



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών**

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

**Διάβρωση και μέθοδοι αντιδιαβρωτικής προστασίας
δεξαμενών φορτίου στα δεξαμενόπλοια
Corrosion and anti-corrosion protection of cargo tanks in oil tankers**

Συγγραφέας:

ΛΑΠΠΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

A.M.:1808

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω, Μάιος, 2022



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

Τίτλος: Διάβρωση και μέθοδοι αντιδιαβρωτικής προστασίας δεξαμενών φορτίου στα δεξαμενόπλοια

Συγγραφέας

Λάμπας Κωνσταντίνος Α.Μ.:1808

Επιβλέπουσα

Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη,

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

03/05/2022

Εξεταστική Επιτροπή

**Θεοχάρη Σταματίνα,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής**

**Σοφία Πέππα,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής**

**Ισίδωρος Ιακωβίδης,
Λέκτορας Πανεπιστημίου
Δυτικής Αττικής**

Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Λάππας του Ματθαίου, με αριθμό μητρώου 1808 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία» του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και κάθε βοήθεια για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολο τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Ο Δηλών:

A handwritten signature in blue ink, reading 'Κ. ΛΑΠΠΑΣ', written over a horizontal line.

Κωνσταντίνος Λάππας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Θεοχάρη Σταματίνα που με την άμεση και ουσιαστική καθοδήγηση της βοήθησε στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στην κοπέλα μου για την στήριξη τους όλο αυτό το διάστημα. Η εργασία είναι αφιερωμένη στον αδερφό μου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι διάφορες μορφές διάβρωσης που συναντώνται στις δεξαμενές φορτίων των πλοίων μεταφοράς αργού πετρελαίου, που προκύπτουν είτε από μηχανικές καταπονήσεις λόγω ατελούς εφαρμογής αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων είτε από την ιδιαιτερότητα του φορτίου. Επίσης, εξετάζονται οι παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση, σε συνάρτηση με τις ευνοϊκές συνθήκες, που δημιουργούνται στις δεξαμενές μεταφοράς φορτίων και αναλύονται οι προτεινόμενοι τρόποι εντοπισμού αλλά και αντιμετώπισης, της διάβρωσης, στα κατασκευαστικά μέρη του πλοίου. Επιπρόσθετα, περιγράφονται με λεπτομέρεια, όλες οι διαδικασίες για την σωστή προετοιμασία και εφαρμογή των αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων στις μεταλλικές επιφάνειες. Πραγματοποιείται εκτεταμένη αναφορά στην ποικιλία των επιστρώσεων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις δεξαμενές φορτίου αλλά και στη χρήση των κατασκευαστικών υλικών που βοηθούν στον έλεγχο και περιορισμό του ρυθμού της διάβρωσης σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα που βρίσκονται σε ισχύ.

Λέξεις - κλειδιά: Διάβρωση, Δεξαμενές φορτίου, Επιθεώρηση, Επιστρώσεις, IMO, Προετοιμασία επιφανειών, Δεξαμενόπλοιο, Μικροβιολογικά Επηρεασμένη Διάβρωση (MIC), SRB, Εποξικές Επιστρώσεις.

Abstract

This thesis examines the various forms of corrosion found in the cargo tanks of crude oil carriers, resulting from either mechanical stress, incomplete application of anti-corrosion coatings, or the specificity of the cargo. The factors that accelerate the corrosion are examined, in relation to the favorable conditions that are created in the cargo tanks and the proposed ways of locating and preventing the corrosion on the structural elements of the ship are analyzed. Additionally, all the procedures for the proper preparation and application of anti-corrosion coatings on the steel surfaces are described in detail, making extensive reference to the variety of the coatings that can be used in cargo tanks and the use of construction materials that reduce the rate of corrosion according to the international standards.

Keywords: Corrosion, Cargo tanks, Inspection, Coating, IMO, Surface Preparation, Tanker, Microbiological influenced corrosion (MIC), SRB, Epoxy coatings.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο πρώτο	1
Ναυτιλία.....	1
1.1 Η ανάπτυξη της ελληνικής ναυτιλίας τα τελευταία 40 χρόνια	1
1.2 Η ανάπτυξη της ελληνικής ναυτιλίας τα τελευταία χρόνια.....	1
Κεφάλαιο δεύτερο	3
Τεχνολογική Εξέλιξη Δεξαμενοπλοίων	3
2.1 Τύποι Δεξαμενοπλοίων.....	7
Κεφάλαιο τρίτο	13
Το φαινόμενο της διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων.....	13
3.1 Μηχανισμός Διάβρωσης	15
3.2 Η χρήση του χάλυβα ως ναυπηγικό υλικό.....	16
3.3 Παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση	17
3.4 Παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση στις δεξαμενές φορτίου.....	18
3.4.1 Πλύση δεξαμενών φορτίου με αργό πετρέλαιο (Cargo oil washing – COW).....	24
3.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στις δεξαμενές φορτίου	24
Κεφάλαιο τέταρτο	28
Μορφές διάβρωσης των δεξαμενών φορτίων των δεξαμενοπλοίων.....	28
4.1 Γενική διάβρωση ή ομοιόμορφη διάβρωση – General Corrosion.....	28
4.2 Τοπική διάβρωση – Local Corrosion	29
4.3 Διάβρωση οπών ή διάβρωση με βελονισμούς – Pitting Corrosion.....	29
4.4 Διάβρωση μετάλλων συγκόλλησης.....	30
4.5 Γαλβανική διάβρωση	31
4.6 Σπηλαιώδης διάβρωση – Cavitation Corrosion	31
4.7 Διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking).....	32
Κεφάλαιο πέμπτο	33
Διάβρωση προκαλούμενη από την επίδραση μικροοργανισμών – Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)	33
5.1 Ορισμός της μικροβιολογικά επηρεασμένης διάβρωσης	34
5.2 Σημαντικότητα της MIC.....	35
5.3 Κατηγορίες των βακτηρίων που ευθύνονται για την Μικροβιολογική Διάβρωση (MIC)	36
5.4 Στάδια και σχηματισμός βιοεπίστρωσης.....	37
5.5 Η επίδραση της βιοεπίστρωσης στη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου.....	39

5.6 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της MIC.....	44
5.7 Συμπέρασμα.....	45
<i>Κεφάλαιο έκτο.....</i>	<i>47</i>
<i>Τρόποι αντιμετώπισης της διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων ...</i>	<i>47</i>
6.1 Πρότυπα IMO σχετικά με Ανθεκτικούς στη Διάβρωση Χάλυβες για δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίου.....	47
6.2 Πρότυπα IMO για συστήματα επικάλυψης σε δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου	51
<i>Κεφάλαιο έβδομο</i>	<i>53</i>
<i>Επιθεωρήσεις της μεταλλικής κατασκευής και των δεξαμενών φορτίων δεξαμενοπλοίων.....</i>	<i>53</i>
7.1. Ετήσια επιθεώρηση (Annual survey).....	53
7.2. Ενδιάμεση Επιθεώρηση (Intermediate Survey)	54
7.3. Ειδική Επιθεώρηση (Special Survey)	55
<i>Κεφάλαιο όγδοο</i>	<i>59</i>
<i>Προετοιμασία των επιφανειών και εφαρμογή των συστημάτων επιστρώσεων στις δεξαμενές φορτίων δεξαμενόπλοιοι.....</i>	<i>59</i>
8.1 Προετοιμασία μεταλλικών επιφανειών πριν την εφαρμογή επιστρώσεων.....	59
8.2 Σύσταση αντιδιαβρωτικών επιστρωμάτων.....	65
8.3 Σύστημα αντιδιαβρωτικής προστασίας.....	67
<i>Κεφάλαιο ένατο.....</i>	<i>70</i>
<i>Η επίδραση των εμπορικών φορτίων στα συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας των δεξαμενών φορτίου των δεξαμενοπλοίων</i>	<i>70</i>
9.1 Εποξικά επιστρώματα (Pure Epoxy)	72
9.2 Εποξικές επιστρώσεις με φαινολικές ρυτίνες (Epoxy phenolic).....	74
9.3 Ισοκυανικά Εποξικά Επιστρώματα (Epoxy Isocyanates)	75
9.4 Επιστρώσεις ψευδαργύρου (Alkaline Zinc Silicates).....	77
9.5 Επιστρώσεις αιθυλοψευδαργύρου (Ethyl Zinc Silicates)	80
9.6 Εποξικές επικαλύψεις με σιλικόνη (Cyclosilicon Eroxies).....	81
<i>Κεφάλαιο δέκατο</i>	<i>83</i>
<i>Κατασκευή δεξαμενών φορτίου δεξαμενοπλοίων από χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση.....</i>	<i>83</i>
10.1 Ιδιότητες ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα.....	84
10.2 Εξαίρεση	85
10.3 Εφαρμογή.....	86
<i>Συμπεράσματα και προτάσεις για την πρόληψη και την προστασία από τη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου δεξαμενοπλοίων</i>	<i>89</i>

<i>1. Παρατηρήσεις σχετικές με τις εργασίες που πραγματοποιούνται στο ναυπηγείο.....</i>	<i>90</i>
<i>2. Παρατηρήσεις σχετικές με τους πλοιοκτήτες.....</i>	<i>90</i>
<i>3. Παρατηρήσεις σχετικές με τους κατασκευαστές χάλυβα.....</i>	<i>91</i>
<i>4. Παρατηρήσεις σχετικές με τους κατασκευαστές χρωμάτων.....</i>	<i>91</i>
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>92</i>

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

- Διάγραμμα 1. Παγκόσμιος Στόλος – Πλοιοκτησία ανά τον κόσμο. Πηγή:UNCTAD – Maritime transport, 2007-2020
- Διάγραμμα 2. Ποσοστό Ελληνόκτητου στόλου σε σχέση με τον παγκόσμιο στόλο ανα τύπο πλοίου. Πηγή:HIS Global ltd.....
- Διάγραμμα 3. Σχέδιο συστήματος αδρανούς αερίου και πτητικών οργανικών ενώσεων. Πηγή: IMO MEPC.1/ CIRC.680.....
- Διάγραμμα 4. Heat affected zone from welding. Πηγή: IACS
- Διάγραμμα 5. Σχέση διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Πηγή: nipponsteel.com
- Διάγραμμα 6. Ακολουθία επιλογής τρόπου αντιμετώπισης της διάβρωσης. Πηγή:DNV-GL

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Κατάταξη τύπων δεξαμενοπλοίων ανά μέγεθος και φορτίο.
Πηγή: www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=17991

Πίνακας 2. Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων όλων των τύπων ναυπηγικού χάλυβα.
Πηγή: www.octlmetals.com

Πίνακας 3. Επιτρεπτά ποσοστά διάβρωσης ανά κατασκευαστικό στοιχείο. Πηγή
ClassNK.....

Πίνακας 4. Πίνακας προτύπων για την προετοιμασία επιφανειών ανά μέθοδο.
Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection.....

Πίνακας 5. Μέθοδοι επιλογής προστασίας των δεξαμενών φορτίου. Πηγή: Class
NK.....

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Σύγκριση σύγχρονου Δ/Ξ με τα υψηλότερα κτήρια στο κόσμο. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tanker-size-comparison.png>

Εικόνα 2. Τυπική Μορφή Πλοίου μονής και διπλής γάστρας. Πηγή: <https://clearseas.org/en/blog/double-hulls/>

Εικόνα 3. Βασική αρχή λειτουργίας Βαλβίδων Πίεσης / Εκτόνωσης. Πηγή <https://www.myseatime.com/blog/detail/primary-and-secondary-means-of-venting.....>

Εικόνα 4. Μηχανήματα πλύσης Δεξαμενών Πετρελαίου. Πηγή: https://www.geocities.ws/icts_papers/Papers/Stojan,%20Drazic,%20Antonic.pdf

Εικόνα 5. Ηλεκτροχημική Διάβρωση και δημιουργία σκουριάς στην επιφάνεια μετάλλου. Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/290559312_Treatise_on_conducting_polymers_for_corrosion_protection_-_Advanced_approach.....

Εικόνα 6. Περιγραφή του μηχανισμού διάβρωσης και των συνθηκών που επικρατούν στις δεξαμενές φορτίου. Πηγή ClassNK

Εικόνα 7. Μηχανισμός παραγωγής θείου. Πηγή ClassNK

Εικόνα 8. Περιγραφή συνθηκών που επικρατούν στον πυθμένα δεξαμενής. Πηγή:ClassNK

Εικόνα 9. Επίδραση της θερμοκρασίας που επικρατεί στις δεξαμενές πετρελαίου και οι επιπτώσεις. Πηγή DNV-GL.....

Εικόνα 10. Περιβάλλον δημιουργίας βελονισμού. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition).....

Εικόνα 11. Τύποι βελονισμού. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition).....

Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της Γαλβανικής διάβρωσης. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition).....

Εικόνα 13. Συστατικά του συστήματος. Πηγή: Microbiologically influenced Corrosion Reza Javaherdashti -book series (EMP).....

Εικόνα 14. Τύποι Βακτηρίων. Πηγή: Microbiologically influenced Corrosion Reza Javaherdashti -book series (EMP).....

Εικόνα 15. Είσοδος και έξοδος των αερίων στο βιοφίλμ. Πηγή: Microbiologically influenced Corrosion Reza Javaherdashti -book series (EMP)

Εικόνα 16. Στατική και πλωτή ανάπτυξη. Πηγή: Engineering Materials and Processes book series (EMP).....

Εικόνα 17. Διάβρωση τύπου βελονισμού σε μεταλλική επιφάνεια. Πηγή: NACE International.....

Εικόνα 18. Δοκίμιο προσομοίωσης. Πηγή: IMO - RESOLUTION MSC.289(87)....

Εικόνα 19. Συσκευή Δοκιμής μεταλλικών δοκιμίων. Πηγή: IMO RESOLUTION MSC.289(87)

Εικόνα 20. Συσκευή δοκιμής ελάσματος πυθμένα. Πηγή: IMO - RESOLUTION MSC.289(87)

Εικόνα 21. Απεικόνιση επιτρεπόμενης διάβρωσης μεταλλικών στοιχείων κατασκευής. Πηγή:ClassNK.....

Εικόνα 22. Παράδειγμα σημείων που υπόκεινται σε ποιοτικό έλεγχο / παχυμετρήσεις στις εγκάρσιες ζώνες. Πηγή:ClassNK

- Εικόνα 23. Παράδειγμα σημείων που υπόκεινται σε ποιοτικό έλεγχο / παχυμετρήσεις στις εγκάρσιες φρακτές των δεξαμενών Φορτίων. Πηγή: ClassNK.....
- Εικόνα 24.. Σχηματική αναπαράσταση προετοιμασίας επιφάνειας. Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection.....
- Εικόνα 25. Όψη των προετοιμασμένων επιφανειών. Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection.....
- Εικόνα 26. Σχηματική αναπαράσταση συστήματος βαφής πλοίου. Πηγή: steel construction.info.....
- Εικόνα 27. Πυθμένας δεξαμενής όπου έχει εφαρμοστεί το τελικό χρώμα. Πηγή: Chemco international – case study M11
- Εικόνα 28. Πυθμένας δεξαμενής φορτίου με τελική στρώση βαφής. Πηγή: Chemco Int.
- Εικόνα 29. Διάβρωση πυθμένα δεξαμενής. Πηγή: nipponsteel.com

Κεφάλαιο πρώτο

Ναυτιλία

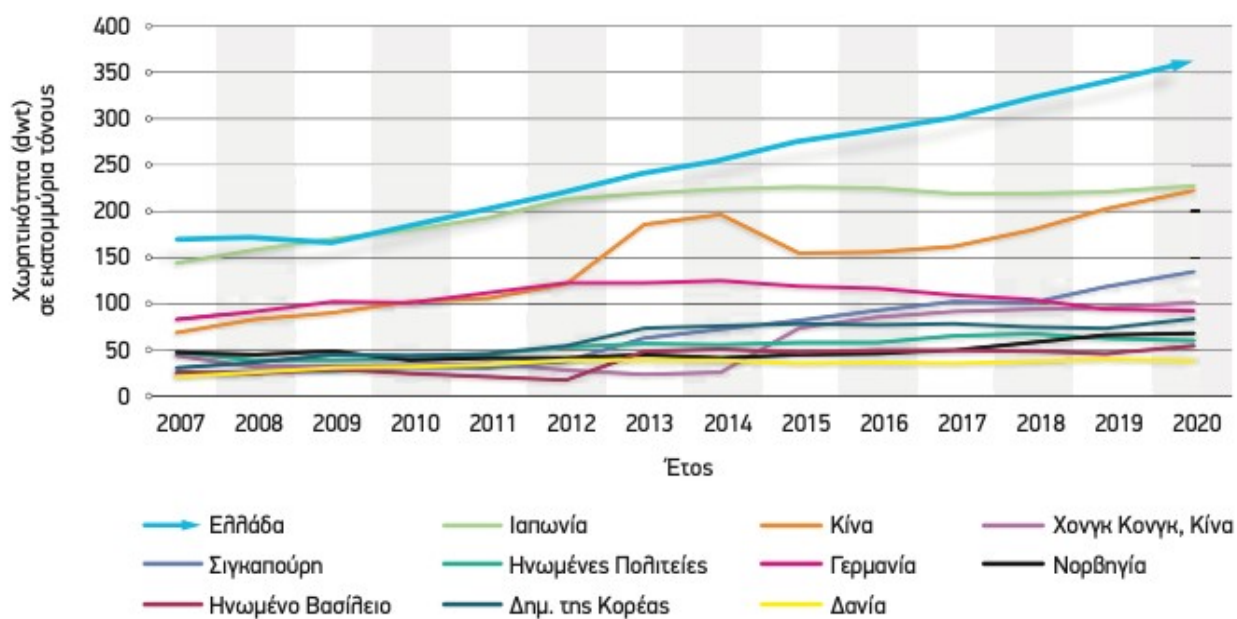
1.1 Η ανάπτυξη της ελληνικής ναυτιλίας τα τελευταία 40 χρόνια

Οι Έλληνες εφοπλιστές ήταν αισιόδοξοι το 1976, όταν δρομολόγησαν παραγγελίες για νέα πλοία, ενώ η κρίση χτυπούσε κατ' εξοχήν τα δεξαμενόπλοια. Μέχρι το 1979 κατείχαν 5000 πλοία χωρητικότητας 53 εκατομμυρίων τόνων dead weight παρόλο που οι ρυθμοί ανάπτυξής τους τότε ήταν χαμηλοί. Η εγχώρια ναυτιλία διέθετε δεξαμενόπλοια με χαμηλότερη χωρητικότητα το 2^ο εξάμηνο του 1981, έναντι ξηρών φορτίων, Και δεδομένου ότι πέρασαν 2 χρόνια μεταξύ των ενεργειακών κρίσεων (1974-75, 1979-1980) και της κρίσης του ξηρού φορτίου, οι Έλληνες εφοπλιστές είχαν κάποιο χρόνο να προετοιμαστούν και να αντιμετωπίσουν τη νέα επικείμενη κρίση, η οποία έμελλε να είναι σοβαρή με διάρκεια άνω των έξι χρόνων. Περίπου 100 μικρές ελληνικές ναυτιλιακές εταιρείες χρεοκόπησαν στα χρόνια αυτά όπως και η ναυτιλιακή εταιρεία Sanko της Ιαπωνίας, κατανοώντας λανθασμένα τους κύκλους ναυτιλίας (Stopford, 2009).

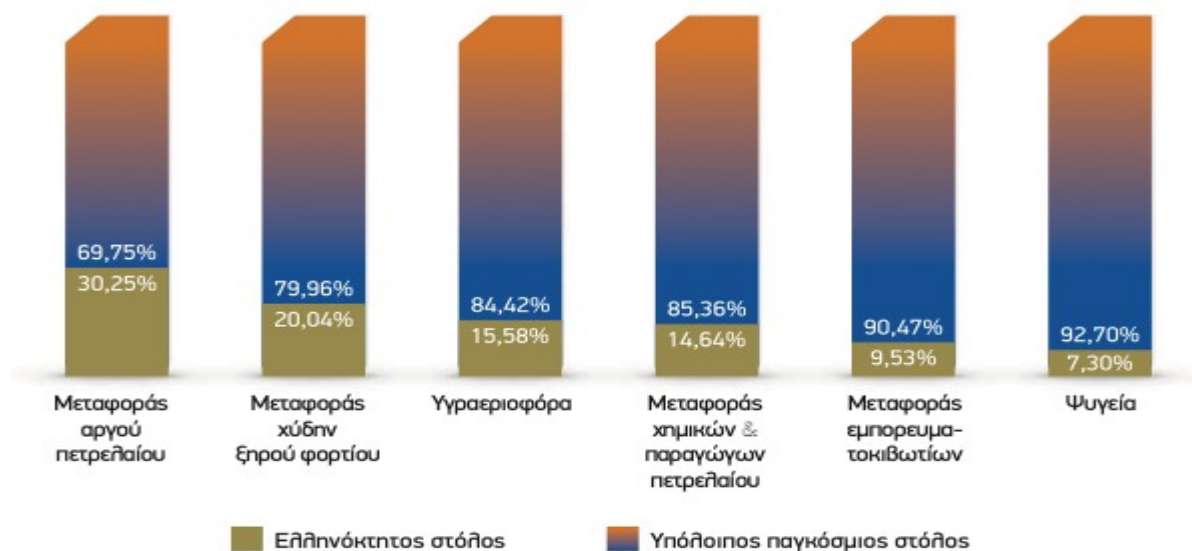
1.2 Η ανάπτυξη της ελληνικής ναυτιλίας τα τελευταία χρόνια

Η Ελλάδα παραμένει η μεγαλύτερη ναυτιλιακή δύναμη παγκοσμίως: Με στόλο 4.901 πλοίων, οι Έλληνες πλοιοκτήτες ελέγχουν το 19,42% της παγκόσμιας χωρητικότητας σε τόνους deadweight (dwt). Ο ελληνόκτητος στόλος, το 2020, αυξήθηκε περισσότερο από 4%, με αποτέλεσμα να φτάνει, τα 364 εκατομμύρια τόνους dwt. (Διάγραμμα 1). Η ελληνική ναυτιλία αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου, καθώς οι Έλληνες πλοιοκτήτες ελέγχουν το 30,25% του παγκόσμιου στόλου δεξαμενοπλοίων, το 14,64% του παγκόσμιου στόλου μεταφοράς χημικών και παραγώγων πετρελαίου, το 15,58% του παγκόσμιου στόλου υγραεριοφόρων (LNG / LPG), το 20,04% του παγκόσμιου στόλου μεταφοράς χύδην ξηρού φορτίου και το 9,53% του παγκόσμιου στόλου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2 (Ενωση Ελλήνων Εφοπλιστών, 2021).

Διάγραμμα 1. Παγκόσμιος Στόλος – Πλοιοκτησία ανά τον κόσμο. Πηγή: UNCTAD – Maritime transport, 2007-2020



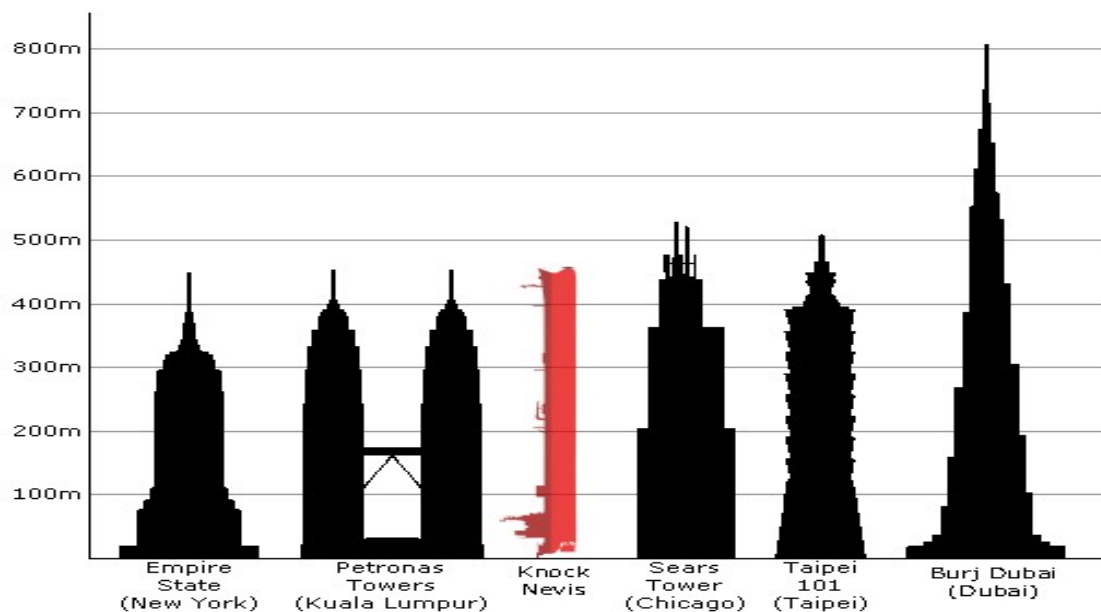
Διάγραμμα 2. Ποσοστό Ελληνόκτητου στόλου σε σχέση με τον παγκόσμιο στόλο ανα τύπο πλοίου. Πηγή: HIS Global Ltd



Κεφάλαιο δεύτερο

Τεχνολογική Εξέλιξη Δεξαμενοπλοίων

Για αρκετές δεκαετίες, ο βασικός τρόπος σχεδίασης και γενικότερα η ιδέα κατασκευής των δεξαμενοπλοίων παραμένει αναλλοίωτη με μικρές διαφοροποιήσεις. Η εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων και των ηλεκτρονικών υπολογιστών συνέβαλαν σημαντικά στη βελτιστοποίηση της μεταλλικής κατασκευής ως προς το βάρος, την αντοχή, την μεταφορική ικανότητα αλλά και την ταχύτητα. Πλέον τα ναυπηγεία μπορούν να κατασκευάσουν τα πλοία σύμφωνα με τις ακριβείς απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις, δίνοντας απλά τα παρακάτω δεδομένα: ταχύτητα, μεταφορική ικανότητα, κύκλος ζωής και τυχόν λιμένες φόρτο - εκφόρτωσης με περιορισμό πλάτους ή/και βυθίσματος. Όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 1, οι αυξανόμενες απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου σε πετρέλαιο, οδηγούν στην συνεχή αύξηση των μεγεθών των νέων πλοίων ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες.

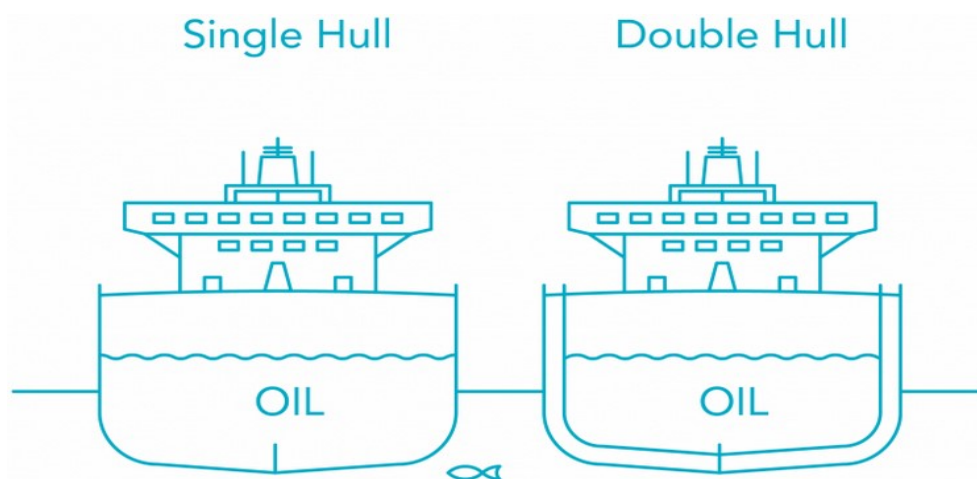


Εικόνα 1. Σύγκριση σύγχρονου Δ/Ξ με τα υψηλότερα κτήρια στο κόσμο.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tanker-size-comparison.png>

Ωστόσο, οι τελευταίες εξελίξεις από διεθνείς κανονισμούς ασφάλειας με θεμέλιο το ατύχημα του πλοίου Exxon Valdez της εταιρείας Exxon Mobil, όπου στις 24 Μαρτίου 1989 προσέκρουσε σε ύφαλο στον κόλπο της Αλάσκας με αποτέλεσμα να απελευθερωθούν 10,8 εκατομμύρια γαλόνια πετρελαίου μολύνοντας 1300

τετραγωνικά μίλια ακτογραμμής, οδήγησαν στην αντικατάσταση των πλοίων μονής γάστρας σε νέα πλοία με διπλή γάστρα.

Η έρευνα του ατυχήματος απέδωσε την ευθύνη σε ανθρώπινο λάθος καθώς οι ιδιαιτερότητες της περιοχής ήταν γνωστές στον καπετάνιο του πλοίου. Η Ακτοφυλακή των ΗΠΑ και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είχε συζητήσει στο παρελθόν την εφαρμογή της διπλής γάστρας (double hull) για αρκετά χρόνια, αλλά υπήρχαν ανησυχίες σχετικά με τη συνολική ασφάλεια ενός τέτοιου μέτρου. Το Κογκρέσο μετά το ατύχημα, με ένα νομοσχέδιο το οποίο είχε ευρεία υποστήριξη, επέβαλε την κατασκευή των πλοίων με διπλή γάστρα (double hull) για τα νέα δεξαμενόπλοια. Συνεπώς οι ΗΠΑ, με την εφαρμογή της νομοθεσίας OPA 90 (oil pollution act), επέβαλαν οι νέες κατασκευές να περιέχουν περιμετρικά των δεξαμενών φορτίου, δεξαμενές θαλάσσιου έρματος (πλοία διπλού τοιχώματος) ή άλλου τύπου δεξαμενές εκτός των δεξαμενών φορτίου ή καυσίμων με αποτέλεσμα να μειώνεται άμεσα η μεταφορική ικανότητα των πλοίων. Ακόμη επιβάλλονται χρονικές προθεσμίες στα υπάρχοντα πλοία για την μετασκευή τους, ώστε να τηρούνται οι προϋποθέσεις που έχουν θεσμοθετηθεί. Στην εικόνα 2 φαίνεται η κατασκευαστική διαφορά μεταξύ πλοίου μονού και διπλού τοιχώματος (<https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-oil-pollution-act>).

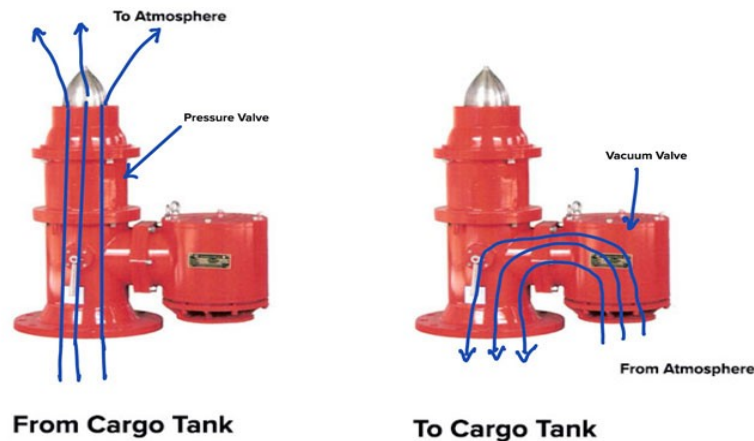


Εικόνα 2. Τυπική Μορφή Πλοίου μονής και διπλής γάστρας. Πηγή: <https://clearseas.org/en/blog/double-hulls/>

Ακολούθησαν επίσης και άλλες καινοτομίες οι οποίες επηρέασαν σημαντικά την ασφάλεια και την αποδοτικότητα των διαδικασιών που εφαρμόζουν τα σύγχρονα δεξαμενόπλοια, όπως αυτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. P/V Valves – Pressure / Vacuum Valves

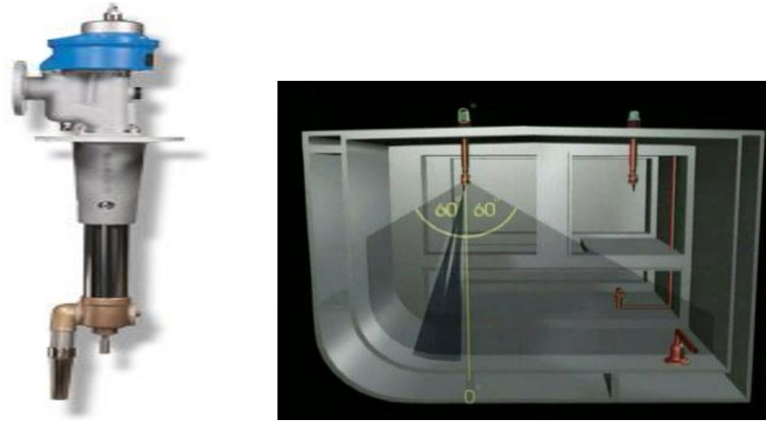
Ο εξαερισμός των δεξαμενών πετρελαίου πραγματοποιείται από μία γραμμή που φέρει στην άκρη της επιστόμια βαλβίδων πίεσης / εκτόνωσης (Pressure / Relief Valves – P/V Valves), τα οποία είναι μηχανικά αυτοματοποιημένα. Έτσι, κατά την φόρτωση του πλοίου, ο όγκος της κενής δεξαμενής γεμίζει με φορτίο, ο αέρας που βρίσκεται σε αυτή πρέπει να ελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, οπότε η ενεργοποίηση των βαλβίδων βοηθά να αποφευχθεί τυχόν πίεση της δεξαμενής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός φόρτωσης. Αντίστοιχα και στην διαδικασία εκτόνωσης, η βαλβίδα προβλέπεται να ενεργοποιηθεί εάν δημιουργηθεί κατά την εκφόρτωση του πλοίου κενό στη δεξαμενή, ώστε ο αέρας που περισσεύει, να εισαχθεί μέσα σε αυτή όπως φαίνεται στην εικόνα 3 (<https://www.iso.org/standard/74708.html>).



Εικόνα 3. Βασική αρχή λειτουργίας Βαλβίδων Πίεσης / Εκτόνωσης. Πηγή
<https://www.myseatime.com/blog/detail/primary-and-secondary-means-of-venting>

2. Μηχανήματα Πλύσης Δεξαμενών Πετρελαίου

Με την πάροδο των ετών υιοθετήθηκε η διαδικασία πλύσης των δεξαμενών φορτίων με αργό πετρέλαιο. Η διαδικασία περιλαμβάνει το ίδιο το φορτίο που μεταφέρει το πλοίο. Πιο συγκεκριμένα στα τελευταία στάδια εκφόρτωσης του πλοίου, ένα μικρό ποσοστό του φορτίου περίπου 15-20% ανακυκλοφορείται και προωθείται σε μόνιμα ή φορητά μηχανήματα υψηλής πίεσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4, που στοχεύουν βαθμιαία σε όλες της επιφάνειές της δεξαμενής ώστε όλα τα κατάλοιπα του αργού πετρελαίου που έχουν δημιουργηθεί να διαλύονται και να εξέρχονται από τη δεξαμενή με το εναπομείναν φορτίο (IMO Resolution A.497(XII)).



Εικόνα 4. Μηχανήματα πλήσης Δεξαμενών Πετρελαίου. Πηγή:
https://www.geocities.ws/icts_papers/Papers/Stojan,%20Drazic,%20Antonic.pdf

3. Σύστημα Αδρανούς Αερίου (INERT GAS SYSTEM)

Στις αρχές του 1980, λόγω των συχνών ατυχημάτων στα δεξαμενόπλοια, με μεταφορική ικανότητα 100.000 DWT και άνω, καθιερώθηκε από την SOLAS RESOLUTION A.418(XI) REVISED REGULATION 62 OF CHAPTER II-2 η εγκατάσταση IGS (Inert Gas Systems) ή αλλιώς Σύστημα αδρανούς αερίου. Οι τροποποιήσεις αυτές, που τέθηκαν σε ισχύ το 1981, μείωσαν το όριο σε 20.000 DWT.

Σύμφωνα με τις παραπάνω τροποποιήσεις της SOLAS, οι οποίες ισχύουν από την 1.1.2016, το όριο μειώθηκε περαιτέρω και πλέον απαιτείται, τα δεξαμενόπλοια των 8.000 DWT και άνω, δηλαδή όσα δεξαμενόπλοια είναι κατασκευασμένα μετά την ημερομηνία αυτή, πρέπει να εξοπλίζονται με σύστημα αδρανούς αερίου κατά τη μεταφορά εύφλεκτων φορτίων. Το σύστημα αυτό παρέχει αδρανές αέριο στις δεξαμενές φορτίου και αποτρέπει την δημιουργία εκρηκτικών μιγμάτων αερίου, ώστε να μην μολυνθεί το φορτίο και να είναι διαθέσιμο σε ικανοποιητικό όγκο και πίεση, για να προσαρμοστεί στις συνθήκες λειτουργίας.

