



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση Βασικών Τύπων Αστοχίας σε Δοχεία Πίεσης



Εκπόνηση:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΡΗΓΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. ΑΛΕΞΗΣ ΚΕΡΜΑΝΙΔΗΣ

Βόλος 2024

ΕΓΚΡΙΘΗΚΕ ΑΠΟ ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΤΡΙΗΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ:

Πρώτος Εξεταστής : Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής : Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής : Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη, ο οποίος με την καθοδήγηση, την τεχνογνωσία και την πολύτιμη βοήθειά του, συνέβαλε καταλυτικά στην υλοποίηση και στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω εξίσου τους υπόλοιπους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής καθηγητή κ. Χαϊδεμενόπουλο και καθηγητή κ. Αράβα για τις ουσιώδεις υποδείξεις και σχόλια τους. Επίσης με αυτή την εργασία θα ήθελα να εκφράσω με θερμές ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές του ΠΜΣ «Ανάλυση και Διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με τους οποίους συνεργαστήκαμε κατά την διάρκεια των μαθημάτων του προγράμματος. Θα ήθελα να αναγνωρίσω την τεράστια συνεισφορά τους στην ενίσχυση των γνώσεων μου στον τομέα των ενεργειακών συστημάτων, ένας τομέας που συνεχώς εξελίσσεται με στόχο την μείωση το αποτυπώματος του άνθρακα στον πλανήτη και την χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, όπως επίσης και την σύζυγό μου για την ενθάρρυνση και την υποστήριξη που είχα όλο αυτό το διάστημα.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Περιγραφή Δοχείων Πίεσης.....	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Χαρακτηριστικά των δοχείων πίεσης	8
1.3 Τύποι Δοχείων Πίεσης.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασικές Αστοχίες σε Δοχεία Πίεσης	17
2.1 Κατηγορίες Αστοχιών	17
2.2 Τύποι Βασικών Αστοχιών	18
2.2.1 Ελαστική παραμόρφωση (Elastic Deformation).....	18
2.2.2 Ψαθυρή θραύση (Brittle Fracture)	20
2.2.3 Διάβρωση (Corrosion)	21
2.2.4 Ψαθυροποίηση υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement).....	23
2.2.5 Αστοχία λόγω ερπυσμού (Creep Failure)	24
2.2.6 Κατασκευαστικές Αστοχίες	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μελέτες περίπτωσης αστοχιών σε δοχεία πίεσης.....	28
3.1 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία αυτόκλειστου δοχείου.....	28
3.1.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας.....	28
3.1.2 Περιγραφή ατυχήματος.....	30
3.1.3 Ανάλυση αστοχίας - 1 ^η Εκτίμηση.....	31
3.1.4 Ανάλυση αστοχίας – 2 ^η Εκτίμηση	32
3.1.5 Παλαιότερες ενδείξεις αστοχίας SCC.....	32
3.2 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία σε κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης.	34
3.2.1 Αρχή Λειτουργίας και τεχνικά χαρακτηριστικά δοχείου.....	34
3.2.2 Αρχικές ενδείξεις αστοχίας.....	36
3.2.3 Περιγραφή ατυχήματος.....	38
3.2.4 Ανάλυση αστοχίας	38
3.3 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε εναλλάκτη θερμότητας.....	41
3.3.1 Ανάλυση αστοχίας	41
3.4 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε δεξαμενής αμμωνίας	44
3.4.1 Περιγραφή ατυχήματος.....	44
3.4.2 Ανάλυση αστοχίας	44
3.5 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε δοχείο επεξεργασίας.....	47

3.5.1 Ανάλυση αστοχίας	47
3.6 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία σε δοχείο πίεσης μονάδας SITVC	50
3.6.1 Ανάλυση αστοχίας	51
3.7 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία εναλλάκτη θερμότητας σωλήνων – κελύφους μονής διαδρομής	58
3.7.1 Ανάλυση αστοχίας	59
3.8 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία εναλλάκτη θερμότητας τύπου πλάκας - πλαισίου	64
3.8.1 Ανάλυση αστοχίας	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιοδικός έλεγχος δοχείων πίεσης	69
4.1 Υδροστατική δοκιμή.....	70
4.2 Μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDT).....	71
4.2.1 Οπτικός έλεγχος (Visual test)	71
4.2.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Liquid - penetrated test)	72
4.2.3 Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic particle test)	73
4.2.4 Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic test)	74
4.2.5 Έλεγχος με Ραδιογραφία (Radiographic test)	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	79
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	82

ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα δοχείο υπό πίεση αποτελεί έναν από τους βασικότερους εξοπλισμούς που χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλες εφαρμογές. Οι κυριότερες από αυτές, αφορούν την αποθήκευση υγρών ή αέριων ρευστών σε πίεση μεγαλύτερη από του περιβάλλοντος, την μεταφορά θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες και την επεξεργασία προϊόντων σε χημικές διεργασίες. Ωστόσο, συχνά προκύπτουν ελαττώματα κατά την λειτουργία τους, που οδηγούν είτε απευθείας, είτε με την πάροδο του χρόνου σε αστοχία του δοχείου. Η παρούσα εργασία εμβαθύνει στην μελέτη των περιπτώσεων διαφόρων τύπων δοχείων υπό πίεση, τα οποία παρουσίασαν αστοχίες τα τελευταία χρόνια. Σκοπός της εργασίας είναι να αναλύσει τις αστοχίες των μελετών περίπτωσης και να διερευνήσει περεταίρω τις αιτίες που οδήγησαν στην διάρρηξη των δοχείων, προκαλώντας υλικές ζημιές, μόλυνση του περιβάλλοντος, εργατικά ατυχήματα, ακόμη και θανάτους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Περιγραφή Δοχείων Πίεσης

1.1 Εισαγωγή

Τα δοχεία πίεσης είναι ειδικά κατασκευασμένα δοχεία ή δεξαμενές που αποθηκεύουν και μεταφέρουν με ασφάλεια ρευστά σε υψηλές πιέσεις. Το περιεχόμενο του δοχείου μπορεί να είναι είτε υγρής, είτε αέριας μορφής. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, το περιεχόμενο μπορεί να υποστεί αλλαγή φάσης όπως για παράδειγμα σε ένα ατμολέβητα(νερό σε ατμό).

Τα δοχεία πίεσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε μικρές και μεγάλες βιομηχανίες. Κάποιες από αυτές είναι τα διυλιστήρια επεξεργασίας και αποθήκευσης υγρών καυσίμων και υγροποιημένων παραγώγων υδρογονανθράκων, όπως το προπάνιο και το βουτάνιο. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, όπως σε πυρηνικούς αντιδραστήρες για την εφαρμογή χημικών αντιδράσεων. Κατά το πλείστον, τα περισσότερα δοχεία υπό πίεση αποθηκεύουν εύφλεκτα υλικά και σε συνδυασμό με τις υψηλές πιέσεις λειτουργίας και θερμοκρασίας που αναπτύσσονται, θέτονται σοβαροί κίνδυνοι ασφαλείας.

Η ορθή μελέτη και ο σωστός σχεδιασμός των δοχείων πίεσης κρίνεται απαραίτητη. Διεθνώς εξουσιοδοτημένοι οργανισμοί, όπως είναι η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME), προσφέρουν εμπειριστατωμένες κατευθυντήριες οδηγίες για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την τακτική επιθεώρηση των δοχείων υπό πίεση, ώστε να πληρούν αυστηρά τα πρότυπα ασφάλειας και ποιότητας [2]. Στην Ευρώπη, τα πρότυπα σχεδιασμού, κατασκευής και επανελέγχου των δοχείων πίεσης θεσμοθετούνται με κανονισμούς από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.

Βασική προϋπόθεση της καλής κατασκευής, είναι η επιλογή κατάλληλων υλικών με μηχανικές ιδιότητες που θα εξασφαλίζουν την αντοχή του δοχείου. Τα πιο διαδεδομένα υλικά για την κατασκευή δοχείων είναι ο ανθρακούχος χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας ή υλικά από μεταλλικά κράματα νικελίου και τιτανίου. Ένας ακόμη καταλυτικός παράγοντας είναι η περιοδική επιθεώρηση και συντήρηση των δοχείων, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις λειτουργικές εφαρμογές των βιομηχανικών απαιτήσεων.

1.2 Χαρακτηριστικά των δοχείων πίεσης

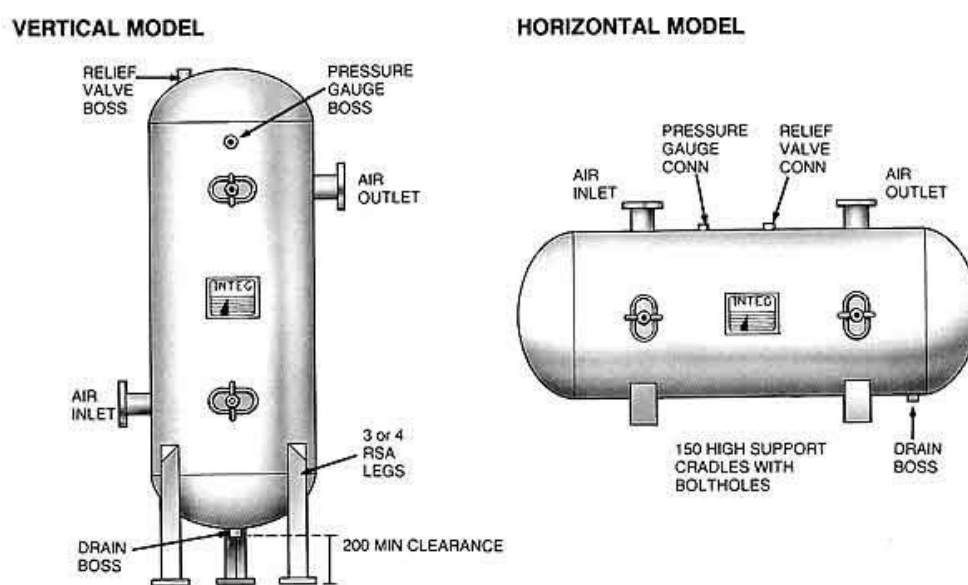
Πολλά είδη δοχείων πίεσης διατίθενται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, για να ικανοποιήσουν μια σειρά απαιτήσεων, όπως είναι η ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό τους λόγω πίεσης, η εφαρμογή τους και ο χώρος εγκατάστασης τους. Μπορούν να εκτείνονται από μικρά κυλινδρικά δοχεία έως μεγάλες σφαιρικές δεξαμενές. Τα βασικότερα είδη δοχείων πίεσης βάση σχεδιασμού είναι:

α) Σφαιρικά Δοχεία: Έχουν σφαιρικό σχήμα και χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση αέριων ή υγρών προϊόντων υπό πίεση όπως καύσιμα. Το σφαιρικό τους σχήμα (Εικ.1) παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων λόγω της εσωτερικής πίεσης που υπόκειται από την περιεχόμενη ύλη και εφαρμογή, περιορίζοντας το ποσοστό καταπόνησης του δοχείου σε πιθανή αστοχία. Επιπλέον, διαθέτουν υψηλή αναλογία αντοχής προς το βάρος σε σχέση με άλλους τύπους δοχείων πίεσης, μειώνοντας το συνολικό φορτίο της κατασκευής. Επίσης, παρέχουν φυσική σταθερότητα, μειώνοντας τον κίνδυνο δομικής αστοχίας όπως και λιγότερη αντίσταση σε φορτία ανέμων όταν προορίζονται για τοποθέτηση σε εξωτερικούς χώρους.[4]



Εικόνα 1: Σφαιρικές δεξαμενές [44]

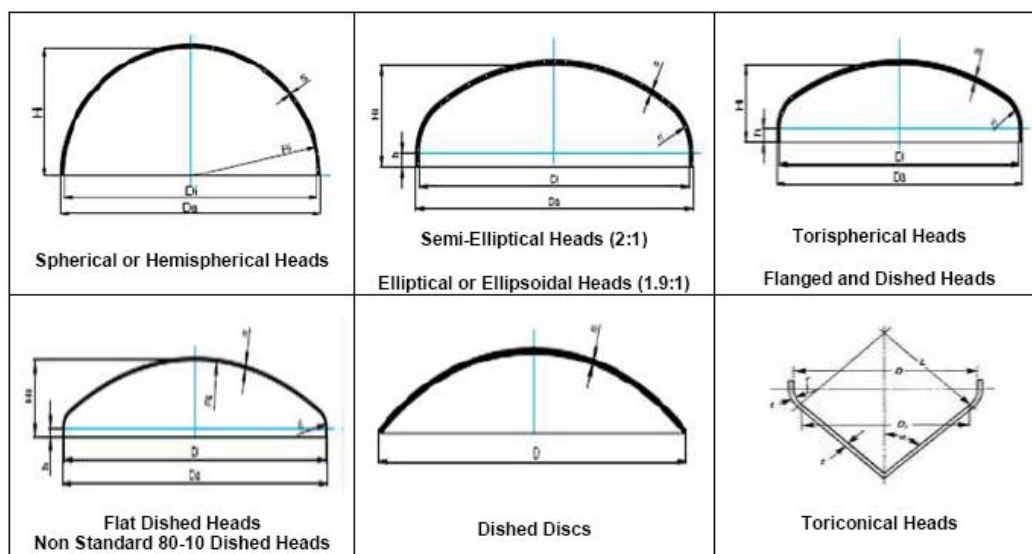
β) Κυλινδρικά Δοχεία: Τα κυλινδρικά δοχεία πίεσης είναι από τα πιο διαδεδομένα είδη δοχείων στην Βιομηχανία. Η μορφολογική τους κατασκευή μπορεί να είναι είτε σε οριζόντια είτε σε κατακόρυφη διάταξη. Αποτελούνται από το κέλυφος, τις κεφαλές, τα ακροφύσια και τις στηρίξεις. Όλες οι συνδέσεις των εξαρτημάτων που αποτελούν το δοχείο γίνονται με συγκολλήσεις. Το κέλυφος αποτελεί το κυρίως σώμα του δοχείου ενώ τα άκρα του αποτελούνται από τις κεφαλές.



Εικόνα 2: Κάθετο και οριζόντιο δοχείο υπό πίεση [45]

Υπάρχουν αρκετοί τύποι κεφαλών στα δοχεία υπό πίεση (Εικ.3). Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κεφαλής εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία, την πίεση και το περιεχόμενο του δοχείου. Για παράδειγμα, οι κυρτές και οι σφαιρικές κεφαλές θεωρούνται κατάλληλες για δοχεία με πίεση λειτουργίας άνω των 10 bar [4]. Οι κωνικές κεφαλές χρησιμοποιούνται κυρίως για την εύκολη αποστράγγιση του περιεχομένου του δοχείου (εμφανίζονται μόνο σε κάθετα δοχεία υπό πίεση και σχεδιάζονται μόνο για τον κάτω πυθμένα του δοχείου) και οι ελλειψοειδής κεφαλές σχεδιάζονται σε δοχεία για πίεση λειτουργίας κάτω των 10 bar [4]. Λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές ανάγκες του δοχείου πίεσης, η σωστή επιλογή κεφαλής μπορεί να συμβάλει στη συνολική απόδοση, την αξιοπιστία και την ασφάλεια του δοχείου. Κάθε δοχείο εμπεριέχει ακροφύσια, δηλαδή ανοίγματα διαφόρων διατομών για την σύνδεση του δοχείου με κατάλληλο εξοπλισμό, όπως μανόμετρα, βαλβίδες εκτόνωσης υπερπίεσης και για συνδέσεις με δίκτυα σωληνώσεων. Τα στηρίγματα στήριξης σε ένα δοχείο, προσφέρουν σταθερότητα κατά την

τοποθέτηση του και θεωρούνται κρίσιμα κατά τον σχεδιασμό τους για την αποφυγή εμφάνισης παραμορφώσεων. Ορισμένα δοχεία διαθέτουν ανοίγματα επισκεψιμότητας (ανθρωποθυρίδες). Τα συγκεκριμένα ανοίγματα διευκολύνουν την πρόσβαση στο εσωτερικό του δοχείου, ώστε να εκτιμηθεί η εσωτερική κατάσταση των ελασμάτων τις εσωτερικής επιφάνειας για τυχόν φθορές όπως οι διαβρώσεις. [4]



Εικόνα 3: Τύποι κεφαλών για δοχεία πίεσης [46]

1.3 Τύποι Δοχείων Πίεσης

Αεροφυλάκιο

Το αεροφυλάκιο χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες για την αποθήκευση και την χρήση πεπιεσμένου αέρα. Διατίθεται σε οριζόντια ή κάθετη διαμόρφωση. Το οριζόντιο αεροφυλάκιο, σε συνδυασμό με τον εμβολοφόρο αεροσυμπιεστή αποτελεί μια μονάδα παραγωγής πεπιεσμένου αέρα. Το κάθετο αεροφυλάκιο χρησιμοποιείται κυρίως σε κεντρικές εγκαταστάσεις, διότι καταλαμβάνει λιγότερο χώρο και λειτουργεί ως διαχωριστής, για την αφαίρεση των συμπυκνωμάτων (υγρασία, σκόνες κ.α.), που μεταφέρονται με τον πεπιεσμένο αέρα υλικών(κυρίως σε εγκαταστάσεις καυσίμων όπως διυλιστήρια, μονάδες παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου κ.α.).



Εικόνα 4: Κάθετο αεροφυλάκιο



Εικόνα 5: Οριζόντιο αεροφυλάκιο

Σε αυτή την περίπτωση, ο πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο αεροφυλάκιο από χαμηλότερο στόμιο και εξέρχεται από υψηλότερο, εγκλωβίζοντας τα συμπυκνώματα στον πυθμένα του αεροφυλακίου, τα οποία εξέρχονται με ένα διακόπτη χειρός ή με ένα σύστημα αυτόματης αποστράγγισης. [5]

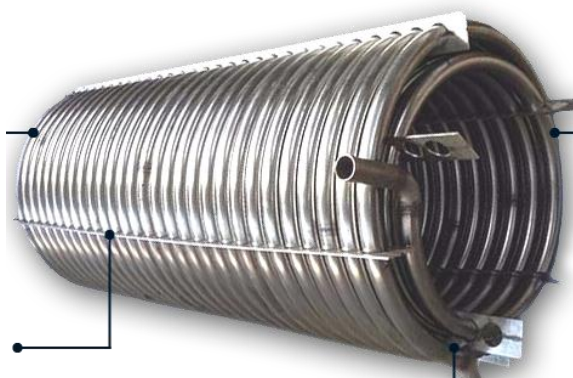
Ατμολέβητας – Ατμογεννήτρια

Ο ατμολέβητας και η ατμογεννήτρια είναι μέρος μονάδων παραγωγής υπέρθερμου ατμού για βιομηχανική χρήση. Ο ατμολέβητας καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών μιας βιομηχανίας ενώ η ατμογεννήτρια καλύπτει συγκεκριμένες διαδικασίες χαμηλών απαιτήσεων. Οι ατμολέβητες παράγουν κυρίως κορεσμένο ατμό με αυξημένο ποσοστό υγρασίας ενώ η ατμογεννήτρια παράγουν ξηρό και υπέρθερμο ατμό χαμηλής υγρασίας. Ως κατασκευές θεωρούνται συνδυασμός ενός διφασικού εναλλάκτη και ενός πιεστικού δοχείου. Ο ατμολέβητας περιέχει μεταλλικούς αυλούς (σωλήνες) ενώ αντίθετα η ατμογεννήτρια εμπεριέχει μια μεταλλική σερπαντίνα. Με την χρήση ενός κατάλληλου καυστήρα καυσίμου, η επιλογή του οποίου γίνεται από τον κατασκευαστή, τα παράγωγά καυσάεiria της καύσης θερμαίνουν το νερό στο εσωτερικό του ατμολέβητα. Οι ανάγκες του ατμολέβητα σε νερό καλύπτονται από αντλίες τροφοδοσίας συνδεδεμένες με το δίκτυο.



Εικόνα 6: Ατμολέβητας

Παρόμοια αρχή λειτουργία έχει και η ατμογεννήτρια. Τα καυσαέρια του καυστήρα θερμαίνουν το νερό στο εσωτερικό της σερπαντίνας μέχρι την ατμοποίηση του. Ο ατμός παράγεται υπό πίεση μέσω της ελεγχόμενης θέρμανσης του νερού σε θερμοκρασία κοντά στους 100°C[6]. Μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων, ο ατμός διοχετεύεται προς κατανάλωση ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε βιομηχανικής μονάδας.



Εικόνα 7: Ατμογεννήτρια

Συνοψίζοντας, οι ατμολέβητες είναι απαραίτητοι για μεγάλες και συνεχείς απαιτήσεις ατμού, ενώ οι ατμογεννήτριες υπερέχουν σε εφαρμογές με διακοπτόμενες ή μεταβλητές ανάγκες. Χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως στην επεξεργασία τροφίμων, στην παραγωγή ενέργειας και στις ανάγκες νοσοκομειακών εγκαταστάσεων όπως τις μονάδες αποστείρωσης. Η επιλογή καταλληλότητας μεταξύ των δύο εξαρτάται από τις απαιτήσεις της βιομηχανικής διεργασίας, συμπεριλαμβανομένης της ζήτησης ατμού, της περιεκτικότητας σε νερό και των σχεδιαστικών παραμέτρων.[6]

Κρυογενική Δεξαμενή

Τα κρυογενικά δοχεία είναι δεξαμενές υπό πίεση, σχεδιασμένες να αποθηκεύουν και να μεταφέρουν ρευστά υλικά σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, συνήθως κάτω των -150°C όπως οξυγόνο (Εικ.8), αργό, ήλιο, άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα (Εικ.9). Θεωρούνται ζωτικής σημασίας σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων υγειονομικής περίθαλψης(νοσοκομεία, κλινικές μονάδες), της αεροδιαστημικής(για την αποθήκευση υπέρψυκτων προωθητικών προϊόντων σε διαστημικά ταξίδια) και της ενέργειας(μεταφορά και αποθήκευση LNG). [7]



Εικόνα 8: Κρυογενική δεξαμενή O_2



Εικόνα 9: Κρυογενικές δεξαμενές CO_2 & N_2

Κατασκευάζονται κυρίως από ανοξείδωτο χάλυβα υψηλής ποιότητας, από αλουμίνιο και εξειδικευμένα κράματα αντοχής σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και για την διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών των περιεχομένων τους, τα δοχεία είναι εξοπλισμένα με μονώσεις όπως μόνωση κενού ή μόνωση διπλού τοιχώματος από πολυστρωματικά υλικά. Διαθέτουν αυτόματα κυκλώματα πίεσης και πρότυπο εξοπλισμό ασφαλείας και ελέγχου όπως δείκτες στάθμης υγρών, ώστε να είναι γνωστή η ποσότητα του αερίου που περιέχεται στην δεξαμενή και μετρητές κενού και πίεσης οι οποίες παρέχουν συνεχή παρακολούθηση των εσωτερικών συνθηκών του δοχείου. Στον εξοπλισμό τους προστίθενται και οι βαλβίδες εκτόνωσης οι οποίες διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία τους. [7]

Δεξαμενές Υγραερίου (LPG)

Το υγραέριο είναι ένα υγροποιημένο καύσιμο παραγόμενο από μείγματα υδρογονανθράκων όπως το βουτάνιο, το προπάνιο και το αιθάνιο. Χρησιμοποιείται ευρύτερα για βιομηχανική αλλά και για οικιακή χρήση. Για την αποθήκευση και την μεταφορά του υγραερίου χρησιμοποιούνται δοχεία πίεσης κατασκευασμένα κυρίως από χάλυβα τα οποία το διατηρούν στην υγρή του μορφή. Τα δοχεία διακρίνονται σε υπέργειες και υπόγειες δεξαμενές.



Εικόνα 10: Υπέργεια (a) και υπόγεια (b) Δεξαμενή LPG

Υπέργεια δεξαμενή LPG: Εγκαθίσταται σε εξωτερικούς χώρους και χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακή και βιομηχανική χρήση. Η διαδικασία εγκατάστασης συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτηση της δεξαμενής σε μια σταθερή και επίπεδη επιφάνεια από σκυρόδεμα. Η σωστή βάση και η σωστή στήριξη είναι απαραίτητα για τη σταθερότητα και την ασφάλεια της δεξαμενής (Εικ.10).

Υπόγεια Δεξαμενή LPG: Οι υπόγειες δεξαμενές LPG δεν διαφέρουν σημαντικά με τις υπέργειες δεξαμενές. Κατασκευάζονται από χάλυβα ώστε να αντιστέκονται στην διάβρωση. Η εγκατάστασή της περιλαμβάνει την ανασκαφή μιας τρύπας στο έδαφος, την τοποθέτηση της δεξαμενής εσωτερικά σε αυτή και την τελική επίχωση. Ο λόγος που προτιμάται μια υπόγεια δεξαμενή έναντι μιας υπέργειας είναι για την εξοικονόμηση του χώρου που προσφέρει και των θερμοκρασιακών απωλειών, καθώς το έδαφος που την περιβάλλει της παρέχει μονωτική ικανότητα (Εικ.10). Και στους δύο τύπους δεξαμενών τοποθετούνται βαλβίδες εκτόνωσης σε περίπτωση υπερπίεσης.[8]

Φιάλες Κατάδυσης

Τα συγκεκριμένα δοχεία χρησιμοποιούνται ως εξοπλισμός κατάδυσης αποθηκεύοντας πεπιεσμένο αέρα ή άλλα αναπνευστικά αέρια για την υποβρύχια αναπνοή των δυτών. Πολλά από τα δοχεία αυτά κατασκευάζονται είτε από χάλυβα είτε από αλουμίνιο (Εικ. 11 & 12). Οι χαλύβδινες φιάλες είναι πιο ανθεκτικές από αυτές του αλουμινίου αλλά είναι πιο βαριές ενώ η χωρητικότητα του δοχείου επιλέγεται βάση του ρυθμού κατανάλωσης αέρα του δύτη και το είδος της κατάδυσης που θα εκτελέσει. Οι περισσότερες φιάλες κατάδυσης αποθηκεύουν πεπιεσμένο αέρα σε πίεση από 100 έως 250 bar περίπου. Η τακτική συντήρηση των φιαλών είναι απαραίτητη για την διασφάλιση της κατάδυσης του δύτη. Ο οπτικός εξωτερικός έλεγχος για τυχόν χτυπήματα στην φιάλη καθώς και ο εσωτερικός έλεγχος με ενδοσκόπιο αφού πρώτα προηγηθεί καλός καθαρισμός αποτελούν μέρος αυτής της διαδικασίας [9].



Εικόνα 11: Χαλύβδινη Φιάλη Οξυγόνου [47]



Εικόνα 12: Φιάλες Οξυγόνου από αλουμίνιο [48]

Αυτόκλειστα Δοχεία

Τα αυτόκλειστα δοχεία χρησιμοποιείται ως εξοπλισμός χημικών διεργασιών σε βιομηχανίες και ως εξοπλισμός αποστείρωσης σε εργαστήρια και εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης. Για την αποστείρωση, χρησιμοποιείται ατμός υπό πίεση για την αδρανοποίηση παθογόνων μικροοργανισμών σε ιατρικό, εργαστηριακό και νοσοκομειακό κυρίως εξοπλισμό. Ένα αυτόκλειστο δοχείο υπό πίεση (Εικ.13) εμπεριέχει ένα μεταλλικό θάλαμο στον οποίο τοποθετούνται τα είδη προς αποστείρωση και αφότου σφραγιστεί, τροφοδοτείται με νερό.



