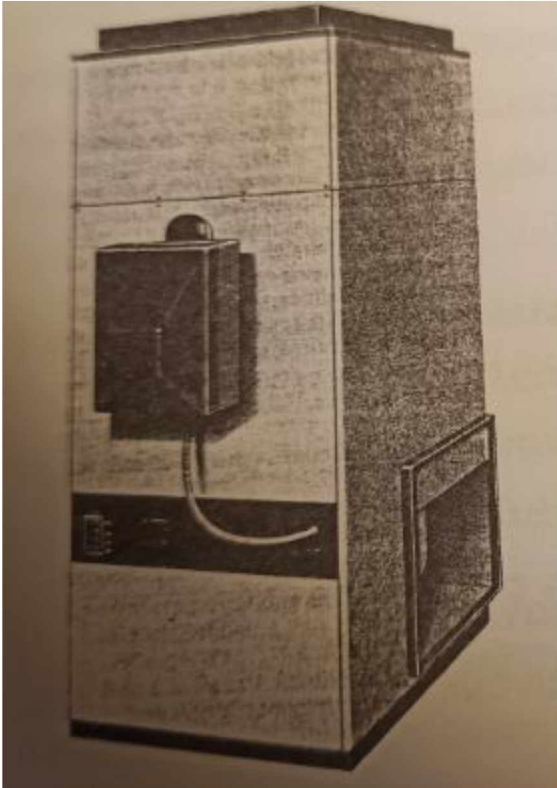
Μειονεκτήματα της θέρμανσης με θερμό αέρα είναι:

- 1) Δεν είναι δυνατή η θέρμανση μιας περιοχής
- 2) Δεν είναι οικονομικό σε μεγάλες υψηλές αίθουσες

Τα συστήματα θέρμανσης με θερμό αέρα χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εργοστασιακούς και επαγγελματικούς χώρους ή σε χώρους εκθέσεων και συγκεντρώσεων και όχι σε κατοικίες, όπου η διάρκεια θέρμανσης είναι μεγάλη και τα συστήματα θέρμανσης με θερμό νερό είναι καταλληλότερα.

Ως καύσιμα στους αερολέβητες χρησιμοποιούνται το ελαφρό πετρέλαιο θέρμανσης και το φυσικό αέριο.

Οι αερολέβητες μπορούν να έχουν καυστήρα με ανεμιστήρα ή ατμοσφαιρικό καυστήρα αερίου, άσχετα αν υπάρχει ανεμιστήρας για τη διανομή του θερμού αέρα. Η κατασκευαστική τους διαμόρφωση εξαρτάται από το είδος του καυστήρα. [1]



Εικόνα 11: Αερολέβητας. [1]

Κεφάλαιο 2: Διάβρωση λεβήτων

2.1 Εισαγωγή

Με τον όρο «διάβρωση» (corrosion) εννοούμε την καταστροφή, φθορά ή και λειτουργική αχρήστευση ενός υλικού εξαιτίας χημικής ή ηλεκτροχημικής ή μηχανικής δράσης του υλικού με το περιβάλλον του. Ο όρος δεν είναι μονοσήμαντος και αναφέρεται τόσο στο φαινόμενο της δράσης όσο και στο αποτέλεσμα της.

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό. Κατά τη διάβρωση, το μεταλλικό υλικό υπό την επίδραση του περιβάλλοντος χάνει ηλεκτρόνια, τα οποία δεσμεύονται από το οξυγόνο του περιβάλλοντος. Υπάρχει δηλαδή αύξηση του σθένους του μετάλλου κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μορφών διάβρωσης είναι η επιφανειακή αλλοίωση των υλικών.

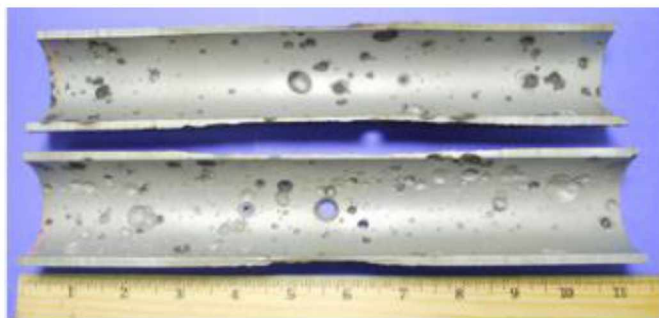
Τα προϊόντα της διάβρωσης από χημική άποψη είναι οξείδια, υδροξείδια ή άλατα και εξαρτώνται από τη χημική σύσταση κυρίως του υλικού αλλά και του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Οι επιπτώσεις της διάβρωσης από οικονομική άποψη είναι σημαντικές. Υπολογίζεται ότι το 1/4 περίπου της παγκόσμιας παραγωγής σιδήρου και χάλυβα καταστρέφεται από τη διάβρωση. Η τεράστια αυτή απώλεια θα μπορούσε να αποφευχθεί σε ποσοστό 25-30% με την αξιοποίηση των υπαρχουσών επιστημονικών γνώσεων προστασίας. [3]

2.2 Είδη διάβρωσης

Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting corrosion)

Πρόκειται για τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης ή για εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας σε βάθος (Εικόνα 12) . Οι αιτίες που μπορούν να οδηγήσουν γαλβανικά στοιχεία σε διάβρωση με βελονισμούς είναι αρκετές, όπως η διαφορά συγκέντρωσης οξυγόνου, θερμοκρασίας, ταχύτητας ροής και γενικότερα, κάθε διαφορά στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η συγκεκριμένη διάβρωση επιταχύνεται με την ύπαρξη στάσιμων νερών με χαμηλή περιεκτικότητα οξυγόνου. Τα περισσότερο ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος της διάβρωσης, είναι αυτά που προστατεύονται με λεπτά στρώματα οξειδίων, όπως ο χαλκός, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το μαγνήσιο. Μπορεί όμως να εμφανιστεί και στο κοινό χάλυβα, το σίδηρο, το μόλυβδο και πολλά άλλα μέταλλα. [3,4]



Εικόνα 12: Pitting corrosion σε σωλήνα λέβητα. [3]

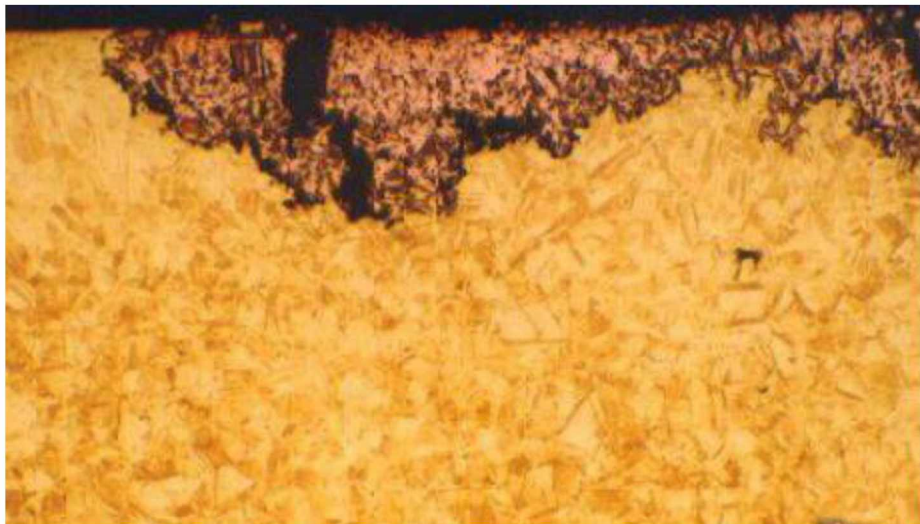
Διάβρωση χαραγής:

Μια σχισμή ή μια προφυλαγμένη περιοχή μεταλλικής επιφάνειας μπορεί να αποτελέσει συχνά, αιτία έντονης εντοπισμένης διάβρωσης, εξαιτίας εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή. Ο βασικός μηχανισμός είναι ουσιαστικά ο ίδιος όπως στη γαλβανική διάβρωση, αλλά στην περίπτωση της διάβρωσης σε σχισμές, η κατευθυντήρια δύναμη είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των περιοχών του ίδιου του μετάλλου που εκτίθεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και όχι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που εκτίθενται στο ίδιο περιβάλλον. Η αντίσταση του ηλεκτρολύτη στην ροή των

ιόντων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον περιορισμό της συγκεκριμένης διάβρωσης. Αυτή η μορφή διάβρωσης είναι συχνά η δυσκολότερη στο να αποφευχθεί. **[3,5]**

Επιλεκτική προσβολή

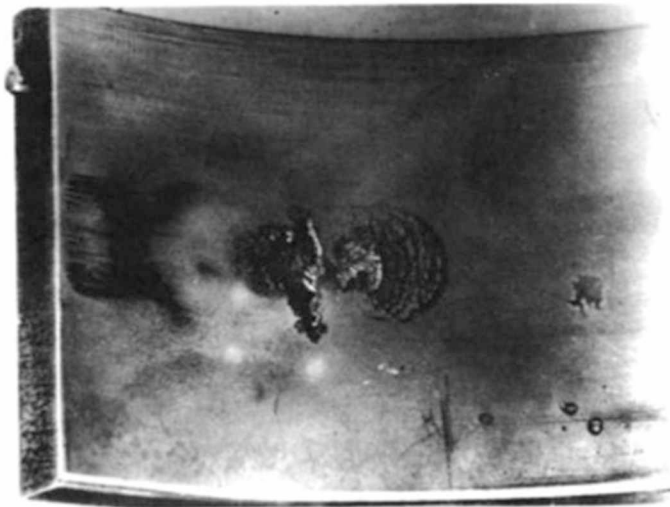
Επιλεκτική διάβρωση είναι η απομάκρυνση ενός μόνο στοιχείου από ετερογενές στερεό κράμα (Εικόνα 13). Εμφανίζεται μόνο σε κράματα όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα δημιουργούν στερεό διάλυμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία, διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο, ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή, αλλά με μεγάλη μείωση της μηχανικής του αντοχής. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση τους και αυξάνει με τη συγκέντρωση του ευγενέστερου συστατικού. **[3]**



Εικόνα 13: Επιλεκτική διάβρωση. **[3]**

Σπηλαιώδης διάβρωση

Σπηλαιώδη ονομάζεται το φαινόμενο, κατά το οποίο, σε ένα ή περισσότερα σημεία ενός περιβρεχόμενου σώματος, η τοπική στατική πίεση είναι μικρότερη από την πίεση κορεσμού του υγρού στη θερμοκρασία που έχει αυτό και έτσι παρουσιάζεται ατμοποίηση του υγρού, και δημιουργούνται φυσαλίδες σπηλαιώσης (Εικόνα 14). Οι φυσαλίδες αυτές, μόλις μεταφερθούν σε κάποιο άλλο σημείο υψηλότερης πίεσης, υγροποιούνται πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Έτσι, όταν καταρρέουν, δημιουργούνται μεγάλες πιέσεις, που καταπονούν μηχανικά και φθείρουν το στερεό σώμα, ανοίγοντας μικρούς κρατήρες και δημιουργώντας εσοχές και σπήλαια από την τοπική εξάχνωση του υλικού. [4]



Εικόνα 14: Σπηλαιώδης διάβρωση σε λέβητα. [4]

2.3 Φαινόμενα διάβρωσης σε λέβητες

Το βασικό είδος διάβρωσης στους λέβητες αφορά την αντίδραση του οξυγόνου με το μέταλλο, ωστόσο και άλλοι παράγοντες όπως οι τάσεις, οι όξινες συνθήκες και κάποια συγκεκριμένα χημικά διαβρωτικά στοιχεία, μπορεί να παίζουν σημαντικό ρόλο και να παράγουν διαφορετικά είδη διάβρωσης. Η διάβρωση μπορεί να συμβεί στο σύστημα του νερού τροφοδοσίας διότι εκεί το νερό έχει χαμηλό pH και λόγω της παρουσίας διαλυμένου οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα.

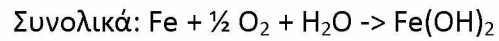
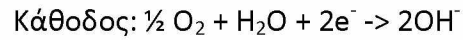
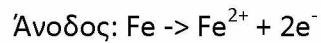
Διάβρωση στο λέβητα συμβαίνει γενικά όταν η αλκαλικότητα του νερού του είναι χαμηλή ή όταν το μέταλλο εκτίθεται σε νερό που φέρει οξυγόνου κατά την διάρκεια της διαδικασίας ή και σε περίοδο αδράνειας. Στο σύστημα ατμού και συμπυκνώματος, η διάβρωση συμβαίνει λόγω του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα. Η αμμωνία και τα αέρια που περιέχουν θείο μπορεί να επιδεινώσουν την διάβρωση στα κράματα χάλυβα στο σύστημα. Η διάβρωση προκαλείται από το συνδυασμό της ροής του στρώματος του οξειδίου και από τη συνεχή οξείδωση από το μεταφερόμενο οξυγόνο.

Επίθεση οξυγόνου (Oxygen attack)

Χωρίς κατάλληλη μηχανική ή χημική απαερίωση, το οξυγόνο στο νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στο λέβητα. Το περισσότερο απομακρύνεται με τον ατμό, το υπόλοιπο όμως μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στο μέταλλο του λέβητα. Το οξυγόνο στο νερό προκαλεί pitting το οποίο είναι πολύ σοβαρό. Το νερό που περιέχει αμμωνία, ιδιαίτερα με την παρουσία οξυγόνου επιτίθεται στον χάλυβα και στα κράματα του χάλυβα. Έτσι η διάβρωση που δημιουργείται οδηγεί σε επικαθίσεις στις επιφάνειες του λέβητα όπου γίνεται η μεταφορά θερμότητας και μειώνει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του λέβητα (Εικόνα 15).

Το οξυγόνο είναι πολύ διαβρωτικό όταν βρίσκεται σε ζεστό νερό. Ακόμα και μικρές συγκεντρώσεις μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα: τα οξείδια του σιδήρου που παράγονται από την διάβρωση, δημιουργούν επικαθίσεις σιδήρου στο λέβητα. Η διάβρωση οξυγόνου μπορεί να είναι τοπική είναι να επεκτείνεται και

σε μεγαλύτερη περιοχή. Η διάβρωση οξυγόνου είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία, η οποία περιγράφεται από τις παρακάτω αντιδράσεις:



Σε αυτή την αντίδραση η αύξηση της θερμοκρασίας παρέχει αρκετή επιπλέον ενέργεια για να επιταχύνει τις αντιδράσεις στις μεταλλικές επιφάνειες, οδηγώντας σε ταχεία και δριμεία διάβρωση.

Το αποδεκτό επίπεδο διαλυμένου οξυγόνου για οποιοδήποτε σύστημα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, το pH, ο ρυθμός ροής, το περιεχόμενο διαλυμένων στερεών και την μεταλλουργία και την φυσική κατάσταση του συστήματος. Γενικά, η οριακή τιμή του οξυγόνου στην διορθωτική ποσότητα του νερού είναι 0.1 mg/kg. [8, 9, 10, 14]



Εικόνα 15: Επίθεση οξυγόνου σε λέβητα. [14]

Επίθεση διοξειδίου του άνθρακα (carbon dioxide attack)

Το CO₂ υπάρχει σε υδατικά διαλύματα ως ελεύθερο CO₂ και σε μορφή ένωσης ανθρακικού άλατος με διττανθρακικά ιόντα. Η διάβρωση είναι το κύριο αποτέλεσμα του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Το αέριο θα διαλυθεί στο νερό, παράγοντας ένα διαβρωτικό ανθρακικό οξύ ως εξής: $H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$ (Εικόνα 16).

Το χαμηλό pH που προκύπτει ως αποτέλεσμα από αυτήν την αντίδραση ενισχύει επίσης το διαβρωτικό αποτέλεσμα του οξυγόνου.

Στα συστήματα του λέβητα, η διάβρωση από το CO₂, εμφανίζεται κυρίως στα συστήματα συμπύκνωσης. Επειδή η απαέρωση του νερού τροφοδοσίας συνήθως απομακρύνει το CO₂ από το νερό τροφοδοσίας του λέβητα, η παρουσία του αερίου στο συμπύκνωμα είναι εξαιτίας της αποσύνθεσης του ανθρακικού και διττανθρακικού άλατος. Προσεγγιστικά έχει υπολογιστεί ότι το νερό τροφοδοσίας με συνολική αλκαλικότητα 100 mg/l ως CaCO₃ μπορεί να παράγει ένα επίπεδο CO₂ κοντά στα 79 mg/l στον ατμό (η αλκαλικότητα πολλαπλασιάζεται με ένα παράγοντα της τάξης του 0.79). Ένα τόσο υψηλό επίπεδο CO₂ μπορεί να δημιουργήσει ένα πολύ διαβρωτικό συμπύκνωμα. [8, 9, 10, 15]



Εικόνα 16: Επίθεση διοξειδίου του άνθρακα σε λέβητα. [15]

Όξινη διάβρωση (Acidic corrosion)

Το νερό τροφοδοσίας μπορεί να γίνει όξινο από μόλυνση του συστήματος (μόλυνση του συμπυκνώματος ή μόλυνση του νερού ψύξης από τους συμπυκνωτές) και μπορεί να προκαλέσει όξινη επίθεση στις μεταλλικές επιφάνειες του συστήματος του λέβητα (Εικόνα 17).

Όξινη διάβρωση μπορεί να δημιουργηθεί και από την διαδικασία του χημικού καθαρισμού στο σύστημα (υπερθέρμανση του καθαριστικού διαλύματος, αν εκτίθεται το μέταλλο υπερβολικά στον παράγοντα καθαρισμού, υψηλή συγκέντρωση του παράγοντα καθαρισμού)

Στο λέβητα και στο σύστημα του νερού τροφοδοσίας, η όξινη διάβρωση μπορεί να πάρει την μορφή της γενικής αραίωσης ή μπορεί να εντοπιστεί σε περιοχές υψηλών τάσεων.

Σε κάποιες περιπτώσεις, για να συμβεί όξινη διάβρωση, θα πρέπει η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα του λέβητα να είναι κάτω από το όξινο σημείο δρόσου. Επιπλέον κατά την καύση το S μετατρέπεται σε SO_2 . Ένα μέρος του SO_2 μετατρέπεται σε SO_3 (αυτή η μετατροπή καταλύεται από V_2O_5 και από Fe_2O_3). Το SO_3 αντιδρά με τους υδρατμούς στο καυσαέριο και σχηματίζει θειικό οξύ (H_2SO_4), αν η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα του λέβητα είναι χαμηλότερη από το όξινο σημείο δρόσου. Στη όξινη διάβρωση, ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα. Η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του νερού εισόδου και όχι από τη θερμοκρασία του αερίου του λέβητα. **[8, 9, 10, 16]**



Εικόνα 17: Acidic corrosion στο σωλήνα του λέβητα. [16]

Γαλβανική διάβρωση

Η γαλβανική διάβρωση συμβαίνει όταν ένα μέταλλο ή κράμα έρχεται σε επαφή με ένα άλλο ανόμοιο μέταλλο ή κράμα σε ένα αγώγιμο περιβάλλον (Εικόνα 18). Σε έναν λέβητα αυτό θα συμβεί όταν θα έρθουν σε επαφή ανόμοια μέταλλα, όπως ο χάλυβας και ο χαλκός. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να συμβεί και όταν αναπτύσσονται επικαθίσεις στο σύστημα. Οτιδήποτε δηλαδή μπορεί να οδηγήσει σε διαφορά δυναμικού σε δύο χωριστές επιφάνειες ανόμοιων μετάλλων μπορεί να οδηγήσει σε γαλβανική διάβρωση.

Για να ξεκινήσει γαλβανική διάβρωση θα πρέπει:

- 1) Τα μέταλλα πρέπει να είναι μακριά στη γαλβανική σειρά.
- 2) Τα μέταλλα πρέπει να είναι σε ηλεκτρική επαφή.
- 3) Η σύνδεση μετάλλων πρέπει να γεφυρωθεί από έναν ηλεκτρολύτη.

Οπές στους σωλήνες του λέβητα (pitting) δημιουργούνται από τις επικαθίσεις του χαλκού. Διαλυμένος χαλκός μπορεί να βρεθεί σε πρόσφατα καθαρισμένες επιφάνειες και να δημιουργήσει ανοδική διάβρωση σε μορφή οπών.

