



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΑΠΟ
ΧΑΛΥΒΑ St37**



ΥΠΟ
ΔΗΜΗΤΡΙΟ ΝΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟ

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος, 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ St37



ΥΠΟ
ΔΗΜΗΤΡΙΟ ΝΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟ

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος, 2022

© 2022 Δημήτριος Νατσιόπουλος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σπυρίδων Καραμάνος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη
Επίκουρη Καθηγήτρια, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων
Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ St37

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΝΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής Μηχανικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Υλικών

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, ο στόχος ήταν η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για την διεξαγωγή δοκιμών κόπωσης με διάβρωση. Αυτή περιλάμβανε τον σχεδιασμό μιας κυψέλης διάβρωσης δοκιμίων, η οποία προσαρμόστηκε στη μηχανή εφελκυσμού MTS 810 MATERIAL TEST SYSTEM, του εργαστηρίου Μηχανικής Και Αντοχής Υλικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η κυψέλη διάβρωσης απαιτούσε συγκεκριμένες διαστάσεις και απόλυτη στεγανότητα προς αποφυγή διαρροής επάνω στη μηχανή εφελκυσμού. Για την δημιουργία της κυψέλης, έγινε μελέτη ως προς τα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καθώς επίσης και σχεδιασμός των παροχών εισόδου και εξόδου που τοποθετήθηκαν πάνω της. Έπειτα, ακολούθησε ο έλεγχος στεγανότητας της κυψέλης και οι διορθωτικές ενέργειες που έπρεπε να γίνουν στον σχεδιασμό της, για την τελική κατασκευή. Η τελική κατασκευή υποβλήθηκε σε πειραματικές διαδικασίες για να διαπιστωθεί πως δεν υπάρχουν φαινόμενα διαρροής αλλά και ότι υπάρχει σωστή κυκλοφορία του υδάτινου διαλύματος. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στη συμπεριφορά δύο δοκιμίων κατασκευασμένα από χάλυβα St37, ενώ το ένα από τα δύο είχε υποστεί κατεργασία συγκόλλησης GMAW. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κόπωσης με διάβρωση στα δύο δοκίμια, όπου το διαβρωτικό περιβάλλον είχε σύσταση 3,5 % κ.β. NaCl σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G44. Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατασκευάστηκαν διαγράμματα όπου συγκρίνεται η διάρκεια ζωής των δοκιμίων συναρτήσει της κατεργασίας που είχαν υποστεί τα δοκίμια.

Λέξεις-κλειδιά: Χάλυβας St37, Κόπωση, Κόπωση σε διαβρωτικό περιβάλλον, Διάβρωση συγκολλήσεων.



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

EXPERIMENTAL STUDY OF CORROSION FATIGUE ON WELDING STEEL St37

DIMITRIOS NATSIOPOULOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2022

Supervisor: Dr Alexis Kermandis

Associate Professor of Mechanical Behavior of Metal Materials

Abstract

The goal of this study was the construction of a device for corrosion fatigue tests. This included the design and construction of a corrosion cell, which was adapted to the MTS 810 MATERIAL TEST SYSTEM tensile machine at the Mechanics and Strength of Materials Laboratory, of the Department of Mechanical Engineering at University of Thessaly. The corrosion cell required specific dimensions and absolute tightness to prevent any leakage onto the tensile machine. The creation of the cell required research about the appropriate materials that could be used, as well as the design of the inlet and outlet supplies that were placed on it. This was followed by testing the tightness of the cell and the corrective actions that had to be done in its design, for the final construction. The final construction was subjected to experimental procedures to determine that there were no leaks and to ensure the proper circulation of the aqueous solution. The study was conducted on the behavior of two specimens made of steel St37, while one of these had a GMAW welding. Corrosion fatigue tests were performed on both specimens, where the composition of the corrosive solution was 3.5% by weight NaCl according to ASTM G44-99. The test results were then used to construct diagrams comparing the service life of the specimens as a function of the treatment the specimens had undergone.

Key words: Low Carbon steel St37, Fatigue, Corrosion Fatigue, Corrosion of welds.



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Πεδίο Εφαρμογής	1
1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	4
Κεφάλαιο 2. Μηχανισμός Διάβρωσης Χάλυβα	5
2.1 Μηχανισμός Διάβρωσης	5
2.1.1 Γαλβανική Διάβρωση	7
2.1.2 Ομοιόμορφη Διάβρωση.....	8
2.1.3 Εργοδιάβρωση	9
2.1.4 Τρημματική Διάβρωση	10
2.2 Συνδυασμός Κόπωσης με Διάβρωση Χάλυβα.....	11
2.2.1 Βασικοί Μηχανισμοί Κόπωσης με Διάβρωση	14
Κεφάλαιο 3. Μελέτη & Κατασκευή Κυψέλης Διάβρωσης	16
3.1 Μελέτη Κυψέλης & Περιορισμοί.....	16
3.2 Κατασκευή Κυψέλης & Στεγανοποίηση.....	20
3.2.1 Βήματα Κατασκευής Πρώτης Δοκιμαστικής Κυψέλης.....	21
3.2.2 Βήματα Κατασκευής Βελτιωμένης Κυψέλης	23
3.2.3 Κατασκευή Τελικής Κυψέλης	25
3.3 Επιπρόσθετος Εξοπλισμός.....	26
3.3.1 Αντλία Νερού.....	26
3.3.2 Λάστιχο Διέλευσης Διαλύματος.....	27
3.3.3 Βάνα Νερού.....	28
3.3.4 Αισθητήρα Υγρασίας	28
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διαδικασία	31
4.1 Κατασκευή Δοκιμίων	31
4.2 Δημιουργία Διαβρωτικού Διαλύματος	34
4.3 Συναρμολόγηση Ιδιοκατασκευής	35
4.4 Δοκιμές Κόπωσης με Διάβρωση.....	37
4.4.1 Πειραματική Διαδικασία 1 (Δοκίμιο με συγκόλληση GMAW)	37
4.4.2 Πειραματική Διαδικασία 2 (Δοκίμιο αναφοράς)	39
4.5 Αποτελέσματα	40
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα	41
Βιβλιογραφία	42



Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 (Παρουσίαση τεσσάρων διαφορετικών ζώνων διάβρωσης [2]).....	2
Εικόνα 2.1 (Διαφορές δυναμικού για διάβρωσης σε νερό [4]).....	5
Εικόνα 2.2 (Μηχανισμός διάβρωσης σιδήρου σε υγρό περιβάλλον [5])	6
Εικόνα 2.3 (Γαλβανική σειρά μετάλλων [6])	7
Εικόνα 2.4 (Κατασκευή που έχει υποστεί γαλβανική διάβρωση)	8
Εικόνα 2.5 (Ομοιόμορφη διάβρωση [7]).....	9
Εικόνα 2.6 (Απεικόνιση ρωγμής λόγω εργοδιάβρωσης).....	10
Εικόνα 2.7 (Απεικόνιση τρηματικής διάβρωσης σε υποθαλάσσιο αγωγό).....	10
Εικόνα 2.8 (Ημιτονοειδής εναλλακτική φόρτιση [8])	11
Εικόνα 2.9 (Καμπύλη S-N για χάλυβα E690 από πειράματα κόπωσης σε ξηρό και διαβρωτικό περιβάλλον [1])..	12
Εικόνα 2.10 (Διάδοση ρωγμών εργοδιάβρωσης και κόπωσης με διάβρωση [7]).....	13
Εικόνα 2.11 (Απορρόφηση υδρογόνου και ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης σε διαβρωτικό περιβάλλον [9]) ...	14
Εικόνα 2.12 (Στάδια μηχανισμού ανοδικής διάλυσης στην αιχμή του ρήγματος [9])	15
Εικόνα 3.1 (Κατασκευή στήριξης κυψέλης και διαστασιολόγηση [8]).....	16
Εικόνα 3.2 (δοκίμιο χάλυβα St37 και διαστασιολόγηση [8]).....	17
Εικόνα 3.3 (Κατασκευή στην οποία διενεργούνται πειράματα κόπωσης με διάβρωση [2]).....	18
Εικόνα 3.4 (Πρώτη απόπειρα σχεδίασης της κυψέλης με τα σημεία παροχής εισόδου και εξόδου	19
Εικόνα 3.5 (Τσιμούχα άξονα).....	20
Εικόνα 3.6 (Λείανση οπών)	21
Εικόνα 3.7 (Διάτρηση οπών)	21
Εικόνα 3.8 (Κοπή σωλήνα PVC)	21
Εικόνα 3.9 (εσωτερικό κυψέλης με συναρμολογημένες τις παροχές εισόδου (μαύρο βέλος) και εξόδου (κόκκινο βέλος))	22
Εικόνα 3.10 (Κάτω μέρος κυψέλης όπου φαίνεται η τοποθετημένη τσιμούχα και περιμετρικά η κόλλα)	22
Εικόνα 3.11 (Σωλήνας PVC Φ160).....	23
Εικόνα 3.12 (Πλαστικό εξάρτημα παροχής διαλύματος).....	24
Εικόνα 3.13 (Ολοκληρωμένη κατασκευή τελικής κυψέλης).....	25
Εικόνα 3.14 (Κάτω μέρος κυψέλης όπου έχει τοποθετηθεί η σιλικόνη)	25
Εικόνα 3.15 (Αντλία νερού).....	26
Εικόνα 3.16 (Λάστιχο διέλευσης διαλύματος)	27
Εικόνα 3.17 (Βάνα νερού).....	28
Εικόνα 3.18 (αισθητήρας υγρασίας)	28
Εικόνα 3.19 (Ηλεκτρολογικό κουτί που έχουν τοποθετηθεί τα δύο ρελέ και ο διακόπτης on/off)	29
Εικόνα 4.1 (Δοκίμιο αναφοράς χάλυβα St37)	32
Εικόνα 4.2 (Δοκίμιο χάλυβα St37 με συγκόλληση GMAW).....	32
Εικόνα 4.3 (εξοπλισμός ευθυγράμμισης δοκιμίου πριν την συγκόλληση [8]).....	33
Εικόνα 4.4 (Στιγμιότυπο αμέσως μετά τη συγκόλληση [8])	33
Εικόνα 4.5 (Συνθήκες συγκόλλησης τύπου GMAW [8]).....	33



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Εικόνα 4.6 (Χαρτάκια μέτρησης του Ph και Χημικά σκευάσματα για τη δημιουργία του διαλύματος διάβρωσης (NaCl & NaOH))	35
Εικόνα 4.7 (Βάση τοποθέτησης κυψέλης).....	35
Εικόνα 4.8 (Τοποθετημένη κυψέλη επάνω στη βάση)	36
Εικόνα 4.9 (Τοποθέτηση δοκιμίου και αισθητήρα υγρασίας)	36
Εικόνα 4.10 (Δοχείο διαλύματος με συνδεδεμένη την αντλία νερού)	36
Εικόνα 4.11 (Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το δοκίμιο βυθισμένο στο διαβρωτικό διάλυμα με την παρουσία σκουριάς έπειτα από αρκετές ώρες σε συνθήκες κόπωσης)	37
Εικόνα 4.12 (Δοκίμιο 1 μετά τη θραύση που υπέστη σε 37508 κύκλους φόρτισης κάτω από συνθήκες κόπωσης με διάβρωση).....	38
Εικόνα 4.13 (Δοκίμιο αναφοράς έπειτα από 167 ώρες σε συνθήκες κόπωσης με διάβρωση).....	39
Εικόνα 4.14 (Διάγραμμα σύγκρισης δοκιμίων χάλυβα St37 με και χωρίς συγκόλληση συναρτήσεως της διάρκειας ζωής τους σε κύκλους φόρτισης)	40



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 (Κατάλογος συμβόλων)	ix
Πίνακας 4.1 (Μέγιστα όρια σύστασης % σε χάλυβα St37 [10])	31
Πίνακας 4.2 (Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα St37 [8])	31
Πίνακας 4.3 (Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας 1)	38
Πίνακας 4.4 (Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας 2)	39
Πίνακας 5.1 (Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων)	41



Κατάλογος Συμβόλων

Πίνακας 1.1 (Κατάλογος συμβόλων)

Σύμβολο	Μονάδες	Ερμηνεία
f	Hz	Συχνότητα
$\Delta\kappa$	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Συντελεστής έντασης τάσεων
σ_y	MPa	Όριο διαρροής
σ_{uts}	MPa	Μέγιστη τάση εφελκυσμού
σ_m	MPa	Μέση τάση
σ_α	MPa	Πλάτος ταλάντωσης
σ_{max}	MPa	Μέγιστη τάση
σ_{min}	MPa	Ελάχιστη τάση
P_{max}	kN	Μέγιστο φορτίο
P_{min}	kN	Ελάχιστο φορτίο
$\Delta\sigma$	MPa	Εύρος τάσης
da/dN	mm/κύκλο φόρτισης	Διάδοση του ρήγματος
N_f	Κύκλοι φόρτισης	Διάρκεια ζωής
R	-	Λόγος τάσεων



Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

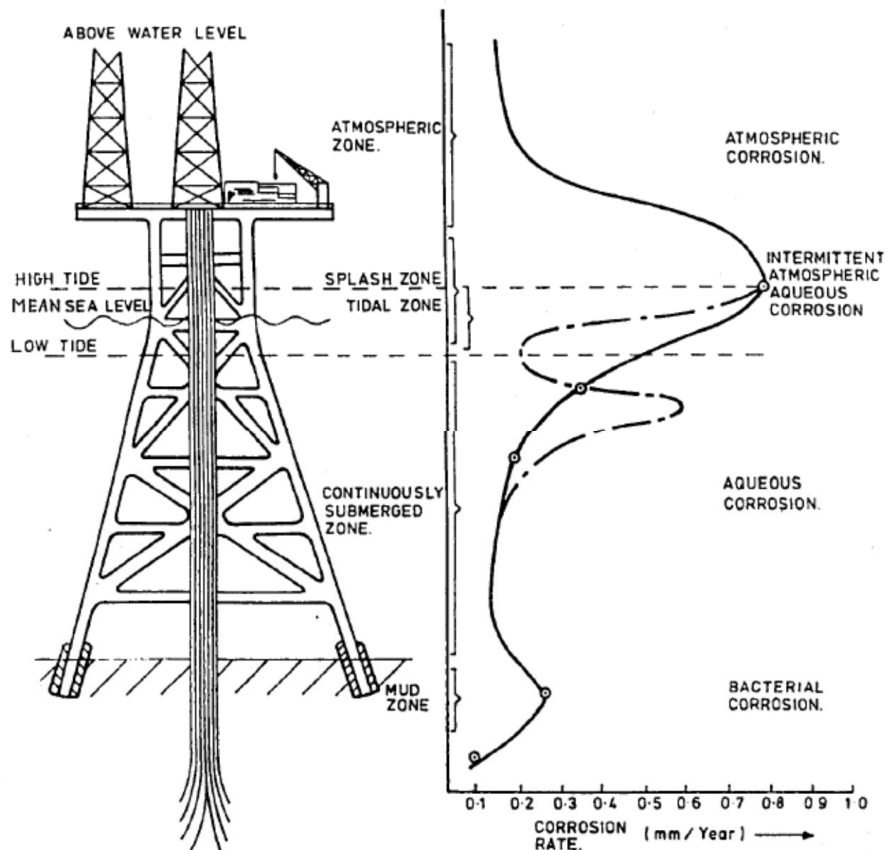
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στο πεδίο εφαρμογής φαινομένων κόπωσης με διάβρωση. Πρόκειται για ένα μεγάλο εύρος μηχανικών κατασκευών στο οποίο έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την εξασφάλιση της δομικής τους ακεραιότητας. Στη συνέχεια αναφέρεται ο σκοπός της και η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας

1.1 Πεδίο Εφαρμογής

Οι θαλάσσιες κατασκευές αποτελούν μεγάλο κομμάτι της βιομηχανικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια. Αυτές οι κατασκευές έχουν αρκετά οφέλη, καθώς εντός της θαλάσσιας περιοχής υπάρχει μεγάλη διαθέσιμη έκταση για την εγκατάστασή τους, αλλά και μεγάλα φορτία ανέμων τα οποία στην περίπτωση των ανεμογεννητριών είναι σημαντικά. Τέτοιες κατασκευές εκτός των ανεμογεννητριών, είναι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου και οι πλατφόρμες εξόρυξης.

Σε αυτές τις κατασκευές, απαιτείται πολλές φορές η συγκόλληση των τμημάτων τους λόγω των μεγάλων επιθυμητών διαστάσεων που έχουν οι τελικές κατασκευές. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε τέτοιου είδους κατασκευές, είναι ο συνδυασμός κόπωσης με διάβρωση. Τα επαναλαμβανόμενα φορτία που δέχονται από τα κύματα και τον άνεμο, σε συνδυασμό με το διαβρωτικό περιβάλλον της θάλασσας, οδηγούν σε μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης των ρωγμών.[1] Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την διερεύνηση τέτοιων φαινομένων σε χάλυβες, όπως ο E690 που διαπιστώθηκε μεγάλη διαφορά στη διάρκεια ζωής του, εξαιτίας των φαινομένων κόπωσης με διάβρωση. Μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε πάνω στο πεδίο των αστοχιών που υφίστανται οι κατασκευές έδειξε ότι, ανάμεσα σε 242 υποθέσεις, το φαινόμενο της κόπωσης είναι υπεύθυνο για 186 αστοχίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι 107 αφορούν φαινόμενα συμβατικής κόπωσης, ενώ 12 περιπτώσεις αφορούν τον συνδυασμό κόπωσης με διάβρωση [2]. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι το ποσοστό αστοχιών κόπωσης με διάβρωση είναι σημαντικό.

Για να πραγματοποιηθεί μία σωστή πρόβλεψη για τη διάρκεια ζωής τέτοιων κατασκευών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράμετροι. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι τα σημεία της κατασκευής, όπου δημιουργούνται φαινόμενα διάβρωσης. [2] Αυτά τα σημεία μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις ζώνες, οι οποίες έχουν διαφορετικό ρυθμό διάβρωσης.



Εικόνα 1.1 (Παρουσίαση τεσσάρων διαφορετικών ζώνων διάβρωσης [2])

- Ατμοσφαιρική ζώνη: Η διάβρωση μεταφέρεται μέσω του αέρα
- Ζώνη διεπιφάνειας: Επικρατούν εναλλασσόμενα φαινόμενα υγρού και ξηρού περιβάλλοντος με δυναμικές φορτίσεις λόγω κυμάτων.
- Ζώνη ολικής βύθισης: Το νερό έχει μειωμένη ποσότητα οξυγόνου και η κατασκευή υπόκειται σε υποθαλάσσια ρεύματα φόρτισης καθώς επίσης και σε δυνάμεις τριβής από άμμο και λάσπη.
- Ζώνη λάσπης: Το θαλασσινό νερό είναι αναμεμιγμένο με άμμο και λάσπη και επικρατεί υψηλό επίπεδο βακτηριδίων.



Από την εικόνα 1.1 είναι εμφανή ότι, από την επιφάνεια του διαβρωτικού μέσου και κάτω, τα φαινόμενα διάβρωσης είναι πολύ πιο έντονα και αυτό οφείλεται κυρίως στην παρουσία οξυγόνου, αλλά και την εναλλακτική φάση υγρής και ξηρής κατάστασης της κατασκευής.

Ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι τα φορτία και η συχνότητα καταπόνησης, που δέχονται οι κατασκευές. Σύμφωνα με μελέτες, [3] για να γίνει προσομοίωση της συχνότητας του ανέμου, επιλέγονται μικρές συχνότητες 0,1 - 0,3 Hz. Με τόσο χαμηλές συχνότητες τα πειράματα κόπωσης θα διαρκούσαν μεγάλο χρονικό διάστημα και αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο επιλέγονται μεγαλύτερες συχνότητες. Ο μηχανισμός της διάβρωσης όμως, εξαρτάται άμεσα από το χρόνο και έτσι στα πειράματα κόπωσης με διάβρωση, αυτή η αύξηση της συχνότητας, οδηγεί στη μη εμφάνιση των αποτελεσμάτων της διάβρωσης, στο βαθμό που αυτά προκύπτουν στην πραγματικότητα. Εν κατακλείδι, η διεξαγωγή πειραμάτων, κόπωσης με διάβρωση ταυτόχρονα, απαιτούν αρκετό χρόνο, έτσι ώστε να διεξαχθούν σωστά αποτελέσματα.

Για τη δημιουργία συνθηκών, όπου θα πραγματοποιηθούν πειράματα κόπωσης με διάβρωση, είναι σημαντικό να κατανοηθούν πολλοί παράγοντες. Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών είναι [2]:

- Θερμοκρασία
- Ph διαλύματος
- Ηλεκτροχημικό δυναμικό
- Ιξώδες διαλύματος

Η θερμοκρασία και το Ph είναι δύο από τα σημαντικότερα δεδομένα για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη και η σχεδίαση ενός συστήματος που μπορεί να προσομοιώσει φαινόμενα κόπωσης με διάβρωση, έχοντας συμπεριλάβει όσο το δυνατόν περισσότερους παράγοντες που θα μπορούσαν να μεταβάλλουν τα τελικά αποτελέσματα. Επίσης, η διεξαγωγή δοκιμών αποτελεί το τελευταίο κομμάτι της παρούσας εργασίας, όπου διαπιστώνεται η σωστή λειτουργία της ιδιοκατασκευής και η επίδραση φαινομένων κόπωσης με διάβρωση σε χάλυβα St37.



1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται οι στόχοι των πέντε κεφαλαίων της παρούσας εργασίας, τα οποία θα ακολουθήσουν στη συνέχεια.

Στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο πεδίο εφαρμογής φαινομένων κόπωσης με διάβρωση και κάποια δεδομένα που σχετίζονται άμεσα με τέτοιου είδους αστοχίες από προηγούμενες μελέτες.

Στο 2^ο κεφάλαιο, αναφέρεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση του μηχανισμού της διάβρωσης και κάποιων βασικών τύπων διάβρωσης σε χάλυβες. Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια να αναλυθεί ο συνδυασμός του φαινομένου κόπωσης με διάβρωση.

Στο 3^ο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία αναλυτική επεξήγηση, σχετικά με την μελέτη και τη σχεδίαση της ιδιοκατασκευής, που απαιτήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων. Η ιδιοκατασκευή αυτή χωρίζεται σε επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία, με τα κυριότερα να είναι η κυψέλη διάβρωσης δοκιμίων, η βάση στήριξης της κυψέλης και ο αισθητήρας υγρασίας. Σχετικά με την κυψέλη, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή με όλα τα στάδια κατασκευής της, καθώς επίσης και τους περιορισμούς που υπήρχαν κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της.

Στο 4^ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, στην δημιουργία του διαβρωτικού διαλύματος που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές διαδικασίες καθώς επίσης και στην εγκατάσταση της ιδιοκατασκευής. Τέλος αποτυπώνονται οι συνθήκες καταπόνησης κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Στο 5^ο κεφάλαιο, αναφέρονται τα αποτελέσματα που υπήρξαν με το πέρας των δύο δοκιμών και γίνεται ο σχολιασμός τους.

Κεφάλαιο 2. Μηχανισμός Διάβρωσης Χάλυβα

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται ο μηχανισμός και οι βασικοί τύποι διάβρωσης σε ένα χάλυβα. Η παρούσα εργασία, επικεντρώνεται κυρίως στο συνδυασμό της κόπωσης με διάβρωση. Οι αστοχίες λόγω διάβρωσης αποτελούν ένα συχνό φαινόμενο στα κατασκευαστικά στοιχεία όπως είναι ο χάλυβας. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

2.1 Μηχανισμός Διάβρωσης

Οι αστοχίες διάβρωσης, αποτελούν ένα κοινό φαινόμενο στον μηχανολογικό τομέα. Πρόκειται για έναν πολύπλοκο ηλεκτροχημικό μηχανισμό, ο οποίος οδηγεί στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, στην απώλεια υλικού και κατά συνέπεια στην αστοχία του μηχανολογικού στοιχείου. Τα προϊόντα διάβρωσης συνήθως προσκολλώνται, ομοιόμορφα ή τοπικά πάνω στο μεταλλικό υλικό, ενώ κάποιες φορές παρασύρονται με το διαβρωτικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα με το νερό. Τα πιο σύνηθες προϊόντα διάβρωσης είναι τα οξείδια, τα άλατα ή τα υδροξείδια και εξαρτώνται από τη χημική σύσταση του υλικού και του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται.

	Αντίδραση ηλεκτροδίου	Πρότυπο δυναμικό ηλεκτροδίου, E° (E)
	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,229
	$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	~ +1,2
	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,800
	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,771
	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0,401
	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+ 0,340
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000
	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,744
	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,662
	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,363
	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,714
	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,924

↑
Αύξηση αδράνειας
(καθοδικό)

↓
Αύξηση δραστηριότητας
(ανοδικό)

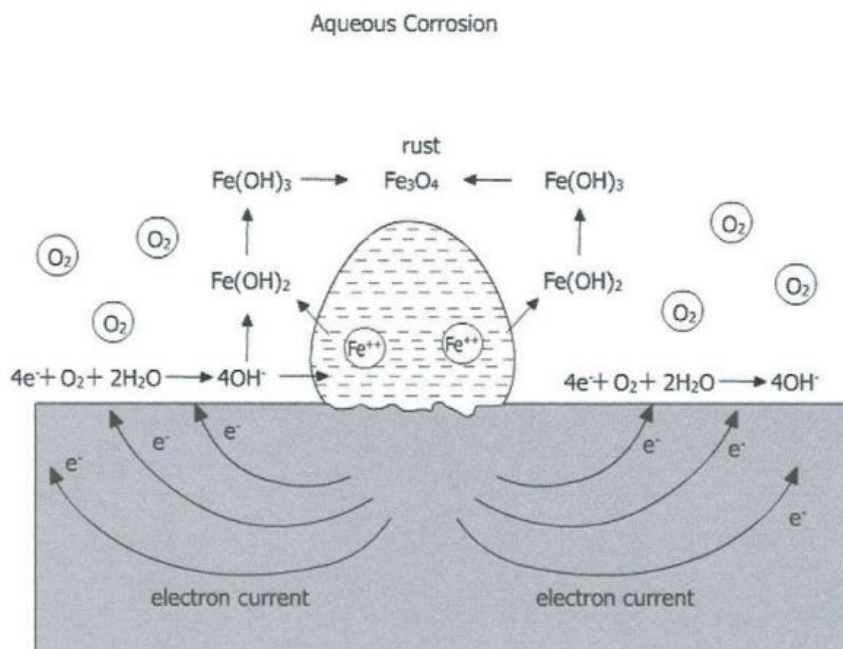
Εικόνα 2.1 (Διαφορές δυναμικού για διάβρωσης σε νερό [4])

Τα μέταλλα είναι επιρρεπή σε φαινόμενα διάβρωσης εξαιτίας της θερμοδυναμικής τους αστάθειας. Βασική προϋπόθεση για την εμφάνιση διάβρωσης, είναι η παρουσία των δύο ηλεκτροδίων δηλαδή μιας ανόδου και μιας καθόδου και του ηλεκτρολύτη. Όταν πρόκειται για ένα μέταλλο, η άνοδος και η κάθοδος εξαρτώνται από τα κραματικά στοιχεία, που περιέχει με βάση τον πίνακα διαφοράς δυναμικού που φαίνεται στην εικόνα 2.1.