Εικόνα 13: Αυτόκλειστο δοχείο - Κλίβανος Αποστείρωσης [49]

Με την θέρμανση του νερού παράγεται ατμός(σε θερμοκρασία 120-140°C) όπου σε συνδυασμό με την εσωτερική αύξηση της πίεσης, επιτυγχάνεται αποτελεσματικά η καταστροφή ή αδρανοποίηση των μικροοργανισμών. [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασικές Αστοχίες σε Δοχεία Πίεσης

2.1 Κατηγορίες Αστοχιών

Πάρα τα μέτρα ασφαλείας και την τήρηση των προτύπων σχεδιασμού και κατασκευής πολλών εταιριών παραγωγής δοχείων πίεσης, πολλά είναι τα ατυχήματα που σημειώνονται εξαιτίας αστοχιών που εντοπίζονται στα δοχεία κατά καιρούς με τραγικές συνέπειες για εγκαταστάσεις, πληθυσμό και περιβάλλον. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την παρουσίαση αστοχιών που μπορεί να οδηγήσουν στην αποτυχία των δοχείων υπό πίεση. Οι αστοχίες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες βάσει της αιτίας που μπορεί να προκληθούν, όπως λόγω:

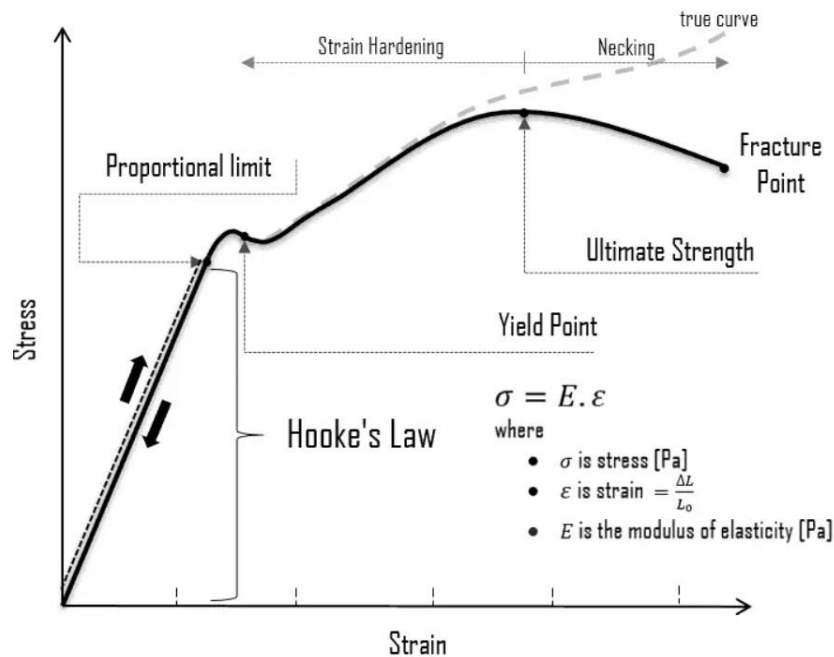
1. **Σχεδιασμού** – Λανθασμένοι υπολογισμοί κατά τον σχεδιασμό του δοχείου όπως για παράδειγμα στον υπολογισμό του πάχους του βασικού υλικού για την κατασκευή του δοχείου.
2. **Υλικού** – Η επιλογή υλικού για την κατασκευή δοχείων η οποία δεν είναι κατάλληλη για τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας του δοχείου υπό πίεση. Επίσης, η εμφάνιση ελαττωμάτων στο υπάρχον υλικό χρήσης όπως σημάδια διάβρωσης με κοιλότητες(pitting corrosion) σε χάλυβα.
3. **Κατασκευής** – Λανθασμένη μέθοδος κατασκευής όπως για παράδειγμα τη σωστή τεχνική διαμόρφωσης κεφαλών σε δοχεία σύμφωνα με εγκεκριμένα πρότυπα. Επίσης παρατηρείται συχνά και η λανθασμένη μέθοδος στις συγκολλήσεις των εξαρτημάτων του δοχείου. Η κακή τεχνική συγκόλλησης μπορεί να δημιουργήσει πιθανές ενδείξεις αστοχίας συγκόλλησης όπως ατελή διείσδυση, εμφάνιση πόρων κ.α.
4. **Συντήρησης** – Ανεπαρκής συντήρηση του δοχείου υπό πίεση και της εγκατάστασης λόγω αργοπορημένης και μη τήρησης προγραμματισμένων ελέγχων συντήρησης με προτεραιότητα στην επίτευξη στόχων παραγωγής (Βιομηχανικές μονάδες). Άλλοι λόγοι ανεπαρκούς συντήρησης, είναι η ανεπαρκής εκπαίδευση του τεχνικού προσωπικού σε θέματα συντήρησης εξοπλισμού και η εφαρμογή των πρωτοκόλλων ασφαλείας. [10]

2.2 Τύποι Βασικών Αστοχιών

Τα δοχεία πίεσης είναι επιρρεπή σε διάφορους τύπους αστοχιών που μπορούν να καταλήξουν στην διάρρηξη και τελικώς στην καταστροφή του. Οι κυριότεροι τύποι αστοχιών που εντοπίζονται σε δοχεία υπό πίεση είναι:

2.2.1 Ελαστική παραμόρφωση (Elastic Deformation)

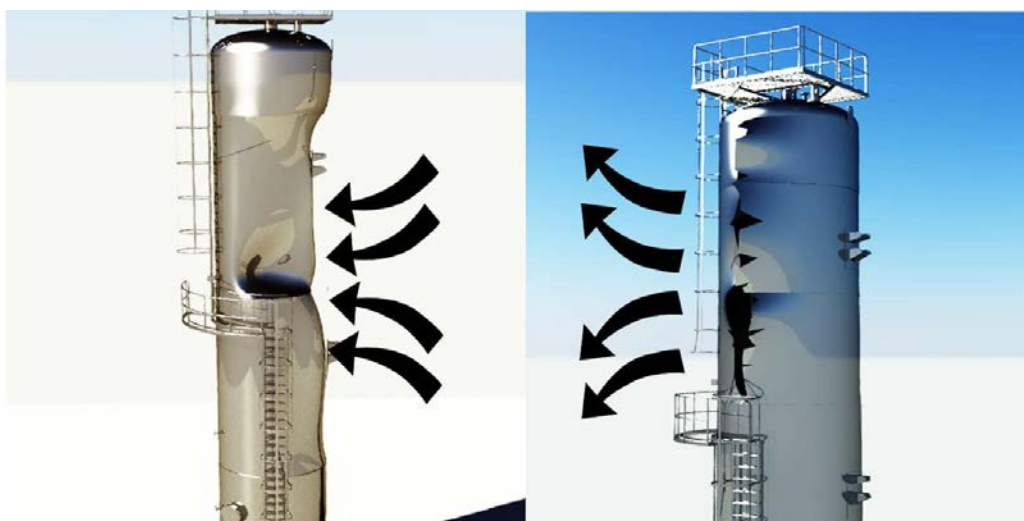
Η ελαστική παραμόρφωση στα δοχεία πίεσης αναφέρεται στην αναστρέψιμη παραμόρφωση του υλικού του δοχείου όταν αυτό καταπονείται από τάσεις λόγω της εσωτερικής πίεσης. Στο στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης, το υλικό παραμορφώνεται αλλά επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα και στις αρχικές του διαστάσεις όταν το φορτίο απομακρύνεται. Όταν ένα υλικό βρίσκεται εντός του ορίου ελαστικότητας του, παραμορφώνεται υπό την εφαρμοζόμενη τάση. Αυτή η αναστρέψιμη παραμόρφωση είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των υλικών σύμφωνα με το νόμο του Hooke, το οποίο δηλώνει ότι η τάση που ασκείται είναι ευθέως ανάλογη με την καταπόνηση εντός του ορίου αναλογίας [13].



Εικόνα 14: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης [50]

Ωστόσο, ένα δοχείο πίεσης μπορεί να αστοχήσει και να καταρρεύσει εξαιτίας της ελαστικής παραμόρφωσης (Εικ.15) μέσω διαφόρων μηχανισμών. Οι πιο συχνοί εξ αυτών είναι:

- 1) **Υπερβολική πλαστική παραμόρφωση (Excessive plastic deformation):** Είναι ένας τύπος αστοχίας σε δοχεία πίεσης που υφίσταται όταν το υλικό υποβάλλεται σε φορτία πέραν του ορίου ελαστικότητας(Εικ. 14), οδηγώντας σε μόνιμη παραμόρφωση. Αυτός ο τρόπος αστοχίας χαρακτηρίζεται από πλαστική παραμόρφωση του υλικού του δοχείου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή κατάρρευση ή πλαστική αστάθεια.
- 2) **Κόπωση (Fatigue failure):** Υψηλή κυκλική φόρτιση μπορεί να προκαλέσει ερπυστική παραμόρφωση, οδηγώντας σε σταδιακή θραύση του δοχείου. Πρόκειται για ένα χρονοεξαρτώμενο φαινόμενο όπου το υλικό του δοχείου παραμορφώνεται με την πάροδο του χρόνου υπό σταθερή τάση, οδηγώντας το τελικώς σε αστοχία.
- 3) **Ελαστικός λυγισμός (Buckling):** Ο λυγισμός[11] είναι ένας τρόπος αστοχίας σε δοχεία πίεσης όπου το δοχείο παραμορφώνεται σημαντικά από τάσεις που οφείλονται στην εσωτερική πίεση, στο βάρος του δοχείου είτε από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος, θερμοκρασία περιβάλλοντος) οι οποίες επηρεάζουν τις ιδιότητες του υλικού και την ακαμψία του. Σε συνδυασμό με την γεωμετρία του δοχείου, των ιδιοτήτων του υλικού και των συνθηκών φόρτισης, ο ελαστικός λυγισμός μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία εάν δεν αντιμετωπιστεί σωστά[14].



Εικόνα 15: Αστοχία δοχείων λόγω ελαστικής παραμόρφωσης [51]

2.2.2 Ψαθυρή θραύση (Brittle Fracture)

Η ψαθυρή θραύση είναι μια αστοχία (Εικ. 16) κυρίως των κεραμικών και γυάλινων υλικών. Παρόλα αυτά, παρατηρείται και σε μεταλλικά υλικά.[11]. Στα δοχεία υπό πίεση η εμφάνιση της ψαθυρής θραύσης δεν γίνεται αρχικά αντιληπτή με γυμνό μάτι όπως ο λυγισμός στην ελαστική παραμόρφωση). Χαρακτηρίζεται από την διάδοση ρωγμών στο υλικό κατασκευής και την αιφνίδια διάρρηξη του δοχείου. Το υλικό που προορίζεται για την κατασκευή δοχείου πίεσης δεν θα πρέπει να έχει χαμηλή ολκιμότητα (πχ ο χάλυβας με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα) διότι παρουσιάζουν εύθραυστη συμπεριφορά ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η ψαθυρή θραύση μπορεί να προκαλεστεί επίσης με σημειακές συγκεντρώσεις τάσεων. Οι τάσεις εμφανίζονται όταν στο υλικό κατασκευής ή στις συγκολλήσεις του δοχείου υπάρχουν γεωμετρικές ασυνέχειες, όπως αιχμηρές γωνίες, εγκοπές ή οπές. Αυτές οι ασυνέχειες μπορούν να δημιουργήσουν υψηλά επίπεδα τάσεων που μπορούν να οδηγήσουν στην έναρξη ρωγμών και τελικώς στην αιφνίδια καταστροφική αστοχία του δοχείου.[13]

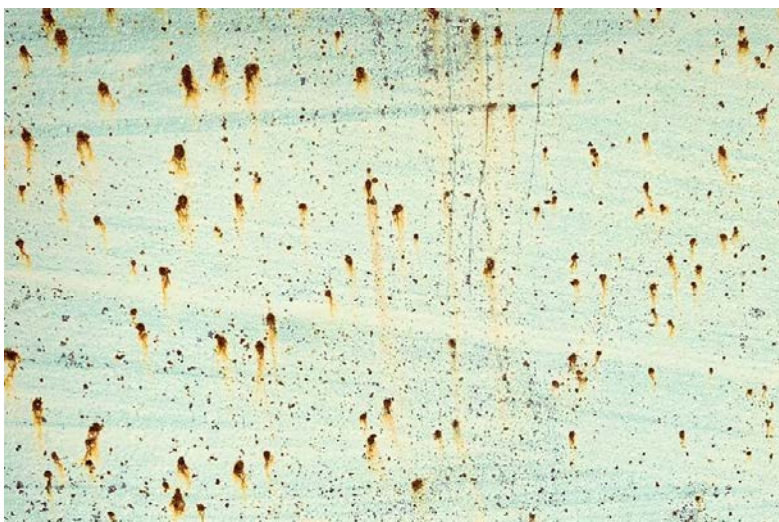


Εικόνα 16: Θραύση δοχείου [52]

2.2.3 Διάβρωση (Corrosion)

Η διάβρωση θεωρείται η πιο διαδεδομένη μορφή αστοχίας που εμφανίζεται σε δοχεία πίεσης. Ένα συνηθισμένο φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί λόγω διαφόρων εσωτερικών και εξωτερικών περιβαλλοντικών παραγόντων, ενεργοποιώντας τους μηχανισμούς διάβρωσης[12] οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν στην αστοχία του δοχείου. Ορισμένοι μηχανισμοί διάβρωσης είναι:

Τρηματική διάβρωση: Αυτός ο τύπος διάβρωσης περιλαμβάνει τον σχηματισμό πολυάριθμων μικρών και μακρόστενων κοιλωμάτων ή κρατήρων στη μεταλλική επιφάνεια του δοχείου (Εικ. 17). Αυτές οι διαβρωτικές κοιλότητες μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων, καθιστώντας το υλικό πιο επιρρεπές σε ρωγμές και αστοχίες.



Εικόνα 17: Τρηματική Διάβρωση(Pitting corrosion)[53]

Ρωγμή διάβρωσης λόγω τάσης (Stress Corrosion Cracking): Η συγκεκριμένη αστοχία εμφανίζεται όταν ένα δοχείο πίεσης υποβάλλεται τόσο σε μηχανική καταπόνηση όσο και σε διαβρωτικές συνθήκες (ελάσματα). Οι τάσεις μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως την εσωτερική πίεση, τα εξωτερικά φορτία ή τις παραμένουσες τάσεις. Η διάβρωση μπορεί να προκληθεί από χημικές ουσίες, υγρασία ή άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες με αποτέλεσμα την έναρξη και τη διάδοση ρωγμών μέχρι την τελική αστοχία (Εικ.18). Ανάλογα με τον τρόπο εμφάνισης των ρωγμών, οι ρωγμές διάβρωσης υπό τάση(SCC) διακρίνονται σε δύο τύπους.

Ο πρώτος (Transgranular SCC) εμφανίζεται όταν οι ρωγμές διαδίδονται μέσω ολόκληρης της δομής των κρυστάλλων του υλικού ενώ ο δεύτερος (Intergranular SCC) εμφανίζεται όταν οι ρωγμές σχηματίζονται κατά μήκος των ορίων των κρυστάλλων.



Εικόνα 18: Ρωγμή διάβρωσης υπό μηχανική τάση [54]

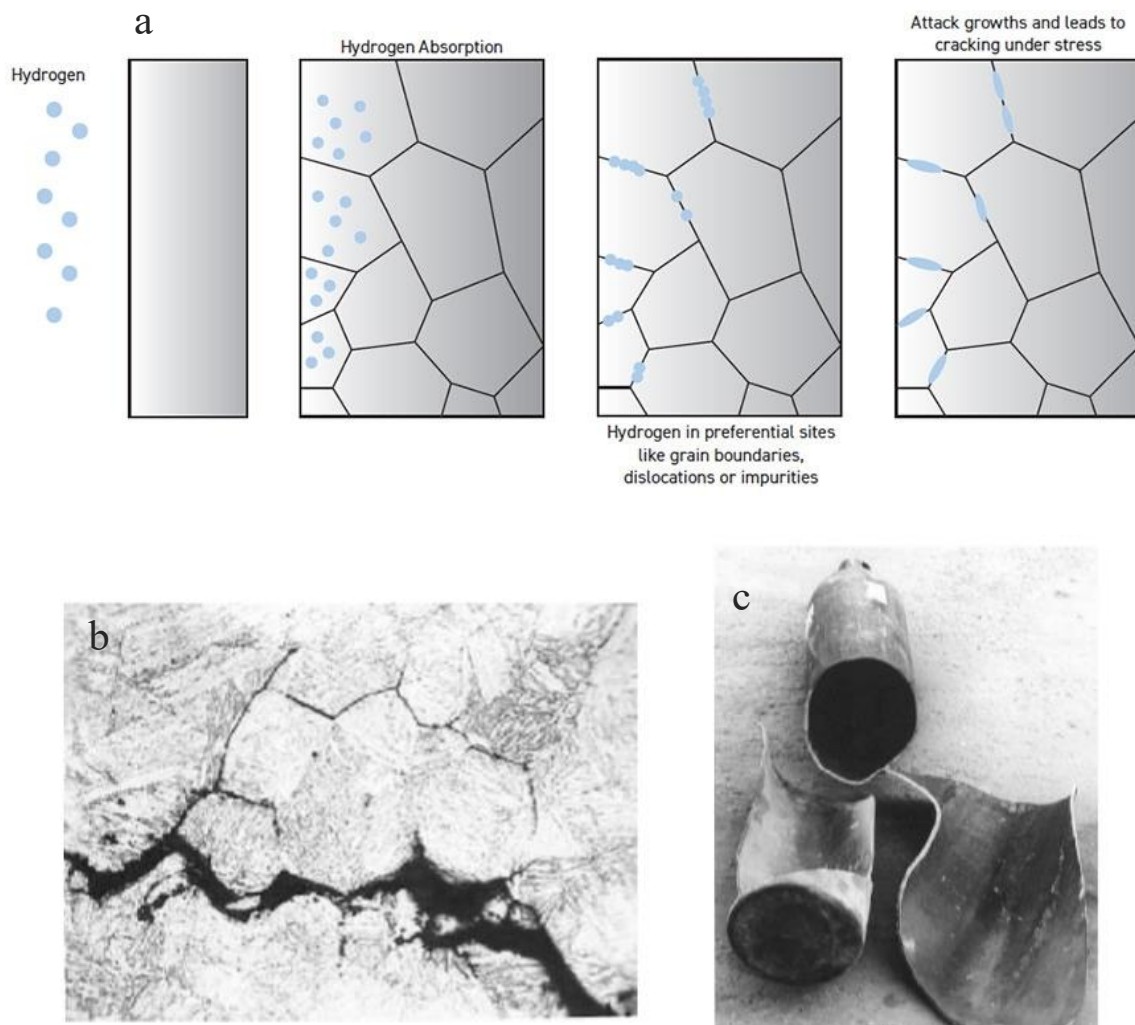
Γενική διάβρωση είναι η ομοιόμορφη διάβρωση του υλικού (Εικ. 19) σε ολόκληρη την επιφάνεια του δοχείου. Η γενική διάβρωση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, της ακατάλληλης επιλογής υλικών κατασκευής και των ανεπαρκών μέτρων διαβρωτικής προστασίας. Καθώς η διάβρωση εξελίσσεται, το πάχος του τοιχώματος του δοχείου μειώνεται, θέτοντας σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του δοχείου πίεσης [12].



Εικόνα 19: Ομοιόμορφη διάβρωση σε αεροφυλάκιο [55]

2.2.4 Ψαθυροποίηση υδρογόνου (Hydrogen Embrittlement)

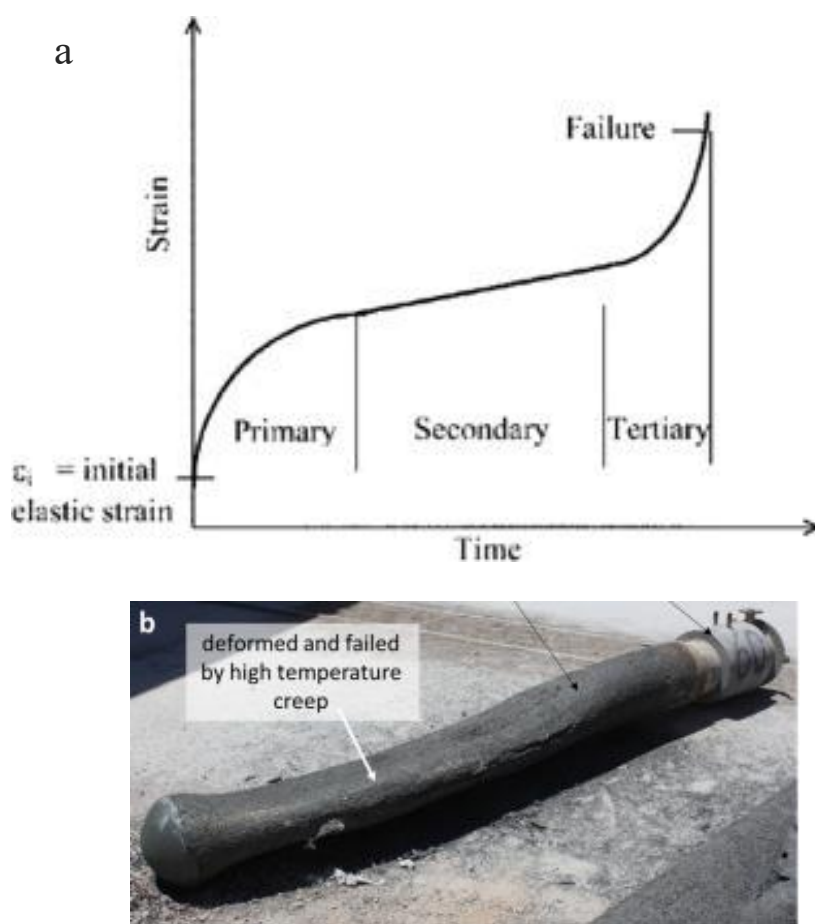
Ψαθυροποίηση υδρογόνου είναι ένας μηχανισμός αστοχίας των κυρίως των χαλύβδινων δοχείων πίεσης. Εμφανίζεται κυρίως λόγω των περιβαλλοντολογικών συνθηκών κατά την κατεργασία του χάλυβα. Τα άτομα του υδρογόνου (Εικ.20a) διεισδύουν στη μεταλλική δομή του μετάλλου, επιφέροντας τοπικές συγκεντρώσεις στο μεταλλικό πλέγμα. Το υδρογόνο λόγω των τάσεων, επηρεάζει την μικροδομή του μετάλλου, κάνοντας το πιο εύθραυστο και πιο επιρρεπές σε ρωγμές (Εικ. 20b) και στη συνέχεια στην τελική ρήξη (Εικ.20c). Το φαινόμενο ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου εμφανίζεται λιγότερο σε μέταλλα όπως στον ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα, στο αλουμίνιο, στο χαλκό και στα κράματα του[15].



Εικόνα 20: (a) Μηχανισμός ψαθυροποίησης υδρογόνου[56], (b) μικροδομή του χάλυβα και ρωγμές στην μικροδομή του υλικού, (c) Αστοχία δοχείου λόγω ψαθυροποίησης υδρογόνου[57]

2.2.5 Αστοχία λόγω ερπυσμού (Creep Failure)

Η αστοχία λόγω ερπυσμού στα δοχεία πίεσης αναφέρεται στη σταδιακή και προοδευτική παραμόρφωση του υλικού κατασκευής υπό σταθερή τάση και σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές. Στα δοχεία πίεσης, αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση του πάχους των τοιχωμάτων τους εξαιτίας των διαστολών και της αύξησης των τάσεων με την πάροδο του χρόνου (Εικ.21a). Η παραμόρφωση εξαιτίας του ερπυσμού επιταχύνεται έως ότου η αντοχή του υλικού να μην επαρκεί πλέον. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική αστοχία του δοχείου (Εικ.21b), ιδίως σε εγκαταστάσεις που λειτουργούν υπό υψηλές θερμοκρασίες, όπως οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας. Η αστοχία λόγω ερπυσμού είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική και καταστροφική αστοχία, χωρίς ιδιαίτερες εμφανής προειδοποιήσεις σε αντίθεση με άλλους τρόπους αστοχίας [16]. Η πρόβλεψη του χρόνου μέχρι την αστοχία για δοχεία πίεσης υπό συνθήκες ερπυσμού είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας, καθώς θα επιτρέπει στους μηχανικούς να σχεδιάζουν δοχεία με επαρκή περιθώρια ασφαλείας.



Εικόνα 21: (α) Διάγραμμα παραμόρφωσης ερπυσμού – χρόνου, [58] (β) Αστοχία δοχείου λόγω ερπυσμού [59]

2.2.6 Κατασκευαστικές Αστοχίες

Τα κατασκευαστικά ελαττώματα σε δοχεία πίεσης μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις για τη δομική ακεραιότητα και την ασφάλειά τους. Οι κατάλληλες διαδικασίες κατασκευής και τα μέτρα ποιοτικού ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι τα δοχεία πίεσης πληρούν τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Οι κυριότερες κατασκευαστικές αστοχίες εντοπίζονται σε [18]:

Συγκολλήσεις: Είναι απαραίτητες για την μορφοποίηση και την συναρμολόγηση των δοχείων. Κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων όμως θα πρέπει να τηρούνται όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές καθώς και η σωστή μέθοδος συγκόλλησης ώστε να αποφευχθούν σφάλματα όπως:

Ατελής διείσδυση: όταν το μέταλλο συγκόλλησης δεν διεισδύει πλήρως στην άρθρωση, οδηγώντας σε αδύναμη σύνδεση.

Ατελής τήξη: Η έλλειψη σωστής τήξης μεταξύ του βασικού μετάλλου και του μετάλλου συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει σε αδύναμες αρθρώσεις.

Ρωγμές: σχηματίζονται είτε στο μέταλλο συγκόλλησης είτε στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του δοχείου πίεσης.

Ελαττώματα υλικού:

Εγκλείσματα: Ξένα υλικά ή σωματίδια, όπως η σκωρία, μπορεί να παγιδευτούν στο μέταλλο κατά την κατασκευή, διαμορφώνοντας τις περιοχές τους ευάλωτες σε τάσεις.

Πορώδης περιοχές: Οι θήκες αερίου ή τα κενά στο μέταλλο μπορούν να μειώσουν την αντοχή του υλικού και να αυξήσουν τον κίνδυνο αστοχίας.

Ελαττώματα διαμόρφωσης και κατασκευής:

Λανθασμένη ευθυγράμμιση: Η εσφαλμένη ευθυγράμμιση των εξαρτημάτων κατά την κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε συγκεντρώσεις τάσεων και δομικές αδυναμίες.

Εκτός στρογγυλότητας: Η απόκλιση από το επιδιωκόμενο κυκλικό σχήμα μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων.

Υπερμορφοποίηση: Εσφαλμένες διαδικασίες διαμόρφωσης μπορεί να οδηγήσουν σε υπομορφωμένα τμήματα, επηρεάζοντας τη δομική ακεραιότητα του δοχείου.

Ελαττώματα θερμικής επεξεργασίας:

Ακατάλληλη θερμική επεξεργασία: Η απόκλιση από τις συνιστάμενες διαδικασίες θερμικής επεξεργασίας μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκείς ιδιότητες του υλικού, επηρεάζοντας την αντοχή και τη σκληρότητα του.