Η διαδικασία είναι η εξής:

Χρησιμοποιώντας τον HCl (υδροχλωρικό οξύ) ως καθαριστικό διαλυτικό μέσο, ο Fe_3O_4 (μαγνητίτης) διαλύεται και αποφέρει μια όξινη εναπόθεση που περιέχει FeCl_2 (χλωριούχο σίδηρο) δύο και τρία τα οποία είναι πολύ διαβρωτικά για το χάλυβα και το χαλκό: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + 2\text{FeCl}_3 + 4\text{H}_2\text{O}$

Ο μεταλλικός ή στοιχειακός χαλκός στις επικαθήσεις του λέβητα διαλύεται με την εξής διαδικασία: $\text{FeCl}_3 + \text{Cu} \rightarrow \text{CuCl} + \text{FeCl}_2$

Όταν βρεθεί ο CuCl (χλωριούχος χαλκός) στην διαδικασία, επανακατατίθεται ως μεταλλικός χαλκός με την εξής διαδικασία: $2\text{CuCl} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeCl}_2 + 2\text{Cu}$

Έτσι το HCl μπορεί να οδηγήσει σε γαλβανική διάβρωση. Ένας παράγοντας συμπλοκοποίησης προστίθεται για να εμποδίσει τον χαλκό να επανακατατεθεί ως μεταλλικός στην επιφάνεια του χαλκού. Η διαδικασία είναι η εξής: $\text{FeCl}_3 + \text{Cu} + \text{complexing agent} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{CuCl}$

Αυτό μπορεί να γίνει ως ξεχωριστή διαδικασία ή και κατά την διάρκεια του καθαρισμού με οξύ. **[6, 8, 9, 10, 17]**



Εικόνα 18: Γαλβανική διάβρωση σε λέβητα. **[17]**

Καυστική διάβρωση (caustic corrosion)

Η συγκέντρωση του καυστικού υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) μπορεί να συμβεί ως αποτέλεσμα του steam blanketing (το οποίο επιτρέπει τα άλατα να συγκεντρωθούν στην μεταλλική επιφάνεια του λέβητα) ή με την συγκέντρωση της καύσης κάτω από τις επικαθίσεις πόρων στην επιφάνεια του σωλήνα. Έτσι, καυστική διάβρωση συμβαίνει όταν το υδροξείδιο του νατρίου συγκεντρώνεται και διαλύει το προστατευτικό στρώμα μαγνητίτη (Fe_3O_4) προκαλώντας απώλεια του μετάλλου βάσης και τελικά αστοχία (Εικόνα 19). Για να συμβεί αυτή η αστοχία του λέβητα, πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- 1) Το μέταλλο πρέπει να υφίστανται τάσεις
- 2) Το νερό του λέβητα πρέπει να περιέχει υδροξείδιο του νατρίου
- 3) Τουλάχιστον ένα ίχνος πυριτίου πρέπει να υπάρχει στο νερό του λέβητα

Το steam blanketing συμβαίνει όταν δημιουργείται ένα στρώμα ατμού μεταξύ του νερού του λέβητα και του τοίχου του σωλήνα. Σε αυτή την κατάσταση, δεν φτάνει, όσο νερό χρειάζεται, την επιφάνεια του σωλήνα για αποδοτική μετάδοση θερμότητας. Το νερό το οποίο φτάνει τον τοίχο του λέβητα, ο οποίος υπερθερμαίνεται, εξατμίζεται γρήγορα, αφήνοντας πίσω συγκεντρωμένο NaOH, το οποίο είναι διαβρωτικό για το χάλυβα.

Τα συστήματα του νερού τροφοδοσίας του λέβητα τα οποία χρησιμοποιούν απιονισμένη ή συμπυκνωμένη διορθωτική ποσότητα νερού ή καθαρό συμπύκνωμα μπορεί να προστατευτούν από την καυστική διάβρωση μέσα από ένα συντονισμένο έλεγχο φωσφορικού άλατος/pH. Το φωσφορικό άλας ρυθμίζει το νερό του λέβητα, μειώνοντας την πιθανότητα μεγάλων αλλαγών του pH εξαιτίας της εξέλιξης των υψηλών συγκεντρώσεων υδροξειδίου του νατρίου. Υπερβολικό NaOH αντιδρά με το Na_2HPO_4 (φωσφορικό νάτριο δύο) και σχηματίζει Na_3PO_4 (φωσφορικό νάτριο τρία), όπως φαίνεται παρακάτω: $Na_2HPO_4 + NaOH \rightarrow Na_3PO_4 + H_2O$

Έτσι εμποδίζεται η δημιουργία NaOH κάτω από τις επικαθίσεις ή μέσα σε μια ρωγμή όπου υπάρχει διαρροή. [8, 9, 10, 12]



Εικόνα 19: Caustic corrosion στο σωλήνα του λέβητα. [12]

Stress corrosion cracking

Το SCC είναι ένας τύπος αστοχίας, ο οποίος καθορίζεται ως θραύση ενός δομικού μέρους κάτω από ένα συνδυασμό αποτελεσμάτων, τα οποία είναι ο στατικός εφελκυσμός και το διαβρωτικό περιβάλλον (Εικόνα 20). Σε περιστάσεις όπου είτε ο εφελκυσμός, είτε το διαβρωτικό περιβάλλον δεν υφίστανται, δεν μπορεί να συμβεί αυτό το είδος θραύσης.

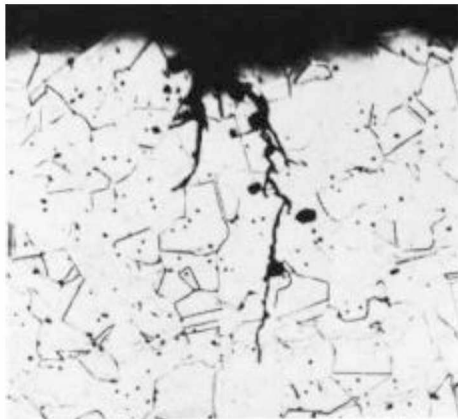
Το SCC λαμβάνει χώρα στο λέβητα και στους σωλήνες, στις σωληνώσεις, στις βαλβίδες, στις τουρμπίνες και στις επενδύσεις του υπερθεμαντήρα και σε άλλα μέρη, και ιδιαίτερα εκεί όπου το νερό τροφοδοσίας και το συμπύκνωμα μπορούν να συλλεχθούν. Η συγκέντρωση του NaOH σε τμήματα των συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν συμβατικές ή συντονισμένες μεθόδους φωσφορικού άλατος για την επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας, είναι ο πιο συχνή αιτία SCC στον εξοπλισμό του ατμού. Υδαρή διαλύματα που περιέχουν ιόντα χλωρίου, μπορούν να προκαλέσουν SCC στους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, ενώ τα διαλύματα που περιέχουν αμμωνία μπορούν να προκαλέσουν SCC στα κράματα χαλκού. Μπορεί να συμβεί και τάση οξείδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι περισσότερες ρωγμές που συμβαίνουν από SCC είναι στενές και δεν φαίνονται εύκολα με γυμνό μάτι. Για την ακρίβεια είναι δύσκολο να εντοπιστούν σε κλιμακωτές επιφάνειες. Οι μέθοδος των διεισδυτικών υγρών είναι πολύ χρήσιμη

για να εντοπιστούν αυτές οι ρωγμές, αλλά μπορεί και να μην τις αποκαλύψει όλες. Επειδή οι ουσίες που βρίσκονται στα διεισδυτικά υγρά είναι παρόμοιες με αυτές που προκαλούν SCC, η χρήση των διεισδυτικών για να εντοπιστεί η ρωγμή μπορεί να εμποδίσει την αναγνώριση των επικαθίσεων στην επιφάνεια θραύσης. Έτσι, τα διεισδυτικά υγρά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται χωρίς δέουσα προσοχή των ανεπιθύμητων παρενεργειών της συνολικής ανάλυσης.

Η εξέταση με μικροσκόπιο είναι απαραίτητη για να επιβεβαιωθεί ότι ο μηχανισμός αστοχίας είναι SCC. Οι ρωγμές του SCC μπορεί να είναι εγκάρσιες ή διαμήκης, ανάλογα με το κράμα και το περιβάλλον, αλλά συνήθως έχουν πολλές διακλαδώσεις, οι οποίες αυξάνονται όσο η ρωγμή διαδίδεται.

Αν και οι διαδικασίες συντήρησης μπορεί να παράγουν στατική τάση, η οποία υπερβαίνει το όριο του SCC, οι παραμένουσες τάσεις είναι συνήθως υπεύθυνες για αυτού του είδους την αστοχία. Οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να προέλθουν από μεταλλουργικούς μετασχηματισμούς ή από άνιση θέρμανση ή ψύξη, ιδιαίτερα στις συγκολλήσεις. Οι θερμές ή ψυχρές διαδικασίες σχηματισμού μπορούν να προκαλέσουν παραμένουσες τάσεις μεγάλου μεγέθους, όπως μπορούν και οι διαδικασίες σύνδεσης, όπως είναι το πρεσάρισμα, το βίδωμα ή το κάρφωμα. Κάποια τυχαία ζημιά, όπως η κάμψη ή η σφυρηλάτηση κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης, είναι μια λιγότερη πιθανή πηγή παραμενουσών τάσεων. [8]



Εικόνα 20: SCC στο σωλήνα του λέβητα. [8]

Διάβρωση κάτω από τις επικαθίσεις στερεών

Τα στερεά μέσα στο νερό του λέβητα μπορούν να οδηγήσουν σε διάβρωση. Για παράδειγμα τα άλατα Ca και Mg, το Si, το Mn και ο Fe μπορούν να δημιουργήσουν επικαθίσεις στο λέβητα. Όταν έρθουν σε επαφή αυτά τα κοιτάσματα με το μέταλλο του λέβητα, παγιδεύουν τα θειικά άλατα από κάτω τους. Αυτά τα θειικά άλατα δημιουργούν οπές και διάβρωση κάτω από τις επικαθίσεις, οι οποίες δεν θα γίνουν φανερές αν δεν απομακρυνθούν οι επικαθίσεις (Εικόνα 21).

Το Na μπορεί να οδηγήσει και σε άλλα προβλήματα διάβρωσης στο σύστημα του λέβητα. Το Na_2CO_3 μπορεί να μετατραπεί σε NaOH μέσω της υδρόλυσης. Το υδροξείδιο του νατρίου αντιδρά με το σίδηρο του λέβητα, τον διαλύει και παράγει Na_2FeO_4 (φερρατικό νάτριο). Αυτό το προϊόν υφίσταται ξανά υδρόλυση και μετατρέπεται ξανά σε NaOH συνεχίζοντας τη διαδικασία. Οι αρθρώσεις και οι καμπυλώσεις είναι επιρρεπής σε διάβρωση από το νάτριο στο νερό. [8, 11]



Εικόνα 21: Διάβρωση κάτω από επικαθίσεις στερεών σε λέβητα. [11]

Διάβρωση τέφρας γαιάνθρακα (coal ash corrosion)

Κατά την διάρκεια της καύσης του κάρβουνου, τα μεταλλικά του στοιχεία του εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και στα αποτελέσματα παραγόμενων καυσαερίων, τα οποία είναι το CO και το H₂. Οι ενώσεις Al, Fe, K, Na και S αποσυντίθενται μερικώς, απελευθερώνοντας ενώσεις πτητικών αλκαλίων και οξείδια του θείου (κυρίως SO₂ και κάποιες μικρές ποσότητες SO₃). Το υπολειπόμενο τμήμα των ενώσεων αντιδρά και σχηματίζει υαλώδη σωματίδια, τα οποία είναι γνωστά ως ιπτάμενη τέφρα.

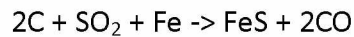
Η coal ash corrosion ξεκινάει με την κατάθεση της ιπτάμενης τέφρας σε επιφάνειες, οι οποίες λειτουργούν κυρίως σε θερμοκρασίες από 540 °C μέχρι 705 °C, και αυτές οι επιφάνειες είναι κυρίως των σωλήνων του υπερθερμαντήρα και του αναθερμαντήρα (Εικόνα 22). Μετά από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, τα πτητικά αλκάλια και τα οξείδια του θείου συμπυκνώνονται πάνω στην ιπτάμενη τέφρα και αντιδρούν με αυτήν σχηματίζοντας πολύπλοκα αλκάλια θείου, όπως είναι το KAl(SO₄)₂ και το Na₃Fe(SO₄)₃, στο όριο μεταξύ του μετάλλου και των επικαθίσεων. Οι αντιδράσεις που παράγουν τα αλκάλια του θείου θεωρείται πως εξαρτώνται ως ένα βαθμό από την καταλυτική οξείδωση του SO₂ και του SO₃, στα εξωτερικά στρώματα των επικαθίσεων της ιπτάμενης τέφρας. Η ακριβής χημική αντίδραση μεταξύ του μετάλλου του σωλήνα και των επικαθίσεων της τέφρας, η οποία περιλαμβάνει και τα αλκάλια του θειικού σιδήρου δεν μπορεί να οριστεί καλά. Αλλά από όλες τις μελέτες, η τέφρα και τα προϊόντα διάβρωσης περιέχουν άνθρακα και σουλφίδια. Τα σουλφίδια δεν μπορούν να υπάρξουν σε πολύ οξειδωτικό περιβάλλον. Έτσι, τουλάχιστον στην επιφάνεια του σωλήνα δεν υπάρχει τόσο μεγάλο πρόβλημα.

Τα χαρακτηριστικά της coal ash corrosion είναι τα εξής:

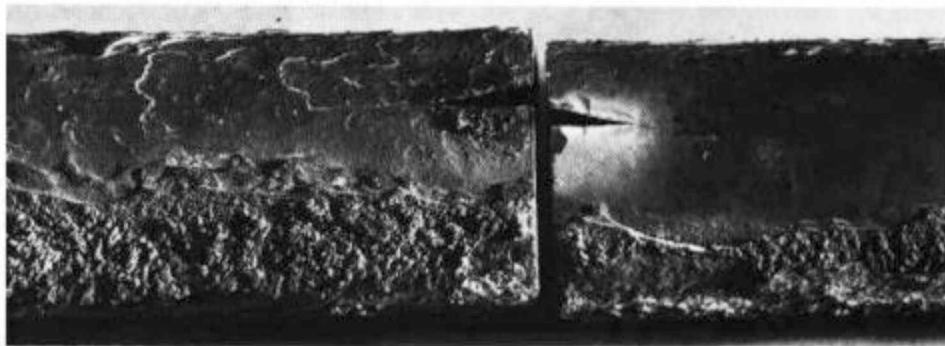
- 1) Ότι συμβαίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ του σημείου τήξης του θειικού μείγματος και του ορίου της θερμικής σταθερότητας για το μείγμα.
- 2) Ο ρυθμός διάβρωσης είναι μια μη γραμμική συνάρτηση της θερμοκρασίας του μετάλλου, η οποία έχει μέγιστο στις θερμοκρασίες μεταξύ των 675 °C και των 730 °C.
- 3) Αυτή η διάβρωση σχεδόν πάντα σχετίζεται με συντηγμένες ή υαλώδης επικαθίσεις.

- 4) Οι επικαθίσεις αποτελούνται από τρία διακριτά στρώματα. Το πορώδη, δηλαδή το εξωτερικό στρώμα, το οποίο αποτελεί το κύριο μέρος των επικαθίσεων και αποτελείται κυρίως από τις ίδιες ενώσεις με την ιπτάμενη τέφρα. Το εσωτερικό στρώμα, το οποίο είναι λεπτό και η υαλώδης ουσία του αποτελείται από τα προϊόντα διάβρωσης του σιδήρου. Το μεσαίο στρώμα, το οποίο λέγεται και άσπρο στρώμα, έχει άσπρο ή κίτρινο χρώμα, είναι συνήθως συντηγμένο, πολύ διαλυτό στο νερό και παράγει ένα διάλυμα οξέος.
- 5) Η συγκεκριμένη διάβρωση μπορεί να συμβεί με οποιονδήποτε ασφαλτούχο άνθρακα, αλλά συνήθως συμβαίνει όταν το κάρβουνο περιέχει περισσότερο από 3.5% S και 0.25% Cl.
- 6) Κανένα από τα συνηθισμένα υλικά των σωλήνων δεν είναι ανθεκτικό σε αυτό το είδος διάβρωσης, αν και ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας 18-8 διαβρώνεται σε μικρότερους ρυθμούς από τα υπόλοιπα υλικά.

Επειδή το στρώμα δίπλα στο σωλήνα περιέχει σουλφίδια, η πιθανή αντίδραση της coal ash corrosion είναι:



Είναι επίσης πιθανό η coal ash corrosion των υπερθερμαντήρων και των αναθερμαντήρων να μειωθεί με καλύτερη και πιο πλήρη καύση του κάρβουνου. Επειδή η διάβρωση συμβαίνει με την παρουσία του άνθρακα, η απομάκρυνση του άνθρακα θα μειώσει το πρόβλημα. [7, 8]



Εικόνα 22: Coal ash corrosion στο σωλήνα του υπερθερμαντήρα του λέβητα. [8]

Διάβρωση τέφρας λαδιού (oil ash corrosion)

Κατά τη διάρκεια της καύσης καυσίμων που περιέχουν έλαια, οργανικές ενώσεις (περιλαμβάνοντας και αυτές που περιέχουν V και S) αποσυντίθενται και αντιδρούν με το O_2 . Αυτά τα πτητικά οξείδια μεταφέρονται στα καυσαέρια. Το Na το οποίο είναι παρών στο λάδι ως χλωρίδιο αντιδρά με τα οξείδια του θείου (SO_2 και SO_3) και σχηματίζει θειικά άλατα. Αρχικά το V_2O_5 συμπυκνώνεται ως υγρή σκουριά στους τοίχους του κάμινου, στους σωλήνες του λέβητα και στους σωλήνες του υπερθερμαντήρα και για την ακρίβεια οπουδήποτε υπάρχει υψηλή θερμοκρασία στο λέβητα. Τα οξείδια του νατρίου (NaO) αντιδρούν με το V_2O_5 και σχηματίζουν περίπλοκες ενώσεις, ιδιαίτερα βαναδικά άλατα ($nNa_2O V_2O_5$) και βαναδυλικά βαναδικά άλατα ($nNa_2O V_2O_4 V_2O_5$). Αυτές οι πολύπλοκες ενώσεις, κάποιες από τις οποίες έχουν σημείο τήξης $249^\circ C$, μολύνουν και διαβρώνουν τις επιφάνειες των σωλήνων (Εικόνα 23) .

Σκουριά ισορροπημένου πάχους (3 - 6.4 mm) έχει αναπτυχθεί σε πειραματικές καμίνους μέσα σε ένα χρονικό διάστημα 100 h. Η σκουριά προσβάλλει του σωλήνες, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της σκουριάς, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει το ρυθμό της διάβρωσης και προάγει παραπάνω επικαθίσεις τέφρας. Επικαθίσεις σκουριάς μεγαλύτερου πάχους οδηγούν στην αύξηση της διάβρωσης, επειδή οι θερμοκρασίες της σκουριάς είναι υψηλότερες και έτσι αυξάνεται ο αριθμός των προϊόντων διάβρωσης που αντιδρούν με τα υλικά του σωλήνα. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες κάνουν την σκουριά πιο ρευστή ώστε να μπορεί να ρέει πιο πρόθυμα σε κατακόρυφες επιφάνειες. Συνεπώς, η σκουριά γενικά συγκεντρώνεται σε γωνίες και σε οριζόντιες επιφάνειες, όπως είναι οι βάσεις των τοιχωμάτων του νερού και στις στηρίξεις που βρίσκονται γύρω από το σωλήνα του υπερθερμαντήρα.

Η διάβρωση oil ash επηρεάζει όλα τα δομικά κράματα. Ακόμα και τα υλικά που είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση, ακόμα και τα κράματα με καλούπι 60Cr-40Ni και 50Cr-50Ni, τα οποία χρησιμοποιούνται μερικές φορές για τις στηρίξεις των σωλήνων με τον υπερθερμαντήρα, δεν είναι ανθεκτικά. Επιπλέον, τα μη μεταλλικά πυρίμαχα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις επενδύσεις των καμίνων διαβρώνονται από την σκουριά V. Αυτός ο μηχανισμός της επίθεσης εμφανίζεται ως

διάλυση ή ως επίθεση τύπου σκουριάς αντί για άμεση χημική επίθεση που συνήθως συμβαίνει σε αυτά τα μέταλλα. [7, 8, 13]



Εικόνα 23: Oil ash corrosion στο σωλήνα του υπερθερμαντήρα του λέβητα. [13]

Διάβρωση σημείου δρόσου (Dew point corrosion)

Σε ζώνες χαμηλών θερμοκρασιών διέλευσης των καυσαερίων, η διάβρωση προκαλείται κυρίως από συμπύκνωμα νερού ατμού που περιέχει SO_3 και CO_2 . Το σημείο δρόσου του H_2SO_4 (θειικό οξύ), το οποίο είναι το πιο ενεργό διαβρωτικό, κυμαίνεται μεταξύ των θερμοκρασιών 120°C και 150°C για συγκεντρώσεις του SO_3 από 15 μέχρι 30 ppm, που είναι πολύ σύνηθες για λέβητες που καίνε άνθρακα. Το σημείο δρόσου των όξινων ατμών εξαρτάται από την ποσότητα υγρασίας στο καύσιμο και στο αέρα της καύσης, την ποσότητα της περίσσειας αέρα, την ποσότητα υδρογόνου στο καύσιμο και την ποσότητα του ατμού που χρησιμοποιείται στο φουσητήρα αιθάλης. Όλα τα προαναφερόμενα επηρεάζουν την ποσότητα του συμπυκνώματος νερού ατμού στα καυσάερια (Εικόνα 24).