Το σύστημα έχει τις εξής, βασικές ομάδες εξοπλισμού:

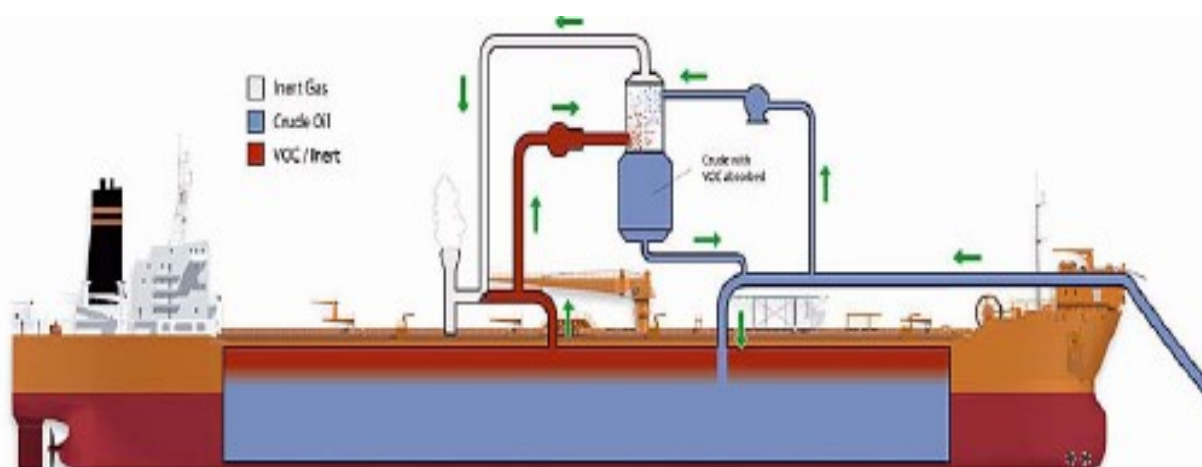
α) Την εγκατάσταση παραγωγής αδρανούς αερίου, όπου παράγεται το αδρανές αέριο. Το αδρανές αέριο προέρχεται από τα καυσαέρια της κύριας μηχανής του πλοίου και των λεβήτων ή από μία ανεξάρτητη γεννήτρια αδρανούς αερίου IGG (Inert Gas Generator) ή από σύστημα αδρανούς αερίου με παραγωγή αζώτου (N-Gas Generator). Η διανομή του παραγόμενου αερίου πραγματοποιείται μέσω των ανεμιστήρων (blowers) στις δεξαμενές φορτίου, με μεγάλη πίεση.

β) Το σύστημα διανομής, που ελέγχει τη μετάβαση του αδρανούς αερίου, μέσα στον απαραίτητο χρόνο, στις κατάλληλες δεξαμενές φορτίου. Η οπισθοροή των

αέριων υδρογονανθράκων από τις δεξαμενές φορτίου αποτρέπεται από το deck water seal και την ανεπίστροφη βαλβίδα.

Το σύστημα αδρανούς αερίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3, έχει σκοπό να διοχετεύει με αδρανές αέριο, τις δεξαμενές, ώστε να μειώνει σε αυτές το οξυγόνο, σε ποσοστό κάτω από 8% κατά όγκο στην ατμόσφαιρα διατηρώντας την ατμόσφαιρα της δεξαμενής μη εκρηκτική. Η δεξαμενή διατηρεί μόνιμα μια θετική πίεση, χωρίς η πίεση αυτή να υπερβαίνει την πίεση δοκιμής της δεξαμενής. Παρεμποδίζει την είσοδο του ατμοσφαιρικού αέρα στις δεξαμενές και απελευθερώνει τις κενές δεξαμενές από τα αέρια των υδρογονανθράκων, έτσι ώστε τυχόν επόμενοι χειρισμοί να μην δημιουργούν εύφλεκτη ατμόσφαιρα (Solas Resolution A.418(xi)).

*Διάγραμμα 3. Σχέδιο συστήματος αδρανούς αερίου και πτητικών οργανικών ενώσεων.
Πηγή: IMO MEPC.1/ CIRC.680*



2.1 Τύποι Δεξαμενοπλοίων

Τα πετρελαιοφόρα δεν περιορίζονται μόνο σε έναν συγκεκριμένο τύπο. Διάφοροι τύποι πετρελαιοφόρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία μεταφοράς υγρού χύδην φορτίου. Η διάκριση και η ταξινόμηση των δεξαμενόπλοιων μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια, όπως είναι τα εξής:

- A. Με βάση τον τύπο πλοίου / φορτίο
- B. Με βάση το μέγεθος του πλοίου

A. Ταξινόμηση με βάση τον τύπο πλοίου / φορτίου

1. Πλοία μεταφοράς πετρελαίου

Τα πετρελαιοφόρα έχουν ως αποστολή να μεταφέρουν πετρέλαιο και υποπροϊόντα του. Με τον όρο αυτό αναφέρονται τα πλοία που μεταφέρουν, από αργό πετρέλαιο έως εξευγενισμένα παράγωγά του.

Τα περισσότερα από αυτά, χρησιμοποιούνται από εμπόρους εισαγωγής ή εξαγωγής πετρελαίου, αλλά και από κυβερνήσεις. Λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους, η μεταφορά προϊόντων πετρελαίου από ένα τόπο σε έναν άλλο, έχει γίνει οικονομικότερη.

Τα πετρελαιοφόρα κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικούς τύπους:

- Στα δεξαμενόπλοια προϊόντων (PRODUCT CARRIER), που είναι μικρότερου μεγέθους, συγκριτικά με τα δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου, και οι δεξαμενές τους, επικαλύπτονται με κατάλληλες εποξικές επιστρώσεις (epoxy paints), βοηθώντας στην ευκολία καθαρισμού, των δεξαμενών.
- Στα δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου (CRUDE OIL CARRIER) που έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ακατέργαστου αργού πετρελαίου από το σημείο παραγωγής ή παραλαβής τους στα διυλιστήρια πετρελαίου (Δεμερούτη – Μυλωνοπούλου, 2010).

2. Πλοία μεταφοράς υγραερίου ή υγροποιημένων γημικών αερίων (Liquified Petroleum Gas Carrier)

Τα πλοία αυτά είναι ειδικά σχεδιασμένα για τη μεταφορά διαφορετικών μορφών αερίων. Οι συγκεκριμένοι τύποι σκαφών είναι περισσότερο προηγμένοι τεχνολογικά σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο τύπο, όπως για παράδειγμα τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulk carriers), τα πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια (Container vessels) και άλλα είδη δεξαμενόπλοιων. Είναι κυρίως χτισμένα στα ναυπηγεία της Κορέας ή της Ιαπωνίας καθώς οι χώρες αυτές είναι πρωτοπόρες στην κατασκευή πλοίων. Διαθέτουν δεξαμενές τύπου "C", οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ανθρακούχο χάλυβα με εμβληματική πίεση σχεδιασμού 18 bar. Δεν έχουν θερμικές μονώσεις ή άλλες ειδικές εγκαταστάσεις. Το φορτίο τους είναι

δυνατόν να μεταφερθεί απευθείας από τις αντλίες ή με δικό τους συμπιεστή. Οι συγκεκριμένοι τύποι σκαφών έχουν συνήθως μικρότερο μέγεθος, καθώς οι δεξαμενές που διαθέτουν είναι εξαιρετικά βαριές λόγω της πίεσης σχεδιασμού (Δεμερούτη – Μυλωνοπούλου, 2010).

3. Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (Liquified Natural Gas carrier)

Τα LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο) carrier είναι τα δεξαμενόπλοια που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου, όπως δηλώνει και η ονομασία τους. Οι συγκεκριμένοι τύποι δεξαμενόπλοιων χρειάζονται κατάλληλους χειρισμούς για την ασφάλεια λόγω του φορτίου που μεταφέρουν. Οι δεξαμενές που φέρουν αποτελούνται από ένα στρώμα το οποίο στηρίζεται στη μόνωση. Το υλικό έχει μονωτικές ιδιότητες και μειώνει τις θερμικές διαστολές αφού το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε θερμοκρασία -162°C . Στατιστικά, υπάρχουν περίπου 193 δεξαμενόπλοια LNG που βρίσκονται σε λειτουργία. Τα δεξαμενόπλοια LNG έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την εμπορία μεγάλου όγκου LNG. Τα πλοία αυτού του είδους παρέχουν τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου $125.000\text{ m}^3 - 135.000\text{ m}^3$ και έχουν μέση διάρκεια ζωής περίπου 20-25 χρόνια (Δεμερούτη – Μυλωνοπούλου, 2010).

4. Δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών φορτίων

Τα χημικά δεξαμενόπλοια είναι εκείνα τα πλοία που μεταφέρουν χημικά, σε διάφορες μορφές με ειδικό σχεδιασμό, για να διατηρούν τη συνοχή των χημικών που μεταφέρουν πάνω τους. Το μέγεθός τους κυμαίνεται συνήθως από 5000 DWT – 35000 DWT, το οποίο είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τα πετρελαιοφόρα, λόγω της φύσης του φορτίου που προορίζονται να μεταφέρουν και του περιορισμού τους λόγω του μεγέθους των λιμένων και των ακτών.

Διαθέτουν διάφορες δεξαμενές, που προστατεύονται με εξειδικευμένες επικαλύψεις, όπως φαινολικές ή εποξικές ή δεξαμενές που είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο τύπος επίστρωσης των δεξαμενών καθορίζει τον τύπο του κατάλληλου φορτίου που μπορεί να μεταφερθεί και για τον λόγο αυτό οι κατασκευαστές των επιστρώσεων διαθέτουν καταλόγους στους οποίους

παρουσιάζεται η συμβατότητα διαφόρων επιστρώσεων με τα μεταφερόμενα φορτία. Τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών φορτίων, ταξινομούνται σε 3 κατηγορίες σύμφωνα με τον τύπο τους:

ΤΥΠΟΣ 1 (IMO TYPE 1)

Στον τύπο 1, ανήκουν τα φορτία που εγκυμονούν κινδύνους για το περιβάλλον και την ασφάλεια των χειριστών. Για το λόγο αυτό απαιτούν προληπτικά μέτρα για την αποφυγή τυχόν διαρροών.

ΤΥΠΟΣ 2 – (IMO TYPE 2)

Στο τύπο 2, ανήκουν τα χημικά φορτία που εγκυμονούν πολύ σοβαρούς κινδύνους για το περιβάλλον και την ασφάλεια των χειριστών, σε σύγκριση με τα φορτία τύπου 1. Στο συγκεκριμένο τύπο, απαιτούνται μέγιστα προληπτικά μέτρα για την αποφυγή διαρροών.

ΤΥΠΟΣ 3 – (IMO TYPE 3)

Τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών φορτίων με μικρότερες επιπτώσεις, για το περιβάλλον και την ασφάλεια απαιτούν μέτριο βαθμό προστασίας. Σε περίπτωση καταστροφής μπορούν να μεταφέρονται με τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών φορτίων τύπου 3. Επειδή ο όγκος του φορτίου IMO Type 1 είναι περιορισμένος, τα περισσότερα από τα χημικά δεξαμενόπλοια αυτού του τύπου, είναι IMO Type 2 ή Type 3 (Δεμερούτη – Μυλωνοπούλου, 2010).

5. Δεξαμενόπλοια υδρογόνου (LH2 Carrier)

Στην Ιαπωνία, η μείωση των εκπομπών CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) αλλά και η ενεργειακή ασφάλεια είναι μείζονα κοινωνικά ζητήματα μετά το ατύχημα στη Φουκουσίμα. Συνεπώς η Ιαπωνία θέλοντας να εισάγει υγροποιημένο υδρογόνο αποφάσισε, σε συνεργασία με τον Ιαπωνικό Νηογνώμονα (Nippon Kaiji Kyokai), την μελέτη, την κατασκευή αλλά και την πίεση για θέσπιση αντίστοιχων κανονισμών αφού το πρώτο δεξαμενόπλοιο του είδους ολοκλήρωσε τις δοκιμές του στα τέλη του 2020. Τα δεξαμενόπλοια υδρογόνου είναι ειδικά σχεδιασμένα δεξαμενόπλοια, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υγροποιημένου αερίου υδρογόνου και δεν

μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς. Η βιομηχανία της Kawasaki ήταν η πρώτη που σχεδίασε ένα δεξαμενόπλοιο υδρογόνου (Shoji Kamiya et al, 2014).

6. Ειδικοί τύποι Δεξαμενόπλοιων

Στους ειδικούς τύπους δεξαμενόπλοιων, ανήκουν όλα τα δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν υγρά φορτία, εκτός αυτών που μεταφορέουν πετρέλαιο και παράγωγα αυτού.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα παρακάτω είδη (DNV-GL Rules, 2016):

Δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγρής ασφάλτου / πίσσας (Asphalt Carrier)

Δεξαμενόπλοια μεταφοράς χυμού (Juice Carrier)

Δεξαμενόπλοια μεταφοράς κρασιού (Wine Carrier)

Δεξαμενόπλοια μεταφοράς βρώσιμου λαδιού (Edible Oil Carrier)

B. Κατηγοριοποίηση των δεξαμενόπλοιων κατά την κατασκευή του κύτους

Μερικές από τις κατηγορίες δεξαμενόπλοιων είναι οι εξής:

1. ULCC – Ultra large cargo carrier: Έχουν χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου από 320.000 έως 550.000 τόνους

2. VLCC – Very large cargo carrier: Με χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου από 200.000 320.000 τόνους.

3. Suezmax: Έχουν δυνατότητα μεταφοράς 120.000 έως και 199.999 τόνους ακατέργαστου πετρελαίου.

4. Aframax: Τα δεξαμενόπλοια αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στη Μεσόγειο, τη Μαύρη Θάλασσα και την Κίνα. Διαθέτουν χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου 80.000 - 119.999 τόνων.

5. Panamax: Αποτελεί την ονομασία των δεξαμενόπλοιων που μπορούν να διέλθουν από το κανάλι του Παναμά κι έχουν μεταφορική ικανότητα από 55.000 - 79.999 τόνων πετρελαίου.

6. Large Range 2 – LR2: Έχουν μεταφορική ικανότητα 80.000 – 159.999 τόνων προϊόντων πετρελαίου.

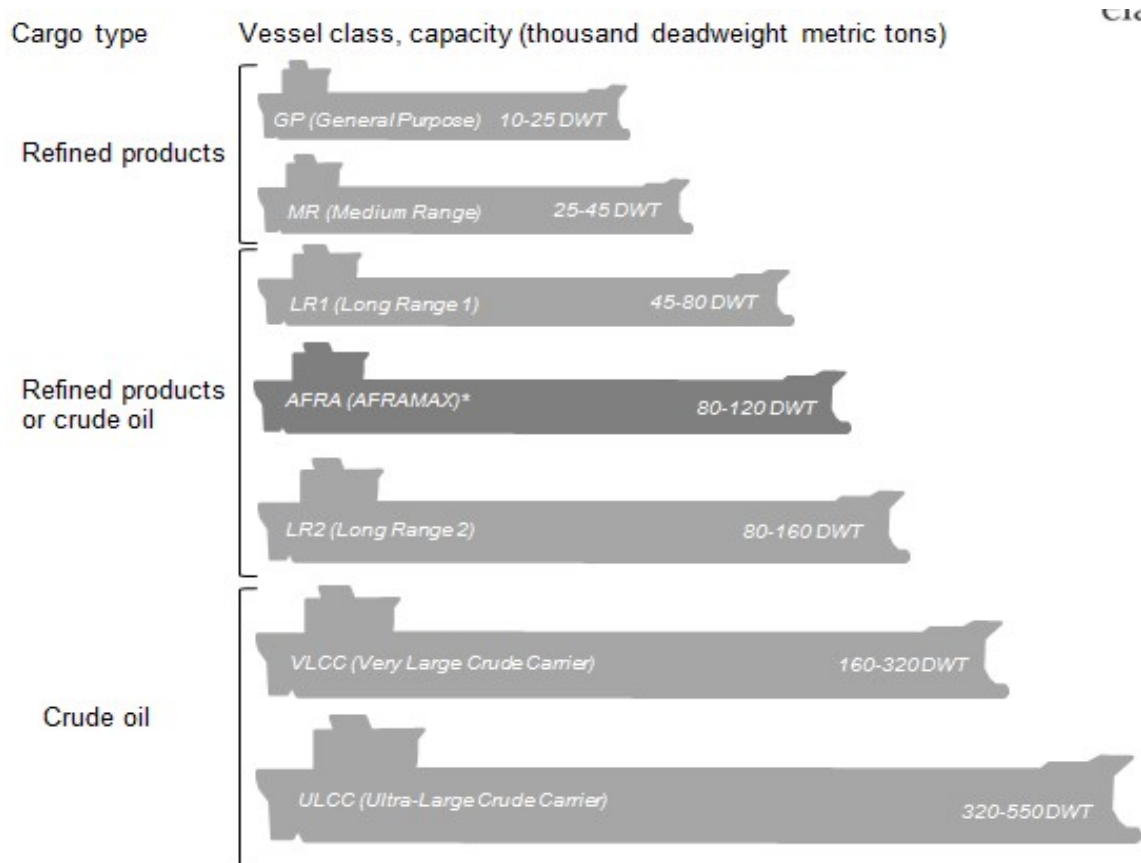
7. Large Range 1 – LR1: Διαθέτουν δυνατότητα μεταφοράς 50.000 – 79.999 τόνων παραγώγων πετρελαίου.

8. Medium Range Vessels: Έχουν ολική χωρητικότητα μεταφοράς 25.000 – 49.999 τόνων προϊόντων πετρελαίου.

9. General Purpose Vessels: Διαθέτουν μεταφορική ικανότητα 16.500 – 24.000 τόνων παραγώγων πετρελαίου (www.eia.gov/todayinenergy).

Στον παρακάτω πίνακα 1, κατατάσσονται οι τύποι και τα μεγέθη των πλοίων σε συνάρτηση με τα φορτία προϊόντων πετρελαίου που μεταφέρουν.

Πίνακας 1. Κατάταξη τύπων δεξαμενοπλοίων ανά μέγεθος και φορτίο.



Πηγή: www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=17991

Κεφάλαιο τρίτο

Το φαινόμενο της διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων

Η διάβρωση που εμφανίζεται σε εν λειτουργία πλοία, δημιουργεί μια σειρά προβλημάτων που καθορίζονται από πολλούς και διαφορετικούς, πολύπλοκους τόσο εξωτερικούς παράγοντες (όπως η πλοήγηση σε διαφορετικές περιοχές και διαφορετικές διαδρομές, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, το θαλασσινό νερό κ.λπ.) όσο και εσωτερικούς παράγοντες (η διάταξη των δεξαμενών έρματος, οι χώροι ξηρού φορτίου, οι συνθήκες λειτουργίας κ.λπ.) (Butler et al, 1966).

Οι ραγδαίες και καθοριστικές εξελίξεις, τα τελευταία 20 χρόνια στη ναυτιλία, αφορούν το σχεδιασμό, την τεχνολογία των πλοίων αλλά και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Ωστόσο, οι αλλαγές αυτές δεν ήταν πάντα αποτελεσματικές για την αντιμετώπιση του φαινομένου της διάβρωσης των πλοίων. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του πάχους των στοιχείων κατασκευής του πλοίου, και κατ' επέκταση τη μείωση τόσο της τοπικής όσο και της συνολικής αντοχής της κατασκευής. Συνεπώς η πλημμελής συντήρηση των παλαιών πλοίων θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφικές απώλειες. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος και έγκαιρος εντοπισμός των διαβρωμένων ελασμάτων είναι πολύ σημαντικός, διότι τυχόν αστοχίες στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου, λόγω διάβρωσης, επιφέρουν δυσμενείς συνέπειες. Συγκεκριμένα, μπορούν να επιφέρουν διαρροή πετρελαίου φορτίου, ρύπανση, τοπική δομική βλάβη ή δαπανηρές επισκευές κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του πλοίου, της κατασκευής, της συντήρησης και επιθεώρησης του πλοίου απαιτείται να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επίδραση της διάβρωσης στην κατασκευή (Herring et al, 1981).

Πολλά και διαφορετικά υλικά χρησιμοποιούνται τόσο για τη κατασκευή του πλοίου όσο και για τα εξαρτήματα, τις σωληνώσεις κ.λπ. Συχνά προκύπτουν προβλήματα διάβρωσης λόγω των υλικών ή των επικαλύψεων που επιλέχθηκαν, καθώς πιθανά να μην είναι κατάλληλα για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Τα δεξαμενόπλοια διπλών τοιχωμάτων, σε συνάρτηση με την αυξημένη ζήτηση μεταφοράς πετρελαιοειδών γίνονται ολοένα μεγαλύτερα και δομικά πιο περίπλοκα. Ο

κατάλληλος σχεδιασμός βελτιώνει σημαντικά τη δομική ακεραιότητα του πλοίου, όμως δημιουργούνται περαιτέρω ζητήματα, όπως δυσκολίες πρόσβασης και επιθεώρησης της μεταλλικής κατασκευής, καθώς και προβλήματα στην εφαρμογή, τη συντήρηση και την επιθεώρηση των επιστρώσεων, αφού οι επιφάνειες που πρέπει να επιθεωρηθούν ή να επικαλυφθούν έχουν συχνά πολύ μεγάλες διαστάσεις. Επίσης, οι δεξαμενές έρματος που δημιουργούνται από την σύγχρονη πλέον κατασκευή των πλοίων επιδρά αρνητικά στη συντήρηση του πλοίου (Herring et al, 1981).

Η χρήση ανοξείδωτου χάλυβα ως κύριο στοιχείο κατασκευής, κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες, εξασφαλίζουν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με τους κοινούς δομικούς χάλυβες πλοίων, σε θαλάσσιο περιβάλλον ή σε διαβρωτικά φορτία, όμως, αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα της σύζευξης διαφορετικών υλικών και η συντήρηση τους είναι πιο απαιτητική. Ακόμη, είναι απαραίτητο να επιβεβαιώνεται συνεχώς η συμβατότητα των φορτίων με το υλικό και το κόστος είναι πολλαπλάσιο απ' ότι για την κατασκευή όμοιου πλοίου με κοινό χάλυβα.

Γενικά, ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέγει τα υλικά λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και το κατάλληλο επίπεδο αντοχής σε σχέση με τη διάβρωση, τις προβλεπόμενες απαιτήσεις συντήρησης και επομένως με βάση το κόστος και το όφελος.

Ο Chandler (1984) εισήγαγε έξι στοιχεία τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή υλικού κατασκευής, ως εξής:

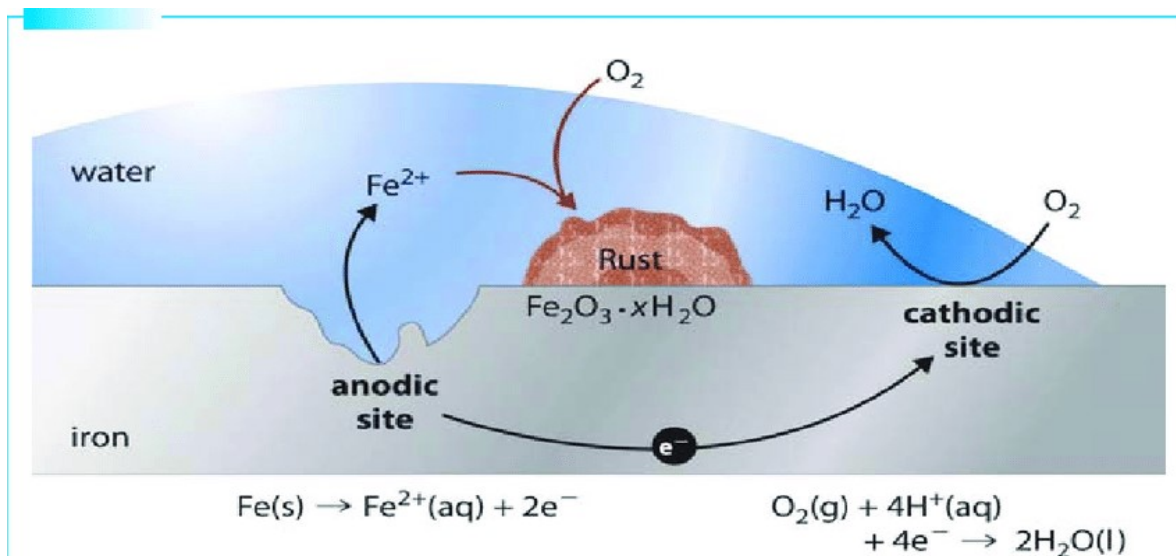
- Υλικό
- Κατασκευή και μεταφορά στο ναυπηγείο
- Εγκατάσταση
- Ποιοτικός έλεγχος και δοκιμές
- Επιθεώρηση
- Συντήρηση και επισκευή

3.1 Μηχανισμός Διάβρωσης

Με τον όρο διάβρωση εννοούμε την αλλοίωση που δημιουργείται σε ένα υλικό λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό εκτίθεται. Πρακτικά το μέταλλο αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον που εκτίθεται με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται οι ιδιότητες του και η λειτουργία, συνεπώς και η λειτουργία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Ο όρος «διάβρωση» αφορά τη διεργασία και όχι το αποτέλεσμα, που είναι η φθορά ή η ζημιά που προκαλείται από τη διάβρωση. Με την έννοια της διάβρωσης ως διεργασία, είναι συνδεδεμένη η ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης, της δημιουργούμενης φθοράς αλλά και η έκταση και η φύση της φθοράς που αναπτύσσεται σε σχέση με τη λειτουργία του προσβαλλόμενου συστήματος (Ντάφλου, 2012).

Η διάβρωση των μετάλλων δημιουργεί μείωση του πάχους στα επιμέρους τμήματα του πλοίου με αποτέλεσμα την ελάττωση της αντοχής των διαφόρων στοιχείων κατασκευής. Αυτή είναι και η σημαντικότερη αιτία φθοράς της κατασκευής του πλοίου. Ο ανθρακούχος χάλυβας αποτελεί το πιο κοινό υλικό για τις θαλάσσιες κατασκευές, είναι όμως αρκετά δραστικό υλικό όταν χρησιμοποιείται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το θαλασσινό νερό είναι πολύ πιο διαβρωτικό ως μέσο σε σχέση με το γλυκό νερό, καθώς η αλατότητα του νερού αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης. Η διάβρωση προκαλεί υποβάθμιση των μετάλλων και σύμφωνα με τον ορισμό, η διάβρωση αποτελεί την *«καταστροφή ενός μετάλλου από χημική ή ηλεκτροχημική αντίδραση με το περιβάλλον που λειτουργεί»* (Rogers, 1968).

Η χημική διάβρωση είναι ένα αυθόρμητο φαινόμενο, κατά το οποίο δημιουργείται αλλοίωση του μετάλλου, λόγω της αντίδρασης του με διάφορα στοιχεία του περιβάλλοντος. Η ηλεκτροχημική ή γαλβανική διάβρωση, όπως παρατηρείται, στην εικόνα 5, συμβαίνει όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή ενώ βρίσκονται βυθισμένα σε ένα αγώγιμο υγρό, τον ηλεκτρολύτη, όπως το θαλασσινό νερό. Συνεπώς, η άνοδος, που αποτελεί το λιγότερο ευγενές μέταλλο (και είναι το πιο χημικά ενεργό υλικό) υφίσταται έντονη διάβρωση ενώ η κάθοδος (δηλαδή το πιο ευγενές, χημικά αδρανές υλικό) παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη (Παπαευθυμίου, 2017).



Εικόνα 5. Ηλεκτροχημική Διάβρωση και δημιουργία σκουριάς στην επιφάνεια μετάλλου. Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/290559312_Treatise_on_conducting_polymers_for_corrosion_protection_-_Advanced_approach

3.2 Η χρήση του χάλυβα ως ναυπηγικό υλικό

Οι διάφοροι τύποι χαλύβων αποτελούν κράματα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1,5% κατά βάρος. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες μπορούν να περιέχουν μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία κραμάτωσης, ώστε να τροποποιούνται οι φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Η μικροδομή των ναυπηγικών χαλβών, αποτελείται από κόκκους σεμεντίτη (*cementite*), φερρίτη (*ferrite*) και περλίτη (*pearlite*). Ο περλίτης (*pearlite*) αποτελεί ένα από τα κυριότερα συστατικά των ναυπηγικών χαλύβων και αποτελείται από στρώσεις σεμεντίτη και φερρίτη. Γενικά, το ποσοστό του άνθρακα και ο ρυθμός απόψυξης επιδρούν στη μικροδομή, και καθορίζουν την αντοχή και τη σκληρότητα (*hardness*) του χάλυβα (Storch et al, 2007).

Οι χάλυβες, που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη ναυπηγική, χωρίζονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες σύμφωνα με την χημική σύσταση και τις μηχανικές τους ιδιότητες και ειδικότερα το όριο εφελκυσμού. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι: A, B, D και E, με τα γράμματα αυτά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αντοχή τους σε κρούση. Αντίστοιχα κάθε κατηγορία χαλύβων, εκτός της κατηγορίας B, περιέχει και χάλυβες υψηλής αντοχής με υψηλότερες τιμές ορίου διαρροής. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει όλες τις κατηγορίες χαλύβων ανάλογα με το όριο διαρροής και τη θερμοκρασία δοκιμής κρούσης.

Πίνακας 2. Τιμές μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων τύπων ναυπηγικού χάλυβα (πηγή:www.octmetals.com).

Steel Grade	Thickness/mm	Yield point/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	V-type impact test		
					Temperature/°C	Average impact absorption work A_{KV} /J	
						Vertical	Horizontal
A	≤50	≥235	400~490	≥22	-	-	-
B	≤50	≥235	400~490	≥22	0	≥27	≥20
D	≤50	≥235	400~490	≥22	-10	≥27	≥20
E	≤50	≥235	400~490	≥22	-40	≥27	≥20
AH32	≤50	≥315	440~590	≥22	0	≥31	≥22
DH32	≤50	≥315	440~590	≥22	-20	≥31	≥22
EH32	≤50	≥315	440~590	≥22	-40	≥31	≥22
AH36	≤50	≥355	490~620	≥22	0	≥34	≥24
DH36	≤50	≥355	490~620	≥22	-20	≥34	≥24
EH36	≤50	≥355	490~620	≥22	-40	≥34	≥24

3.3 Παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης, είναι η επαφή των αντιδρώντων ουσιών με την μεταλλική επιφάνεια μέσω διάχυσης (*diffusion*), η θερμοκρασία του περιβάλλοντος (αέρα ή νερού), η αγωγιμότητα, το είδος ιόντων, το pH του νερού και το ηλεκτροχημικό δυναμικό. Ο ρυθμός διάβρωσης περιορίζεται με την εφαρμογή αντιδιαβρωτικών επικαλύψεων ή άλλων κατάλληλων τεχνικών προστασίας. Η διαβρωτικότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού, τους κυματισμούς που επικρατούν στην περιοχή πλεύσης του πλοίου και τη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Επιπροσθέτως, οι καιρικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα μία καταιγίδα, επηρεάζουν σημαντικά τη συγκέντρωση των σταγονιδίων νερού που περιέχουν αλάτι στην ατμόσφαιρα, τα οποία επικαθονται στις εκτεθειμένες μεταλλικές επιφάνειες (Soares et al, 2011).

Η παρουσία μηχανικών τάσεων αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα της διάβρωσης. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει ακόμα και θραύση του μεταλλικού στοιχείου (διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση). Ωστόσο, οι μηχανικές ατέλειες, εφόσον υφίστανται, δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις καθιστώντας το έλασμα ευάλωτο στη διάβρωση σε σύγκριση με τα γειτονικά σημεία του όπου υπάρχει μεγαλύτερη επιφανειακή ομαλότητα. Για τον λόγο αυτό τα κομμάτια των μεταλλικών κατασκευών απαιτείται να έχουν κατάλληλα επεξεργασμένο σχήμα, χωρίς επιφανειακές ανωμαλίες (Soares et al, 2005).

3.4 Παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση στις δεξαμενές φορτίου

Το εντονότερο διαβρωτικό περιβάλλον είναι το θαλασσινό νερό καθώς σε αυτό υπάρχουν διαλυμένα άλατα που προκαλούν αυξημένη αγωγιμότητα και φυτικοί και ζωικοί μικροοργανισμοί που προκαλούν ρύπανση και δημιουργούν ανομοιογένεια στην επιφάνεια των υλικών με αποτέλεσμα να αυξάνουν τον ρυθμό της διάβρωσης. Κατά την λειτουργία του, το πλοίο καλείται να ανταπεξέλθει σε πληθώρα φορτίσεων όπως στατικών, δυναμικών, περιοδικών και μη, που οδηγούν στην κόπωση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου και όλα αυτά σε ένα έντονα διαβρωτικό περιβάλλον (Panayotova et al, 2004).

Ο OCIMF (1997) εξέτασε έναν αριθμό περιπτώσεων επιταχυνόμενης διάβρωσης σε δεξαμενές πετρελαίου φορτίου και ο RINA (2004) εξέτασε ορισμένα από τα αίτια που θα μπορούσαν να επιταχύνουν τη διάβρωση, όπως τους διαφορετικούς τρόπους καθαρισμού των δεξαμενών, την αλλαγή θερμοκρασίας λόγω της θέρμανσης δεξαμενών αργού πετρελαίου και του αδρανούς αερίου κτλ. Ωστόσο, δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως, οι διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας της δεξαμενής, η πίεση λειτουργίας των μηχανημάτων καθαρισμού των δεξαμενών και η ποιότητα του αδρανούς αερίου, που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης των δεξαμενών φορτίου. Σκόπιμο θα ήταν να μελετηθούν εκτενέστερα, προκειμένου να καθοριστούν τα αποτελέσματα διάβρωσης αλλά και οι διαφορετικές συμπεριφορές που προκαλούν.

Παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση δεξαμενών φορτίου:

- είδος φορτίου,
- υψηλή περιεκτικότητα σε θείο,
- συχνότητα απομάκρυνσης ιζημάτων,
- έλλειψη επικάλυψης,
- παρουσία νερού,
- σχεδιασμός και δομική διάταξη της δεξαμενής,
- ατμοσφαιρικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία),
- καθαρισμός δεξαμενής φορτίου με χρήση του φορτίου.

Κοινοί παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου και έρματος:

- υλικό κατασκευής,
- προσβολή από μικροοργανισμούς,
- συσσώρευση λάσπης ,
- υψηλή υγρασία και θερμοκρασία.

Επίσης, επιτάχυνση της διάβρωσης της κατασκευής δημιουργούν οι ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

Μη αποτελεσματική γείωση ηλεκτρικού εξοπλισμού

Η μη αποτελεσματική γείωση ηλεκτρικού εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε κυκλοφορία του ρεύματος στη μεταλλική κατασκευή αυξάνοντας την πιθανότητα επέκτασης της διάβρωσης βελονισμού στα ελάσματα των δεξαμενών φορτίου (OCIMF, 1997).

Ποιότητα αδρανούς αερίου

Το αδρανές αέριο, σε χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου, επιβραδύνει το ρυθμό διάβρωσης των ελασμάτων στις δεξαμενές φορτίου ωστόσο για την εξάλειψη του φαινομένου απαιτείται η συγκέντρωση οξυγόνου να κυμαίνεται σε ποσοστό λιγότερο του 1% κατ' όγκο. Επιπλέον, οι θειούχες ενώσεις και η αιθάλη που συναντώνται στα καυσαέρια, εάν δεν αφαιρεθούν κατά τη διάρκεια πλύσης, οδηγούν στην ενίσχυση του φαινομένου της διάβρωσης αλλά και στην υποβάθμιση της ποιότητας του αδρανούς αερίου με αποτέλεσμα την έξαρση του φαινομένου στον κενό χώρο της δεξαμενής, μεταξύ φορτίου και ανωτέρου τμήματος, όπου η υπάρχουσα υγρασία τείνει να συμπυκνώνεται (OCIMF, 1997).