Υπερθέρμανση: Οι υπερβολικές θερμοκρασίες κατά τη θερμική επεξεργασία μπορεί να μειώσουν την αντοχή του υλικού. [18]

Οι μελέτες περίπτωσης που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές έρευνας και μελέτης στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι παρούσες μελέτες αντλήθηκαν από επιστημονικά δημοσιευμένα άρθρα, ηλεκτρονικά συγγράμματα και ψηφιακά αρχεία τεχνικών εκθέσεων, τα οποία ήταν ελεύθερα στο διαδίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μελέτες περίπτωσης αστοχιών σε δοχεία πίεσης

3.1 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία αυτόκλειστου δοχείου

Η ιαπωνική εταιρία NDK Crystals Inc.[19] με εγκαταστάσεις στο Belvedere των ΗΠΑ (Εικ. 22) παραγωγή ειδικεύεται στην παραγωγή κρυσταλλικών υλών σύνθετου χαλαζία. Οι κτηριακές εγκαταστάσεις της στέγαζε οκτώ κάθετα αυτόκλειστα δοχεία πίεσης στα οποία εκτελούνταν η καλλιέργεια των κρυστάλλων. Για την συγκεκριμένη διεργασία παραγωγής – καλλιέργειας συνθετικών κρυστάλλων η ίδια η εταιρία σχεδίασε τα δοχεία σε συνεργασία με πιστοποιημένο κατασκευαστή μεταλλικών κατασκευών. Τα δοχεία είχαν ύψος 15 περίπου μέτρα και ήταν κατασκευασμένα από κοινό χάλυβα πάχους άνω των 20 εκατοστών. [19]

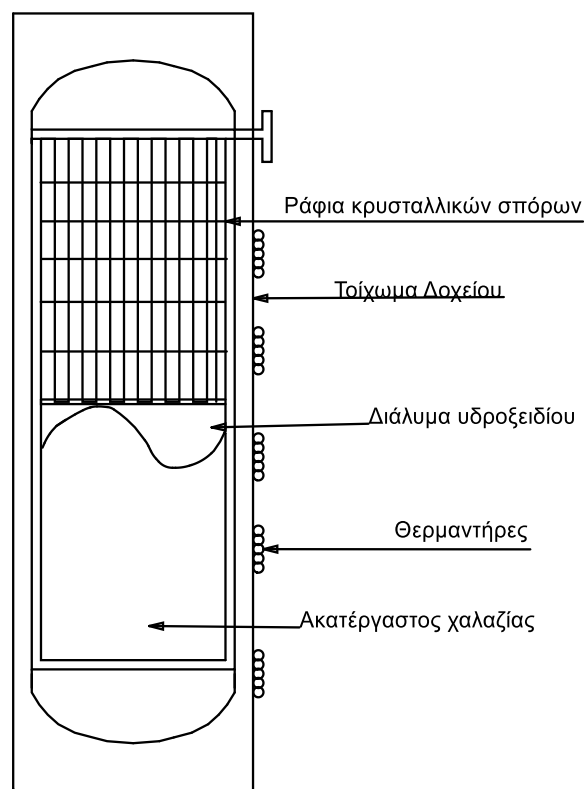


Εικόνα 22: Κτηριακές εγκαταστάσεις της NDK Crystals Inc.[60]

3.1.1 Περιγραφή και αρχή λειτουργίας

Η παραγωγή του συνθετικού χαλαζία περιλαμβάνει ένα συνδυασμό διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας και ελεγχόμενων συνθηκών για τη δημιουργία ενός υψηλής καθαρότητας, κρυστάλλινου υλικού. Τα οκτώ δοχεία πίεσης σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με αμερικανικούς κανονισμούς (ASME: pressure and boiler) ως μέσα καλλιέργειας συνθετικού

χαλαζία, κατασκευασμένα από υλικά(χάλυβας ASME SA-723) με μηχανικές ιδιότητες που να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις λειτουργίας. Και τα οκτώ δοχεία αποτελούνταν από ένα χαλύβδινο κυλινδρικό κέλυφος μήκους 14,5 περίπου μέτρων και τις κεφαλές πάχους μισού μέτρου. Το πάχος του κυλινδρικού τοιχώματος (κέλυφος) του δοχείου ήταν 20,57 εκατοστά, ενώ το πάχος στα ελάσματα των κεφαλών ήταν μεγαλύτερο (45 εκατοστά πάχος άνω κεφαλής και 40 εκατοστά στην κεφαλή πυθμένα του δοχείου (Εικ. 23, CSB, 2013, Fig.3, p. 4[19]). [19]



Εικόνα 23: Σκαρίφημα αυτόκλειστου δοχείου πίεσης (CSB, 2013, Fig.3, p. 4) [19]

Στο εσωτερικό των δοχείων εφαρμόστηκε μια επίστρωση αιγινίτη¹ [19] στα τοιχώματα ως επιπρόσθετο προστατευτικό μέσο για την αποφυγή σχηματισμού διάβρωσης εξαιτίας της διεργασίας. Τα δοχεία μελετήθηκαν βάση της εφαρμογής τους με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας περίπου τα 2068 bar και μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 400°C. Κάθε δοχείο είχε περίπου τρεις κύκλους καλλιέργειας κρυστάλλων ανά έτος ενώ το τεχνικό προσωπικό της NDK είχε την οδηγία να αντικαθιστούν ανά κύκλο καλλιέργειας την ανακουφιστική βαλβίδα εκτόνωσης σε όλα τα δοχεία πίεσης λόγω της υψηλής πίεσης λειτουργίας.

¹ *Acmite ή Αιγινίτης* είναι ένα υλικό που προστατεύει μεταλλικές επιφάνειες από διαβρώσεις.

Η NDK Crystals κατασκεύαζε συνθετικούς κρυστάλλους χαλαζία σε δοχεία με την διεργασία της υδροθερμικής σύνθεσης. Τα δοχεία περιείχαν ακατέργαστο χαλαζία που τοποθετούνταν στον πυθμένα με την χρήση ανυψωτικών μηχανήματων. Στην συνέχεια περιείχε ποσότητες διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου, νερό και μια ποσότητα νιτρικού λιθίου. Τέλος, στο άνω μέρος του δοχείου τοποθετούνταν σε μεταλλικές σχάρες οι «σπόροι», οι οποίοι ήταν λεπτοί κρύσταλλοι καθαρού χαλαζία. Το δοχείο σφραγίζονταν και με την χρήση εξωτερικών ηλεκτρικών θερμαντήρων αυξάνονταν με αργό ρυθμό η θερμοκρασία του δοχείου φτάνοντας έως και τους 370°C [19]. Λόγω του βρασμού, η αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του δοχείου έφτανε έως και τα 1900 bar περίπου ενώ ταυτόχρονα ο ακατέργαστος χαλαζίας διαλύονταν με το υγρό διάλυμα. Το υπερκορεσμένο διάλυμα αναδυόταν στο άνω μέρος του δοχείου όπου και ερχόταν σε επαφή με τους «σπόρους». Σε διάστημα 100 με 150 ημερών, οι «σπόροι» σχημάτιζαν τους συνθετικούς κρυστάλλους χαλαζία. Όταν η λειτουργία του δοχείου ολοκληρωνόταν και η θερμοκρασία του δοχείου επανέρχονταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι χειριστές αφαιρούσαν το τελικό προϊόν χαλαζία ενώ στην συνέχεια προχωρούσαν στον εσωτερικό καθαρισμό του άδειου δοχείου πριν την επόμενη καλλιέργεια. [19]

3.1.2 Περιγραφή ατυχήματος

Το 2009, το δοχείο πίεσης No. 2 υπέστη διάρρηξη την 120η μέρα λειτουργίας σε κύκλο λειτουργίας 150 ημερών. Θραύσματα του δοχείου και της κτηριακής εγκατάστασης κατέληξαν σε γειτονικές κτηριακές εγκαταστάσεις της περιοχής με απόσταση έως και 500 m περίπου τραυματίζοντας θανάσιμα έναν εργαζόμενο καθώς και έναν οδηγό φορτηγού που βρισκόταν σταθμευμένος έξω από τις εγκαταστάσεις. Επίσης από την διάρρηξη του δοχείου προκλήθηκαν σοβαρές υλικές ζημιές ενώ το δοχείο No 2 μετά την έκρηξη, αποκόπηκε από τη βάση του και προσγειώθηκε σε γειτονική κτηριακή εγκατάσταση (CSB, 2013, Fig.8, p. 6,[19]).

3.1.3 Ανάλυση αστοχίας - 1^η Εκτίμηση

Μετά το συμβάν, ορίστηκε μια ομάδα εμπειρογνομόνων για να διαπιστωθούν τα αίτια της διάρρηξης του δοχείου Νο 2. Μετά τα πρώτα συμπεράσματα απορρίφθηκε το ενδεχόμενο κολλήματος κατά την διαδικασία λειτουργίας του δοχείου. Παρατηρήθηκε ότι δεν ενεργοποιήθηκε η ασφαλιστική βαλβίδα εκτόνωσης, αποδεικνύοντας ότι δεν υπέστη υπερπίεση. Από προηγούμενα αρχεία ενδείξεων των θερμομέτρων του δοχείου Νο 2, διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις ήταν σταθερές βάσει της λειτουργίας τους μέχρι και την έκρηξη. Ως αποτέλεσμα, η επιτροπή προχώρησε σε δοκιμές ανάλυσης από τα ευρήματα των διεργασιών ελασμάτων (CSB, 2013, Fig 12 & 13, p. 9, [19]) του δοχείου Νο 2, προκειμένου να προσδιοριστεί το ακριβές αίτιο της πρόκλησης της αστοχίας του δοχείου και αν η τελευταία προκλήθηκε από χαρακτηριστικά της διαδικασίας καλλιέργειας του συνθετικού χαλαζία ή από ελάττωμα του δοχείου που προερχόταν από το σχεδιασμό και την αρχική κατασκευή του. Από τα θραύσματα, κόπηκαν δοκίμια από την εσωτερική, την εξωτερική διάμετρο και από τις επιφάνειες θραύσης του δοχείου για μικροσκοπική εξέταση. Μετά από επανεξέταση των δεδομένων των μηχανικών δοκιμών, η επιτροπή εμπειρογνομόνων διαπίστωσε ισχυρές ενδείξεις ρωγμών (CSB, 2013, Fig.14, p. 9[19]) κοντά στην εσωτερική διάμετρο του θραύσματος του δοχείου. Η ανάλυση του μικροσκοπικού ελέγχου στα δοκίμια του θραύσματος έδειξε ότι η σκληρότητα του υλικού μειώθηκε σημαντικά με αποτέλεσμα να υποβαθμιστεί η αντοχή του. Η ρηγματώση λόγω διάβρωσης υπό μηχανική τάση (SCC) θεωρήθηκε ο πιθανός μηχανισμός αστοχίας που προκάλεσε την θραύση του δοχείου. Το δοχείο, για της ανάγκες της καλλιέργειας περιείχε ένα αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου και νερού. Το συγκεκριμένο διάλυμα δημιούργησε ένα περιβάλλον υποβάθμισης στο εσωτερικό του δοχείου, ιδίως σε μικρές επιφανειακές γρατζουνιές, και πιθανότατα οδήγησε στην ανάπτυξη SCC. Η θραύση ξεκίνησε από μια υπάρχουσα, επιφανειακή μη σχετική ασυνέχεια στην εσωτερική διάμετρο του κάτω τμήματος του δοχείου. Οι ενδείξεις των ρωγμών διάβρωσης υπό τάσης στο θραύσμα υποδηλώνουν ότι η επίστρωση ακμίτη δεν προστάτευε επαρκώς το εσωτερικό δοχείου από το όξινο περιβάλλον διεργασίας. Εκτιμήθηκε ότι τα εσωτερικά ίχνη που σχηματίστηκαν κατά τον καθαρισμό των δοχείων (γρατζουνιές) ήταν οι εστίες όπου το όξινο περιβάλλον της καλλιέργειας ενεργοποίησε τον μηχανισμό διάβρωσης και σε συνδυασμό με την εσωτερική πίεση τις μετέτρεψε σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων προκαλώντας την τελική αστοχία του δοχείου. [19]

3.1.4 Ανάλυση αστοχίας – 2^η Εκτίμηση

Η ευθραυστότητα λόγω σκλήρυνσης είναι ένας μηχανισμός θραύσης που εμφανίζεται όταν οι χάλυβες, ιδίως οι κραμματωμένοι, εκτίθενται σε θερμικές κατεργασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση της ανθεκτικότητας του υλικού, καθιστώντας το, ευάλωτο στη θραύση. Αυτό το φαινόμενο φαίνεται να είναι ένα δεύτερο σενάριο το οποίο μπορεί να συνέβαλε στον σχηματισμό κρίσιμων ρωγμών στο δοχείο Νο 2 και στην επιτάχυνση της ρωγμής διάβρωσης υπό τάση (Stress Corrosion Crack). Ο έλεγχος του χρόνου της θερμικής κατεργασίας είναι σημαντικός για να εξασφαλιστεί ότι το υλικό έχει τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες για την εφαρμογή του. Για την περαιτέρω ανάλυση αυτής της θεωρίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κρούσης με δοκίμια από το θραύσμα τους δοχείου και έγινε σύγκριση με τα αυτά των δοκιμών κρούσης κατά την αρχική πιστοποίηση του δοχείου (μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του). Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι υπήρχαν σημαντικές διαφορές στην αντοχή του υλικού σε διάφορες περιοχές του δοχείου, επιβεβαιώνοντας το σενάριο της πρόκλησης ρωγμών λόγω ευθραυστότητας, εκτός από την SCC. Η μείωση της ενέργειας Charpy δείχνει ότι η ικανότητα του δοχείου να απορροφά ενέργεια πριν από την αστοχία μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου, ενδεχομένως λόγω της SCC. Τα σημεία δεδομένων μετά την αστοχία είναι ο μέσος όρος τριών δοκιμών σε τέσσερα διαφορετικά σημεία της διαμέτρου του δοχείου μετά την θραύση (CSB, 2013, Table.1, p. 10[19]). Το τμήμα του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) που υπάγεται στο Υπουργείο Εμπορίου των ΗΠΑ, ανέλαβε την εξέταση της μικροδομής των κρυστάλλων του θραύσματος, για να διαπιστώσει εάν η αστοχία του δοχείου προήλθε από την υπερβολική θερμική κατεργασία. Η NIST κατέληξε ότι οι διακυμάνσεις στη δομή των κρυστάλλων του δοχείου ήταν οι τυπικές. Επομένως, οι επιθεωρητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το αίτιο της αστοχίας του δοχείου Νο 2 λόγω ήταν σχηματισμού ρωγμών από διάβρωση υπό τάση (SCC).

3.1.5 Παλαιότερες ενδείξεις αστοχίας SCC

Το 2007, η άνω κεφαλή του δοχείο Νο 6 είχε παρουσιάσει διαρροή του καυστικού διαλύματος το οποίο εξήλθε μέσω της κοχλιωτής σύνδεσης του αισθητήρα πίεσης στην κορυφή του δοχείου εν λειτουργία. Η NDK διέκοψε την παραγωγή και προχώρησε σε μη καταστροφικούς ελέγχους από εξωτερικό διαπιστευμένο εργαστήριο και για τα οκτώ δοχεία. Ο ελεγκτής διαπίστωσε πολύ μικρές ρωγμές στα τέσσερα από τα οκτώ δοχεία. Πιο συγκεκριμένα οι ρωγμές εντοπίστηκαν

στις άνω κεφαλές κλεισίματος (δοχεία Νο. 1, 4, 6 και 8) και σημείωσε την πιθανότητα ασυνεχειών στον άνω πυθμένα του δοχείου Νο. 2. Ο ελεγκτής απέδωσε τη ρηγμάτωση λόγω διάβρωσης υπό τάση (SCC) σε θέματα σχεδιασμού, επιλογής υλικών και θερμικής επεξεργασίας του υλικού κατασκευής των δοχείων. [19]

3.2 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία σε κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης.

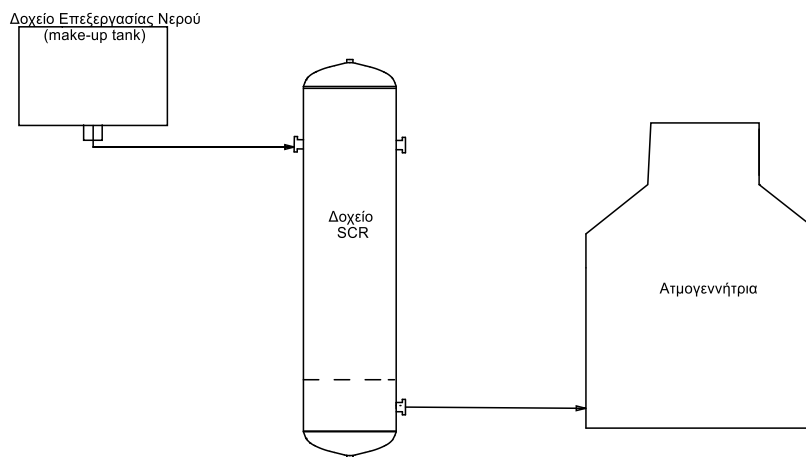
Η Loy-Lange Box Co. είναι εταιρία παρασκευής χάρτινων συσκευασιών στις ΗΠΑ (Εικ. 24). Το 2017 σε μία από τις εγκαταστάσεις της στο Μισσούρι, προκλήθηκε έκρηξη από αστοχία δοχείου πίεσης στο δίκτυο παραγωγής ατμού, προκαλώντας τεράστιες υλικές ζημιές σε κτηριακές εγκαταστάσεις καθώς και θανατηφόρους τραυματισμούς.



Εικόνα 24: Εγκαταστάσεις της Loy Lange Box Co μετά την αστοχία του δοχείου [61]

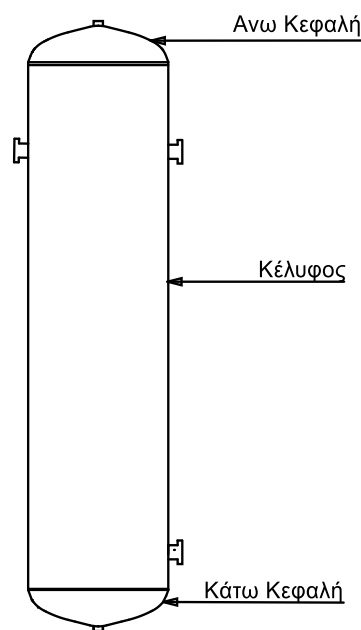
3.2.1 Αρχή Λειτουργίας και τεχνικά χαρακτηριστικά δοχείου

Για την παραγωγή κυματοειδούς χαρτιού, η Loy-Lange διέθετε ένα σύστημα παραγωγής ατμού. Η μονάδα ατμοπαραγωγής (Εικ. 25, CSB, 2022, Fig.2, p.14,[20]) αποτελούνταν μία ατμογεννήτρια, συστήματα επεξεργασίας νερού και ένα δίκτυο σωλήνων παροχής ατμού και επιστροφής συμπυκνωμάτων. Το νερό τροφοδοσίας της ατμογεννήτρια περιλάμβανε νερό από την παροχή νερού του δημόσιου δικτύου ύδρευσης καθώς και επιστρεφόμενο συμπύκνωμα νερού από την μονάδα δικτύου ατμοποίησης. Το νερό του δικτύου ύδρευσης επεξεργάζονταν με ένα σύστημα αφαλάτωσης σε μια δεξαμενή αναπλήρωσης (make up tank). Η επεξεργασία του νερού γινόταν με την προσθήκη χημικών ουσιών. Οι διεργασίες αφαλάτωσης σχεδιάστηκαν για να απομακρύνουν το οξυγόνο και άλλα μη συμπυκνωμένα αέρια από το εισερχόμενο νερό, ώστε να μην προκληθεί διάβρωση και πρόωρη φθορά στον εξοπλισμό της μονάδας και του δικτύου σωληνώσεων μεταφοράς του ατμού. [20]



Εικόνα 25: Σκαρίφημα ροής νερού τροφοδοσίας ατμοπαραγωγής ατμού (CSB, 2022, Fig.2, p. 14) [20]

Στη συνέχεια, το νερό αντλούνταν από τη δεξαμενή αναπλήρωσης σε ένα δοχείο πίεσης (SCR). Το δοχείο πίεσης ήταν εξοπλισμένο με μια γραμμή εξαερισμού που επέτρεπε στα αέρια προϊόντα, να εκτονώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω μιας ασφαλιστικής βαλβίδας. Αυτό το δοχείο δεχόταν στο εσωτερικό του τόσο το αφαλατωμένο νερό όσο και το επιστρεφόμενο συμπύκνωμα της μονάδας. Το νερό στο δοχείο πίεσης (SCR) υποβαλλόταν σε επιπρόσθετη χημική αφαλάτωση με την χρήση επιπλέον χημικών ουσιών. Στη συνέχεια, το νερό αντλούνταν από το δοχείο SCR προς τις ατμογεννήτριες, όπου διέρρεε στο εσωτερικό της μέσω μιας σερπαντίνας και θερμαινόταν με την χρήση καυστήρα στον θάλαμο καύσης. Στη συνέχεια, εισερχόταν σε ένα δοχείο που ονομάζεται διαχωριστής (Steam separator). Σε αυτό το δοχείο, το μεγαλύτερο μέρος του νερού εξατμιζόταν σε ατμό ενώ το όποιο νερό αποστραγγίζονταν. Τέλος, ο ατμός κατέληγε μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων στη μονάδα παραγωγής επεξεργασίας χαρτιού και συσκευασίας και χρησιμοποιούνταν μόνο για την παραγωγή θερμότητας της μονάδας. Λόγω πτώσης πίεσης του ατμού, μετά την χρήση του στην μονάδα επεξεργασίας χαρτιού, ο ατμός συμπυκνωνόταν και επέστρεφε στο δοχείο πίεσης (SCR) σε θερμοκρασία και πίεση σχεδόν κορεσμού. [20]



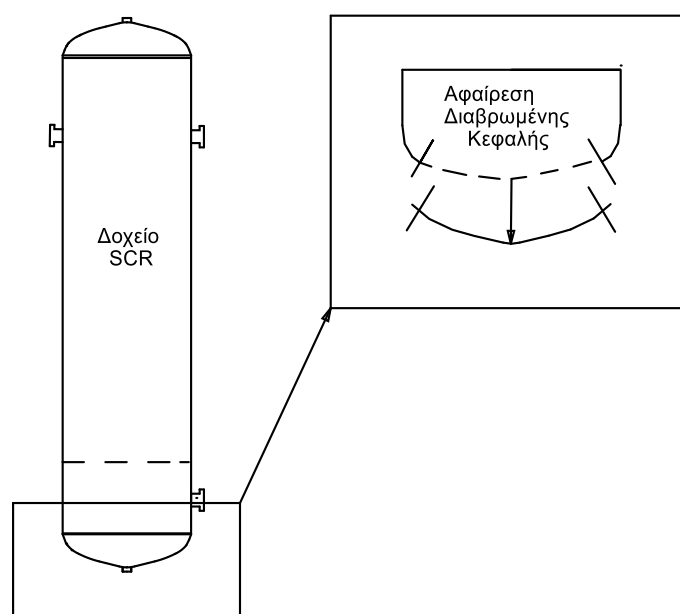
Εικόνα 26: Σκαρίφημα του δοχείου SCR (CSB, 2013, Fig.4, p.16) [20]

Το δοχείο SCR διατηρούνταν υπό πίεση, γεγονός που επέτρεπε στο νερό τροφοδοσίας και στο συμπύκνωμα που επέστρεφε να διατηρήσουν την θερμότητα τους. Το σύστημα ατμού της Loy-Lange Box λειτουργούσε συνήθως κατά τη διάρκεια της πρωινής βάρδιας. Η μονάδα παραγωγής ατμού ξεκινούσε την λειτουργία της το πρωί ενώ η διακοπή της πραγματοποιούνταν στο τέλος κάθε εργάσιμης ημέρας και παρέμενε ανενεργή τα Σαββατοκύριακα. Το δοχείο SCR (Εικ. 26, CSB, 2013, Fig.4, p.16, [20]) ήταν ένα κυλινδρικό δοχείο πίεσης με εξωτερική διάμετρο 76,2 εκατοστών και μήκος περίπου 5,4 μέτρα. Το SCR ήταν τοποθετημένο περίπου ένα μέτρο πάνω από το έδαφος πάνω σε μία βάση στήριξης. Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή το δοχείο πίεσης SCR είχε ονομαστικό πάχος 6,50 mm, μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας 10,34 bar και μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού 232,22°C. [20]

3.2.2 Αρχικές ενδείξεις αστοχίας

Το 2012, το τεχνικό προσωπικό της Loy-Lange εντόπισε διαρροή νερού από την κάτω κεφαλή του δοχείου SCR. Η κεφαλή είχε εμφανή σημάδια διάβρωσης (pitting corrosion). Αυτή ήταν και η αρχική εκτίμηση των τεχνικών για την διαρροή του δοχείου. Η εταιρεία αποφάσισε να επισκευάσει το δοχείο από το να το αντικαταστήσει με νέο, αναθέτοντάς τις εργασίες επισκευής

σε εξωτερικό πιστοποιημένο συνεργείο. Το δοχείο SCR ήταν επιθεωρημένο από το Εθνικό Επιμελητήριο Επιθεωρητών λεβήτων και δοχείων υπό πίεση (NBBI) όπου πιστοποίησε ότι κατασκευάστηκε σύμφωνα με τον ASME(BPVC) [1]. Το συνεργείο που ανέλαβε την επισκευή κατείχε πιστοποιητικό εξουσιοδότησης του NBBI το οποίο τον εξουσιοδοτούσε να εκτελεί επισκευές και μετατροπές σε δοχεία πίεσης σύμφωνα με τον Εθνικό Κώδικα Επιθεώρησης (NBIC). [20]



Εικόνα 27: Σχεδιάγραμμα επισκευή της διαβρωμένης κεφαλής (CSB, 2022, Fig.7, p.19,[20])

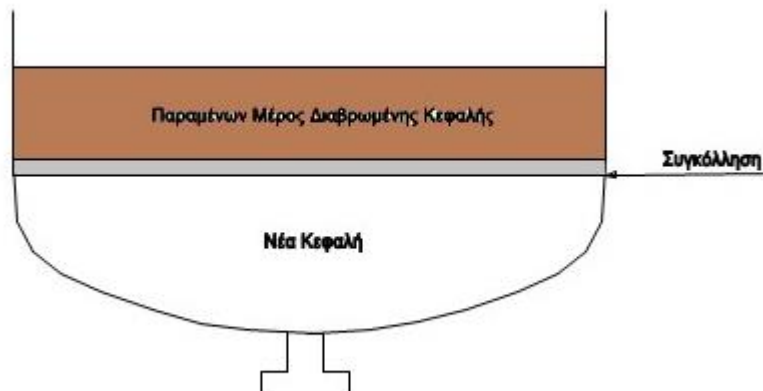
Το συνεργείο μετά από οπτικό έλεγχο, αποφάσισε να αφαιρέσει το διαβρωμένο μέρος της κεφαλής και να το αντικαταστήσει με νέο έλασμα ίδιου πάχους, αφού προηγηθεί πρώτα καλός καθαρισμός (Εικ.27, CSB, 2022, Fig.7, p.19,[20]). Όταν η επισκευή ολοκληρώθηκε, το συνεργείο εκτέλεσε υδραυλική δοκιμή στο δοχείο σε πίεση δοκιμής τα 7,58 bar με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην συνέχεια με την έγκριση του συνεργείου επισκευής, η εταιρία Loy-Lange έθεσε την μονάδα ατμοπαραγωγής ξανά σε λειτουργία. [20]

3.2.3 Περιγραφή ατυχήματος

Το προσωπικό της Loy-Lange Box παρατήρησε διαρροή που προερχόταν από τον κάτω πυθμένα του δοχείου SCR. Το συνεργείο που ανέλαβε την επισκευή του δοχείου δεν ήταν διαθέσιμο για την άμεση επισκευή του. Η Loy-Lange Box παρά τον εντοπισμό της διαρροής δεν διέκοψε την λειτουργία της παραγωγικής μονάδας ώστε να μην ματαιωθεί η παραγωγή του χαρτιού. Όταν η παραγωγική διαδικασία ολοκληρώθηκε, η εταιρία δεν μερίμνησε περαιτέρω για την επισκευή του δοχείου. Την επόμενη εργάσιμη, ο τεχνικός που ήταν υπεύθυνος για την προθέρμανση και την ενεργοποίηση του συστήματος παραγωγής ατμού έθεσε τις ατμογεννήτριες της μονάδας σε λειτουργία. Μετά από μια και μισή ώρα περίπου από την προθέρμανση της ατμογεννήτριας η κάτω κεφαλή του SCR αστόχησε με αποτέλεσμα το δοχείο SCR να εκτοξευτεί από το κτίριο της Loy-Lange στον αέρα (CSB, 2022, Fig.9, p.23,[20] & CSB, 2022, Fig.11, p.24,[20]) και να προσκρούσει 160 μέτρα περίπου στην οροφή ενός γειτονικού κτηρίου (Εικ.35b). Η έκρηξη του δοχείου πίεσης SCR προκάλεσε ανυπολόγιστες υλικές ζημιές στις εγκαταστάσεις της Loy-Lange Box, σε γειτονικές εγκαταστάσεις και οχήματα (CSB, 2022, Fig.11, p.24,[20]), ενώ παράλληλα τρεις άνθρωποι τραυματίστηκαν θανάσιμα.

3.2.4 Ανάλυση αστοχίας

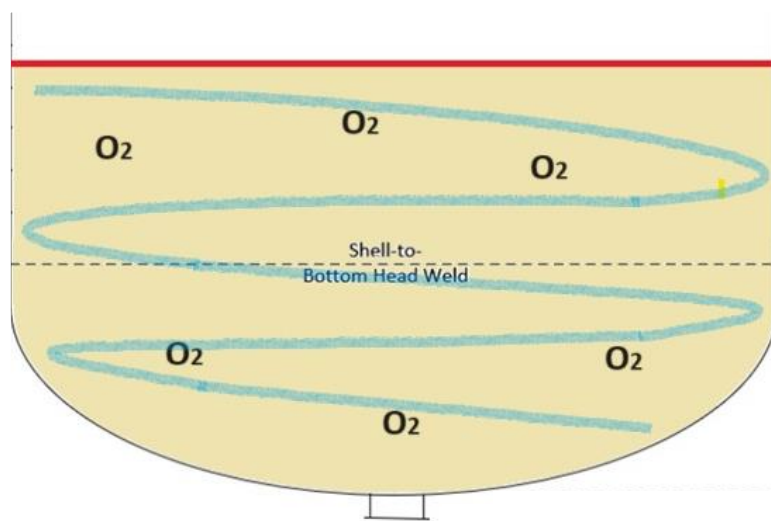
Κατά την απομάκρυνση του δοχείου πίεσης SCR από τα συντρίμια του γειτονικού κτηρίου (CSB, 2022, Fig.13, p.25, [20]), παρατηρήθηκε ότι ένα μέρος κεφαλής του κάτω πυθμένα είχε αποκολληθεί (CSB, 2022, Fig.15, p.27, [20]). Η αρχική συγκόλληση κατασκευής μεταξύ κάτω κεφαλής και κελύφους, δεν επηρεάστηκε από την έκρηξη καθώς παρέμεινε συνδεδεμένη με το υπόλοιπο δοχείο. Αντίθετα, στο υπόλοιπο μέρος της κάτω κεφαλής που βρέθηκε, παρατηρήθηκε η συγκόλληση της επισκευής που διενεργήθηκε στο δοχείο από την διαρροή που υπέστη το 2012. Από τον οπτικό έλεγχο που διενεργήθηκε, αποκλείστηκε το ενδεχόμενο ότι έκρηξη να προκλήθηκε από τις συγκεκριμένες συγκολλήσεις. Πιο συγκεκριμένα, η αποκόλληση βρέθηκε εντός του επαναχρησιμοποιημένου αρχικού χαλύβδινου δακτυλίου, στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη(ΘΕΖ) της συγκόλλησης (Εικ. 28, CSB, 2022, Fig.14, p.27, [20]).