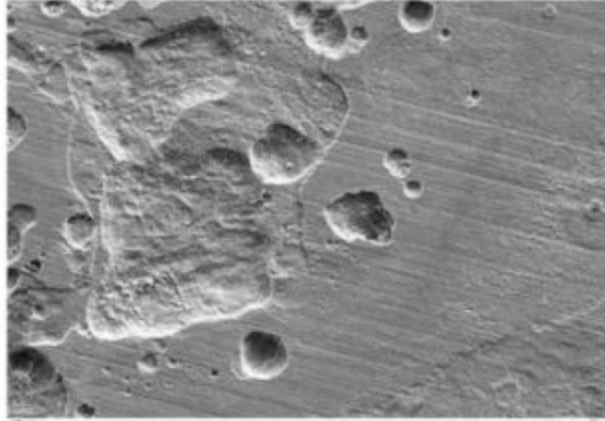
Η συμπύκνωση των όξινων ατμών είναι πιο συνήθης στους θερμαντήρες αέρα, στους κατακρημιστές, στους ψύκτες στοίβας, στους καπνοδόχους και κοντά στις εισόδους των ανακυκλωτών σε περιοχές χωρίς θερμαντήρες του νερού τροφοδοσίας. Οι παράγοντες που αυξάνουν την πιθανότητα της όξινης συμπύκνωσης περιλαμβάνουν χαμηλή ροή καυσαερίων, η οποία συμβαίνει στην εκκίνηση και σε περιόδους λειτουργίας χαμηλού φορτίου, υπερβολικά χαμηλές

θερμοκρασίες εξόδου καυσαερίων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, μεγάλο ποσό περίσσειας αέρα με υψηλή υγρασία και πολύ χαμηλές ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες.

Οι χαμηλά κραματωμένοι χάλυβες, ειδικά αυτοί που περιέχουν χαλκό, χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στους ανακυκλωτές και στους θερμαντήρες αέρα που είναι επιρρεπής διάβρωση dew point. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αυτών των κραμάτων είναι η καλή τους αντοχή σε pitting το οποίο προκαλείται από περίσσεια οξυγόνου στο νερό του λέβητα.

Οι επικαθίσεις που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της διάβρωσης dew point, μπορεί να περιέχουν προϊόντα διάβρωσης, ιπτάμενη τέφρα και τα προϊόντα της χημικής αντίδρασης του συμπυκνωμένου οξέος με τα συστατικά της ιπτάμενης τέφρας. Πολλές από τις ενώσεις στις επικαθίσεις είναι διαλυτές στο νερό και μπορούν έτσι να απομακρυνθούν βολικά ψεκάζοντας τις επηρεαζόμενες περιοχές με νερό. Ωστόσο, μερικές φορές οι επικαθίσεις είναι δύσκολο να απομακρυνθούν, ειδικά όταν τους επιτρέπεται να συσσωρεύονται μέχρι να βουλώσουν εντελώς τα περάσματα ή όταν περιέχουν αδιάλυτες ενώσεις, όπως είναι το CaSO_4 (θειικό ασβέστιο).

Η διάβρωση dew point εμφανίζεται πιο συχνά στις μονάδες που καίνε έλαια, παρά στις μονάδες που καίνε γαιάνθρακα, επειδή το V στις επικαθίσεις τέφρας – ελαίων είναι καταλύτης για την οξείδωση του SO_2 σε SO_3 και επειδή η καύση ελαίων παράγει λιγότερη τέφρα από την καύση του άνθρακα. Στις μονάδες καύσης γαιάνθρακα ένα σεβαστό ποσό από τα οξείδια του θείου απορροφάται από τις επικαθίσεις ιπτάμενης τέφρας στις περιοχές υψηλών θερμοκρασιών, όπου τα οξείδια του θείου συμμετέχουν στη coal ash corrosion. Επιπλέον, η τέφρα γαιάνθρακα, η οποία αποτελείται κυρίως από βασικές ενώσεις, εξουδετερώνει μερικώς τα συμπυκνωμένα οξέα, όταν δημιουργούν επικαθίσεις πάνω σε υγρές επιφάνειες στις περιοχές χαμηλών θερμοκρασιών. Η τέφρα των ελαίων, η οποία είναι κυρίως όξινη, είναι ανίκανη να εξουδετερώσει τα συμπυκνωμένα οξέα. [8, 18]



Εικόνα 24: Dew point corrosion σε λέβητα. [18]

Συνέπειες της διάβρωσης στη λειτουργία του λέβητα

Τα βασικά αποτελέσματα της διάβρωσης στο λέβητα είναι τα εξής:

- 1) Απώλεια απόδοσης: Η διάβρωση και οι επικαθίσεις καταστρέφουν την απόδοση του συστήματος. Τα προϊόντα της διάβρωσης, επίσης συμβάλουν και στη δημιουργία επικαθίσεων στο σύστημα. Ακόμα και μια μικρή εμφάνιση επικαθίσεων, όπως αυτή του 1/8", μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια απόδοσης. Αντίστροφα η δημιουργία επικαθίσεων οδηγεί στην αύξηση της διάβρωσης στο σύστημα, καθώς παγιδεύεται το νάτριο κάτω από τις επικαθίσεις και έτσι δημιουργούνται λάκκοι στην επιφάνεια του λέβητα, πράγμα που του δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερη ζημιά. Η διάβρωση που δημιουργεί οπές στο μέταλλο, επίσης μειώνει την απόδοση του λέβητα. Οι οπές στο λέβητα δημιουργούν διαρροή, η οποία με την σειρά της οδηγεί σε διάφορα λειτουργικά προβλήματα στο λέβητα.

- 2) Μικρότερη διάρκεια ζωής του λέβητα: Η αποτυχία ελέγχου της διάβρωσης οδηγεί σε μικρότερη διάρκεια ζωής του συστήματος του λέβητα. Η διάβρωση θα χειροτερεύει με την πάροδο του χρόνου, ιδιαίτερα αν δεν προσεχθεί η χημεία του νερού. Έτσι θα υπάρχει απώλεια απόδοσης και πάλι, μέχρι να τερματιστεί τελικά η λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα, η διάβρωση που προκαλείται από τα οξείδια του σιδήρου και του χαλκού στο συμπύκνωμα μπορεί να μειώσει την κυκλοφορία του νερού, το οποίο μπορεί να οδηγήσει και σε ξήρανση του σωλήνα. Αυτό το συμβάν μπορεί να δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα στους σωλήνες και τα άλλα μέρη του λέβητα. Όσο περισσότερα μέλη του λέβητα χρειάζονται αντικατάσταση, τόσο πιο πολλά έξοδα θα υπάρξουν. Για αυτό είναι προτιμότερη η συντήρηση του λέβητα.
- 3) Υψηλά κόστη: Η διάβρωση μπορεί να οδηγήσει στο να δαπανηθούν πολύ μεγάλα ποσά για την επισκευή του συστήματος και για την αντικατάσταση των κατεστραμμένων κομματιών του λέβητα. Σε πολλές περιπτώσεις, μάλιστα, οι τρυπημένοι σωλήνες και τα κατεστραμμένα κομμάτια χρειάζονται αντικατάσταση αντί για αλλαγή. Για να διορθωθεί το πρόβλημα, θα πρέπει να γίνει τερματισμός της λειτουργίας του συστήματος, το οποίο θα οδηγήσει με την σειρά του σε μείωση της παραγωγικότητας του λέβητα. Όσο πιο συχνά χρειαστούν επισκευές στο σύστημα, τόσο λιγότερο αποδοτικό θα γίνει το σύστημα. Για παράδειγμα, μέσα σε πέντε χρόνια, τα έμμεσα κόστη διάβρωση από τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις μπορούν να φτάσουν τα 80000000 \$. Ένα ακόμα παράδειγμα είναι ότι οι συνεχείς διακοπές λειτουργίας του συστήματος μπορεί να κοστίσουν παραπάνω από 1000000 \$ καθημερινά. [5]

Κεφάλαιο 3: Προτάσεις για την αποφυγή διάβρωσης σε λέβητες

3.1 Εισαγωγή

Οι τεχνικές προστασίας από τη διάβρωση ποικίλουν ανάλογα και με το είδος της διάβρωσης. Οι βασικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διατήρηση του κατάλληλου pH, τον έλεγχο του οξυγόνου, τον έλεγχο των επικαθίσεων και την μείωση των εφαρμοζόμενων τάσεων είτε από τον αρχικό σχεδιασμό είτε μετέπειτα. Η απαερίωση, η χρήση μεμβρανών διαστολής και η επεξεργασία του νερού είναι οι καλύτεροι και οι πιο εύχρηστοι τρόποι για να αποφύγουμε την διάβρωση αφαιρώντας τα αέρια που την δημιουργούν (κυρίως οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα).

Η προστασία του χάλυβα σε ένα σύστημα λέβητα εξαρτάται από την θερμοκρασία, το pH και το πόσο οξυγόνο περιέχεται. Γενικά υψηλές θερμοκρασίες, υψηλά ή χαμηλά επίπεδα pH και υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου αυξάνουν την διάβρωση του χάλυβα. Μηχανικοί και λειτουργικοί παράγοντες, όπως οι ταχύτητες, οι τάσεις και τα αυστηρά μέτρα στην συντήρηση μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση της διάβρωσης. Τα συστήματα διαφέρουν στην ευκολία που έχει το καθένα να διαβρωθεί, για αυτό και πρέπει να αξιολογούνται ξεχωριστά.

3.2 Απαερίωση σε λέβητες

Για να ακολουθεί ο λέβητας τα βιομηχανικά πρότυπα τόσο σε περιεχόμενο οξυγόνου, όσο και στα επιτρεπτά επίπεδα μεταλλικού οξειδίου στο νερό τροφοδοσίας, θα πρέπει να αφαιρεθεί σχεδόν όλο το οξυγόνο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με αποδοτική μηχανική απαερίωση, η οποία θα συμπληρώνεται από έναν κατάλληλα ελεγμένο καθαριστή οξυγόνου.

Η απαερίωση μπορεί να γίνει με την χρήση φυσικού μέσου, όπως είναι θερμαντήρες απαερίωσης και οι απαγωγείς κενού ή μπορεί να γίνει και με τη χρήση χημικού μέσου, όπως είναι οι καθαριστές οξυγόνου και οι καταλυτικές ρητίνες.

Ο σκοπός του απαερωτή είναι να μειώσει τα διαλυμένα αέρια και συγκεκριμένα το οξυγόνο σε ένα χαμηλό επίπεδο και να βελτιώσει την επίδοση της θερμικής εγκατάστασης αυξάνοντας την θερμοκρασία του νερού. Επιπλέον παρέχουν μία αποθήκη νερού τροφοδοσίας και κατάλληλες συνθήκες αναρρόφησης για τις αντλίες του νερού τροφοδοσίας του λέβητα.

Οι απαερωτές πίεσης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. Απαερωτές τύπου δίσκου (Εικόνα 25)
2. Απαερωτές τύπου σπρέι (Εικόνα 26)

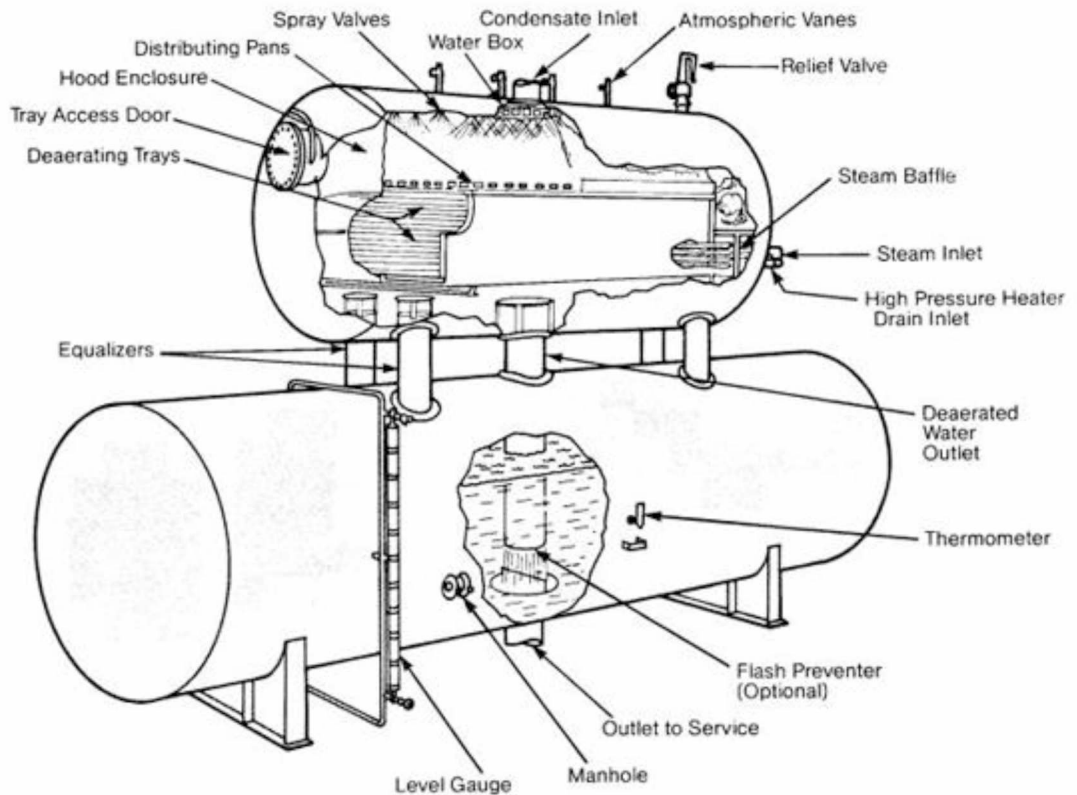
Οι τύπου δίσκου θερμαντήρες απαερίωσης αποτελούνται από ένα κέλυφος, ακροφύσια ψεκασμού για να διανέμουν και να ψεκάζουν το νερό, έναν άμεσης επαφής συμπυκνωτή εξαερισμού, στοίβες δίσκων και προστατευτικούς τοίχους μέσα στο θάλαμο. Ο θάλαμος κατασκευάζεται από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, αλλά τα ακροφύσια ψεκασμού, όπως και τα υπόλοιπα εξαρτήματα κατασκευάζονται από ανοξείδωτους χάλυβες που είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση.

Το εισερχόμενο νερό, ψεκάζεται σε ατμοσφαιρικό ατμό, όπου θερμαίνεται, μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού του ατμού. Τα περισσότερα από τα μη συμπυκνωμένα αέρια (κυρίως το οξυγόνο και το ελεύθερο διοξείδιο του άνθρακα) απελευθερώνονται στον ατμό, όσο το νερό ψεκάζεται στην μονάδα. Συσκευές στεγανοποίησης αποτρέπουν την επαναμόλυνση του νερού στις στοίβες των δίσκων από τα αέρια του τμήματος ψεκασμού. Το νερό που πέφτει από δίσκο σε δίσκο μετατρέπεται σε λεπτά σταγονίδια, τα οποία έρχονται σε επαφή με τον εισερχόμενο ατμό.

Ο ατμός θερμαίνει το νερό στην θερμοκρασία κορεσμού του ατμού, μέχρι να απομακρυνθεί κάθε ίχνος του οξυγόνου. Το απαερωμένο νερό πέφτει στον χώρο αποθήκευσης, όπου μια κουβέρτα ατμού το προστατεύει από την επαναμόλυνση. Συνήθως αποθηκεύεται σε ξεχωριστή δεξαμενή.

Ο ατμός εισέρχεται στους απαερωτές από θύρες στο θάλαμο των δίσκων, ρέοντας μέσα από την στοίβα των δίσκων παράλληλα στη ροή του νερού. Ένα πολύ μικρό ποσοστό του ατμού συμπυκνώνεται σε αυτό το τμήμα, όσο η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται μέχρι την τιμή της θερμοκρασίας κορεσμού του ατμού. Ο υπόλοιπος ατμός διαχωρίζει τον νερό που υπερχειλίζει. Πριν φύγει από το θάλαμο

των δίσκων, ο ατμός ρέει ανοδικά ανάμεσα στο κέλυφος και στον τοίχο μέχρι την περιοχή ψεκασμού. Το μεγαλύτερο μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και γίνεται μέρος του νερού απαερίωσης. Ένα μικρό ποσοστό του ατμού, το οποίο περιέχει μη συμπυκνωμένο αέριο απελευθερωμένο από το νερό και μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα. [4, 20]



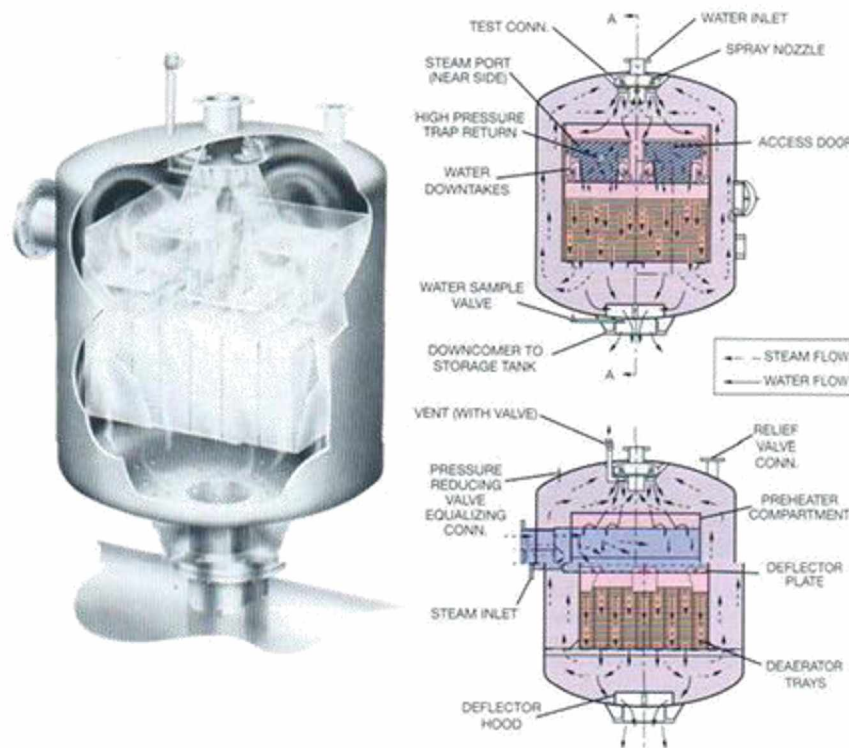
Εικόνα 25: Απαεριωτής τύπου δίσκου. [4]

Οι τύπου σπρέι θερμαντήρες απαερίωσης αποτελούνται από ένα κέλυφος, από βαλβίδες εισαγωγής ψεκασμού με ελατήριο, έναν άμεσης επαφής συμπυκνωτή εξαερισμού και ένα διαχωριστή ατμού για την τελική απαερίωση. Το κέλυφος και ο διαχωριστής ατμού κατασκευάζονται από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα, ενώ οι βαλβίδες ψεκασμού και ο συμπυκνωτής από ανοξείδωτο χάλυβα.

Το εισερχόμενο νερό ψεκάζεται σε ατμοσφαιρικό ατμό και θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού του ατμού. Τα περισσότερα από τα μη συμπυκνωμένα αέρια απελευθερώνονται στον ατμό και το θερμαινόμενο νερό πέφτει στις θύρες νερού και διοχετεύεται στο χαμηλότερο τμήμα του συμπυκνωτή ατμού. Το νερό

διαχωρίζεται από ένα μεγάλο ποσό ατμού και θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία κορεσμού. Όσο το μείγμα αέρα-ατμού ανεβαίνει στο διαχωριστή το απαεριωμένο νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη της θερμοκρασίας κορεσμού, λόγω μια μικρής πτώσης πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο, παράγεται ένα μικρό ποσό διόγκωσης, το οποίο βοηθάει στην απομάκρυνση των διαλυμένων αερίων. Το απαεριωμένο νερό υπερχειλίζει από τον διαχωριστή του ατμού στο τμήμα αποθήκευσης.