Διαφορά θερμοκρασίας

Η διαφορά θερμοκρασίας σε ένα μεταλλικό στοιχείο προκαλεί την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού μεταξύ θερμής και ψυχρής ζώνης. Η ψυχρή ζώνη θεωρείται πιο ηλεκτροθετική από τη θερμή και διαβρώνεται πιο έντονα. Κατά την εκφόρτωση του πλοίου, οι δεξαμενές φορτίου παραμένουν σε υψηλές θερμοκρασίες μέχρι να κρυσώσουν από τον ατμοσφαιρικό αέρα ή από τις παρακείμενες δεξαμενές έρματος που γεμίζουν με θαλασσινό νερό. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, το φαινόμενο της διάβρωσης ενισχύεται και ο ρυθμός του αυξάνεται (μπορεί και να διπλασιάζεται). (OCIMF, 1997). Ο Pollard (1991) μελέτησε τους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης στα δεξαμενόπλοια, ενώ αντιστοιχες μελέτες σε άλλου τύπου πλοία πραγματοποιήθηκαν από τους Viner και Tozer (1985). Οι παραπάνω συγγραφείς συμφωνούν ότι η διάβρωση επιταχύνεται από την αλατότητα του θαλασσινού νερού, τη θερμοκρασία, την περιβαλλοντική ρύπανση, την ταχύτητα πλεύσης, την κατανομή των ρευμάτων, τη συχνότητα καθαρισμού των δεξαμενών, την υγρασία, τη διαθεσιμότητα οξυγόνου, τους τύπους του φορτίου, τα υπολείμματα φορτίου και τη μηχανική τριβή.

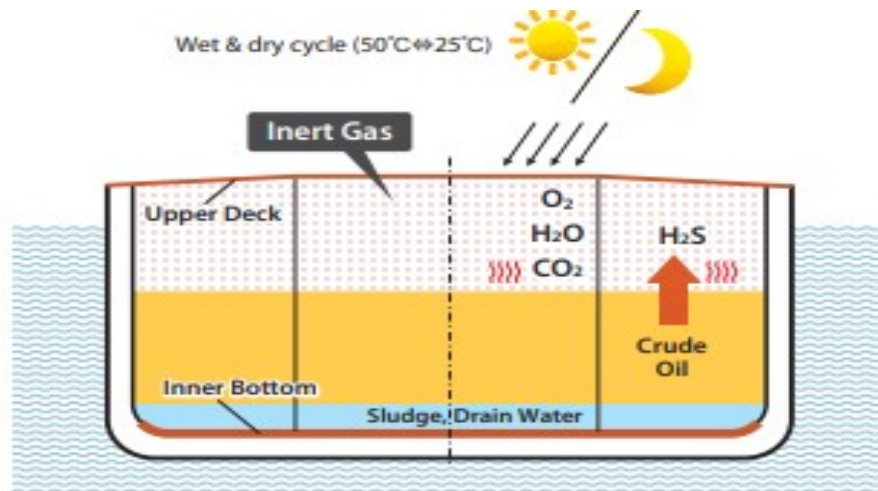
Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, είναι δυνατό να μελετηθούν τρεις βασικές ομάδες παραγόντων που επηρεάζουν τη διάβρωση: η ατμόσφαιρα, το θαλάσσιο περιβάλλον και ορισμένοι ειδικοί παράγοντες. Ο εντοπισμός πολλών σημαντικών παραγόντων και η γνώση των συνθηκών ναύλωσης του δεξαμενόπλοιου αποτελούν προϋπόθεση για την πλήρη κατανόηση της διαδικασίας της διάβρωσης καθώς και την πρόβλεψη εμφάνισής της.

Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, στο οποίο ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται με τη συμβολή των βιολογικών, φυσικών και χημικών παραγόντων. Βασικός βιολογικός παράγοντας είναι τα βακτήρια και η βιομάζα ενώ ως χημικοί παράγοντες θεωρούνται η υψηλή περιεκτικότητα σε αλάτι και οξυγόνο, καθώς και το pH του θαλασσινού νερού. Φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η ταχύτητα κίνησης του νερού και η απώλεια ύλης (Ivošević, 2012; Venkatesan, 2000).

Είναι σαφές ότι παράγοντες που σχετίζονται με τη λειτουργία του πλοίου και την κατασκευή των φορτηγών χύδην έχουν σημαντική επίδραση τόσο στις διάφορες μορφές όσο και στον ρυθμό της διάβρωσης που μπορεί να προκύψει σε δεξαμενές φορτίου, δεξαμενές έρματος ή σε ξηρούς χώρους λόγω ατμοσφαιρικών ή θαλάσσιων συνθηκών. Εκτός από τους προαναφερθέντες θαλάσσιους και ατμοσφαιρικούς

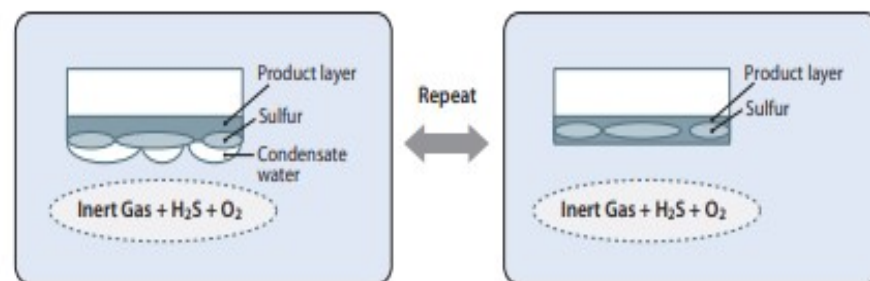
παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση, πρέπει να τονισθούν ιδιαίτερα δύο ευρείες κατηγορίες λειτουργικών παραγόντων που είναι χαρακτηριστικές για την κατασκευή των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικοί λειτουργικοί παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση θεωρούνται ο τύπος, η διαβρωτικότητα και η συχνότητα των μεταβολών του φορτίου. Από την άλλη πλευρά, οι βασικοί εσωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση είναι: η θέση και ο προσανατολισμός των δομικών στοιχείων προστασίας, καθώς επίσης και το εκάστοτε σύστημα προστασίας από τη διάβρωση (Soares et al., 2011; Paik, 2004). Συγκεκριμένα, η αυξανόμενη θέρμανση του φορτίου σε δεξαμενές καθώς και η αυξημένη συχνότητα πλήρωσης και αποστράγγισης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δραστικές μεταβολές της θερμοκρασίας στις επιφάνειες της δεξαμενής, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην μείωση της αντοχής των δομικών στοιχείων των δεξαμενών φορτίου. Κατά συνέπεια, η απομάκρυνση της αντισκωριακής επίστρωσης στα δύσκολα προσβάσιμα σημεία της δεξαμενής, προκαλεί την επιτάχυνση της διάβρωσης ειδικά κατά τη μεταφορά διαβρωτικών φορτίων τα όποια λόγω πλημμελούς καθαρισμού, παραμένουν και επηδρούν στα δομικά στοιχεία της δεξαμενής (Garbatov et al, 2007).

Το σύστημα αντιδιαβρωτικής προστασίας των δεξαμενών φορτίου και άλλων επιφανειών που είναι ευαίσθητες στη διάβρωση, κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας ενός πλοίου, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά και να οδηγήσει σε επιβράδυνση ή επιτάχυνση της διαδικασίας της διάβρωσης. Φυσικά, η επιμελής συντήρηση των πλοίων αναμένεται να καθυστερήσει τη διάβρωση, ενώ η πλημμελής συντήρηση να την επιταχύνει. Ωστόσο, δεν έχουν αναφερθεί κατάλληλα συστήματα αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων ή διαδικασίες για την ελαχιστοποίηση της εμφάνισης και ανάπτυξης της διάβρωσης στα υπάρχοντα πλοία. Γενικά, η μεταβλητότητα περιβαλλοντικών παραγόντων (ατμοσφαιρικό και θαλάσσιο περιβάλλον) που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να οδηγήσουν σε επιτάχυνση της διαδικασίας διάβρωσης που παρατηρείται σε δομικά στοιχεία του πλοίου. Η έναρξη και ο ρυθμός εξάπλωσης της διάβρωσης μπορεί να εντοπιστεί και να καθοριστεί με συνεχείς επιθεωρήσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας και εκμετάλλευσής του. Ορισμένα στοιχεία σχετικά με τους παράγοντες που ευνοούν τη διάβρωση σε δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου παρουσιάζονται στην εικόνα 6 (ClassNk, 2011)



Εικόνα 6. Παράγοντες διάβρωσης και συνθήκες που επικρατούν στις δεξαμενές φορτίου. Πηγή ClassNK

Όπως περιγράφεται στην εικόνα 7, το αδρανές αέριο στο χώρο ατμών της δεξαμενής, περιέχει σημαντικές ποσότητες οξυγόνου (O_2), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), διοξειδίου του θείου (SO_2) και υδροθείου (H_2S), τα οποία προέρχονται από το αργό πετρέλαιο που μεταφέρεται. Η επιτόπια εξέταση πολλών πλοίων εντόπισε υψηλές συγκεντρώσεις υδροθείου στον κενό χώρο που παραμένει πάνω από το φορτίο. Η συνύπαρξη οξυγόνου και υδροθείου δείχνει ότι το περιβάλλον διάβρωσης στις δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου είναι μια αρκετά περίπλοκη και ιδιαίτερη περίπτωση. Γενική διάβρωση συμβαίνει στην άνω επιφάνεια της δεξαμενής (main deck), καθώς το πίσω τμήμα της εκτίθεται περιοδικά, σε υγρές και ξηρές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές, επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση του νερού, όπως φαίνεται στην εικόνα 5 (Gutzeit, 1968).

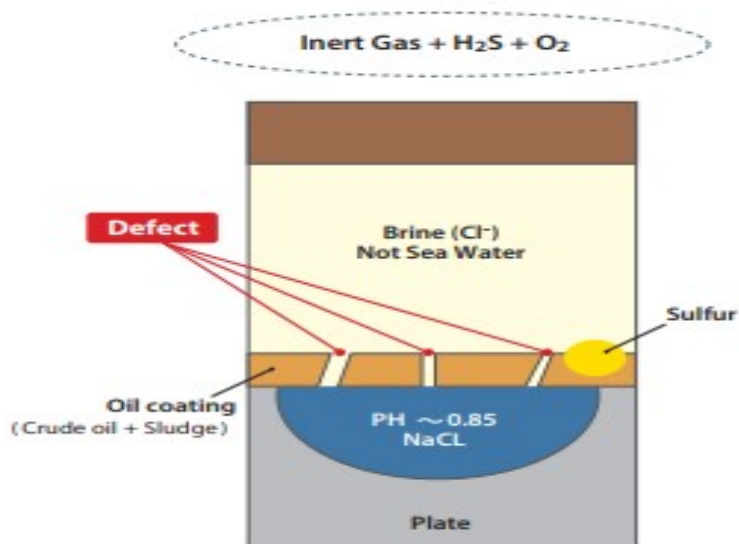


Εικόνα 7. Μηχανισμός παραγωγής θείου. Πηγή ClassNK

Τα περισσότερα από τα προϊόντα που εμφανίζονται στην άνω επιφάνεια της δεξαμενής (main deck) δεν οφείλονται άμεσα στη διάβρωση. Περίπου το 60% αυτών αποτελούνται από θείο. Αντιθέτως, η διάβρωση στις κοιλότητες εμφανίζεται στον

εσωτερικό πυθμένα της δεξαμενής. Το νερό αποστράγγισης που συγκεντρώνεται επίσης στον εσωτερικό πυθμένα περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου και υδροθείου, τα οποία οφείλονται στο φορτίο αργού πετρελαίου (Gutzeit, 1968).

Στην εικόνα 8, φαίνεται ο πυθμένας της δεξαμενής (*Inner Bottom Plating*) που καλύπτεται με διοχετευμένο νερό, το οποίο συμπεριλαμβάνει ένα στρώμα επικάλυψης πετρελαίου με λάσπη και αργό πετρέλαιο. Γενικά, η επικάλυψη πετρελαίου μειώνει το ρυθμό διάβρωσης, ωστόσο μερικά ελαττώματα στην επικάλυψη πετρελαίου μπορούν να προκληθούν από την πλύση αργού πετρελαίου και τις σταγόνες νερού που προέρχονται από τη μεταλλική δομή της δεξαμενής. Στη συνέχεια, η εσωτερική επιφάνεια του πυθμένα εκτίθεται σε ένα ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον που περιέχει ιόντα χλωρίου και υδρόθειο. Το pH του διαλύματος (νερού και υπολειμμάτων φορτίου) εντός των κοιλοτήτων των μεταλλικών κατασκευαστικών στοιχείων είναι μικρότερο από 1,5 (ισχυρά όξινο περιβάλλον). Οι κοιλότητες διάβρωσης προκύπτουν λόγω της δημιουργίας ηλεκτροχημικού στοιχείου διάβρωσης, μεταξύ της ανόδου (δηλαδή του σημείου προσβολής) και της καθόδου (δηλαδή της χαλύβδινης επιφάνειας). Οι κοιλότητες αυτές, εντοπίζονται κάτω από την επικάλυψη πετρελαίου και περιμετρικά του σημείου προσβολής σε ένα εξαιρετικά διαβρωτικό περιβάλλον (ClassNK, 2011).



Εικόνα 8. Περιγραφή συνθηκών που επικρατούν στον πυθμένα δεξαμενής. Πηγή: ClassNK

3.4.1 Πλύση δεξαμενών φορτίου με αργό πετρέλαιο (Cargo oil washing – COW)

Το πλύσιμο (COW) των δεξαμενών φορτίου κατέστη υποχρεωτικό για τα νέα δεξαμενόπλοια από τη Σύμβαση MARPOL (1978). Η σύμβαση του IMO A446 (XI) καθορίζει το ελάχιστο επίπεδο καθαρισμού δεξαμενών. Στο παρελθόν, ήταν σύνηθες, οι επιφάνειες των δεξαμενών φορτίου να μην φέρουν αντιδιαβρωτική επίστρωση, με αποτέλεσμα η μεταλλική δομή της δεξαμενής να είναι πλήρως εκτεθειμένη, καθώς οι περισσότεροι πλοιοκτήτες και κατασκευαστές πίστευαν ότι η επακόλουθη φυσική επίστρωση που δημιουργούνται από το εκάστοτε φορτίο θα μπορούσε να προστατεύσει, ακριβώς όπως λειτουργεί η αντιδιαβρωτική προστασία, με όφελος την μείωση του κόστους και συντήρησης (MARPOL, 1978).

Όμως στην πραγματικότητα απαιτείται συνεχής πλύση αργού πετρελαίου σε υψηλή πίεση, που έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση του προστατευτικού κηρώδους στρώματος που δημιουργείται στην επιφάνεια του χάλυβα μαζί με τυχόν προϊόντα διάβρωσης. Υπό κανονικές συνθήκες, το πλύσιμο των δεξαμενών με φορτίο πραγματοποιείται με ακροφύσια jet υψηλής πίεσης (5 ~ 12 bar) τα οποία κινούνται από αντλίες πετρελαίου ή από ειδική αντλία καθαρισμού δεξαμενών. Είναι προφανές, πως το σύστημα καθαρισμού, δεξαμενών υψηλής πίεσης, μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση οποιουδήποτε μέρους του πλοίου, κάτω από το άνω κατάστρωμα, και ενδεχομένως να επηρεάσει την αντοχή και την ακαμψία της δομής του πλοίου. Η πλύση των δεξαμενών φορτίου με ακροφύσια jet υψηλής πίεσης, σε βάθος χρόνου, μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της αντοχής και της ακαμψίας της κατασκευής του πλοίου. Είναι απαραίτητο να διερευνηθούν οι πιθανές επιπτώσεις που επιφέρει η χρήση των μηχανημάτων υψηλής πίεσης για τον καθαρισμό των δεξαμενών και η επακόλουθη δομική συμπεριφορά όσον αφορά την αντοχή των δεξαμενών (MARPOL, 1978).

3.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στις δεξαμενές φορτίου

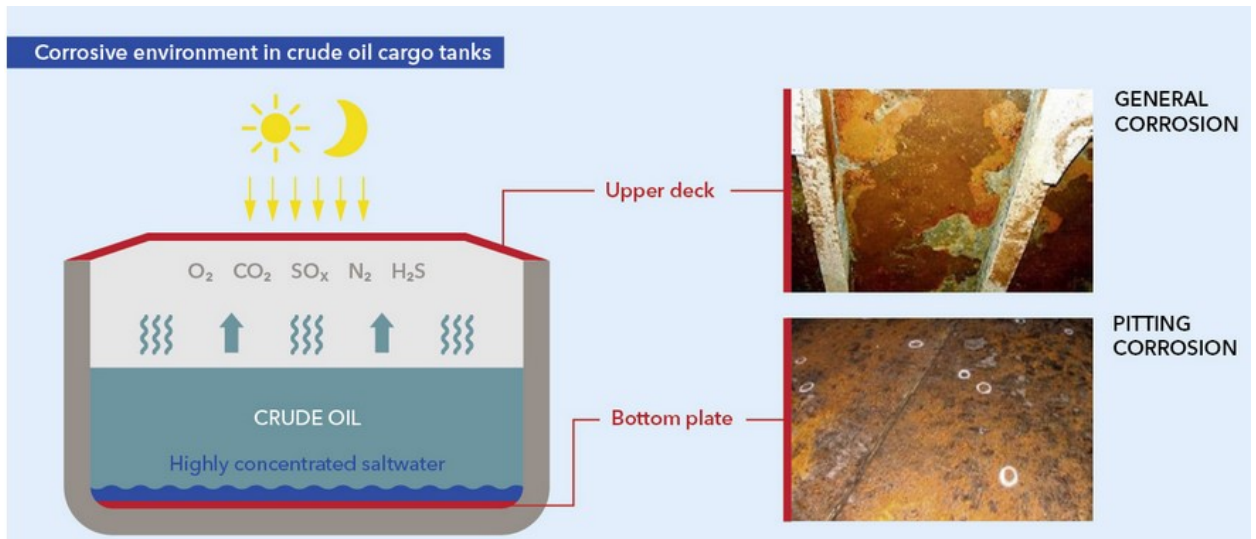
Πολλά δεξαμενόπλοια, στις δεξαμενές φορτίου, διαθέτουν ξεχωριστό σύστημα θέρμανσης. Αυτό επιτρέπει να διατηρείται το φορτίο σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλό ιξώδες ώστε να λειτουργούν κανονικά οι αντλίες εκφόρτωσης του πλοίου. Ο ατμός χρησιμοποιείται συνήθως ως μέσο θέρμανσης σε πίεση λειτουργίας 6 ~ 8 bar και διανέμεται μέσω σωληνώσεων στις δεξαμενές φορτίου (*heating coils*). Η θέρμανση της δεξαμενής επιδρά στη μείωση του ιξώδους του φορτίου, έτσι ώστε να

διευκολύνεται η εκφόρτωση του αργού πετρελαίου με τις αντλίες πετρελαίου ή για τη θέρμανση του μέσου καθαρισμού της δεξαμενής (αργό πετρέλαιο ή θαλασσινό νερό) για αποτελεσματική απόδοση καθαρισμού.

Γενικά, οι χημικές διαδικασίες της διάβρωσης ευνοούνται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασία νερού από 0 °C έως 100 °C, ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 80% λόγω της επίδρασης του οξυγόνου. Αντίθετα, μπορεί να μειωθεί σημαντικά εξαιτίας της μείωσης της διαλυτότητας του οξυγόνου. Για παράδειγμα, αύξηση θερμοκρασίας κατά 10 °C μπορεί ακόμα και να διπλασιάσει τον ρυθμό ηλεκτρολυτικής αντίδρασης (TSCF, 2000).

Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός διάβρωσης διπλασιάζεται σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας, περίπου ανά 10 °C στο εσωτερικό της δεξαμενής. Στην περίπτωση δεξαμενόπλοιων, διπλών τοιχωμάτων, οι χώροι μεταξύ των διπλών τοιχωμάτων λειτουργούν ως θερμικό φράγμα με αποτέλεσμα να απομονώνουν τις δεξαμενές φορτίου από το θαλασσινό νερό. Στην πραγματικότητα, δεν παρατηρείται να επηρεάζονται οι δεξαμενές φορτίου από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα από τη θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού και του αέρα, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία φόρτωσης του φορτίου να θεωρείται ότι διατηρείται σταθερή. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ή σε ένα σύντομο ταξίδι με φορτίο δεν απαιτείται θέρμανση του φορτίου πετρελαίου (Butler et al, 1966).

Αφού πραγματοποιηθεί η εκφόρτωση φορτίου, τα κατασκευαστικά στοιχεία της δεξαμενής φορτίου, παραμένουν σε υψηλή θερμοκρασία για ορισμένες περιόδους έως ότου οι δεξαμενές έρματος γεμίσουν με θαλασσινό νερό. Σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 9, τα βακτήρια ευδοκίμουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και κατά συνέπεια υπάρχει σχετική αύξηση των μικροβιακών δράσεων στη διάβρωση. Είναι προφανές, ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες, μπορούν να επιταχύνουν την υποβάθμιση της μεταλλικής δομής μέσω της διάβρωσης (ClassNK, 2011).



Εικόνα 9. Επίδραση της θερμοκρασίας που επικρατεί στις δεξαμενές πετρελαίου και οι επιπτώσεις. Πηγή "DNV-GL

Ωστόσο, τα αποτελέσματα της θέρμανσης της δεξαμενής φορτίου σε περιπτώσεις πλοίων διπλού πυθμένα δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως. Όταν οι δεξαμενές φορτίου θερμαίνονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, η θερμοκρασία της παρακείμενης κενής δεξαμενής ή έρματος τείνει να αυξάνεται. Όπως προαναφέρθηκε, ο κύριος σκοπός της θέρμανσης της δεξαμενής αργού πετρελαίου είναι η μείωση του ιξώδους του φορτίου, ώστε να διευκολύνεται η απόρριψη του από αντλίες φορτίου (TSCF, (2000).

Είναι επομένως σαφές, ότι η υπερβολική θέρμανση του φορτίου δεν είναι μόνο αιτία για την επιτάχυνση της διάβρωσης, αλλά έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση τους κόστους λειτουργίας, αφού καταναλώνεται περισσότερο καύσιμο για την θέρμανση της δεξαμενής. Συχνά, υπάρχει διαφωνία μεταξύ του ιδιοκτήτη του πλοίου και του ναυπηγείου, κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής σχετικά με το συνολικό μήκος των στοιχείων θέρμανσης που τοποθετούνται στον πυθμένα της δεξαμενής πετρελαίου φορτίου, υποστηρίζοντας ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος των στοιχείων θέρμανσης στη δεξαμενή φορτίου, τόσο καλύτερες είναι οι συνθήκες που επιτυγχάνονται στις δεξαμενές φορτίου (OCIMF, 1997).

Όμως, οι ιδιοκτήτες πλοίων και τα ναυπηγεία πρέπει να αναγνωρίζουν το γεγονός ότι ένα σύστημα θέρμανσης φορτίου οδηγεί σε αυξημένο ποσό αρχικού κόστους για την εγκατάσταση, αύξηση του κόστους λειτουργίας και μείωση της διάρκειας ζωής του πλοίου αυξάνοντας το ρυθμό διάβρωσης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας θέρμανσης στις δεξαμενές πετρελαίου φορτίου. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιταχύνουν τη διάβρωση στις θαλάσσιες κατασκευές. Από αυτούς, δεν έχουν

διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση του πλυσίματος των δεξαμενών φορτίων με μηχανήματα υψηλής πίεσης, η αλλαγή της θερμοκρασίας λόγω της θέρμανσης της δεξαμενής πετρελαίου και του συστήματος καθαρού αδρανούς αερίου. Ο ρυθμός διάβρωσης διπλασιάζεται περίπου για κάθε 10 °C αύξησης της θερμοκρασίας οπότε όπως είναι αναμενόμενο, η υψηλότερη θερμοκρασία επιταχύνει τον ρυθμό της διάβρωσης στη δεξαμενή. Όταν οι δεξαμενές φορτίου διατηρούν ή θερμαίνονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας σε παρακείμενες κενές δεξαμενές έρματος ή κενές δεξαμενές (TSCF, 2000).

Προφανώς, ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα θέρμανσης φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, συμβάλλοντας στη μείωση του ρυθμού διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου και στις δεξαμενές έρματος. Ένα σύστημα το οποίο μπορεί να βοηθήσει προς αυτή την κατεύθυνση είναι ένα σύστημα καθαρού αδρανούς αερίου ή ένα σύστημα παραγωγής αζώτου (N₂), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του φαινομένου της διάβρωσης στις θαλάσσιες κατασκευές, σε περιοχές όπως οι δεξαμενές έρματος αλλά και στους μόνιμα κενούς χώρους (Ok et al, 2005).

Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να υιοθετηθεί τόσο για τα πετρελαιοφόρα αργού πετρελαίου, όσο και για τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η εφαρμογή έχει το πλεονέκτημα ότι δεν δημιουργεί περιορισμό στην χωρητικότητα και ο φορέας εκμετάλλευσης μπορεί να υιοθετήσει μικρότερη χωρητικότητα ώστε να μειώσει κατά το δυνατόν το κόστος εξοπλισμού.

Οι Ok και Pu (2005) παρουσίασαν μια μελέτη κόστους, μεταξύ ενός συμβατικού συστήματος αδρανούς αερίου, που χρησιμοποιεί τα καυσαέρια της κύριας μηχανής ως αδρανές αέριο, και μιας γεννήτριας αδρανούς αερίου για την παροχή αερίου στο χώρο της δεξαμενής φορτίου σε ένα δεξαμενόπλοιο AFRAMAX.

Από την έρευνα προέκυψε, ότι το καθαρό αδρανές αέριο, μπορεί να επηρεάσει αποτελεσματικά την επίδραση της διάβρωσης στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου, και αναλόγως, μπορεί να περιορίσει σημαντικά το συνολικό κόστος συντήρησης, για την αντικατάσταση των χαλύβδινων κατασκευών, καθώς και στο να μειωθεί το απαιτούμενο πάχος αντιδιαβρωτικής επίστρωσης στις δεξαμενές φορτίου. Απαιτούνται όμως περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες με πραγματικές δοκιμές επί του σκάφους για την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας του πλυσίματος των δεξαμενών, της θέρμανσης δεξαμενών φορτίου καθώς και του καθαρού συστήματος παραγωγής αδρανούς αερίου έναντι της διάβρωσης (Ok et al, 2005).

Κεφάλαιο τέταρτο

Μορφές διάβρωσης των δεξαμενών φορτίων των δεξαμενοπλοίων

Η σκουριά των συνηθισμένων ανθρακούχων χαλύβων αποδίδεται με τον γενικό όρο διάβρωση. Αυτή ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος του κόστους συντήρησης και επισκευής μετά τον έλεγχο χαλύβδινων κατασκευών. Υψηλό κόστος μπορεί να προκύψει από μεγάλο αριθμό ανακατασκευών/επιδιορθώσεων στη χαλύβδινη κατασκευή ή από την επισκευή/επιδιόρθωση της προστατευτικής επικάλυψης. Συνήθως οι φυσικές μορφές διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου και έρματος των πετρελαιοφόρων μπορούν γενικά να ταξινομηθούν ως εξής:

4.1 Γενική διάβρωση ή ομοιόμορφη διάβρωση – General Corrosion

Η γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση, είναι η πιο κοινή μορφή διάβρωσης που χαρακτηρίζει τον χάλυβα που σκουριάζει στον αέρα και εμφανίζεται ειδικά σε δεξαμενές φορτίου αλλά και σε όλα τα μέρη του πλοίου. Με τον όρο γενική διάβρωση νοείται η διάβρωση που εξαπλώνεται με τον ίδιο ρυθμό σε ολόκληρη την επιφάνεια του μετάλλου που εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στην πραγματικότητα, η απώλεια μετάλλου δεν είναι πάντα ομοιόμορφη και συνήθως εμφανίζονται διαφορές στην επιφάνεια του υλικού ανάλογα με τη θέση που είναι εγκατεστημένο. Συνήθως, είναι η λιγότερο επικίνδυνη μορφή σε σχέση με την τοπική διάβρωση, επειδή μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί και να ελεγχθεί. Η τοπική αντοχή και κατά συνέπεια η ακεραιότητα της δομής του πλοίου, εξαρτώνται από το ποσοστό μείωσης του πάχους των ελασμάτων. Το συγκεκριμένο είδος διάβρωσης εξελίσσεται με αργούς ρυθμούς, ωστόσο πρέπει να ελέγχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της κατασκευής (Καρύδης, 2002).

Μία από τις δημοφιλείς μεθόδους για τη μέτρηση του πάχους διαβωμένων στοιχείων είναι η μέτρηση πάχους με τη χρήση υπερήχων. Συνήθως γίνονται πολλές μετρήσεις πάνω στην επιφάνεια ενός διακριτού στοιχείου μιας επιφάνειας. Ο βαθμός υποβάθμισης της κατασκευής λόγω της διάβρωσης ποικίλλει ανάλογα με τη θαλάσσια περιοχή στην οποία αυτή δρα, τον τύπο του πλοίου και τη θέση διάβρωσης (Καρύδης, 2002).

4.2 Τοπική διάβρωση – Local Corrosion

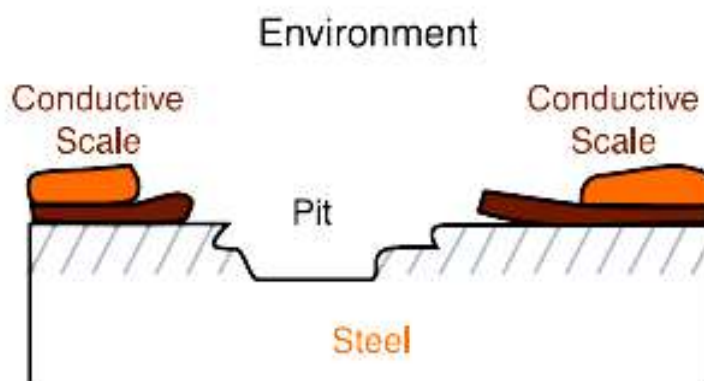
Στην τοπική διάβρωση, υπάρχει έντονη καταστροφή σε εντοπισμένες θέσεις, στην επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια του διαβρώνεται με πολύ χαμηλότερο ρυθμό. Το συγκεκριμένο είδος διάβρωσης είναι συνήθως περίπλοκο και μπορεί να έχει απρόβλεπτες συνέπειες. Επομένως δεν είναι συνήθως δυνατό να προβλεφθεί το σημείο που θα εκδηλωθεί το πρόβλημα και ποια θα είναι η έκτασή του. Συνήθως, η τοπική διάβρωση σε ένα πλοίο μπορεί να εκδηλωθεί σε δομικές συγκολλήσεις και σε σημεία, όπου συλλέγεται ή ρέει νερό καθώς και στον πυθμένα της δεξαμενής φορτίου. Τοπική διάβρωση παρατηρείται συχνά στα κάθετα δομικά μέλη, στη διαδρομή της ροής του νερού ή στις πλευρές των διαφραγμάτων, σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων κ.λπ. (Καρύδης, 2002).

4.3 Διάβρωση οπών ή διάβρωση με βελονισμούς – Pitting Corrosion

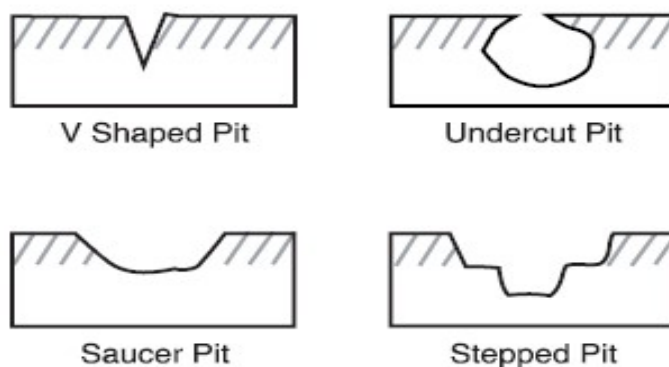
Η διάβρωση με βελονισμούς (*pitting*), όπως φαίνεται στην εικόνα 10, είναι μια ειδική μορφή εντοπισμένης διάβρωσης, που οδηγεί στο σχηματισμό οπών (κρατήρων), όπως φαίνονται στην εικόνα 11, επάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Αφού εμφανιστεί, συνεχίζεται λόγω αντιδράσεων που εξαρτώνται από την πιθανότητα να είναι ανοδικό το σημείο προσβολής σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια που είναι καθοδική. Ορισμένες φορές οι δημιουργούμενες κοιλότητες μπορεί να προχωρήσουν σε βάθος και στο μεταξύ η προσβολή να εκτείνεται σε οριζόντια κατεύθυνση μέσα στο μέταλλο. Αυτό το φαινόμενο συναντάται πιο συχνά στους πυθμένες των δεξαμενών, σε συγκολλήσεις ραφών, ενισχυτών, οριζόντιων επιφανειών ή πλαϊνών κελυφών και εξαρτάται από τον τρόπο ροής του νερού και τον τόπο συσσώρευσης νερού και ιζημάτων (Laycock et al, 1993).

Γενικά, οι επικαλύψεις, όπως συμβαίνει με την παραμένουσα επίστρωση πετρελαίου από προηγούμενα φορτία, τείνουν να προστατεύουν τις χαλύβδινες επιφάνειες στις δεξαμενές φορτίου από τη διάβρωση και ενδέχεται να επιβραδύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης. Όμως, η τοπική διάσπαση αυτών των φυσικών επικαλύψεων των δεξαμενών, ιδιαίτερα σε περιοχές με τυρβώδη ροή ρευστού, μπορεί γρήγορα να οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων κοιλότητων στις οποίες εγκλωβίζεται θαλασσινό νερό και μπορεί να εμφανιστεί ηλεκτρολυτική και/ή μικροβιακή

διάβρωση. Στην περίπτωση αυτή, αν η διάβρωση δεν ελεγχθεί, μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα, στην αντοχή και την ακεραιότητα της μεταλλικής κατασκευής, όπως προβλήματα διείσδυσης στο κύτος του πλοίου και διαρροή φορτίου, προκαλώντας περιβαλλοντική ρύπανση. Οι Hutchinson et al. (1993), Laycock and Scarf (1993), Daidora et al. (1997) και Paik et al. (2003) ανέπτυξαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα για την περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης.



Εικόνα 10. Περιβάλλον δημιουργίας βελονισμού. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition)



Εικόνα 11. Τύποι βελονισμού. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition)

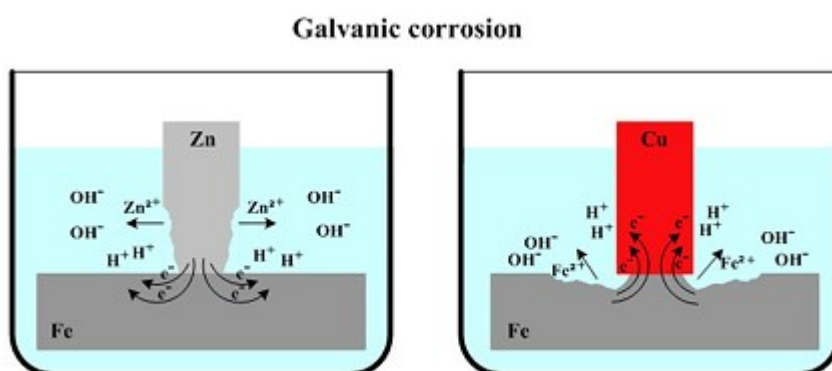
4.4 Διάβρωση μετάλλων συγκόλλησης

Η διάβρωση μετάλλων συγκόλλησης είναι το αποτέλεσμα μιας γαλβανικής αντίδρασης, μεταξύ του βασικού μετάλλου και του προστιθέμενου υλικού συγκόλλησης, που μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση ή αυλάκωση. Διάφορες συγκολλήσεις προκαλούν ασυνέχειες σε επίπεδο μικροκλίμακας στην επιφάνεια του χάλυβα, που μπορούν να οδηγήσουν σε τοπικές μεταλλουργικές μεταβολές και να

προκαλέσουν σε ορισμένες θέσεις τη διάρρηξη της επικάλυψης. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα διάβρωσης, επιβάλλεται να διαπιστωθεί εάν το μέταλλο συγκόλλησης έχει υψηλότερο δυναμικό διάβρωσης σε σύγκριση με το βασικό μέταλλο. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να επιλέγεται ένα πιο ευγενές ηλεκτρόδιο ως μέταλλο συγκόλλησης σε σχέση με το βασικό μέταλλο, ώστε το μέταλλο συγκόλλησης να λειτουργεί ως κάθοδος και το βασικό μέταλλο ως άνοδος στο σχηματιζόμενο γαλβανικό στοιχείο (ABS 2007).

4.5 Γαλβανική διάβρωση

Η γαλβανική διάβρωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 12, πραγματοποιείται όταν δύο ανόμοια (από ηλεκτροχημική άποψη) μέταλλα συνδέονται και εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Το λιγότερο ευγενές μέταλλο (άνοδος) όντας καλυμμένο από ένα στρώμα πετρελαίου, υφίσταται επιταχυνόμενη προσβολή ενώ το πιο ευγενές μέταλλο (κάθοδος) προστατεύεται καθοδικά από το γαλβανικό ρεύμα (ABS, 2007).