Εικόνα 28: Σχεδιάγραμμα κάτω κεφαλής του δοχείου SCR (CSB, 2022, Fig.14, p.27, [20])

Η εκτεταμένη διάβρωση που βρέθηκε τόσο στο διαχωρισμένο τμήμα της κάτω κεφαλής όσο και στο τμήμα της κάτω κεφαλής που παρέμεινε συνδεδεμένο με το κέλυφος SCR, συνάδει με την εμφάνιση τρηματικής διάβρωσης (pitting corrosion) (CSB, 2022, Fig.16, p.28, [20]). Το κέλυφος και η άνω κεφαλή του δοχείου βρέθηκαν σχετικά ανεπηρέαστα από βλάβες διάβρωσης (CSB, 2022, Fig.17, p.29, [20]). Μετά τον οπτικό έλεγχο των ευρημάτων, πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική εξέταση του πάχους των γειτονικών σημείων εκατέρωθεν της συγκόλλησης επισκευής (CSB, 2022, Fig.20, p.32, [20]). Κατά μέσο όρο, το επίθεμα της επισκευής είχε σχεδόν διπλάσιο πάχος από το έλασμα της χαλύβδινης κεφαλής του δοχείου SCR. Από τα αρχεία της επισκευής βρέθηκε ότι το πάχος του επίθεματος είχε ονομαστικό πάχος κατά μέσο όρο 6,5 mm (όσο και το ονομαστικό πάχος σχεδιασμού). Ο μέσος όρος του πάχους που μετρήθηκε μετά την θραύση, είχε μειωθεί κατά 50% περίπου (Μ.Ο. 2,79 mm). Επίσης, το επίθεμα επισκευής, σύμφωνα με μαρτυρίες του συνεργείου επισκευής, ήταν μια χαλύβδινη πλάκα που διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει σχηματικά με την διαβρωμένη κεφαλή που αφαιρέθηκε από το δοχείο SCR, χωρίς να γίνει κάποιος σχεδιασμός ή μελέτη για την καταλληλότητα του επιθέματος. Μετά από ελέγχους στα αρχεία της Loy-Lange Box, οι επιθεωρητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τρηματική διάβρωση (pitting corrosion) του 1^{ου} περιστατικού διαρροής (2012) προκλήθηκε από το περιεχόμενο νερό που δεν αποστραγγιζόταν από το δοχείο SCR κατά την παύσης της μονάδας ατμοπαραγωγής (Εικ. 29, (CSB, 2022, Fig.27, p.40, [20])). Το παραμένον νερό ήταν αποτέλεσμα της κακής εκτέλεσης

της διαδικασίας εκκίνησης του συστήματος παραγωγής ατμού (ατμογενήτριας) από το υπεύθυνο προσωπικό, με νερό το οποίο δεν ήταν κατάλληλο για βιομηχανική χρήση. Η παραμονή του νερού στο δοχείο SCR ποσότητες διοξειδίων στην σύστασή του, ενεργοποίησαν τον μηχανισμό της τρημματικής διάβρωσης. Με την αντικατάσταση-επισκευή του διαβρωμένου μέρους της κεφαλής, η Loy-Lang Box θεώρησε ότι είχε προλάβει την διάδοση της διάβρωσης.



Εικόνα 29: Σκαρίφημα της κάτω κεφαλής του SCR (CSB, 2022, Fig.27, p.40) [20]

Οι επιθεωρητές διαπίστωσαν ότι το τεχνικό συνεργείο που ανέλαβε την επισκευή δεν αφαίρεσε πλήρως το διαβρωμένο τμήμα της κεφαλής. Στην πραγματικότητα, το νέο έλασμα συγκολλήθηκε (Εικ. 28, CSB, 2022, Fig.14, p.27, [20]) με το υπόλοιπο μέρος της κεφαλής του δοχείου που είχε ήδη προσβληθεί από τον μηχανισμό της τρημματικής διάβρωσης (pitting corrosion). Μετά την επαναλειτουργία της μονάδας ατμοπαραγωγής, το διαβρωμένο τμήμα της κεφαλής που δεν αφαιρέθηκε, συνέχισε να επηρεάζεται από την διάβρωση και τις τάσεις του δοχείου μειώνοντας έτσι το πάχος του τοιχώματος. Οι υπεύθυνοι της μονάδας εξακολουθούσαν να μην αποστραγγίζουν το δοχείο από το υπάρχον νερό, μετά από κάθε παύση λειτουργίας. Τελικώς, το δοχείο συνέχισε να λειτουργεί με αυτούς του ρυθμούς για τα επόμενα πέντε χρόνια με αποτέλεσμα την τελική διάρρηξη του. Το μειωμένο κατά σειρά πάχος τοιχώματος της κεφαλής δεν μπορούσε να διατηρήσει τις πιέσεις λειτουργίας που όριζε ο αρχικός κατασκευαστής. Η επισκευή (2012) δεν απέτρεψε την αστοχία του δοχείου, απλά την καθυστέρησε.[20]

3.3 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε εναλλάκτη θερμότητας

Το Κεντρικό Ινστιτούτο Μεταλλουργικών Έρευνών και Ανάπτυξης (CMRDI) προχώρησε στην αναζήτηση των αιτιών αστοχίας σε έναν εναλλάκτης θερμότητας. Το συγκεκριμένο δοχείο πίεσης χρησιμοποιούνταν για τις ανάγκες επεξεργασίας αφαλατωμένου νερού (με θέρμανση) στην πόλη Sharm Elshaikh της Αιγύπτου. Η αστοχία παρατηρήθηκε στους αυλούς του εναλλάκτη. Οι αυλοί ήταν κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα ποιότητας 316L με χαμηλά ποσοστά άνθρακα, καλή ολκιμότητα και αντοχή στην οξείδωση. Η CMRDI διεξήγαγε τους παρακάτω ελέγχους για να διερευνηθεί κάτω από ποιους παράγοντες εμφανίστηκε η αστοχία:

- **Οπτικός έλεγχος**
- **Χημική ανάλυση**
- **Δοκιμής διάβρωσης**
- **Μακροσκοπικός έλεγχος**

3.3.1 Ανάλυση αστοχίας

Αρχικά ο εναλλάκτης (Ghayad, 2015, Fig. 1, p.58, [21]) αποσυναρμολογήθηκε για να εξεταστεί κάθε αυλός ξεχωριστά. Τα πρώτα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου έδειξαν ότι δεν υπήρχαν εμφανείς οπές ή ρωγμές από τα οποία να προήλθε η διαρροή. Για την συνέχιση των ελέγχων κόπηκαν δειγματοληπτικά δείγματα σε σημεία των αυλών και σε σημεία σύνδεσης των αυλών και των κεφαλών του εναλλάκτη. Ένα μέρος των δειγμάτων υποβλήθηκε σε χημική ανάλυση. Ο παραπάνω έλεγχος επιβεβαίωσε την ποιότητα του ανοξείδωτου χάλυβα 316L των αυλών όπως όριζε η μελέτη και ο τεχνικός φάκελος του κατασκευαστή (Ghayad, 2015, Table 1, p.58, [21]). Τα υπόλοιπα δείγματα των αυλών υποβλήθηκαν σε δοκιμές διάβρωσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα, για την εκτίμηση του μηχανισμού διάβρωσης.

Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές ηλεκτροχημικής διάβρωσης και πιο συγκεκριμένα σε ποτενσιοστατική δομική¹, σε θερμοκρασίες δωματίου και στους 80°C για να προσομοιωθούν οι συνθήκες λειτουργίας του δείγματος. Οι δοκιμές έγιναν με την χρήση ηλεκτρονικού ποντενσιοστάτη σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου(1,37 gr NaCl) και ιονισμένου νερού παρασκευάζοντας 1000ppm ιόντων χλωρίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαμόρφωσαν μια ανοδική καμπύλη πόλωσης² σε ένα διάγραμμα δυναμικού(V) / ρεύματος(A cm³) προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του υλικού στην διάβρωση. Στην πρώτη δοκιμή, σε θερμοκρασία δωματίου, παρατηρήθηκε παθητικοποίηση³ του δείγματος σε ρεύμα μέχρι τα 0,6V. Στην συνέχεια όμως παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση(κόκκινη καμπύλη) (Ghayad, 2015, Fig 2, p.59, [21]) . Αυτή η αύξηση του δυναμικού θεωρήθηκε ως δυναμικό διάρρηξης (pitting potential)⁴. Με αντίστροφο ρυθμό σάρωσης⁵ του δυναμικού κατά 1V(μπλε καμπύλη) σχηματίστηκε στο διάγραμμα ένας βρόχος, υποδηλώνοντας ότι η επιφάνεια του υλικού χρειάζεται κάποιο χρόνο για την αποκατάσταση της παθητικοποίησης στην επιφάνεια του υλικού. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την εμφάνιση τρηματικής διάβρωσης. Στην δεύτερη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στους 80°C, παρατηρήθηκε το ίδιο μοτίβο όπως και στην θερμοκρασία δωματίου, αλλά με διαφορετικές τιμές παθητικού ρεύματος(0,4V) και στην αντίστροφη πόλωση δυναμικού(1.028V) (Ghayad, 2015, Fig 3, p.59, [21]). Το αποτέλεσμα της κυκλικής καμπύλης ανοδικής πόλωσης στις θερμοκρασίες δωματίου και στους 80 °C απέδειξε ότι σε υψηλές θερμοκρασίες το δυναμικό διάβρωσης μειώνεται ενώ η περιοχή του βρόχου αυξήθηκε όπως και η περιοχή του παθητικού ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνεται η έναρξη και η ανάπτυξη κοιλοτήτων διάβρωσης, δηλαδή τρηματική διάβρωση(pitting corrosion). Ο λόγος αυτής της ανάπτυξης έχει σχέση με την αυξημένη χημική αντιδραστικότητα και την ενισχυμένη διάχυση των διαβρωτικών μηχανισμών στο μέταλλο.

¹Η ποτενσιοστατική δοκιμή είναι ένα ηλεκτροχημικό πείραμα όπου το δυναμικό ενός ηλεκτροδίου διατηρείται σε σταθερή τιμή, ενώ μετρείται το ρεύμα που το διαρρέει. Αυτός ο τύπος δοκιμής χρησιμοποιείται σε μελέτες διάβρωσης, και ηλεκτροχημικής ανάλυσης.

²κυκλική καμπύλη ανοδικής πόλωσης είναι μια γραφική αναπαράσταση της ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς ενός υλικού (μετάλλου ή κράματος), υπό συνθήκες ανοδικής πόλωσης.

³Εμφάνιση στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου που εμποδίζει την ροή ηλεκτρονίων και ιόντων, μειώνοντας τον ρυθμό διάβρωσης.

⁴Στην ελληνική βιβλιογραφία έχει προταθεί ο όρος δυναμικό έναρξης διάβρωσης με κοιλοτήτες(pitting corrosion).

⁵Όταν επιτευχθεί το υψηλό ανοδικό δυναμικό, το δυναμικό αντιστρέφεται (ανακυκλώνεται) προς την καθοδική κατεύθυνση, επιτρέποντας στο υλικό να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση.

Από την άλλη μεριά, όταν το παθητικό ρεύμα αυξάνεται σε αυξημένες θερμοκρασίες νοείται ότι το παθητικό στρώμα του μετάλλου γίνεται ολοένα και πιο επιρρεπές σε διάσπαση λόγω της αυξημένης κινητικότητας των ιόντων και της παραπάνω χημικής δραστηριότητας. Μετά το πείραμα της κυκλικής ανοδικής πόλωσης στο δείγμα του αυλού του εναλλάκτη το δυναμικό παρέμεινε σταθερό σε διάστημα δύο ωρών (Ghayad, 2015, Fig 4 & Fig. 5, p.59, [21]). σε θερμοκρασία δωματίου και 80 °C αντίστοιχα. Η αύξηση του παθητικού ρεύματος, που σχετίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγεί στην ευαισθησία του αυλού στην εμφάνιση διάβρωση με κοιλότητες (pitting corrosion). Αυτό το αποδεικνύει και ο μικροσκοπικός έλεγχος που διενεργήθηκε ως συνέχεια της ποτενσιοστατικής δοκιμής. Στους 80 °C εμφανίστηκαν ίχνη τρηματικής διάβρωσης (Ghayad, 2015, Fig 6, p.59, [21]). Το δείγμα που εξετάστηκε σε θερμοκρασία δωματίου θα εμφάνιζε και αυτό σημάδια διάβρωσης αν αυξανόταν η θερμοκρασία του πριν την ποτενσιοστατική δοκιμή. Το εργαστήριο της CMRDI κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αστοχία του αυλού-αυλών του εναλλάκτη οφειλόταν λόγω της ανάπτυξης διάβρωσης με κοιλότητες (pitting corrosion) που σχηματίστηκε εξαιτίας του ποσοστού το χλωριόντων (800ppm) που περιείχε το νερό τροφοδοσίας σε συνδυασμό την χρήση υδροχλωρικού οξέος για την ρύθμιση του pH του εμπεριεχόμενου στον εναλλάκτη νερού. Η επιφάνεια του ανοξειδωτού χάλυβα των αυλών επηρεάστηκε από την χημική αντίδραση με τα ιόντα χλωρίου. Η κοιλότητες της διάβρωσης σχηματίζονται σε σημεία του ανοξειδωτού χάλυβα με επιφανειακές ετερογένειες (γρατζουνιές ή εγκλείσματα). Αν ο ρυθμός αποκατάστασης του παθητικού στρώματος δεν είναι επαρκής ώστε να καταστείλει την ανάπτυξη των κοιλοτήτων διάβρωσης, ιόντα που παράχθηκαν κατά την διάσπαση, συσσωρεύονται στις κοιλότητες ως στερεά προϊόντα διάβρωσης καλύπτοντας το στόμιο της κοιλότητας. Εξαιτίας αυτής της επικάλυψης, συσσωρεύονται μέσω μιας αντίδρασης (ηλεκτρόλυση) θετικά ιόντα υδρογόνου και σε συνδυασμό με τα ιόντα χλωρίου που διαχέονται από το νερό, δημιουργούν ένα όξινο περιβάλλον, με χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου, οδηγώντας στην αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης των κοιλοτήτων διάβρωσης μέχρι την τελική αστοχία του σωλήνα από την ανάπτυξη και διάδοση των ρωγμών. [21]

3.4 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε δεξαμενής αμμωνίας

Η επόμενη μελέτη περίπτωσης που θα αναλυθεί, αφορά δοχείο οχήματος μεταφοράς επικίνδυνων υλών, κατασκευασμένο από χάλυβα και με περιεχόμενο μέσο υγροποιημένη αμμωνία υπό πίεση. Οι ημισφαιρικές κεφαλές τις δεξαμενής ήταν συγκολλημένες με το κυλινδρικό κέλυφος 6 m περίπου. Λόγω το ότι το περιεχόμενο της δεξαμενής ήταν υγρή αμμωνία, για την μεταφορά της θα έπρεπε να διατηρηθούν συνθήκες κορεσμού να λειτουργεί ως δοχείο πίεσης. Το δοχείο είχε πίεση μέγιστης λειτουργίας τα 20,7 bar. Η πίεση κορεσμού όμως σχετίζεται με την θερμοκρασία. Στους 50 °C, η πίεση κορεσμού ήταν στα 20,33 bar πράγμα που έκρινε το δοχείο ασφαλή για την μεταφορά της υγρής αμμωνίας. [22].

3.4.1 Περιγραφή ατυχήματος

Το όχημα και η δεξαμενή κατά την μεταφορά της υγρής αμμωνίας μέχρι και το σημείο του προορισμού, δεν παρουσίασε κάποια δυσλειτουργία. Για την εκφόρτωση της υγρής αμμωνίας χρησιμοποιήθηκε ένας συμπιεστής με μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 18,3 bar. Κατά την εκφόρτωση της αμμωνίας, σημειώθηκε ρωγμή σε ένα σημείο της περιμετρικής συγκόλλησης μεταξύ κελύφους και κεφαλής μέχρι την πλήρη αποκόλλησή της προκαλώντας έκρηξη.

3.4.2 Ανάλυση αστοχίας

Σύμφωνα με τους Ashby και Jones, η αστοχία του δοχείου ξεκίνησε από μια ρωγμή που σχηματίστηκε στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ) της συγκόλλησης μεταξύ της ημισφαιρικής κεφαλής και του κελύφους (Ashby, 2012, Fig. 16.1, p.230, [22]). Τα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου εντοπίστηκαν πολλές διαβρωμένες περιοχές, οι οποίες κατά εκτίμηση των ερευνητών του συμβάντος, προκλήθηκαν από το περιεχόμενο της δεξαμενής. Η αρχική ρωγμή (Ashby, 2012, Fig. 16.2, p.231. [22]) χαρακτηρίστηκε ως ενδοκρυσταλλική και είχε αρχικά βάθος 2,5 mm. Λόγω του διαβρωτικού περιβάλλοντος εσωτερικά του δοχείου, η αντοχή των ορίων των κρυστάλλων υποβαθμίστηκε σε σχέση με την αντοχή της δομής του υλικού, προκαλώντας την ενδοκρυσταλλική ρωγμή. Το διαβρωτικό περιβάλλον διευκόλυνε τη διάδοση της ρωγμής κατά μήκος των αποδυναμωμένων ορίων των κρυστάλλων, ενώ η εφελκυστική τάση παρείχε τη μηχανική κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη της ρωγμής (Ashby, 2012, Fig. 16.2, p.231, [22]). αλλά και τον σχηματισμό των ρωγμών διάβρωσης υπό τάση (stress corrosion

cracking). Σύμφωνα με τον Ashby [22], ο χάλυβας που επιλέχτηκε για την κατασκευή του δοχείου ήταν χαμηλής κραματοποίησης και υψηλής αντοχής, με όριο διαρροής (yield strength) στα 712 MPa και δυσθραυστότητα (fracture toughness) στα 80 MPa (Πίν. 1).

Πίνακας 1: Εύρος ανθεκτικότητας και δυσθραυστότητας για ορισμένα μέταλλα

Material	Toughness G_c (KJ/ m⁻²)	Fracture toughness K_{IC} (MPa)
Steels	30 - 150	80 – 170
Cast irons	0.2 - 3	6 - 20
Aluminum alloys	0.4 - 70	5 - 70

Λόγω ότι η αρχική ρωγμή εμφανίστηκε στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (ΘΕΖ), εξετάστηκαν δείγματα από διάφορα σημεία πλησίον της περιμετρικής συγκόλλησης κελύφους και κεφαλής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμότητα που αναπτύχθηκε κατά την διαδικασία της συγκόλλησης, επηρέασε την δομή του υλικού στην περιοχή της ΘΕΖ, αυξάνοντας το όριο διαρροής στα 940 MPa αλλά μειώνοντας ταυτόχρονα την δυσθραυστότητα στα 39 MPa από τα 80 MPa που είχε αρχικά ο επιλεγμένος χάλυβας. Έχοντας ως στοιχείο της μήκος της ενδοκοκκοδους ρωγμής και την εξέλιξή σε γρήγορή θραύση (fast fracture), υπολογίζεται παρακάτω η κρίσιμη τάση (σ) για να διαπιστωθεί εάν η συγκεκριμένη ασυνέχεια θα ωθούσε το δοχείο προς αστοχία. Με βάση τα στοιχεία της δεξαμενής, υπολογίστηκε η διαμήκης τάση της γρήγορης θραύσης. Η σχέση του υπολογισμού της τάσης δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad (1) [22]$$

Όπου (σ) η εφελκυστική τάση στα τοιχώματα του δοχείου, (p) η πίεση του περιεχομένου (στην προκειμένη περίπτωση η πίεση της υγρής αμμωνίας στο εσωτερικό της δεξαμενής), (r) η ακτίνα της δεξαμενής και (t) το πάχος του ελάσματος της δεξαμενής [13]. Ο υπολογισμός της έντασης της τάσης στη γρήγορη θραύση (fast fracture) δίνεται από την σχέση:

$$Y\sigma\sqrt{\pi a} = K_c \quad (2) \quad [22]$$

Όπου (K_c) η ένταση της τάσης, (a) το μήκος της αρχικής ρωγμής και Y_σ μια σταθερά με τιμή κοντά στην μονάδα η οποία εξαρτάται σε μικρό βαθμό από την γεωμετρία του ρηγματωμένου σώματος [13]. Το Y ισοδυναμεί με 1,98 σύμφωνα με το μήκος της αρχικής ρωγμής που σχηματίστηκε (Ashby, 2012, Fig. 16.3, p.232, [22]).

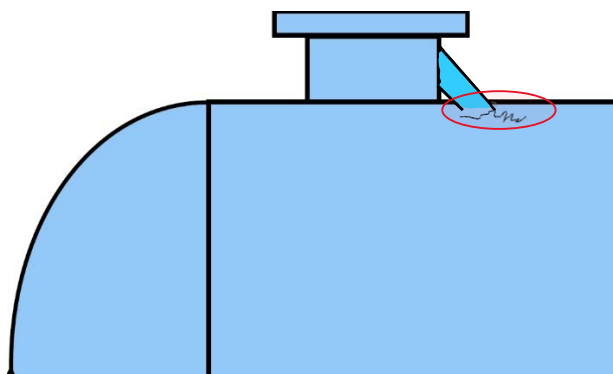
Έχοντας όλα τα στοιχεία γνωστά, υπολογίζεται η κρίσιμη τάση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{crit} = \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a}} = \frac{39}{1.92\sqrt{\pi \times 0.0025}} = 229 \text{ MPa} \quad [22]$$

Η κρίσιμη τάση (σ_{crit}) είναι 64% μεγαλύτερη από την διαμήκης τάσης (σ) [22]. Εκ του αποτελέσματος, το υλικό που επιλέχτηκε είχε την απαραίτητη αντοχή στην εφαρμοζόμενη τάση χωρίς να υποστεί αστοχία. Με άλλα λόγια, το υλικό δεν θα έφτανε στο όριο θραύσης του υπό τις δεδομένες συνθήκες φόρτισης αν δεν υπήρχε το διαβρωτικό περιβάλλον, ενισχύοντας την γρήγορη διάδοση της αρχικής ρωγμής διάβρωσης υπό τάση (stress corrosion cracking). Για την αποφυγή αυτών των τύπων αστοχιών, θα πρέπει 0,357 ι ιδιαίτερη προσοχή στο να αποτρέπεται ο σχηματισμός διάβρωσης, διότι ακόμη και αν επιλέγονταν υλικά για την κατασκευή του δοχείου με υψηλότερο βαθμό δυσθραυστότητας, το δοχείο θα ξανά αστοχούσε. [22]

3.5 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία σε δοχείο επεξεργασίας

Σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης θα μελετηθεί μια επαναληπτική αστοχία που προκλήθηκε σε δύο δοχεία πίεσης, στο ίδιο σχεδόν σημείο σε σταθμό παραγωγής πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) της Dow Argentina. Τα δοχεία χρησιμοποιήθηκαν ως εξοπλισμός ενός κλειστού συστήματος συμπίεσης με την χρήση εναλλασσόμενου συμπιεστή. Το συγκεκριμένο δοχείο πίεσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της πίεσης και στο διαχωρισμό των φάσεων του περιεχόμενου προϊόντος, εξασφαλίζοντας την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία των διεργασιών της μονάδας. Το δοχείο εγκαταστάθηκε το 1991 ενώ οι συνθήκες λειτουργίας του ήταν σε πίεση 5 bar και θερμοκρασία μέχρι τους 110 °C με περιεχόμενο αέριο το αιθυλένιο. Το δοχείο σχεδιάστηκε σύμφωνα με το πρότυπο της ASME PVBC (VIII Div. 1) ενώ το περιεχόμενο του ήταν σε μεγάλο ποσοστό αιθυλένιο αέριας μορφής με ορισμένα υποπροϊόντα.



Εικόνα 30: Σκαρίφημα εμφάνισης ρωγμών σέλας - ενισχυτικής πλάκας

3.5.1 Ανάλυση αστοχίας

Σύμφωνα με τον Otegui [23], το δοχείο δεν υποβαλλόταν σε μη καταστροφικούς ελέγχους και ιδιαίτερα στα σημεία στηρίξεως του δοχείου (Otegui, 2009, Fig.1, p.1826, [23]) Μετά από τέσσερα χρόνια λειτουργίας εντοπίστηκε ρωγμή στην συγκόλληση στηρίγματος της φλάντζας – σέλας με το δοχείο. Με μια πρώτη εικόνα των ευρημάτων, η ρωγμή ξεκίνησε από την ρίζα (Εικ. 30) της συγκόλλησης πλήρωσης και αναπτύχθηκε με την επιφάνεια του τοιχώματος του δοχείου (Otegui, 2009, Fig.2, p.1827, [23]). Η αρχική εκτίμηση της εμφάνισης της ρωγμής προσδιορίστηκε λόγω κόπωσης, ενώ παράλληλα βρέθηκαν χαμηλά επίπεδα σκληρότητας στην

ΘΕΖ του δοχείου. Η επιφάνεια θραύσης παρουσιάζει την τυπική επίπεδη μορφολογία που είναι ενδεικτική της κόπωσης. Παρατηρούνται πολύ λεπτά και κατανεμημένα σημάδια, γεγονός που υποδηλώνει ότι το πλάτος των κυκλικών φορτίσεων ήταν ως επί το πλείστον σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της διάδοσης της ρωγμής. Η διάδοση των ρωγμών σχετίζεται με μεγάλο αριθμό κυκλικών φορτίων, πιθανότατα λόγω των δονήσεων του συμπιεστή. Το βαθύτερο σημείο της ρωγμής, μετά από μετρήσεις, βρέθηκε στο να είναι στο 92,3% σε σχέση με το συνολικό πάχος του δοχείου. Ο εναπομείνας σύνδεσμος της συγκόλλησης ήταν μόλις 1 mm. Επίσης, τα στηρίγματα του δοχείου βρέθηκαν υπερβολικά φθαρμένα. Αυτή η ένδειξη οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα στηρίγματα δεν ήταν κατάλληλα για συγκεκριμένο δοχείο λόγω βάρους. Αποδείχθηκε ότι η μελέτη στήριξης ανταποκρινόταν για δοχείο κατά 25% ελαφρύτερο σε σχέση με το πραγματικό. Εν τέλει, το δοχείο τέθηκε εκτός λειτουργίας, ενώ συγχρόνως αποφασίστηκε η επισκευής του. Η ελλαττωματική φλάντζα αφαιρέθηκε και στην θέση της τοποθετήθηκε προς συγκόλληση φλάντζα τύπου weldolet (Εικ.31). Weldolet [35] είναι ένας τύπος εξαρτήματος σύνδεσης διακλάδωσης και έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί τις συγκεντρώσεις τάσεων στον εξοπλισμό. Επιπλέον, παρέχει ομαλές μεταβάσεις ροής με εφαρμογές υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας όπου απαιτείται ισχυρή και αξιόπιστη σύνδεση. Η νέα φλάντζα συγκολλήθηκε στο δοχείο ενώ πραγματοποιήθηκαν επιπλέον συγκολλήσεις ενίσχυσης στην σύνδεση με συγκόλληση τύπου φιλέτου (Fillet weld) στο δοχείο (Εικ. 32). [23]



Εικόνα 31: Εξάρτημα τύπου weldolet - προσαρμογή [36]



Εικόνα 32: Εξάρτημα τύπου weldolet – συγκόλληση [36]

Με την ολοκλήρωση των διορθωτικών ενεργειών, το δοχείο επανασυνδέθηκε με το δίκτυο και τέθηκε σε λειτουργία, χωρίς να επιθεωρηθεί η επισκευή και η συγκόλληση με κάποιο μη

καταστροφικό έλεγχο (όπως ορίζεται από διεθνής κώδικές πχ ASME). Σε μικρό διάστημα λειτουργίας παρατηρήθηκε και πάλι αστοχία στο ίδιο περίπου σημείο με την αρχική (Otegui, 2009, Fig.3, p.1828, [23]) με εμφάνιση ρωγμής στην συγκόλληση της νέας φλάντζας αποδίδοντας στην κακή τεχνική εκτέλεσης της συγκόλλησης. Επιπλέον, με την χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, εκτιμήθηκε ότι το συγκεκριμένο σημείο που βρέθηκε η ρωγμή (μεταξύ της φλάντζας και του ελάσματος του δοχείου), είναι σημείο συγκέντρωσης πολλών τάσεων. Η αστοχία της επισκευής οφειλόταν κυρίως στην ελλιπή κατανόηση των τάσεων που αναπτύσσονταν στο συγκεκριμένο σημείο και στην λανθασμένη επιλογή επισκευής. Τα αίτια αυτής της υψηλής συγκέντρωσης στο συγκεκριμένο σημείο, δεν επιβεβαιώθηκαν. Σε σχέση με την πρώτη αστοχία του δοχείου, η ανάπτυξη της ρωγμής έγινε αποκλειστικά μέσω του ελάσματος του δοχείου, μειώνοντας την διάρκεια ζωής του υλικού λόγω κόπωσης. Η ενισχυμένη μέθοδος συγκόλλησης φιλέτου (FW) αποδείχθηκε μη αποδοτική, καθώς αύξησε τα επίπεδα ακαμψίας της φλάντζας, με αποτέλεσμα την πιθανότητα εμφάνισης παραμορφώσεων στα ευάλωτα σημεία των τοιχωμάτων του δοχείου. Εν κατακλείδι, το δοχείο πίεσης αιθυλενίου αστόχησε λόγω σφαλμάτων που αφορούσαν τον σχεδιασμό και την κατασκευή – επισκευή του. [23]

3.6 Μελέτη περίπτωσης – Αστοχία σε δοχείο πίεσης μονάδας SITVC

Σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης θα αναλυθεί η αστοχία σε δεξαμενή που θα αποτελούσε μέρος εξοπλισμού ενός συστήματος SITVC¹ (Secondary Injection Thrust Vector Control). Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατεύθυνσης διαστημικών πυραύλων και δορυφόρων (Εικ 33). Πιο συγκεκριμένα, το έργο αφορούσε την κατασκευή των εν λόγω δεξαμενών, στα οποία στο εσωτερικό τους θα περιείχαν ένα υγρό συστατικό (strontium per chlorate²).