Ο ατμός εισέρχεται στον απαεριωτή μέσα από οπές στο πλάι και ρέει στο διαχωριστή ατμού. Αφού τελειώσει η ροή του στο διαχωριστή, ο ατμός πηγαίνει στην περιοχή του καυστήρα για να θερμάνει το εισερχόμενο νερό. Το μεγαλύτερο μέρος του ατμού συμπυκνώνεται στο τμήμα ψεκασμού και γίνεται μέρος του απαεριωμένου νερού. Ένα μικρό ποσοστό των αερίων μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα για να αφαιρεθούν και τα μη συμπυκνωμένα αέρια. [4, 20]

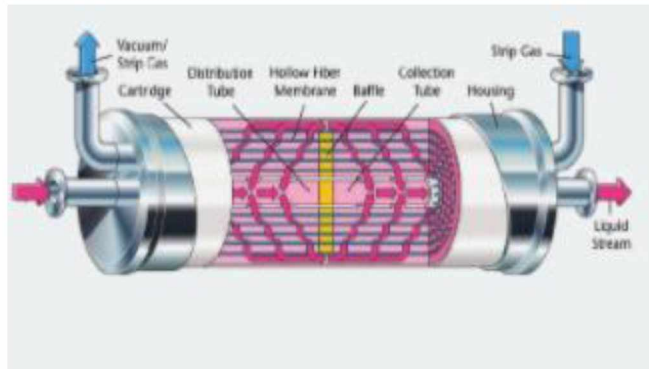


Εικόνα 26: Απαεριωτής τύπου σπρέι. [4]

3.3 Μεμβράνες διαστολής

Οι μεμβράνες διαστολής χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν τα διαλυμένα αέρια (οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα) στο νερό τροφοδοσίας του λέβητα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες ημιαγωγών, ισχύος, φαρμακευτικές και άλλες, όπου προσπαθούν να ελέγξουν τα διαλυμένα αέρια στα συστήματα νερού. Η χρήση τους στα συστήματα απαεριοποίησης του νερού τροφοδοσίας των λεβήτων έχει αυξηθεί πολύ από τότε που εξελίχθηκαν νέες βιομηχανικές συσκευές ποιότητας.

Οι μεμβράνες διαστολής κατασκευάζονται από μικρό πορώδη υδρόφοβες μεμβράνες. Η μεμβράνη χρησιμοποιείται για να φέρει σε επαφή το υγρό με το αέριο, χωρίς να τα κάνει μίξη. Οι διαστολείς μειώνουν την πίεση του αερίου, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το υγρό, δημιουργώντας μία ωθούσα δύναμη, η οποία αφαιρεί τα διαλυμένα αέρια από το υγρό (Εικόνα 27). [3]



Εικόνα 27: Μεμβράνη διαστολής. [3]

3.4 Επεξεργασία νερού του λέβητα

Η εξωτερική επεξεργασία του νερού είναι η μείωση ή η απομάκρυνση των ακαθαρσιών από το νερό έξω από το λέβητα. Γενικά, η εξωτερική επεξεργασία του νερού χρησιμοποιείται όταν η ποσότητα ενός ή παραπάνω από τις ακαθαρσίες του νερού τροφοδοσίας είναι πολύ υψηλή και δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί από το σύστημα του λέβητα. Η εσωτερική επεξεργασία του νερού είναι η κατανομή των ακαθαρσιών μέσα στο σύστημα του λέβητα. Οι αντιδράσεις συμβαίνουν είτε στο

στις γραμμές τροφοδοσίας, είτε στον ίδιο το λέβητα. Η εσωτερική επεξεργασία του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνη της ή σε συνδυασμό με την εξωτερική επεξεργασία. Ο σκοπός της είναι να αντιδράσει καταλλήλως με την σκληρότητα του νερού τροφοδοσίας και το καθαρό οξυγόνο.

Εξωτερική επεξεργασία νερού

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού καθαρίζουν και απαερίζουν την διορθωτική ποσότητα του νερού ή το νερού τροφοδοσίας. Το νερό μερικές φορές προ επεξεργάζεται με εξάτμιση για να παραχθεί καθαρός ατμός, ο οποίος συμπυκνώνεται και χρησιμοποιείται για σκοπούς τροφοδοσίας στο λέβητα (Εικόνα 28). Οι εξατμιστήρες είναι πολλών και διαφορετικών τύπων. Το πιο απλό είδος είναι μία δεξαμενή νερού μέσα από την οποία περνάνε πηνία ατμού για να ζεστάνουν το νερό μέχρι το σημείο βρασμού του. Μερικές φορές για να αυξηθεί η αποδοτικότητα του ατμού, μεταφέρεται μέσα από πηνία από την πρώτη δεξαμενή σε μία δεύτερη, για να παραχθεί επιπλέον θέρμανση και εξάτμιση. Οι εξατμιστήρες είναι κατάλληλοι εκεί όπου ο ατμός ως πηγή θερμότητας είναι διαθέσιμος. Έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την αφαλάτωση, όπως για παράδειγμα όταν τα διαλυμένα στερεά μέσα στο αφιλτράριστο νερό είναι πολύ υψηλά. [5, 8,19]



Εικόνα 28: Εξατμιστήρας για την εξωτερική επεξεργασία του νερού του λέβητα.
[5]

Συγκεκριμένα φυσικά και συνθετικά υλικά, έχουν την ικανότητα να αφαιρούν μεταλλικά ιόντα από νερό και να τα αντικαθιστούν με άλλα. Για παράδειγμα, από το νερό που περνάει μέσα από έναν αποσκληρυντή, ο οποίος ανταλλάσει ένα απλό κατιόν, αφαιρούνται τα ιόντα Ca και Mg και αντικαθίστανται από ιόντα Na. Αφού η απλή ανταλλαγή ενός κατιόντος δεν αφαιρεί όλες τις στερεές επικαθήσεις από την παροχή νερού, χρησιμοποιείται πολλές φορές σε συνδυασμό με softening τύπου ιζηματοποίησης. Ένας από του πιο γνωστούς και αποδοτικούς συνδυασμούς επεξεργασίας νερού είναι η διαδικασία ζεστού Ca(OH)_2 -ζεόλιθου. Αυτή περιλαμβάνει προ επεξεργασία του νερού με τον ασβέστη για να μειώσει την σκληρότητα του, την αλκαλικότητα του και σε μερικές περιπτώσεις και το πυρίτιο που περιέχεται μέσα σε αυτό, όπως και κάποια μείωση του οξυγόνου.

Η χημική επεξεργασία του νερού μέσα στο λέβητα είναι συνήθως ουσιώδης και συμπληρώνει την εξωτερική επεξεργασία, αφαιρώντας ακαθαρσίες που μπαίνουν στο λέβητα μέσα από το νερό τροφοδοσίας (O_2 , Si κλπ.). Σε πολλές περιπτώσεις η εξωτερική επεξεργασία της παροχής του νερού δεν είναι αναγκαία και το νερό μπορεί να επεξεργαστεί μόνο με εσωτερικές μεθόδους.

Εσωτερική επεξεργασία νερού

Η εσωτερική επεξεργασία μπορεί να αποτελέσει την μοναδική επεξεργασία στους λέβητες, όταν αυτοί λειτουργούν σε χαμηλές ή μέτριες πιέσεις, όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα ποσά συμπυκνωμένου ατμού στο νερό τροφοδοσίας ή όταν υπάρχει καλής ποιότητας αφιλτράριστο νερό. Ο σκοπός της εσωτερικής επεξεργασίας είναι:

- 1) Να αντιδρά με την σκληρότητα του νερού τροφοδοσίας και να την εμποδίσει από την ιζηματοποίηση της πάνω στο μέταλλο του λέβητα.
- 2) Να ελέγξει κάθε αιωρούμενη ύλη, όπως τα οξείδια του σιδήρου και να τα κάνει μη επιδραστικά στο μέταλλο του λέβητα.
- 3) Να εξουδετερώσει το οξυγόνο από το νερό και να παρέχει αρκετή αλκαλικότητα για να αποτρέψει την διάβρωση του λέβητα.

Επιπρόσθετα, ως συμπληρωματικά μέτρα η εσωτερική επεξεργασία θα πρέπει να αποτρέψει τη διάβρωση του συστήματος του νερού τροφοδοσίας και να προστατέψει τα συστήματα συμπυκνωμένου ατμού από τη διάβρωση.

Κατά την διάρκεια της διαδικασίας κλιματισμού, η οποία είναι πολύ σημαντική για το πρόγραμμα επεξεργασίας του νερού, συγκεκριμένες δόσεις προϊόντων κλιματισμού προστίθενται στο νερό. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά είναι:

- 1) Αναχαιτιστές PO_4^{3-} και πολυφωσφορικού άλατος: Τα οποία αντιδρώντας με την αλκαλικότητα του νερού του λέβητα, εξουδετερώνουν την σκληρότητα του νερού δημιουργώντας $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ και ένα αδιάλυτο προϊόν το οποίο απομακρύνεται και εκκενώνεται υπό πίεση σε μία συνεχή βάση ή και πιο σπάνια μέσα από το κάτω μέρος του λέβητα.
- 2) Καθαριστές οξυγόνου: Αυτοί είναι το Na_2SO_3 , τανίνη, N_2H_4 (υδραζίνη) και διασκορπιστές $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ (υδροκινόνη), H_3NO (υδροξυλαμίνη) και ασκορβικό οξύ. Αυτοί οι καθαριστές μειώνουν τα οξείδια και το διαλυμένο οξυγόνο. Οι περισσότεροι μάλιστα παθητικοποιούν και τις μεταλλικές επιφάνειες. Η επιλογή του προϊόντος και της δόσης που απαιτείται εξαρτάται από το αν χρησιμοποιείται θερμαντήρας απαερίωσης.

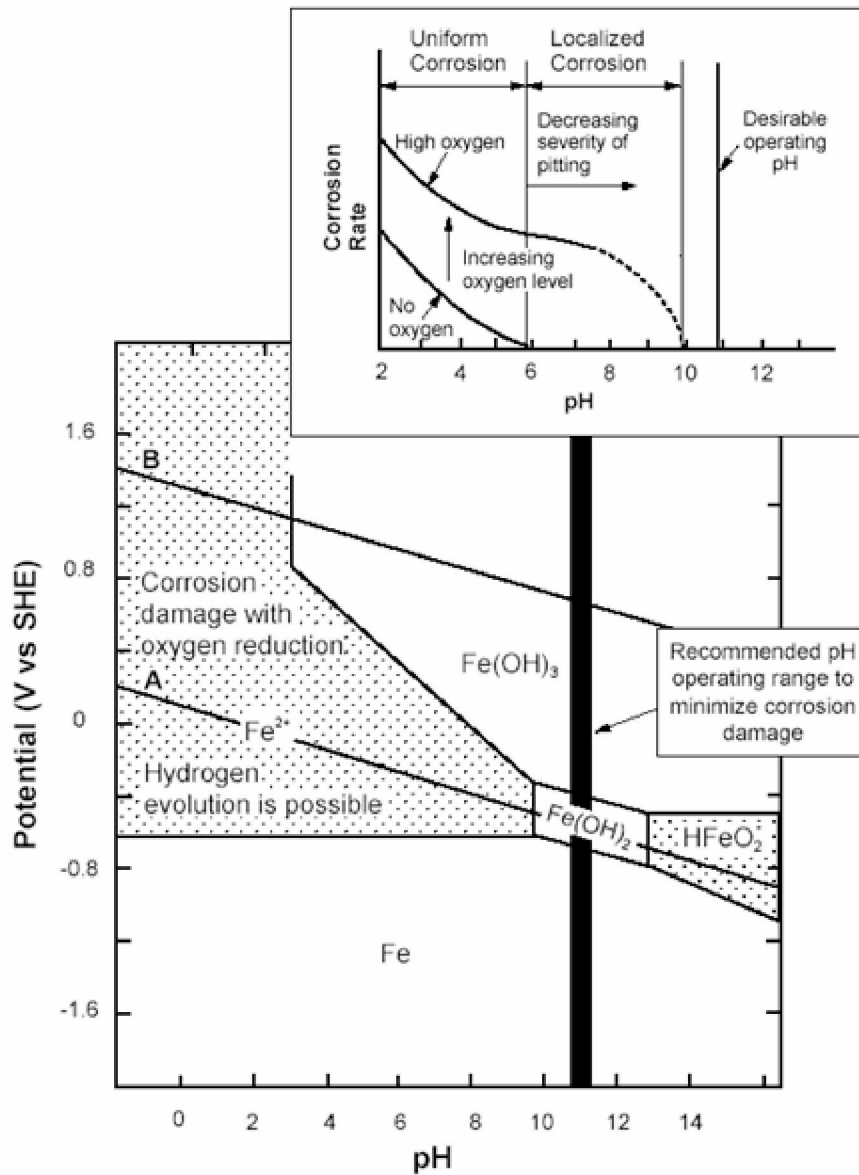
Τα χημικά softening που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν Na_2CO_3 , NaOH και διάφορους τύπους Na_3PO_4 . Αυτά τα χημικά αντιδρούν με τις ενώσεις Ca και Mg στο νερό τροφοδοσίας. Το $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ που εισέρχεται στο νερό τροφοδοσίας διασπάται στις θερμοκρασίες του λέβητα ή αντιδρά με το NaOH για να δημιουργήσει CaCO_3 . Αφού το CaCO_3 είναι σχετικά αδιάλυτο τείνει να απομακρύνεται από το διάλυμα. Το Na_2CO_3 εν μέρει διαλύεται σε NaOH και CO_2 σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές θερμοκρασίες στο λέβητα μειώνουν τη διαλυτότητα του CaSO_4 και τείνουν να το κάνουν να ιζηματοποιηθεί στο μέταλλο του λέβητα. Συνεπώς, το CaSO_4 πρέπει να αντιδράσει χημικά για να δημιουργήσει ένα ίζημα μέσα στο νερό, όπου μπορεί να ρυθμιστεί και να απομακρυνθεί με εκκένωση υπό πίεση. Το CaSO_4 αντιδρά με το Na_2CO_3 , το Na_3PO_4 και το Na_2SiO_3 και σχηματίζει αδιάλυτο CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ και $\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$. Το MgSO_4 αντιδρά με το NaOH και σχηματίζει ίζημα του $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Ένα μέρος του Mg μπορεί να αντιδράσει και με το Si και να σχηματίσει MgO_3Si . Το Na_2SO_4 είναι πολύ διαλυτό και παραμένει στο διάλυμα, εκτός και αν εξατμιστεί σχεδόν όλο το νερό.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να καθαρίσουν το οξυγόνο περιέχουν Na_2SO_4 και N_2H_4 . Πολλοί συνδυασμοί πολυφωσφορικών και οργανικών ουσιών χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η διάβρωση και η κλιμάκωση στα συστήματα του νερού τροφοδοσίας του λέβητα. Αμίνες εξουδετέρωσης των πτητικών συστατικών και αναστολείς της διαδικασίας 'filming' χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί διάβρωση συμπυκνώματος.

Οι κοινές μέθοδοι εσωτερικής χημικής τροφοδοσίας περιλαμβάνουν την χρήση δεξαμενών χημικής διάλυσης και αναλογικές αντλίες ή χημικά τροφοδοτικά. Γενικά τα χημικά softening (PO_4^{3-} , Na_2CO_3 , NaOH κλπ.) προστίθενται κατευθείαν στο νερό τροφοδοσίας σε ένα σημείο κοντά στο τύμπανο του λέβητα. Τα χημικά ρέουν έξω από τον λέβητα στο τμήμα του νερού τροφοδοσίας, ώστε οι αντιδράσεις να συμβαίνουν στο νερό πριν αυτό εισέλθει στο τμήμα παραγωγής ατμού. Τα χημικά softening μπορούν να προστίθενται στο λέβητα συνεχώς ή κατά διαστήματα ανάλογα με την σκληρότητα του νερού τροφοδοσίας και άλλων παραγόντων. Τα χημικά που προστίθενται για να αντιδράσουν με το διαλυμένο οξυγόνο (SO_4^{2-} , N_2H_4 κλπ.) και αυτά που χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν την διάβρωση και την κλιμάκωση στα συστήματα τροφοδοσίας του νερού (πολυφωσφορικά, οργανικές ουσίες κλπ.) πρέπει να τροφοδοτούνται στο σύστημα του νερού τροφοδοσίας όσο πιο συχνά γίνεται. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν την διάβρωση του συμπυκνώματος τροφοδοτούνται απευθείας στο ατμό ή στο σύστημα του νερού τροφοδοσίας, ανάλογα με το τι χημικά χρησιμοποιούνται. Η συνεχής τροφοδοσία προτιμάται αλλά και η εφαρμογή κατά διαστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μερικές περιπτώσεις. [5, 8, 19]

Διατήρηση του pH στο νερό του λέβητα

Ο σωστός τρόπος διαχείρισης του pH στο νερό τροφοδοσίας του λέβητα είναι πολύ σημαντική παράμετρος για αντιμετώπιση της διάβρωσης στο λέβητα. Το λειτουργικό pH του λέβητα εξαρτάται από την πίεση του λέβητα, από το υλικό του λέβητα, από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας και από το είδος της χημικής επεξεργασίας του νερού του λέβητα. Για αποτελεσματική και οικονομική λειτουργία του λέβητα, είναι απαραίτητος ο έλεγχος του pH του νερού. Το ασφαλές εύρος pH για τους κυμαίνεται μεταξύ του 8.5 και του 12.7, αλλά το εύρος που συστήνεται είναι μεταξύ του 10.5 και του 12 (Εικόνα 29). Αν το pH του νερού πέσει κάτω από το 8.5 τότε θα συμβεί όξινη διάβρωση στο λέβητα, ενώ αν το pH του νερού ανέβει πάνω από το 12.7 τότε θα έχουμε καυστική διάβρωση στο λέβητα. Η διατήρηση του pH στο σωστό εύρος τιμών, μπορεί να συμβεί αφαιρώντας της ακαθαρσίες από το νερό του λέβητα ή προσθέτοντας χημικά για να εξουδετερώσουν τις ακαθαρσίες. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η προσθήκη NaOH για την εξουδετέρωση του H_2CO_3 στο νερό του λέβητα. [21, 22]



Εικόνα 29: Διάγραμμα που υποδεικνύει το ασφαλές εύρος του pH για το νερό του λέβητα. [21]

Κεφάλαιο 4: Case studies

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε 5 μελέτες περιπτώσεων (case studies), οι οποίες αφορούν αστοχίες λόγω διάβρωσης σε λέβητα, για την καλύτερη κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το πρώτο case study αφορά αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή ατμολέβητα και οφείλεται σε dew point corrosion. Το δεύτερο case study αφορά αστοχία σωλήνων ατμού σε λέβητα λόγω διάβρωσης και οφείλεται σε επίθεση οξυγόνου (oxygen attack). Το τρίτο case study αφορά την αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή λέβητα και οφείλεται επίσης σε acidic corrosion. Το τέταρτο case study αφορά αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων του υπερθερμαντήρα λέβητα και οφείλεται σε διάβρωση ιπτάμενης τέφρας (coal ash corrosion). Το πέμπτο case study αφορά αστοχία λόγω διάβρωσης σωλήνα λέβητα και οφείλεται σε SCC (Stress Corrosion Cracking).

4.2 Πειραματικές διαδικασίες

- 1) **Χημική ανάλυση:** Τα δοκίμια των σωλήνων αναλύθηκαν με την μέθοδο της φασματομετρίας οπτικών εκπομπών.
- 2) **Στερεό-οπτικός έλεγχος:** Ο στερεό-οπτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε και στις εσωτερικές αλλά και στην εξωτερικές επιφάνειες των σωλήνων. Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο Leica 'Wild M3Z' σε μεγεθύνσεις 6.5x – 40x.
- 3) **Μεταλλογραφία:** Η μεταλλογραφική ανάλυση έγινε σε εγκάρσια δοκίμια. Η προετοιμασία των δοκιμίων περιλάμβανε την κοπή σε τροχούς 'Accutom 2', την λείανση με χαρτιά SiC 120, 320, 500, 800 και 1000 grit και την στίλβωση σε πάνινους τροχούς που περιέχουν κόκκους διαμαντιού διαμέτρου 1 και 3 μm. Η χημική προσβολή πραγματοποιήθηκε με Nital 2%. Ο μεταλλογραφικός έλεγχος έγινε σε οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Leitz 'Aristomet' σε μεγεθύνσεις 50x – 500x.

- 4) **SEM/EDX (Τοπικές χημικές αναλύσεις):** Οι τοπικές χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στις εσωτερικές επιφάνειες των σωλήνων. Για αυτή την διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν ένα SEM JEOL-840A μαζί με μια ανάλυση EDS.
- 5) **XRD:** Το υλικό που συλλέχθηκαν από την εσωτερικές επιφάνειες των σωλήνων, αναλύθηκαν περισσότερο με XRD. Για αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο Rigaku Ultima (40 kV, 30mA, CuKα ακτινοβολία).