Οι αντιδράσεις χωρίζονται σε ανοδικές και καθοδικές. [4] Οι ανοδικές αντιδράσεις, σχετίζονται με την απόσπαση των ηλεκτρονίων ($Me \rightarrow Me^{n+} + ne^-$), οι οποίες οδηγούν σε οξείδωση, ενώ οι καθοδικές αντιδράσεις οδηγούν σε αναγωγή ($Me^{n+} + ne^- \rightarrow Me$).

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του σιδήρου σε υγρό διαβρωτικό περιβάλλον (Εικόνα 2.2) η ανοδική αντίδραση που παίρνουμε είναι: $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$

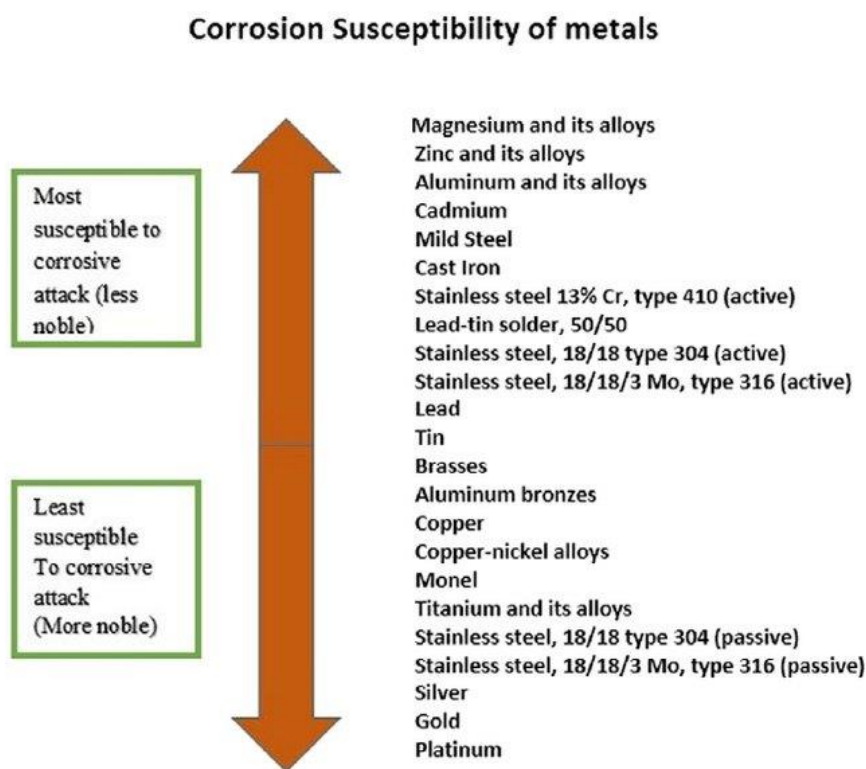
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει γίνει απόσπαση 2 ηλεκτρονίων από το σίδηρο και στην καθοδική αντίδραση ορίζεται: $O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$. Συνεπώς, γίνεται αναγωγή με τα 2 ηλεκτρόνια από την προηγούμενη αντίδραση και τελικά τα ιόντα OH^- αντιδρούν με τα ιόντα Fe^{++} και παράγεται το υδροξείδιο του σιδήρου $Fe(OH)_2$. Το υδροξείδιο του σιδήρου, μετατρέπεται σε ένυδρο οξείδιο του σιδήρου $FeO \cdot H_2O$ με τη μορφή ιζήματος (σκουριά) μέσα στο νερό.



Εικόνα 2.2 (Μηχανισμός διάβρωσης σιδήρου σε υγρό περιβάλλον [5])

2.1.1 Γαλβανική Διάβρωση

Η γαλβανική διάβρωση παρατηρείται όταν υπάρχει επαφή δύο ανόμοιων μετάλλων με παρουσία ενός ηλεκτρολύτη. Σε αυτή την περίπτωση, η μηχανική αστοχία διάβρωσης προκαλείται λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο μετάλλων. Γενικότερα, σε αυτή την περίπτωση, το ένα υλικό αντιπροσωπεύει την άνοδο ενώ το δεύτερο την κάθοδο. Σύμφωνα με την εικόνα 2.3 όσο μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού έχουν τα δύο μέταλλα, τόσο διαβρώνεται η άνοδος, ενώ ταυτόχρονα η κάθοδος προστατεύεται.



Εικόνα 2.3 (Γαλβανική σειρά μετάλλων [6])

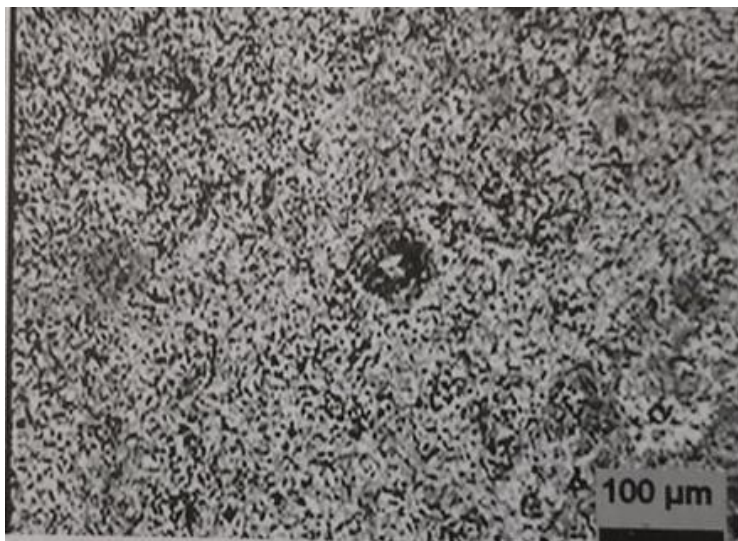
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα γαλβανικής διάβρωσης φαίνεται στην εικόνα 2.4. Η κατασκευή αυτή λειτουργεί σε περιβάλλον με μεγάλη υγρασία, καθώς επίσης υπάρχει άμεση επαφή δύο ανόμοιων μετάλλων. Το περικόχλιο είναι κατασκευασμένο από Cu-Zn και ο κωνικός δακτύλιος από χάλυβα 316. Λόγω της μεγάλης διαφοράς δυναμικού που έχουν τα δύο μέταλλα εμφανίστηκε αστοχία γαλβανικής διάβρωσης. Κατά συνέπεια, δημιουργήθηκε αποψευδαργύρωση στο υλικό με αποτέλεσμα να προέλθει η θραύση του περικοχλίου.



Εικόνα 2.4 (Κατασκευή που έχει υποστεί γαλβανική διάβρωση)

2.1.2 Ομοιόμορφη Διάβρωση

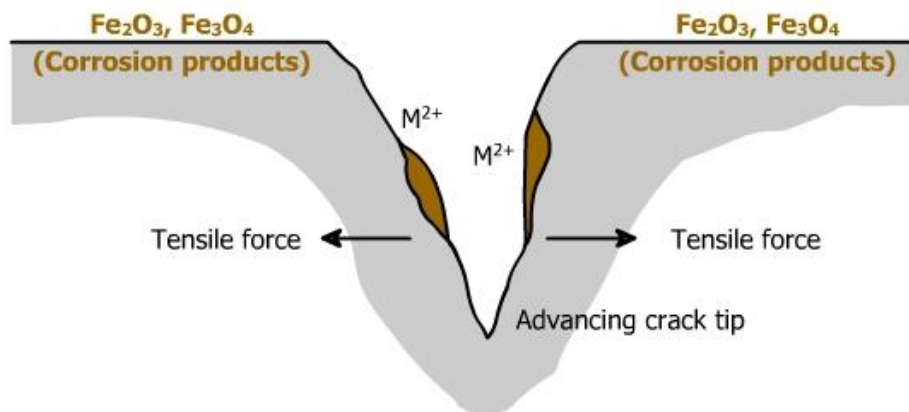
Η ομοιόμορφη διάβρωση αποτελεί ένα από τα πιο κοινά προβλήματα διάβρωσης. Πρόκειται για την πιο απλή μορφή διάβρωσης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα ένα κράμα χαλκού βυθισμένο σε θαλασσινό νερό. Σε αυτή την περίπτωση, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 2.5 παρατηρείται η δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος προϊόντος διάβρωσης, στην επιφάνεια του μετάλλου. Η βασική μέθοδος για τον υπολογισμό του ποσοστού διάβρωσης είναι η απώλεια βάρους. Η διαδικασία που ακολουθείται, είναι ο καθαρισμός του δοκιμίου από τα διαβρωτικά προϊόντα και η ζύγιση του. Αργότερα το δοκίμιο εκτίθεται σε παρόμοιες συνθήκες και επαναλαμβάνεται η διαδικασία καθαρισμού και ζυγίσματος, έτσι ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό απώλειας, με την υπόθεση ότι επικρατούν ομοιόμορφες συνθήκες. Χάρης της εύκολης διαδικασίας μέτρησης σε προβλήματα ομοιόμορφης διάβρωσης, οι μηχανικές αστοχίες είναι σπάνιο φαινόμενο, καθώς μπορεί να εντοπιστεί έγκαιρα.



Εικόνα 2.5 (Ομοιόμορφη διάβρωση [7])

2.1.3 Εργοδιάβρωση

Εργοδιάβρωση, ονομάζεται το φαινόμενο δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο, το οποίο καταπονείται με εφελκυστικές τάσεις σε διαβρωτικό περιβάλλον. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι τελικά σε μακροσκοπική κλίμακα, η ψαθυρή θραύση του υλικού. Σε μικροσκοπική κλίμακα, η διάδοση των ρωγμών μπορεί να είναι διακρυσταλλική ή/και περικλυσταλλική. Φαινόμενα εργοδιάβρωσης δεν εντοπίζονται μόνο όταν υπάρχουν εξωτερικές εφελκυστικές τάσεις, αλλά και από παραμένουσες τάσεις λόγω κατεργασιών, όπως συγκολλήσεις. Συνεπώς, πρόκειται για ένα συνδυαστικό φαινόμενο όπου εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού, όσο και από το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Όπως στην περίπτωση της κόπωσης, έτσι και στην εργοδιάβρωση η εξέλιξη της ρωγμής εξαρτάται από τον συντελεστή έντασης τάσεων Δk . Στην εικόνα 2.6 παρατηρείται η εφελκυστική φόρτιση κάθετα στη ρωγμή και οι επικαθήσεις από το διαβρωτικό μέσο στο οποίο λειτουργεί η κατασκευή.



Schematic of stress corrosion cracking.

Εικόνα 2.6 (Απεικόνιση ρωγμής λόγω εργοδιάβρωσης)

2.1.4 Τρημματική Διάβρωση

Η τρημματική διάβρωση είναι ένας τύπος διάβρωσης στον οποίο είναι πιο ευαίσθητα το αλουμίνιο και ο χάλυβας εξαιτίας του παθητικού φιλμ που σχηματίζουν. Η εμφάνιση της γίνεται τοπικά με το σχηματισμό κοιλοτήτων ή μικρών οπών (εικόνα 2.7). Αυτές οι οπές αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και λειτουργούν ως σημεία εκκίνησης των ρωγμών. Στην υπόλοιπη επιφάνεια του μετάλλου δεν εμφανίζονται σημάδια με σκοπό να μην γίνεται εύκολα αντιληπτό και να υπάρχουν αρκετές αστοχίες λόγω τρημματικής διάβρωσης. Το πιο ευνοϊκό περιβάλλον για τη δημιουργία αυτού του τύπου διάβρωσης είναι το θαλάσσιο περιβάλλον λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης της σε ιόντα καθώς επίσης ενισχύονται τα φαινόμενα τρημματικής διάβρωσης όταν υπάρχουν στάσιμα νερά. Η μικροδομή του υλικού έχει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση τρημματικής διάβρωσης αφού οι χάλυβες με μικρό μέγεθος κόκκων είναι πιο επιρρεπής σε αυτό το φαινόμενο.