Εικόνα 33: Δεξαμενή SITVC προσαρμοσμένο σε πυραυλικό σύστημα

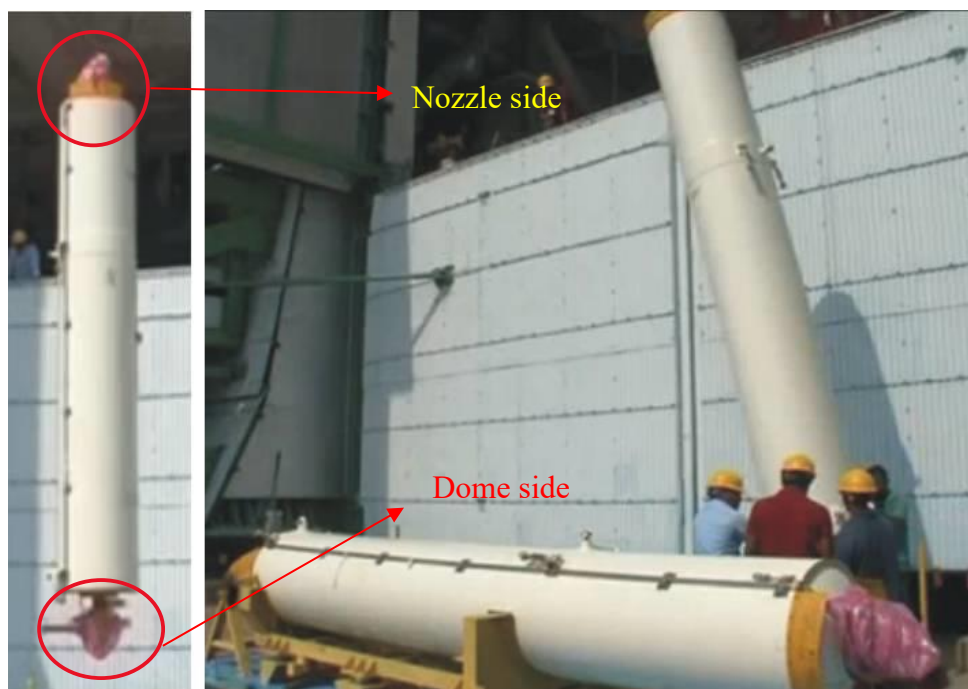
Τα δοχεία κατασκευάστηκαν από κραματωμένο χάλυβα υψηλής αντοχής (HSLA³) με ονομαστική σύνθεση 0,15C-1,25Cr-1Mo-0,25V (κράμα) για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η δεξαμενή αποτελούνταν από τρία κυλινδρικά κελύφη. Το κάθε κέλυφος

¹ Το σύστημα SITVC περιλαμβάνει την εγκάρσια έγχυση ενός δευτερεύοντος ρευστού στην κύρια ροή ενός υπερηχητικού ακροφυσίου καυσίμου, για την παραγωγή μιας πλευρικής δύναμης που επιτρέπει τον έλεγχο της κατεύθυνσης της ώθησης.

² Το strontium per chlorate είναι ένα υγρό συστατικό το οποίο εγχέεται συνήθως υπό υψηλή πίεση και εξατμίζεται γρήγορα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στη ροή καυσαερίων των πυραυλικών συστημάτων, γεγονός που δημιουργεί ένα αέριο που τροποποιεί το νέφος καυσαερίων και παράγει μια πλευρική δύναμη βοηθώντας στον έλεγχο της κλίσης και των ελιγμών κατεύθυνσης που μπορεί να χρειαστεί κατά την εκτέλεση εκτόξευσης πυραύλων και δορυφόρων στο διάστημα.

³ Ο χάλυβας HSLA (High Strength Low Alloy) χρησιμοποιείται συνήθως σε έργα ελαφριών μεταλλικών κατασκευών. Η μικροδομή του αποτελείται από φερρίτη, με μικρές ποσότητες περλίτη και μπαινίτη που προστίθενται ανάλογα με τα απαιτούμενα επίπεδα αντοχής.

κατασκευάστηκε με κάμψη ψυχρής έλασης και συγκολλήθηκαν συνολικά μεταξύ τους με περιμετρική συγκόλληση για να διαμορφώσουν το κύριο σώμα της κυλινδρικής δεξαμενής. Στα άκρα του κύριου κελύφους συγκολλήθηκαν, επίσης με περιμετρική συγκόλληση δύο μεταλλικοί δακτύλιοι στις μεριές του ακροφυσίου (nozzle) και του θόλου (dome) (Εικ 34).



Εικόνα 34: Δεξαμενή SITVC [37]

Βάση των απαιτήσεων σχεδιασμού τους, το πάχος του ήταν ελάσματος 6,2 mm, ενώ είχαν διάμετρο 700 mm και ύψος 4,6 m. Όσο αφορά τα τεχνικά στοιχεία, τα δοχεία, σχεδιάστηκαν για να λειτουργήσουν σε πίεση έως και 80 bar, ενώ ως πίεση αντοχής και ως ελάχιστη πίεση διάρρηξης εκτιμήθηκαν τα 120 bar και τα 160 bar αντίστοιχα. [24]

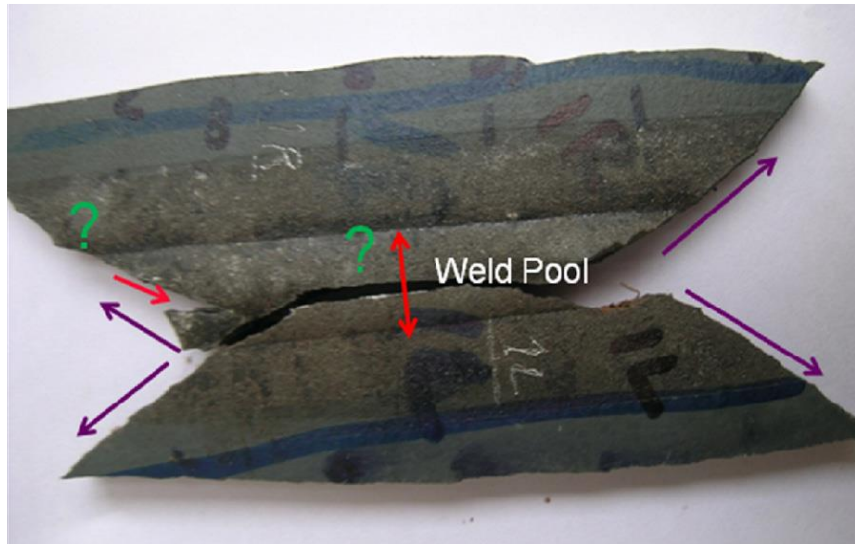
3.6.1 Ανάλυση αστοχίας

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής συνολικά έξι δοχείων, τα εν λόγω δοχεία υποβλήθηκαν για την αρχική τους πιστοποίηση σε υδροστατική δοκιμή, από την οποία το ένα από αυτά αστόχησε. Η αστοχία σημειώθηκε σε ένα από τα τρία συγκολλητά κελύφη που αποτελούσαν το κύριο σώμα του συνολικού κελύφους της δεξαμενής (Εικ.35c).



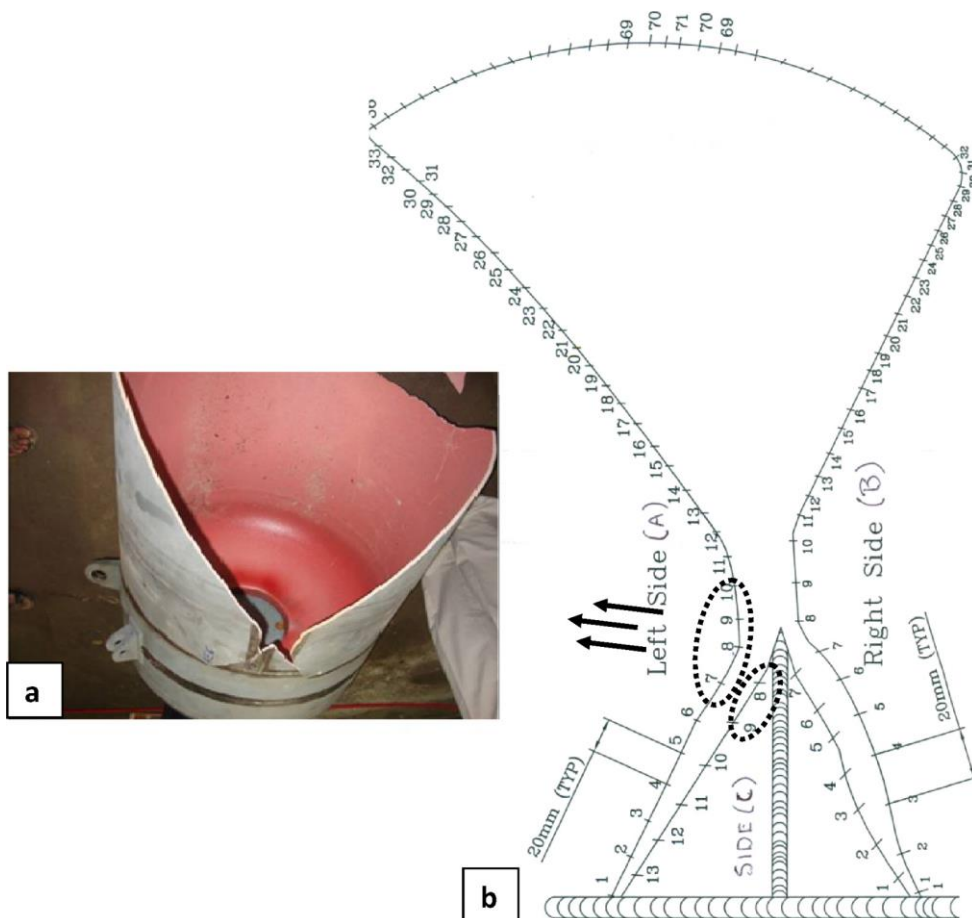
Εικόνα 35: (a, b) Κύριο σημείο αστοχίας της δεξαμενής SITVC [24], (c) το αποτυχημένο κέλυφος [24]

Από τον πρώτο οπτικό έλεγχο, η αστοχία ξεκίνησε στη μακρά ραφή του κελύφους, κοντά στην συγκόλληση-ένωση κελύφους-δακτυλίου θόλου (Εικ. 35a & 35b). Η θραύση, μετά από μια μικρή μετακίνηση κατά μήκος της συγκόλλησης, εξαπλώθηκε στο κύριο υλικό (HSLA) από κάθε πλευρά σχηματίζοντας γωνία 45° περίπου με τη συγκόλληση (Εικ. 36).



Εικόνα 36: Η έναρξη της αστοχίας στη συγκόλληση και η περαιτέρω διάδοση της στο μητρικό μέταλλο [24]

Η ρωγμή, από την πλευρά του δακτυλίου, παρέκκλινε από την πορεία της και εξαπλώθηκε περιμετρικά για περίπου 160 mm. Ένα σχηματικό σκαρίφημα της διαδρομής της ρωγμής της δεξαμενής παρουσιάζεται στην Εικόνα 37.

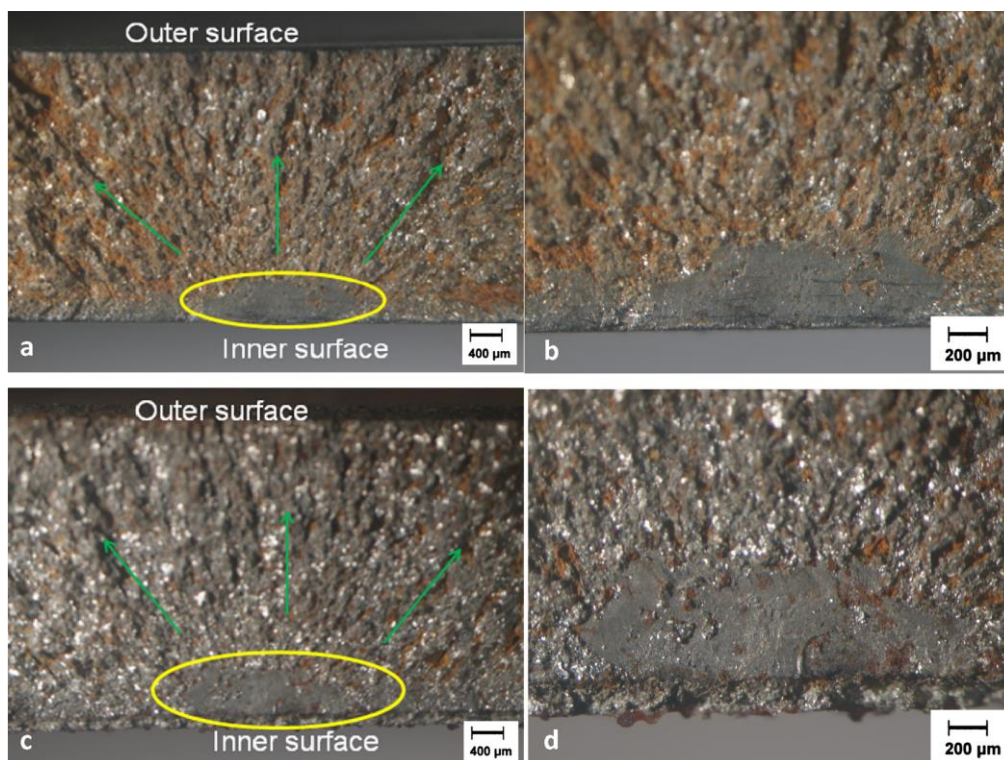


Εικόνα 37: (a) Αστοχία στο κέλυφος και (b) σκαρίφημα της θραύσης σε όλο το μήκος [24]

Το εναπομένον υλικό στο κέλυφος (Εικ. 37a) που αστόχησε έχει χαρακτηριστεί στο σκαρίφημα ως θέση (A), θέση (B) και θέση (C) αντίστοιχα (Εικ. 37b). Στις θέσεις αυτές διενεργήθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις πάχους κατά μήκος της θραύσης του ελάσματος και σε διάστημα 10 mm ανά σημείο μέτρησης με συσκευή υπερήχων. Σύμφωνα με τον Jha [24] στην θέση A στα σημεία από 7 έως 10, παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες μετρήσεις πάχους του υλικού (Εικ.37b) σε σχέση με τα υπόλοιπα μετρούμενα σημεία των θέσεων A, B και C (5,90 – 6,20 mm). Πιο συγκεκριμένα, το πάχος του υλικού κυμαίνονταν από 5,72 – 5,79 mm (σημεία από 7-10). Στις θέσεις 7, 8, 9 της θέσης του υλικού A, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω παχυμετρήσεις σε θέσεις που ξεκινούσαν από την άκρη της θραύσης προς το εσωτερικό του υλικού. Τα αποτελέσματα και αυτών των παχυμετρήσεων επιβεβαίωσαν την αρχική εκτίμηση για μείωση του πάχους στο σημείο 7 (5,72 – 5,88 mm), στο σημείο 8 (5,74 – 5,96 mm) και στο σημείο 9 (5,79 – 5,95 mm). Σε συνέχεια των ερευνών, διενεργήθηκε μικροσκοπικός έλεγχος σε δοκίμια που συλλέχτηκαν από διάφορα σημεία της επιφανειακής θραύσης του κελύφους όπως φαίνεται στην εικόνα 38. Η επιφάνεια θραύσης στη θέση 1L και 1R στο μικροσκόπιο αποκάλυψε μια ημιελλειπτική περιοχή (Εικ. 39).



Εικόνα 38: Δειγματοληπτικές θέσεις λήψης δοκιμίων 1L, 1R, 2, 3, 4 [24]

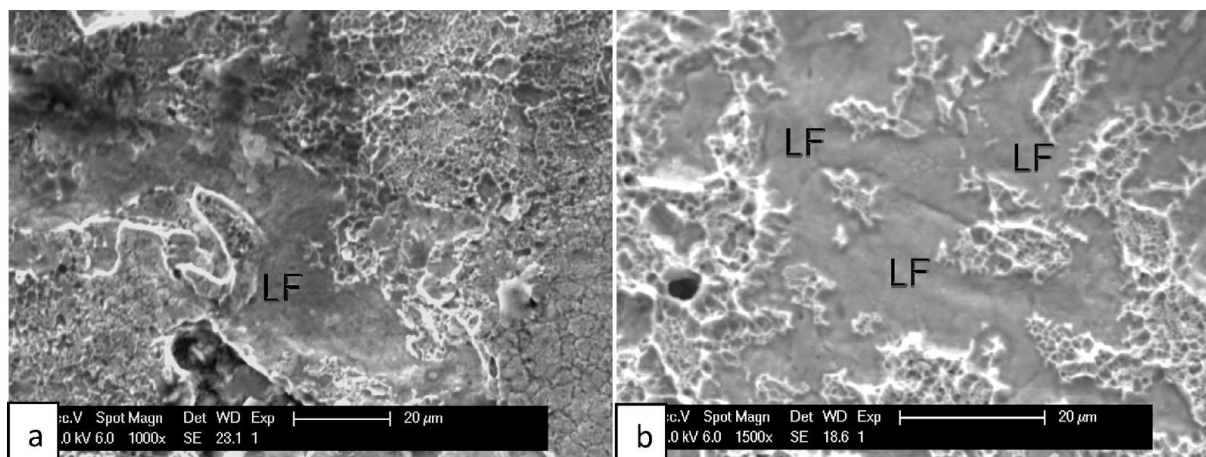


Εικόνα 39: Ημιελλειπτική περιοχή στην επιφάνεια θραύσης στο δοκίμιο 1R (a & b) και στο δοκίμιο 1L (c & d) [24]

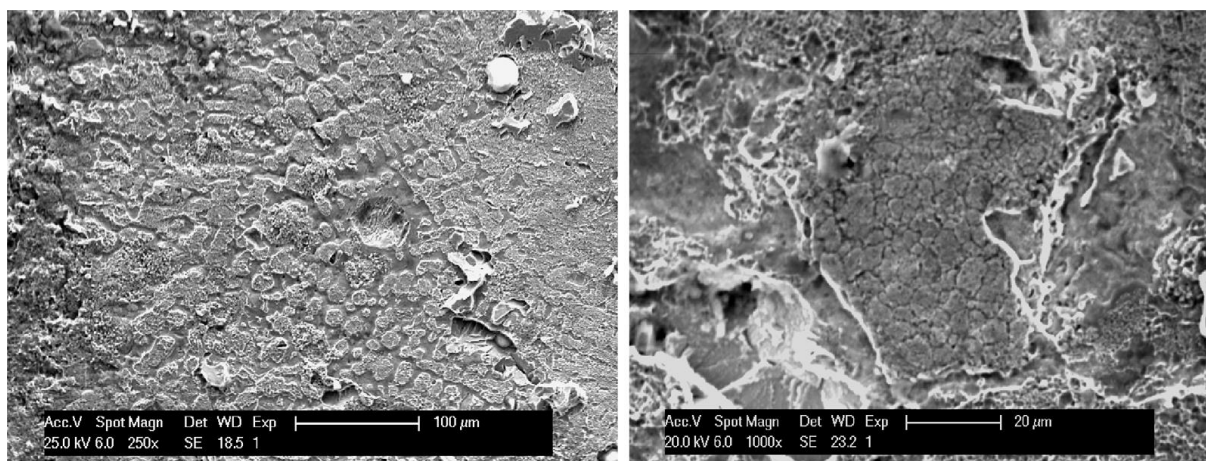
Η ημιελλειπτική περιοχή ήταν περίπου 7x2 mm προς την εσωτερική επιφάνεια της δεξαμενής και ως εκ τούτου επιβεβαιώθηκε ότι βρισκόταν στην ρίζα της συγκόλλησης. Η υπόλοιπη περιοχή της επιφάνειας θραύσης είχε χαρακτηριστικά ακτινικής διάδοσης της ρωγμής μέσω του πάχους του χάλυβα (HSLA) (Εικ.40α). Η περιοχή εξετάστηκε στην συνέχεια με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM (Scanning Electron Microscope) και επιβεβαιώθηκε ότι πρόκειται για μια αστοχία συγκόλλησης - ατελή τήξη που δημιουργείτε κατά την εκτέλεση της μεθόδου της συγκόλλησης (Εικ. 40b). Επίσης, σε πολλά σημεία παρατηρήθηκαν αρκετές ενδείξεις δενδρίτη (denritic patterns¹)[39] που προέκυψαν λόγω ανεπαρκούς συγκολλητικού υλικού κατά την στερεοποίηση (Εικ. 41). Άλλα δοκίμια από την επιφάνεια θραύσης της δεξαμενής, μελετήθηκαν ως προς την μικροδομή τους με την εφαρμογή 3% Nital, αποκαλύπτοντας χαρακτηριστικά υπό σκλήρυνση χάλυβα (Εικ. 42).

¹ Μοτίβα δενδρίτη: σχηματίζονται όταν το υγρό μέταλλο υποψύγχεται κάτω από το σημείο τήξης του, ιδίως στον σκληρυσμένο μαρτενσίτη. Επηρεάζουν τη σκληρότητα, την αντοχή και την ανθεκτικότητα του υλικού.

² 3% Nital είναι ένα διαβρωτικό υλικό για την αποκάλυψη μικροδομικών χαρακτηριστικών και φάσεων που υπάρχουν σε μεταλλικά δείγματα.



Εικόνα 40: Ευρήματα ατελής τήξης στην περιοχή έναρξης της θραύσης [24]



Εικόνα 41: Ενδείξεις δενδρίτη (denritic patterns) [24]



Εικόνα 42: Υπό σκλήρυνση μαρτενσίτης [24]

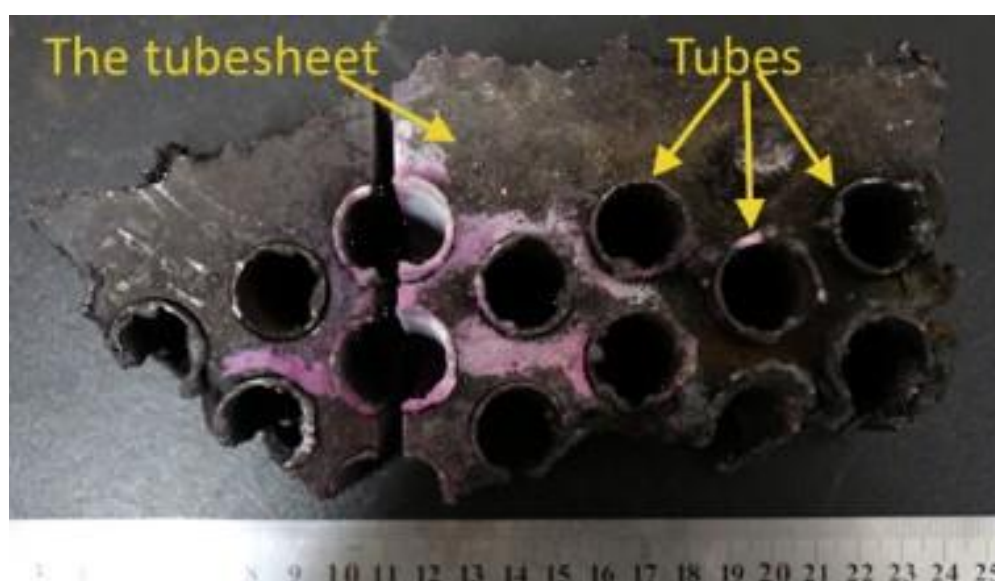
Τέλος, διενεργήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δείγματα του βασικού υγιείς μετάλλου της δεξαμενής και σε δείγματα σε σημεία γύρω από την περιμετρική συγκόλληση έως και την συγκόλληση κελύφους (Εικ.37b, θέση C). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2. [24]

Πίνακας 2: Αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων της δεξαμενής [24]

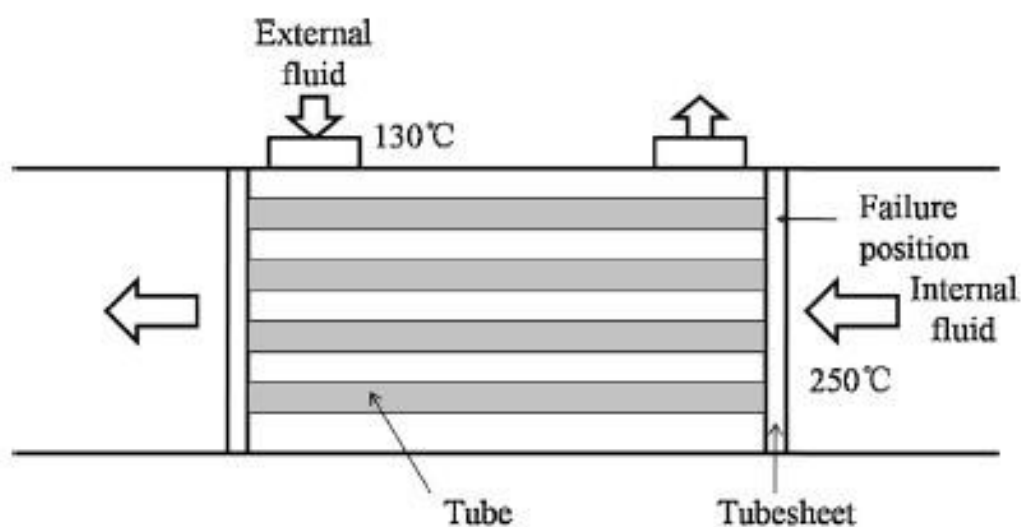
SPECIMENTS	UTS (MPa)	0,2% Ps (MPa)	%El (50 mm GL)
Parent material (rolling direction)	939 - 962	838 - 846	15.7 -16.6
Failed material in C side	887 - 962	784 - 863	11.6 – 13.4

3.7 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία εναλλάκτη θερμότητας σωλήνων – κελύφους μονής διαδρομής

Εναλλάκτης θερμότητας δέσμης – κελύφους μονής διαδρομής αστόχησε μετά από 30 ημέρες λειτουργίας. Η αστοχία παρατηρήθηκε σε πολλά σημεία συγκόλλησης μεταξύ των άκρων των σωλήνων με τον εμπρόσθιο καθρέπτη του εναλλάκτη (αυλοφόρος πλάκα) (Εικ.43α – 43b). Οι αυλοί του εναλλάκτη ήταν κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα ποιότητας 304L. Η εξωτερική διάμετρος τους ήταν 19 mm, το πάχος τους 1,2 mm και το μήκος τους 4,5 m. Το έλασμα μεταξύ των αυλών ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα ποιότητας SA516 Gr.71.