4.3 Case study 1 –Αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή ατμολέβητα [23]

I. Εισαγωγή

Το πρώτο case study αφορά τη διάβρωση των σωλήνων του ανακυκλωτή ατμολέβητα, που λειτουργεί σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Λειτουργικά στοιχεία:

- 1) Ρευστό μέσα στους σωλήνες: Νερό σε θερμοκρασία 110°C.
- 2) Το περιβάλλον έξω από τους σωλήνες: Καυσαέρια από τον καυστήρα σε θερμοκρασία 510°C.
- 3) Υλικό κατασκευής: ανθρακούχος χάλυβας



Εικόνα 30: Δείγματα σωλήνων [23]

II. Αποτελέσματα

- 1) **Αποτελέσματα στερεοσκοπίου:** Τα δοκίμια των σωλήνων αποτελούνται από την γωνιακή σύνδεση τους που συνδέεται με τα ευθεία κομμάτια με περιφερειακές συγκολλήσεις. Η διάβρωση επικεντρώνεται κυρίως στις περιοχές που είναι γειτονικές στις συγκολλήσεις και στην γωνιακή σύνδεση. Διάβρωση με την μορφή αυλακώσεων και οπών παρατηρήθηκε κυρίως κοντά στις συγκολλήσεις, κάτι που μας δείχνει ότι οι συγκολλήσεις είναι ο κύριος λόγος της διάβρωσης(εικόνες 31-32). Παρατηρήθηκαν επίσης προϊόντα διάβρωσης και στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Οπές παρατηρήθηκαν και στην εξωτερική επιφάνεια της γωνιακής σύνδεσης, εκτός από τις συγκολλήσεις, όπως επίσης και στα ευθεία κομμάτια των σωλήνων(εικόνες 33-34). Το χρώμα των προϊόντων αυτών είναι άσπρο με κίτρινο(εικόνες 31-32, 35). Προϊόντα διάβρωσης εμφανίστηκαν και στο εσωτερικό της γωνιακής σύνδεσης, μόνο που αυτή την φορά είχαν κόκκινο και καφέ χρώμα(εικόνα 36). Η διάβρωση στο εσωτερικό της γωνιακής σύνδεσης ήταν ομοιόμορφη(εικόνα 37).



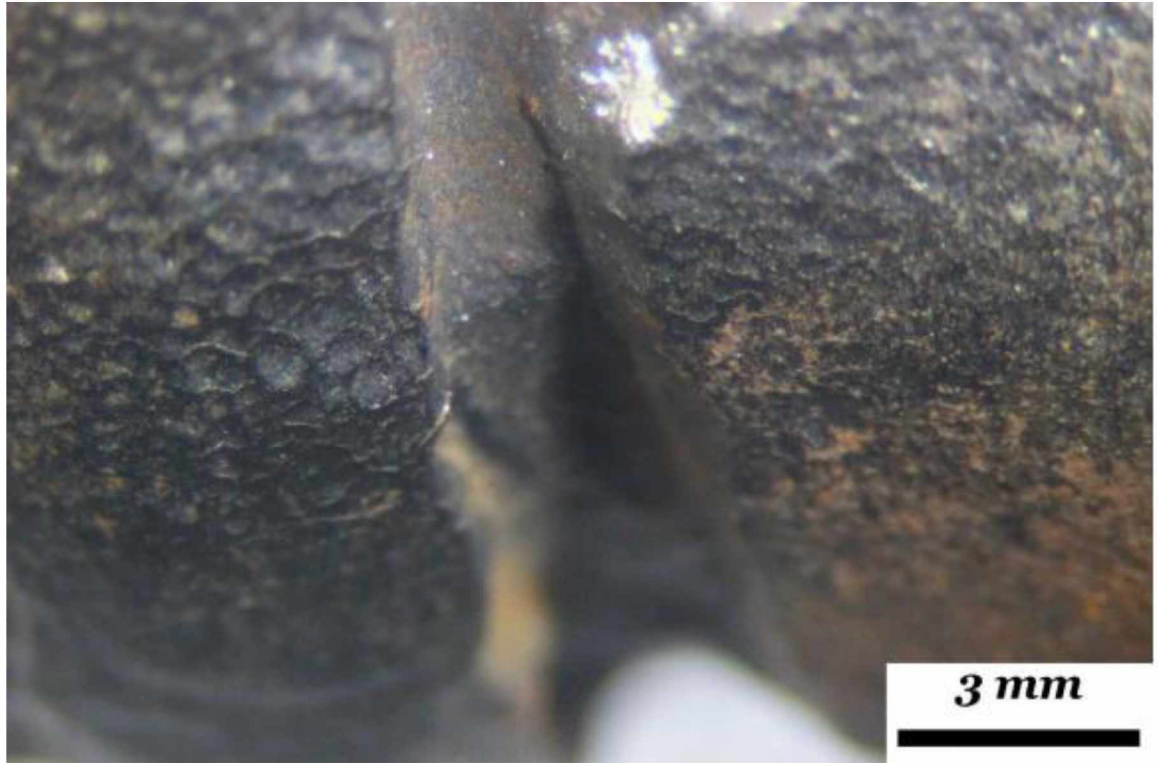
Εικόνα 31: Κοντινότερη όψη της γωνιακής σύνδεσης. Τα βέλη μας υποδεικνύουν την διάβρωση στην περιοχή των συγκολλήσεων. [23]



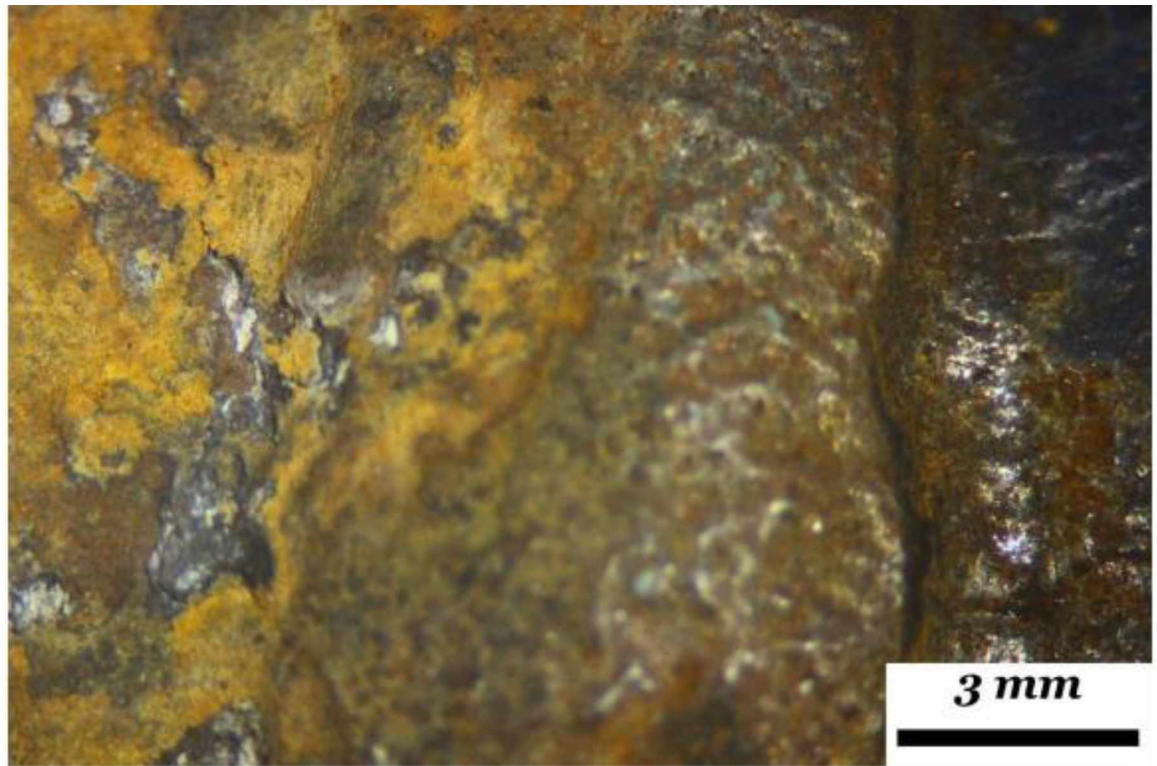
Εικόνα 32: Διάβρωση στην περιοχή των συγκολλήσεων. Τα προϊόντα διάβρωσης φαίνονται με άσπρο χρώμα. [23]



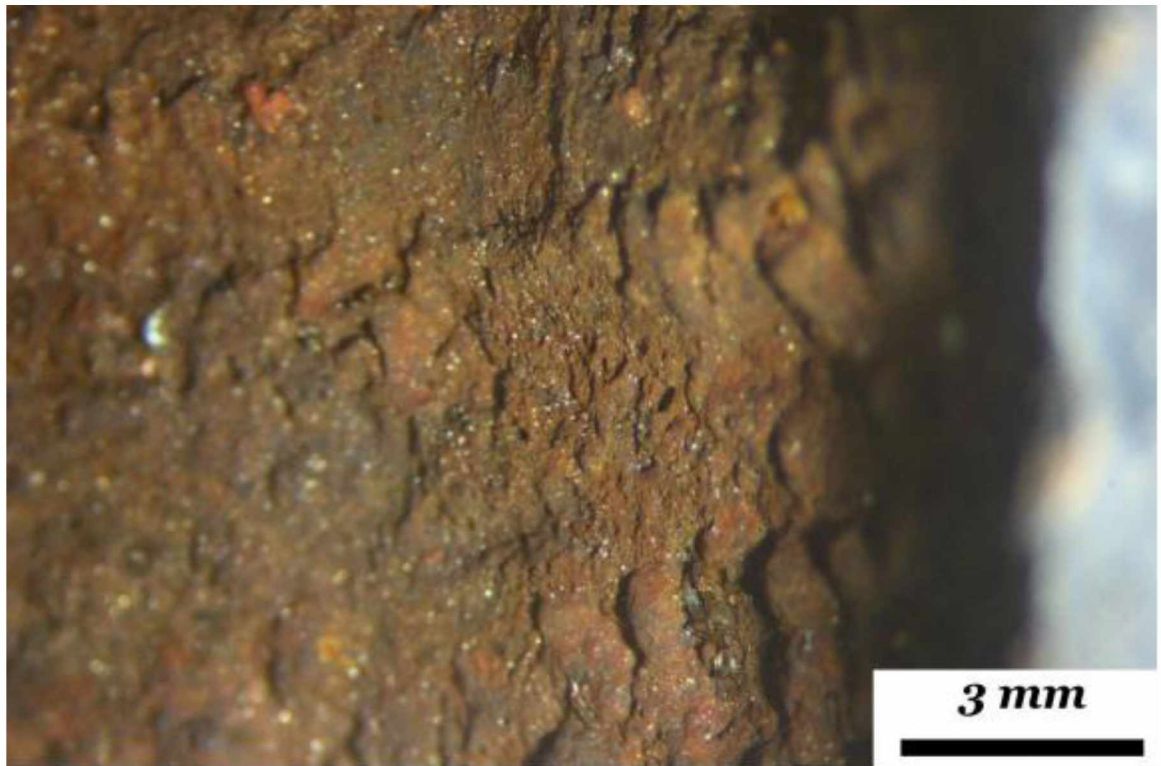
Εικόνα 33: Το βέλος υποδεικνύει σπές (pits) στην επιφάνεια του σωλήνα, κοντά στην γωνιακή σύνδεση. [23]



Εικόνα 34: Διάβρωση pitting κοντά στην περιοχή των συγκολλήσεων. [23]



Εικόνα 35: Προϊόντα διάβρωσης κοντά στη συγκόλληση. [23]

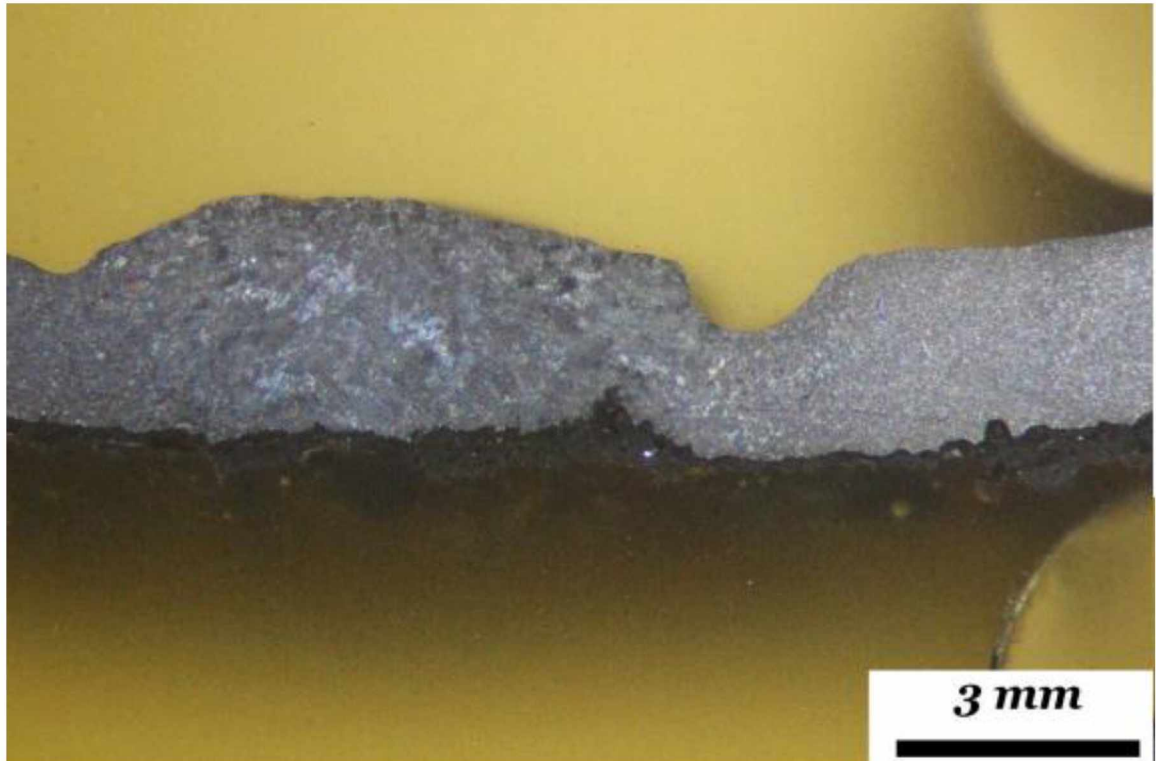


Εικόνα 36: Διάβρωση pitting στην εσωτερική επιφάνεια της γωνιακής σύνδεσης. [23]

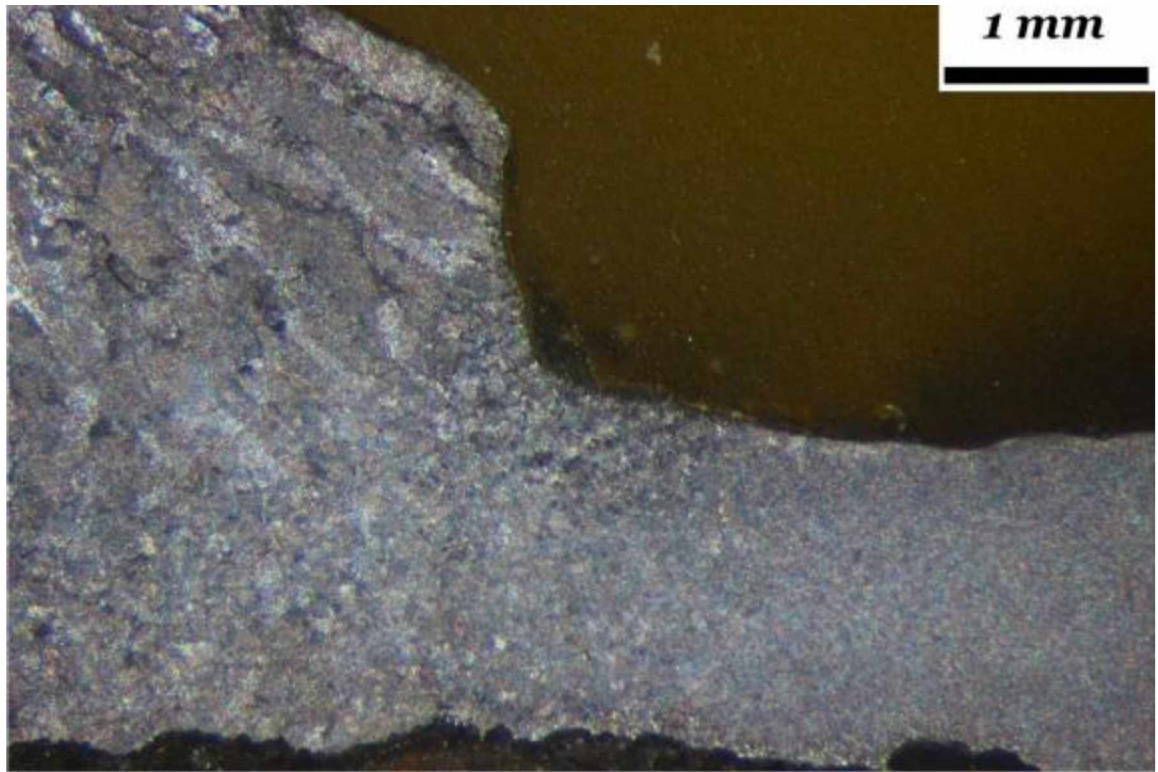


Εικόνα 37: Ομοιόμορφη διάβρωση στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα. [23]

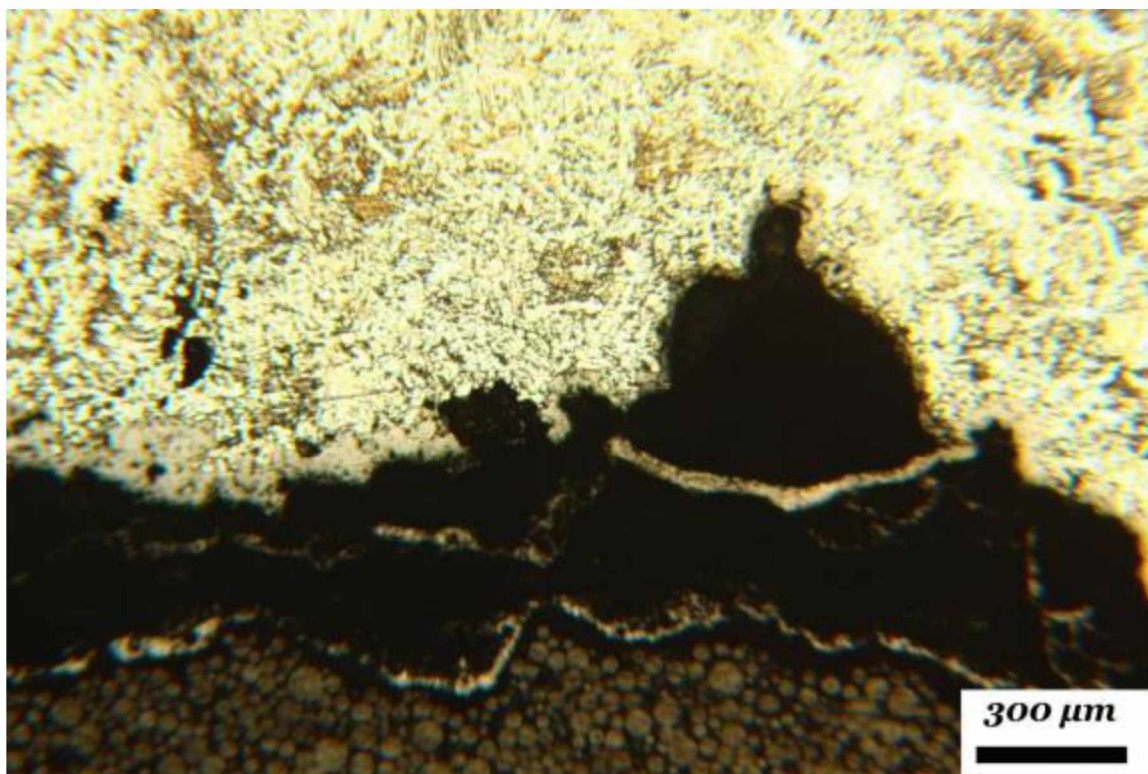
2) **Αποτελέσματα μεταλλογραφίας:** Για την μεταλλογραφική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από της πιο διαβρωμένες περιοχές της γωνιακής σύνδεσης(εικόνα 38). Από την ανάλυση της μικροδομής είναι σαφές ότι η διάβρωση είναι πιο εμφανής στον πόδα και στο πρόσωπο της συγκόλλησης. Σε αυτή την περιοχή η μείωση του πάχους φτάνει περίπου στο μισό του πάχους του σωλήνα(εικόνα 39). Τρηματική (pitting) διάβρωση παρατηρήθηκε στην εσωτερική επιφάνεια των δοκιμίων, όπου οι οπές είναι γεμάτες με προϊόντα διάβρωσης(εικόνα 40).