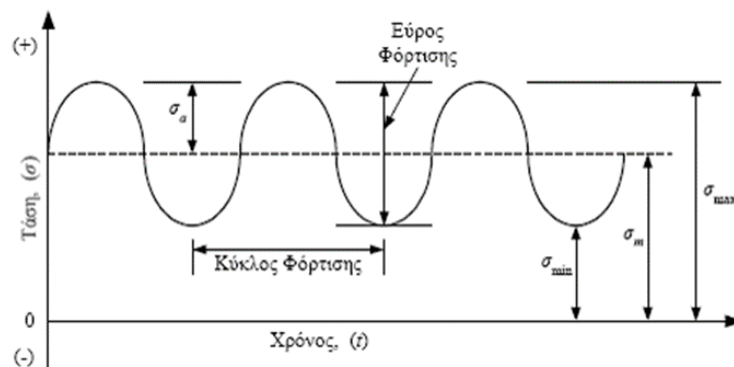


Εικόνα 2.7 (Απεικόνιση τρημματικής διάβρωσης σε υποθαλάσσιο αγωγό)

2.2 Συνδυασμός Κόπωσης με Διάβρωση Χάλυβα

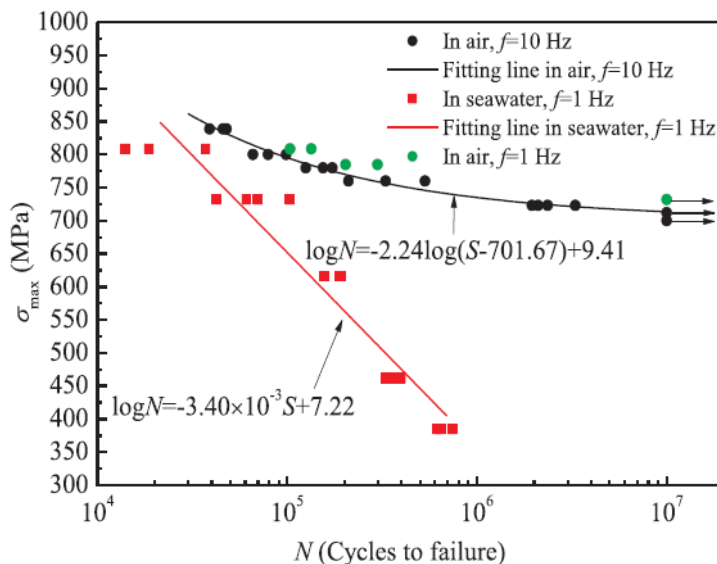
Κόπωση, ονομάζεται το φαινόμενο όπου ένα κατασκευαστικό στοιχείο δέχεται επαναλαμβανόμενα μηχανικά φορτία (εικόνα 2.8) μέσα σε συγκεκριμένο εύρος τάσης $\Delta\sigma$, μέχρι την τελική του θραύση. Αναλυτικότερα, λόγω των επαναλαμβανόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών φορτίων που δέχεται το δοκίμιο, εμφανίζονται εσοχές και προεξοχές ολίσθησης. Έτσι, έχουμε ανάπτυξη των ρωγμών στις εσοχές, οι οποίες αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Επιπρόσθετα, παρατηρείται αποκόλληση σωματιδίων δεύτερης φάσης όπως είναι τα καρβίδια, τα οξειδία και τα εγκλείσματα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται καινούργιες οπές στη μικροδομή του υλικού. Αυτές οι οπές τείνουν να ενωθούν μεταξύ τους και έτσι αυξάνεται το μήκος του ρήγματος

Η ρωγμή αρχίζει από την επιφάνεια του υλικού, στη συνέχεια διαδίδεται ($\frac{da}{dN}$) στο εσωτερικό του μέσω των κόκκων και τέλος η ρωγμή διαδίδεται κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης [7]. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας αποτυπώνονται σε καμπύλες S–N, οι οποίες δείχνουν τους κύκλους φόρτισης που έχει υποστεί το δοκίμιο στη μέγιστη τάση. Σε αυτή την περίπτωση, είναι πιθανό να επέλθει θραύση του υλικού σε τάσεις μικρότερες του μέγιστου φορτίου σ_{uts} , ή ακόμη και μικρότερες του ορίου διαρροής σ_y , εξαιτίας της δυναμικής καταπόνησης του δοκιμίου.



Εικόνα 2.8 (Ημιτονοειδής εναλλακτική φόρτιση [8])

Ο μηχανισμός κόπωσης με διάβρωση είναι ένα φαινόμενο αστοχίας, στις μηχανολογικές κατασκευές με μεγάλο εύρος εμφάνισης. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της αστοχίας είναι ότι η διάδοση των ρωγμών πραγματοποιείται ταχύτερα, λόγω του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός και συνεπώς η ανάπτυξη των ρωγμών σχετίζεται με πολλούς παράγοντες γι' αυτό και αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Κάποιοι από του σημαντικότερους παράγοντες είναι η μικροδομή του υλικού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται όπως το Ρh, η σύστασή του και η περιεκτικότητα του σε οξυγόνο. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο, έχουν οι συνθήκες καταπόνησης του υλικού όπως για παράδειγμα, η συχνότητα ταλάντωσης αλλά και τα φορτία καταπόνησης.



Εικόνα 2.9 (Καμπύλη S-N για χάλυβα E690 από πειράματα κόπωσης σε ξηρό και διαβρωτικό περιβάλλον [1])

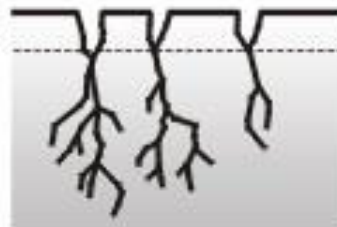
Η παρουσία διαβρωτικού μέσου, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία οπών (pitting) ή/και μικρών ρωγμών. Έτσι, ο χρόνος εμφάνισης ρηγματώσεων μειώνεται σε σημαντικό βαθμό, ενώ παράλληλα ο μηχανισμός κόπωσης συνεχίζει να ακολουθεί την ίδια συμβατική διαδικασία. Η μείωση της διάρκειας ζωής ενός χάλυβα που υφίσταται κόπωση με διάβρωση σε σύγκριση με έναν που δεν εκτίθεται σε διαβρωτικό μέσο, φαίνεται στην εικόνα 2.9. Πρόκειται για μεγάλη απόκλιση στην διάρκεια ζωής τους ειδικά για μικρές τάσεις. Μία διαφορά μεταξύ της εργοδιάβρωσης και της κόπωσης με διάβρωση φαίνεται στην εικόνα 2.10 και είναι η κατεύθυνση και η εξάπλωση των ρωγμών.

Στην περίπτωση της εργοδιάβρωσης, οι ρωγμές αναπτύσσουν παρακλάδια με κατεύθυνση γύρω ή μέσα από τους κόκκους του υλικού, ενώ αντίθετα στον συνδυασμό κόπωσης με διάβρωση, οι ρωγμές διαδίδονται κάθετα στο φορτίο καταπόνησης, με χαρακτηριστική διαφορά το μεγάλο μήκος τους.

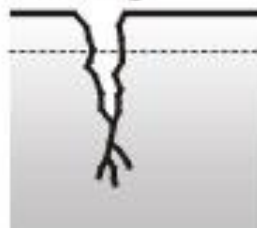
A. SCC or Fatigue Cracks nucleate at pits



B. SCC Cracks are highly branched



C. Corrosion fatigue cracks have little branching



Εικόνα 2.10 (Διάδοση ρωγμών εργοδιάβρωσης και κόπωσης με διάβρωση [7])

Η πιο σημαντική διαφορά ανάμεσα στους δύο, είναι ο μηχανισμός ρηγμάτωσης και εξέλιξης της ρωγμής του. Αυτή η διαφορά προκύπτει από τον διαφορετικό τύπο φόρτισης. Στο μηχανισμό της εργοδιάβρωσης το κατασκευαστικό στοιχείο καταπονείται συνεχώς με στατική εφελκυστική φόρτιση. Αντίθετα, στο μηχανισμό κόπωσης με διάβρωση επικρατούν φαινόμενα δυναμικής φόρτισης. Στη δυναμική φόρτιση, κάποιες φορές υπάρχει εναλλασσόμενο εφελκυστικό και θλιπτικό φορτίο και κάποιες άλλες εναλλασσόμενο εφελκυστικό φορτίο. Λόγω της δυναμικής καταπόνησης του υλικού, το μήκος των ρηγμάτων αυξάνεται περισσότερο σε σύγκριση με τη στατική καταπόνησή του.

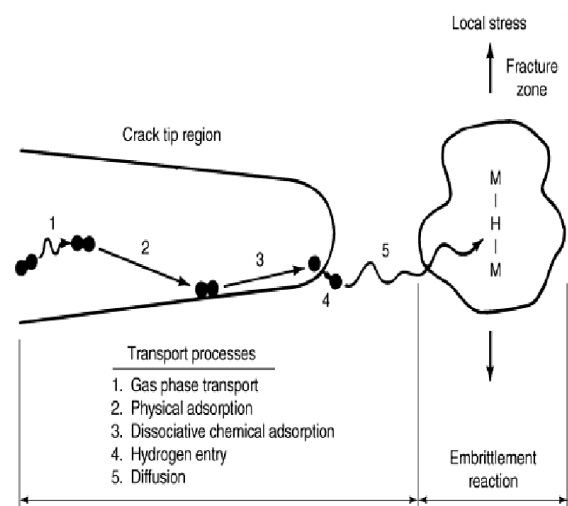
2.2.1 Βασικοί Μηχανισμοί Κόπωσης με Διάβρωση

Οι δύο βασικότεροι μηχανισμοί που εμφανίζονται σε φαινόμενα κόπωσης με διάβρωση είναι, η ψαυθυροποίηση του υδρογόνου και η ανοδική διάλυση. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί είναι αντίθετοι μεταξύ τους κι ενώ μπορεί να συνυπάρχουν σε ένα πρόβλημα κόπωσης με διάβρωση, μόνο ένας από τους δύο μηχανισμούς κυριαρχεί και ο δεύτερος μπορεί να αμεληθεί.

Ανάπτυξη Ρωγμών με Υποβοήθηση Υδρογόνου

[9] Σε προβλήματα κόπωσης με διάβρωση, το υδρογόνο σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο και το ρυθμό ανάπτυξης των ρωγμών. Το υδρογόνο απορροφάτε από την επιφάνεια του μετάλλου και στη συνέχεια μεταφέρεται με το μηχανισμό της διάχυσης μέσα στην πλαστική ζώνη που έχει δημιουργηθεί από τα εφελκυστικά φορτία (εικόνα 2.11). Σε αυτό το σημείο, προκαλεί ζημιά στο υλικό και έτσι αυξάνεται το μήκος ρωγμής. Το διαβρωτικό περιβάλλον βοηθάει σε αυτή τη διαδικασία, παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα το υδρογόνο να εισβάλει στο υλικό, χωρίς την υποβοήθηση διαβρωτικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της μηχανικής κατεργασίας του υλικού. Οι μηχανισμοί που έχουν ερευνηθεί σχετικά με την υποβοήθηση του υδρογόνου στην ανάπτυξη των ρωγμών σε προβλήματα κόπωσης με διάβρωση είναι:

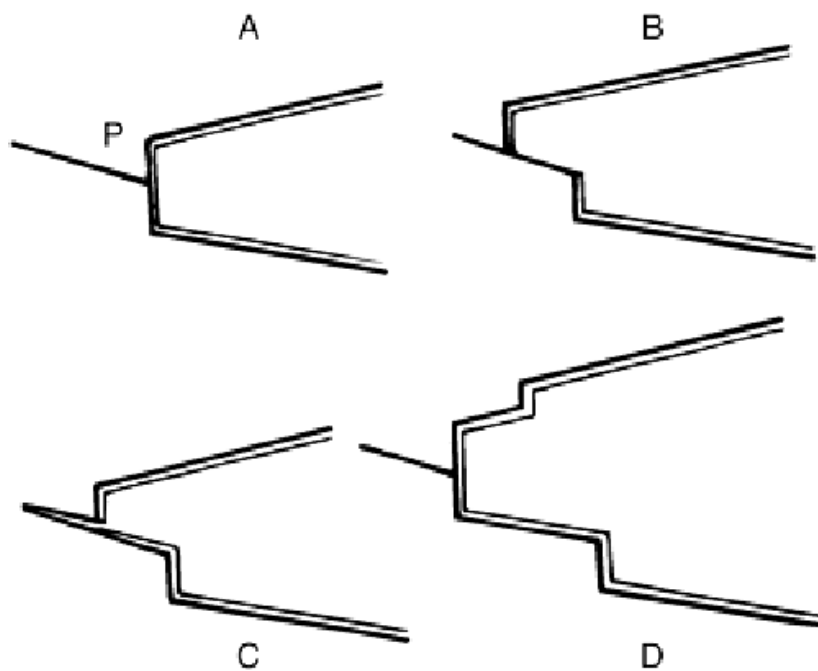
- Μηχανισμός Πίεσης
- Μηχανισμός Αποσύνθεσης Πλέγματος
- Μηχανισμός επιφανειακής Προσρόφησης
- Υδρογονούχος Μηχανισμός
- Μηχανισμός Υδρογόνου Ενισχυμένης Πλαστικότητας



Εικόνα 2.11 (Απορρόφηση υδρογόνου και ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης σε διαβρωτικό περιβάλλον [9])