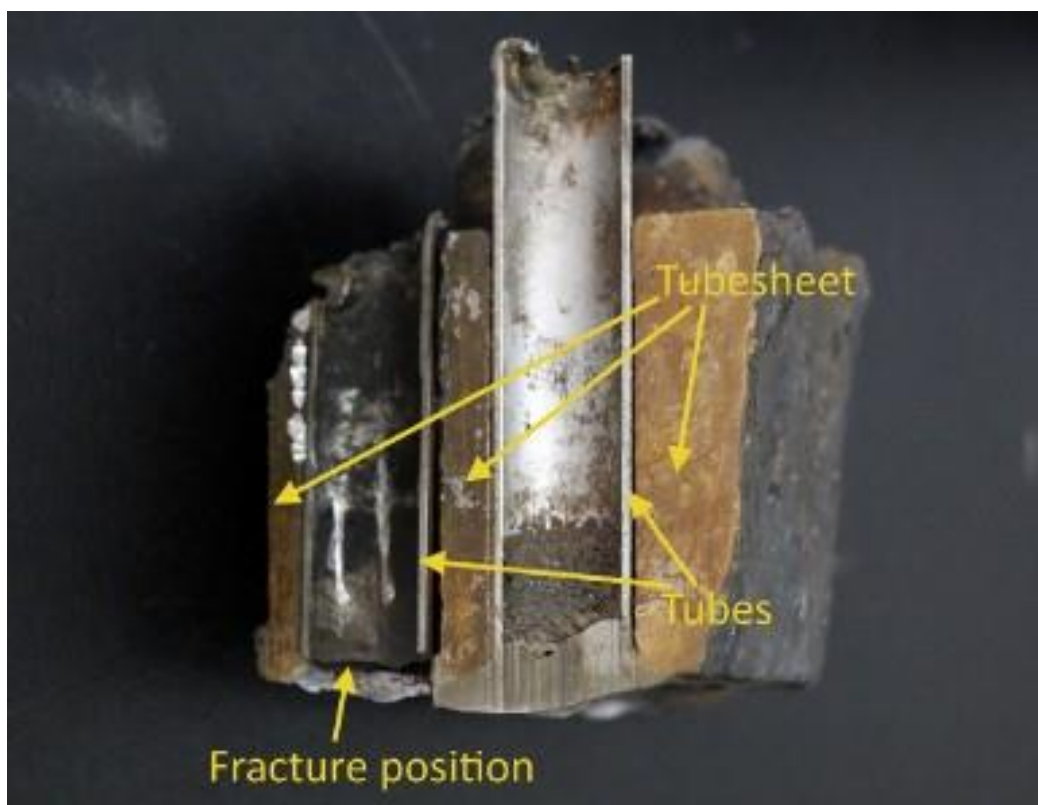


Εικόνα 43a: Κομμάτι συγκολλημένου αυλού – κελύφους του εναλλάκτη [25]



Εικόνα 43b: Σκαρίφημα του αποτυχημένου εναλλάκτη θερμότητας κελύφους-σωλήνα [25]

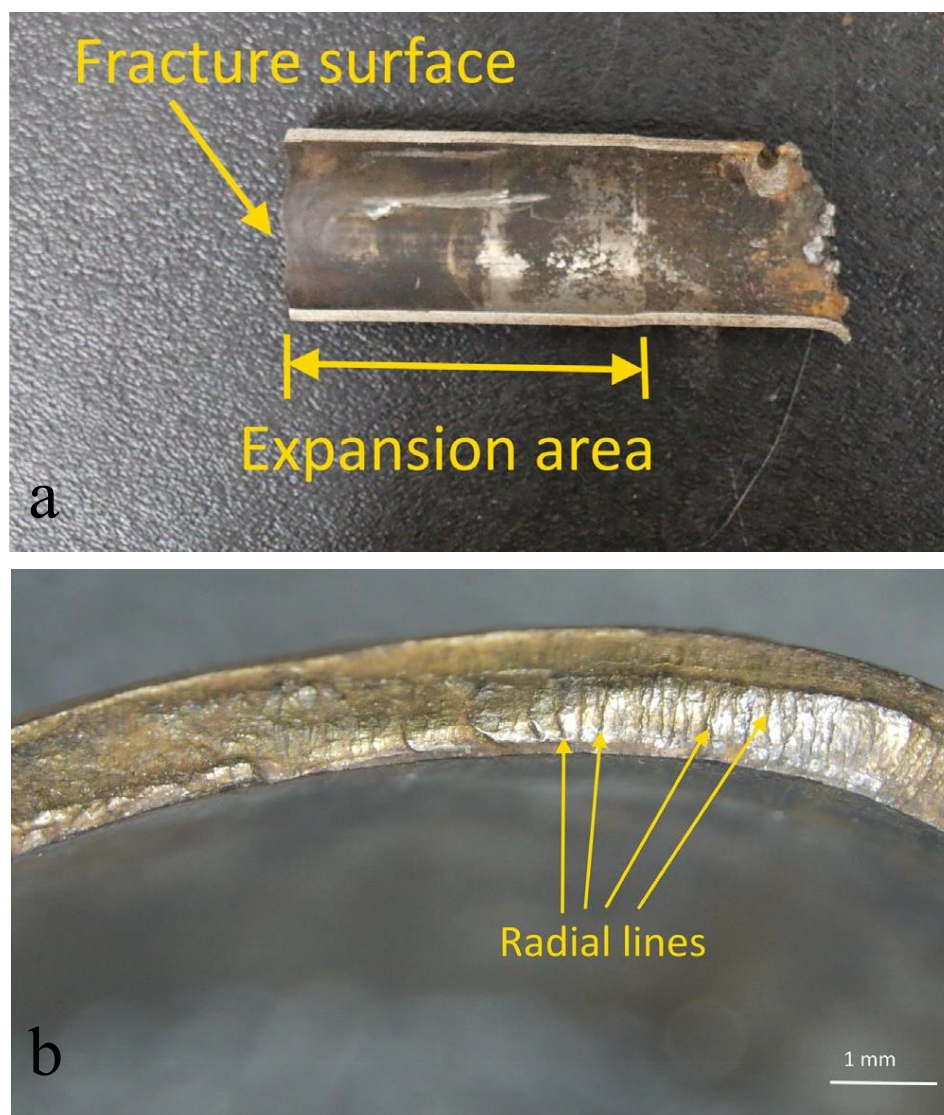
Η συγκόλληση μεταξύ των αυλών και του ελάσματος (tubesheet) έγινε με την μέθοδο βυθιζόμενου τόξου με Αργό, η πιο διαδεδομένη για κολλήσεις ανοξείδωτου χάλυβα με άλλους τύπους χάλυβα. Από σημεία που παρατηρήθηκε η θραύση κοπήκαν δείγματα για να υποβληθούν σε έλεγχο ώστε να βρεθούν τα αίτια της αστοχίας του εναλλάκτη θερμότητας. [25]



Εικόνα 44: Τομή συγκολλημένης σύνδεσης σωλήνα-λαμαρίνας χάλυβα [25]

3.7.1 Ανάλυση αστοχίας

Αρχικά, από τον οπτικό έλεγχο βρέθηκαν αρκετές ρωγμές στην σύνδεση των άκρων των αυλών με το έλασμα του εναλλάκτη (Εικ. 44) ενώ η επιφάνεια θραύσης του αυλού ήταν κάθετη στην αξονική διεύθυνση. Από τομές που πραγματοποιήθηκαν σε αυλούς του εναλλάκτη, φαίνεται ότι 50 mm του αυλού που αστόχησε υπέστη διαστολή, ξεκινώντας από την άκρη του αυλού, δηλαδή από την συγκόλληση του αυλού με το έλασμα του εναλλάκτη (Εικ. 45a). Στην επιφάνεια της θραύσης εμφανίζονται ακτινικές γραμμές (radial lines) οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις προέρχονται από σφάλματα κατά την εκτέλεση της μεθόδου της συγκόλλησης (Εικ.45b).

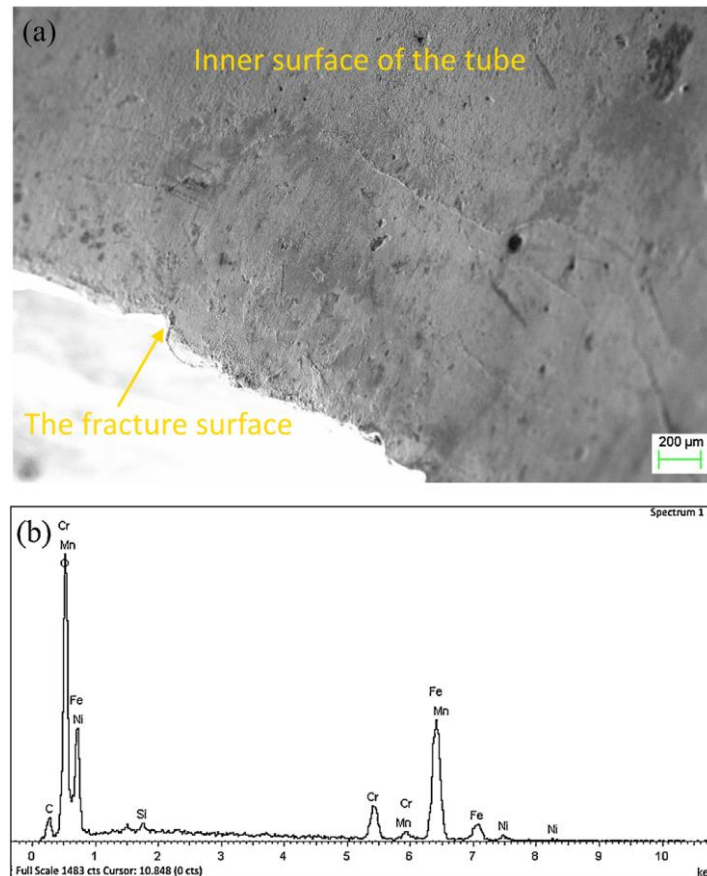


Εικόνα 45: (α) Τομή σωλήνα εναλλάκτη [25], (β) Επιφάνεια θραύσης σωλήνα εναλλάκτη [25]

Στην συνέχεια με την χρήση SEM¹ (Scanning electron microscopy) και EDS² (Energy deflective spectrometer) αναλύθηκαν δείγματα σωλήνων του εναλλάκτη στα οποία βρέθηκαν ίχνη διάβρωσης, επιβεβαιώνοντας ότι η θραύση δεν προήλθε από μηχανισμό διάβρωσης (Εικ. 46a & 46b) όπως για παράδειγμα τρηματική διάβρωση (pitting corrosion) που είναι η πιο διαδεδομένη αιτία αστοχίας σε εναλλάκτη θερμότητας.

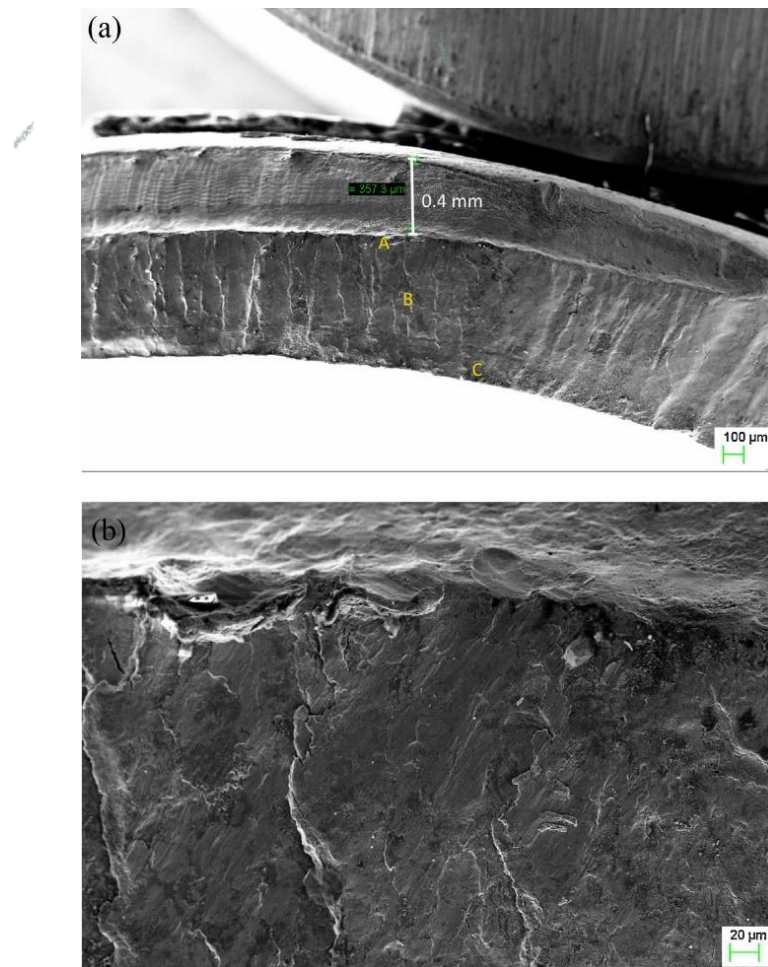
¹ SEM : συσκευή που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μεταλλικών υλικών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Το SEM επιτρέπει τη λεπτομερή εξέταση των μικροδομικών χαρακτηριστικών, των ατελειών, των ελαττωμάτων και των μηχανισμών θραύσης στα μέταλλα.

² EDS είναι μέρος της SEM. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση στοιχείων που υπάρχουν σε ένα δείγμα.



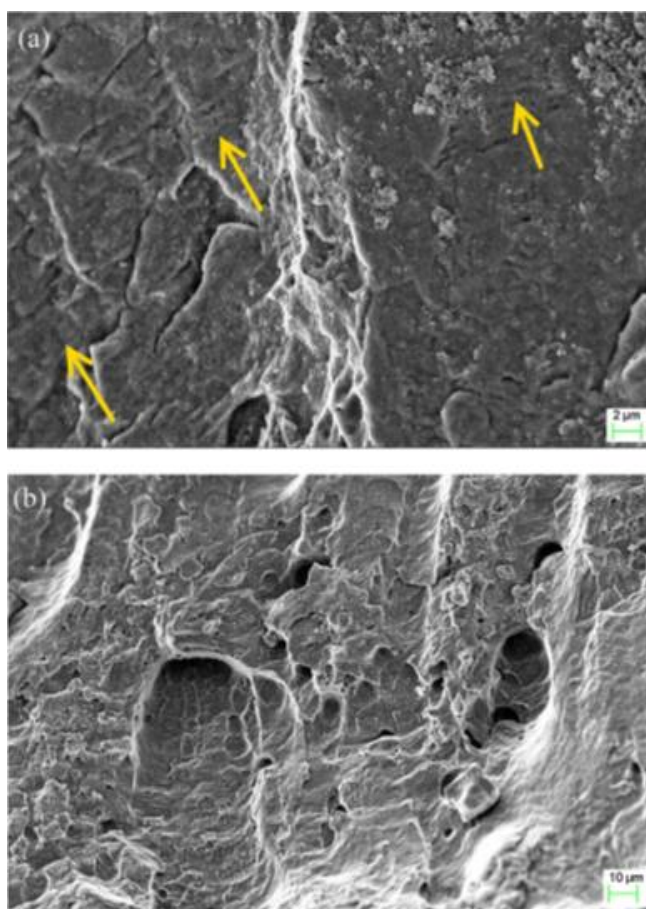
Εικόνα 46: (α) Εσωτερική επιφάνεια του αποτυχημένου σωλήνα με την χρήση SEM [25], (β) τα αποτελέσματα EDS [25]

Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και στην χημική ανάλυση δειγμάτων σωλήνων κοντά στο σημείο της συγκόλλησης με το κέλυφος, με την ποιότητα του υλικού να μην έχει επηρεαστεί (Εικ.46b). Με την χρήση SEM, εξετάστηκαν σε δείγμα σωλήνα, δύο περιοχές από τις οποίες η μία αφορά την επιφάνεια θραύσης, ενώ η άλλη περιοχή αφορά αστοχία συγκόλλησης και πιο συγκεκριμένα ατελούς τήξη. Λόγω του ελαττώματος, στην διεπιφάνεια μεταξύ αυτών των δύο περιοχών, παρουσιάστηκε συγκέντρωση τάσεων με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμής η οποία στην συνέχεια διαδόθηκε. Για την καλύτερη ανάλυση της επιφάνειας θραύσης, εξετάστηκε με μεγέθυνση στη SEM, η περιοχή κάτω από την διεπιφάνεια, η οποία βάση κατά τον Liu [25] χωρίστηκε σε τρεις ζώνες (Εικ. 47α). Η ζώνη Α χαρακτηρίστηκε ως η περιοχή που έκανε την εμφάνισή της η ρωγμή λόγω της συγκέντρωσης των τάσεων (Εικ.47b). Στην ζώνη Β εντοπίστηκαν αρκετά ίχνη κόπωσης (ραβδώσεις), επιβεβαιώνοντας ότι η αστοχία της συγκόλλησης προκλήθηκε λόγω διάδοσης της ρωγμής από κόπωση (Εικ. 48a) ενώ στην ζώνη C παρουσιάζεται η μορφολογία της τελικής ζώνης στο εσωτερικό άκρο της επιφάνειας θραύσης (Εικ.48b).

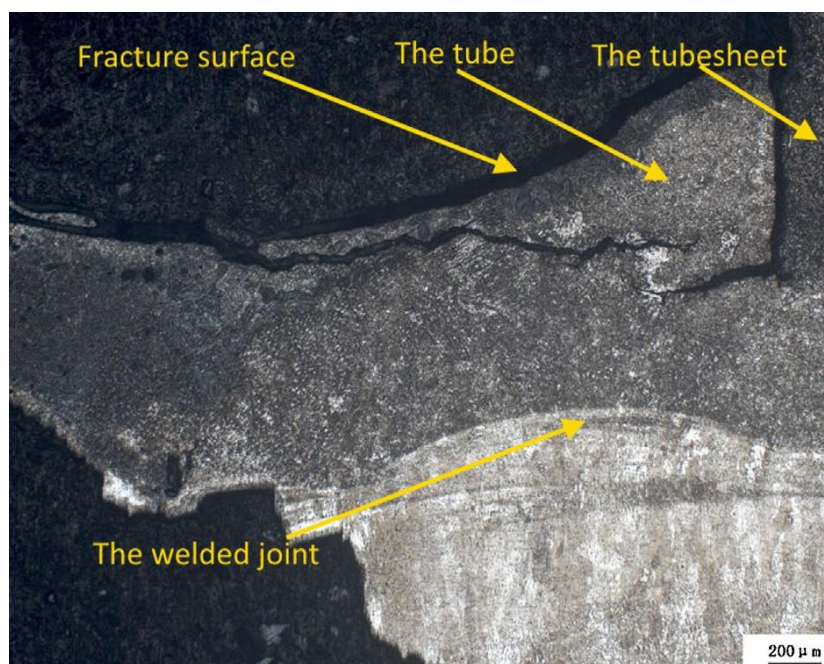


Εικόνα 47: (a) Επιφάνειας θραύσης σωλήνα σε ζώνες [25], (b) ζώνη A σε μεγέθυνση [25]

Τα ευρήματα των ζωνών B και C είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα της κόπωσης. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η θραύση προκλήθηκε λόγω κόπωσης. Η έρευνα συνεχίστηκε με την εφαρμογή επιπλέον εργαστηριακών ελέγχων όπως της μεταλλογραφίας και των μηχανικών δοκίμων (δοκιμή εφελκυσμού, σκληρομετρία). Η μεταλλογραφία ανέδειξε ρωγμές στην περιοχή της συγκόλλησης μεταξύ του σωλήνα και του κελύφους όπως επίσης και στην περιοχή ΘΕΖ (Εικ.48). Στην δοκιμή εφελκυσμού, διαπιστώθηκε ότι οι παράμετροι αστοχίας εφελκυσμού του δείγματος ήταν σύμφωνοι με τα όρια των κανονιστικών διατάξεων για τον ανοξείδωτο χάλυβα 304L. Η σκληρομετρία ωστόσο απέδειξε ότι κοντά στην επιφάνεια θραύσης, η σκληρότητα του σωλήνα, ήταν υψηλότερη από τα τυποποιημένα όρια που όριζαν οι προδιαγραφές του υλικού. Αρά ο σωλήνας σε εκείνα τα σημεία είχε μειωμένη αντοχή που οφείλονταν όχι στο υλικό του, αλλά στο υλικό συγκόλλησης του. [25]



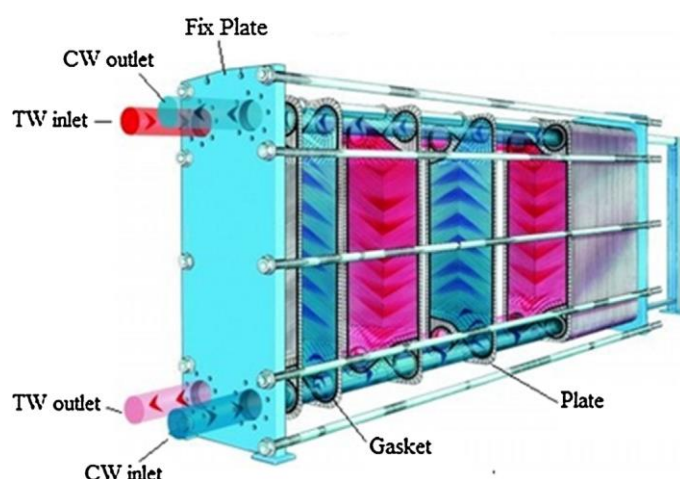
Εικόνα 48: Ζώνη B (α) ζώνη C (b) σε μεγέθυνση (SEM) [25]



Εικόνα 49: Αστοχία στην συγκόλλησης [25]

3.8 Μελέτη περίπτωση - Αστοχία εναλλάκτη θερμότητας τύπου πλάκας - πλαισίου

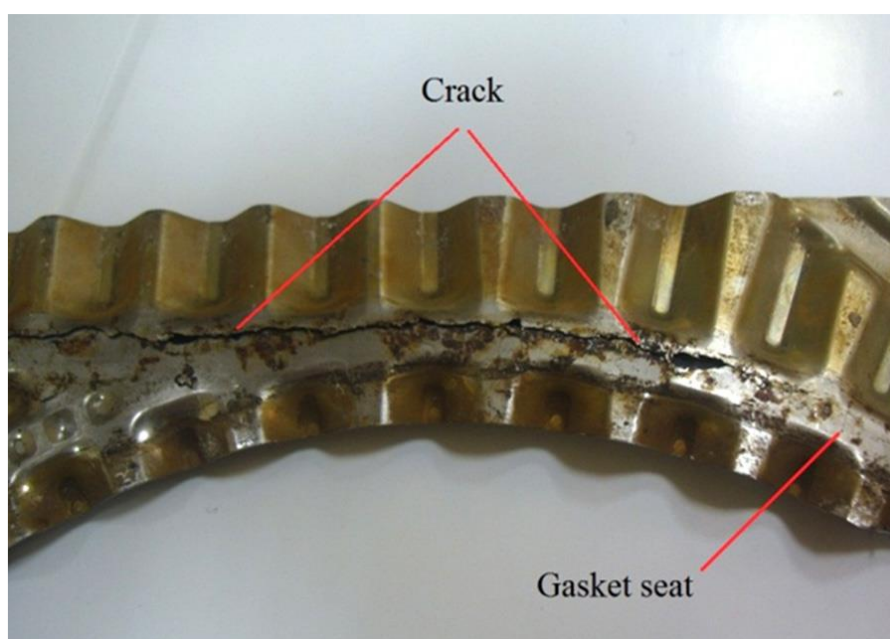
Ένας πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας PHE (Plate Heat Exchanger) της Ιρανικής εταιρίας JPC (Jam petrochemical complex) παρουσίασε αστοχία με αρχή λειτουργία από το 2008. Ο συγκεκριμένος τύπος εναλλάκτης θερμότητας αποτελούνταν από μια σειρά λεπτών, κυματοειδών πλακών που συνδέονταν μεταξύ τους και διαχωρίζονταν με στεγανοποιητικά παρεμβύσματα (gaskets) (Εικ.50). Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, η αστοχία του εναλλάκτη εντοπίστηκε σε μία πλάκα του εναλλάκτη (56 πλάκες στο σύνολο) κοντά στην θέση τοποθέτησης παρεμβύσματος (Εικ.51). Οι πλάκες ήταν κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα (ASTM A240 Type.316) και σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να σχηματίζουν μια σειρά παράλληλων ροών, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών με διαφορετικές θερμοκρασίες (TW&CW). Ως μέσο μεταφοράς (TW) αλλά και ως μέσο ψύξης (CW) χρησιμοποιήθηκε αφαλατωμένο νερό με μέγιστη περιεκτικότητα χλωρίου 50 ppm και 8-10 ppm διαλυμένου οξυγόνου. Οι συνθήκες λειτουργίας στην είσοδο του εναλλάκτη για το θερμό μέσο (TW) ήταν στους 80°C και σε πίεση λειτουργίας στα 4,9 bar ενώ στην είσοδο του κρύου μέσου (CW) ήταν στους 38°C και σε πίεση λειτουργίας στα 6,5 bar. Αντίστοιχα, οι συνθήκες λειτουργίας στην έξοδο του εναλλάκτη ήταν στους 70°C και πίεση στα 4,4 bar (TW) και στους 48°C και πίεση στα 6 bar (CW). Η JPC προχώρησε στην ανασκόπηση για να εντοπιστούν τα αίτια που οδήγησαν στην αστοχία της πλάκας.



Εικόνα 50: Σχηματική απεικόνιση εναλλάκτη θερμότητας πλάκας – πλαισίου [26]

3.8.1 Ανάλυση αστοχίας

Για την διερεύνηση της αστοχίας, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές όπως οπτικός έλεγχος, μακροσκοπία (SEM & EDS), θερμική και χημική ανάλυση. Αρχικά, από τον οπτικό έλεγχο εντοπίστηκε τρημματική διάβρωση (pitting corrosion) και διάβρωση σε σχισμές (crevice corrosion). Στα εσωτερικά τμήματα των πλακών του εναλλάκτη δεν εντοπίστηκαν σημαντικά ευρήματα διάβρωσης.

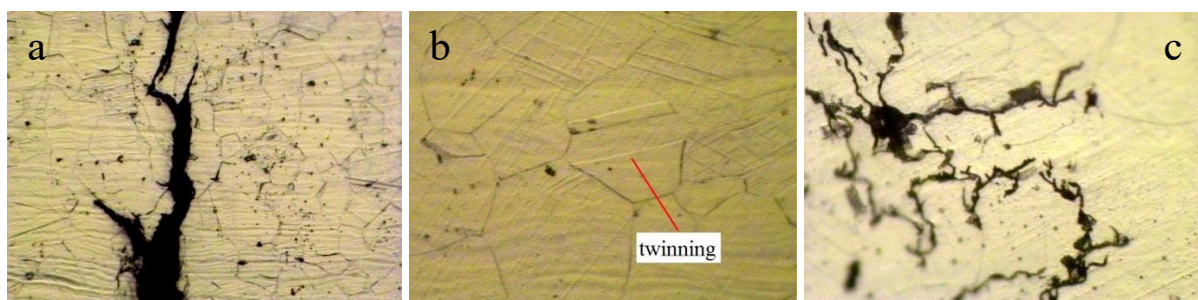


Εικόνα 51: Ρωγμή στη πλάκα του εναλλάκτη (θέση παρεμβύσματος) [26]

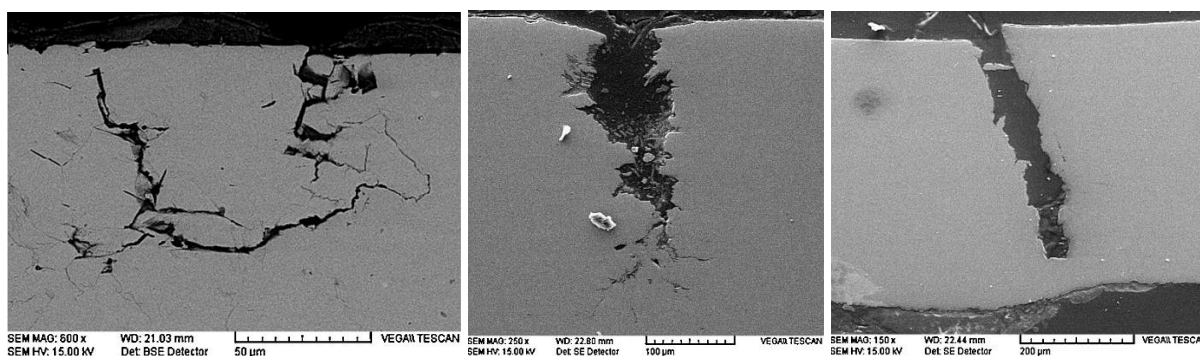


Εικόνα 52: Κοιλότητες και σχισμές διάβρωσης [26]

Για τον εντοπισμό περισσότερων πληροφοριών, κόπηκαν τρία δείγματα κοντά στο σημείο της αστοχίας στην πλάκα του εναλλάκτη, για την παρατήρηση της μικροδομής του υλικού και την εξέλιξη της διάβρωσης με την χρήση SEM και EDS. Τα αποτελέσματα και στα τρία δείγματα με την χρήση SEM, ήταν σχεδόν όμοια. Παρατηρήθηκαν και στα τρία δείγματα ίχνη διάβρωσης καθώς και μικροσκοπικά σημεία από τα οποία αναπτύχθηκαν οι αρχικές ρωγμές (Εικ.53). Επίσης, παρατηρήθηκαν στην μικροδομή των τριών δειγμάτων «το φαινόμενο της δικτύωσης» (twinning) (Εικ.53b). Αυτός ο όρος αναφέρεται στο σχηματισμό δικτυωμάτων στην μικροδομή του μετάλλου, όταν η επιφάνειά του χάνει το προστατευτικό στρώμα οξειδίου, επιτρέποντας στο μέταλλο να γίνει ευαίσθητο σε απώλεια ηλεκτρονίων, άρα ευαίσθητο στην εμφάνιση της διάβρωσης [27]. Σύμφωνα με τον Khodamorad [26], όλα τα παραπάνω, οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η αστοχία σχετίζεται με έναν συνδυασμό ανάπτυξης διακρυσταλικής και ενδοκρυσταλλικής ρωγμής διάβρωσης υπό τάση (Intergranular SCC & Transgranular SCC)(Εικ.54). Οι διακλαδισμένες ρωγμές είναι τυπικά σημάδια ρωγμής διάβρωσης υπό τάση(SCC) [28].