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση της Γαλβανικής διάβρωσης. Πηγή: (ABS guidance notes on inspection, maintenance and application of marine coating systems, 2007 third edition)

4.6 Σπηλαιώδης διάβρωση – Cavitation Corrosion

Η σπηλαιώδης διάβρωση σχηματίζεται όταν η λειτουργική πίεση του ρευστού πέσει κάτω από την τάση ατμών του, προκαλώντας το σχηματισμό φυσαλίδων αέρα. Αυτές οι φυσαλίδες, λόγω του αέρα που περιέχουν, μεταφέρονται σε κάποιο άλλο σημείο υψηλότερης πίεσης, υγροποιούνται πάνω στην επιφάνεια του στερεού και έτσι όταν καταρρέουν δημιουργούνται μεγάλες πιέσεις που καταπονούν το στερεό σώμα δημιουργώντας φαινόμενα βελονισμού και τοπική απώλεια του υλικού. Αυτό το είδος της προσβολής εξαρτάται από το βαθμό του στροβιλισμού και της ταχύτητας του υγρού. Σοβαρή σπηλαιώδης διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί στις αντλίες

αναρρόφησης φορτίου και έρματος. Το πλύσιμο των δεξαμενών από φορτία αργού πετρελαίου, θεωρείται μια ακόμα αιτία διάβρωσης, καθώς με αυτόν τον τρόπο απομακρύνεται το λιπαρό ή κηρώδες στρώμα που έχει δημιουργηθεί από το φορτίο πετρελαίου επάνω στις μεταλλικές επιφάνειες, οπότε ο χάλυβας γίνεται ευάλωτος στη διάβρωση (ABS, 2007).

4.7 Διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση συμβαίνει κατά την ταυτόχρονη έκθεση των χαλύβδινων κατασκευών σε στατικές ή δυναμικές τάσεις εφελκυσμού και στη σχετική κόπωση σε διαβρωτικό περιβάλλον. Οι ρωγμές εμφανίζονται και διαδίδονται εξαιτίας του συνδυασμού των επιπτώσεων του περιβάλλοντος και της καταπόνησης που δέχεται η κατασκευή. Είναι ιδιαίτερα ύπουλο κι επικίνδυνο φαινόμενο καθώς η καταστροφική αστοχία μπορεί να συμβεί ακόμη και σε χαμηλές τιμές μηχανικών τάσεων, συχνά χωρίς κάποια προειδοποίηση (ABS, 2007).

Κεφάλαιο πέμπτο

Διάβρωση προκαλούμενη από την επίδραση μικροοργανισμών – Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)

Διάβρωση προκαλούμενη από την επίδραση μικροοργανισμών εμφανίζεται σε όλους τους τομείς των εγκαταστάσεων παραγωγής πετρελαίου, συμπεριλαμβανομένης της μονάδας παραγωγής, των αγωγών, της εγκατάστασης έγχυσης νερού, και φυσικά, στις δεξαμενές φορτίου των δεξαμενοπλοίων μεταφοράς πετρελαίου. Η διάβρωση, που δημιουργείται λόγω της μικροβιακής ανάπτυξης, σχετίζεται με την ύπαρξη διαφορετικών πληθυσμών που περιλαμβάνουν αμοιβαία εξαρτώμενα βακτηριακά είδη. Τα βακτήρια που συνδέονται συχνότερα με τη διάβρωση του χάλυβα χαρακτηρίζονται ως βακτήρια αναγωγής θεικών (*sulphate reducing bacteria - SRB*) (OCIMF, 1997).

Ο συγκεκριμένος τύπος διάβρωσης μπορεί να είναι πολύ επιβλαβής για όλα σχεδόν τα μηχανικά υλικά και ονομάζεται μικροβιολογικά επηρεασμένη διάβρωση (*microbiological influenced corrosion*) ή για συντομία MIC. Ο όρος MIC αν και υποδεικνύει ότι μόνο οι μικροοργανισμοί είναι ικανοί να προκαλέσουν αυτό το είδος της διάβρωσης, στην πραγματικότητα, η βιορύπανση που είναι ένας γενικότερος όρος, συσχετίζεται τόσο με την μικροβιολογική όσο και τη μακροβιολογική ανάπτυξη οργανισμών πάνω σε ελεύθερες επιφάνειες (Soares et al, 1996) με αποτέλεσμα τη διάβρωση της επιφάνειας.

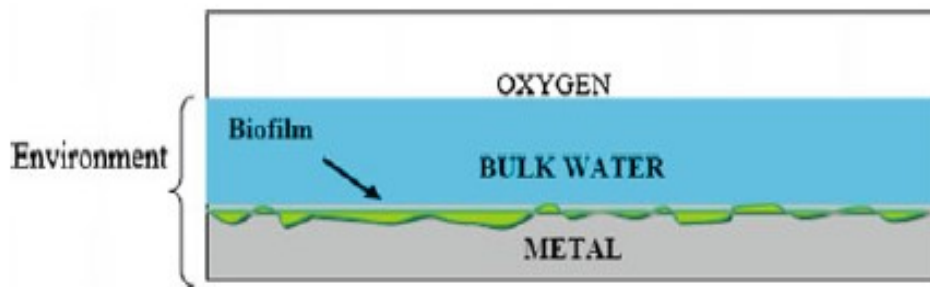
Φαίνεται ότι δεν είναι εύκολο να καταλήξουμε σε μια σαφή εξήγηση της επίδρασης των βακτηρίων στην εξέλιξη της διάβρωσης. Αυτός ο τύπος διάβρωσης εμφανίζεται στις περιπτώσεις όπου τοπικά περιβάλλοντα και συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη και κυριαρχία βακτηριακής δραστηριότητας. Οι κρίσιμες περιοχές του πλοίου στις οποίες εμφανίζεται η βακτηριακή διάβρωση είναι συνήθως οι δεξαμενές πετρελαίου, οι σωληνώσεις μεταφοράς πετρελαίου και οι δεξαμενές έρματος στα δεξαμενόπλοια (TSCF, 2000).

Συνοπτικά ως τέτοιες συνθήκες θεωρούνται οι παρακάτω:

- Στάσιμα νερά (χωρίς οξυγόνο),
- Θερμοκρασία που ευνοεί την ανάπτυξη βακτηρίων,
- Βακτήρια που τρέφονται με υδρογονάνθρακες (αργό πετρέλαιο),
- Θειούχες ενώσεις στο θαλασσινό νερό.

5.1 Ορισμός της μικροβιολογικά επηρεασμένης διάβρωσης

Η μικροβιολογικά επηρεασμένη διάβρωση (MIC) είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία μέσω της οποίας οι μικροοργανισμοί μπορούν να ξεκινήσουν, να διευκολύνουν ή να επιταχύνουν τις αντιδράσεις διάβρωσης μέσω της αλληλεπίδρασης των τριών απαραίτητων στοιχείων που είναι το μέταλλο, το διάλυμα και οι μικροοργανισμοί, και που αποτελούν ένα σύστημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13. Συστατικά του συστήματος. Πηγή: *Microbiologically influenced Corrosion* Reza Javaherdashti - book series (EMP)

Προϋπόθεση για τη MIC είναι η παρουσία των μικροοργανισμών. Η διάβρωση επηρεάζεται άμεσα από τη δραστηριότητά τους ενώ οι βασικές προϋποθέσεις για την εξάπλωσή τους είναι: (I) μια πηγή ενέργειας, (II) μια πηγή άνθρακα, (III) μια πηγή ηλεκτρονίων, (IV) ένας δέκτης ηλεκτρονίων και (V) το νερό.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι:

1. Η MIC είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία.
2. Οι μικροοργανισμοί μπορούν να επηρεάσουν την έκταση, την ένταση αλλά και την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης.
3. Εκτός από την παρουσία μικροοργανισμών, για να ξεκινήσει η MIC θα πρέπει να πληρούνται καθορισμένες προϋποθέσεις.

Η μικροβιολογικά επηρεασμένη διάβρωση (MIC) προκαλείται από ζώντες μονοκύτταρους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των βακτηρίων, μυκήτων και φυκιών. Τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά ιόντα (SRB) είναι ικανά να προκαλέσουν διάβρωση του χάλυβα υπό αναερόβιες συνθήκες. Γενικά, το οξυγόνο είναι βασικό στοιχείο στη διάβρωση του χάλυβα, αλλά παρουσία αυτών των βακτηρίων, η διαδικασία διάβρωσης ακολουθεί διαφορετικό μηχανισμό από αυτόν που παρατηρείται στο κανονικό θαλασσινό νερό που περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Τα βακτήρια SRB καλύπτουν τις ανάγκες τους σε θείο με μια πολύπλοκη χημική αντίδραση. Οι ιδανικές συνθήκες που ευνοούν την δημιουργία και εξάπλωση των βακτηρίων SRB περιλαμβάνουν μη διαλυμένο οξυγόνο, νερό και διαλυτά οργανικά θρεπτικά συστατικά. Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο, οπότε η περιοχή που εμφανίζει έλλειψη οξυγόνου γίνεται ανοδική σε σχέση με παρακείμενες σχετικά πλούσιες σε οξυγόνο ζώνες, προκαλώντας έτσι την ανάπτυξη ανοδικών περιοχών διάβρωσης. Οι αερόβιοι μικροοργανισμοί δημιουργούν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης και είναι ικανοί να προκαλέσουν απώλεια μεταλλικού υλικού της τάξης των 1,5 έως 3 mm ετησίως, σε δομές με ακανόνιστα σχήματα (Reza, 2017).

5.2 Σημαντικότητα της MIC

Η MIC παρατηρείται σε όλα τα φυσικά περιβάλλοντα (θαλασσινό νερό) και σε όλες τις βιομηχανίες (πετρέλαιο, παραγωγή ενέργειας, θαλάσσιες βιομηχανίες). Μέσα από μελέτες έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι η MIC αντιπροσωπεύει το 20% των καταστροφικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη διάβρωση. Τα βακτήρια που ανάγουν το θείο (SRB) ενισχύουν και επιταχύνουν τη διάβρωση, και είναι υπεύθυνα για την δημιουργία εκτεταμένων προβλημάτων σε μηχανήματα και δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου. Έχει αναφερθεί επίσης, ότι η υπαρξή τους αυξάνει την περιεκτικότητα του θείου στα καύσιμα. Αυτά τα βακτήρια είναι σημαντικά στις δευτερεύουσες διαδικασίες ανάκτησης ελαίου, στα νερά ψεκασμού από τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις διαδικασίες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα βακτήρια SRB είναι σημαντικά για τις διεργασίες βιογένεσης των υδρογονανθράκων πετρελαίου (Reza, 2017).

Στην διάρκεια του κύκλου ζωής τους, τα αναερόβια βακτήρια SRB ανάγουν τα θειικά άλατα, που βρίσκονται στο συγκεκριμένο φορτίο. Αποτέλεσμα της αναγωγής είναι η οξείδωση της οργανικής πηγής της τροφής τους και ο σχηματισμός θειούχων

ενώσεων, συμπεριλαμβανομένου του υδροθείου. Αυτές οι ενώσεις μπορούν να οξειδωθούν ξανά για να σχηματίσουν όξινα θειικά άλατα όταν οι δεξαμενές φορτίου είναι κενές. Καθώς η κατάσταση των δεξαμενών φορτίου εναλλάσσεται συνεχώς (φορτωμένες – άφορτες), δημιουργούνται συνεχώς κι εναλλάξ αερόβιες και αναερόβιες συνθήκες, που βοηθούν τον κύκλο δημιουργίας των θεικών ενώσεων. Τα βακτήρια χρησιμοποιούν τη μικρή ποσότητα οξυγόνου του νερού για να μεταβολίσουν τους υδρογονάνθρακες και να παράγουν οργανικά οξέα (Reza, 2017).

5.3 Κατηγορίες των βακτηρίων που ευθύνονται για την Μικροβιολογική Διάβρωση (MIC)

Οι μικροβιολόγοι χρησιμοποιούν ορισμένα χαρακτηριστικά για να κατατάξουν τους διάφορους τύπους βακτηρίων, όπως αναφέρεται παρακάτω:

➤ Σχήμα και εμφάνιση:

- (1) *Vibrio*: βακτήρια που έχουν σχήμα αποστρόφου ή κόμματος (comma shaped).
- (2) *Bacillus*: βακτήρια που έχουν σχήμα ράβδου.
- (3) *Coccus*: βακτήρια που έχουν στρογγυλό σχήμα.
- (4) Μύκητες για νηματοειδή μυκητοειδή κύτταρα κ.λπ.

➤ Θερμοκρασία:

- (1) Μεσόφιλα: είναι βακτήρια που αναπτύσσονται σε θερμοκρασία 20 – 35 °C.
- (2) Θερμόφιλα: είναι βακτήρια που αναπτύσσονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 40 °C.

➤ Κατανάλωση οξυγόνου:

- (1) Αναερόβια βακτήρια, τα οποία δεν αναπτύσσονται παρουσία οξυγόνου.
- (2) Αερόβια βακτήρια, που απαιτούν οξυγόνο για το μεταβολισμό τους.
- (3) Αναερόβια βακτήρια, που μπορούν να λειτουργήσουν είτε με ή χωρίς την παρουσία οξυγόνου.
- (4) Μικροαερόφιλοι μικροοργανισμοί, που αναπτύσσονται σε χαμηλά επίπεδα οξυγόνου.

(5) Μικρόβια ανθεκτικά στον αέρα, τα οποία είναι αναερόβια και δεν επηρεάζονται από την παρουσία του οξυγόνου. Οι αναερόβιοι αυτοί μικροοργανισμοί εκτίθενται σε οξυγόνο, όμως ο μεταβολισμός τους δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του οξυγόνου με αποτέλεσμα να παραμένουν λειτουργικοί (Reza, 2017).

5.4 Στάδια και σχηματισμός βιοεπίστρωσης

Όταν τα βακτήρια προσκολλώνται σε μεταλλικές επιφάνειες, αρχίζουν να σχηματίζουν ένα λεπτό φιλμ, γνωστό ως βιοεπίστρωση, που αποτελείται από κύτταρα προσκολλημένα στο υπόστρωμα, συχνά ενσωματωμένα σε οργανική πολυμερή μήτρα μικροβιακής προέλευσης.

Ο σταδιακός σχηματισμός της βιοεπίστρωσης, επιφέρει συνεχείς αλλαγές στις συγκεντρώσεις χημικών ουσιών στην επιφάνεια του μεταλλικού υποστρώματος. Η φυσική παρουσία της βιοεπίστρωσης, ασκεί μια παθητική επίδραση περιορίζοντας τη διάχυση του οξυγόνου και των θρεπτικών ουσιών στη μεταλλική επιφάνεια. Ενώ μια βιοεπίστρωση με πάχος 100 μm μπορεί να αποτρέψει τη διάχυση των θρεπτικών συστατικών στη βάση της επίστρωσης, ένα πάχος μόλις 12 μm μπορεί να δημιουργήσει ένα τοπικό σημείο αρκετά αναερόβιο για δραστηριότητα μικροοργανισμών σε ένα αερόβιο σύστημα (TSCF, 2000).

Οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο και παράγουν μεταβολίτες (χημικές ουσίες που αποτελούν προϊόντα μεταβολισμού). Ο σχηματισμός μεμβράνης της βιοεπίστρωσης προϋποθέτει την συσσώρευση διαφόρων υλικών καθ' όλο το πάχος του υποστρώματος. Η χρονική διάρκεια για το σχηματισμό της βιοεπίστρωσης κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως κάποιες ώρες, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο είναι βυθισμένο το μέταλλο. Ο σχηματισμός του λεγόμενου «φιλμ συνθηκών», αποτελεί το πρώτο στάδιο δημιουργίας της βιοεπίστρωσης και οφείλεται στην ηλεκτροστατική διάταξη μιας μεγάλης ποικιλίας πρωτεϊνών και άλλων οργανικών ενώσεων. Οι παραπάνω παράγοντες σε συνδυασμό με τη σύνθεση και τις συνθήκες του περιβάλλοντος, ευνοούν την προσκόλληση των βακτηρίων (*exopolysaccharidic substances* - *EPS*) μέσω της συσσώρευσης, έτσι ώστε να απαιτούνται ελάχιστες ποσότητες ενέργειας για να αναπτυχθούν τα προσκολλημένα βακτήρια (Reza Javaherdashti, 2017).

Όταν σχηματίζεται και αναπτύσσεται η μεμβράνη της βιοεπίστρωσης, δηλαδή κατά τα στάδια 1-3, τα εξωτερικά κύτταρα αρχίζουν να καταναλώνουν τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά πολύ πιο γρήγορα από ό,τι τα κύτταρα που βρίσκονται βαθύτερα, κι έτσι η δραστηριότητα αλλά και ο ρυθμός ανάπτυξης των τελευταίων μειώνεται σημαντικά. Συνεπώς, η μεμβράνη αρχίζει να δρα σαν «δίχτυ» που έχει σκοπό να παγιδεύει τα οργανικά ή τα ανόργανα σωματίδια. Η συνθήκη αυτή, μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του πάχους της βιοεπίστρωσης και κατ' επέκταση στο

σχηματισμό εξω-πολυσακχαριδικών ουσιών (*exopolysaccharidic substances - EPS*) που θα βοηθήσει τα εκτεθημένα βακτήρια να επιβιώσουν και να ξεπεράσουν την απειλή από εξωτερικούς παράγοντες. Το γεγονός αυτό τα βοηθά να απορροφούν περισσότερη τροφή, διευρύνοντας έτσι την επιφάνειά τους μέσω των EPS. Παράγοντες όπως το pH, το διαλυμένο οξυγόνο κ.λπ. μπορεί να είναι πολύ διαφορετικοί στη μεμβράνη της βιοεπίστρωσης από αυτούς που επικρατούν στο συνολικό όγκο του διαλύματος, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου του «εξευγενισμού» (*ennoblement*), που έχει διαπιστωθεί σε μια σειρά μετάλλων και κραμάτων, όπως για παράδειγμα, από ανοξείδωτο χάλυβα που εκτίθεται σε συνθήκες διαφορετικής αλατότητας (Telegdi et al, 2020).

Παράγοντες που επιδρούν στους μηχανισμούς ανάπτυξης της βιοεπίστρωσης (Dexter, 2000) περιλαμβάνουν:

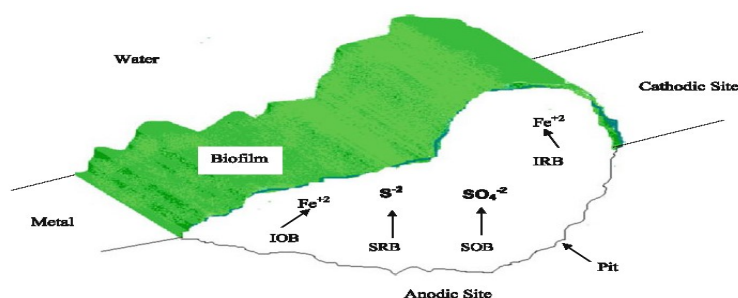
- (1) Επίδραση χαμηλού pH.
- (2) Συνδυασμός pH με υπεροξείδιο και χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο.
- (3) Επίδραση βαρέων μετάλλων.
- (4) Σχηματισμός παθητικοποιημένων σιδηροφόρων (*Siderophores*).
- (5) Συνεισφορά διοξειδίου του μαγανίου.

Η αντίσταση των ανοξείδωτων χαλύβων στη διάβρωση προκύπτει από το σχηματισμό ενός παθητικού φιλμ οξειδίου που είναι σταθερό σε οξειδωτικό περιβάλλον. Όταν επέλθει κάποια αστάθεια φυσικοχημικού τύπου στη μεμβράνη του οξειδίου είτε ως αποτέλεσμα αλλαγής στις χημικές συνθήκες του περιβάλλοντος, είτε από το σχηματισμό κάποιων ρωγμών στην μεταλλική επιφάνεια, δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες για τη συγκέντρωση οξυγόνου που μπορεί να οδηγήσει σε τοπική διάβρωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας αλλαγής του περιβάλλοντος αποτελεί η αστάθεια που προκαλείται από την επίδραση των ιόντων χλωρίου τα οποία μπορούν τοπικά να προκαλέσουν διάβρωση σε ανοξείδωτους χάλυβες (Telegdi et al, 2020).

Στην παρουσία ορισμένων βακτηρίων, όπως βακτήρια που οξειδώνουν τον σίδηρο, οι συνθήκες μπορεί να γίνουν πολύ όξινες, καθώς τα ιόντα συνδυάζονται με τα ιόντα σιδήρου που παράγονται για να σχηματίσουν ένα πολύ διαβρωτικό όξινο διάλυμα χλωριούχου σιδήρου.

Εν κατακλείδι, τα βακτήρια είναι ικανά να εκκινήσουν και να επεκτείνουν την διάβρωση στην εσωτερική επιφάνεια του μετάλλου, ως αποτέλεσμα της συγκέντρωσης χλωριδίων, που προκαλείται σε συνθήκες χαμηλού pH κι εμφανίζεται

στη βάση των σημείων βελονισμού. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι διαφορετικοί τύποι βακτηρίων που φαίνονται στην εικόνα 14 είναι δυνατόν να συνυπάρχουν ή όχι (Reza Javaherdashti, 2017).



Εικόνα 14. Σχηματισμός μεμβράνης βιοεπίστρωσης.

. Πηγή: *Microbiologically influenced Corrosion Reza Javaherdashti -book series (EMP)*

5.5 Η επίδραση της βιοεπίστρωσης στη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου

Θεωρώντας το μεταλλικό υπόστρωμα και το νερό ως «περιβάλλον», μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη ταξινόμηση. Η θερμοκρασία, το pH, οι πρεκτικότητα σε συνολικά διαλυμένα στερεά (*Total Dissolved Solids - TDS*) και σε αιωρούμενα στερεά καθώς και η χημική σύσταση του νερού (όσον αφορά χλωρίδια και θρεπτικά συστατικά), αποτελούν σημαντικούς παράγοντες, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την εξέλιξη των φαινομένων διάβρωσης. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να έχουν διαφορετική επίδραση στη διάβρωση με μικροοργανισμούς και σε μη μικροβιακή διάβρωση. Για παράδειγμα, ενώ όταν αφαιρείται το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί σημαντικά να μειωθεί ο ρυθμός διάβρωσης, σε περίπτωση που το σύστημα έχει προσβληθεί από αναερόβιο οργανισμό, η ίδια η επίδραση του οξυγόνου, θα ενίσχυε την εξέλιξη μικροβιολογικής διάβρωσης (Telegdi et al, 2020) μέσω της διαδικασίας που φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15. Είσοδος και έξοδος των αερίων στο βιοφίλμ. Πηγή: *Microbiologically influenced Corrosion Reza Javaherdashti -book series (EMP)*

➤ Χημικοί παράγοντες

Η ποιότητα του νερού, είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν MIC σε ένα σύστημα. Η εμφάνιση MIC καθορίζεται από την ποιότητα του νερού, όπως επίσης και από το αν το νερό είναι ακατέργαστο, μη επεξεργασμένο ή κακώς επεξεργασμένο. Στην περίπτωση κακής ποιότητας νερού που χρησιμοποιείται συνήθως για ναυτιλιακή ή βιομηχανική δραστηριότητα και αναφέρεται ως «κυδροδοκιμασία», ο κίνδυνος εμφάνισης MIC είναι υψηλός. Αυτό που εννοείται ως ακατέργαστο νερό είναι το νερό στο οποίο δεν έχει γίνει κατάλληλη φυσική/χημική επεξεργασία. Το νερό αυτό μπορεί να προέρχεται από τη θάλασα ή ποταμούς και χρησιμοποιείται για βιομηχανικές δραστηριότητες (Reza, 2017).

➤ Επεξεργασία νερού

Η μέθοδος επεξεργασίας του νερού εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, όπως το κόστος ανταλλακτικών, των αναλωσίμων αλλά και των πρακτικών περιορισμών που σχετίζονται με την εφαρμογή φυσικής/χημικής επεξεργασίας του. Όμως αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας.

Τα συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) σε συνδυασμό με την ύπαρξη του βακτηρίου *Halophilic* (SRB βακτήριο που ευνοείται σε συνθήκες αλατότητας), που συναντάται σε νερά με υψηλά ποσοστά TDS (της τάξης των 240.000 mg/L), αποτελούν έναν κρίσιμο παράγοντα (Reza, 2017) για την εμφάνιση MIC.

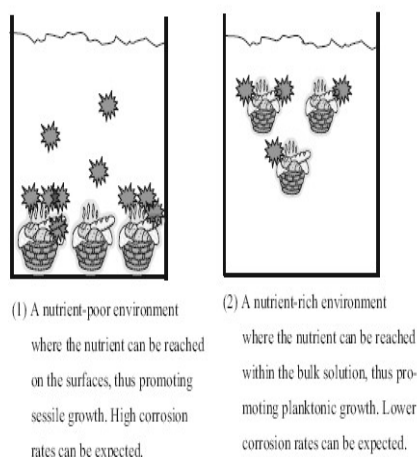
➤ Οξυγόνο

Η συγκέντρωση οξυγόνου στο νερό δεν θεωρείται πάντα απαραίτητη, αφού μεμβράνη βιοεπίστρωσης μπορεί να σχηματιστεί από αναερόβια βακτήρια σε πολλές περιπτώσεις. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, βιοεπίστρωση με πάχος μόλις 12 μm είναι δυνατόν να δημιουργηθεί σε ένα αναερόβιο σύστημα από τη δράση βακτηρίων SRB. Έχει αναφερθεί (Reza, 2017) ότι γνωρίζοντας την απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμη για την αναγωγή θειικών ιόντων ή του μετάλλου, και έτσι να γίνει εκτίμηση του κινδύνου από την ανάπτυξη SRB ή άλλων «αναγωγικών» βακτηρίων, όπως τα IRB (*Iron reducing bacteria*).

➤ Τα θρεπτικά συστατικά

Τα θρεπτικά συστατικά αποτελούν ένα κρίσιμο παράγοντα, και μπορούν να καθορίσουν το είδος του επικρατέστερου βακτηριακού πληθυσμού. Σημειώνεται ότι το επίπεδο των θρεπτικών συστατικών είναι ικανό να επηρεάσει τη «δράση» των

βακτηρίων. Όταν το περιβάλλον είναι φτωχό σε θρεπτικά συστατικά, τότε αυτά παραμένουν στην επιφάνεια, με συνέπεια τα βακτήρια επίσης να παραμένουν και να αναπτύσσονται σε αυτή (Enos & Taylor, 1996). Αυτά τα βακτήρια ονομάζονται «στατικά» βακτήρια. Ωστόσο, όταν το περιβάλλον είναι αρκετά πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, τότε τα βακτήρια δεν παραμένουν στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να ευνοείται η πλαγκτονική ανάπτυξη, όπως φαίνεται στην εικόνα 16.



Εικόνα 16. Στατική και πλωτή ανάπτυξη. Πηγή: *Engineering Materials and Processes book series (EMP)*

Με άλλα λόγια, κάτω από συγκεκριμένες εργαστηριακές συνθήκες, όταν τα βακτήρια διαθέτουν τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά, δείχνουν να προτιμούν την ανάπτυξη του πλαγκτόν, ενώ πολλά από τα προβλήματα MIC προέρχονται από στατικά και όχι πλαγκτονικά βακτήρια. Πρακτικά, δεν είναι δυνατόν να διεξαχθεί μια δοκιμή όπου όλες οι συνθήκες να είναι αντίστοιχες του φυσικού περιβάλλοντος (Enos et al, 1996).

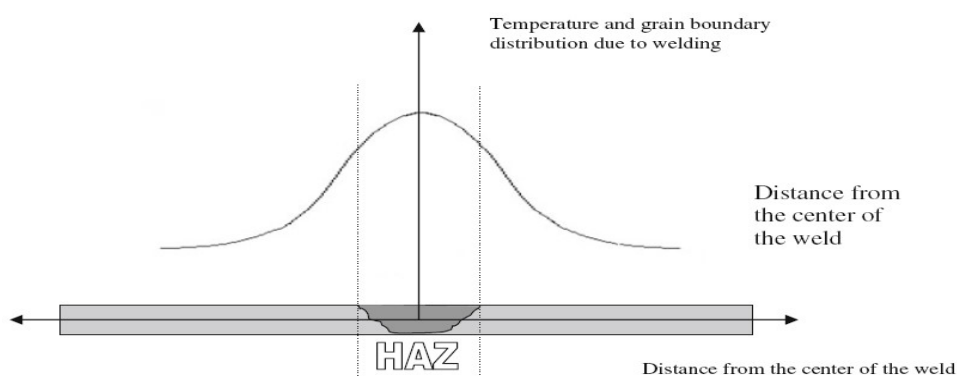
➤ Κράματα σιδήρου και επιπτώσεις

Η προσθήκη κραματικών στοιχείων στα μέταλλα βελτιώνει τις μηχανικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες αυτών. Για παράδειγμα, η προσθήκη χρωμίου στο χάλυβα, που αποτελεί μια ευρέως γνωστή πρακτική, βοηθά στην αύξηση της ανθεκτικότητας του έναντι της διάβρωσης. Ωστόσο, τα κραματικά στοιχεία μπορούν μερικές φορές να έχουν και άλλες επιπτώσεις, όπως το να επηρεάσουν τον τρόπο που ανταποκρίνεται το μέταλλο στο περιβάλλον ως προς τη μικροβιακή διάβρωση. Για παράδειγμα, η αύξηση της περιεκτικότητας σε μολυβδαίνιο μπορεί να μειώσει τη βιωσιμότητα των βακτηρίων και να περιορίσει την προκαλούμενη διάβρωση. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι η δράση βακτηρίων SRB στην επιφάνεια του νικελίου είναι πιο σημαντική για την εμφάνιση MIC, σε σύγκριση με τον ανοξείδωτο χάλυβα 304 (Enos et al, 1996).

Τα παραπάνω, είναι αποτελούν παραδείγματα έντονων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των βακτηρίων και ορισμένων κραματικών στοιχείων. Ακόμα όμως παραμένουν άγνωστες οι λεπτομέρειες ενός μηχανισμού που είναι υπεύθυνος για αυτή την συμπεριφορά. Εφόσον είναι αποτέλεσμα ενός είδους χημικής απόκρισης, είτε παραγωγής «πρωτεϊνών πρόσφυσης» είτε οποιουδήποτε άλλου μηχανισμού, τότε το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει, είναι ότι μερικά κραματικά στοιχεία προκαλούν MIC σε διαφορετικό βαθμό. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του κατασκευαστικού κράματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί (Enos et al, 1996).

➤ Επίδραση των συγκολλήσεων

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να καταστήσει ένα σύστημα ευάλωτο στη MIC είναι η συγκόλληση. Για τη σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων των κατασκευών, η πιο συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδος είναι η συγκόλληση. Ωστόσο, παρά τη μεγάλη της χρησιμότητα, η συγκόλληση θεωρείται ισοδύναμη με μια πληγή στο κυρίως μεταλλικό σώμα της κατασκευής, και απαιτεί πολύ μεγάλη προσοχή καθώς το σημείο συγκόλλησης αποτελεί το πιθανότερο σημείο για την εμφάνιση προβλημάτων διάβρωσης. Σύμφωνα με τους Kurissery *et. al.*, (2004) σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 1950, αναφέρονται οι συγκολλήσεις ως τα πιο πιθανά σημεία για αποικισμό μικροβίων. Οι ίδιοι ερευνητές παραθέτουν επίσης αναφορές για αστοχίες, λόγω διάβρωσης, στα συστήματα ψύξης νερού, που εντοπίζονται γύρω ή εντός των συγκολλήσεων και τα οποία είχαν κατασκευαστεί από "κράματα ανθεκτικά στη διάβρωση". Κατά την συγκόλληση δύο τμημάτων χάλυβα, η θερμοκρασία και η κατανομή ενέργειας κατά μήκος της περιοχής συγκόλλησης αλλάζει σημαντικά όπως παρατηρείται στο παρακάτω διάγραμμα 4.



Διάγραμμα 4. Heat affected zone from welding. Πηγή: IACS

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό (διάγραμμα 4), περιμετρικά και μέσα στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης, η θερμοκρασία και οι καμπύλες κατανομής ενέργειας εμφανίζουν κορυφές. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκόλλησης όπου θερμοδυναμικά η ενέργεια είναι υψηλή και η δομή έχει χάσει την ομοιόμορφη υφή της. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την έναρξη της βακτηριακής διάβρωσης είναι η αλλαγή στην υφή και εν συνεχεία στην τραχύτητα της επιφάνειας. Οι πιθανές επιδράσεις της συγκόλλησης στην επιτάχυνση της MIC σε μεταλλικές επιφάνειες είναι οι ακόλουθες:

- Αλλαγή της τραχύτητας της επιφάνειας διευκολύνει τον αποικισμό των βακτηρίων, που «αγκιστρώνονται» στις τραχιές επιφάνειες.
- Η αλλαγή της χημικής κατάστασης της επιφάνειας και της μικροδομής της, τόσο της ζώνης τήξεως όσο και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (*HAZ – Heat affected zone*) κατά την συγκόλληση, επιτρέπει στους μικροοργανισμούς να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα εύρεσης των απαιτούμενων θρεπτικών συστατικών ευνοώντας την ανάπτυξη τους στις επιφάνειες των συγκολλημένων ελασμάτων.
- Η μέθοδος της συγκόλλησης δημιουργεί μια ετερογενή επιφάνεια με αποτέλεσμα τον εύκολο σχηματισμό ηλεκτροχημικών στοιχείων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, φαίνεται πως εάν οι εργασίες πριν την διεξαγωγή της συγκόλλησης αγνοούνται και παραλείπονται, η συγκόλληση, μέσα από αλλαγές που προκαλούνται στο υλικό, θα ευνοήσει τη δυνατότητα αποικισμού από βακτήρια, τον σχηματισμό μεμβράνης βιοεπίστρωσης και την έναρξη της μικροβιακής διάβρωσης (Kurissery et al, 2004).

➤ Επίδραση της υδραυλικής δοκιμής

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας για την έναρξη της MIC είναι η λανθασμένη ή ελλιπής υδραυλική δοκιμή. Ενώ ο πνευματικός έλεγχος είναι απλώς δοκιμή διαρροής με την χρήση αέρα σε συγκεκριμένη πίεση, η υδραυλική δοκιμή είναι δοκιμή διαρροής και αντοχής διότι χρησιμοποιείται νερό και αέρας, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές πιέσεις. Η υδραυλική δοκιμή είναι ένα συνηθισμένο τεστ στη ναυτιλία, για την εκτίμηση κυρίως της ισχύος των συγκολλήσεων σε συστήματα που θα λειτουργούν υπό πίεση ή σε δεξαμενές φορτίων. Η υδραυλική

δοκιμή πραγματοποιείται με πλήρωση του συστήματος με νερό, μέχρι η πίεση να γίνει 1,1 φορές μεγαλύτερη από την πίεση, που μπορεί να υποστεί το σύστημα στην πραγματικότητα. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται νερό χωρίς επεξεργασία (νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό), που μπορεί να μεταφέρει βακτήρια που σχετίζονται με τη διάβρωση, όπως βακτήρια που ανάγουν το θείο (SRB) ή βακτήρια σιδήρου (IB). Για την καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της υδραυλικής δοκιμής και της MIC, αξίζει να αναφερθούν τα εξής:

Λανθασμένη υδραυλική δοκιμή: σημαίνει ότι για την υδραυλική δοκιμή, έχει χρησιμοποιηθεί νερό χωρίς επεξεργασία, με συνέπεια να μην έχει πραγματοποιηθεί χημική επεξεργασία για την απομάκρυνση των βακτηρίων που ενισχύουν τη διάβρωση.

Ελλιπής υδραυλική δοκιμή: σημαίνει ότι ενέργειες όπως η αποστράγγιση και το στέγνωμα που πρέπει να γίνονται αμέσως μετά τη δοκιμή, είτε δεν έχουν πραγματοποιηθεί είτε έχουν γίνει ελλιπώς. Στην περίπτωση αυτή μπορεί κανείς να παρατηρήσει ακόμα παρουσία νερού στο σύστημα.

Όπως προαναφέρθηκε, κάποιες φορές χρησιμοποιείται για την υδραυλική δοκιμή μη επεξεργασμένο νερό. Αυτό είναι ίσως αποτέλεσμα δύο αντιφατικών υποθέσεων που αναφέρονται στην υδραυλική δοκιμή, όπως εξηγείται στη συνέχεια:

- (1) Η υδραυλική δοκιμή θεωρείται σημαντική επειδή αξιολογεί το πόσο ισχυρό είναι το υπό εξέταση στοιχείο και ποια είναι η πιθανότητα διαρροής, πριν τεθεί σε λειτουργία το σύστημα.
- (2) Η υδραυλική δοκιμή δεν θεωρείται σημαντική επειδή δεν αποτελεί μέρος της διαδικασίας κατασκευής. Επίσης, είναι φθηνότερο να διεξάγεται με τις διαθέσιμες πηγές νερού σε σχέση με άλλες επιλογές (Reza, 2017).