Εικόνα 38: Η διάβρωση στο πόδα της συγκόλλησης και η διάβρωση pitting στην εσωτερική επιφάνεια. [23]

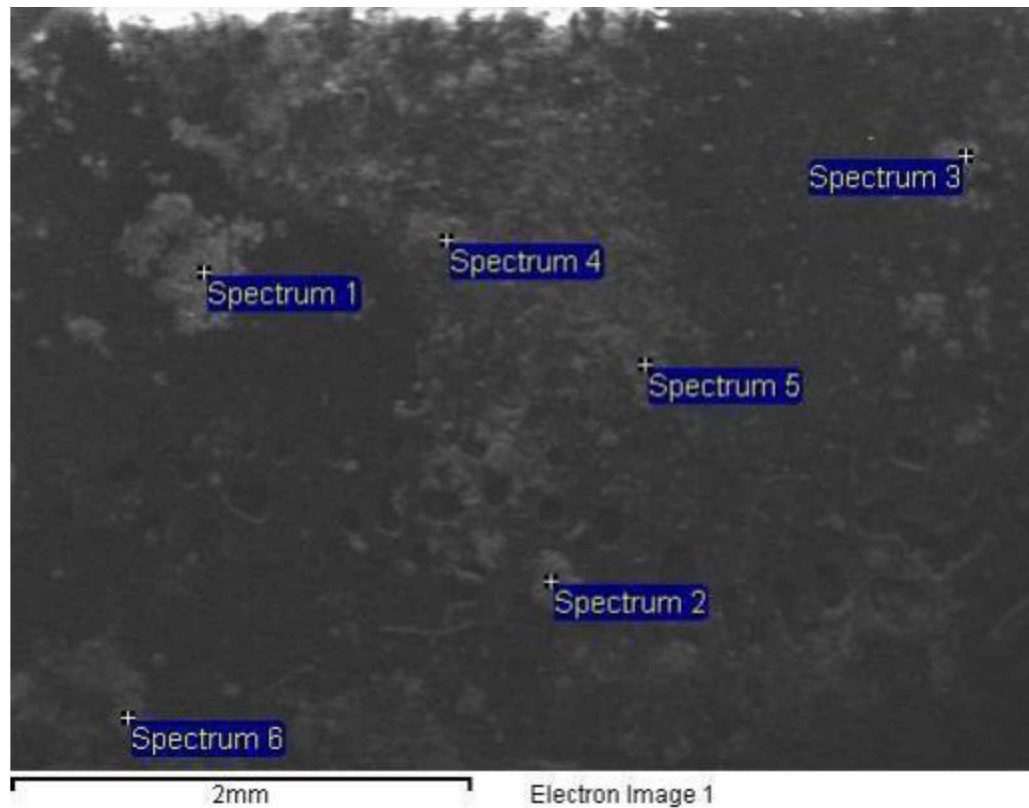


Εικόνα 39: Διάβρωση στο πρόσωπο της συγκόλλησης. [23]



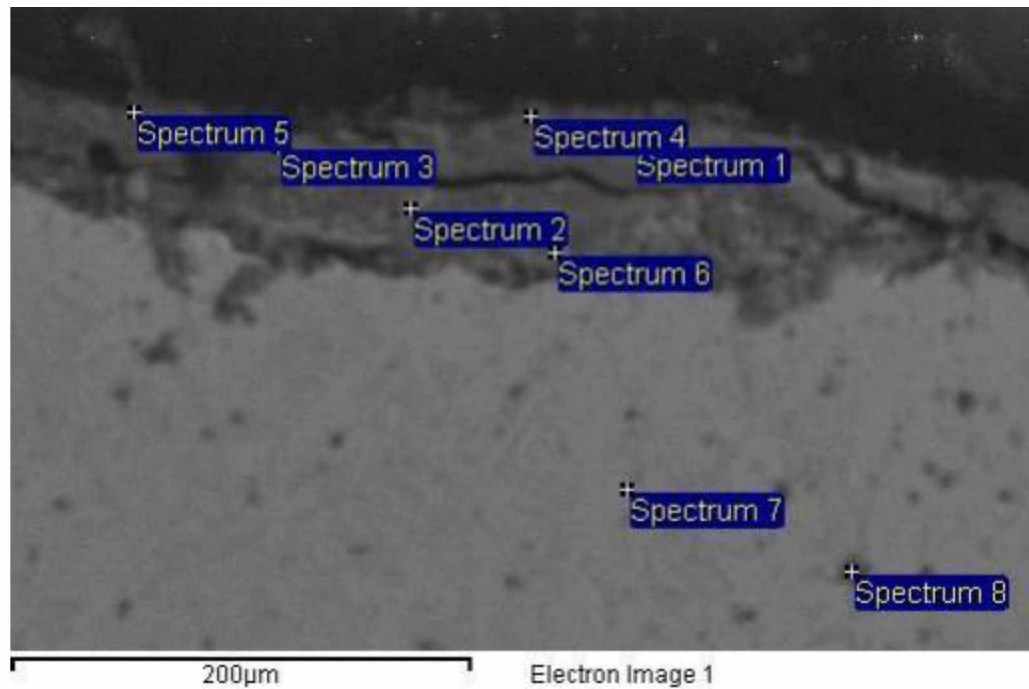
Εικόνα 40: Διάβρωση pitting στην εσωτερική επιφάνεια. [23]

- 3) **Αποτελέσματα της ανάλυσης SEM/EDX:** Η ανάλυση SEM/EDX έγινε πάνω σε:
- Προϊόντα διάβρωσης τα οποία συλλέχθηκαν από την εξωτερική επιφάνεια των συγκολλήσεων. Από αυτό το έλεγχο βρέθηκε η ύπαρξη θείου (εικόνα 41).
 - Συγκεκριμένες περιοχές του μεταλλογραφικού δοκιμίου στην εσωτερική του επιφάνεια(εικόνα 42) και στην εξωτερική του επιφάνεια. Εκτός από οξυγόνο και σίδηρο, βρέθηκαν χλώριο και θείο σε συγκεντρώσεις 0.65%κ.β. και 0.83%κ.β. αντίστοιχα.



Spectrum	O	S	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	66.76	13.90		19.33	100.00
Spectrum 2	61.36	19.28		19.36	100.00
Spectrum 3	57.06	9.03		33.91	100.00
Spectrum 4	69.69	14.04	5.19	11.09	100.00
Spectrum 6	67.75	14.51		17.74	100.00

Εικόνα 41: Ανάλυση SEM/EDX, η οποία έγινε πάνω στα προϊόντα διάβρωσης τα οποία συλλέχθηκαν από την εξωτερική επιφάνεια της γωνιακής σύνδεσης. [23]



Spectrum	O	Si	S	Cl	V	Fe	Total
Spectrum 1	43.62	1.00	3.85	0.50		51.03	100.00
Spectrum 2	47.31	0.43	1.82	0.07		50.37	100.00
Spectrum 3	49.66		5.00			45.34	100.00
Spectrum 4	39.86		4.25			55.89	100.00
Spectrum 5	43.38	1.04	3.62			51.96	100.00
Spectrum 6	43.19	0.62	1.72		0.08	54.39	100.00
Spectrum 7						100.00	100.00
Spectrum 8	20.22					79.78	100.00

Εικόνα 42: Ανάλυση SEM/EDX, η οποία έγινε πάνω στα προϊόντα διάβρωσης τα οποία συλλέχθηκαν από την εσωτερική επιφάνεια του μεταλλογραφικού δοκιμίου. [23]

III. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα έχουμε:

Για την εσωτερική επιφάνεια:

- a) Ομοιόμορφη διάβρωση παρατηρήθηκε στα ευθεία κομμάτια των σωλήνων.
- b) Διάβρωση pitting παρατηρήθηκε στις γωνιακές συνδέσεις των σωλήνων που οφείλεται στην παρουσία χλωρίου.

Για την εξωτερική επιφάνεια:

- a) Η διάβρωση παρατηρείται κυρίως στις περιοχές των συγκολλήσεων αλλά και στις γειτονικές σε αυτές. Η διάβρωσης εμφανίζεται με την μορφή οπών και αυλακώσεων.
- b) Τα προϊόντα διάβρωσης που παραμένουν στην επιφάνεια του σωλήνα εμφανίζουν ένα άσπρο με κίτρινο χρώμα, το οποίο υποδεικνύει το σχηματισμό του FeSO_4
- c) Η ανάλυση EDX των προϊόντων διάβρωσης υποδεικνύει υψηλές συγκεντρώσεις θείου και οξυγόνου.

Οι παραπάνω πληροφορίες υποδεικνύουν ότι ο μηχανισμός της διάβρωσης είναι η διάβρωση σημείου δρόσου εξαιτίας του H_2SO_4 , το οποίο σχηματίστηκε από την αντίδραση του SO_3 με τον υδρατμό στην επιφάνεια των σωλήνων σε μία θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου δρόσου του H_2SO_4 ($120^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$).

Το πρόβλημα της διάβρωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας καλύτερης ποιότητας καύσιμο με λιγότερο θείο και υγρασία. Η συγκέντρωση του H_2SO_4 μπορεί να αποφευχθεί κρατώντας την θερμοκρασία του μετάλλου στους σωλήνες του ανακυκλωτή πάνω από το σημείο δρόσου του H_2SO_4 .

4.4 Case study 2 – Αστοχίας σωλήνων ατμού λόγω διάβρωσης [24]

I. Εισαγωγή

Το δεύτερο case study αφορά την μελέτη αστοχίας σωλήνων ατμού, οι οποίοι υπέστησαν διάβρωση pitting στην εσωτερική τους επιφάνεια. Οι σωλήνες ανήκουν σε λέβητα κορεσμένου ατμού πίεσης 2.3-3 bar.

Τα δύο δοκίμια των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη έρευνα φαίνονται στην εικόνα 43. Το υλικό του σωλήνα είναι ανθρακούχος χάλυβας.



Εικόνα 43: Τα δοκίμια των σωλήνων. [24]

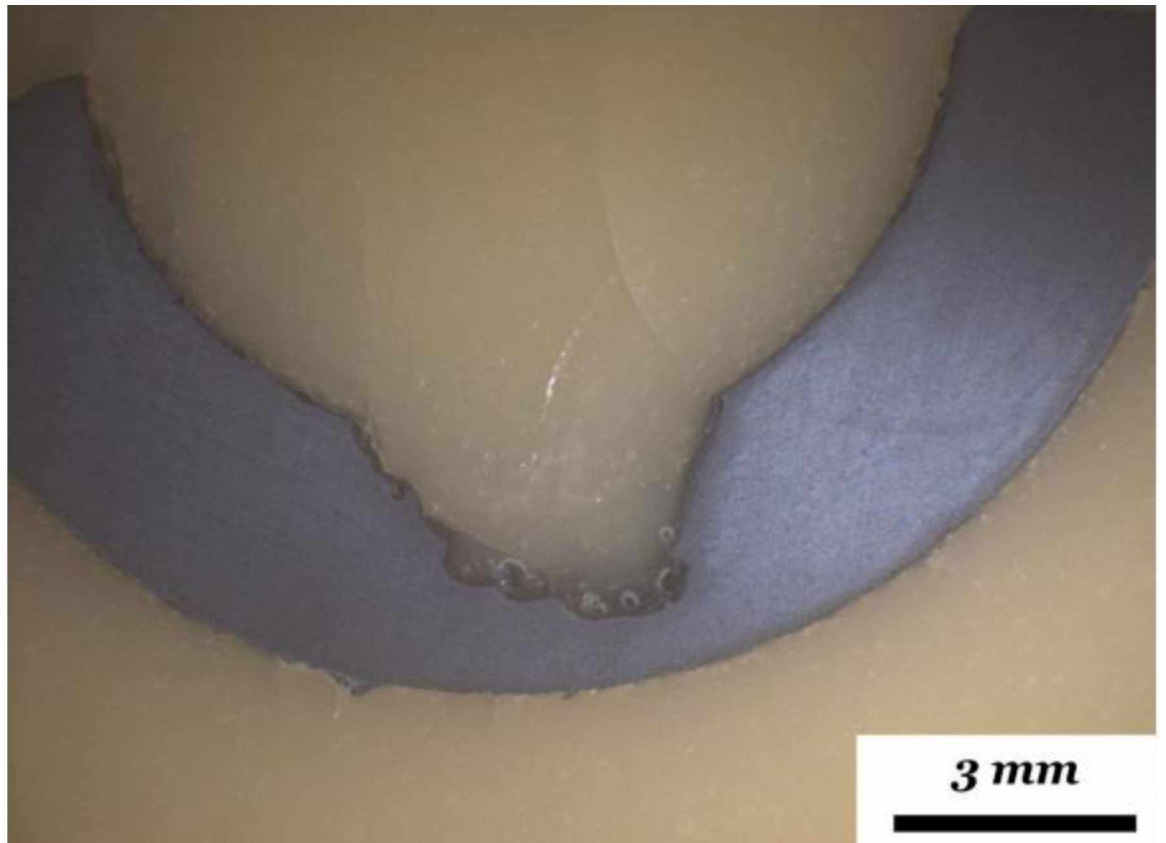
II. Αποτελέσματα

- 1) **Αποτελέσματα οπτικού ελέγχου:** Το εσωτερικό του σωλήνα φαίνεται στην εικόνα 44. Στην εικόνα αυτή φαίνονται διάφορες μεγάλες και βαθιές οπές (pits). Παρατηρήθηκε επίσης ότι υπάρχουν δύο τύποι οξειδίων εξαιτίας των διαφορετικών χρωμάτων που φαίνονται. Ο γκριζο-άσπρος μαγνητίτης (Fe_3O_4) και κόκκινος και καφέ αιματίτης (Fe_2O_3) με υδροξείδια.

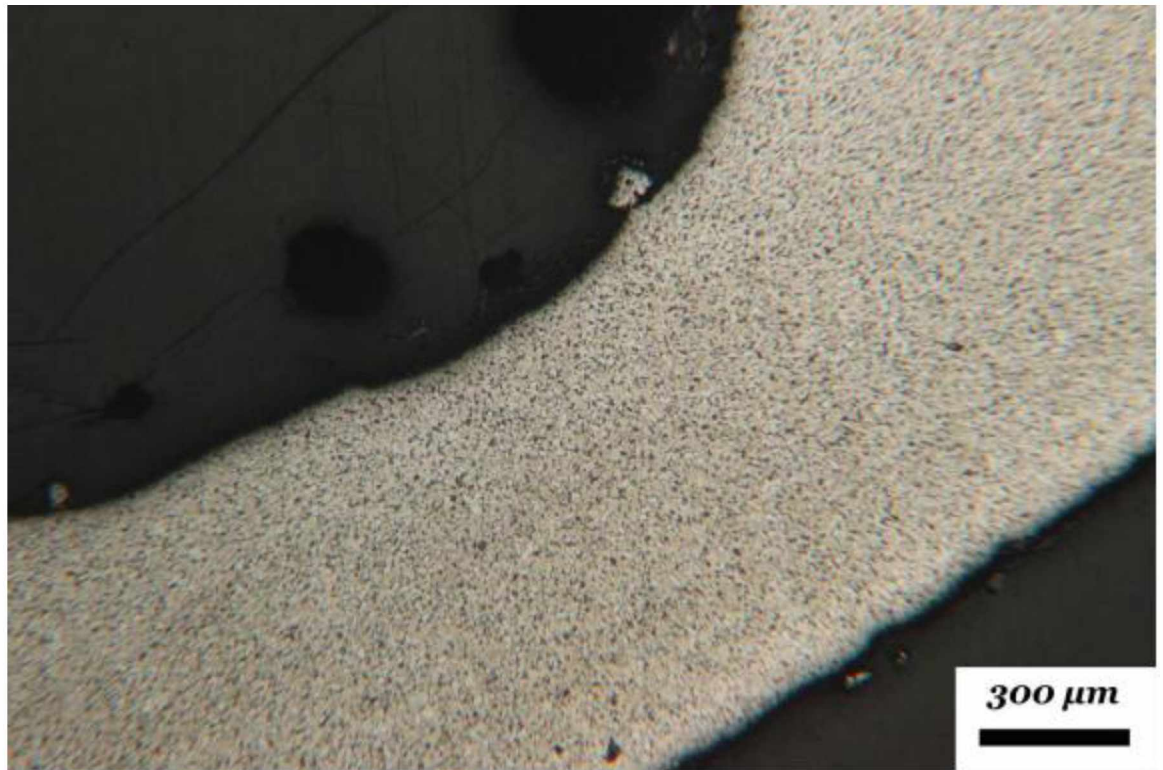


Εικόνα 44: Εσωτερική επιφάνεια σωλήνα. [24]

- 2) **Αποτελέσματα μεταλλογραφίας:** Το εγκάρσια κομμένο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την ανάλυση φαίνεται στην εικόνα 45. Σε αυτή την εικόνα φαίνεται και η οπή (pit), της οποίας το βάθος φτάνει το 1.5 mm. Το κάτω μέρος της οπής φαίνεται στην εικόνα 46. Σε αυτές τις εικόνες παρατηρήθηκε και ένα στρώμα οξειδίου. Η μικροδομή του υλικού είναι φερριτική-περλιτική.

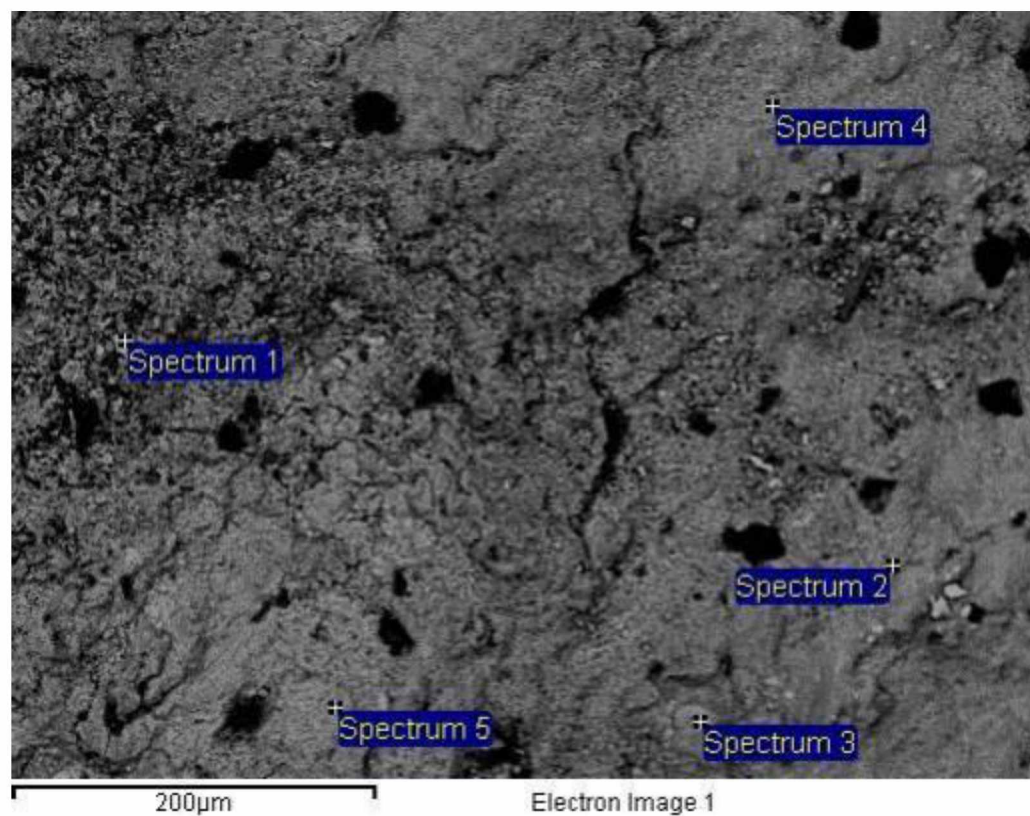


Εικόνα 45: Το εγκάρσια κομμένο δοκίμιο για την μεταλλογραφική ανάλυση. [24]



Εικόνα 46: Το κάτω μέρος της οπής. [24]

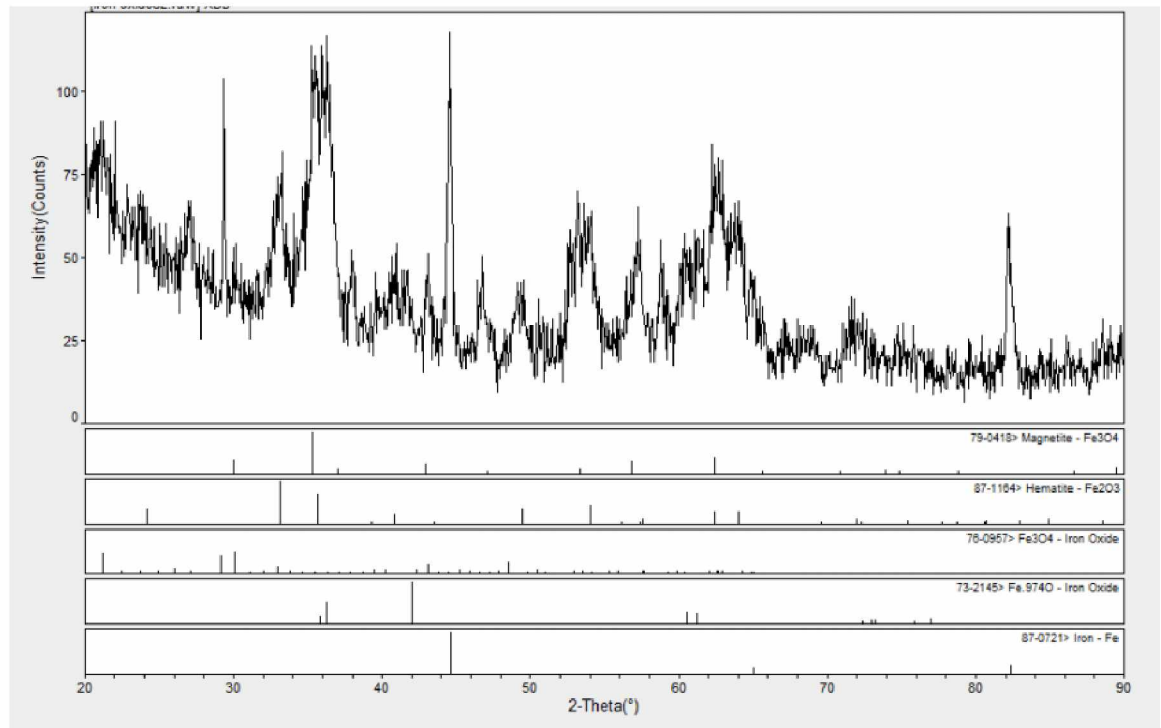
- 3) **Αποτελέσματα της ανάλυσης SEM/EDX:** Η ανάλυση SEM/EDX έγινε πάνω στην επιφάνεια των οπών (pits). Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 47 και υποδεικνύουν την παρουσία οξειδίων του σιδήρου.