Ανοδική Διάλυση

Ο μηχανισμός της ανοδικής διάλυσης, σχετίζεται με την αύξηση διάδοσης των ρωγμών και παρατηρούνται φαινόμενα ανοδικής διάλυσης κατά μήκος των συνόρων των κόκκων αλλά και στην αιχμή του ρήγματος, που βρίσκεται εντός της πλαστικής ζώνης. Αποτέλεσμα της ανοδικής διάλυσης τόσο στα σύνορα των κόκκων, όσο και στην αιχμή του ρήγματος είναι η άμβλυση της ρωγμής. [9] Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12, η διαδικασία της ανοδικής διάλυσης χωρίζεται σε 4 στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το υλικό προστατεύεται από τα προϊόντα διάβρωσης, λόγω του επιφανειακού φιλμ που υπάρχει γύρω από τις ρωγμές. Σε δεύτερη φάση, πραγματοποιείται διάσπαση αυτού του επιφανειακού φιλμ και με αυτόν τον τρόπο το υλικό βρίσκεται πλέον εκτεθειμένο στο διαβρωτικό περιβάλλον δημιουργώντας οπές. Στο τελευταίο στάδιο του φαινομένου ανοδικής διάλυσης, υπάρχει άμβλυση της ρωγμής και συνεπώς η αύξηση διάδοσης του ρήγματος



Εικόνα 2.12 (Στάδια μηχανισμού ανοδικής διάλυσης στην αιχμή του ρήγματος [9])

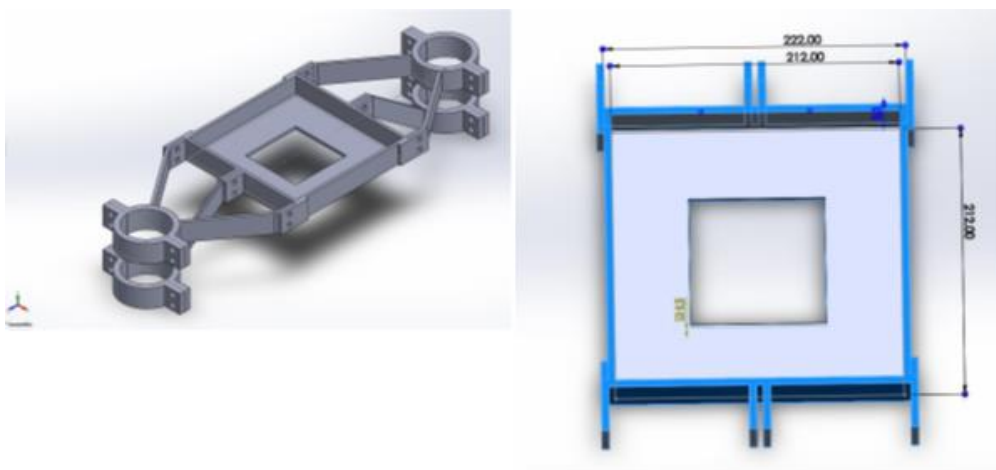
Κεφάλαιο 3. Μελέτη & Κατασκευή Κυψέλης Διάβρωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η μελέτη και ο σχεδιασμός που πραγματοποιήθηκε για την κατασκευή της κυψέλης διάβρωσης δοκιμίου, το οποίο συνεπάγεται την περιγραφή, τόσο των περιορισμών που υπήρχαν για την υλοποίηση της κυψέλης, όσο και την τελική συναρμολόγηση της. Πρόκειται για μία ιδιοκατασκευή, στην οποία τοποθετείται το δοκίμιο εντός διαβρωτικού διαλύματος και πραγματοποιούνται πειράματα κόπωσης με διάβρωση.

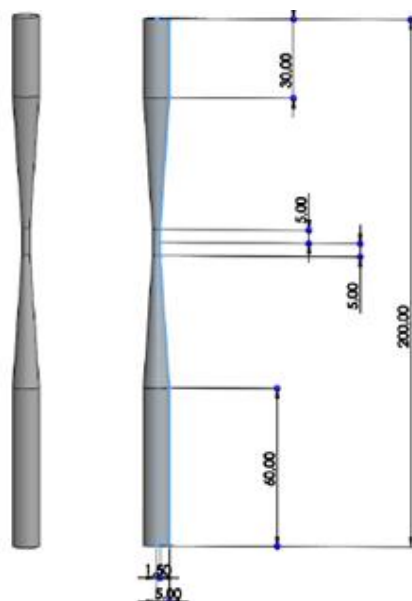
3.1 Μελέτη Κυψέλης & Περιορισμοί

Η αρχική ιδέα για την δημιουργία της κυψέλης, προήλθε από προηγούμενες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο της κόπωσης με διάβρωση. Μία τέτοιου είδους κατασκευή απαιτεί πολύ καλό σχεδιασμό, δεδομένου ότι θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μία μηχανή εφελκυσμού η οποία δεν είναι κατασκευασμένη για τέτοιου είδους πειράματα και συνεπώς η παραμικρή αστοχία θα προκαλέσει σοβαρές ζημιές στο μηχάνημα.

Το πρώτο μέλημα αυτής της ιδιοκατασκευής ήταν ένα είδος στήριξης (εικόνα 3.1), το οποίο τοποθετείται ανάμεσα από τα έμβολα της μηχανής εφελκυσμού για να σταθεροποιηθεί η κυψέλη. Αυτή η κατασκευή στήριξης, όπως και τα δοκίμια (εικόνα 3.2) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, προϋπήρχαν στο εργαστήριο από προηγούμενη μελέτη [8] πάνω στην κόπωση με διάβρωση.



Εικόνα 3.1 (Κατασκευή στήριξης κυψέλης και διαστασιολόγηση [8])

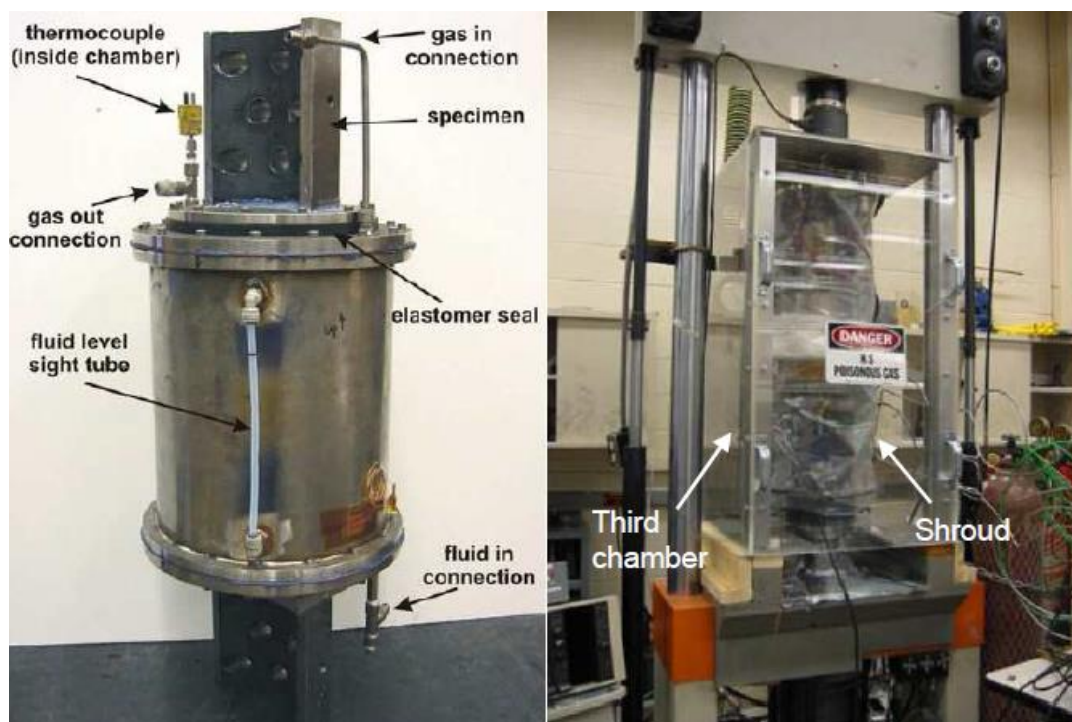


Εικόνα 3.2 (δοκίμιο χάλυβα St37 και διαστασιολόγηση [8])

Συνεπώς, λόγω της κατασκευής στήριξης αλλά και των δοκιμών, η κατασκευή της κυψέλης θα έπρεπε να έχει συγκεκριμένες διαστάσεις έτσι ώστε να είναι συμβατή με τον ήδη υπάρχον εξοπλισμό. Οι διαστάσεις αυτές όσον αφορά την κυψέλη, ανέρχονται στα 212 mm μήκος κυψέλης και 120 mm ύψος κυψέλης.

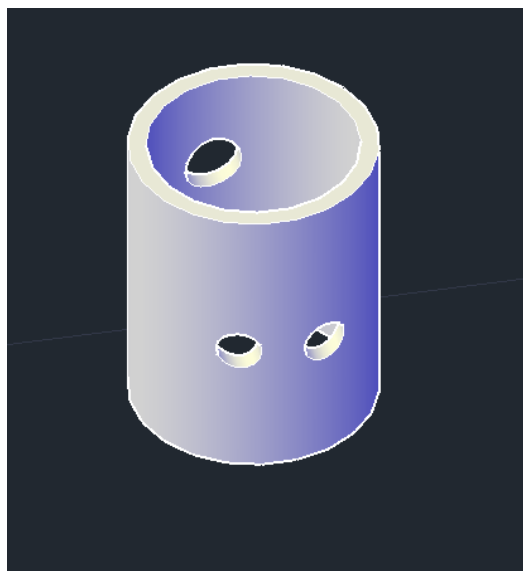
Ένας ακόμη βασικός περιορισμός που υπήρξε κατά τη σχεδίαση της κυψέλης ήταν, ότι η κατασκευή απαιτούσε απόλυτη στεγανοποίηση τόσο στο σημείο υποδοχής του δοκιμίου, αλλά και στις περιοχές εισαγωγής και εξαγωγής του υδάτινου διαλύματος. Τελικά, το κόστος της κατασκευής επιχειρήθηκε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο και παράλληλα να χρησιμοποιηθούν υλικά και εξαρτήματα τα οποία είναι εφικτό να προμηθευτούν από το εμπόριο, χωρίς την απαίτηση ειδικών κατασκευών, με στόχο την εύκολη και γρήγορη αντικατάσταση πιθανών ελαττωματικών ή φθαρμένων εξαρτημάτων.

Μία παρόμοια κατασκευή απεικονίζεται στην εικόνα 3.3 όπου φαίνεται μία κυλινδρική κυψέλη η οποία τοποθετείται στη μηχανή εφελκυσμού και εντός αυτής υπάρχει το δοκίμιο και το διαβρωτικό διάλυμα.



Εικόνα 3.3 (Κατασκευή στην οποία διενεργούνται πειράματα κόπωσης με διάβρωση [2])

Η μελέτη άρχισε με την ιδέα να κατασκευαστεί μία κυψέλη από κάποιο πλαστικό υλικό το οποίο διασφαλίζει τη στεγανότητα της και μπορεί να κατεργαστεί αρκετά εύκολα. Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών διαστάσεων, επιλέχθηκε σαν βασικό υλικό κατασκευής ο σωλήνα PVC. Ο συγκεκριμένος τύπος σωλήνα είναι ανθεκτικός σε διαβρωτικά υδάτινα διαλύματα όπως αυτό που χρησιμοποιείται στις δοκιμές. Έπειτα, έγινε μία πρώτη σχεδίαση της κυψέλης έτσι ώστε να επιλεχθούν τα σημεία τοποθέτησης των παροχών εισόδου και εξόδου του διαλύματος (εικόνα 3.4). Βασικός παράγοντας για την επιλογή των σημείων ήταν ότι το διάλυμα εισέρχεται στην κυψέλη με τη λειτουργία μιας αντλίας νερού αλλά η εξαγωγή τους θα έπρεπε να γίνεται χωρίς την παρουσία κάποιας συσκευής. Επίσης, το δοκίμιο πρέπει να μένει βυθισμένο στο διάλυμα σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Με βάση αυτά τα δεδομένα, η εισαγωγή σχεδιάστηκε σε ύψος 70 mm από τον πάτο του σωλήνα ενώ οι εξαγωγές σε ύψος 60 mm. Με αυτή τη διάταξη, θα υπήρχε πάντοτε υδάτινο διάλυμα εντός της κυψέλης βάθους 60 mm που θα κάλυπτε τη μειωμένη διατομή του δοκιμίου. Επίσης, ο λόγος που σχεδιάστηκαν δύο εξαγωγές είναι διότι η ταχύτητα εξαγωγής είναι μικρότερη από αυτή της εισαγωγής και σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να εμφανιζόταν φαινόμενα υπερχειλίσης.