5.6 Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της MIC

1. Μικροβιολογική προσβολή που πραγματοποιείται με φυσική παρουσία και προσκόλληση μικροβιακών κυττάρων στις μεταλλικές επιφάνειες.
2. Μικροβιολογική προσβολή μέσω βιολογικής πηγής (όπως SRB ή νιτροβακτήρια), με απέκκριση ανόργανων ή οργανικών οξέων, όπως το ένυδρο αέριο υδρόθειο ή το νιτρικό οξύ που προκαλούν υδρόλυση του υλικού επίστρωσης.

3. Μικροβιολογική προσβολή από οργανικούς διαλύτες, εξαιτίας των δράσεων που προκαλούνται από τα βακτήρια ζύμωσης.
4. Μικροβιολογική προσβολή που προκαλείται από άλατα, εξαιτίας των αντιδράσεων μεταξύ ανιόντων (που προκύπτουν λόγω του μικροβιακού μεταβολισμού) και κατιόντων. Οι επιπτώσεις αυτών των αντιδράσεων, περιλαμβάνουν την διόγκωση του πορώδους υλικού (λόγω της ενυδάτωσης των υδατοδιαλυτών αλάτων) έως την εκτίναξη τους (που προκαλείται από ξηρότητα, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ογκώδεις κρύσταλλοι) εξαιτίας της αρχικής διόγκωσης που προκαλεί η μικροβιακή δραστηριότητα.
5. Η επίδραση των βιομεμβρανών μπορεί να προκαλέσει μικροβιολογική διάβρωση, και κατ' επέκταση προβλήματα όπως η τοπική διάβρωση και η μειωμένη ταχύτητα ροής.
6. Τα ένζυμα, που εκκρίνονται από μικροοργανισμούς, ευνοούν επίσης τη μικροβιολογική διάβρωση.
7. Μικροβιολογική προσβολή προκαλείται επίσης λόγω της διαλυτότητας των περισσότερων οργανικών οξέων, τα οποία σχηματίζουν σύμπλοκα ιόντα μετάλλων που είναι είτε αδιάλυτα είτε σε μικρό βαθμό διαλυτά προϊόντα (Reza, 2017).

5.7 Συμπέρασμα

Η μικροβιολογικά προκαλούμενη διάβρωση (MIC) είναι μια περίπτωση της βιοδιάβρωσης. Η MIC αναφέρεται στη δραστηριότητα των μικροοργανισμών (βακτήρια) και τον ρόλο αυτών στην εκκίνηση, την αύξηση του ρυθμού και την έκταση της διάβρωσης. Πρόσφατα, έχει προταθεί ότι ίσως τα ίδια τα βακτήρια να εμπλέκονται στην πρόσληψη των απαιτούμενων ηλεκτρονίων από τη μεταλλική επιφάνεια (OCIMF, 1997).

Η απάντηση στο ερώτημα «τι κάνει ένα σύστημα ευάλωτο στη MIC;» είναι σίγουρα πολυδιάστατη. Η υποβάθμιση ενός μεταλλικού συστήματος από την μικροβιολογική διάβρωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες και είναι είτε φυσικοί / μηχανικοί παράγοντες, όπως η ταχύτητα του νερού ή η τραχύτητα των επιφανειών, είτε χημικοί παράγοντες, όπως η επίδραση των κραματικών στοιχείων και των συνολικών

διαλυμένων στρεών (TDS). Ως σημαντικοί παράγοντες αναφέρονται ακόμα η διαδικασία της συγκόλλησης μετάλλων, καθώς και η διαδικασία της υδραυλικής δοκιμής, καθώς εάν δεν πραγματοποιηθούν σωστά και με ακρίβεια, μπορεί να θέσουν το σύστημα σε κίνδυνο εκδήλωσης MIC. Στην πραγματικότητα τα συστήματα δεν παραμένουν απρόσβλητα, αλλά επηρεάζονται από MIC, και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να είναι γνωστοί οι τρόποι ανίχνευσης της MIC, καθώς επίσης τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών μεθόδων. Στην εικόνα 17 φαίνεται η δημιουργία διάβρωσης με βελονισμούς στη μεταλλική επιφάνεια (Kurissery et al, 2004).



Εικόνα 17. Διάβρωση τύπου βελονισμού σε μεταλλική επιφάνεια. Πηγή: NACE International

Κεφάλαιο έκτο

Τρόποι αντιμετώπισης της διάβρωσης στις δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων

Ο αυξανόμενος όγκος αργού πετρελαίου που μεταφέρεται από τον παγκόσμιο στόλο δεξαμενόπλοιων οδήγησε σε αυξανόμενες ανησυχίες, για τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η τελευταία δεκαετία ειδικότερα επέφερε τεράστιες αλλαγές στις απαιτήσεις για τα πετρελαιοφόρα. Εκτός από τη στροφή προς τα βελτιωμένα προγράμματα έρευνας, την κατασκευή διπλού κύτους και τις επικαλύψεις δεξαμενών έρματος, οι πρόσφατες προσπάθειες επικεντρώθηκαν επίσης στη θέσπιση μέτρων πρόληψης της διάβρωσης για τις δεξαμενές φορτίου πετρελαιοφόρων.

Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία των πρώτων διεθνών νομικών απαιτήσεων σχετικά με προβλήματα που σχετίζονται με τη διάβρωση και την εφαρμογή επιστρωμάτων στις δεξαμενές φορτίων, και καλύπτει τομείς όπως την εξέταση του συστήματος επικάλυψης και την ανάπτυξη των τεχνικών επιστρώσεων.

6.1 Πρότυπα IMO σχετικά με Ανθεκτικούς στη Διάβρωση Χάλυβες για δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίου.

Οι τροποποιήσεις στη Σύμβαση SOLAS, που απαιτούν μέτρα πρόληψης της διάβρωσης εγκρίθηκαν κατά την 87^η σύνοδο (*MSC – Maritime Safety Committee*) τον Μάιο του 2010, και από την 1^η Ιανουαρίου 2013 η εφαρμογή μέτρων αντοχής στη διάβρωση κατέστη υποχρεωτική για τις δεξαμενές φορτίου (πετρελαίου) όλων των πετρελαιοφόρων αργού πετρελαίου. Οι νέες απαιτήσεις περιλαμβάνουν την εφαρμογή δύο τύπων μεθόδων προστασίας των δεξαμενών φορτίου δεξαμενοπλοίου από τη διάβρωση. Μία μέθοδος προστασίας από την διάβρωση είναι η εφαρμογή ενός συστήματος επιστρώσεως παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στις δεξαμενές έρματος για την προστασία των μεταλλικών στοιχείων. Η άλλη μέθοδος είναι η χρήση χάλυβα ανθεκτικού στη διάβρωση (Nippon steel & Sumitomo Metal, 2015).

Ένα νέο «πρότυπο απόδοσης για χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση» υιοθετήθηκε επίσης μαζί με τις τροποποιήσεις στο SOLAS. Η ανάπτυξη ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα προήλθε από την Ιαπωνία στα τέλη της δεκαετίας του 1990, ως συνέπεια ενός κοινού ερευνητικού προγράμματος που πραγματοποιήθηκε για την αντιμετώπιση της διάβρωσης των δεξαμενών φορτίου. Οι κορυφαίοι παραγωγοί χάλυβα στην Ιαπωνία

συνεργάστηκαν και ανέπτυξαν χάλυβες ανθεκτικούς στη διάβρωση λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προήλθαν από το παραπάνω πρόγραμμα. Το πρόγραμμα περιελάμβανε την αναπαράσταση του μηχανισμού διάβρωσης, που εμφανίζεται κάτω από το ανώτερο κατάστρωμα και στον πυθμένα της δεξαμενής, σε συνθήκες περιβάλλοντος ίδιες μ' αυτές που επικρατούν στις δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου. Το αποτέλεσμα του προγράμματος ήταν η εμφάνιση διάβρωσης βελονισμών, της οποίας η επέκταση θα οδηγούσε σε διάτρηση. Ο νέος χάλυβας υποσχόταν να παρέχει στους πλοιοκτήτες και στα ναυπηγεία εναλλακτική λύση χαμηλότερου κόστους έναντι των επιχρισμάτων (Nippon steel & Sumitomo Metal, 2015).

Τα πρότυπα του IMO δεν καθορίζουν περιορισμούς στην πρόσθετη χημική σύνθεση ενός υλικού που βελτιώνει τις αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Ωστόσο, η χρήση ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα με πολλά κραματικά στοιχεία δεν είναι ρεαλιστική, καθώς η ικανότητα συγκόλλησης θα επηρεαστεί σημαντικά και οι προδιαγραφές της διαδικασίας συγκόλλησης που έχουν ήδη καθιερωθεί σε διάφορα ναυπηγεία θα πρέπει να αλλάξουν, παρόλο που έχουν αναπτυχθεί σχετικά πρόσφατα. Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες σε συνδυασμό με τα αναλώσιμα συγκόλλησης πρέπει να προεγκριθούν μέσω κατάλληλων εργαστηριακών δοκιμών πριν γίνει εφικτή η εφαρμογή τους (ClassNK, 2011).

Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες έχουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση σε περιβάλλον, όπως αυτό των δεξαμενών φορτίου των δεξαμενοπλοίων. Η έννοια της προστασίας μέσω της χρήσης ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα βασίζεται στο γεγονός ότι έχει αποδειχθεί πως οι χάλυβες διατηρούν τη δομική τους ακεραιότητα κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, επιβραδύνοντας τον ρυθμό διάβρωσης σε σύγκριση με τους συμβατικούς χάλυβες. Η χρήση χάλυβα ανθεκτικού στη διάβρωση, δίνει την δυνατότητα στα ναυπηγεία να μειώσουν το χρόνο της διαδικασίας κατασκευής και επίστρωσης, ενώ αντίστοιχα οι πλοιοκτήτες μπορούν να μειώσουν το κόστος συντήρησης και επισκευής (Resolution MSC.289(87), 2010).

Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες είναι παρόμοιοι με τον κοινό ναυπηγικό χάλυβα. όπως περιγράφεται στους κανονισμούς IACS (UR) W11. Ομοίως στο πρότυπο IACS UR W17 περιγράφονται οι απαιτήσεις συγκόλλησης και συγκολλησιμότητας του ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα ενώ οι απαιτήσεις για τα αναλώσιμα που θα χρησιμοποιηθούν στη συγκόλληση περιγράφονται στο πρότυπο UR W28. Οι δοκιμές έγκρισης έναντι της διάβρωσης για ανθεκτικούς στη διάβρωση χάλυβες αναφέρονται στο MSC.289 (87). Αξίζει να σημειωθεί ότι για το έλασμα του

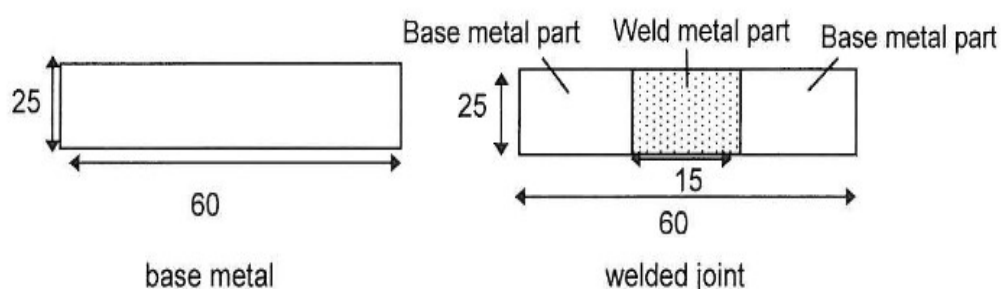
κυρίου καταστρώματος οι συνθήκες προσομοίωσης είναι συγκεκριμένες και η προσομοίωση έχει διάρκεια 21, 49, 77, 98 ημέρες για χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση και 98 ημέρες για τις συγκολλημένες αρθρώσεις (Resolution MSC.289(87), 2010).

Με βάση τα προηγούμενα δεδομένα, το πεδίο εφαρμογής των οδηγιών αναφέρεται στις ιδιότητες αντοχής στη διάβρωση, ώστε να ικανοποιούνται τα ακόλουθα:

α. Η χημική σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των δομικών προδιαγραφών του κύτους, όπως αυτές καθορίζονται από τις εταιρείες.

β. Τα κραματικά στοιχεία που πρέπει να προστεθούν στην χημική σύνθεση του χάλυβα για να βελτιωθεί η αντοχή του στη διάβρωση, που δεν προσδιορίζονται παραπάνω, θα πρέπει να έχουν περιεκτικότητα μικρότερη του 1% κατ' όγκο, προκειμένου να διασφαλιστεί επαρκής συγκολλησιμότητα του υλικού. Ταυτόχρονα, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο χάλυβας δεν θα προκαλεί γαλβανική διάβρωση όταν βρίσκεται σε επαφή με συμβατικούς χάλυβες (ClassNK, 2011).

Κατασκευάζονται πέντε δοκίμια με συγκεκριμένες διαστάσεις $25 \pm 1 \text{ mm} \times 60 \pm 1 \text{ mm} \times 5 \pm 0,5 \text{ mm}$ για την προσομοίωση ελάσματος και αντίστοιχα για κάθε δοκίμιο συγκόλλησης που θα χρησιμοποιηθεί με διαστάσεις $25 \pm 1 \text{ mm} \times 60 \pm 1 \text{ mm} \times 5 \pm 0,5 \text{ mm}$ συμπεριλαμβάνοντας $15 \pm 5 \text{ mm}$ του πλάτους συγκόλλησης όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Όλες οι επιφάνειες, εκτός από αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση, προστατεύονται ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα (Resolution MSC.289(87), 2010).



Εικόνα 18. Δοκίμιο προσομοίωσης. Πηγή: IMO - RESOLUTION MSC.289(87)

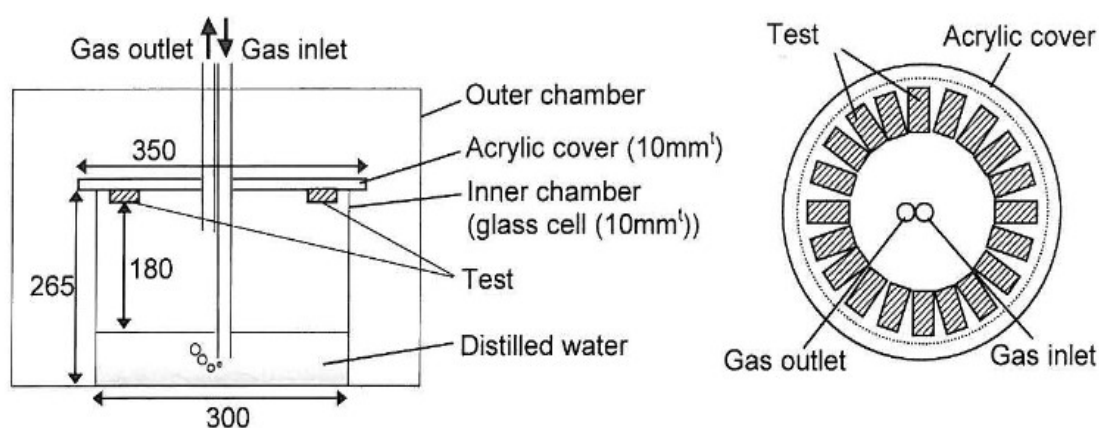
Προσομοιώνοντας την κατάσταση του πραγματικού άνω καταστρώματος, εκτελείται ο κύκλος δοκιμής σε μια συσκευή δοκιμής, όπως φαίνεται στην εικόνα 19, με απεσταγμένο νερό και κατάλληλο αέριο προσομοίωσης, ώστε να αναπαρασταθεί το περιβάλλον της δεξαμενής φορτίου. Τα στοιχεία που αναφέρονται στο αέριο είναι

τα εξής: $4 \pm 1\%$ O₂, $13 \pm 2\%$ CO₂, 100 ± 10 ppm SO₂, 500 ± 50 ppm H₂S, $83 \pm 2\%$ N₂.

O₂: Οξυγόνο - CO₂: Διοξείδιο του άνθρακα - ppm: μέρη ανά εκατομμύριο - SO₂: Διοξείδιο του θείου - H₂S: Υδρόθειο - N₂: Άζωτο

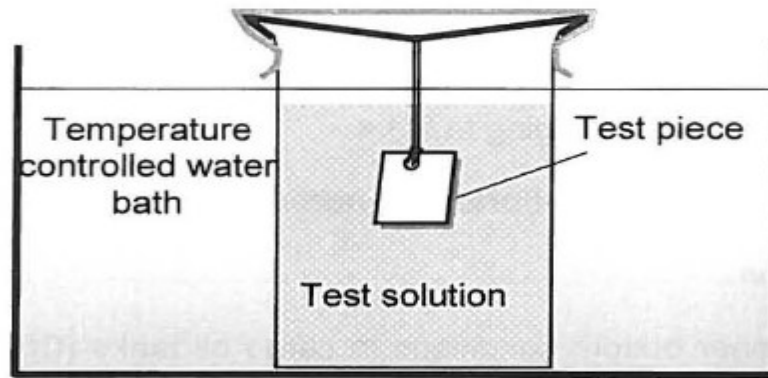
Διατηρείται απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του δοκιμίου και του απεσταγμένου νερού ώστε να αποφεύγεται η επαφή με το απεσταγμένο νερό. Η ελάχιστη παροχή αερίου είναι $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ για τις πρώτες 24 ώρες, και $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ μετά από 24 ώρες. Τα δοκίμια θερμαίνονται για 19 ± 2 ώρες στους $50 \pm 2^\circ\text{C}$ και 3 ± 2 ώρες στους $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Ο χρόνος μετάβασης είναι τουλάχιστον 1 ώρα και ο χρόνος για 1 κύκλο είναι 24 ώρες. Η θερμοκρασία του απεσταγμένου νερού διατηρείται στους 36°C , ενώ η θερμοκρασία των δοκιμών είναι 50°C (Resolution MSC.289(87), 2010).



Εικόνα 19. Συσκευή Δοκιμής μεταλλικών δοκιμίων. Πηγή: IMO RESOLUTION MSC.289(87)

Αντίστοιχα, για το έλασμα πυθμένα δεξαμενής φορτίου η προσομοίωση συνθηκών διαρκεί 72 ώρες για το μεταλλικό δοκίμιο και 168 ώρες για την συγκολλημένη άρθρωση. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε εγκεκριμένη εγκατάσταση δοκιμών και τα δοκίμια έχουν διαστάσεις όμοιες με τις προαναφερόμενες, χρησιμοποιώντας όμως διαφορετική συσκευή προσομοίωσης από αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα δοκίμια αναρτώνται σε διάλυμα, ασφαλισμένα με πλαστικό νήμα, για την αποφυγή ρωγμών και τοπικής διάβρωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Το διάλυμα δοκιμής περιέχει 10% κατά βάρος NaCl και το pH του είναι 0,85. Ανανεώνεται κάθε 24 ώρες για να ελαχιστοποιούνται μεταβολές του pH. Ο όγκος του διαλύματος είναι περισσότερο από $20 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ (μιλιλίτρο ανά εμβαδόν επιφάνειας του δοκιμίου) με θερμοκρασία περίπου στους $30 \pm 2^\circ\text{C}$ (Resolution MSC.289(87), 2010).



Εικόνα 20. Συσκευή δοκιμής ελάσματος πυθμένα. Πηγή: IMO - RESOLUTION MSC.289(87)

Στο τέλος του πειράματος εξετάζεται η διαφορά του αρχικού και τελικού βάρους του δοκιμίου και ο ρυθμός διάβρωσης (CR) από τον παρακάτω τύπο:

$$CR \text{ (mm/year)} = \{365 \text{ (days)} \times 24 \text{ (hours)} \times W \times 10\} / \{S \times 72 \text{ (hours)} \times D\}$$

CR: corrosion rate, W: είναι η απώλεια βάρους, S: επιφάνεια του δοκιμίου, D: η πυκνότητα του διαλύματος.

6.2 Πρότυπα IMO για συστήματα επικάλυψης σε δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου

Τα πρότυπα του IMO για συστήματα επικάλυψης, καθορίζουν έναν στόχο προσδόκιμου ζωής της επίστρωσης 15 ετών. Για την επίτευξη του στόχου, καθορίζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις, οριακές τιμές, όπως επίσης μηχανισμοί ελέγχου και δοκιμών κατά την κατασκευή. Επομένως, τα πρότυπα επικάλυψης θέτουν καθορισμένες οριακές τιμές για την κατάλληλη προετοιμασία των επιφανειών εφαρμογής, όπως και σχετικά με την καθαριότητα και το προφίλ της επιφάνειας, το επίπεδο αλατότητας, το βαθμό σκόνης, το πάχος ξηρού υμένα και άλλους δευτερεύοντες παράγοντες. Επιπροσθέτως, δίνονται οδηγίες σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου συστήματος επίστρωσης, των μεθόδων εφαρμογής και των απαιτούμενων δοκιμών πιστοποίησης των συστημάτων επίστρωσης. Ακόμη, δίνονται κατευθυντήριες οδηγίες για την επιθεώρηση της διαδικασίας εφαρμογής από εξειδικευμένο επιθεωρητή καθώς και για τη δημιουργία και τήρηση του συστήματος καταγραφής τεχνικών δεδομένων και των αρχείων εργασίας (IMO Resolution MSC.288(87), 2010).

Αντιθέτως, ο στόχος των προτύπων, που είναι σχετικά με τον ανθεκτικό στη διάβρωση χάλυβα, είναι η διατήρηση της απαιτούμενης δομικής ακεραιότητας για 25 χρόνια σε συνθήκες έντονης διάβρωσης, όπως των δεξαμενών φορτίου αργού πετρελαίου. Ο μηχανισμός προστασίας από τη διάβρωση από ανθεκτικούς στη διάβρωση χάλυβες είναι αρκετά διαφορετικός από αυτόν για τα συστήματα επικάλυψης και η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από τις ιδιότητες των χαλύβων και των συγκολλημένων αρμών. Επομένως, τα πρότυπα του IMO επικεντρώνονται στις δοκιμές προσόντων, χωρίς να καθορίζουν λεπτομερείς προδιαγραφές για τις εργασίες (IMO Resolution MSC.288(87), 2010).

Κεφάλαιο έβδομο

Επιθεωρήσεις της μεταλλικής κατασκευής και των δεξαμενών φορτίων δεξαμενοπλοίων

Το 1993 ο διεθνής σύνδεσμος νηογνομόνων θέσπισε ένα πρόγραμμα επιθεωρήσεων της μεταλλικής κατασκευής, για τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην και δεξαμενοπλοίων. Λόγω των πολλών ατυχημάτων, το 1994 ο IMO έλαβε δραστικά μέτρα, θεσπίζοντας ένα νέο κεφάλαιο στη SOLAS (κεφ. XI-1) ώστε να ενισχύσει τους κανονισμούς, ως προς την ασφάλεια των πλοίων. Το νέο αυτό κεφάλαιο, περιελάμβανε ένα συγκεκριμένο κύκλο επιθεωρήσεων για τα πλοία. Ο κύκλος επιθεωρήσεων (*Enhanced Survey Program – ESP code*) προσδιορίζει συγκεκριμένα τις επιθεωρήσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην μεταλλική κατασκευή και μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου ανάλογα τον τύπο και την ηλικία του (ClassNK,2020).

Οι επιθεωρήσεις που γίνονται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, είναι ο συχνότερος τρόπος εντοπισμού των επιπτώσεων που δημιουργούνται από τη διάβρωση και διαιρούνται σε δύο υποκατηγορίες:

- Οι υποχρεωτικές επιθεωρήσεις που γίνονται παρουσία επιθεωρητών (surveyor) σε ετήσια βάση, εξωτερικού φορέα (*classification society*), για την εξακρίβωση της κατάστασης πλοίου και την έκδοση πιστοποιητικών αξιοπλοΐας.
- Αυτές που γίνονται για λογαριασμό των πλοιοκτητών από ανεξάρτητους επιθεωρητές, είτε για λογαριασμό ναυτασφαλιστών ή για την αγοραπωλησία του πλοίου ή για την ναύλωση του πλοίου είτε για την επιθεώρηση μετά από ζημιά.

Οι υποχρεωτικές επιθεωρήσεις χωρίζονται σε ετήσιες (*annual surveys*), ενδιάμεσες (*intermediate surveys*) και ειδικές επιθεωρήσεις (*special surveys*) (ClassNK, 2020).

7.1. Ετήσια επιθεώρηση (Annual survey)

Η ετήσια επιθεώρηση πραγματοποιείται μια φορά το χρόνο, με χρονική απόσταση τριών (3) μηνών πριν ή μετά (παράθυρο) από την τελευταία ημερομηνία

πραγματοποίησης της ειδικής επιθεώρησης (*special survey*). Κατά την διενέργεια της ετήσιας επιθεώρησης εξακριβώνεται η ικανοποιητική κατάσταση των παρακάτω στοιχείων:

1. Οπτικός έλεγχος των στοιχείων μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, ήτοι κύριο κατάστρωμα, υπερκατασκευές, κάγκελα και μια δεξαμενή φορτίου και μια δεξαμενή έρματος. Βοηθητικά μηχανήματα μηχανοστασίου όπως αντλίες έρματος και κύτους, γεννήτριες (*generators*) και δοκιμή γεννήτριας εκτάκτου ανάγκης (*simulation test of emergency generator*), σύστημα πηδαλιουχίας και χειροκίνητη λειτουργία εκτάκτου ανάγκης αυτού (*emergency steering*).
2. Δοκιμή λειτουργίας όλων των ανυψωτικών μέσων χωρίς ανύψωση βάρους, εργάτες άγκυρας και επιθεώρηση και δοκιμή σωσίβιων βαρκών – καπονιών. Δοκιμάζονται όλοι οι αυτοματισμοί του πλοίου και όλα τα μηχανήματα της γέφυρας, με ιδιαίτερη προσοχή στους αυτοματισμούς για την εξάλειψη πυρκαγιάς.
3. Οπτικός έλεγχος όλων των δικτύων του πλοίου (πυροσβεστικού, φορτίου, πλυσίματος, καυσίμου). Εφόσον ο οπτικός έλεγχος των δικτύων και των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής δεν ικανοποιεί τον επιθεωρητή υπάρχει η δυνατότητα εξέτασης με επιμέρους έλεγχο που περιλαμβάνει παχυμετρήσεις (ClassNK,2020).

7.2. Ενδιάμεση Επιθεώρηση (Intermediate Survey)

Η ενδιάμεση επιθεώρηση πραγματοποιείται σε αντικατάσταση της δεύτερης ή τρίτης ετήσιας επιθεώρησης. Οι απαιτήσεις είναι όμοιες με αυτές της ετήσιας επιθεώρησης, ενώ ανάλογα με την ηλικία του πλοίου καθορίζονται ορισμένοι επιπρόσθετοι έλεγχοι. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ηλικία των 12,5 ετών είναι καθοριστική για ένα πλοίο, όσον αφορά τη μεταλλική κατασκευή του, διότι μέχρι την ηλικία των 12,5 ετών το πλοίο στις ενδιάμεσες επιθεωρήσεις υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί αν ο πυθμένας του πλοίου θα επιθεωρείται με δύτες ή αν θα γίνεται επιθεώρηση με δεξαμενισμό. Από την ηλικία αυτή και πάνω το πλοίο απαραιτήτως επιθεωρείται μόνο στην δεξαμενή καθώς υπόκειται σε παχυμετρήσεις πυθμένα κάθε 2.5 έτη. Μετά την ηλικία των 15 ετών, κάθε ενδιάμεση επιθεώρηση περιέχει τις

απαιτήσεις της προηγούμενης ειδικής επιθεώρησης, που σημαίνει ότι το πλοίο υπόκειται σε ειδική επιθεώρηση κάθε 2.5 έτη (ClassNK,2020).

7.3. Ειδική Επιθεώρηση (Special Survey)

Η ειδική επιθεώρηση διενεργείται σε διάστημα 4 - 5 ετών. Κατά την ειδική επιθεώρηση στο μηχανολογικό εξοπλισμό εξετάζονται τα προαναφερθέντα και τα παρακάτω (ClassNK,2020):

- Ωστικό έδρανο ελικοφόρου άξονα και τα έδρανα του
- Διατάξεις πηδαλιουχίας και βοηθητικά μηχανήματα
- Έδραση κύριας μηχανής, μηχανημάτων
- Συστήματα καυσίμων, επιστομίων και δικτύων
- Συστήματα αυτοματισμού και αντλίες
- Αντίσταση μόνωσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Όσον αναφορά τη μεταλλική κατασκευή εξετάζονται με βάση την ηλικία του πλοίου τα παρακάτω, με οπτικό έλεγχο αλλά και με τη διενέργεια μη καταστρεπτικών ελέγχων με υπερήχους (παχυμετρήσεις – *ultrasonic thickness measurement*) για την καταγραφή της φθοράς των ελασμάτων (ClassNK,2020):

➤ Ειδική Επιθεώρηση No.1 (No.1 Special Survey)

- Ύποπτες περιοχές σύμφωνα με την κρίση του επιθεωρητή
- Ένας (1) νομέας σε μια δεξαμενή έρματος και μια εγκάρσια φρακτή
- Ένα ζυγό ενίσχυσης καταστρώματος σε μια δεξαμενή φορτίου και μια εγκάρσια φρακτή
- Μια ζώνη καταστρώματος που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του πλοίου

➤ Ειδική Επιθεώρηση No.2 (No.2 Special Survey)

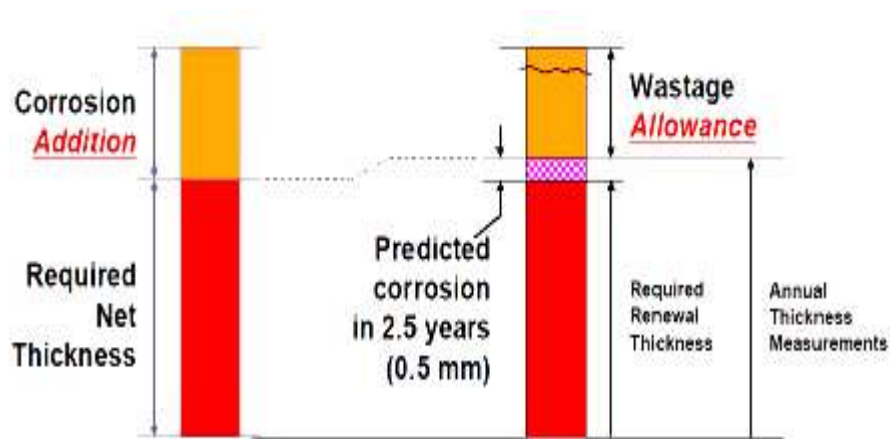
- Ύποπτες περιοχές σύμφωνα με την κρίση του επιθεωρητή
- Όλα τα ελάσματα καταστρώματος στην περιοχή των δεξαμενών φορτίου
- Όλοι οι νομείς σε μια δεξαμενή έρματος και στις εγκάρσιες φρακτές
- Ένας (1) νομέας στις υπόλοιπες δεξαμενές έρματος και μια εγκάρσια φρακτή
- Επιλεγμένα ελάσματα εξάλων εκτός της περιοχής των δεξαμενών φορτίου
- Ένα ζυγό ενίσχυσης καταστρώματος και μια εγκάρσια φρακτή σε 3 δεξαμενές φορτίου

- Επιλεγμένα δίκτυα σωληνώσεων.
- Ειδική Επιθεώρηση No.3 (No.3 Special Survey)
 - Ύποπτες περιοχές σύμφωνα με την κρίση του επιθεωρητή
 - Όλα τα ελάσματα καταστρώματος του πλοίου
 - Όλοι οι νομείς και όλες οι εγκάρσιες φρακτές σε όλες τις δεξαμενές έρματος και δεξαμενές διαγωγής
 - Όλοι οι νομείς και όλες οι φρακτές σε όλες τις δεξαμενές φορτίου
 - Όλα τα ελάσματα πυθμένα και όλα τα ελάσματα εξάλων
 - Δύο εγκάρσιες ζώνες συμπεριλαμβανομένων όλων των ελασμάτων και ενισχυτικών
 - Επιλεγμένα δίκτυα σωληνώσεων και κουτιά αναρρόφησης
- Ειδική Επιθεώρηση No.4 (No.4 Special Survey)
 - Ότι και στην προηγούμενη επιθεώρηση
 - Όλα τα ελάσματα των καταστρωμάτων των υπερκατασκευών
 - Εξωτερικό περίβλημα στις περιοχές των εξαγωγών σωληνώσεων
 - Περιοχές που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής
 - Οι δεξαμενές φορτίου
 - Ενισχύσεις κάτω από το κατάστρωμα και ρωγμές στα άκρα των πελμάτων των μπρακέτων (*bracket toe*)
 - Λώροι εγκάρσιων φρακτών
 - Νομείς στις διαμήκεις φρακτές
 - Ρωγμές στον εσωτερικό πυθμένα στην ένωση με τις εγκάρσιες φρακτές.

Τα σημεία των παχυμετρήσεων ορίζονται από τους κανονισμούς όπως φαίνεται στην εικόνα 22 - 23, και συγκρίνονται με τα όρια που θέτει ο κάθε νηογνώμονας. Γενικά τα όρια φθοράς, βρίσκονται περίπου στο ίδιο ποσοστό, για όλους τους νηογνώμονες με μικρές διαφορές. Ανάλογα με την ομάδα στην οποία ανήκει το επιθεωρούμενο κατασκευαστικό στοιχείο, έχει και άλλο ποσοστό επιτρεπόμενης φθοράς. Στον πίνακα 3 παρατίθενται τα ανώτερα όρια φθοράς ανά κατασκευαστικό στοιχείο του πλοίου (ClassNK,2020).

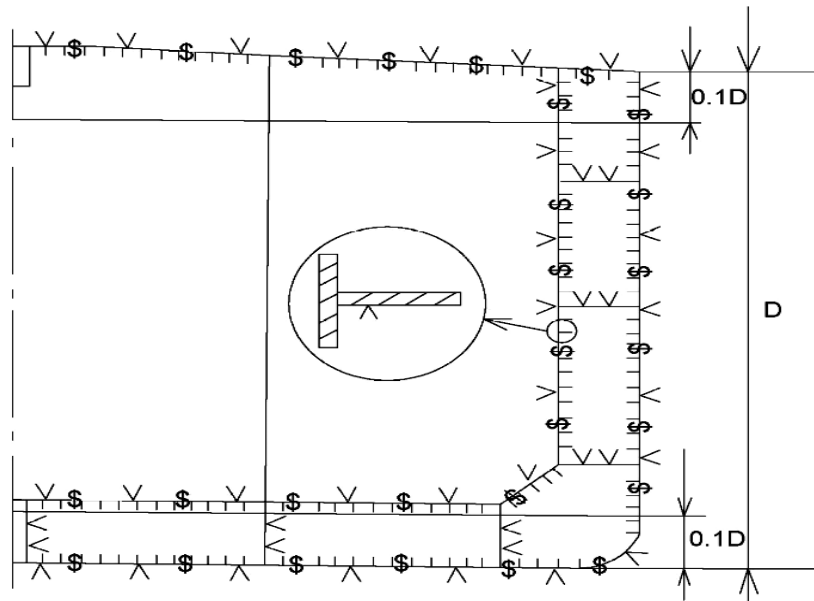
Πίνακας 3. Επιτρεπόμενα ποσοστά διάβρωσης ανά κατασκευαστικό στοιχείο (Πηγή ClassNK).