Spectrum	O	Fe
Spectrum 1	26.50	73.50
Spectrum 2	48.57	51.43
Spectrum 3	44.55	55.45
Spectrum 4	48.29	51.71
Spectrum 5	50.08	49.92

Εικόνα 47: Ανάλυση EDX στην επιφάνεια της οπής. [24]

- 4) **Αποτελέσματα της ανάλυσης XRD:** Η ανάλυση XRD πραγματοποιήθηκε στην εσωτερική επιφάνεια των σωλήνων κοντά στις περιοχές των οπών και υποδεικνύει την παρουσία FeO και Fe_2O_3 , επιπροσθέτως με την παρουσία του προστατευτικού μαγνητίτη Fe_3O_4 . Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 48.



Εικόνα 48: Ανάλυση XRD στην εσωτερική επιφάνεια των σωλήνων κοντά στις περιοχές των οπών. [24]

III. Συμπεράσματα

Η παρουσία του αιματίτη (Fe₂O₃) και των οξειδίων του σιδήρου (FeO) υποδεικνύουν ότι η διάβρωση pitting δημιουργήθηκε λόγω του διαλυμένου οξυγόνου, σε μεγαλύτερες από τις επιτρεπτές τιμές. Η τοπική μορφή της διάβρωσης προήλθε εξαιτίας της διάλυσης του συνεχούς προστατευτικού στρώματος του μαγνητίτη (Fe₃O₄), παράγοντας θερμικές τάσεις ή διαφοροποιήσεις στο φορτίο. Συνοψίζοντας το αίτιο της αστοχίας είναι η επίθεση οξυγόνου.

Αυτό το πρόβλημα της διάβρωσης μπορεί να αντιμετωπιστεί ελέγχοντας αν το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό τροφοδοσίας είναι κάτω από τις αποδεκτές τιμές (30 ppb) και αν είναι να αφαιρεθεί με τη χρήση απαεριωτών οι μεμβρανών διαστολής.

4.5 Case study 3 - Αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή λέβητα [25]

I. Εισαγωγή

Το τρίτο case study αφορά την αστοχία λόγω διάβρωσης των σωλήνων ανακυκλωτή λέβητα. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα φαίνεται στην εικόνα 49. Το υλικό του σωλήνα είναι χάλυβας ASTM A106Gr. B διαμέτρου 4''.



Εικόνα 49: Το δοκίμιο του σωλήνα. [25]

II. Αποτελέσματα

- 1) **Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης:** Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του σωλήνα του ανακυκλωτή φαίνονται στον πίνακα 6, όπως και οι απαιτήσεις της σχετικής προδιαγραφής ASTM. Το υλικό του σωλήνα ικανοποιεί τις απαιτήσεις της προδιαγραφής.

Πίνακας 6: Χημική ανάλυση σωλήνα ανακυκλωτή.

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Al	Ni
	0.15	0.22	1.19	<0.01	0.01	0.03	0.14	0.02	0.06
ASTM A106 Gr.B.	0.30 max	0.1 min	0.29-1.06	0.035 max	0.035 max	0.40 max	0.40 max	-	0.40 max

- 2) **Αποτελέσματα οπτικού ελέγχου:** Τα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου φαίνονται στις εικόνες 50-53. Η διαρροή προήλθε από μία οβάλ τρύπα με διαστάσεις 12x6 mm, της οποίας ο κύριος άξονας είναι παράλληλος στο άξονα του σωλήνα (Εικόνα 50). Το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα από την πλευρά της εξωτερικής διαμέτρου έχει μειωθεί (Εικόνα 51). Μία παχιά επίστρωση έχει σχηματιστεί στην εξωτερική διάμετρο του σωλήνα (2-4.5 mm), εξωτερικά της περιοχής της διαρροής (Εικόνα 52). Αυτή η περιοχή δεν εμφανίζει προϊόντα διάβρωσης, εξαιτίας της απομάκρυνσής τους από τον ατμό (Εικόνα 53).



Εικόνα 50: Περιοχή διαρροής στο σωλήνα του ανακυκλωτή. [25]



Εικόνα 51: Εγκάρσια κομμένο δοκίμιο κοντά στη διαρροή, όπου φαίνεται η μείωση πάχους τοιχώματος σωλήνα. [25]

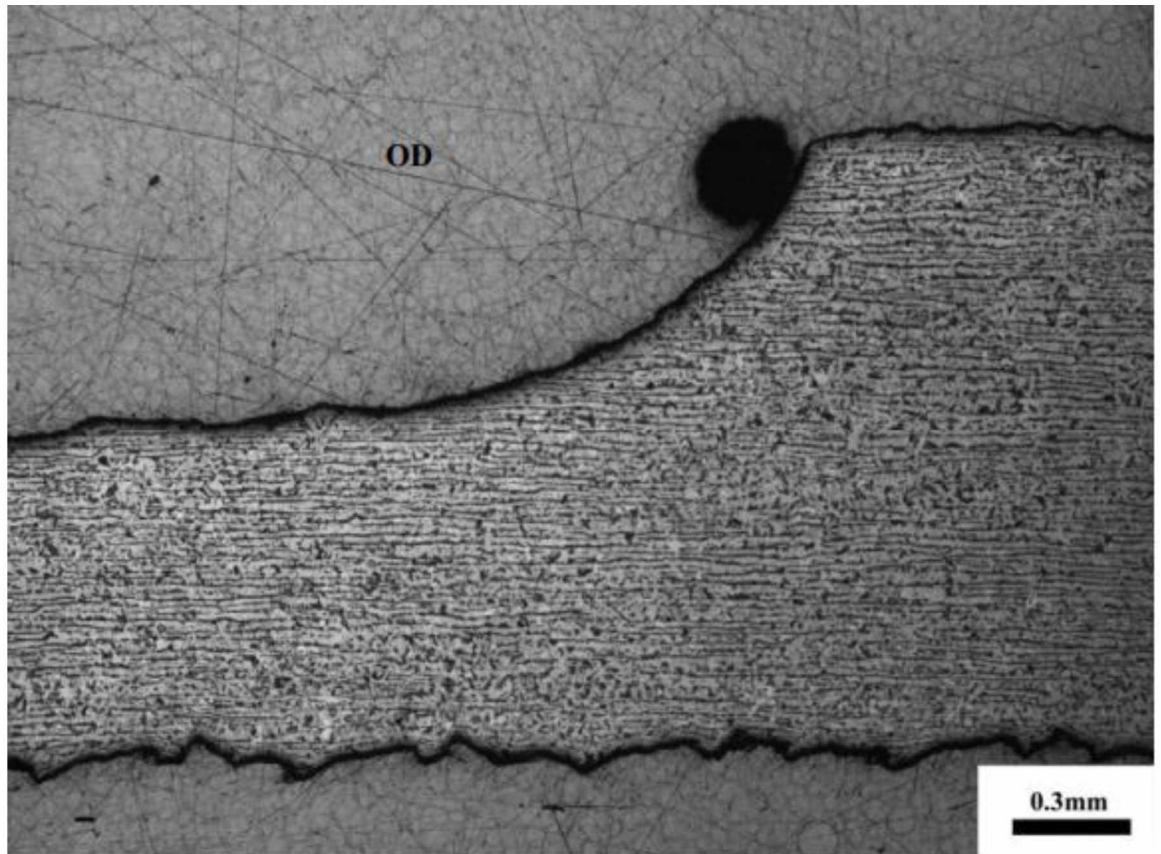


Εικόνα 52: Η επίστρωση με πάχος 2-4.5 mm που έχει σχηματιστεί στην εξωτερική διάμετρο του σωλήνα. [25]

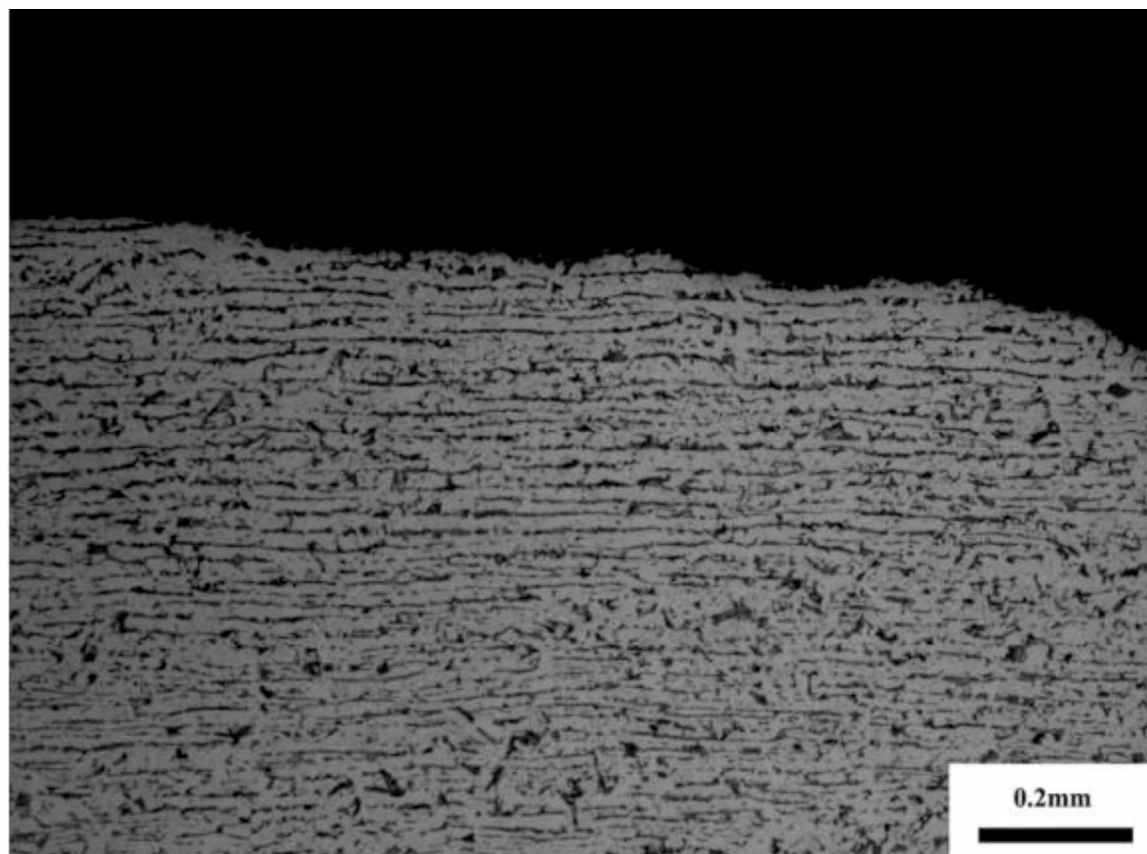


Εικόνα 53: Η περιοχή δίπλα στη διαρροή, η οποία δεν εμφανίζει προϊόντα διάβρωσης. [25]

- 3) **Αποτελέσματα μεταλλογραφίας:** Ένα εγκάρσια κομμένο μεταλλογραφικό δοκίμιο, κοντά στην περιοχή της διαρροής αναλύθηκε και τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες 54-55. Η μικροδομή του αποτελείται από φερρίτη και περλίτη. Παρατηρείται μεγάλη μείωση του πάχους από την πλευρά της εξωτερικής διαμέτρου (Εικόνα 54). Μία επιλεκτική επίθεση στην φερριτική φάση, η οποία υποδεικνύει ηλεκτρολυτική διάβρωση φαίνεται στην εικόνα 55.

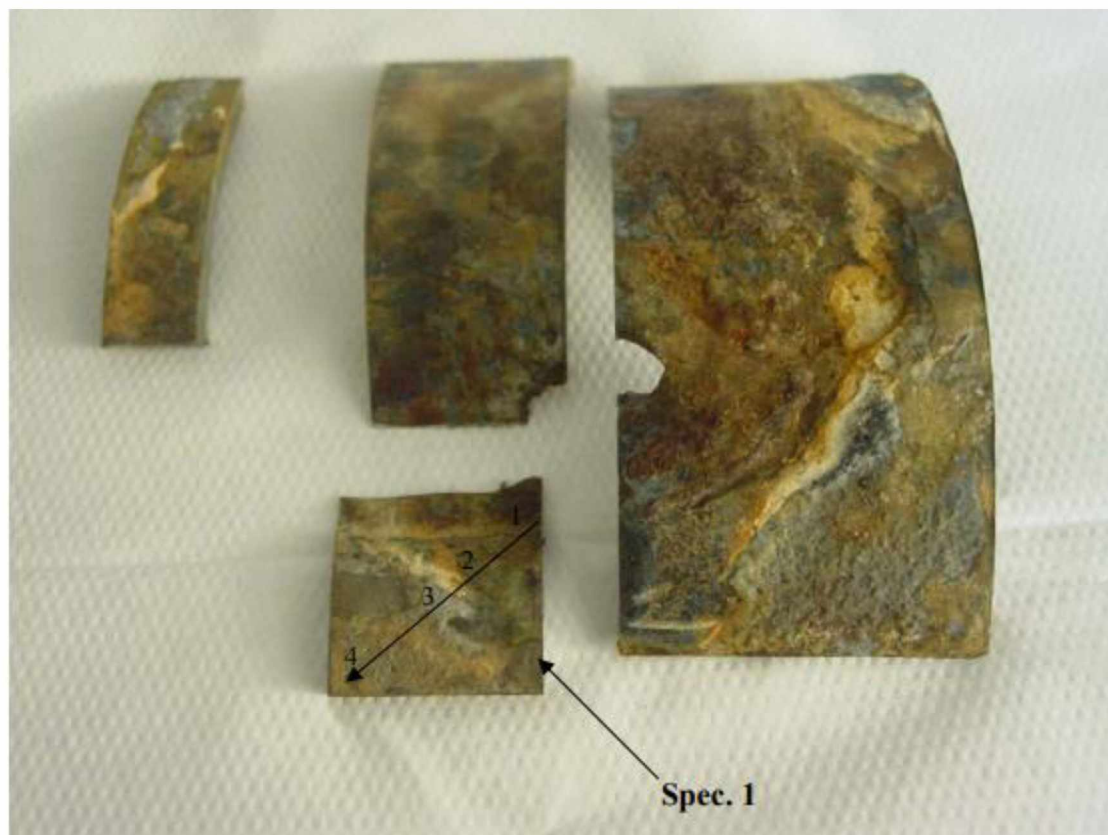


Εικόνα 54: Εγκάρσια κομμένο δοκίμιο κοντά στην περιοχή διαρροής του σωλήνα, που υποδεικνύει την μείωση του πάχους του. [25]



Εικόνα 54: Εγκάρσια κομμένο δοκίμιο κοντά στην περιοχή διαρροής του σωλήνα, που υποδεικνύει την ηλεκτρολυτική διάβρωση της φερριτικής φάσης.
[25]

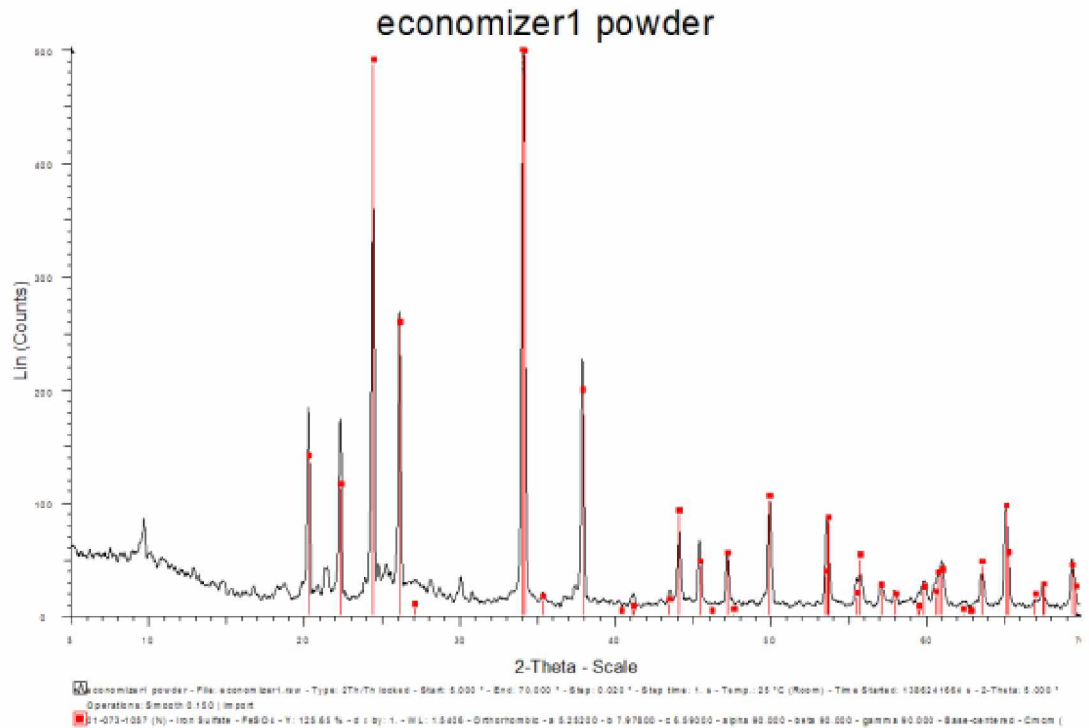
- 4) **Αποτελέσματα της ανάλυσης SEM/EDX:** Η ανάλυση SEM/EDX πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο που φαίνεται στην εικόνα 55, δηλαδή από το δοκίμιο που αφαιρέθηκε από την επιφάνεια του σωλήνα, κοντά στην περιοχή της διαρροής. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν παρουσία Na, V, S, O, Fe, Al και Cl.



Element	Weight%			
	1	2	3	4
O K	43.37	35.49	32.32	38.51
Na K	1.06	-	-	-
Al K	1.32	1.09	-	-
Si K	0.92	1.40	0.70	-
P K	0.43	-	-	-
S K	8.11	6.20	4.56	17.36
Cl K	-	-	1.24	-
Ca K	0.51	-	-	-
V K	1.09	1.88	0.57	-
Mn K	0.52	-	0.69	-
Fe K	42.68	53.95	59.93	44.13
Totals	100.00	100.00	100.00	100.00

Εικόνα 55: Ανάλυση SEM/EDX στο δοκίμιο που αφαιρέθηκε από την επιφάνεια του σωλήνα, κοντά στην περιοχή της διαρροής. [25]

- 5) **Αποτελέσματα της ανάλυσης XRD:** Η ανάλυση XRD πραγματοποιήθηκε στην επιφάνεια που συλλέχθηκε από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα του ανακυκλωτή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 56. Το κύριο προϊόν διάβρωσης είναι ο FeSO_4 .



Εικόνα 56: Ανάλυση XRD στην επιφάνεια που συλλέχθηκε από την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα του ανακυκλωτή. [25]

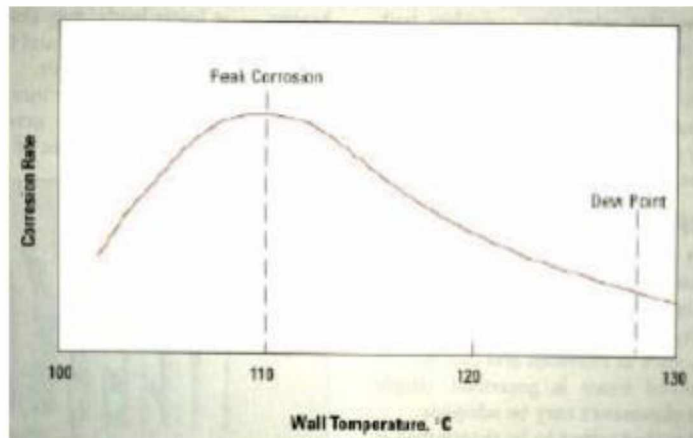
III. Συμπεράσματα

Δύο είναι τα πιθανά σενάρια αστοχίας του λέβητα: 1) Η διάβρωση τέφρας άνθρακα και 2) Η όξινη διάβρωση.