Εικόνα 3.4 (Πρώτη απόπειρα σχεδίασης της κυψέλης με τα σημεία παροχής εισόδου και εξόδου)

Ένα ακόμη βασικό πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί πριν την έναρξη της κατασκευής, ήταν ο τρόπος στεγανοποίησης στο σημείο εισαγωγής του δοκιμίου. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι έπρεπε να βρεθεί ένα μέσο, το οποίο να έχει τις κατάλληλες διαστάσεις για να περάσει το δοκίμιο διαμέτρου 11 mm, παράλληλα όμως να μπορεί να σταθεροποιηθεί επάνω στην κυψέλη και να απορροφάει τις παραμορφώσεις από τα φορτία κόπωσης. Αρχικά, έγινε μελέτη πάνω στον τομέα του 3D printing, για την κατασκευή μιας τσιμούχας από ελαστομερές υλικό. Τα μειονεκτήματα που διαπιστώθηκαν ήταν το κόστος, η χρονοβόρα διαδικασία αντικατάστασης σε περίπτωση φθοράς και τέλος ότι λόγω των πολλαπλών στρωμάτων υλικού παραμένουν πολύ μικρές οπές εντός του υλικού από το οποίο είναι δυνατόν να εισχωρήσει το διάλυμα. Συνεπώς, αυτή η ιδέα απορρίφθηκε και συμπεριλήφθηκε η ιδέα αγοράς μιας τσιμούχας άξονα (εικόνα 3.5), η οποία είχε συμβατές διαστάσεις. Η τσιμούχα άξονα, είναι εξάρτημα που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία αυτοκινήτων για την στεγανοποίηση των αξόνων από το λάδι της μηχανής. Πρόκειται για ένα ελαστομερές υλικό, το οποίο είναι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες λαδιού και μεγάλες πιέσεις. Έτσι με την επιλογή αυτού του υλικού επιτευχθεί να λυθεί το πρόβλημα της στεγανοποίησης, αλλά και των παραμορφώσεων που θα έπρεπε να δεχτεί το υλικό αυτό. Βασικό κομμάτι του σχεδιασμού υπήρξε ο τρόπος τοποθέτησης της τσιμούχας άξονα. Επειδή δεν μπορούσε να διαμορφωθεί κάποια ειδική οπή στήριξης της τσιμούχας στην τάπα του σωλήνα αποφασίστηκε να δημιουργηθεί οπή μικρότερη κατά 1 mm σε σχέση με την εξωτερική διάμετρο της τσιμούχας. Ο σκοπός αυτού του σχεδιασμού ήταν να σφηνώσει η τσιμούχα εντός της οπής και λόγω της τριβής και της πίεσης που θα ασκούσε στα τοιχώματα να παραμείνει σταθεροποιημένη.



Εικόνα 3.5 (Τσιμούχα άξονα)

Εφόσον ολοκληρώθηκε η μελέτη πάνω στη σχεδίαση της κατασκευής, το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή της πρώτης δοκιμαστικής κυψέλης ακολουθώντας το σχεδιασμό που αναφέρθηκε παραπάνω.

3.2 Κατασκευή Κυψέλης & Στεγανοποίηση

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της κυψέλης είναι ο εξής:

- Ηλεκτρικό δράπανο
- Σβουράκια λείανσης
- Ποτυροτρίπανο 19 mm
- Πριόνι
- Τσιμούχα άξονα (εξωτερική διάμετρος 20 mm, εσωτερική διάμετρος 10 mm, ύψος 7 mm)
- Παροχές άρδευσης
- Τεφλόν
- Σιλικόνη γενικής χρήσης
- Κόλλα (Loctite 638)

Για τη δημιουργία της πρώτης δοκιμαστικής κυψέλης αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σαν κύριο σώμα, ένας σωλήνας αποχέτευσης PVC $\Phi 110$. Ο λόγος που ελήφθη αυτή η απόφαση ήταν διότι, η κυψέλη θα πρέπει να είναι ανθεκτική σε διαβρωτικό περιβάλλον αλλά ταυτόχρονα να είναι εύκολη στην κατεργασία και να μπορεί να απορροφήσει μικρές παραμορφώσεις, λόγω της καταπόνησης του δοκιμίου που θα ενσωματωθεί.

Σαν πρώτη απόπειρα έγινε προσπάθεια να κατασκευαστεί μικρογραφία της τελικής κατασκευής για να διαπιστωθεί εάν πληροί κάποιες από τις προϋποθέσεις που χρειάζονται

3.2.1 Βήματα Κατασκευής Πρώτης Δοκιμαστικής Κυψέλης

Παρακάτω, αναλύεται η διαδικασία κατασκευής που ακολούθησε για την κατασκευή της πρώτης δοκιμαστικής κυψέλης.

- Κοπή σωλήνα PVC Φ110 με ύψος 120 mm (εικόνα 3.8)
- Διάτρηση τεσσάρων οπών με χρήση ποτηροτρύπανου διαμέτρου 19 mm, 1 οπή για την εισαγωγή του διαλύματος (περιμετρικά του σωλήνα), 2 για την εξαγωγή (περιμετρικά του σωλήνα) και 1 για την διέλευση του δοκιμίου στο κέντρο της τάπας (εικόνα 3.7).
- Λείανση οπών, έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη εφαρμογή των ελαστομερών μέσων για τη στεγανοποίηση της κατασκευής (εικόνα 3.6).
- Πρεσαριστή τοποθέτηση τσιμούχας άξονα σε οπή διαμέτρου 19 mm και στεγανοποίηση με χρήση κόλλας loctite 638 (εικόνα 3.10)
- Τοποθέτηση μεταλλικών παροχών μαζί με χρήση ελαστομερές υλικών για την στεγανοποίηση της κατασκευής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.9 αντιστοιχούν δύο παροχές εξόδου και μία παροχή εισόδου.



Εικόνα 3.8 (Κοπή σωλήνα PVC)



Εικόνα 3.7 (Διάτρηση οπών)



Εικόνα 3.6 (Λείανση οπών)



Εικόνα 3.10 (Κάτω μέρος κυψέλης όπου φαίνεται η τοποθετημένη τσιμούχα και περιμετρικά η κόλλα)



Εικόνα 3.9 (Εσωτερικό κυψέλης με συναρμολογημένες τις παροχές εισόδου (μαύρο βέλος) και εξόδου (κόκκινο βέλος))

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκε η πρώτη κυψέλη έγιναν δοκιμές για να διαπιστωθεί η στεγανότητα της, καθώς επίσης και η ροή του διαλύματος. Εδώ να σημειωθεί ότι, το διάλυμα κατά τη διάρκεια του πειράματος, εισέρχεται στην κυψέλη με την βοήθεια μιας αντλίας νερού και επιστρέφει πίσω κάνοντας έτσι μία συνεχόμενη ανακύκλωση του με σκοπό να μη μένει στάσιμο εντός της κυψέλης.

Τα προβλήματα που διαπιστώθηκαν πάνω στην συγκεκριμένη κατασκευή ήταν:

- Πολύ μικρός όγκος κυψέλης με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ορατότητα του δοκιμίου.
- Πολύ μικρός όγκος διαλύματος (0,6 L).
- Εντοπισμός μικρών διαρροών στα σημεία παροχής λόγω της μεγάλης καμπυλότητας του σωλήνα.
- Σε βάθος χρόνο μπορεί να εμφανιζόταν φαινόμενα γαλβανικής διάβρωσης λόγω των μεταλλικών παροχών.

Προκειμένου να βελτιωθεί η κατασκευή και να ελαχιστοποιήσουμε τα προβλήματα που διαπιστώθηκαν έγινε δεύτερη προσπάθεια για τη δημιουργία μιας καινούριας κυψέλης.

3.2.2 Βήματα Κατασκευής Βελτιωμένης Κυψέλης

Σε αυτό το σημείο γίνεται ανάλυση της διαδικασίας κατασκευής με σκοπό τη δημιουργία της δεύτερης βελτιωμένης κυψέλης.

- Κοπή καινούριου σωλήνα ίδιου τύπου αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου ($\Phi 160$). Το ύψος διατηρήθηκε σταθερό (120 mm) δεδομένου ότι ήταν το μέγιστο επιτρεπτό μας όριο (εικόνα 3.11).
- Διάτρηση τεσσάρων οπών με χρήση ποτηροτρύπανου διαμέτρου 19 mm όπως στην πρώτη κατασκευή.
- Λείανση οπών έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη εφαρμογή των ελαστομερών μέσων για τη στεγανοποίηση της κατασκευής.
- Πρεσαριστή τοποθέτηση τσιμούχας άξονα σε οπή διαμέτρου 19 mm και στεγανοποίηση με χρήση κόλλας loctite 638.
- Τοποθέτηση πλαστικών παροχών μαζί με χρήση ελαστομερών υλικών για την στεγανοποίηση της κατασκευής (εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.11 (Σωλήνας PVC $\Phi 160$)



Εικόνα 3.12 (Πλαστικό εξάρτημα παροχής διαλύματος)

Με τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στην δεύτερη κατασκευή, υπήρχε πλέον καλύτερη ορατότητα του δοκιμίου καθώς επίσης και επαρκής ποσότητα διαλύματος μέσα στην κυψέλη. Επιπλέον, λόγω της μικρότερης καμπυλότητας του σωλήνα οι παροχές είχαν καλύτερη εφαρμογή και έτσι δεν διαπιστώθηκαν φαινόμενα διαρροής. Τελικά, λόγω της αντικατάστασης των μεταλλικών παροχών με πλαστικό υλικό, δεν υπήρχε πλέον η πιθανότητα εμφάνισης γαλβανικής διάβρωσης του δοκιμίου.

Σε αυτή τη φάση της κατασκευής και ενώ είναι εφικτό να ξεκινήσουν οι πειραματικές διαδικασίες, παρουσιάστηκε ένα τελευταίο πρόβλημα που θα έπρεπε να επιλυθεί. Το πρόβλημα αυτό ήταν η διασφάλιση της προστασίας της μηχανής εφελκυσμού, σε περίπτωση που υπάρξει διαρροή. Η ιδέα για την προστασία του μηχανήματος σε περίπτωση διαρροής, ήταν να κατασκευαστεί ένας μηχανισμός ο οποίος θα μπορούσε να εντοπίσει τη διαρροή και άμεσα να σταματήσει τη λειτουργία της αντλίας νερού, με σκοπό να αδειάσει το διάλυμα από την κυψέλη. Ο μηχανισμός αυτός αναλύεται σε επόμενη παράγραφο (Επιπρόσθετος Εξοπλισμός) Πρόκειται για ένα αισθητήρα υγρασίας, ο οποίος περικλείει το δοκίμιο έξω από την κυψέλη. Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η αλλαγή στην τοποθέτηση παροχών που απαιτήθηκε να πραγματοποιηθεί στην τρίτη και τελευταία κυψέλη που κατασκευάστηκε.

3.2.3 Κατασκευή Τελικής Κυψέλης

Στην τρίτη κυψέλη που κατασκευάστηκε, λόγω του επιπλέον περιορισμού που εμφανίστηκε, δηλαδή η τοποθέτηση του αισθητήρα υγρασίας, ήταν αναγκαία η μεταβολή των σημείων τοποθέτησης των παροχών. Ο λόγος που έπρεπε να γίνει αυτή η μεταβολή ήταν διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε περίπτωση διαρροής η αντλία νερού θα σταματούσε να λειτουργεί και θα έπρεπε να αδειάσει η κυψέλη. Με βάση την πρώτη και δεύτερη συνδεσμολογία όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9 το διάλυμα δεν ήταν εφικτό να αδειάσει ολόκληρο, εφόσον οι παροχές εξόδου απείχαν από τον πάτο του σωλήνα 60 mm. Συνεπώς, η αλλαγή που πραγματοποιήθηκε ήταν να τοποθετηθεί η μία παροχή εξόδου στον πάτο του σωλήνα και άλλη μία περιμετρικά όπως πριν (εικόνα 3.13). Με αυτή την αλλαγή, λόγω βαρύτητας η κυψέλη αδειάζει εξολοκλήρου από το σημείο 1 της εικόνας 3.13 χωρίς επέμβαση. Η χρήση της παροχής εξόδου στο σημείο 2 λειτουργεί ως μέσο υπερχειλίσης με σκοπό να διατηρείται η στάθμη του διαλύματος σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η τελευταία εργασία που πραγματοποιήθηκε στην τρίτη κατασκευή πριν την έναρξη των πειραμάτων, ήταν να τοποθετηθεί ένα στρώμα σιλικόνης περιμετρικά της τσιμούχας άξονα, για καλύτερη συγκράτηση και επιπλέον στεγανοποίηση (εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.13 (Ολοκληρωμένη κατασκευή τελικής κυψέλης)



Εικόνα 3.14 (Κάτω μέρος κυψέλης όπου έχει τοποθετηθεί η σιλικόνη)

3.3 Επιπρόσθετος Εξοπλισμός

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί ο επιπρόσθετος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να συνδεθούν οι επιμέρους κατασκευές μεταξύ τους και να ολοκληρωθεί η ιδιοκατασκευή.

3.3.1 Αντλία Νερού

Η αντλία νερού (εικόνα 3.15) αποτελεί ένα από τα πιο βασικά στοιχεία του εξοπλισμού. Η χρησιμότητά της στηρίζεται κυρίως στην κυκλοφορία του υδάτινου διαλύματος, με σκοπό να υπάρχει συνεχόμενη ροή και να μην είναι στάσιμο το διάλυμα. Πρόκειται για μία απλή αντλία νερού που χρησιμοποιείται σε ενυδρεία είτε γλυκού είτε αλμυρού νερού. Δεδομένο ότι το διάλυμά είναι προσομοίωση θαλάσσιου περιβάλλοντος, αυτό εξασφαλίζει τη δυνατότητα λειτουργίας της αντλίας χωρίς προβλήματα εξαιτίας της περιεκτικότητας του διαλύματος σε Χλωριούχο Νάτριο (NaCl). Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της αντλίας νερού είναι: παροχή 500 L/h, ύψος άντλησης 3 m και κατανάλωση ενέργειας 7,7 W.



Εικόνα 3.15 (Αντλία νερού)

3.3.2 Λάστιχο Διέλευσης Διαλύματος

Το λάστιχο που χρησιμοποιήθηκε (εικόνα 3.16), είναι κατασκευασμένο από πλαστικό υλικό και χρησιμοποιείται κυρίως για αρδευτικούς λόγους. Πρόκειται για εύκαμπτο υλικό, το οποίο δεν επηρεάζεται εύκολα από το διαβρωτικό περιβάλλον, με χαμηλό κόστος αγοράς.