Structural Member	Wastage Allowance
<ul style="list-style-type: none"> - Shell plates - Strength deck plates - Longitudinal beams (flat bar) on shear strake and strength deck - Tight bulkheads in deep tanks - Inner bottom plates 	20% of original thickness + 1 mm
<ul style="list-style-type: none"> - Floors and girders in double bottom - Primary members (web & face) - Web, face and bracket of hold frames - Watertight bulkhead plates 	25% of original thickness
<ul style="list-style-type: none"> - Web and face of frames (excluding hold frames), longls beams, stiffeners and brackets - Effective deck plates - Hatch cover and hatch beam 	30% of original thickness

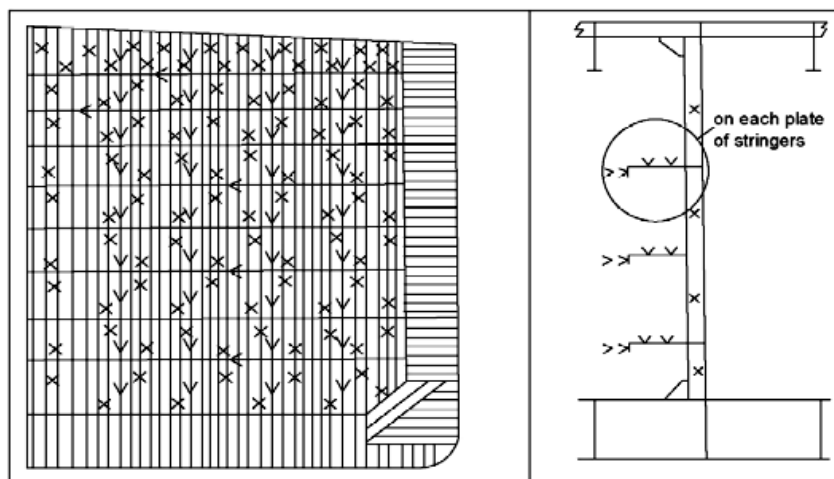


Εικόνα 21. Απεικόνιση επιτρεπόμενης διάβρωσης μεταλλικών στοιχείων κατασκευής. Πηγή: ClassNK

Εφόσον ένα έλασμα, όπως απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα 21, με αρχικό πάχος 10,0 mm επιθεωρηθεί και βρεθεί να έχει πάχος 7,0 mm ή λιγότερο, με ομοιόμορφη φθορά και όχι τοπικά, τότε το έλασμα αυτό πρέπει να αντικατασταθεί, εφόσον το ποσοστό αντικατάστασης που ορίζεται από τον εκάστοτε νηογνώμονα είναι 30% επί του αρχικού πάχους. Στην περίπτωση που το έλασμα με αρχικό πάχος 10,0 mm επιθεωρηθεί και βρεθεί να έχει πάχος 8,0 mm, δηλαδή μικρότερο του ποσοστού αντικατάστασης που θέτει ο νηογνώμονας, τότε το επιθεωρούμενο έλασμα δεν αντικαθίσταται αλλά με βάση τους κανονισμούς χρειάζεται να επιθεωρείται σε ετήσια βάση.



Εικόνα 22. Παράδειγμα σημείων που υπόκεινται σε ποιοτικό έλεγχο / παχυμετρήσεις στις εγκάρσιες ζώνες.
 Πηγή: ClassNK



Εικόνα 23. Παράδειγμα σημείων που υπόκεινται σε ποιοτικό έλεγχο / παχυμετρήσεις στις εγκάρσιες φρακτές των δεξαμεμών Φορτίων. Πηγή: ClassNK

Συνεπώς ένας τρόπος έγκαιρης πρόληψης και αντιμετώπισης της διάβρωσης είναι η συστηματική επιθεώρηση του πλοίου, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα υψηλής διάβρωσης που οδηγούν σε ατυχήματα και ταυτόχρονα με την επιθεώρηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου να γίνεται και επιθεώρηση των επικαλύψεων των επιφανειών αυτών, ώστε εάν εντοπιστεί κάποιο ελάττωμα σε αυτές, να επιδιορθωθεί και να αποφευχθεί η ανάπτυξη της διάβρωσης (Wang et al, 2003).

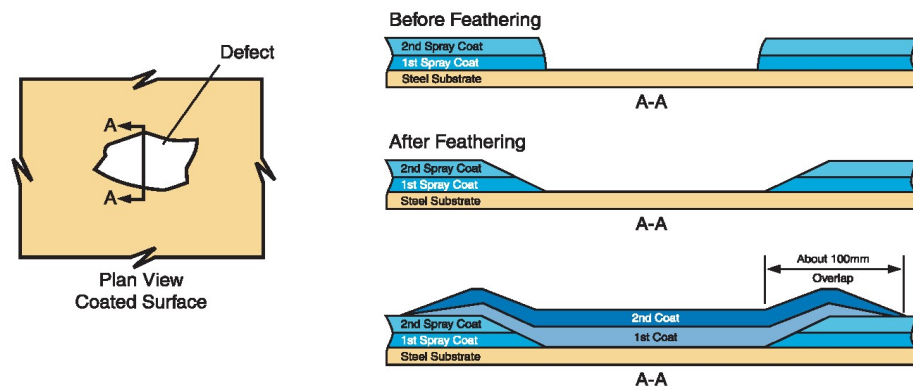
Κεφάλαιο όγδοο

Προετοιμασία των επιφανειών και εφαρμογή των συστημάτων επιστρώσεων στις δεξαμενές φορτίων δεξαμενόπλοιων

Οι νέοι κανονισμοί προστασίας από τη διάβρωση απαιτούν προστασία από τη διάβρωση στις δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου, είτε με επίστρωση MSC 288(87) ή με εναλλακτικά μέσα MSC 289(87), για τις δεξαμενές φορτίου. Ωστόσο, οι μηχανισμοί μέσω των οποίων λειτουργεί η διάβρωση σε κάθε περιοχή επί του πλοίου είναι διαφορετικοί και πρέπει να αντιμετωπίζονται ανάλογα. Η δυνατότητα του συστήματος επίστρωσης να επιτύχει τον στόχο της ωφέλιμης ζωής εξαρτάται από τον τύπο του, την προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας που θα επιστρωθεί, το περιβάλλον λειτουργίας, την ποιότητα εφαρμογής της επίστρωσης, τη συστηματική επιθεώρησή του, αλλά και τη συντήρησή του. Όλες οι προαναφερόμενες παράμετροι συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης της επίστρωσης (IMO Resolution msc.288(87), 2010).

8.1 Προετοιμασία μεταλλικών επιφανειών πριν την εφαρμογή επιστρώσεων

Όπως αναφέρθηκε, τα πλοία λειτουργούν σε ένα πολύ δραστικό περιβάλλον από πλευράς διάβρωσης. Έτσι λοιπόν για να επιτευχθεί η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του πλοίου πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα προληπτικά μέτρα έναντι της διάβρωσης, πέραν της συστηματικής επιθεώρησης που αναλύθηκε παραπάνω. Τα προστατευτικά επιστρώματα είναι ένας τρόπος αντιμετώπισης της διάβρωσης, αναλόγως την περίπτωση, με τον οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί ή και να περιοριστεί ο ρυθμός διάβρωσης των εσωτερικών στοιχείων της κατασκευής ενός πλοίου. Πριν από την εφαρμογή όμως του αντιδιαβρωτικού συστήματος επικάλυψης, αναγκαία προϋπόθεση ώστε να είναι επιτυχής η εφαρμογή των επιστρωμάτων, είναι η σωστή προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας, όπως φαίνεται στην εικόνα 24, καθώς ο παράγοντας αυτός καθορίζει τη διάρκεια ζωής που παρέχει η προστασία.



Εικόνα 24. Σχηματική αναπαράσταση προετοιμασίας επιφάνειας. Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection

Με την φράση «σωστή προετοιμασία της επιφάνειας», εννοούμε τον καθαρισμό της μεταλλικής επιφάνειας από οτιδήποτε επιδρά στην αποδοτικότητα του συστήματος επιστρωμάτων. Η παρουσία ακαθαρσιών στη μεταλλική επιφάνεια οδηγεί στο σχηματισμό γαλβανικών στοιχείων με αποτέλεσμα την εμφάνιση της διάβρωσης με βελονισμούς (*pitting corrosion*) και τελικά αστοχίας του συστήματος επικάλυψης. Επίσης, η σωστή προετοιμασία των μεταλλικών επιφανειών αποσκοπεί στη δημιουργία ισχυρής πρόσφυσης μεταξύ επιστρώματος και μετάλλου (ABS, 2007).

Οι συνηθέστερες μέθοδοι προετοιμασίας των μεταλλικών επιφανειών είναι οι παρακάτω:

- Απολίπανση (*Degreasing*)
- Απομάκρυνση της καλαμίνιας (*Mill scale removal*)
- Μηχανικός καθαρισμός (*Mechanical Cleaning*)
- Καθαρισμός με φλόγα (*Flame cleaning*)
- Καθαρισμός με αμμοβολή (*Sand blast cleaning*)
- Καθαρισμός με υδροβολή (*Hydro blast cleaning*)

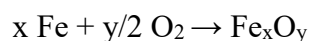
Απολίπανση

Η διαδικασία της απολίπανσης συνίσταται στην απομάκρυνση προϊόντων και παραγώγων λαδιών και λιπών καθώς και σκόνης, αλάτων και διαφόρων ακαθαρσιών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση οργανικών διαλυτών (*organic solvents*) ή απορρυπαντικών (*detergents*) σε υδατικό διάλυμα. Η απομάκρυνση των παραπάνω κρίνεται απαραίτητη διότι ακόμα και μικρές ποσότητες προκαλούν ανομοιογένεια της

επιφάνειας με αποτέλεσμα την αποτυχία πρόσφυσης του επιστρώματος στο μέταλλο (ABS, 2007).

Απομάκρυνση της καλαμίνης – (Mill Scale)

Κατά την διάρκεια της παραγωγής θερμικά ανοπτημένων χαλύβων ο θερμός χάλυβας αντιδρά με το οξυγόνο και σχηματίζει οξειδία κατά την αντίδραση:



Ως συνέπεια σχηματίζεται πάνω στο έλασμα ένα στρώμα οξειδίων που διαφέρει σε πάχος και σύσταση, ανάλογα με το πάχος του χάλυβα. Εάν η καλαμίνη δεν απομακρυνθεί από τη χαλύβδινη επιφάνεια λόγω της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε αυτή και το χάλυβα, δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο και έτσι επιταχύνεται η καταστροφή του προστατευτικού συστήματος επικαλύψεων, μειώνοντας ταυτόχρονα και την πρόσφυση του στο μέταλλο. Η απομάκρυνση της καλαμίνης απαιτεί έκθεση του ελάσματος στο εξωτερικό περιβάλλον ή επιτυγχάνεται με μηχανικά μέσα. Ως μέθοδος αντιδιαβρωτικής προστασίας έχει αρκετά μειονεκτήματα. Πλέον, η μέθοδος με έκθεση σε εξωτερικό περιβάλλον έχει εξαιρεθεί αφού στη σύγχρονη ναυπήγηση τα ελάσματα μετά την διέλαση περνούν από το στάδιο της αμμοβολής και επικαλύπτονται με ένα προσωρινό υπόστρωμα (*shop primer*), το οποίο πρέπει να αφαιρείται πριν τη εφαρμογή των τελικών υποστρωμάτων (Hempel, 2009).

Μηχανικός καθαρισμός (Mechanical Cleaning)

Αφού προηγηθεί η απολίπανση των μεταλλικών επιφανειών, σε επόμενο στάδιο γίνεται ο μηχανικός καθαρισμός με εργαλεία χειρός, ηλεκτρικά εργαλεία η εργαλεία αέρος καθώς στα δεξαμενόπλοια απαγορεύεται η χρήση ηλεκτρικού εξοπλισμού στο ανοικτό κατάστρωμα ή στις δεξαμενές. Όταν η επιφάνεια καθαριστεί από την ελαφρώς προσκολλημένη σκουριά, στην συνέχεια βουρτσίζεται με συρματόβουρτσες ή δίσκους λείανσης (*abrasive flap discs*). Ακολούθως, τα υπολείμματα σκόνης, που δημιουργήθηκαν, απομακρύνονται με πεπιεσμένο αέρα ή με σκούπες ή με γλυκό νερό, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή προσκόλληση της επίστρωσης στην επιφάνεια του μετάλλου. Γενικά, η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για την απομάκρυνση της ελαφράς σκουριάς και επιφανειών ακαθαρσιών. Το ποιοτικό επίπεδο αυτής της μεθόδου είναι πολύ χαμηλό, γι' αυτό και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις τοπικών επισκευών ή σε πολύ δύσκολα σημεία που δεν μπορεί να εφαρμοσθεί άλλη μέθοδος (ABS, 2007).

Καθαρισμός με χρήση ηλεκτρικών εργαλείων ή εργαλεία αέρος (*Power tool cleaning*)

Αφού προηγηθεί απολίπανση της περιοχής προς καθαρισμό, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται εργαλεία που λειτουργούν με πρόσκρουση (*impact*), με περιστροφή (*rotary*) ή και συνδυασμό των δύο. Αμέσως μετά τον μηχανικό καθαρισμό και την απομάκρυνση της σκόνης ακολουθεί το πρώτο στρώμα ασταριού. Γενικά η μέθοδος αυτή, είναι ταχύτερη και αποφέρει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από το χειρωνακτικό καθαρισμό. Εφαρμόζεται σε τοπικές επισκευές, μεγαλύτερου εύρους και σε σημεία με αρκετή διάβρωση. Δεν συνίσταται για περιοχές όπως τα ύφαλα και τα έξαλλα του πλοίου (Καρύδης, 2002).

Καθαρισμός με αμμοβολή

Κατά τη μέθοδο αυτή, ο καθαρισμός γίνεται με εκτόξευση σωματιδίων άμμου, με την βοήθεια αέρα, πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Αποτέλεσμα της πρόσκρουσης είναι η αφαίρεση παλαιότερων επιστρωμάτων, ακαθαρσιών, σκουριάς καθώς και η επίτευξη κατάλληλης τραχύτητας ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή πρόσφυση του επιστρώματος στη μεταλλική επιφάνεια. Η επιλογή του ψήγματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την σκληρότητα του καθώς και από την επιθυμητή ποιότητα και τραχύτητα της τελικής επιφάνειας. Τα ψήγματα που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι μεταλλικά και ορυκτά.

Τα ποιοτικά στάδια της μεθόδου, όπως φαίνονται στον πίνακα 4 και χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- *Sweep blasting – Loose rust removal – Surface preparation*
- *Sa1 – Light blast cleaning*
- *Sa2 – Thorough blast cleaning*
- *Sa2½ – Very thorough blast cleaning*
- *Sa3 – Blast cleaning to visually clean steel*

Γενικά, είναι η πιο διαδεδομένη και πιο αποδοτική μέθοδος αποσκουρίασης μεταλλικών επιφανειών. Χρησιμοποιείται κατά κόρον σε δεξαμενισμούς για την προετοιμασία και συντήρηση της γάστρας του πλοίου αλλά και σε όλες τις περιοχές του πλοίου. Αφού γίνει πλύση με χαμηλή πίεση νερού (400 – 500 bar) ώστε να γίνει απολίπανση της περιοχής, στη συνέχεια γίνεται αμμοβολή όπου ανάλογα με το μέγεθος της διάβρωσης αλλά και τη μορφή της επιφάνειας, χρησιμοποιείται διαφορετικού τύπου αμμοβολή. Για παράδειγμα, σε σημεία με πολύ σκουριά γίνεται αμμοβολή Sa2.5 ή Sa 3 και στα σημεία με ελάχιστη σκουριά γίνεται Sa1 η *sweep*

blasting ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τραχύτητα για την μέγιστη πρόσφυση του υποστρώματος. Με το πέρας της αμμοβολής τα σημεία καθαρίζονται από την άμμο με πεπιεσμένο αέρα ή με γλυκό νερό υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το συντομότερο δυνατόν η πρώτη στρώση προστατευτικού επιστρώματος (Καρύδης 2002).

Ο πίνακας 4 περιέχει όλα τα πρότυπα ανάλογα την μέθοδο προετοιμασίας της επιφάνειας που θα επιλεγθεί.

Πίνακας 4. Πίνακας προτύπων για την προετοιμασία επιφανειών ανά μέθοδο.
Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection

CLEANING METHOD	DESCRIPTION (SUMMARY)	SWEDISH/ISO	SSPC	JSRA	NACE
Abrasive blast	White metal/visually clean	Sa 3	SP 5		1
				Sh/Sd 3	
	Near white metal/very thorough clean	Sa 2.5	SP 10		2
				Sh/Sd 2	
	Commercial/thorough clean	Sa 2	SP 6		3
				Sh/Sd 1	
	Brush/light blast	Sa 1	SP 7		4
Water blast			SP 12		5
	Sa 2.5 equivalent	**	VIS-4		VIS-7
	Sa 2 equivalent	**			
Power tool	Very thorough cleaning	St 3	SP 3	Pt 3	
	Thorough cleaning	St 2	SP 2	Pt 2	
Hand tool	Very thorough cleaning	St 3	SP 3		
	Thorough cleaning	St 2	SP 2		

- ** = An ISO standard is in preparation, based on the International Paint Ltd. standards
 ISO = ISO 8504:1992(E) and 8501-1:1998(E) and 8501-2:1994
 Swedish = SIS 05 59 00 (1967)
 SSPC = Steel Structures Painting Council (now the Society for Protective Coatings)
 JSRA = Japan Shipbuilding Research Association – Standard 1984
 Sh = shot blasting
 Sd = sand blasting
 NACE = National Association of Corrosion Engineers

Καθαρισμός με υδροβολή

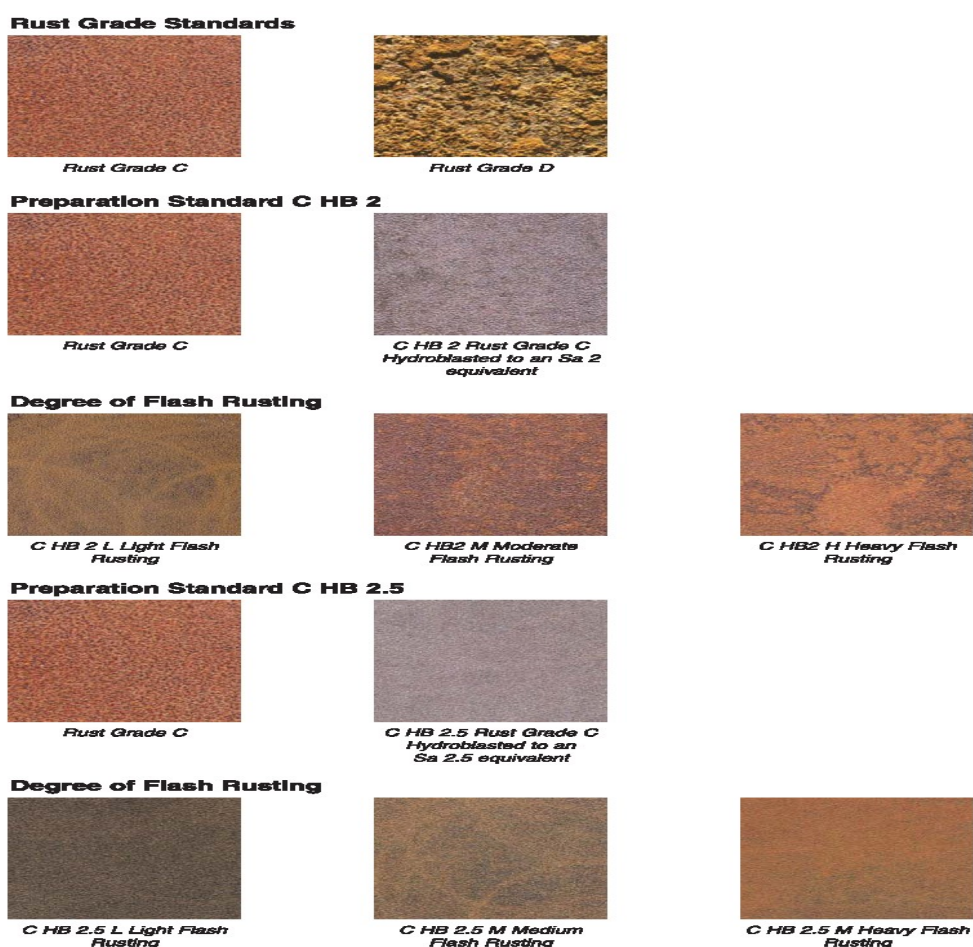
Εκτός από τα παραπάνω ο καθαρισμός και η απομάκρυνση σκουριάς από την επιφάνεια μπορεί να πραγματοποιηθεί και με υδροβολή. Μέσω ενός περιστροφικού εκτοξευτήρα νερού, υψηλής πίεσης, που μπορεί να φτάσει μέχρι και 3000 bar, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση σκουριάς και παλαιότερων επιστρωμάτων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρέχεται η δυνατότητα απομάκρυνσης επιστρωμάτων στις περιοχές που επιθυμούμε, καθώς δεν επηρεάζονται τα στρώματα χρωμάτων που διατηρούν την βέλτιστη πρόσφυση. Άλλα πλεονεκτήματα, είναι η δυνατότητα εφαρμογής υπό συνθήκες υγρασίας, η αποφυγή της ατμοσφαιρικής μόλυνσης, το χαμηλό κόστος, η ευκολία καθαρισμού τής περιοχής

εφαρμογής καθώς και μη παραγωγή σκόνης ή άμμου κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Η υδροβολή πλέον στα ευρωπαϊκά ναυπηγεία χρησιμοποιείται κατά κόρον. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν δημιουργείται σωστή κατανομή τραχύτητας κατά την εφαρμογή, διότι υπάρχει περιορισμένη ορατότητα και αρκετά κρυφά σημεία του πλοίου δεν μπορούν να καθαριστούν σωστά.

Οι διαφορετικές κατηγορίες υδροβολής είναι:

- Καθαρισμός με νερό χαμηλής πίεσης – κάτω από 68 bar
- Καθαρισμός με νερό υψηλής πίεσης – 68 έως 680 bar
- Υδροβολή Υψηλής πίεσης – 680 bar έως 1700 bar
- Υδροβολή Εξαιρετικά υψηλής πίεσης – άνω των 1700 bar

Στην παρακάτω εικόνα 25 φαίνεται η επιφάνεια μετά την προετοιμασία της ανάλογα την μέθοδο προετοιμασίας που επιλέγεται.



Εικόνα 25. Όψη των προετοιμασμένων επιφανειών. Πηγή: ABS guidance notes for marine coating inspection

8.2 Σύσταση αντιδιαβρωτικών επιστρωμάτων

Επίστρωμα είναι το ρευστό, που μπορεί να εφαρμοσθεί σε μια συμπαγή επιφάνεια, στην οποία λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν βαθμιαία, σκληραίνει και στην τελική μορφή του γίνεται ένα προσκολλημένο συνεχές στρώμα. Τα διάφορα επιστρώματα, ή χρώματα όπως αποκαλούνται, είναι μείγματα πολλών χημικών ουσιών, καθεμιά από τις οποίες προσδίδει στο εφαρμοζόμενο στρώμα συγκεκριμένες ιδιότητες.

Τα κύρια συστατικά των χρωμάτων είναι η χρωστική ύλη (*pigment*), η οποία προσδίδει στο χρώμα ιδιότητες όπως: απόχρωση, στιλπνότητα, σκληρότητα, μηχανική αντοχή, ικανότητα απορρόφησης νερού κλπ., το συνδετικό μέσο, οι διαλύτες και τα χημικά πρόσθετα (Καρύδης, 2002).

Οι χρωστικές ύλες χωρίζονται σε:

Αντιδιαβρωτικές χρωστικές (*anticorrosive pigments*)

Φραγματικές χρωστικές (*barrier pigments*)

Χρωστικές (*color pigments*)

Χρωστικές επέκτασης (*extender pigments*)

Αντιδιαβρωτικές χρωστικές (*anticorrosive pigments*)

Ψευδάργυρος

Ο μεταλλικός ψευδάργυρος χρησιμοποιείται ευρέως σε αστάρια που παρέχουν αντοχή στη διάβρωση του χάλυβα. Το πρώτο στάδιο της προστασίας πραγματοποιείται με γαλβανική δράση, ωστόσο κατά την έκθεση της επικάλυψης στην ατμόσφαιρα, δημιουργείται μια προοδευτική συσσώρευση, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός αδιαπέραστου φράγματος με μικρή ή καθόλου γαλβανική προστασία. Για την παροχή σωστής γαλβανικής προστασίας, απαιτούνται υψηλά επίπεδα ψευδαργύρου, σε ποσοστό 85% κατά βάρος στη ξηρή μεμβράνη. Για να λειτουργήσει σωστά ο ψευδάργυρος, θα πρέπει να βρίσκεται σε στενή επαφή με το χάλυβα και πριν από την εφαρμογή να είναι καλά καθαρισμένη η επιφάνεια (Καρύδης, 2002).

Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται συνήθως ως αντιδιαβρωτική χρωστική ουσία και δρα ως αντιδιαβρωτικός παράγοντας. Κατά την επαφή του αλουμινίου με τον χάλυβα ξεκινά ένας περιορισμένος μηχανισμός καθοδικής προστασίας. Όταν εφαρμόζεται σε δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων, η περιεκτικότητα σε αλουμίνιο στη ξηρή

μεμβράνη δεν πρέπει ξεπερνά το 10% ώστε να αποφεύγονται πιθανοί κίνδυνοι, όπως η δημιουργία σπινθήρων λόγω της συσσώρευσης εύφλεκτων αερίων (Καρύδης, 2002).

Φωσφορικός ψευδάργυρος

Ο φωσφορικός ψευδάργυρος χρησιμοποιείται ως αντιδιαβρωτική χρωστική ουσία και σε κανονικές συνθήκες έκθεσης. Η προσφερόμενη προστασία προϋποθέτει υψηλή περιεκτικότητα χρωστικών για την παροχή επαρκούς αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η ενσωμάτωση του, είναι εφικτή σχεδόν με οποιοδήποτε συνδετικό μέσο, αφού λόγω της διαφανούς απόχρωσης του, μπορεί να παραχθεί οποιοδήποτε χρώμα (Καρύδης, 2002).

Πιγμέντα φράγματος (*barrier pigments*)

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι αυτών των χρωστικών είναι το αλουμίνιο (φύλλα αλουμινίου) και το οξειδίο του σιδήρου (*Micaceous Iron Oxide - MIO*). Και τα δυο έχουν σωματιδιακά σχήματα τα οποία ονομάζονται ελασματοειδή (σχήμα πλάκας). Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό, με το αλουμίνιο φωτίζοντας την σχεδόν μαύρη απόχρωση του MIO. Οι χρωματισμένες μεμβράνες MIO έχουν διάρκεια, αλλά για να επιτευχθεί αυτό, απαιτούνται υψηλά επίπεδα MIO της τάξης του 80% της συνολικής χρωστικής ουσίας. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια ως η κύρια χρωστική ουσία, καθώς το ελασματοειδές σχήμα βοηθά να γίνει η μεμβράνη αδιάβροχη (ABS, 2007).

Χρωστικές (*color pigments*)

Οι χρωστικές μπορούν να χωριστούν σε ανόργανους ή οργανικούς τύπους, παρέχοντας μεγάλο εύρος αποχρώσεων ακόμη και αδιαφάνεια. Η πιο κοινή χρωστική ουσία, είναι το διοξειδίο του τιτανίου, το οποίο έχει λευκή απόχρωση. Στη βαφή, όλες οι χρωστικές ουσίες διασπείρονται σε μια πολύ λεπτή μορφή σωματιδίων, έτσι ώστε να αποδοθεί το μέγιστο χρώμα και η αδιαφάνεια. Παραδοσιακά, τα έντονα χρώματα παράγονταν χρησιμοποιώντας μόλυβδο και χρωστικές. Επισημαίνεται ότι λόγω επιπτώσεων στην υγεία και για λόγους ασφάλειας, η χρήση τους τείνει πλέον να εξαλειφθεί. Σήμερα, χρησιμοποιούνται οργανικές χρωστικές, αλλά δεν μπορεί να επιτευχθεί υψηλή αδιαφάνεια. Όπου ισχύει το πρότυπο IMO PSPC (*Performance Standard for Protective Coatings*) και απαιτείται σύστημα πολλαπλών στρώσεων, συνιστάται κάθε στρώση να έχει αντίθεση χρώματος, ώστε η επίστρωση να είναι εμφανής χρωματικά, για να διευκολύνεται ο έλεγχος κατά τη εφαρμογή (ABS, 2007).

Χρωστικές επέκτασης (*extender pigment*)

Όπως υποδηλώνει το όνομα, προσαρμόζουν ή "επεκτείνουν" τη χρώση μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη συγκέντρωση (*Pigment volume concentration - PVC*). Οι χρωστικές επέκτασης είναι ανόργανα σωματίδια με ποικιλία σχήματων και μεγεθών. Παρόλο που συμβάλλουν ελάχιστα, ή και καθόλου, στη αδιαφάνεια του χρώματος, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις φυσικές ιδιότητες του. Στις ιδιότητες αυτές περιλαμβάνονται η ροή, ο βαθμός στιλπνότητας, οι ιδιότητες κατά της καθίζησης, η ικανότητα ψεκασμού, η αντοχή στο νερό, καθώς και η χημική αντοχή, η μηχανική αντοχή και η σκληρότητα. Μείγματα χρωστικών επέκτασης χρησιμοποιούνται συχνά για την απόκτηση των επιθυμητών ιδιοτήτων και είναι σχετικά φθηνά σε σύγκριση με τις ρητίνες, ή άλλες αντιδιαβρωτικές χρωστικές (Καρύδης, 2002).

Συνδετικό Μέσο – (*binder*)

Αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό του χρώματος, αφού από αυτό σχηματίζεται το συνεχές στρώμα (μεμβράνη) και καθορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του χρώματος. Γενικά τα χρώματα, όπως θα δούμε παρακάτω, χαρακτηρίζονται από τον τύπο του συνδετικού μέσου που περιέχουν. Το συνδετικό υλικό σχηματίζει ένα μόνιμο συνεχές φιλμ, το οποίο είναι υπεύθυνο για την πρόσφυση στην επιφάνεια και συμβάλει στη συνολική αντίσταση της επικάλυψης στο περιβάλλον (Hempel, 2009).

Διαλύτες – (*Solvents*)

Είναι διαφανή υγρά συστατικά του χρώματος με τα οποία ελέγχεται το ιξώδες των χρωμάτων. Οι διαλύτες είναι πτητικά υγρά και εξατμίζονται κατά την χρήση (Hempel, 2009).

Χημικά Πρόσθετα – (*Additives*)

Χημικά πρόσθετα είναι οι χημικές ενώσεις που προστίθενται στα χρώματα και προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες, καθώς αυτές δεν μπορούν να προσδοθούν από τα υπόλοιπα συστατικά. Μερικά από αυτά είναι: οι επιβραδυντές ξήρανσης, οι αναστολείς διάβρωσης και οι σταθεροποιητές χρώματος (Καρύδης, 2002).

8.3 Σύστημα αντιδιαβρωτικής προστασίας

Η χρήση των αντιδιαβρωτικών επιστρωμάτων ή άλλων επικαλύψεων, για τη προστασία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, αποσκοπεί στην αντιμετώπιση της διάβρωσης όλων των τμημάτων του πλοίου. Οι επιστρώσεις αυτές παρουσιάζουν αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση με αποτέλεσμα να ελαττώνεται άμεσα η ένταση του

ρεύματος διάβρωσης, που αποτελεί το μέτρο της ταχύτητας διάβρωσης. Τα μη μεταλλικά επιστρώματα βοηθούν στην απομόνωση του υποστρώματος από την άμεση επαφή του με το διαβρωτικό περιβάλλον, να το μονώσουν ώστε να μειωθεί το δυναμικό διάβρωσης και να αποφευχθεί η άμεση επαφή νερού και οξυγόνου με τη μεταλλική επιφάνεια. Κάθε κατηγορία επιστρωμάτων έχει συγκεκριμένη λειτουργία και σκοπό (TSCF, 2000).

Γενικά, μια μόνο επίστρωση δεν είναι αρκετή, ώστε να προστατευθεί αποτελεσματικά η μεταλλική κατασκευή του πλοίου, γιατί απαιτείται η εφαρμογή πολλών διαδοχικών επιστρώσεων, που αποτελούν το σύστημα βαφής του πλοίου. Ένα συμβατικό σύστημα βαφής, όπως φαίνεται παραπάνω, αποτελείται τουλάχιστον από δύο στρώματα ασταριού (*primers*), από ένα ενδιάμεσο στρώμα (*undercoat*) και από ένα τελικό στρώμα (*finishing coat*). Αναλόγως την περιοχή εφαρμογής, εφαρμόζονται και εναλλάσσονται περισσότερες στρώσεις και μεγαλύτερα πάχη στρώματος. Το άθροισμα των επιστρωμάτων είναι το τελικό πάχος του συστήματος βαφής και μετράται σε μm (Καρύδης, 2002).



Εικόνα 26. Σχηματική αναπαράσταση συστήματος βαφής πλοίου. Πηγή: *steel construction.info*

ΑΣΤΑΡΙΑ (PRIMERS)

Οι πρώτες στρώσεις, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 24, πρέπει να έχουν καλή πρόσφυση στο μέταλλο για να εξασφαλιστεί η προστασία έναντι της διάβρωσης και να αποτελέσουν μια καλή βάση για τις επόμενες στρώσεις.

ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

Η ενδιάμεση στρώση πρέπει να έχει πολύ καλή πρόσφυση στο αστάρι και ικανοποιητική καλυπτική ικανότητα. Συνίσταται το χρώμα να είναι συγγενικό με αυτό της τελικής επίστρωσης αλλά όχι ίδιο, ώστε να παραμένουν ορατές οι περιοχές που δεν καλυφθήκαν επαρκώς. Είναι πολύ σημαντικό για την διάρκεια ζωής του

επικαλυπτικού επιστρώματος, ενώ όταν περιέχει χρωστικές ουσίες σε στρώσεις περιορίζει τη διαπερατότητα του συστήματος από το οξυγόνο (ABS, 2007).

ΤΕΛΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ

Η τελική στρώση είναι απαραίτητο να παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή έναντι των καιρικών συνθηκών, αλλά και να έχει καλές μηχανικές ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να χάνει τη στιλνότητά της, υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και των φορτίων, καθώς στις δεξαμενές φορτίου το τελικό χρώμα είναι συμβατό με συγκεκριμένους τύπους φορτίων. Επίσης, όπως αναφέρθηκε για τις μηχανικές ιδιότητες, πρέπει να ελέγχεται η αντοχή σε κρούση, η αντίσταση στην απόξεση, αλλά και η αντοχή στην επίδραση διαφόρων τάσεων, αφού εάν δημιουργηθούν ρωγμές στο σύστημα βαφής ξεκινά ο μηχανισμός διάβρωσης. Στην παρακάτω εικόνα 27 παρατηρούμε την τελική μορφή του πυθμένα δεξαμενής μετά από πλήρη βαφή (ABS, 2007).



Εικόνα 27. Πυθμένας δεξαμενής όπου έχει εφαρμοστεί το τελικό χρώμα.

Πηγή: Chemco international – case study M11

Κεφάλαιο ένατο

Η επίδραση των εμπορικών φορτίων στα συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας των δεξαμενών φορτίου των δεξαμενοπλοίων

Για τη σωστή επιλογή του συστήματος αντιδιαβρωτικής επικάλυψης και του σωστού χειρισμού των φορτίων, είναι απαραίτητη η βασική γνώση των χημικών ιδιοτήτων των περισσότερων φορτίων, καθώς η συμπεριφορά των προϊόντων που προέρχονται από τις ίδιες ομάδες οργανικών χημικών ενώσεων μπορεί να ποικίλουν. Χαρακτηριστική περίπτωση, η μεθανόλη η οποία μπορεί να επηρεάσει και να μαλακώσει σχεδόν όλα τα οργανικά επιστρώματα (Ackermann, PCE, 1998).

Πολλές κατηγορίες οργανικών ενώσεων (αλκοόλες, εστέρες, κετόνες κ.λπ.) έχουν έντονη επίδραση στα επιστρώματα, ενώ οι επιστρώσεις με ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους προσβάλλονται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με αυτές μεγαλύτερου μοριακού βάρους. Αξίζει να αναφερθεί ότι καθαρά εποξειδικά επιστρώματα δεν θεωρούνται κατάλληλα για επαφή μεγάλης χρονικής διάρκειας με ακετόνη, με άλλες κετόνες, όπως η μεθυλαιθυλοκετόνη (βουτανόνη), ή με κατώτερους εστέρες όπως ο μεθυλεστέρας, ωστόσο, δεν επηρεάζονται από ανώτερα μέλη της ομόλογης σειράς όπως είναι η μεθυλο,ισοβουτύλοκετόνη (Ackermann, PCE, 1998). Η διείσδυση των μικρότερων μορίων στις πολυμερείς δομές είναι πολύ εύκολη αφού είναι είτε διαλυμένες, είτε περιβάλλονται, ως πολυμερείς αλυσίδες, από μόρια διαλύτη. Ο αριθμός και το είδος των διακλαδώσεων της ανθρακικής αλυσίδας στο επίστρωμα καθορίζει επίσης τη συμπεριφορά του μέσω στερεοχημικής παρεμπόδισης (*steric hindrance*). Γενικά, οι γραμμικές αλυσίδες έχουν περισσότερη διεισδυτική ισχύ από τις αλυσίδες με πλευρικές διακλαδώσεις. Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ισχύ του διαλύτη είναι οι λειτουργικές ομάδες (όπως η υδροξυλομάδα (-OH) για τις αλκοόλες, η αμινομάδα (-NH₂) για τις αμίνες, η αιθερομάδα (-O-) για αιθέρες κ.λπ.), η πολικότητα των μορίων, όπως αυτή καθορίζεται από τη δομή και τη διπολική τους ροπή, αλλά και η δυνατότητα σχηματισμού δεσμών υδρογόνου (Ackermann, PCE, 1998).