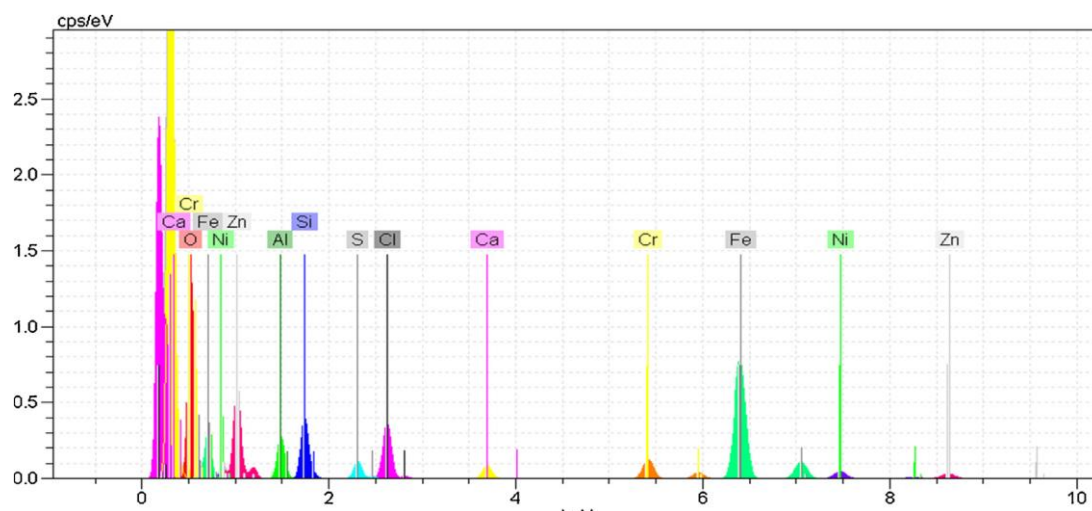


Εικόνα 53: Μικροδομή των δειγμάτων 1(a), 2(b) & 3(c) αντίστοιχα [26]



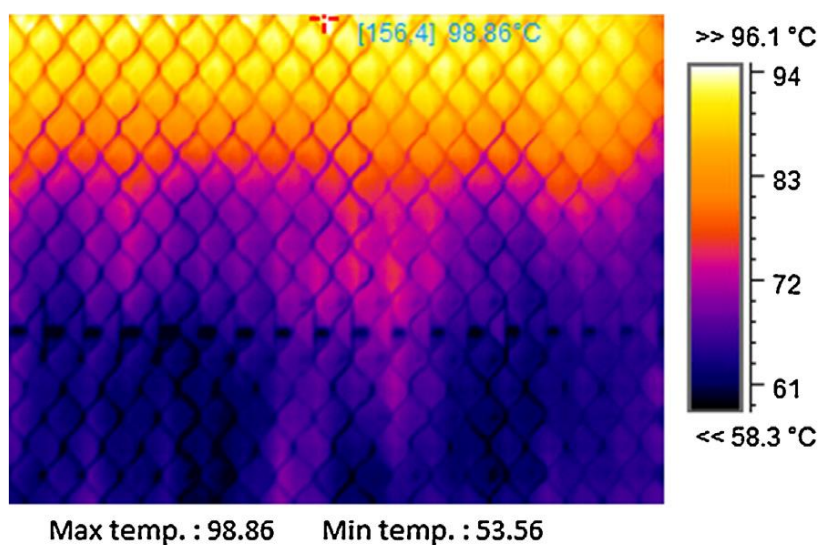
Εικόνα 54: Φωτογραφίες SEM των δειγμάτων 1(a), 2(b) & 3(c) αντίστοιχα [26]

Στη συνέχεια, το δείγμα 1 υποβλήθηκε σε επιπλέον ανάλυση των στοιχείων της διάβρωσης που βρέθηκαν στην επιφάνεια του μετάλλου, με την χρήση του φασματογράφου EDS (Εικ. 55).



Εικόνα 55: Ανάλυση των προϊόντων διάβρωσης στο δείγμα 1 [26]

Τα στοιχεία Fe, Cr και O προσδιορίζουν προϊόντα διάβρωσης. Η παρουσία επίσης του χλωρίου επιβεβαιώνει τα αίτια εμφάνισης της τρημματικής διάβρωσης (pitting corrosion) στην επιφάνεια της πλάκας [26]. Άρα σαν συμπέρασμα μπορεί να γίνει η εκτίμηση ότι τα συγκεκριμένα ευρήματα οδήγησαν στην δημιουργία και στην εξέλιξη της ρωγμής διάβρωσης υπό τάση (SCC) στην πλάκα του εναλλάκτη. Το επόμενο σκέλος της έρευνας συνεχίστηκε με σάρωση μέσω κάμερας υπέρυθρων στην είσοδο του θερμού μέσου (TW) του εναλλάκτη (Εικ. 56).



Εικόνα 56: Προφίλ της θερμοκρασίας εισόδου (TW) [26]

Το αποτέλεσμα της σάρωσης έδειξε ότι η μέγιστη θερμοκρασία του εναλλάκτη κυμαινόταν έως τους 99°C στην είσοδο του θερμού μέσου (TW), υψηλότερη από τη θερμοκρασία σχεδιασμού του εναλλάκτη θερμότητας. Μετά από ανασκόπηση στο ιστορικό συντήρησης της εταιρίας, αποκαλύφτηκε ότι ένα έτος πριν την αστοχία της πλάκας, οι τιμές της θερμοκρασίας TW σημείωσαν αύξηση, λόγω μιας σημαντικής αλλαγής στη διαδικασία λειτουργίας του εναλλάκτη. Για να αυξηθεί ο ρυθμός ψύξης και να μειωθεί η θερμοκρασία εξόδου TW στον εναλλάκτη, προθέτονταν στον εναλλάκτη ποσότητα νερού γενικής χρήσης το οποίο δεν ήταν επεξεργασμένο για βιομηχανική χρήση και γενικότερα για την λειτουργία της συγκεκριμένης εφαρμογής. Αυτή η πληροφορία, δικαιολόγησε τις τα ίχνη διάβρωσης που εντοπίστηκαν στη φτερωτή περιοχή της πλάκας κοντά στο σημείο της αστοχίας (Εικ. 53, zigzag edge). Στην συνέχεια, το νερό τροφοδοσίας του εναλλάκτη υποβλήθηκε σε χημική ανάλυση. Το νερό τροφοδοσίας περιείχε χαμηλή ποσότητα χλωριδίων και σουλφιδίων (1 – 3 ppm), ικανό μέσω της εξάτμισης του νερού χρήσης, να συγκεντρωθούν τοπικά στην πλάκα του εναλλάκτη ιόντα χλωριδίων και σουλφιδίων (λόγω υψηλής θερμοκρασίας) στην είσοδο του εναλλάκτη. Εν κατακλείδι, η εμφάνιση της τοπικής διάβρωσης λόγω της εξάτμισης του νερού χρήσης, σε συνδυασμό με τις τάσεις που αναπτύχθηκαν λόγω λειτουργίας της εγκατάστασης, οδήγησε στο τελικό στάδιο της αστοχίας, δηλαδή στη ρωγμή διάβρωσης υπό μηχανική τάση (SCC).[26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιοδικός έλεγχος δοχείων πίεσης

Τα δοχεία πίεσης, με την ολοκλήρωση της κατασκευής τους και τις δομικές ελέγχου σύμφωνα με διεθνή πρότυπα και κανονισμούς για την πιστοποίηση τους, μπορούν να κυκλοφορήσουν ελεύθερα στην αγορά. Από την πρώτη εγκατάστασή τους και θέση σε λειτουργία, ο κάτοχος ενός δοχείου πίεσης οφείλει τον συχνό περιοδικό έλεγχο του δοχείου ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η οποιαδήποτε ένδειξη που μπορεί να εξελιχθεί σε αστοχία και να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ορισμένοι μέθοδοι ελέγχου που εκτελούνται περιοδικά (1 έως 5 έτη) σε δοχεία υπό πίεση, ανάλογα με το εύρημα της αστοχίας. Όπως τα δοχεία υπό πίεση σχεδιάζονται και κατασκευάζονται βάση προτύπων, έτσι και η περιοδική επιθεώρησή τους ορίζεται είτε από κρατικές οδηγίες, είτε από διεθνείς κανονισμούς. Τα πιο διαδεδομένα πρότυπα περιοδικών ελέγχων για δοχεία πίεσης είναι:

1. API 510: Pressure Vessel Inspection Code, το οποίο καθορίζει τις απαιτήσεις για την επιθεώρηση, τη διαβάθμιση, την επισκευή και τη μετατροπή των δοχείων πίεσης.
2. The ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), που προβλέπει κανόνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή και την επιθεώρηση λεβήτων και δοχείων πίεσης.
3. The National Board Inspection Code (NBIC), η οποία θεσπίζει τις απαιτήσεις για την επιθεώρηση, τη διαβάθμιση, την επισκευή και τη μετατροπή λεβήτων και δοχείων πίεσης
4. The Pressure Equipment Directive (PED) (European Union), η οποία καθορίζει τα πρότυπα για το σχεδιασμό, την κατασκευή και την αξιολόγηση της συμμόρφωσης του εξοπλισμού υπό πίεση.

Τα παραπάνω πρότυπα παρέχουν όλες τις απαραίτητες οδηγίες από τον σχεδιασμό ενός δοχείου υπό πίεση έως την τακτική επιθεώρησή του. Οι επιθεωρήσεις αναλαμβάνονται από εξουσιοδοτημένους οργανισμούς πιστοποίησης και επιθεώρησης και είναι υπεύθυνοι για την πιστοποίηση δοχείων πίεσης (πιστοποίηση αρχικής κατασκευής) και τη διενέργεια περιοδικών επιθεωρήσεων για τη διασφάλιση της συνεχούς συμμόρφωσης με τους παραπάνω κώδικες και πρότυπα. Η συμμόρφωση είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας των δοχείων υπό πίεσης και των συστημάτων τους, τα οποία θεωρούνται μέρος του εξοπλισμού τους (πχ ανακουφιστική βαλβίδα εκτόνωσης).

4.1 Υδροστατική δοκιμή

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος αντοχής και στεγανότητας σε δοχεία πίεσης, ατμολέβητες, δεξαμενές και αγωγούς που απαιτείται σχεδόν από όλα τα διεθνή πρότυπα είναι η υδροστατική δοκιμή. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί την πλήρωση του δοχείου με ένα ασυμπίεστο ρευστό (νερό ή λάδι) και την αύξηση της πίεσης του δοχείου έως την πίεση δοκιμής που ορίζει εκάστοτε ο κατασκευαστής του. Το μανόμετρο που χρησιμοποιείται πριν την εκτέλεση του ελέγχου θα πρέπει να είναι διακριβωμένο (Εικ. 57) Το εξεταζόμενο δοχείο παραμένει υπό σταθερή πίεση τουλάχιστον για 60 min. Σε αυτόν τον χρόνο, ο υπεύθυνός ελεγκτής επιθεωρεί για τυχόν παραμορφώσεις ή πτώσης πίεσης. Συνήθως όταν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο τότε υπάρχει αστοχία στο δοχείο. Τα πρώτα μέρη ενός δοχείου που ελέγχεται είναι τα συγκολλητά μέρη και συνδέσεις. Όπως παρατηρήθηκε και από τις αστοχίες των μελετών περιπτώσεις που αναλύθηκαν στο τρίο κεφάλαιο, πολλές από αυτές οφείλονταν σε σφάλματα κατά την μέθοδο της συγκόλλησης. Επίσης μέρος της υδροστατικής δοκιμής είναι και ο έλεγχος ενεργοποίησης της ασφαλιστικής βαλβίδας του δοχείου όταν πρόκειται για περιοδικό έλεγχο εξοπλισμού υπό πίεση. Οι περισσότερες βαλβίδες ασφαλείας, μετά από ένα χρονικό διάστημα, δεν ενεργοποιούνται πάντα στην πίεση ρύθμισης τους λόγω μη λειτουργίας. Ο έλεγχος ενεργοποίησης του ασφαλιστικού θα πρέπει να εκτελείται ανά έτος από εξειδικευμένο και πιστοποιημένο τεχνικό προσωπικό και να γίνεται η αντικατάστασή του με νέο σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.[32]



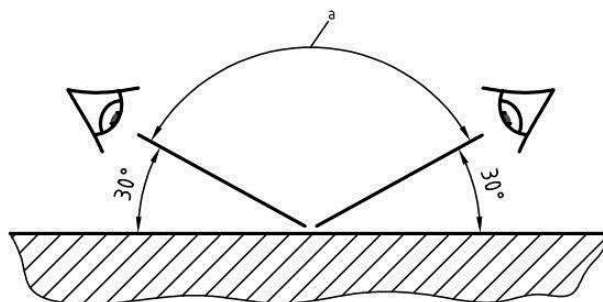
Εικόνα 57: Υδροστατική δοκιμή σε δοχείο συμπρέσορα (α), ασφαλιστική βαλβίδα (b), μανόμετρο (c)

4.2 Μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDT)

Μία άλλη ομάδα ελέγχων που απαιτείται και εφαρμόζεται από διεθνή πρότυπα για την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων αλλά και για την διασφάλιση της αξιοπιστίας και της μακροζωίας των συγκολλητών και μη, μεταλλικών κατασκευών είναι οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι (Non-destructive tests) [29]. Με τους ελέγχους NDT αξιολογούνται οι ιδιότητες μεταλλικών υλικών και εξαρτημάτων χωρίς να προκαλούνται βλάβες κατά την εκτέλεσή τους. Οι δοκιμές αυτές μπορούν να εκτιμήσουν την επί τόπου αντοχή σε θλίψη, την ομοιομορφία και την ομοιογένεια, την ποιότητα, τις περιοχές χαμηλότερης ακεραιότητας, την παρουσία ρωγμών, κενών και άλλων ατελειών και να παρακολουθήσουν τις αλλαγές στη δομή του υλικού με την πάροδο του χρόνου. Εφαρμόζονται συνήθως σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας και ιδιαίτερα στα δοχεία πίεσης ενώ το προσωπικό που εκτελεί τις δοκιμές απαιτείται να έχουν εξειδικευμένη εκπαίδευση για τον χειρισμό ευαίσθητου εξοπλισμού και την ακριβή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι πιο σημαντικές NDT δοκιμές είναι:

4.2.1 Οπτικός έλεγχος (Visual test)

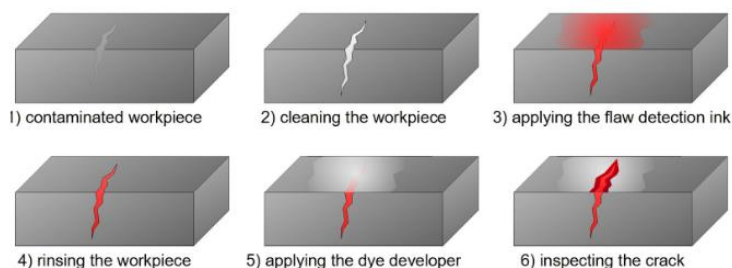
Ο οπτικός έλεγχος είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας των συγκολλήσεων και των μεταλλικών επιφανειών. Είναι η πιο διαδεδομένη και λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου. Ο οπτικός έλεγχος περιλαμβάνει τη χρήση γυμνού ματιού ή οπτικών οργάνων (μεγεθυντικοί φακοί, καθρέπτης, ενδοσκόπιο) για την επιθεώρηση της επιφάνειας συγκόλλησης και βασικού μετάλλου για τυχόν επιφανειακά σφάλματα [32]. Η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιείται υπό αρκετό φως, τουλάχιστον 500 lux, με γωνία όχι μικρότερη από 30° (Εικ. 58) και η απόσταση μεταξύ του ματιού και της επιφάνειας δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 300 mm.[30].



Εικόνα 58: Υπόδειξη θέσης οπτικού ελέγχου [30]

4.2.2 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά (Liquid - penetrated test)

Ο έλεγχος με την χρήση διεισδυτικών υγρών είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου (NDT) για την ανίχνευση επιφανειακών σφαλμάτων και ασυνεχειών σε συγκολλήσεις, καθώς και άλλων μη πορωδών υλικών όπως πλάκες, ράβδοι, σωλήνες, χυτά και σφυρήλατα υλικά.



Εικόνα 59: Ιδιότητα των διεισδυτικών υγρών [40]

Αρχικά, ο έλεγχος απαιτεί την εφαρμογή ενός διεισδυτικού υγρού που περιέχει χρωστική (συνήθως κόκκινη) στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Η επιφάνεια θα πρέπει να καθαρή από σκόνες και διάφορους ρύπους. Ο «διεισδυτής» έχει την ιδιότητα να διεισδύει σε τυχόν επιφανειακές ατέλειες ή ρωγμές. Μετά από ένα κρίσιμο χρονικό διάστημα (20 min), όπου η επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού καθαρίζεται και ξηραίνεται. Στην συνέχεια εφαρμόζεται ένα δεύτερο υγρό, ο «εμφανιστής», ο οποίος μέσω του τριχοειδούς φαινομένου, «αναγκάζει» τον διεισδυτή που έχει κατακαθίσει σε μια επιφανειακή ατέλεια να εμφανιστεί στην επιφάνεια του υλικού, καθιστώντας το ελάττωμα ορατό λόγω χρωματικής αντίθεσης (Εικ. 59 & 60).

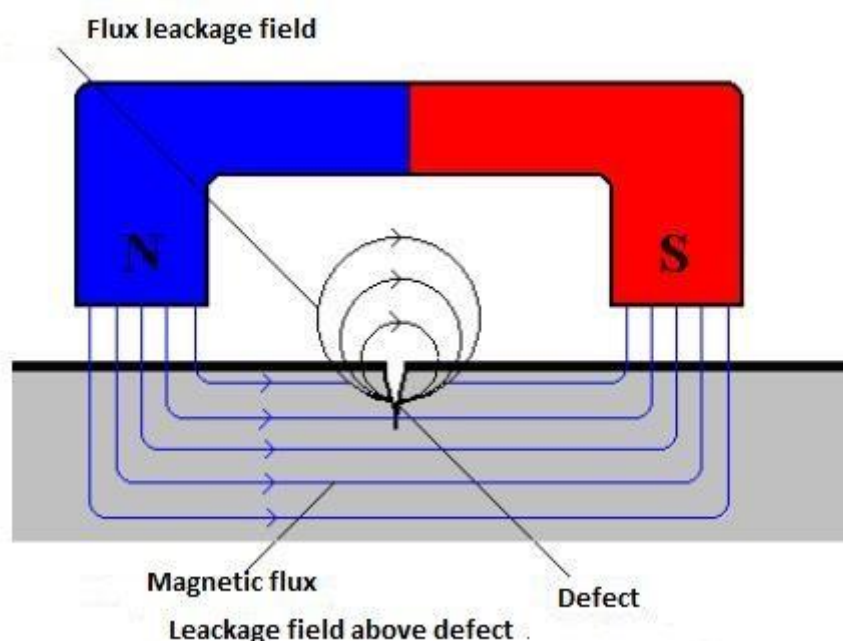


Εικόνα 60: Εφαρμογή διεισδυτικών υγρών σε μεταλλικό εξάρτημα [40]

Τα διεισδυτικά υγρά διαχωρίζονται ανάλογα από την παρασκευή τους σε δύο κατηγορίες: τα διαλυτοαφαιρούμενα και τα υδατοαφαιρούμενα. Είναι σημαντικό πριν την εφαρμογή των διεισδυτικών υγρών να υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και ο ποιοτικός έλεγχος των υλικών διείσδυσης για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων. [32]

4.2.3 Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic particle test)

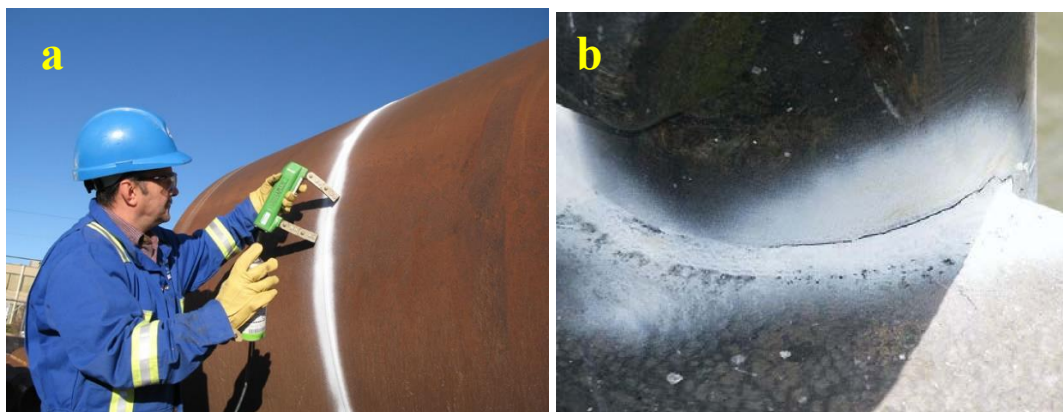
Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια είναι ένας άλλος τρόπος μη καταστροφικού ελέγχου για την ανίχνευση ασυνεχειών σε μέταλλα. Ο συγκεκριμένος έλεγχος εκτελείται με την χρήση ενός μαγνήτη στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Η επιφάνεια μαγνητίζεται, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο (Εικ. 61).



Εικόνα 61: Φαινόμενο μαγνητισμού NDT [41]

Στην συνέχεια, εφαρμόζονται τα μαγνητικά σωματίδια στην επιφάνεια του υλικού είτε σε μορφή ξηρής σκόνης είτε ως αιωρούμενα σε υγρό διάλυμα (σπρέι). Τα σωματίδια αποτελούνται από λεπτά θρυμματισμένα κομμάτια σιδήρου ή οξείδιο του σιδήρου, συχνά χρωματισμένα για καλύτερη ορατότητα (π.χ. μαύρο, κόκκινο, κίτρινο, φθορίζον). Όταν στην εξεταζόμενη μεταλλική επιφάνεια υπάρχουν ελαττώματα, όπως ρωγμές, εγκλείσματα ή ατελής τήξης, το μαγνητικό πεδίο διαταράσσεται σε αυτές τις θέσεις και δημιουργεί ένα "πεδίο διαρροής ροής" γύρω από το ελάττωμα. Τα μαγνητικά σωματίδια έλκονται και συσσωρεύονται στις περιοχές

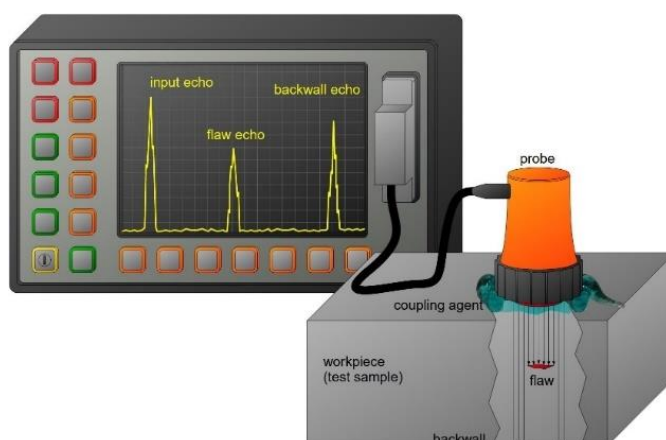
διαρροής ροής, σχηματίζοντας ορατές ενδείξεις αντίθεσης που αποκαλύπτουν την παρουσία και τη θέση των ελαττωμάτων (Εικ.62b. Ο τύπος μαγνήτη που χρησιμοποιείται συνήθως σε ελέγχους NDT είναι ο πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης (Εικ.62α). [32]



Εικόνα 62: (α) Εκτέλεση MP με πεταλοειδή μαγνήτη[41], (b) ρωγμή με την τεχνική ορατής αντίθεσης[41]

4.2.4 Έλεγχος με υπερήχους (Ultrasonic test)

Η δοκιμή με υπερήχους (UT) είναι μια μη-κατασκευαστική δοκιμή (NDT) μέθοδος για τη ανίχνευση υποπιφανειακών ασυνεχειών. Περιλαμβάνει τη χρήση κεφαλών (transducers) τα οποία εκπέμπουν παλμούς υπερήχων στο εσωτερικό μιας μεταλλικής επιφάνειας ή συγκόλλησης, με εύρος μεταξύ 500 kHz έως και 20 MHz. Η κεφαλή συνδέεται με μία διαγνωστική συσκευή, η οποία σε περίπτωση υποεπιφανειακής ασυνέχειας, απεικονίζονται στην οθόνη της, ενδείξεις υπό μορφή γραφημάτων σε διαγράμματα συχνότητας (Εικ. 63).