Συνολικά απαιτήθηκαν 4 m λάστιχο, το οποίο κόπηκε στις κατάλληλες διαστάσεις για την ολοκλήρωση του κυκλώματος (δοχείο διαλύματος, αντλία νερού και κυψέλη διάβρωσης δοκιμίου). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι: εξωτερική διάμετρος 17 mm και εσωτερική διάμετρος 12 mm.



Εικόνα 3.16 (Λάστιχο διέλευσης διαλύματος)

3.3.3 Βάνα Νερού

Η βάνες νερού (εικόνα 3.17) τοποθετήθηκαν στα άκρο των σημείων διέλευσης του διαλύματος, με σκοπό να βοηθήσει να ρυθμιστεί η ροή του διαλύματος, τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του. Αποτελείται εξολοκλήρου από ανθεκτικό πλαστικό υλικό το οποίο διασφαλίζει ότι δε θα υπάρξουν σύντομα φαινόμενα φθοράς λόγω του διαλύματος.



Εικόνα 3.17 (Βάνα νερού)

3.3.4 Αισθητήρα Υγρασίας

Ο αισθητήρα υγρασίας που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να εντοπιστεί πιθανή διαρροή και να σταματήσει η λειτουργία της αντλίας, φαίνεται στις εικόνες 3.18, 3.19. Αποτελείται από δύο συσκευές στις οποίες έγινε η κατάλληλη συνδεσμολογία έτσι ώστε να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 3.18 (αισθητήρας υγρασίας)

Αρχικά λήφθηκε προμήθεια από το εμπόριο, έναν κοινό αισθητήρα υγρασίας. Ο τρόπος λειτουργίας του συγκεκριμένου μηχανήματος, είναι να εντοπίζει το υγρό στοιχείο που έρχεται σε επαφή με την ταινία που βρίσκεται εκτός της συσκευής.

Η ταινία αυτή, ουσιαστικά αποτελεί ένα κύκλωμα, το οποίο αρχικά είναι κλειστό. Λόγω του ότι το νερό αποτελεί καλό αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος, το κύκλωμα αυτό κλείνει με την παρουσία υγρού στοιχείου και έτσι παίρνει ρεύμα ένας ειδοποιητής (alarm).

Οι μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν πάνω σε αυτή τη συσκευή, ήταν να κοπούν τα καλώδια που δίνουν ρεύμα στον ειδοποιητή και την εντολή να τη δέχεται ένα ρελέ ασφαλείας, το οποίο θα σταματάει το ρεύμα από την αντλία νερού. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι κοινός με αυτόν που χρησιμοποιείται σαν σύστημα ασφαλείας στα σπίτια και πέφτει ο γενικός διακόπτης όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα. Για την υλοποίηση αυτής της κατασκευής απαιτήθηκε ένας διακόπτης on/off, ένα ρελέ ηλεκτρικό 230 V και ένα συνεχούς ρεύματος ρελέ 9 V. Επειδή ο αισθητήρας δουλεύει με μπαταρία 9 V ενώ η αντλία παίρνει ρεύμα από το δίκτυο με 230 V έπρεπε να χρησιμοποιηθούν δύο ρελέ.

Το ρελέ με τα 9 V παίρνει την εντολή από τον αισθητήρα όταν κλείσει το κύκλωμα και δίνει εντολή στο ρελέ των 230 V να κόψει την ροή του ρεύματος μέσω του διακόπτη on/off.



Εικόνα 3.19 (Ηλεκτρολογικό κουτί που έχουν τοποθετηθεί τα δύο ρελέ και ο διακόπτης on/off)



Για να διασφαλιστεί στη συνέχεια η σωστή λειτουργία της συσκευής, έγιναν δοκιμές και διαπιστώθηκε ότι ο αισθητήρας δουλεύει σωστά ακόμη και με πολύ μικρές ποσότητες υγρού στοιχείου, όπως μία σταγόνα νερού.

Καταλήγοντας, το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα για να οριστεί έπρεπε να βρεθεί ποιο είναι το πιο αδύναμο σημείο της ιδιοκατασκευής. Λόγω των συνεχόμενων φορτίων που θα δεχόταν το δοκίμιο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, θεωρήθηκε πως ο αισθητήρα θα έπρεπε να τοποθετηθεί γύρω από το δοκίμιο και κάτω από την τσιμούχα στεγανοποίησης. Για να γίνει εφικτή η τοποθέτηση σε αυτό το σημείο χρειάστηκε να γίνει μία οπή στην ταινία του αισθητήρα, με σκοπό να περάσει το δοκίμιο από μέσα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9. Η οπή αυτή μονώθηκε με μονωτική ταινία διότι το μέταλλο όπως και το νερό αποτελεί επίσης καλό αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος και έτσι αν ερχόταν σε άμεση επαφή το δοκίμιο με την ταινία θα έστελνε ρεύμα η συσκευή να σταματήσει η αντλία.



Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας, ξεκίνησε από την συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων και έπειτα με την εφαρμογή των κατάλληλων φορτίων στη μηχανική εφελκυσμού για την υλοποίηση των πειραμάτων κόπωσης με διάβρωση. Πρόκειται για μία χρονοβόρα διαδικασία η οποία διήρκεσε σχεδόν 20 μέρες και ολοκληρώθηκαν 2 πειράματα σε δύο διαφορετικά δοκίμια χάλυβα. Τα αποτελέσματά τους αναλύονται στη συνέχεια.

4.1 Κατασκευή Δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων που μελετήθηκαν, αποτελεί σημαντικό μέρος αυτής της εργασίας, καθώς είναι απαραίτητο να κατανοούνται οι ιδιότητες αλλά και η κατεργασία που έχουν υποστεί τα δοκίμια πριν την εκτέλεση των πειραμάτων. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένα από χάλυβα St37 με σύσταση η οποία φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 (Μέγιστα όρια σύστασης % σε χάλυβα St37 [10])

-	C	Si	Mn	P	S	N
St37-2	Max. 0,17	Max. 0,3	Max.1,4	Max. 0,045	Max. 0,045	Max. 0,009

Ο χάλυβας St37, ανήκει στην κατηγορία των χαλύβων με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα και περιέχει κραματικά στοιχεία αλλά σε μικρή κραμάτωση, με αποτέλεσμα να μην τον προστατεύουν από την έκθεσή του σε διαβρωτικό περιβάλλον. Σύμφωνα με πειράματα εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα δοκίμια, χωρίς την παρουσία κάποιου διαβρωτικού μέσου, οι μηχανικές ιδιότητες του αναφέρονται στον πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 (Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα St37 [8])

-	$\sigma_{y(0,2\%)}$ (MPa)	σ_{uts} (MPa)
St37-2	378	519

Σχετικά με την κατεργασία που έχουν υποστεί τα δοκίμια θα πρέπει να αναφερθεί, ότι πρόκειται για δύο ήδη δοκιμίων από το ίδιο υλικό.

- Δοκίμιο Αναφοράς

Το δοκίμιο αναφοράς (εικόνα 4.1), η μοναδική κατεργασία που δέχτηκε ήταν η μείωση της κεντρικής διατομής του, από διάμετρο 11 mm σε διάμετρο 7 mm. Ο λόγος που έγινε αυτή η κατεργασία, ήταν για να δημιουργηθεί μία περιοχή συγκέντρωσης τάσεων με σκοπό να διασφαλιστεί το σημείο θραύσης.



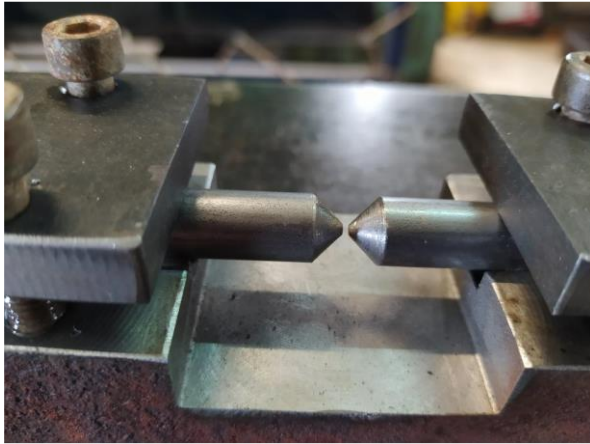
Εικόνα 4.1 (Δοκίμιο αναφοράς χάλυβα St37)



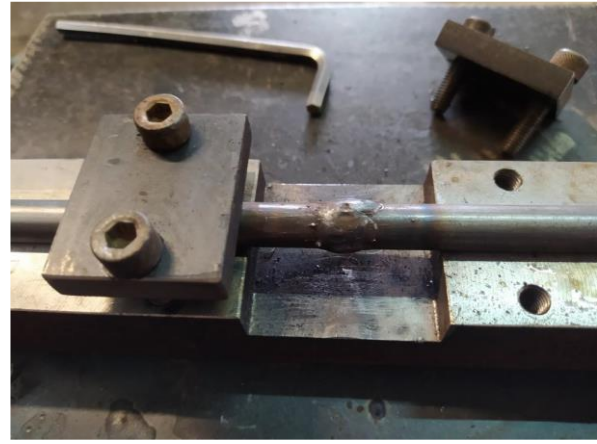
Εικόνα 4.2 (Δοκίμιο χάλυβα St37 με συγκόλληση GMAW)

- Δοκίμιο με συγκόλληση GMAW

Το δοκίμιο με συγκόλληση GMAW (εικόνα 4.2), κατασκευάστηκε από έμπειρο μηχανουργό με πολύ μεγάλη προσοχή, διότι πρόκειται για πολύ μικρές διαστάσεις δοκιμίου το οποίο θα ήταν εύκολο να σπάσει. Για την κατεργασία συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε από το μηχανουργείο ειδικός εξοπλισμός με σκοπό να παραμείνει ευθυγραμμισμένο το δοκίμιο μετά τη συγκόλληση (εικόνα 4.3). Η συγκόλληση ήταν τύπου GMAW, με ηλεκτρόδιο από το ίδιο υλικό διαμέτρου 1 mm. Επίσης, οι συνθήκες συγκόλλησης φαίνονται στην εικόνα 4.5, με τη διαφορά ότι στη συνέχεια της συγκόλλησης η ένδειξη των 115 A μειώθηκε σε τιμή μικρότερη των 100 A.



Εικόνα 4.3 (Εξοπλισμός ευθυγράμμισης δοκιμίου πριν την συγκόλληση [8])



Εικόνα 4.4 (Στιγμιότυπο αμέσως μετά τη συγκόλληση [8])



Εικόνα 4.5 (Συνθήκες συγκόλλησης τύπου GMAW [8])

Μετά τη συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε το δοκίμιο στο κεντρικό σημείο είχε διάμετρο 15 mm (εικόνα 4.4). Για τη μείωση της διαμέτρου στα 7 mm χρησιμοποιήθηκε τόνος όπως και στο δοκίμιο αναφοράς, κατασκευάζοντας τελικά δύο είδη δοκιμίων με όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.



4.2 Δημιουργία Διαβρωτικού Διαλύματος

Το διαβρωτικό διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων κόπωσης σε διαβρωτικό περιβάλλον, δημιουργήθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G44 – 99. Πρόκειται για ένα διάλυμα προσομοίωσης θαλασσινού νερού με σύσταση 3,5 % κ.β. NaCl, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές πειραμάτων εναλλακτικής βύθισης. [11] Παρόλα αυτά, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες κόπωσης με διάβρωση, με τη χρήση διαλύματος με τη συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε NaCl και λόγω της εύκολης δημιουργίας του, χωρίς την απαίτηση άλλων χημικών στοιχείων, όπως μέταλλα, επιλέχθηκε για τα συγκεκριμένα πειράματα. Η διαβρωτική του δράση είναι πολύ πιο ισχυρή, σε σύγκριση με το πραγματικό θαλασσινό νερό και συνεπώς αναμένεται να υπάρξει πιο γρήγορη θραύση των δοκιμίων, σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες έκθεσης του συγκεκριμένου υλικού σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Τα χημικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Χλωριούχο Νάτριο (NaCl)
- Υδροξείδιο του Νατρίου (NaOH)
- Χαρτάκια μέτρησης του Ph
- Αναδευτήρας
- Ζυγαριά ακριβείας
- Κυπελάκια μέτρησης
- Απιονισμένο νερό
- Πλαστικό δοχείο συγκέντρωσης διαλύματος

Το διάλυμά αποτελείται από 8 kg απιονισμένο νερό, 290 gr NaCl και 1-2 gr NaOH (εικόνα 4.6). Αρχικά τοποθετήθηκαν τα 8 kg απιονισμένου νερού σε θερμοκρασία δωματίου μέσα στο δοχείο διαλύματος, έπειτα ζυγίστηκε η ποσότητα NaCl και ομογενοποιήθηκε με το νερό με τη βοήθεια ενός αναδευτήρα και στη συνέχεια μετρήθηκε το Ph. Τέλος προστέθηκε στον διάλυμα 1-2 gr NaOH με σκοπό τη μεταβολή του Ph από 6,5 σε 8,2.