Όλες οι οργανικές επικαλύψεις που χρησιμοποιούνται σήμερα για τις δεξαμενές φορτίου είναι τύπου δύο συστατικών, με αποτέλεσμα η επικάλυψη να μην μπορεί να επανέλθει στη αρχική υγρή μορφή μετά την αντίδραση των δύο συστατικών. Ωστόσο,

οι σκληρυμένες επικαλύψεις μπορούν να μαλακώσουν, εφόσον έρθουν σε επαφή με ισχυρούς διαλύτες, προκαλώντας αστοχίες ή/και, σε ορισμένες περιπτώσεις, εμφάνιση προϊόντων διάβρωσης (σκουριά) κάτω από το υπόστρωμα. Για παράδειγμα, ένας πολύ ισχυρός διαλύτης για οργανικές επικαλύψεις όπως το μεθυλοχλωρίδιο, που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση χρωμάτων, δεν πρέπει να μεταφέρεται σε δεξαμενές που είναι επικαλυμμένες με οργανικές επικαλύψεις (IACS, 2015).

Η υδατοδιαλυτότητα είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή του κατάλληλου διαλύτη και αναφέρεται στη συμβατότητα της επίστρωσης με αυτόν. Οι οργανικές επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται για την προστασία των δεξαμενών φορτίου μπορεί να μαλακώσουν, ως ένα ορισμένο βαθμό, από την απορρόφηση ποσότητας διαλύτη. Αυτό συμβαίνει, εφόσον υπάρχει επαρκής χρόνος για την εξάτμιση του απορροφημένου διαλύτη, ώστε το επίστρωμα να αποκτήσει την αρχική του σκληρότητα. Αστοχίες στη βαφή δημιουργούνται στην περίπτωση που ο διαλύτης είναι υδατοδιαλυτός και οι δεξαμενές φορτίου, είτε πλυθούν με νερό είτε φορτωθούν με υδάτινο φορτίο, πριν την ολοκλήρωση της σωστής σκλήρυνσης της επικάλυψης (IACS, 2015).

Οι επικαλύψεις πυριτικού ψευδαργύρου βασίζονται σε ανόργανα συνδετικά και, ως εκ τούτου, δεν εμφανίζουν αυτά τα μειονεκτήματα. Χαρακτηριστικό των επικαλύψεων είναι η μεγάλη αντοχή τους στην επίδραση ισχυρών διαλυτών. Αντιθέτως, έχουν μεγάλη ευαισθησία σε όξινα φορτία (οξύτητα κάτω από την τιμή $\text{pH}=6$) και σε αλκαλικά φορτία (άνω της τιμής $\text{pH}=9$). Συνεπώς, δεν συνιστάται η χρήση τους για φορτία, όπως είναι τα περισσότερα έλαια ή πολύ αλκαλικά προϊόντα αργού πετρελαίου. Επιπλέον, φορτία που μπορούν να υποστούν υδρόλυση, όπως εστέρες και χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες πρέπει να μεταφέρονται σε ξηρά μορφή σε δεξαμενές επίσης ξηρού φορτίου (IACS, 2015).

Ο σωστός χειρισμός και η μεταφορά φορτίου δεν είναι πάντα εύκολο έργο, παρόλο που οι κατασκευαστές χρωμάτων παρέχουν λίστες με όλες τις πληροφορίες, για τα συστήματα επικαλύψεων των δεξαμενών καθώς και πίνακες στους οποίους δίνεται η συμβατότητα των φορτίων με το εκάστοτε σύστημα επικάλυψης. Στα ιδιαίτερα δραστικά φορτία επισημαίνονται όλοι οι περιορισμοί, που πρέπει να είναι γνωστοί προκειμένου να αποφευχθούν λάθη που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή ή αστοχία των επιστρωμάτων. Περίπου το 70% των δεξαμενών φορτίου του παγκόσμιου στόλου κατασκευάζονται από κοινό χάλυβα. Αυτές οι δεξαμενές πρέπει

να προστατεύονται από τη διάβρωση και από τη μεταφορά «επιθετικών» φορτίων (Ackermann, PCE, 1998).

Τα επιστρώματα παίζουν κρίσιμο ρόλο στην προστασία της δεξαμενής. Η δυνατότητα εύκολης μετάβασης από το ένα φορτίο στο άλλο, με ελάχιστο χρόνο διακοπής λειτουργίας και καθαρισμό δεξαμενών, είναι το κλειδί για την επιτυχή και κερδοφόρα λειτουργία των δεξαμενόπλοιων μεταφοράς χημικών προϊόντων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετά είδη πλοίων μεταφοράς πετρελαίου και παραγώγων αυτού, όμως δεν είναι εφικτό να μεταφέρονται όλα τα προϊόντα πετρελαίου με τα ίδια πλοία. Οι δεξαμενές που μεταφέρουν τα φορτία αυτά, είναι επικαλυμμένες με επιστρώματα τα οποία δεν αντιδρούν και είναι κατάλληλα για το συγκεκριμένο φορτίο. Οι εταιρείες χρωμάτων παρέχουν καταλόγους με όλα τα πιθανά χρώματα και τα αντίστοιχα φορτία που επιτρέπεται να μεταφέρουν, ώστε να μην υπάρξει αλληλεπίδραση του φορτίου με το επίστρωμα. Τα τελευταία 30 χρόνια, αρκετοί τύποι επικαλύψεων, όπως βινύλια, πολυεστέρες, εποξειδία, εποξικά φαινολικά, εποξικά ισοκυανικά, πολυουρεθάνες, αλκαλικοί πυριτικοί ψευδάργυροι κ.α., έχουν χρησιμοποιηθεί για την επένδυση δεξαμενών στη ναυτιλία. Μερικά από αυτά τα υλικά επικάλυψης, έχουν σταματήσει να χρησιμοποιούνται στη βαφή δεξαμενών. Τα βινύλια, όντας θερμοπλαστικά, έχουν περιορισμένη αντίσταση στους διαλύτες. Οι ενισχυμένοι πολυεστέρες με γυαλί, χρησιμοποιούνταν για τη μεταφορά όξινων φορτίων αλλά αντικαταστάθηκαν από τις δεξαμενές ανοξειδωτού χάλυβα. Η πολυουρεθάνη, που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς τη δεκαετία του 1980, λόγω της αντοχής της σε διαφορετικούς τύπους φορτίων, έδειξε κάποια προβλήματα στον τρόπο εφαρμογής αλλά και στην αντίσταση έναντι του νερού. Οι σημερινές επικαλύψεις, διακρίνονται σε κατηγορίες, όπως εποξικές, εποξικές-φαινολικές, εποξικές-ισοκυανικές, αλκαλικού ψευδαργύρου, πυριτικών αλάτων και πυριτικού αιθυλοψευδαργύρου (Munger, 2014).

9.1 Εποξικά επιστρώματα (Pure Epoxy)

Οι καθαρές εποξικές επικαλύψεις βασίζονται σε ρητίνες δισφαινόλης-A (επιγλωρυδρίνη) που αντιδρούν με εποξικές ομάδες (οξυράνιο) και με σκληρυντικά που έχουν λειτουργικές ομάδες όπως η $-NH_2$ (αμίνες). Η χημική αντοχή και οι μηχανικές ιδιότητες των εποξικών επιστρώσεων μπορεί να ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τη εκάστοτε σύσταση. Οι ιδιότητες των εποξικών επιστρωμάτων,

επηρεάζονται από κάποιους παράγοντες, όπως το μοριακό βάρος των ρητινών, τον τύπο του σκληρυντή και σε μικρότερο βαθμό, το μείγμα των χρωστικών και του διαλύτη που χρησιμοποιούνται. Εποξειδικά επιστρώματα με ρητίνες χαμηλού μοριακού βάρους, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία επικαλύψεων με υψηλότερη πυκνότητα, τρισδιάστατων διασυνδέσεων καθώς και χαμηλότερο αριθμό υδροξυλομάδων. Συνεπώς, οι εποξικές ρητίνες με χαμηλό μοριακό βάρος έχουν καλύτερη χημική αντοχή στο νερό από τις εποξικές ρητίνες μέσου μοριακού βάρους. Από την άλλη πλευρά, όμως, προσφέρουν καλύτερη μηχανική αντίσταση και ευκαμψία (Ackermann, PCE, 1998).

Οι σκληρυντές που περιέχουν αμίνες προσδίδουν καλή χημική αντοχή στις εποξικές επικαλύψεις, σε σχέση με εκείνες που περιέχουν σκληρυντές πολυαμίδιου. Επίσης, εμφανίζουν μεγαλύτερη ανοχή στην ποιότητα προετοιμασίας των επιφανειών για εφαρμογή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Για τον παραπάνω λόγο, προτιμώνται οι επιστρώσεις με σκληρυντές πολυαμίνης, λόγω της εξαιρετικής αντοχής τους σε διαλύτες. Η αντοχή αυτή οφείλεται στην επίδραση των σκληρυντών πολυαμίνης, οι οποίοι είναι κυρίως αλειφατικά πολυαμινικά πρόσθετα. Οι εποξικές επικαλύψεις, είναι ευρέως γνωστές και χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε δεξαμενές φορτίου δεξαμενοπλοίων, λόγω της ευελιξίας, της αντίστασής τους, του εύρους και των ιδιοτήτων εφαρμογής. Μία σωστά διαμορφωμένη καθαρή εποξική επιστροφή μπορεί να εφαρμοστεί με ψεκασμό, χωρίς αέρα σε μεσαίο έως και υψηλό πάχος στεγνού στρώματος βαφής (*DFT*), χωρίς να εμφανίζονται προβλήματα όπως σπασίματα ή σχηματισμός οπών (Munger, 2014).

Ωστόσο, κατά την εφαρμογή τους, τα εποξικά επιστρώματα προσφέρουν μικρό χρονικό περιθώριο μεταξύ των διαστημάτων εφαρμογής των επιστρώσεων, περίπου τρεις έως πέντε ημέρες, συνεπώς απαιτείται ένα αυστηρό πρόγραμμα εφαρμογής. Καθαρές εποξικές επιστρώσεις, δεν προτείνονται για τη μεταφορά φορτίων όπως: μεθανόλη, αιθανόλη, μεθυλ-αιθυλο-κετόνη, ή αμόλυβδη βενζίνη. Έχουν χημική αντίσταση και ανήκουν στην κατηγορία επιστρωμάτων δύο συστατικών (κυρίου χρώματος και σκληρυντή). Ξηραίνονται μέσω κατάλληλης χημικής αντίδρασης, μεταξύ των δύο συστατικών και ενός σκληρυντή και έχουν πολύ καλή πρόσφυση στην εφαρμοζόμενη επιφάνεια. Επίσης, εμφανίζουν καλές χημικές ιδιότητες, καθώς και σημαντική χημική αντίσταση σε πολλούς διαλύτες (Munger, 2014).

Για την εφαρμογή επιστρωμάτων υψηλών απαιτήσεων, όπως τα εποξειδικά, απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας τουλάχιστον σε βαθμό προετοιμασίας Sa2^{1/2}.

Η εφαρμογή των εποξικών χρωμάτων πρέπει να πραγματοποιείται στον προκαθορισμένο χρόνο που δίδεται από τον κατασκευαστή, καθώς μετά την ανάμιξη του χρώματος με τον σκληρυντή, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αρχίζει να στεγνώνει, με αποτέλεσμα να φράζει ο σωλήνας του σπρέι. Στην περίπτωση που η εφαρμογή γίνεται με πινέλο, μπορεί να στεγνώνει το χρώμα πριν χρησιμοποιηθεί το δοχείο. Τα εποξειδικά επιστρώματα, όταν εκτεθούν στην ατμόσφαιρα και στις ακτίνες του ηλίου χάνουν γρήγορα την στιλπνότητά τους και παρουσιάζουν ελαττώματα. Η πολύ καλή σκληρότητα τους και η αντίστασή τους στους διαλύτες, αποτελούν μειονέκτημα σε εργασίες επιδιόρθωσης, αφού για την εφαρμογή του νέου επιστρώματος απαιτείται να επιτευχθεί καλή τραχύτητα στο υπάρχον στρώμα. Σήμερα, διατίθενται βελτιωμένα εποξειδικά επιστρώματα που μπορούν να διατηρήσουν την εμφάνισή τους για μακρύ χρονικό διάστημα, όταν εκτεθούν στο φυσικό περιβάλλον. Τα εποξειδικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται σε πολλά σημεία του πλοίου, όπως και σε πολλούς τύπους δεξαμενών (Ackermann, PCE, 1998).

9.2 Εποξικές επιστρώσεις με φαινολικές ρυτίνες (*Epoxy phenolic*)

Οι εποξειδικές φαινολικές επιστρώσεις είναι πολυλειτουργικές εποξειδικές ρητίνες, παρασκευασμένες από την εποξείδωση φαινολικών ρητινών με επιχλωρυδρίνη. Τα πολυμερή του συγκεκριμένου τύπου (αλειφατικές ρητίνες σκληρυμένες με αμίνη), προσφέρουν πολύ υψηλά επίπεδα πυκνότητας, με αποτέλεσμα την εξαιρετική χημική αντοχή. Συνήθως, οι εποξικές φαινολικές επικαλύψεις απαιτούν θέρμανση στους 50 – 60 °C, για 7 ημέρες, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης σκλήρυνσή τους. Συγκρίνοντας τις καθαρές εποξειδικές επιστρώσεις με τις θερμικά επεξεργασμένες εποξειδικές φαινολικές επιστρώσεις, οι δεύτερες έχουν εξαιρετική αντοχή ενάντια σε ισχυρούς διαλύτες και λιπαρά οξέα, ωστόσο πρακτικά, η θερμική μετά-σκλήρυνση δημιουργεί πολλά προβλήματα, καθώς για να διατηρηθούν οι δεξαμενές φορτίου στην απαιτούμενη θερμοκρασία, χρειάζεται να φορτωθούν με αδρανές φορτίο (π.χ. λιπαντικό) ώστε να θερμανθούν με θερμαντικά πηνία. Η διαδικασία είναι συνήθως ανεπαρκής, καθώς για να επιτευχθεί η θερμοκρασία των 50 - 60 °C σε περιοχές όπως εξωτερικές φρακτές, απαιτείται η χρήση βοηθητικών θερμαντήρων, στους χώρους των δεξαμενών που δημιουργούνται από το διπλό τοίχωμα, καθώς και θέρμανση του αέρα εισαγωγής στις κενές δεξαμενές (Munger, 2014).

Εκτός από ακριβή και χρονοβόρα, η σκλήρυνση με θέρμανση, υπόκειται σε ορισμένους κινδύνους, αφού δεν είναι εφικτό να ελέγχεται η συνεχής και ομοιόμορφη διατήρηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας, για μεγάλο χρονικό διάστημα σε όλες τις περιοχές της δεξαμενής. Χωρίς θερμική επεξεργασία, η χημική αντοχή εποξειδικών φαινολικών επιστρώσεων βελτιώνεται μετά από ένα χρονικό διάστημα, τουλάχιστον τριών μηνών εάν και εφόσον μεταφέρονται φορτία μέτριας δραστηριότητας, αλλά και πάλι δεν αποκτά το πλήρες εύρος αντίστασης του. Σ' αυτή την περίπτωση, δεν συνίσταται η μεταφορά προϊόντων όπως π.χ. μεθανόλη και αιθανόλη. Οι παραπάνω επικαλύψεις, έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τις καθαρές εποξικές επικαλύψεις, αλλά συνήθως έχουν μεγαλύτερα διαστήματα επαναβαφής. Από την άλλη πλευρά, δημιουργούν κατά την εφαρμογή, μεγαλύτερο πάχος λόγω του ισχυρότερου διαλύτη και είναι πολύ ευαίσθητα σε εφαρμογές με μικρό πάχος. Στην εικόνα 28, φαίνεται η επισκευή πυθμένα με τη συγκεκριμένη επίστρωση (Ackermann, PCE, 1998).



Εικόνα 28. Πυθμένας δεξαμενής φορτίου με τελική στρώση βαφής. Πηγή: Chemco Int.

9.3 Ισοκυανικά Εποξικά Επιστρώματα (Epoxy Isocyanates)

Οι υψηλού μοριακού βάρους ρητίνες, αντιδρούν με πολυϊσοκυανικές ενώσεις για να σχηματιστούν πολυμερείς ρητίνες. Η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος, αφού τα ισοκυανικά αντιδρούν με τις υδροξυλομάδες της εποξικής ρητίνης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πυκνής δομής με εξαιρετική χημική αντοχή (εποξειδική σύνδεση ουρεθάνης). Τα διαστήματα επικάλυψης είναι όμοια με των εποξειδικών επιστρώσεων που περιέχουν φαινολικές ρητίνες. Τα ισοκυανικά εποξειδικά, προσφέρουν μεγάλο εύρος αντίστασης, παρόμοιο με εκείνο των εποξικών επιστρώσεων με φαινολικές ρητίνες, με μόνη εξαίρεση την επαφή με αλκαλικά φορτία, τα οποία μπορούν να μεταφερθούν μόνο σε μικρότερες

συγκεντρώσεις. Ένα σημαντικό εύρος φορτίων μπορεί να μεταφερθεί 10 ημέρες μετά την εφαρμογή, όμως πολύ δραστικά φορτία, όπως η μεθανόλη, μπορούν να μεταφερθούν μετά από περίοδο τριών μηνών. Αξίζει να αναφερθεί ότι, δεν απαιτείται θερμική σκλήρυνση πριν τη φόρτωση, ωστόσο τα ισοκυανικά εποξειδικά επιστρώματα είναι πολύπλοκα στην εφαρμογή τους συγκριτικά με τα καθαρά εποξειδικά ή εποξειδικά φαινολικής ρητίνης, ή τουλάχιστον έχουν καλύτερες ιδιότητες κατά την εφαρμογή (Ackermann, PCE, 1998). Για παράδειγμα, λόγω των ισχυρών διαλυτών, η δημιουργία εκνεφώματος (*spray*) μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα πρόσφυσης κατά την εφαρμογή. Επίσης, τα ισοκυανικά εποξειδικά επιστρώματα είναι πολύ ευαίσθητα όταν κατά την εφαρμογή τους επιτευχθεί υπερβολικό πάχος στρώσης. Σε αντίθεση με τα φαινολικά εποξικά επιστρώματα, το μικρό πάχος χρώματος (μικρή τιμή *DFT*) του συστήματος συνήθως δεν είναι σημαντικό, όμως τα πολύ παχιά στρώματα μπορούν να φτάσουν στα 150 - 180 μm . Οι ρωγμές που δημιουργούνται, στις περισσότερες, μπορούν να ανιχνευθούν με γυμνό μάτι μετά την πλήρη ξήρανση της επίστρωσης, αν και μερικές φορές είναι ορατές μόνο με μεγεθυντικό φακό. Όμως, το σπάσιμο που προκύπτει συνήθως δεν χωρίζει τη μεμβράνη επίστρωσης, επομένως, κατά τη διάρκεια δοκιμής με θαλασσινό νερό δε προκύπτουν περιοχές που εμφανίζουν σημάδια διάβρωσης (Munger, 2014).

Μη επισκευασμένες ρωγμές, ωστόσο, μπορεί να διαδίδονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πλοίου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προϊόντα διάβρωσης ή/και να επέλθει αποκόλληση του επιστρώματος. Περιοχές που συνήθως επηρεάζονται από ρωγμές, είναι τα σημεία συγκολλήσεων, καθώς και τα ήδη διαβρωμένα σημεία. Σε περιοχές επικαλυμμένες με λωρίδες χρώματος (*stripe coating*) μπορεί να δημιουργηθούν ρωγμές ή φουσκάλες αν υπάρχει υπερβολική επικάλυψη πριν στεγνώσει τελείως η αρχική επίστρωση. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, κάθε στρώση πρέπει να επιθεωρείται ενδελεχώς για ρωγμές και σε περίπτωση που εντοπιστούν ελαττωματικές περιοχές, χρειάζεται να λειαινούνται και να επικαλύπτονται τοπικά (ABS, 2007).

Οι κύριοι λόγοι για τη μειωμένη χρήση ισοκυανικών εποξειδικών επιστρώσεων, είναι τα προβλήματα εφαρμογής που προαναφέρθηκαν. Ωστόσο, αν είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν, προσφέρουν ένα εξαιρετικό σύστημα επικάλυψης έναντι δραστικών φορτία κυρίως στις νέες κατασκευές. Για τα εν χρήσει δεξαμενόπλοια, το ενδεχόμενο εφαρμογής των ισοκυανικών εποξειδικών δεν συνιστάται, εάν τα ελάσματα των δεξαμενών είναι ήδη διαβρωμένα σε μεγάλο βαθμό, αφού κατά την εφαρμογή είναι

πολύ δύσκολο να αποφευχθεί επικάλυψη με υπερβολικό πάχος εφαρμογής στις περιοχές που εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς (ABS, 2007).

9.4 Επιστρώσεις ψευδαργύρου (*Alkaline Zinc Silicates*)

Οι συγκεκριμένες επιστρώσεις αποτελούνται από πυριτικό νάτριο, πυριτικό κάλιο, ή πυριτικό λίθιο διαλυμένο σε νερό. Η χημεία των ανόργανων πυριτικών αλάτων είναι διαφορετική από την χημεία των οργανικών ενώσεων, που περιλαμβάνουν τις εποξειδικές επιστρώσεις, καθώς η σκλήρυνση συμβαίνει μέσω αντίδρασης μεταξύ της χρωστικής ουσίας (σκόνη ψευδαργύρου) και του συνδετικού χρώματος (*silica gel*). Το συνδετικό χρώμα αντιδρά επίσης με το υπόστρωμα (χάλυβα), εξασφαλίζοντας πολύ καλή πρόσφυση στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με τα οργανικά επιστρώματα, η πρόσφυση των πυριτικών αλάτων στις χαλύβδινες επιφάνειες, επιτυγχάνεται κυρίως μέσω φυσικών δυνάμεων (www.corrosionpedia.com).

Ο αυτοσκληρυνόμενος πυριτικός ψευδάργυρος χρησιμοποιείται ως επίστρωμα στις δεξαμενές φορτίου και ο πολυμερισμός του περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Η αρχική αντίδραση περιλαμβάνει την αύξηση της συγκέντρωσης των συστατικών κατά την διαδικασία εξάτμισης του νερού. Η παραπάνω διαδικασία προκαλεί σύνδεση του ψευδαργύρου με το συνδετικό χρώματος (*silica gel*), δημιουργώντας μια υγρή επίστρωση στο υπόστρωμα. Σ' αυτό το στάδιο, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα διαβροχής στο χρώμα βοηθούν την επαφή της επίστρωσης με την μεταλλική επιφάνεια.

2. Στο δεύτερο στάδιο, μετά την εφαρμογή, η αδιαλυτοποίηση της επικάλυψης προέρχεται από την αντίδραση των ιόντων ψευδαργύρου με το πυριτικό οξύ, κατά την οποία σχηματίζεται πυριτικός ψευδάργυρος. Με την ολοκλήρωση της αντίδρασης, σχηματίζεται μια στερεά, αδιάλυτη επικάλυψη στο μεταλλικό υπόστρωμα, η οποία αποκτά σχεδόν το πλήρες εύρος των χημικών αντοχών της. Η μηχανική αντίσταση, αναπτύσσεται σε αποδεκτό βαθμό και η όψη της επικάλυψης έχει μια πορώδη δομή που οφείλεται στη διάχυση του νερού.

3. Στο τρίτο στάδιο, πραγματοποιείται η αντίδραση μεταξύ του ανθρακικού οξέος, που σχηματίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα και την υγρασία του περιβάλλοντος και των συστατικών του επιστρώματος, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της προστατευτικής μεμβράνης μετά την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος (Ackermann, PCE, 1998). Το ανθρακικό οξύ έρχεται σε επαφή με την βαφή, αντιδρά

με τα ελεύθερα σωματίδια ψευδαργύρου, και σχηματίζει μια πυκνή μήτρα πυριτικού ψευδαργύρου. Το θαλασσινό νερό επίσης, συνεισφέρει, σε αυτήν την αντίδραση, σχηματίζοντας υδροξείδιο του ψευδαργύρου. Με την ολοκλήρωση της αντίδρασης, σχηματίζεται ένα σκληρό και πυκνό επικαλυπτικό επιστρώμα. Παλαιότερα, τα παραγόμενα επιστρώματα αλκαλικού πυριτικού ψευδαργύρου, απαιτούσαν τον ψεκασμό με όξινο διάλυμα μετά την εφαρμογή, ώστε να επέλθει η σκλήρυνση. Αυτοί οι τύποι επιστρωμάτων (ανόργανων πυριτικών αλάτων του ψευδαργύρου) περιείχαν πυρίτιο και αλκάλια με αναλογία περίπου 2:1, παρέχοντας ανεπαρκή ποσότητα οξέος για την επίτευξη της σκλήρυνσης. Σήμερα, η αναλογία αυτή κυμαίνεται από 3:1 έως 5:1 με συνέπεια, όσο υψηλότερη είναι η αναλογία, τόσο πιο γρήγορα να γίνεται η αντίδραση σκλήρυνσης που πραγματοποιείται μόλις το νερό εξατμιστεί. Η ταχύτητα σκλήρυνσης καθορίζεται ακόμη, από τον τύπο του αλκαλίου. Η γρήγορη σκλήρυνση έχει κάποια πλεονεκτήματα, αφού η μη διαλυτότητα και σκλήρυνση εμφανίζεται μέσα λίγες ώρες, όμως μπορεί να προκαλέσει προβλήματα εφαρμογής, όπως η απόφραξη του στομίου του πιστολιού ψεκασμού καθώς και η σκλήρυνση του χρώματος εντός της συσκευής εφαρμογής. Τα επιστρώματα, που περιέχουν ανόργανες ενώσεις πυριτικού ψευδαργύρου ταχείας σκλήρυνσης, προτιμώνται για εφαρμογή σε εξωτερικές περιοχές, ενώ επιστρώματα με πυριτικό ψευδάργυρο τα οποία έχουν μέση ταχύτητα σκλήρυνσης, προτιμώνται για την επικάλυψη δεξαμενών φορτίου (Munger, 2014).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά σκλήρυνσης των επιστρωμάτων, με αλκαλικές ενώσεις πυριτικού ψευδαργύρου, είναι το μέγεθος των κόκκων της σκόνης ψευδαργύρου. Η σκόνη ψευδαργύρου αποτελείται από σωματίδια με πάχος που κυμαίνεται από 6 - 10 μm . Μείγματα που περιέχουν σωματίδια με μικρότερο μέγεθος δε θεωρούνται κατάλληλα, καθώς μπορεί να προκαλέσουν χαλάρωση σε χαμηλό πάχος εφαρμογής του επιστρώματος. Η αντοχή στη διάβρωση των επιστρώσεων που περιέχουν ενώσεις ανόργανου πυριτικού ψευδαργύρου σχετίζεται με το ποσοστό κατά βάρος ψευδαργύρου στο ξηρό επίστρωμα. Οι επιστρώσεις υψηλής ποιότητας έχουν περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο μεγαλύτερη από 90% (Hempel, 2009).

Εφόσον πρέπει να διαφοροποιηθεί η απόχρωση, προστίθενται μικρές ποσότητες χρωστικών, όπως οξείδιο του σιδήρου ή το οξείδιο του χρωμίου. Αυτό συμβαίνει, ώστε κατά την πρώτη εφαρμογή η απόχρωση να είναι σκούρα, οπότε κατά την εφαρμογή της δεύτερης στρώσης, η διαφορά απόχρωσης να βοηθά ώστε να

εντοπίζονται εύκολα περιοχές που δεν έχει εφαρμοστεί επαρκώς η δεύτερη στρώση. Η εφαρμογή των επιστρώσεων, με ενώσεις αλκαλικών πυριτικών αλάτων του ψευδαργύρου, σε σχέση με τις οργανικές επικαλύψεις, είναι πολυπλοκότερη για τους ακόλουθους λόγους:

- Λόγω του υψηλού περιεχομένου τους σε μεταλλική σκόνη υδραργύρου, οι επιστρώσεις αυτές δε μπορούν να εφαρμοστούν με συνήθη ψεκασμό, αλλά μόνο με χαμηλή πίεση αέρα, οπότε απαιτείται ειδικός εξοπλισμός.
- Η ανάγκη δημιουργίας κατάλληλης ατμόσφαιρας, με αφύγρανση και εξαερισμό της δεξαμενής κατά τη διάρκεια των περιόδων σκλήρυνσης (στάδια 1 και 2), είναι κρίσιμες, διότι κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου δημιουργούνται θύλακες αέρα λόγω κακής κυκλοφορίας και η επίστρωση δεν έχει πρόσφυση σε αυτές τις περιοχές. Με τη συμπλήρωση του μέγιστου χρόνου στεγνώματος χωρίς να έχει επέλθει η κατάλληλη σκλήρυνση, η αντίδραση δεν μπορεί να συνεχιστεί και απαιτείται απομάκρυνση του επιστρώματος εξ' ολοκλήρου με αμμοβολή.
- Τα επιστρώματα με ενώσεις αλκαλικών πυριτικών αλάτων του ψευδαργύρου, είναι ευαίσθητα στο υπερβολικό πάχος εφαρμογής. Ανάλογα με τη σύνθεση, μία στρώση με πάχος 150 - 250 μm, μπορεί να αρχίσει να σπάει, ωστόσο, το σπάσιμο είναι συνήθως μακροσκοπικό και μπορεί εύκολα να εντοπιστεί και να επισκευαστεί.
- Οι επιστρώσεις που περιέχουν ενώσεις αλκαλικών πυριτικών αλάτων του ψευδαργύρου, εφαρμόζονται σε ένα μόνο στρώμα, με πάχος 75 – 125 μm μόνο. Επομένως, πιθανά ελαττώματα στις επιστρώσεις δεν ρυθμίζονται εκ νέου.

Η εφαρμογή επικαλύψεων με ενώσεις αλκαλικών πυριτικών αλάτων του ψευδαργύρου, μέσα σε δεξαμενές φορτίου απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό με εξειδικευμένο εξοπλισμό και επιθεωρητές επικαλύψεων που είναι εξοικειωμένοι με αυτόν τον τύπο υλικού. Ωστόσο, η σωστή εφαρμογή επιστρώσεων, παρέχει στη δεξαμενή εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, καλή αντοχή σε χημικά και διαλύτες και πολύ καλή μηχανική αντοχή (Ackermann, PCE, 1998).

Η διάρκεια των επιστρωμάτων αυτών μπορεί να είναι ίση με τη διάρκεια ζωής του δεξαμενόπλοιου, σε σύγκριση με την διάρκεια 10 - 15 ετών που έχουν οι οργανικές επικαλύψεις. Μοναδικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι επιστρώσεις αυτού του είδους είναι ακατάλληλες για φορτία με pH μικρότερο από 6 και υψηλότερο από

9, καθώς δημιουργείται σημαντικός κίνδυνος μόλυνσης κατά τη μεταφορά ευαίσθητων φορτίων.

9.5 Επιστρώσεις αιθυλοψευδαργύρου (*Ethyl Zinc Silicates*)

Οι επιστρώσεις αιθυλοψευδαργύρου έχουν ως βάση διαλύτες και αποτελούνται από αιθυλοσιλάνιο και σκόνη ψευδαργύρου. Για να επιτευχθεί η σκλήρυνση, το πυριτικό συνδετικό πρέπει να υδρολυθεί μερικώς. Η αντίδραση σκλήρυνσης είναι όμοια με την αντίδραση που συμβαίνει σε υδατογενή, αυτοσκληρυνόμενα προϊόντα. Στην αρχική φάση της αντίδρασης, εξατμίζεται ο διαλύτης, φέρνοντας τα σωματίδια ψευδαργύρου και πυριτίου σε επαφή ενώ στη συνέχεια σχηματίζεται η ξηρή μεμβράνη της επίστρωσης στη χαλύβδινη επιφάνεια (Ackermann, PCE, 1998).

Αμέσως μετά την εφαρμογή των επιστρώσεων, η υπάρχουσα υγρασία από τον αέρα συνεχίζει να υδρολύει το οργανικό πυρίτιο, απελευθερώνοντας περισσότερο πυριτικό οξύ, με αποτέλεσμα να αντιδρούν τα σωματίδια ψευδαργύρου και η χαλύβδινη επιφάνεια. Οι επιστρώσεις οργανικού πυριτικού ψευδαργύρου δείχνουν γρηγορότερη αντίσταση στο νερό και στους διαλύτες από τα αντίστοιχα ανόργανα και μετά την ολοκλήρωση της δεύτερης αντίδρασης η εφαρμοσμένη επίστρωση διαθέτει σχεδόν πλήρη χημική αντίσταση και μηχανική αντοχή (Ackermann, PCE, 1998).

Στο τρίτο στάδιο, ο πολυμερισμός του οξέος σε συνδυασμό με τα σωματίδια ψευδαργύρου σχηματίζουν ένα πυκνό και σκληρό φιλμ επίστρωσης. Η διαδικασία εφαρμογής οργανικών επιστρώσεων, σε σχέση με την εφαρμογή των ανόργανων επιστρώσεων, έχει σημαντικές διαφορές. Η εφαρμογή μπορεί να πραγματοποιηθεί με ψεκασμό χωρίς αέρα. Ο καθορισμός των συνθηκών εφαρμογής όπως η υγρασία και ο εξαερισμός, είναι λιγότερο κρίσιμος από τα επιστρώματα πυριτικού ψευδαργύρου, που έχουν ως βάση το νερό, όμως η σχετική υγρασία της δεξαμενής δεν πρέπει να πέσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα διότι η σκλήρυνση θα είναι ανεπαρκής. Στις περιοχές που η επίστρωση δεν έχει σκληρυνθεί πλήρως, η σκλήρυνση δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με την αύξηση της σχετικής υγρασίας είτε με τον έλεγχο του ψεκαζόμενου νερού (Ackermann, PCE, 1998).

Ένα σοβαρό πρόβλημα με τα επιστρώματα αιθυλοπυριτικού ψευδαργύρου είναι η δυσκολία επαναβαφής περιοχών με χαμηλό πάχος στρώσης, αφού μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα πρόσφυσης μεταξύ των στρώσεων. Αφού επιτευχθεί η σκλήρυνση της πρώτης στρώσης, η δεύτερη στρώση αιθυλοπυριτικού ψευδαργύρου,

μπορεί να μην έχει καλή πρόσφυση στην πρώτη στρώση. Αυτό το γεγονός μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, στην πρόσφυση κατά την διάρκεια βαφής περιοχών με δύσκολη πρόσβαση. Με την εφαρμογή υδατικών επιστρωμάτων πυριτικού ψευδάργυρου τα παραπάνω προβλήματα αποφεύγονται (Ackermann, PCE, 1998).

9.6 Εποξικές επικαλύψεις με σιλικόνη (Cyclosilicon Epoxies)

Οι εποξικές επικαλύψεις με σιλικόνη, βασίζονται σε μια εντελώς νέου τύπου ρητίνη της οποίας η σκλήρυνση γίνεται με την επίδραση καταλύτη, για να δώσει ένα διασταυρωμένο σε μεγάλο βαθμό ομοπολυμερές. Ο πολυμερισμός επιτυγχάνεται μέσω σχηματισμού αιθερικών δεσμών από τις εποξικές ομάδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μετά τη σκλήρυνση, την δημιουργία πολύ ισχυρών αιθερικών δεσμών (C-O-C) χωρίς να υπάρχουν στη δομή του μακρομορίου υδροξυλομάδες (-OH) ή εστερομάδες (-COO-). Οι υδροξυλομάδες μπορούν να αντιδρούν με οξέα ενώ οι εστερομάδες μπορούν να υποστούν υδρόλυση. Συνεπώς, η απουσία τέτοιων ομάδων ενισχύει την ανθεκτικότητα της ρητίνης σε προσβολή από οξέα και σε αποικοδόμηση μέσω υδρόλυσης. Η ύπαρξη ισχυρών πρωτογενών χημικών δεσμών, σε συνδυασμό με την πολύ πυκνή δομή, καθιστούν τη ρητίνη αδιαπέραστη στους δραστικούς διαλύτες και ανθεκτική στα οξέα και στα καυστικά αλκάλια (Ackermann, PCE, 1998). Οι συγκεκριμένες επικαλύψεις εμφανίζουν ανθεκτικότητα σε προσβολή από το σύνολο των κοινών φορτίων θαλάσσιου εμπορίου. Σ' αυτά συμπεριλαμβάνονται, τα χημικά φορτία που είναι ακατάλληλα για ανοξείδωτο χάλυβα, με αποτέλεσμα να προσφέρουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, έναντι των συμβατικών επιστρώσεων σε σχέση με τη ποικιλία, την διακίνηση φορτίων και τον καθαρισμό των δεξαμενών. Οι επιστρώσεις αυτού του τύπου, είναι δύο συστατικών και μπορούν να εφαρμοστούν σαν μια συμβατική οργανική επίστρωση, με μερική σκλήρυνση σε θερμοκρασία δωματίου (Ackermann, PCE, 1998).