Εικόνα 63: Μέθοδος ελέγχου με υπερήχους [42]

Η λήψη της κυματομορφής ένδειξης πραγματοποιείται με την ανάκλαση των παλμών που εκπέμπονται από την κεφαλή (Εικ. 64α). Κάθε ατέλεια που υπάρχει μέσα στο υλικό ανακλά μια ηχώ του παλμού, η οποία έχει εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος της ασυνέχειας (ρωγμή). Επίσης, υπάρχουν τύποι συσκευών υπερήχων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του πάχους ελασμάτων (Εικ. 64b) στα οποία παρατηρείται μείωση πχ λόγω εσωτερικής διάβρωσης. [32]



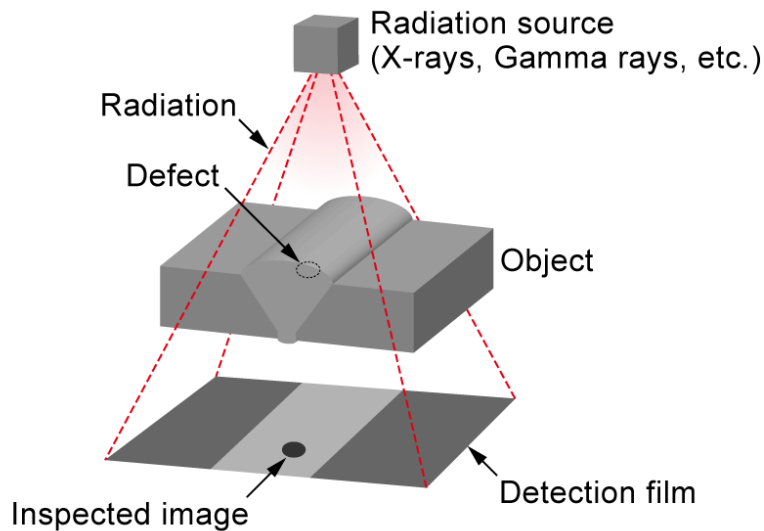
Εικόνα 64: (α) Εφαρμογή UT για ασυνέχειες [42], (β) Παχυμετρήσεις ελάσματος με UT [42]

4.2.5 Έλεγχος με Ραδιογραφία (Radiographic test)

Ο ραδιογραφικός έλεγχος (RT) είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου (NDT) που χρησιμοποιεί ακτίνες-X ή ακτίνες-γ για να επιθεωρηθεί η δομή εσωτερικά των συγκολλήσεων για ασυνέχειες ή ελαττώματα. Η ραδιογραφική δοκιμή εφαρμόζεται με την χρήση συσκευής ραδιογραφίας από την οποία παράγεται ακτινοβολία. Η ακτινοβολία εκπέμπεται και εν συνεχεία διέρχεται στο προς εξέταση αντικείμενο δοκιμής. Η ένταση της ακτινοβολίας καταγράφεται σε ένα φιλμ. Οι πυκνότερες και παχύτερες περιοχές του υλικού απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο σκούρες περιοχές στην ακτινογραφική εικόνα, ενώ οι λιγότερο πυκνές ή λεπτότερες περιοχές επιτρέπουν τη διέλευση περισσότερης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πιο φωτεινές (Εικ. 65)

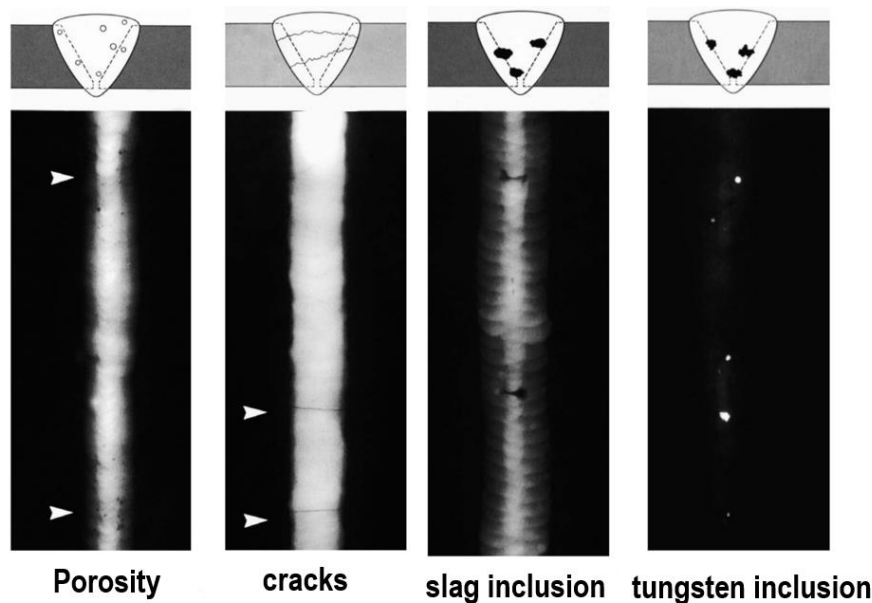
¹ Οι ακτίνες-X έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-X) έως τα 10pm («σκληρές» ακτίνες-X) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ατσάλι πάχους μισού μέτρου.

² Οι ακτίνες-γ εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος και έχουν σχεδόν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-X.



Εικόνα 65: Αρχή λειτουργίας ραδιογραφίας (RT) [43]

Αυτό επιτρέπει στους επιθεωρητές να εντοπίζουν και να εξετάζουν οπτικά, μέσω των φιλμ (Εικ. 66), εσωτερικά ελαττώματα όπως πόρους, ρωγμές, εγκλείσματα και ειδικές κατηγορίες ελαττωμάτων συγκόλλησης όπως ατελή τήξη ή ατελή διείσδυση [10]. Το προσωπικό που εκτελεί τον ραδιογραφικό έλεγχο θα πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο ώστε να επιτυγχάνεται μια καλή οπτική αντίθεση μεταξύ των πυκνοτήτων στα φιλμ της ραδιογραφίας. Όσο το δυνατόν πιο ευκρινέστατα απεικονίζονται τα ελαττώματα τόσο πιο σωστά μπορεί να ερμηνευτεί ο τύπος του σφάλματος. [32]



Εικόνα 66: Απεικονίσεις των σημαντικότερων ατελειών συγκόλλησης σε φιλμ ραδιογραφίας [43]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω μιας εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μελετών περίπτωσης ανακύπτει ότι τα δοχεία πίεσης είναι ένας σημαντικός εξοπλισμός για την Βιομηχανία αλλά και για καθημερινές εφαρμογές. Έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί διάφοροι τύποι δοχείων, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής τους. Ωστόσο, ο παράγοντας της αστοχίας είναι πολύ υψηλός που μπορεί να προέρχεται είτε από λάθη στον αρχικό σχεδιασμό των δοχείων, είτε κατά την κατασκευή, είτε κατά διαχείριση της λειτουργίας τους.

Τα είδη αστοχιών που αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και τα είδη των δοχείων πίεσης ήταν ποικίλα σύμφωνα με τις μελέτες περίπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν(ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι). Οι κυριότεροι τύποι αστοχιών που διαπιστώθηκαν στη παρούσα εργασία ήταν:

- 1) Ρηγμάτωση υπό μηχανική τάση (Stress Corrosion Cracking).
- 2) Διάβρωση με κοιλότητες (Pitting Corrosion) που εν συνεχεία εξελίχθηκαν σε ρωγμές.
- 3) Ελαττώματα στις συγκολλήσεις των δοχείων, όπως η ατελής τήξη.
- 4) Συνδυασμοί σφαλμάτων (ελλιπής μελέτης σχεδιασμού και κακοτεχνία συγκόλλησης)

Στις παραπάνω αστοχίες έπαιξε σημαντικό ρόλο και ο ανθρώπινος παράγοντας λόγω:

- 1) Ελλιπής συντήρησης και μη τακτικού ελέγχου με μη καταστροφικές δοκιμές.
- 2) Άγνοιας των αρχικών ενδείξεων πριν την τελική αστοχία.
- 3) Λανθασμένων, πιθανότατα υπολογισμών στην μελέτη σχεδίασης των δοχείων και κατά συνέπεια, λανθασμένων επιλογών πρώτων υλών.
- 4) Κακής εκτέλεσης των μεθόδων συγκόλλησης κατά την κατασκευή και την επισκευή δοχείων.

Όλα τα παραπάνω, αποτελούν μια σειρά περιπτώσεων, όπου τα διεθνή πρότυπα και οι κώδικες αποσκοπούν στην αποφυγή αστοχιών κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή μέχρι και τον περιοδικό έλεγχο των δοχείων πίεσης, με στόχο την εγγύηση της ασφάλειας και της καλής λειτουργίας.

Στο λειτουργικό σκέλος, υπάρχουν κρατικοί νόμοι που υποχρεώνουν τους κατόχους των δοχείων πίεσης να διενεργούν συστηματικούς περιοδικούς ελέγχους βάσει διεθνών κανονισμών. Ωστόσο, σε ορισμένες Βιομηχανίες αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Ορισμένοι λόγοι μπορεί να είναι:

- 1) Η μείωση στον προϋπολογισμό της συντήρησης και της τακτικής επιθεώρησης σε περιπτώσεις περικοπών.
- 2) Η αποφυγή αναβάθμισης πεπαλαιωμένου εξοπλισμού λόγω υψηλού κόστους.
- 3) Η έλλειψη εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού συντήρησης, η οποία μπορεί να δυσχεράνει τις εταιρείες να συντηρούν σωστά τον εξοπλισμό τους.
- 4) Η έμφαση στην αποδοτικότητα της παραγωγής έναντι της μακροζωίας του εξοπλισμού.

Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτεί μια στρατηγική, βασισμένη σε δεδομένα προσέγγισης της συντήρησης που να λαμβάνει υπόψη το πραγματικό μακροπρόθεσμο κόστος.

Συνοψίζοντας, η μελέτη των αστοχιών σε δοχεία πίεσης είναι εξαιρετικά σημαντική για την ενίσχυση της ασφάλειας, τη βελτίωση των πρώτων υλών, της κατασκευής, της βελτιστοποίησης των σχεδίων και της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Μαθαίνοντας από συμβάντα του παρελθόντος, οι μηχανικοί μπορούν να αναπτύξουν πιο αξιόπιστα και αποδοτικά δοχεία πίεσης, να βελτιώσουν τις οδηγίες επιθεώρησης που θα συμβάλουν στη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας τους, μέσω ολοκληρωμένων προγραμμάτων συντήρησης και αυστηρών πρωτοκόλλων επιθεώρησης στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

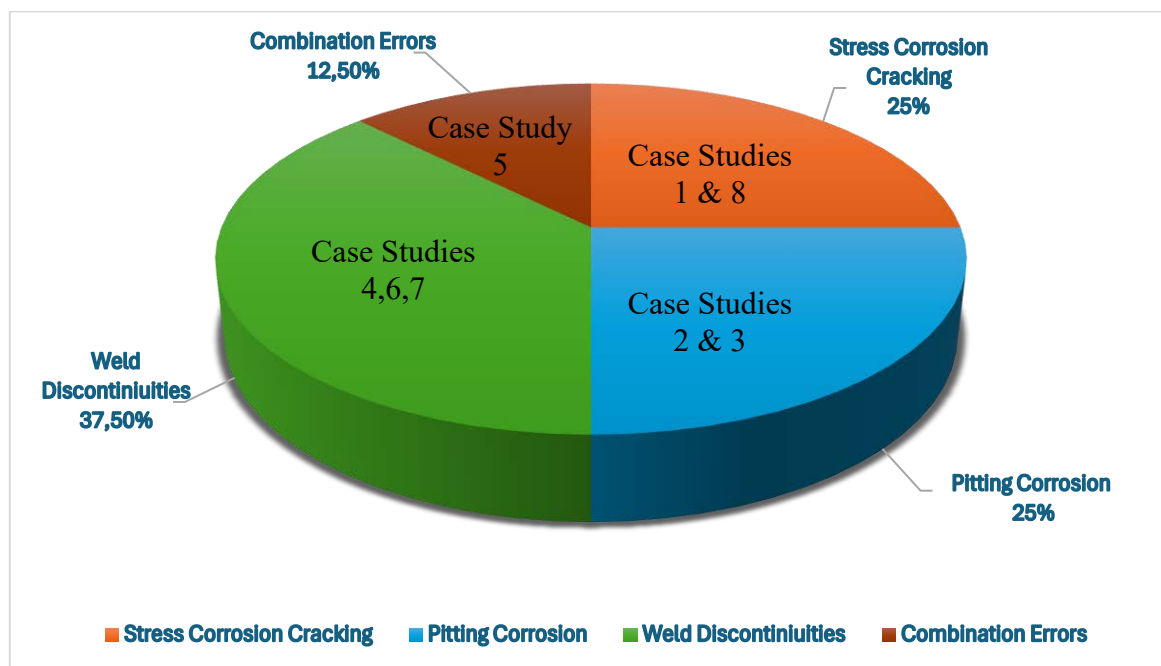
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Πίνακας 3: Βασικά στοιχεία ανά μελέτη περίπτωσης

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	ΤΥΠΟΣ ΔΟΧΕΙΟΥ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ	ΤΕΛΙΚΗ ΑΣΤΟΧΙΑ	ΑΛΛΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ
Case Study 1	Αυτόκλειστο Δοχείο	Χαλαζίας + Νερό + NaOH	Ρωγμή Διάβρωσης υπό Τάση (SCC)	- Ευθραυστότητα λόγω κακής θερμικής κατεργασίας του υλικού του δοχείου. - Ελλιπής περιοδικός έλεγχος (NDT).
Case Study 2	Δοχείο Αποθήκευσης	Νερό	Τρημματική Διάβρωση (Pitting Corrosion)	- Ελλιπής περιοδικός έλεγχος (NDT). - Ελλιπής έλεγχος ποιότητας νερού. - Λανθασμένη διαδικασία εκκίνησης και παύσης του συστήματος ατμοπαραγωγής
Case Study 3	Εναλλάκτης Θερμότητας Δέσμης Σωλήνων	Νερό	Τρημματική Διάβρωση (Pitting Corrosion)	- Ελλιπής έλεγχος ποιότητας νερού. - Ταπωμένοι σωλήνες - Χρήση HCL για την ρύθμιση του Ph.
Case Study 4	Δοχείο Αποθήκευσης	Αμμωνία	Ασυνέχεια Συγκόλλησης (Welding Discontinuities)	- Εμφάνιση διάβρωσης στην εσωτερική επιφάνεια του δοχείου
Case Study 5	Δοχείο Αποθήκευσης & Επεξεργασίας	C2H4 Αιθυλένιο	Κόπωση (Fatigue)	- Ανεπαρκής σχεδιασμός ενισχυτικής πλάκας και μεθόδου συγκόλλησης. - +25% βάρος του αρχικού δοχείου. - Υψηλή σκληρότητα στην ΘΕΖ - Ελλιπής περιοδικός έλεγχος (NDT). - Κακοτεχνία συγκόλλησης επισκευής - Ελλιπής εφαρμογή ελέγχων NDT στην επισκευή πριν την λειτουργία. - Σφάλματα σχεδιασμού θεμελίωσης
Case Study 6	Δοχείο Αποθήκευσης	SrCl2 Χλωριούχο Στρόντιο	Ασυνέχεια Συγκόλλησης (Welding Discontinuities)	- Υψηλή σκληρότητα
Case Study 7	Εναλλάκτης Θερμότητας Κελύφους Σωλήνων	Νερό	Ασυνέχεια Συγκόλλησης (Welding Discontinuities)	- Λανθασμένα μέτρα συγκόλλησης (διαστολές)
Case Study 8	Εναλλάκτης Θερμότητας Πλάκας - Πλαισίου	Νερό	Ρωγμή Διάβρωσης υπό Τάση (SCC)	- Τρημματική διάβρωση σε σημεία της φλάντζας

Στον πίνακα 3 του παραρτήματος, γίνεται μια αναφορά στα κυριότερα στοιχεία των μελετών περίπτωσης που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία. Σε κάθε μελέτη περίπτωσης παρουσιάζετε ο τύπος του δοχείου που αστόχησε, το περιεχόμενο μέσο και ο τύπος της αστοχίας από την οποία προήλθε η τελική διάρρηξη. Επίσης, γίνεται μια αναφορά σε επιμέρους ευρήματα που έγιναν γνωστά κατά τους εργαστηριακούς ελέγχους καθώς και ελλείψεις που υποβοήθησαν στην εξέλιξη της αστοχίας. Όπως παρατηρείτε, στις περισσότερες εξ αυτών μελέτες περίπτωσης, ανεξάρτητα με τον τύπο του δοχείου και την λειτουργία του, το περιεχόμενο μέσο ήταν το νερό. Από τα οκτώ δοχεία που μελετήθηκαν, τα τέσσερα (case study 1,2,3 & 8) αστόχησαν από μηχανισμό διάβρωσης. Μόνο ένα δοχείο με περιεχόμενο νερό, αστόχησε λόγω λανθασμένης τεχνικής συγκόλλησης (case study 7). Επίσης, προκύπτει ότι από τις συνολικές οκτώ αστοχίες των μελετών περίπτωσης (Γραφ.1), οι τρεις προήλθαν λόγω ασυνεχειών σε συγκολλήσεις σύνδεσης των δοχείων. Οι τέσσερις προήλθαν από μηχανισμούς διάβρωσης και πιο συγκεκριμένα δύο λόγω τρημματικής διάβρωσης (pitting corrosion) και δύο λόγω ρωγμών που προήλθαν από διάβρωση υπό τάση (SCC). Η 5^η μελέτη περίπτωσης περιείχε ένα συνδυασμό πολλών παραγόντων που συντέλεσαν στην αστοχία του δοχείου και στην αστοχία της επισκευής του (σχεδιασμός, μελέτη ικανότητα συγκολλητή).

Γράφημα 1: Ποσοστά αστοχιών ανά τύπο αστοχίας



ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα προαναφερόμενά της παρούσας εργασίας, εκτιμάται ότι οι αστοχίες των μελετών περίπτωσης αποτελούν τους πιο συνήθεις τύπους αστοχιών σε δοχεία πίεσης.

- **Η μέθοδος των συγκολλήσεων**, θα πρέπει να εκτελούνται βάση προδιαγραφών - προτύπων. Οι συγκολλητές πρέπει να έχουν την απαραίτητη ικανότητα(πιστοποίηση ικανότητας) των τεχνικών συγκόλλησης ακολουθώντας τους κανόνες διεθνών προτύπων, όπως επίσης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί (πχ ηλεκτρόδια). Μετά από κάθε κατασκευή ή επισκευή, οι συγκολλήσεις θα πρέπει να υπάγονται σε μη καταστροφικούς ελέγχους ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα της συγκόλλησης.
- **Οι μηχανισμοί διαβρώσεις (SCC & pitting corrosion)** θα πρέπει να προλαμβάνονται με συχνές επιθεωρήσεις από έμπειρο τεχνικό προσωπικό πριν από την εμφάνιση βλαβών, είτε με τακτικούς ελέγχους μη καταστροφικών δοκιμών (NDT), είτε με ποιοτικούς ελέγχους για την έκθεση των δοχείων σε διαβρωτικές συνθήκες (περιεχόμενο μέσο, εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες). Οι κάτοχοι των δοχείων θα πρέπει να αναπτύσσουν ένα σύστημα τυποποιημένων διαδικασιών λειτουργίας για το χειρισμό, την συντήρηση και την επισκευή των δοχείων πίεσης.
- **Ο σχεδιασμός και η μελέτη των δοχείων** θα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με αναγνωρισμένα πρότυπα ασφαλείας (ASME, ARI, TRD), διασφαλίζοντας την αντοχή του δοχείου σε καταπονήσεις και ελαχιστοποιώντας τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία.

Η πρόληψη όλων των παραπάνω τους είναι ζωτικής σημασία διότι με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η λειτουργική αξιοπιστία του δοχείου, η ασφάλεια του προσωπικού και μη, η προστασία του περιβάλλοντος από την απελευθέρωση των επικίνδυνων ουσιών και η εξοικονόμηση κόστους αποτρέποντας δαπάνες επισκευών, αντικατάστασης εξοπλισμού, διακοπής παραγωγής και αξιώσεων ευθύνης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ross, C.T.F. (2011) Pressure Vessels - External Pressure Technology, 2nd Edition, Woodhead Publishing, April 30, 2011.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII: Rules for construction of pressure vessels, 2023.
- [3] EN ISO 13445: The current European standard, harmonized with the pressure equipment directive.
- [4] Gaddam, S. R. (2020) Design of Pressure Vessels, CRC Press, 17 December 2020.
- [5] Parr, A. (2011) Hydraulics and Pneumatics - A Technician's and Engineer's Guide, 3rd Edition, Section 3: Air Compressors, Air Treatment and Pressure Regulation, Butterworth & Heinemann, January 28, 2011.
- [6] Sarkar, D. K. (2015) Thermal Power Plant - Design and Operation, 1st Edition, August 20, 2015, Elsevier.
- [7] EN ISO 21029-1:2004 - Cryogenic vessels — Transportable vacuum insulated vessels of not more than 1000 liters volume — Part 1: Design, fabrication, inspection, and tests.
- [8] EN 12817:2019 - Liquefied petroleum gas equipment and accessories- European standard- Mar 13, 2019
- [9] EN ISO 10460:2018 & LC:2019 - Gas cylinders - Welded aluminum-alloy, carbon, and stainless-steel gas cylinders - Periodic inspection and testing.
- [10] Moss, D. R., Michael M. (2012) Pressure Vessel Design Manual, 4th Edition, Butterworth & Heinemann, December 26, 2012.
- [11] Moss, D. R. (2004) Pressure Vessel Design Manual Chapter 1 – Failures in pressure vessels, Elsevier Science Ltd, January 23, 2004.
- [12] Revier, R. W. (2011) Uhlig's Corrosion Handbook, 3rd edition, [Online] Available: <https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=kK1IfAMJUsC&oi=fnd&pg=PA195&dq=uhlig+corrosion+handbook+2011+pitting+corrosion&ots>
- [13] Ashby, M. Shecliff, H. Cebon, D. (2022) Υλικά, Τεχνολογία, επιστήμη, επεξεργασία και σχεδιασμός. Κλειδάριθμος 2022.
- [14] Asachi, G., (2016) Experimental Research on the Elastic Deformation Mode of S235JR Rolled Steel Fastened between the Centers of a Universal Lathe, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, November 2016.
- [15] Troiano, R.A. Hehemann, R. F. Gibala, R. (1984) Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, American Society for metals.
- [16] Dogan, B. Petrovski, B. (2001) Creep crack growth of high temperature weldments - International Journal of Pressure Vessels and Piping, Elsevier Science Ltd (2001).
- [17] Lippold, J. C. (2014) Welding Metallurgy and Weldability, Wiley, November 2014.
- [18] Rizvi, S. A. Alib, W. (2019) Welding defects, Causes and their Remedies: A Review, December 2019. [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/345274687_Welding_defects_Causes_and_their_Remedies_A_Review
- [19] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB). (2014) NDK Crystal, Inc., Belvidere, IL, High-Pressure Vessel Rupture, Case study No. 2010-04-I-IL - December 7, 2014. [Online] Available: <https://www.csb.gov/ndk-crystal-inc-explosion-with-offsite-fatality/>
- [20] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB). Pressure Vessel Explosion at Loy-Lange Box Company - Investigation Report No 2017-04-I-MO, July 29, 2022. [Online] Available: <https://www.csb.gov/loy-lange-box-company-pressure-vessel-explosion/>
- [21] Ghayad, M. I. Hamid, A. Z. Gomaa, N. (2015) A Case Study: Corrosion Failure of Tube Heat Exchanger - Journal of Metallurgical Engineering (ME) Volume 4, 2015.
- [22] Ashby, F. M. Jones, R.H. D. (2012) Engineering Materials 1 - An Introduction to Properties, Applications and Design · Section 1 - chapter 16 - Case Study 1: Fast Fracture of an Ammonia Tank, Butterworth-Heinemann, pp 229-232.
- [23] Otegui, J.L. Fazzini, P.G. Márquez, A. (2009) Common root causes of recent failures of flanges in pressure vessels subjected to dynamic loads - Engineering Failure Analysis 16 – 1825 - 1836.
- [24] Jha, K. A. Manwatkar, K.S. Narayanan, P. R. Pant, B. Sharma S.C. Koshi M. (2013) Case Studies in Engineering Failure Analysis 1 - Failure analysis of a high strength low alloy 0.15C–1.25Cr–1Mo–0.25V steel pressure vessel - 265–272.
- [25] Liu, L. Ding, N. Shi, J. Xua, N. Guo, W. Wua, C. M. L. (2016) Case Studies in Engineering Failure Analysis 7 -Case study - Failure analysis of tube-to-tubesheet welded joints in a shell-tube heat exchanger, 32 – 40.
- [26] Khodamorad, S. H. Alinezhad, N. Haghshenas Fatmehsari, D. Ghahtan K. (2016) Case Studies in Engineering Failure Analysis 5–6. Stress corrosion cracking in Type.316 plates of a heat exchanger, 59 – 66.
- [27] Zhu, Y. T. Liao, X. Z. Wu, X. L. (2012) Deformation twinning in nanocrystalline materials - Progress in Materials Science - 57. [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007964251100065X>
- [28] Dietzel, W. Turnbull A. (2007) Stress Corrosion Cracking, Elsevier Science Ltd.
- [29] Smith, R.A. (2015) Non-Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods – Document: AA050 - Issue 2 – November 2015- BINDT.
- [30] Zawawi, N.A.W.A. Liew, M. S. S. AL Aloul, W. Lim, E. S. Toloue, I. Imran, M. (2019) Non-Destructive Testing Techniques for Offshore Underwater Decommissioning Projects through Cutting Detection: A State of Review, December 2019. [Online] Available <https://www.researchgate.net/publication/337574309>.

- [31] Hallai, C. Kulcsar, P. (1993) Non-Destructive Testing '92, 1st Edition - January 4, 1993
- [32] Singh, R. (2015) Applied Welding Engineering, Processes, Codes, and Standards, 2nd Edition, section 3, October 24, 2015, [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128041765/applied-welding-engineering>
- [33] Darvell, B.W. (2018) Materials Science for Dentistry, 10th Edition - March 3, 2018, Chapter 26 - Radiography [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081010358/materials-science-for-dentistry#book-info>
- [34] US CSB, "Ignored Warnings: Explosion in St. Louis", [Online] Available: https://www.youtube.com/watch?v=rGVbGNdx7g0&ab_channel=USCSB
- [35] Kameshwar U. (2017) Hands on Boiler and Auxs Operation and Maintenance – Notion Press, July 3, 2017, ANNEX, section D, 37.
- [36] Epower metals (2023) [Online] available: <https://www.epowermetals.com/fr/how-to-weld-outlets.html>
- [37] PSLV gallery (2014) [Online] available: https://www.b14643.de/Spacerockets_1/India/PSLV/Gallery/PSLV_SITVC.htm
- [38] DTechinnd (2020) [Online] available: <https://thedtechind.wordpress.com/2020/04/21/launch-vehicles-of-isro-2/>
- [39] Azeem M.A., Lee P.D., Phillion A.B., Karakadde S., Rockett P., Atwood R.C., Courtois L, Rahman K.M., Dye D. (2017) Revealing dendritic pattern formation in Ni, Fe and Co alloys using synchrotron tomography, ACTA MATERIALIA pp 241-248, Volume 128, April 15, 2017.
- [40] Ahmed S.P. (2023) Difference between Destructive and Non-Destructive Tests. [Online] available: <https://www.merchantnavydecoded.com/testing-of-material-destructive-test-non-destructive-tests-difference-between-destructive-and-non-destructive-tests/>
- [41] TUV NORD, Magnetic particle testing, [online] available: <https://www.tuv-nord.com/lv/en/services/testing/non-destructive-testing-of-materials-and-structures-ndt/magnetic-particle-testing-mt/>
- [42] Tech-science (2018) Ultrasonic testing, [online] available: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/ultrasonic-testing-ut/>
- [43] Matsusada P. (2022) Radiographic testing, [online] available: <https://www.matsusada.com/column/words-ndt.html>
- [44] Anees T. Pressure Vessels, [online] available: <https://theanees.com/pressure-vessels-what-is-it-how-does-it-work-type-uses/>
- [45] MC Intec, Air receivers [online] available: <https://www.mc-integ.co.uk/product/pressure-vessels/air-receivers/>
- [46] Dey A.K. Exploring the Various Types of Pressure Vessel Heads, [online] available: <https://whatispiping.com/types-of-pressure-vessel-heads/>
- [47] SEFIC [online] available: https://www.alibaba.com/product-detail/Made-in-China-Aluminum-Scuba-Tank_60663589879.html?spm=a2700.details.you_may_like.2.64ec39d8kq9jpB
- [48] Apollo military, [online] available: <https://www.apollomilitary.com/products/scuba-diving-tank-only-s-80-cu-ft-111-ltr-207-bar>
- [49] Weidner, [online] available: <https://www.wasserchemie.de/autoklaven/>
- [50] Modulus of Elasticity – Elastic Modulus [online] available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/materials-science/material-properties/strength/hookes-law/modulus-of-elasticity-elastic-modulus/>
- [51] DFC Pressure Vessels Manufacturer Co, [online] available: <https://www.dfctank.com/news/P5.html>
- [52] Inspectioneer -99 Diseases of Pressure Equipment: Brittle Fracture- [online] available: <https://inspectioneer.com/journal/2007-01-01/3683/99-diseases-of-pressure-equipm>
- [53] Corrosionpedia - Understanding Pitting Corrosion to Prevent Catastrophic Failures - [online] available: <https://www.corrosionpedia.com/2019/03/14/understanding-pitting-corrosion-to-prevent-catastrophic-failures>
- [54] SFS - How to detect & prevent hydrogen-assisted stress corrosion cracking - [online] available: <https://us.sfs.com/learn-more/detect-prevent-hydrogen-assisted-stress-corrosion-cracking>
- [55] IQS Directory – Pressure tanks - [online] available: <https://www.iqsdirectory.com/articles/pressure-vessel/pressure-tanks.html>
- [56] American Bobcat – H – The challenge of hydrogen transport - [online] available: <https://americanbobcat.blog/2023/12/31/h-the-challenge-of-hydrogen-transport/>
- [57] Hydrogen Tools – Hydrogen Embrittlement -[online] available: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-embrittlement>
- [58] Sokairge H., Elgabbas F., Rashad A., Elshafie H. (2020) - Long-term creep behavior of basalt fiber reinforced polymer, 31 August 2020, p.2, Fig. 1, - [online] available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820324429>
- [59] Shahheidari M., Sadeghi A., Sadeghi M.H. (2018) - High temperature creep failure in magnesium reduction retorts, 24 August 2018, p. 439, Fig.1b - [online] available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630718305521>
- [60] Rockford Register Star, (2024), [online] available: <https://eu.rstar.com/story/news/local/2012/02/18/ndk-cannot-resume-operations-until/42653839007/>
- [61] Athens Banner-Herald (2024)-[online] available: <https://eu.onlineathens.com/story/news/nation-world/2017/04/03/dead-4-hurt-after-boiler-explodes-st-louis/15428564007/>