Εικόνα 4.6 (Χαρτάκια μέτρησης του Ph και Χημικά σκευάσματα για τη δημιουργία του διαλύματος διάβρωσης (NaCl & NaOH))

4.3 Συναρμολόγηση Ιδιοκατασκευής

Η συναρμολόγηση της ιδιοκατασκευής άρχισε με την τοποθέτηση της βάσης πάνω στη μηχανή του εφελκυσμού (εικόνα 4.7). Η βάση στερεοποιήθηκε με τη βοήθεια τεσσάρων χαλύβδινων κοχλιών και περικοχλιών. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε η κυψέλη διάβρωσης, πάνω στη βάση και ασφαλίστηκε με τους δύο κοχλίες, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το δοκίμιο μέσα από την τσιμούχα στεγανοποίησης, ενώ παράλληλα περάστηκε μέσα από την ταινία του αισθητήρα υγρασίας (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.7 (Βάση τοποθέτησης κυψέλης)

Σε αυτό το σημείο και αφού κατασκευάστηκε το διαβρωτικό διάλυμα, ήταν έτοιμο να τοποθετηθεί η αντλία μέσα στο διάλυμα και να συνδεθούν τα λάστιχα διέλευσης του διαλύματος με τις παροχές εισόδου και εξόδου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8, στην κάτω μεριά της κυψέλης συνδέθηκε η έξοδος του διαλύματος ενώ στην πάνω αριστερά η είσοδος του. Τέλος, μπήκε σε λειτουργία η αντλία νερού, μέσω του διακόπτη on/off που είναι συνδεδεμένος με την παροχή ρεύματος και την αντλία. Έπειτα, ρυθμίστηκε η ροή του νερού, με τη βοήθεια από τις βάνες νερού (εικόνα 4.10) με σκοπό να παραμείνει σταθερή η στάθμη του διαλύματος εντός της κυψέλης και να ολοκληρωθεί το κύκλωμα.



Εικόνα 4.8 (Τοποθετημένη κυψέλη επάνω στη βάση)



Εικόνα 4.9 (Τοποθέτηση δοκιμίου και αισθητήρα υγρασίας)



Εικόνα 4.10 (Δοχείο διαλύματος με συνδεδεμένη την αντλία νερού)

4.4 Δοκιμές Κόπωσης με Διάβρωση

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα αναλύσουμε τις συνθήκες, στις οποίες επιβλήθηκαν τα δοκίμια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Υπήρξαν συνολικά 2 δοκιμές κόπωσης με διάβρωση, μία στο δοκίμιο με συγκόλληση GMAW και μία στο δοκίμιο αναφοράς.

4.4.1 Πειραματική Διαδικασία 1 (Δοκίμιο με συγκόλληση GMAW)

Για το συγκεκριμένο πείραμα κόπωσης με διάβρωση, επιλέχθηκε μία συχνότητα $f=1$ Hz, μέγιστο φορτίο καταπόνησης $P_{max} = 10$ kN, ελάχιστο φορτίο καταπόνησης $P_{min} = 1$ kN και λόγο $R = 0,1$. Με αυτές τις συνθήκες καταπόνησης και την επιλογή εναλλασσόμενης ημιτονοειδής φόρτισης άρχισε η πειραματική διαδικασία. Το συγκεκριμένο πείραμα διήρκησε 10 ώρες και 42 λεπτά ολοκληρώνοντας 37508 κύκλους φόρτισης μέχρι την τελική θραύση του δοκιμίου (εικόνα 4.12). Στην εικόνα 4.11 απεικονίζεται το δοκίμιο με συγκόλληση GMAW κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης με διάβρωση.



Εικόνα 4.11 (Στιγμιότυπο όπου φαίνεται το δοκίμιο βυθισμένο στο διαβρωτικό διάλυμα με την παρουσία σκουριάς έπειτα από αρκετές ώρες σε συνθήκες κόπωσης)

Πίνακας 4.3 (Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας 1)

Υλικό	Συγκόλληση	Παρουσία Διαβρωτικού μέσου	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	R (-)	F (Hz)	Nf (Κύκλοι φόρτισης)
St37	NAI	NAI	10	1	0,1	1	37508



Εικόνα 4.12 (Δοκίμιο 1 μετά τη θραύση που υπέστη σε 37508 κύκλους φόρτισης κάτω από συνθήκες κόπωσης με διάβρωση)

4.4.2 Πειραματική Διαδικασία 2 (Δοκίμιο αναφοράς)

Οι συνθήκες καταπόνησης του δεύτερου δοκιμίου διατηρήθηκαν ίδιες. Συχνότητα $f=1$ Hz, μέγιστο φορτίο καταπόνησης $P_{max} = 10 \text{ kN}$, ελάχιστο φορτίο καταπόνησης $P_{min} = 1 \text{ kN}$ και λόγο $R = 0,1$. Με αυτές τις συνθήκες καταπόνησης και την επιλογή εναλλασσόμενης ημιτονοειδής φόρτισης το πείραμα διακόπηκε έπειτα από 600000 Κύκλους φόρτισης (εικόνα 4.13). Το συγκεκριμένο πείραμα διήρκησε 167 ώρες με σημαντική απόκλιση από το πρώτο πείραμα.

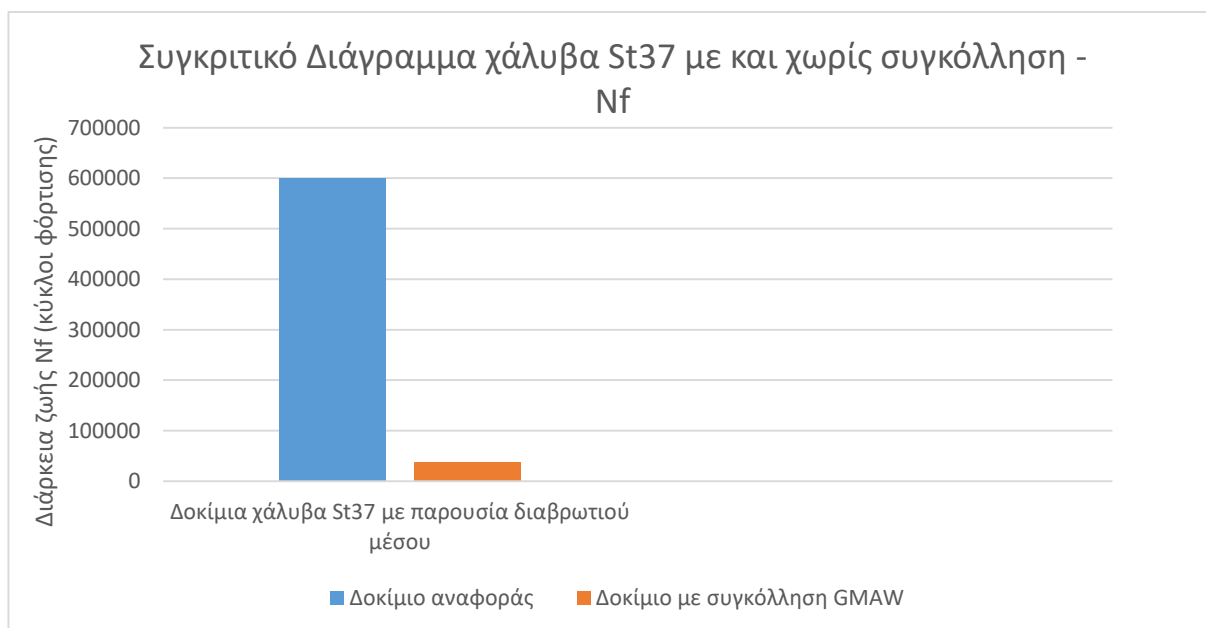


Εικόνα 4.13 (Δοκίμιο αναφοράς έπειτα από 167 ώρες σε συνθήκες κόπωσης με διάβρωση)

Πίνακας 4.4 (Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας 2)

Υλικό	Συγκόλληση	Παρουσία Διαβρωτικού μέσου	$P_{max} \text{ (kN)}$	$P_{min} \text{ (kN)}$	R (-)	F (Hz)	Nf (Κύκλοι φόρτισης)
St37	ΟΧΙ	ΝΑΙ	10	1	0,1	1	600000

4.5 Αποτελέσματα



Εικόνα 4.14 (Διάγραμμα σύγκρισης δοκιμών χάλυβα St37 με και χωρίς συγκόλληση συναρτήσει της διάρκειας ζωής τους σε κύκλους φόρτισης)

Τα αποτελέσματα από τις δύο πειραματικές διαδικασίες, απεικονίζονται στην εικόνα 4.14. Η ράβδος με το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στο δοκίμιο αναφοράς (χωρίς συγκόλληση), το οποίο δεν εμφάνισε αστοχία μετά από 167 ώρες καταπόνησης, ενώ η ράβδος με το πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχεί στο δοκίμιο με συγκόλληση GMAW, το οποίο έσπασε έπειτα από 10,42 ώρες. Η ανάλυση αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι από τις δύο πειραματικές διαδικασίες πάρθηκαν αποτελέσματα τα οποία έχουν αρκετή απόκλιση μεταξύ τους, παρόλο που οι συνθήκες διατηρήθηκαν σταθερές.



Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων που έχουμε πάρει με τη διεξαγωγή των δύο πειραμάτων που έγιναν στα δοκίμια.

Η πρώτη πειραματική διαδικασία, που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία, εμφάνισε το φαινόμενο της αστοχίας, με την τελική θραύση του δοκιμίου, έπειτα από 37508 κύκλους φόρτισης. Πρόκειται για ένα δοκίμιο με συγκόλληση GMAW το οποίο εξετάστηκε σε συνθήκες κόπωσης με διάβρωση για 10,42 ώρες. Αντίθετα, από τη δεύτερη πειραματική διαδικασία, το δοκίμιο αναφοράς, το οποίο δεν είχε υποβληθεί σε κατεργασία συγκόλλησης, όπως το πρώτο, κατάφερε να διατηρηθεί χωρίς την εμφάνιση αστοχίας έπειτα από 600000 κύκλους φόρτισης. Ο χρόνος διεξαγωγής αυτού του πειράματος ήταν 167 ώρες. Τα δύο δοκίμια εξετάστηκαν στις ίδιες συνθήκες. Το περιβάλλον τους κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ήταν και στις δύο περιπτώσεις το διαβρωτικό διάλυμα προσομοίωσης θαλάσσιου νερού και τα φορτία καταπόνησης όπως και η συχνότητα διατηρήθηκαν σταθερά. Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι η μηχανική κατεργασία συγκόλλησης, που δέχτηκε το πρώτο δοκίμιο έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διάρκεια ζωής του υλικού. Η συγκόλληση φαίνεται να υποβάθμισε τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, καθώς επίσης και να βοήθησε τη δράση του διαβρωτικού μέσου. Για την επιβεβαίωση των παραπάνω συμπερασμάτων, θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν επαναληπτικά πειράματα και στα δύο είδη δοκιμίων. Τα πειράματα αυτά λόγω της χαμηλής συχνότητας και των σχετικά μικρών φορτίων καταπόνησης, απαιτούν πολύ χρόνο για τη διεξαγωγή τους και έτσι κατέστη ανέφικτη η επαναληπτική διαδικασία.

Πίνακας 5.1 (Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων)

Υλικό St37	Συγκόλληση	Παρουσία Διαβρωτικού μέσου	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	R (-)	F (Hz)	Nf (Κύκλοι φόρτισης)
Πείραμα 1	ΝΑΙ	ΝΑΙ	10	1	0,1	1	37508
Πείραμα 2	ΟΧΙ	ΝΑΙ	10	1	0,1	1	600000



Βιβλιογραφία

- [1] Tianliang Zhaoa, Zhiyong Liua, Cuiwei Dua, Chunduo Daia, Xiaogang Lia,b, Bowei Zhangc, Corrosion fatigue crack initiation and initial propagation mechanism of E690 steel in simulated seawater, *Materials Science & Engineering A*, Pages 181–192, 2017
- [2] E. Delmotte, N. Micone, and W. De Waele, Testing methodologies for corrosion fatigue, *Sustainable Construction and Design*, vol. 6, no. 3, 2015
- [3] Ali Mehmanparast, Azenor Vidament, An accelerated corrosion-fatigue testing methodology for offshore wind applications, *Engineering Structures*, Volume 240, Article 112414, 1 August 2021
- [4] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Αντώνης Ι. Κατσαμάς , *Εισαγωγή στην Τεχνολογία Υλικών*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2003
- [5] Zaki Ahmad, CHAPTER 4 - TYPES OF CORROSION, *Materials and Environments, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 1st Edition, Pages 120-270, 2006
- [6] Aidin Ghavamian, Mohammad Reza Maghami, Shayan Dehghan, Chandima Gomes, Concerns of corrosive effects with respect to lightning protection systems, *Engineering Failure Analysis*, Volume 57, November 2015, Pages 434-443, 2015
- [7] Σπύρος Γ. Παντελάκης, Κωνσταντίνος Ι. Τσερπές, *Μηχανική συμπεριφορά υλικών*, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2018
- [8] Michail Tziastoudis, *Design and Construction of Corrosion Fatigue Test Setup*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021
- [9] ASM Handbook, Volume 13 Corrosion, ASM International 1992
- [10] Information about steel for metallographer, 2022, [<http://www.metallograf.de/start-eng.htm>], Ανάκτηση 21/02/2022
- [11] ASTM International, *Standard Practice for Exposure of Metals and Alloys by Alternate Immersion in Neutral 3.5% Sodium Chloride Solution*, , ASTM G44 – 99, 2005