Ο μέγιστος χρόνος σκλήρυνσης της επικάλυψης είναι περιορισμένος, καθώς φτάνει από τέσσερις έως πέντε ημέρες στους 20 °C, ενώ για την πλήρη επίτευξη της χημικής αντίστασης, απαιτείται θερμική σκλήρυνση στους 80 °C για τουλάχιστον οκτώ ώρες με ζεστό αέρα ή ατμό. Το μέγιστο πάχος του ξηρού υμένα (*DFT*), δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 μm, λόγω του κινδύνου παγίδευσης διαλύτη ή την δημιουργία ρωγμών. Σημειώνεται ότι για τη βαφή παλαιότερων δεξαμενοπλοίων, το υπερβολικό πάχος εφαρμογής δημιουργούσε αστοχίες, αφού σε περιοχές με

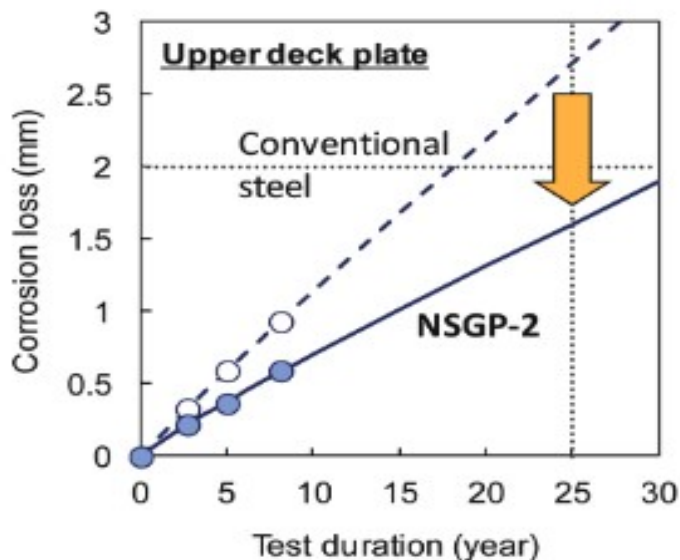
βελονισμό, ήταν δύσκολο να αποφευχθεί ξηρό πάχος επίστρωσης μεγαλύτερο των 500 μm. Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα αυτών των επικαλύψεων, είναι η αναγκαιότητα της ύπαρξης θερμαντικής συσκευής, κατά την διάρκεια επισκευών των επιστρώσεων. Η χρήση τέτοιων συστημάτων αντιδιαβρωτικής προστασίας, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1993, ενώ μέχρι σήμερα μεγάλο ποσοστό δεξαμενοπλοίων χρησιμοποιούν το σύστημα αυτό, κυρίως για μεταφορά μεθανόλης με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα (Munger, 2014).

Κεφάλαιο δέκατο

Κατασκευή δεξαμενών φορτίου δεξαμενοπλοίων από χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση

Οι νέες απαιτήσεις επιτρέπουν την εφαρμογή δύο μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η μία μέθοδος, είναι αυτή που χρησιμοποιεί, ένα σύστημα επίστρωσης, παρόμοιο με αυτό, που χρησιμοποιείται για την προστασία από τη διάβρωση της δεξαμενής έρματος, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Εναλλακτικά, μια άλλη μέθοδος προστασίας είναι μέσω της χρήσης ανθεκτικών στη διάβρωση χάλυβων. Ένα νέο "Πρότυπο χάλυβα ανθεκτικού στη διάβρωση", εγκρίθηκε μαζί με τις τροπολογίες στη SOLAS. Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες έχουν εξαιρετική αντίσταση διάβρωσης σε συνθήκες όπως αυτές που επικρατούν στις δεξαμενές φορτίου αργού πετρελαίου. Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες, διατηρούν καλύτερα τη δομική τους ακεραιότητα κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, μειώνοντας τον ρυθμό διάβρωσης σε σύγκριση με τους συμβατικούς χάλυβες. Η επιλογή αυτή αναφέρεται στους κανονισμούς «εναλλακτικά μέσα», που έχουν ως στόχο τη διατήρηση της απαιτούμενης δομικής ακεραιότητας για 25 χρόνια, σύμφωνα με το Πρότυπο Απόδοσης MSC.289 (87) της ανάλυσης, για εναλλακτικά μέσα προστασίας από τη διάβρωση σε δεξαμενές πετρελαίου σε σχέση με το κοινό ναυπηγικό χάλυβα όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5. Αυτή η επιλογή πρέπει να συνοδεύεται με δοκιμές, οι οποίες επιβεβαιώνουν την ανθεκτικότητα του υλικού (IMO - Resolution MSC.289(87)).

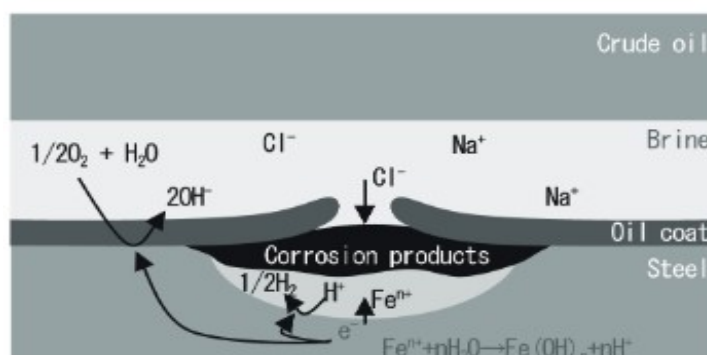
Διάγραμμα 5. Σχέση διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Πηγή: nipponsteel.com



Μέχρι και σήμερα, ο ανθεκτικός στη διάβρωση χάλυβας, είναι η μόνη αναγνωρισμένη εναλλακτική λύση, καθώς αναπτύχθηκε για να βελτιωθεί η αντοχή στη διάβρωση των πλοίων σε σύγκριση με την αντοχή στη διάβρωση του κοινού ναυπηγικού χάλυβα. Για άλλα εναλλακτικά μέσα που ενδέχεται να αναπτυχθούν στο μέλλον, τα οποία δεν καλύπτονται από τις ισχύουσες διατάξεις του παραρτήματος, πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο πρότυπο. Στο νέο πρότυπο, πρέπει να συμπεριληφθούν οι νέες διαδικασίες δοκιμών που πρέπει να διεξαχθούν σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS II-1 / 3-11.4 και να αναγνωριστεί από τον IMO, λαμβάνοντας υπόψιν την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω των δοκιμών που διεξήχθησαν.

10.1 Ιδιότητες ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα

Οι ανθεκτικοί στη διάβρωση χάλυβες χρησιμοποιούνται με σκοπό την αντιμετώπιση των σκληρών συνθηκών διάβρωσης που επικρατούν, είτε στο κατάστρωμα είτε στον πυθμένα της δεξαμενής πετρελαίου. Οι χάλυβες αυτού του τύπου δεν πρέπει να συγχέονται με ανθεκτικά στη διάβρωση κράματα, όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Οι χάλυβες αυτοί, είναι συγκολλησιμοι, ναυπηγικής χρήσης και υψηλότερου βαθμού εφελκυσμού. Στην επαφή τους με το θαλάσσιο περιβάλλον, διαβρώνονται με τρόπο όμοιο, με αυτόν του κανονικού ναυπηγικού χάλυβα, οπότε δεν αποφέρουν οφέλη, εάν εγκατασταθούν στο κύτος ή στις δεξαμενές έρματος. Λόγω της επίδρασης ορισμένων χημικών στοιχείων που προστίθενται στο χάλυβα, αυξάνεται η αντοχή στη διάβρωση σε περιβάλλοντα όπως οι δεξαμενές φορτίου. Η διάβρωση θα συνεχίσει να συμβαίνει, όπως φαίνεται στην εικόνα 29, αλλά με πιο αργό ρυθμό, καθιστώντας την διαχειρίσιμη (ClassNK, 2011).

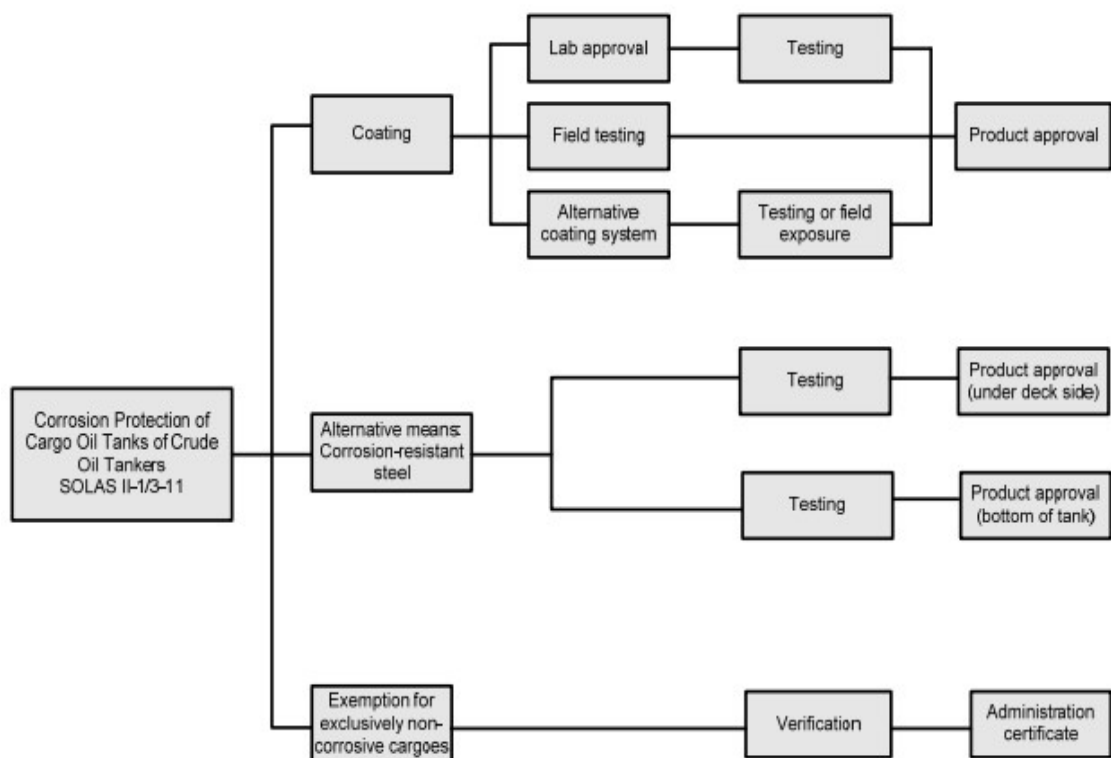


Εικόνα 29. Διάβρωση πυθμένα δεξαμενής. Πηγή: nipponsteel.com

10.2 Εξαιρέση

Δίνεται και μια τρίτη δυνατότητα μέσω των κανονισμών, όπως προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα 6, που επιτρέπει στον πλοιοκτήτη να εξαιρεθεί το πλοίο του από τις απαιτήσεις που περιγράφονται παραπάνω, εάν αυτό έχει κατασκευαστεί ή χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για τη μεταφορά συγκεκριμένων φορτίων που δεν προκαλούν διάβρωση. Ο IMO εξακολουθεί να αναπτύσσει οδηγίες για να περιγράψει ποια φορτία μπορεί να θεωρηθούν ότι δεν προκαλούν διάβρωση

Διάγραμμα 6. Ακολουθία επιλογής τρόπου αντιμετώπισης της διάβρωσης. Πηγή: DNV-GL



Αναμένεται ότι θα παρέχεται ένα σύνολο κριτηρίων χαρακτηριστικών για πλοία μεταφοράς πετρελαίου και ότι ένα φορτίο που πληροί αυτά τα κριτήρια θα μπορούσε να θεωρηθεί ως «αβλαβές» και να υπόκειται σε πιθανή εξαίρεση. Οποιαδήποτε εξαίρεση και οι όροι για τους οποίους χορηγείται, καταγράφονται στο πιστοποιητικό εξαίρεσης, που εκδίδεται από το κράτος σημαίας και ανάλογα με την προστασία που έχει επιλεγεί για τις δεξαμενές μεταφοράς πετρελαίου επαληθεύεται από τον Νηγνώμονα του πλοίου και εκδίδεται το κατάλληλο πιστοποιητικό εξαίρεσης.

10.3 Εφαρμογή

Στην πράξη, εφαρμόζονται διάφοροι συνδυασμοί, διαφορετικών τύπων και μεθόδων προστασίας από τη διάβρωση, ως προς την αποτελεσματικότητα της κατασκευής. Ο Πίνακας 5 δείχνει τους συνδυασμούς μεθόδων προστασίας των δεξαμενών φορτίου.

Πίνακας 5. Μέθοδοι επιλογής προστασίας των δεξαμενών φορτίου. Πηγή: Class NK

Member		Lower surface of strength deck (a)	Upper surface of inner bottom plating (b)
Corrosion protection method	Case 1	Corrosion resistant steel (Brand A)	Corrosion resistant steel (Brand A)
	Case 2	Coating	Corrosion resistant steel (Brand B)
	Case 3	Corrosion resistant steel (Brand C)	Coating
	Case 4	Corrosion resistant steel (Brand D)	Corrosion resistant steel (Brand E)

Επιπλέον, οι κατευθυντήριες γραμμές καθορίζουν τις περιπτώσεις, στις οποίες χάλυβες ανθεκτικοί στη διάβρωση, διαφορετικής εταιρείας κατασκευής, χρησιμοποιούνται στο ίδιο δομικό μέλος. Οι μέθοδοι προστασίας που χρησιμοποιούν θεωρούνται ως ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο προστασίας από τη διάβρωση με μικρές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς γενικά δεν χρειάζεται επικάλυψη όταν χρησιμοποιείται ένα τέτοιο υλικό (ClassNK, 2011).

Η ευρεία χρήση του υλικού αυτού στη ναυπηγική βιομηχανία αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Ωστόσο, ο IMO έχει αναπτύξει πρότυπα απόδοσης για τους ανθεκτικούς στη διάβρωση χάλυβες, τόσο στους τομείς των δοκιμών, όσο και στους τομείς των εφαρμογών και επαλήθευσης. Όμως απαιτούνται ακόμα πιο λεπτομερείς οδηγίες σχετικά με την πραγματική εφαρμογή τους. Στο πλαίσιο αυτό, ο ClassNK (2011) ανέπτυξε νέες οδηγίες, σχετικά με τη χρήση ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα σε δεξαμενές φορτίου που εστιάζουν σε διάφορα θέματα, που σχετίζονται άμεσα με την πραγματική εφαρμογή ενός τέτοιου είδους χάλυβα.

Η διάβρωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους εξής παράγοντες: τον χρόνο που βρίσκονται οι δεξαμενές φορτωμένες, τον τρόπο πλύσης τους, την αδρανοποίηση δεξαμενών (για δεξαμενόπλοια), την αποτελεσματικότητα των συστημάτων

προστασίας από τη διάβρωση, τη θέση και τον προσανατολισμό των εξαρτημάτων. Ο αυξημένος βαθμός δομικής ευελιξίας αυξάνει τους ρυθμούς διάβρωσης, καθώς ο χρόνος εξελίσσεται λόγω της συνεχούς απώλειας κλίμακας. Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα διάβρωσης, που αναπτύχθηκαν με δεδομένα στατιστικής ανάλυσης επιχειρησιακών δεδομένων θα είναι διαφορετικά, και μάλιστα ανάλογα με τους τύπους πλοίων και φορτίων ή τις τοποθεσίες και τις κατηγορίες δομικών μελών.

Οι Paik et al. (2003) παρουσίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της διάβρωσης, σε συνάρτηση με το χρόνο, στα δεξαμενόπλοια μονής και διπλής γάστρας, στις μονάδες πλωτής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FSOs) και μονάδων πλωτής, παραγωγής, αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSOs).

Οι Guedes-Soares et al. (2005) δημιούργησαν μια βάση δεδομένων με μετρήσεις πάχους, συγκεκριμένων ελασμάτων σε πλοία, από την οποία θα μπορούσαν να προκύψουν σημεία στα οποία εμφανίζεται εντονότερα το φαινόμενο της διάβρωσης. Αρχικά, συνέλλεξαν τις μέσες τιμές, τις τυπικές αποκλίσεις και τις μέγιστες τιμές πάχους ελασμάτων που έχουν υποστεί διάβρωση, διαφόρων δομικών μελών από πλοία μέχρι την ηλικία των 20 ετών. Οι μετρήσεις κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με την τοποθεσία (δομικό μέλος) και την κατηγορία του χώρου. Οι θέσεις που μελετήθηκαν είναι το κατάστρωμα και τα πλευρικά και κάτω διαμήκη διαφράγματα. Ερευνήθηκαν αμφότερες, οι πλάκες και ο ιστός και οι φλάντζες των διάμηκων ενισχυτικών. Σύμφωνα με τους κανόνες ταξινόμησης για νέες κατασκευές, εξετάστηκαν δύο χώροι χρήσης (δεξαμενές φορτίου και δεξαμενές έρματος). Από αυτή τη βάση δεδομένων, μπορεί να παρατηρηθεί, ότι η διάβρωση στη δεξαμενή των πλοίων παρουσιάζει υψηλό επίπεδο μεταβλητότητας. Για παράδειγμα, για πλοία ηλικίας 20 ετών, η μέγιστη παρατηρούμενη απόκλιση στο πάχος του ελάσματος καταστρώματος είναι 8,70 mm, ενώ η μέση απόκλιση είναι 1,1 mm. Ορισμένα δομικά μέλη, παρουσίασαν τυπικές αποκλίσεις, υψηλότερες από τους μέσους όρους. Η μέγιστη διάβρωση φαίνεται να είναι υψηλότερη στις δεξαμενές φορτίου σε σύγκριση με τις δεξαμενές έρματος και η μέση απόκλιση διάβρωσης δεν φαίνεται να εξαρτάται από τους χώρους χρήσης (δεξαμενή φορτίου ή έρματος).

Οι Wang et al (2003) αξιολόγησαν επίσης τους κινδύνους απόκλισης διάβρωσης, για τη γήρανση της δομικής ακεραιότητας των πλοίων. Παρόμοια στατιστικά στοιχεία, που σχετίζονται με τους ρυθμούς διάβρωσης που προήλθαν από δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου, παρουσιάστηκαν από τους Yamamoto και Ikegami (1998).

Οι Zayed et al. (2005) και Panayotova et al. (2004) έχουν εντοπίσει τους παράγοντες που διέπουν τα θαλάσσια φαινόμενα διάβρωσης στα δομικά στοιχεία χάλυβα, σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους και για το θαλάσσιο περιβάλλον.

Οι Garbatov et al. (2004) ανέλυσαν τα δεδομένα της διάβρωσης του κύτους και του καταστρώματος των φορτηγών χύδην φορτίου, τα οποία κατά κύριο λόγο υφίστανται διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες σε όλη τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Αποδείχθηκε ότι το μη γραμμικό μοντέλο διάβρωσης είναι ευρέως αποδεκτό για την αναπαράσταση ρεαλιστικών καταστάσεων σε διάφορες περιοχές του πλοίου. Έχουν πραγματοποιηθεί εκτενείς μελέτες από τους Garbatov et al. (2007) για τη καταγραφή της διάβρωσης των ελασμάτων καταστρώματος, δεξαμενών έρματος και δεξαμενών φορτίου.

Οι Guedes-Soares et al. (2005) μελέτησαν την επίδραση των διαφόρων παραγόντων, όπως οι θαλάσσιες βυθίσεις και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, στη συμπεριφορά της διάβρωσης στη ζωή του πλοίου. Οι μελέτες οδήγησαν στη διατύπωση ενός νέου μοντέλου διάβρωσης, που βασίζεται σε ένα μη γραμμικό και εξαρτώμενο από το χρόνο μοντέλο, που αντιπροσωπεύει διάφορους ατμοσφαιρικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες επάνω και κάτω από το νερό.

Συμπεράσματα και προτάσεις για την πρόληψη και την προστασία από τη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου δεξαμενοπλοίων

Τα πλοία λειτουργούν σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον, επηρεαζόμενα από τις ιδιότητες του θαλασσινού νερού όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, το επίπεδο του pH και η χημική του σύσταση, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το βάθος του νερού. Υπάρχουν πολλά είδη διάβρωσης που μπορούν να προσβάλλουν τα μέταλλα. Η διάβρωση συχνά, ταυτίζεται με την ατμοσφαιρική σκουριά των κραμάτων σιδήρου, αλλά αυτός είναι μόνο ένας από τους πολλούς πιθανούς μηχανισμούς διαβρωτικής προσβολής.

Ορισμένοι τύποι διαβρωτικής προσβολής στα μέταλλα, μπορούν να εμφανίζονται ως γενική διάβρωση, γαλβανική διάβρωση, διάβρωση από την υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), διάβρωση στις συγκολλήσεις, διάβρωση εξαιτίας κόπωσης της δεξαμενής, μικροβιολογική διάβρωση, διάβρωση πίεσης, κ.λπ. Η γενική διάβρωση, η οποία είναι η πιο κοινή μορφή διάβρωσης, θεωρητικά εξελίσσεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου και συνίσταται στη διάλυση του σε διαβρωτικό περιβάλλον, όπως το θαλασσινό νερό.

Τα ατυχήματα πετρελαιοφόρων, που έχουν συμβεί αρκετά συχνά τις τελευταίες δεκαετίες, προκάλεσαν μαζική διαρροή πετρελαίου στις θάλασσες. Οι καταστροφές αυτές, όχι μόνο έθεσαν σε κίνδυνο τη φυσική ζωή, αλλά επέφεραν και τεράστιες οικονομικές απώλειες. Συνήθως, αυτού του είδους οι απώλειες σχετίζονται με την υποβάθμιση του υλικού (συνήθως του χάλυβα), που προκαλείται ή επηρεάζεται από φαινόμενα διάβρωσης που δεν είχαν ανιχνευτεί. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερα κρίσιμης σημασίας είναι το πρόβλημα διάβρωσης των δεξαμενών φορτίου των δεξαμενοπλοίων. Η χρήση των επιστρώσεων είναι μια από τις γνωστές μεθόδους πρόληψης της διάβρωσης, καθώς απομονώνουν την επιφάνεια του χάλυβα από το διαβρωτικό περιβάλλον.

Συνοψίζοντας, στην εργασία αυτή, μελετήθηκαν οι αρχές διάβρωσης και οι τρόποι επιθεώρησης των δεξαμενών, σε συνδυασμό με τους τρόπους προστασίας των

δεξαμενών μεταφοράς φορτίου εντός πετρελαιοφόρων πλοίων, με έμφαση στην επιτυχή αντιμετώπιση των προβλημάτων της διάβρωσης.

1. Παρατηρήσεις σχετικές με τις εργασίες που πραγματοποιούνται στο ναυπηγείο

Το ναυπηγείο χρειάζεται πριν τη σύναψη της σύμβασης να διασφαλίσει την επάρκεια του ανθεκτικού, στη διάβρωση, χάλυβα. Σε περίπτωση που επιλεγεί εφαρμογή αντιδιαβρωτικής προστασίας, στον κοινό χάλυβα, να διασφαλίσει ότι διαθέτει τον εξοπλισμό και τις απαραίτητες γνώσεις για την εφαρμογή τους, σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης, για την εφαρμογή της αντιδιαβρωτικής προστασίας ή την τοποθέτηση ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα, πρέπει να επιδιορθωθεί, προτού το σκάφος λάβει πιστοποιητικά αξιοπλοΐας. Ο ανθεκτικός στη διάβρωση χάλυβας κατασκευάζεται ειδικά, για τις περιοχές του καταστρώματος και των ενισχυτικών, για τον πυθμένα της δεξαμενής καθώς και για τις εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές. Επομένως, αυτά τα υλικά δεν πρέπει να αναμιγνύονται ή να χρησιμοποιούνται σε εσφαλμένη περιοχή της δεξαμενής φορτίου.

2. Παρατηρήσεις σχετικές με τους πλοιοκτήτες

Η σωστή επιλογή του τρόπου προστασίας από την διάβρωση απαιτεί αρχικά τον καθορισμό απαιτήσεων του πλοιοκτήτη. Σαφέστατα, η χρήση του ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα, σε σύγκριση με τον κοινό ναυπηγικό, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα για την παρεμπόδιση της διάβρωσης. Οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη όμως, όσον αφορά τον χρόνο λειτουργίας του πλοίου, μπορεί να μην είναι τα 25 έτη, που έχει ο ανθεκτικός χάλυβας. Συνεπώς, το επιπλέον κόστος είναι ασύμφορο και η χρήση κοινού ναυπηγικού χάλυβα με αντιδιαβρωτική επίστρωση είναι κατάλληλη επιλογή.

Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν τη δημιουργία τεχνικού φακέλου με λεπτομερείς πληροφορίες, όπως οι θέσεις εφαρμογής στο πλοίο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και το πάχος των επικαλύψεων, αλλά και τη μέθοδος επισκευής, εφόσον χρειαστεί να γίνουν επισκευές.

Στην περίπτωση νέας κατασκευής, προσδιορίζονται γραπτώς ότι πληρούνται όλες οι απαιτούμενες προϋποθέσεις, ώστε να ληφθούν οι παρακάτω αποφάσεις:

1) Επιλογή και εφαρμογή εγκεκριμένης επίστρωσης σύμφωνα με τα φορτία που θα μεταφέρει το πλοίο.

2) Επιλογή και χρήση εγκεκριμένου ανθεκτικού στη διάβρωση χάλυβα.

3. Παρατηρήσεις σχετικές με τους κατασκευαστές χάλυβα

Τα υλικά είναι απαραίτητη προϋπόθεση, να παράγονται σε εγκεκριμένα εργοστάσια, σύμφωνα με τις διεθνείς απαιτήσεις και διαδικασίες, όπως η βασική διαδικασία οξυγόνου και ηλεκτρικού κλιβάνου. Τέλος, η διέλαση του να είναι σύμφωνη με τις διαδικασίες του IACS UR W11. Για να δοθεί η απαραίτητη έγκριση θα πρέπει οι δοκιμές διάβρωσης για ανθεκτικό στη διάβρωση χάλυβα να αναπαράγονται, όπως περιγράφονται στο MSC.289 (87), και μάλιστα να πραγματοποιούνται σε εγκεκριμένη εγκατάσταση.

4. Παρατηρήσεις σχετικές με τους κατασκευαστές χρωμάτων

Στο στάδιο της νέας κατασκευής πρέπει να παρέχονται από τις εταιρείες όλες οι λεπτομέρειες σχετικά με τα χρώματα και τις επιστρώσεις. Πρέπει να ελέγχεται η συμβατότητα των φορτίων με τις επικαλύψεις, ώστε να επιλέγεται η καταλληλότερη σε κάθε περίπτωση. Επιπροσθέτως, ένας εξειδικευμένος επιθεωρητής, της εταιρείας χρωμάτων, πρέπει να επιθεωρεί συστηματικά, σε όλη την διάρκεια της επισκευής ή κατασκευής, την εφαρμογή του συστήματος επικάλυψης, συμπεριλαμβανομένης της προετοιμασίας της επιφάνειας. Το ναυπηγείο είναι υπεύθυνο για την προετοιμασία του τεχνικού φακέλου επίστρωσης του σκάφους, στον οποίο πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οι προδιαγραφές του εφαρμοζόμενου συστήματος επίστρωσης, το αρχείο εργασιών επίστρωσης του ναυπηγείου και του πλοιοκτήτη, καθώς και τα λεπτομερή κριτήρια, για την επιλογή επίστρωσης, τις προδιαγραφές εργασίας, την επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή του πλοίου.

Βιβλιογραφία

- Ackermann N. (1998). “Choosing the Correct Coating for Cargo Tanks”, in: PCE vol. 6 (13), pp. 44, ISSN 02453-469.
- American Bureau of Shipping (ABS) (2010). Guidance notes on the inspection, maintenance and application of marine coating systems, Third Edition.
- Butler, G. and Ison, H.C.K. (1966). Corrosion and its Prevention in Waters.
- Chandler, K.A. (1984). Marine and Offshore Corrosion.
- DNV –GL, (2016). Rules for Classification and Construction I - Ship Technology
- Enos D.G., Taylor S.R. (1996). Influence of sulphate-reducing bacteria on alloy 625 and austenitic stainless steel weldments. CORROSION 52(11):831–842.
- Garbatov, Y., Guedes S.C, Wang, G. (2007). Non-linear time dependent corrosion wastage of deck plates of ballast and cargo tanks of tankers, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 129 (1), 48–55.
- Garbatov, Y., Vodkadjev, I., Guedes Soares C. (2004). Corrosion wastage assessment of deck structures of bulk carriers, in: Proceedings of the International Conference on Marine Science and Technology, Varna, 24–33.
- Goulielmos, A. M. (2019). Forecasting the Next Dry Cargo Shipping Depression beyond 2018. Modern Economy, 10, 1684-1712.
- Guedes Soares, C., Garbatov, Y. (1999). Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue under combined loading. J. Constr. Steel Res. 52,93e115.
- Guedes Soares, C., Garbatov, Y., Zayed, A. (2011). Effect of environmental factors on steel plate corrosion under marine immersion conditions, Corrosion Engineering. Sci. Technol. 46, 524 - 541.
- Guedes Soares, C., Garbatov, Y., Zayed, A., Wang, G. (2005). Impact of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere, submitted for publication.
- Guedes Soares, C., Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang. (2005). Non-linear corrosion model for immersed steel plates accounting for environmental factors, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers 113, 306–322.
- Gutzeit, J. (1968). Corrosion of steel by sulphides and cyanides in refinery condensate water, Materials Protection 7 (12), 17–23.
- Hempel Marine Coatings, (2009). Onboard Maintenance Manual.

- Herring, L.C. and Titcomb. A.N. (1981). Investigation of Internal Corrosion and Corrosion Control Alternatives in Commercial Tank Ships, Ship Structure Committee, SSC-312.
- Hutchinson, S.C. and Bea, R.G. (1993). Maintenance of Marine Structures; A State of the Art Summary. Ship Structure Committee, SSC-372.
- IACS (June 2004/Rev.1 - June 2006/Rev.2 - May 2015). Guidelines for coating maintenance & repairs for ballast tanks and combined cargo/ballast tanks on oil tankers.
- IMO Resolution A.446 XI, (1979). Revised specifications for the design, operation and control of crude oil washing systems.
- IMO Resolution MSC.288/87, (2010). Performance standard for protective coatings for cargo oil tanks of crude oil tankers.
- IMO Resolution MSC.289/87, (2010). Performance Standard for Alternative Means of Corrosion Protection for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers.
- Ivošević S., (2012). PhD Thesis, An approach to the corrosion analysis of bulk carrier hull structure, University of Montenegro, Maritime Faculty Kotor, Montenegro.
- Kurissery RS, Nandakumar K, Kikuchi Y. (2004). Effect of metal microstructure on bacterial attachment: a contributing factor for preferential MIC attack of welds. Paper No. 04597, NACE International, Houston, TX, USA.
- Laycock, P.J. and P.A. Scarf. (1993). Exceedances, extremes, extrapolation and order statistics for pits, pitting and other localized corrosion phenomena. Corrosion Science. 35(1-4 SU -): p. 135-145. 17.
- MARPOL. (1978). International Convention for the Prevention of Pollution by Ships (MARPOL 73/78).
- Melchers, R.E. (2003). Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment. J. Struct. Eng. 129 (11), 1484e1493.
- Munger, C.G. and Vincent Louis D. (2014). Corrosion Prevention by Protective Coatings, Third Edition, NACE, ISBN: 1575902621
- Nippon Kaii Kyokai, IACS Req. 1990 / Rev.28 Corr.1, (2020). Hull Classification Surveys.
- Nippon steel & Sumitomo metal technical report no. 110, (2015). Corrosion Resistant Steel Plate for Crude Oil Tanker (Minoru ITO Kazuyuki KASHIMA Takayuki HONDA Motomichi HARA Akinori INAMI Seiji NISHIMURA)

- OCIMF, (1997). Factors Influencing Accelerated Corrosion of Cargo Oil Tanks. Oil Company International Marine Forum.
- Ok, D. and Y. Pu. (2005). Corrosion control method by using clean inert gas to ballast tanks and permanent void spaces in marine and offshore structures. In 3rd International Marine Science and Technology for Environmental Sustainability (ENSUS) Conference. Newcastle upon Tyne, UK.
- Paik, J.K., (2003). Time-dependent risk assessment of ageing ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local dent damage. SNAME, Annual Meeting in San Francisco (World Maritime Technology Conference).
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K. (2002). Ultimate strength of aging ships. *J. Eng. Marit. Environ.* 1 (1), 57 - 77.
- Paik, J.K., Wang, G., Thayamballi, A.K., Lee, J.M., Park, Y.I. (2003). Time-depend and risk assessment of aging ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local denting damage. *Tran. SNAME* 111, 159e197.
- Panayotova, M., Garbatov, Y., Guedes Soares, C. (2004). Factor Influencing Atmospheric Corrosion and Corrosion in Closed Spaces of Marine Steel Structures, in: *Proceedings of the International Conference on Marine Science and Technology*, 286-292
- Pollard, R.R. (1991). Evaluation of Corrosion Damage in Crude and Product Carriers. Report No. SMP-I. Department of Naval Architecture & Offshore Engineering, University of California, Berkeley, 67.
- Reza Javaherdashti (2017). *Microbiological Influenced corrosion - An Engineering Insight*, Second Edition, Springer, ISBN 978-3-319-44306-5
- RINA (2004). *Guide for the Structural Design of Oil Tankers*. Registro Italiano Navale.
- Rogers, T.H. (1968). *Marine Corrosion*.
- Scherzer, J. and McArthur, D.P. (1986). Tests show effects of nitrogen compounds on commercial fluid cat cracking catalysts, *Oil Gas Journal* 84, 76– 82.
- Shoji Kamiya, Motohiko Nishimura, Eichi Harada (2014). Study on Introduction of CO₂ Free Energy to Japan with Liquid Hydrogen, 25th International Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference in 2014, ICEC 25–ICMC 2014.
- SOLAS Resolution A.418 XI (1974). Revised regulation 62 of chapter ii-2 of the international convention for the safety of life at sea.

- Stopford, M. (2009). *Maritime Economics* (3rd edition) London: Routledge.
- Telegdi, J., Shaban, A., Trif, L. (2020). Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms, Article in *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*.
- TSCF (2000). *Corrosion Protection of Cargo Tanks*. Tanker Structure Co-Operative Forum. TSCF Working Group #2, Chevron, Shipping Company.
- Tscheliesnig, P. (2004). Detection of corrosion attack on ships, especially oil tankers, with Acoustic Emission (AE), in: *Proceeding of 16th World Conference on Nondestructive Testing*.
- Venkatesan, R. (2000). *Studies on Corrosion of Some Structural Materials in Deep Sea Environment*. Dissertation. Indian Institute of Science, Bangalore.
- Viner, A.C. and Tozer, D.R. (1985). *Influence of Corrosion on Ship Structural Performance*, Hull New Construction Division No. 85/29. Lloyd's Register of Shipping.
- Wang, G., Spencer, J., Sun H. (2003). Assessment of corrosion risks to aging ships using an experience database, in: *Proceeding of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Paper OMAE2003-37299, ASME.
- Wang, G., J. Spencer, T. Elsayed. (2003). Estimation of corrosion rates of structural members in oil tankers, in: *Proceeding of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Paper OMAE2003-37361, ASME.
- Yamamoto, N. and Ikegami, K. (1996). A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach. In: *Proceedings of the International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE'96)*, vol. 2, 159 - 166.
- Yamamoto, N. and Ikegami, K. (1998). A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 120 (3), 121–128.
- Zayed, A., Garbatov, Y., Guedes Soares, C., Wang. G. (2005). Environmental factors affecting the time dependent corrosion wastage of marine structures, in: C. Guedes Soares, Y. Garbatov, N. Fonseca (Eds.), *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*, vol. 1, Taylor & Francis, 589 – 598.
- Δεμερούτη Γ.Κ., Μυλωνοπούλου Δ.Ν., (2010). *Ναυτιλιακές Γνώσεις, Ίδρυμα Ευγενίδου*.

- Ένωση Ελλήνων Εφοπλιστών (2021). Ο Στρατηγικός και Οικονομικός Ρόλος της Ελληνικής Ναυτιλίας.
- Καρύδης Π. (2002). Επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, Αθήνα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Ντάφλου Ε. (2012). «Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης». Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπαευθυμίου Σ. (2017). «Τεχνολογία Υλικών», Β' Έκδοση, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.