Η ανάλυση SEM/EDX που πραγματοποιήθηκε σε όλα τα επίπεδα της επίστρωσης υποδεικνύει την παρουσία Na, V και S. Το Na όμως δεν υπάρχει στα ανώτερα επίπεδα, ενώ ο σίδηρος είναι παρών σε όλα. Με αυτό τον τρόπο αποκλείεται η αστοχία να προήλθε από διάβρωση τέφρας άνθρακα, διότι δεν υπάρχει αρκετό Na για να υποστηρίξει το σχηματισμό σουλφιδίων (SO_4^{2-}) και

πυροσφικτών ($[S_2O_7]_2^-$), τα οποία είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση τέφρας άνθρακα.

Η παρουσία του Fe σε όλα τα επίπεδα της επίστρωσης μαζί με την παρουσία S και O υποδεικνύει ότι τα προϊόντα διάβρωσης περιέχουν Fe, S και O. Η ανάλυση XRD στην επίστρωση υποδεικνύει την παρουσία $FeSO_4$ το οποίο είναι το προϊόν διάβρωσης του χάλυβα με το θειικό οξύ (H_2SO_4). Η μεταλλογραφική ανάλυση υποδεικνύει ηλεκτρολυτική διάβρωση, η οποία σχετίζεται με το σενάριο της όξινης διάβρωσης. Για να συμβεί, όξινη διάβρωση, θα πρέπει η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα να είναι κάτω από το όξινο σημείο δρόσου. Επιπλέον κατά την καύση το S μετατρέπεται σε SO_2 . Ένα μέρος του SO_2 μετατρέπεται σε SO_3 (αυτή η μετατροπή καταλύεται από V_2O_5 και από Fe_2O_3 , που και τα δύο εμφανίζονται στα επίπεδα της επίστρωσης). Το SO_3 αντιδρά με τους υδρατμούς στο καυσαέριο και σχηματίζει θειικό οξύ (H_2SO_4), αν η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα είναι χαμηλότερη από το όξινο σημείο δρόσου. Στη όξινη διάβρωση, ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 57. Ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης εμφανίζεται σε θερμοκρασία $20^\circ C$ χαμηλότερη από το όξινο σημείο δρόσου. Η θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνα καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του νερού εισόδου και όχι από τη θερμοκρασία του αερίου. Η διαρροή εμφανίστηκε στο πρώτο σωλήνα του ανακυκλωτή οποίος είχε τη χαμηλότερη θερμοκρασία τοιχώματος.



Εικόνα 57: Ο ρυθμός διάβρωσης ως εξάρτηση της θερμοκρασίας τοιχώματος του σωλήνα. [25]

Επομένως το αίτιο της αστοχίας είναι όξινη διάβρωση εξαιτίας του σχηματισμού θειικού οξέος (H_2SO_4). Οι κύριοι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό ήταν η χαμηλή θερμοκρασία του νερού εισόδου (που οδηγεί σε χαμηλή θερμοκρασία του

τοιχώματος του σωλήνα, κάτω από το σημείο δρόσου) και η παρουσία του V_2O_5 το οποίο καταλύει το σχηματισμού του SO_2 σε SO_3 .

4.6 Case study 4 -Αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα υπερθερμαντήρα λέβητα. [8]

I. Εισαγωγή

Το τέταρτο case study αφορά την αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα υπερθερμαντήρα λέβητα.

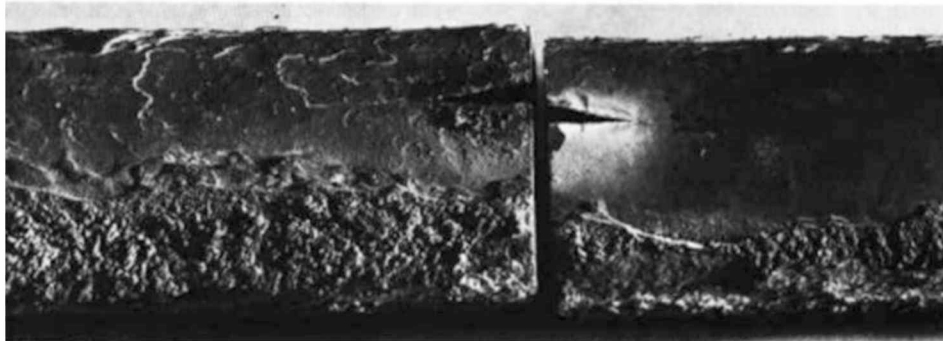
Ο σωλήνα αποτελείται από σωλήνωση φερριτικού χάλυβα με διάμετρο 64 mm και πάχος τοιχώματος 5.6 mm και από σωλήνωση ωστενιτικού ανοξείδωτου χάλυβα με διάμετρο 64 mm και πάχος τοιχώματος 3.4 mm. Η διάβρωση εμφανίστηκε στη σωλήνωση του φερριτικού χάλυβα κοντά στη συγκόλληση.

Η σωλήνωση φερριτικού χάλυβα είναι κατασκευασμένη από 25Cr-1Mo χάλυβα, ενώ η σωλήνωση ωστενιτικού χάλυβα είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου 321.

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του σωλήνα κατά της περίοδο της αστοχίας κυμαίνονταν μεταξύ των 620 °C και των 695 °C, η οποία είναι αρκετά υψηλότερη από τη θερμοκρασία που κυμαίνονταν πριν την αστοχία (520 °C – 540°C).

II. Αποτελέσματα

Η πάνω επιφάνεια του σωλήνα στην περιοχή της αστοχίας (τμήμα φερριτικού χάλυβα) δεν είχε επικαθήσεις, αλλά στις πλευρικές και στην κάτω επιφάνεια υπήρχε υψηλή συγκέντρωση κόκκινων και άσπρων επικαθίσεων (Εικόνα 58). Το τμήμα του ωστενιτικού χάλυβα δεν είχε επικαθήσεις, αλλά εμφάνισε κάποια σημάδια pitting corrosion.



Εικόνα 58: Σωλήνας υπερθεμαντήρα λέβητα που αστόχησε λόγω διάβρωσης ιπτάμενης τέφρας (coal ash corrosion) [8]

Η ανάλυση φασματογραφίας υποδεικνύει ότι το φερριτικό τμήμα του σωλήνα αποτελείται από 2.1% Cr και 1.1% Mo

Οι άσπρες επικαθήσεις είναι θειικό νάτριο κάλιο [(Na,K)SO₄], το οποίο περιέχει 3% θειικό αλκαλικό οξύ [(Na,K)HSO₄]. Οι κόκκινες επικαθίσεις αποτελούνται από κυρίως από Fe₂O₃, αλλά και από 5% SiO₂, 2% Al₂O₃ και 0.5% Cr₂O₃. Η επίθεση του χάλυβα από το θειικό αλκαλικό οξύ, το οποίο έχει χαμηλό σημείο τήξης, μείωσε το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα και έτσι παράχθηκαν οι κόκκινες επικαθίσεις. Αυτό το είδος διάβρωσης δημιουργεί μεγάλο πρόβλημα στους χάλυβες Cr-Mo σε θερμοκρασίες από 595 μέχρι 705 °C. Αν και ο ανοξειδωτός χάλυβας είναι επιρρεπής σε αυτό το είδος διάβρωσης, η επίδραση είναι πιο αργή, και μόνο ένα μικρό ποσοστό της μείωσης του πάχους του σωλήνα εντοπίστηκε στο τμήμα του ανοξειδωτού χάλυβα.

Τα αρχεία λειτουργίας υπέδειξαν δύο πιθανές αιτίες διάβρωσης. Την αύξηση στη θερμοκρασία λειτουργίας και τη χρήση γαιάνθρακα με θερμοκρασία τέφρας 28

°C, η οποία είναι χαμηλότερη από την φυσιολογική που υπήρχε προηγουμένως. Η χρήση αυτού του γαιάνθρακα δημιούργησε συνθήκες σκουριάς στο λέβητα.

Ο διαχωρισμός του σωλήνα στην περιοχή της αστοχίας υπέδειξε ότι η επίθεση του θειικού αλκαλικού οξέος οδήγησε στη μείωση του πάχους του τοιχώματος του σωλήνα. Η μεταλλογραφική ανάλυση αποκαλύπτει μια μικροδομή, η οποία είναι φυσιολογική σε γενικές γραμμές, με εξαίρεση κάποια καρβίδια.

III. Συμπεράσματα

Η αστοχία του σωλήνα αποδίδεται στη μείωση του πάχους του τοιχώματος του εξαιτίας της διάβρωσης τέφρας. Η διάβρωση επιταχύνθηκε και από τη αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και μπορεί να επηρεάστηκε και από την προσωρινή χρήση γαιάνθρακα κατώτερου βαθμού.

Οι γειτονικοί σωλήνες, η οποίοι επίσης υπέστησαν μείωση του πάχους τους, ενισχύθηκαν με μεμονωμένες συγκολλήσεις. Ασπίδες ανοξειδωτού χάλυβα τύπου 304 προστέθηκαν στα τμήματα των ανοξειδωτων χαλύβων με συγκόλληση και συνδέθηκαν με τα τμήματα του σωλήνα με χάλυβα Cr-Mo με χαλύβδινες ταινίες. Αυτές οι ασπίδες προορίζονταν ως ένα προσωρινό τέχνασμα εναντίον της διάβρωσης τέφρας γαιάνθρακα και όχι ως μόνιμη λύση. Επειδή οι ασπίδες δεν θα ψυχρανθούν από τη ροή του ατμού, η θερμοκρασία τους θα είναι κοντά στους 705 °C, η οποία είναι η μέγιστη θερμοκρασία της διάβρωσης τέφρας γαιάνθρακα και έτσι αναμένεται μεγάλη μείωση του προβλήματος.

4.7 Case study 5 – Αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα λέβητα [8]

I. Εισαγωγή

Το πέμπτο case study αφορά την αστοχία λόγω διάβρωσης ενός σωλήνα λέβητα. Το υλικό του σωλήνα είναι ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 316 με εξωτερική διάμετρο 19 mm και πάχος τοιχώματος 1.7 mm. Ο συγκεκριμένος σωλήνας λειτουργούσε για 5 με 6 χρόνια, μέχρι που αστόχησε. Ο σωλήνας ήταν θαμμένος, χωρίς κάλυμμα σε αμμώδες και καυστικό έδαφος. Ο σωλήνας μετέφερε συμπύκνωμα ατμού στους 120 °C. Το συμπύκνωμα και το νερό του λέβητα δεν είχαν υποστεί καμία χημική επεξεργασία. Δύο δοκίμια του σωλήνα με συνολικό μήκος 330 mm χρησιμοποιήθηκαν για εργαστηριακή ανάλυση για την εύρεση του λόγου της αστοχίας.

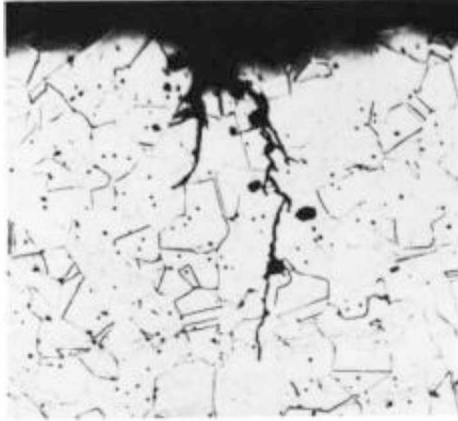
II. Αποτελέσματα

Η εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα δεν παρουσίαζε κάποιο ίχνος διάβρωσης. Όμως, σε ένα από τα δοκίμια υπήρχε μία εγκάρσια ρωγμή, κατά μήκος της άκρης μιας περιοχής που είχε υποστεί pitting με διάμετρο 6.4 mm. Δύο γειτονικές περιοχές εμφάνισαν επίσης εγκάρσιες ρωγμές κατά μήκος της άκρης τους. Οι ρωγμές ήταν ακανόνιστες και είχαν διαπεράσει τελείως το τοίχωμα του σωλήνα. Η περιοχή που είχε υποστεί pitting, όπως και οι ρωγμές προήλθαν από SCC το οποίο προήλθε από την εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Το πρόβλημα δεν φαίνεται να είχε καμία σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον του σωλήνα.

Η εσωτερική επιφάνεια, η οποία ήταν καλυμμένη με μία καφέ κλίμακα σκόνης, ήταν ελαφρώς τραχιά και περιείχε μικρές οπές. Κάποιες ρωγμές προήλθαν από τις οπές στην εσωτερική επιφάνεια αλλά δεν διαπέρασαν εντελώς το τοίχωμα του σωλήνα (εικόνα 59). Οι ρωγμές κινούνταν εγκάρσια στα όρια των κόκκων και είχαν διακλαδώσεις, το οποίο είναι πολύ χαρακτηριστικό για SCC σε ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα που περιέχει Cl.

Για να γίνει έλεγχος για Cl το εσωτερικό του σωλήνα πλύθηκε με αποσταγμένο νερό, και το πλυμένο νερό συγκεντρώθηκε σε ένα καθαρό δοχείο. Μερικές σταγόνες διαλύματος νιτρικού αργύρου (AgNO_3) προστέθηκαν στο ξεπλυμένο νερό το οποίο θόλωσε λίγο εξαιτίας του σχηματισμού αδιάλυτου χλωριούχου αργύρου

(AgCl). Αυτό ο έλεγχος υπέδειξε ότι υπήρχε μια αρκετά μεγάλη συγκέντρωση Cl μέσα στο σωλήνα.



Εικόνα 59: Περιοχή του σωλήνα του λέβητα που αστόχησε από SCC. [8]

III. Συμπεράσματα

Ο σωλήνας αστόχησε από SCC, η οποία προήλθε από Cl. Το Cl στο συμπύκνωμα ατμού προκάλεσαν διάβρωση και pitting στο εσωτερικό του σωλήνα. Η τάση προήλθε όταν ο σωλήνας υπέστη λυγισμό κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης.

Επεξεργασία του νερού πρέπει να γίνει για να αφαιρεθούν το Cl από το σύστημα. Επίσης, πρέπει να διατηρείται συνεχόμενη ροή σε ολόκληρο το σύστημα για να αποφευχθεί η συγκέντρωση Cl. Δεν πρέπει να επιτρέπεται ακόμα να παραμένει νερό που περιέχει Cl στο σύστημα κατά την περίοδο των shutdowns. Ο λυγισμός του σωλήνα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης πρέπει να αποφεύγεται, για να μειωθούν και οι παραμένουσες τάσεις.

Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε το θέμα της διάβρωσης λεβήτων. Κάνοντας μία επισταμένη μελέτη στα συγγράμματα που επεξεργάζεται το θέμα, παρατέθηκαν περιληπτικά οι λέβητες, τα βασικά καθώς και κοινά μέρη των λεβήτων και των οργάνων τους, η διάβρωση γενικά ως φαινόμενο, τα είδη της, η διάβρωση των λεβήτων καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισης της. Τέλος παρουσιάζονται και έξι case studies με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της διάβρωσης στους λέβητες.

Σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία:

- I. Το κυριότερο υλικό κατασκευής του λέβητα πρέπει να είναι ο χάλυβας και πιο σπάνια ο χυτοσίδηρος, ο χαλκός και το αλουμίνιο.
- II. Η κατασκευαστική διαμόρφωση του λέβητα παίζει σημαντικό ρόλο για να μην υπάρξει πρόβλημα διάβρωσης.
- III. Η διάβρωση εμφανίζεται κυρίως στους σωλήνες του λέβητα (υπερθερμαντήρας, ανακυκλωτής κλπ.).
- IV. Τα κύρια είδη διάβρωσης που εμφανίζονται στο λέβητα είναι επίθεση οξυγόνου (oxygen attack), η επίθεση διοξειδίου του άνθρακα (carbon dioxide attack) και η όξινη διάβρωση (acidic corrosion).
- V. Η συνέπειες της διάβρωσης στο λέβητα αφορούν την απόδοση του, την διάρκεια ζωής του και τέλος τα κόστη που πρέπει να δαπανηθούν στην συνέχεια για την αντιμετώπιση του προβλήματος.
- VI. Η μέθοδος της απαερίωσης και των μεμβρανών διαστολής είναι πολύ χρήσιμες για την αντιμετώπιση της επίθεσης οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα.
- VII. Η μέθοδος επεξεργασίας του νερού είναι πολύ χρήσιμη για την αντιμετώπιση όλων των ειδών διάβρωσης στο λέβητα.
- VIII. Πρέπει να γίνεται διαρκής έλεγχος στους λέβητες για τυχόν προβλήματα διάβρωσης, ώστε να μπορέσουν αντιμετωπιστούν εγκαίρως και να μην προκύψει πρόβλημα στην παραγωγή.

Βιβλιογραφία

- 1) Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς. Καυστήρες – Λέβητες, εκδόσεις του συλλόγου Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος.
- 2) Β.Α. Σωτηρόπουλος. Ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις (Λέβητες), εκδόσεις Σύγχρονη παιδεία.
- 3) Υφαντής Δ.Κ. Υλικά: Διάβρωση και προστασία, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 4) Σκουλικίδης Θ. Βασιλείου Π. “Διάβρωση και Προστασία Υλικών”, Β’ Έκδοση, Συμεών, Αθήνα, 2000.
- 5) Κουλουμπή Νίκη. Διάβρωση και προστασία, Ε.Μ.Π , Αθήνα, 1994.
- 6) Lloyd’s List events Conference. Prevention and management of marine corrosion, London, 2003.
- 7) Δανιήλ Γ.Φ., Μιμηκόπουλου Κ.Η.. Ναυτικοί Ατμολέβητες, Εκδόσεις Ευγενιδείου Ιδρύματος, Αθήνα, 2006.
- 8) ASM Metal Handbook Volume 11 – Failure Analysis and Prevention
- 9) ASM Metal Handbook Volume 13 – Corrosion
- 10) ASM Metal Handbook Volume 13A – Corrosion Fundamentals, Testing and Protection
- 11) Kobra Pourabdollah. Fouling formation and under deposit corrosion of boiler firetubes. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9 (1), 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104552>

- 12) Y.-S. Kim, W.-C. Kim, J.-G. Kim. Bulging rupture and caustic corrosion of a boiler tube in a thermal power plant. *Engineering Failure Analysis*, 104:560-567, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.022>
- 13) Andrei Dedov, Ivan Klevtsov, Toomas Lausmaa, Tatjana Bojarinova. High temperature corrosion and remaining lifetime assessment of ferritic steel 13CrMo4-4 tubes in a convective superheater of a CFB oil shale boiler. *Corrosion Science*, 164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108311>
- 14) Fatemeh Mahdizadeh, Mohammadreza Eskandarian. Glucose oxidase and catalase co-immobilization on biosynthesized nanoporous SiO₂ for removal of dissolved oxygen in water: Corrosion controlling of boilers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4):2378-2383, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.016>
- 15) Jing Zhou, Jun Xiang, Sheng Su, Song Hu, Yi Wang, Kai Xu, Jun Xu, Limo He, Peng Ling, Meng Zhu. Key issues and practical design for cooling wall of supercritical carbon dioxide coal-fired boiler. *Energy*, 186, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.164>
- 16) Abhradip Pal, Chandan Das. A novel use of solid waste extract from tea factory as corrosion inhibitor in acidic media on boiler quality steel. *Industrial Crops and Products*, 151, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112468>
- 17) Jie Qiu, Angjian Wu, Yanhui Li, Yi Xu, Raluca Scarlat, Digby D. Macdonald. Galvanic corrosion of Type 316L stainless steel and Graphite in molten fluoride salt. *Corrosion Science*, 170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108677>
- 18) Dorota Bankiewicz, Emil Vainio, Patrik Yrjas, Leena Hupa, Grzegorz Lisak. Application of bipolar electrochemistry to accelerate dew point corrosion for screening of steel materials for power boilers. *Fuel*, 265, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116886>
- 19) Pavel Cuda, Petr Pospisil, Jaroslava Tenglerova. Reverse osmosis in water treatment for boilers. *Desalination*, 198 (1-3):41-46, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.007>
- 20) J.H Bulloch, E. Rochford. In-service electrochemical potential data in a deaerator feedwater storage vessel; the influence of a noble metal coating. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77 (8):485-499, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(00\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(00)00040-5)
- 21) Mohtada Sadrzadeh, Javad Hajinasiri, Subir Bhattacharjee, David Pernitsky. Nanofiltration of oil sands boiler feed water: Effect of pH on water flux and organic and dissolved solid rejection. *Separation and Purification Technology*, 141:339-353, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.12.011>

22) Tomoyuki Kuroki, Hidekatsu Fujishima, Keiitsi Otsuka, Tomohiro Ito, Masaaki Okubo, Toshiaki Yamamoto, Keiichiro Yoshida. Continuous operation of commercial-scale plasma-chemical after treatment system of smoke tube boiler emission with oxidation reduction potential and pH control. Thin Solid Films, 516 (19):6704-6709, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.11.101>

23) Case-study Failure analysis of tubes from heat exchanger, Report No. 269/2018, Εργαστήριο Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

24) Case-study Failure analysis of steam tubes, Report No. 237/2017, Εργαστήριο Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

25) Case-study Failure analysis of economizer leakage, Report No. 169/2014, Εργαστήριο Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.