

Υποβρύχιες Συγκολλήσεις

Αράγιαννη Ε. Ελένη, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Πελοποννήσου, Μ. Αλεξάνδρου 1, Κουκούλι, ΤΚ 26334, Πάτρα

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει εις βάθος δύο μηχανισμούς που επηρεάζουν καθοριστικά την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής των πλοίων: τη γαλβανική διάβρωση και τη διάβρωση κόπωσης. Στη ναυπηγική πράξη αυτά τα δύο φαινόμενα είναι συνήθως αλληλένδετα διότι η εντοπισμένη διάβρωση (π.χ pits) είναι δυνατό να αποτελέσει εστία έναρξης ρωγμών κόπωσης, ενώ οι μικρορωγμές μεταβάλλουν το ηλεκτροχημικό περιβάλλον και επιταχύνουν τη διάβρωση μέσα στη ρωγμή. Η εργασία ξεκινά με τις βασικές έννοιες και μηχανισμούς της διάβρωσης, παρουσιάζει παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση στη θαλάσσια ατμόσφαιρα και ποσοτικοποιεί έννοιες όπως το δυναμικό διάβρωσης σε σχέση με την πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης μέσω μαθηματικών σχέσεων.

Ακολούθως, αναλύεται η γαλβανική διάβρωση σε επίπεδο μηχανισμού και εφαρμογών (προπέλες, άξονες, πηδάλια, κυκλώματα θαλασσινού νερού, δεξαμενές έρματος, υπερκατασκευές αλουμινίου) με έμφαση στο ρόλο της γαλβανικής σειράς και του λόγου επιφανειών ανόδου/ καθόδου.

Στο κεφάλαιο της διάβρωσης κόπωσης, παρουσιάζεται η εξίσωση Basquin καθώς και βασικές έννοιες της θραυστομηχανικής (ΔΚ, νόμος Paris) που συντελούν στη μηχανολογική ερμηνεία της διάδοσης ρωγμών. Τέλος, γίνεται πλήρης ανάπτυξη των μεθόδων διάγνωσης και παρακολούθησης (οπτικές επιθεωρήσεις, UT, MT/PT, PAUT, RT, μετρήσεις δυναμικού) και των μεθόδων πρόληψης και αντιμετώπισης (coatings, καθοδική προστασία με ανόδους και ICCP, σχεδιαστικές βελτιστοποιήσεις, risk-based inspection, προγνωστική συντήρηση).

Εισαγωγή

Η υποβρύχια συγκόλληση έχει γίνει ένα ουσιαστικό μέσο για την επισκευή και συντήρηση θαλάσσιων κατασκευών στην ανάπτυξη και αξιοποίηση των θαλάσσιων πόρων. Η πρώτη υποβρύχια συγκόλληση πραγματοποιήθηκε από το Βρετανικό Ναυαρχείο – το Ναυπηγείο, για να σφραγίσει διαρρέοντες πριτσίνους πλοίων κάτω από τη γραμμή της θάλασσας. Η υποβρύχια συγκόλληση με τόξο (οι τύποι ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται συμμορφώνονται με την ταξινόμηση AWS E6013), μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε υγρή συγκόλληση, ξηρή συγκόλληση ή υποβρύχια ξηρή συγκόλληση τοπικής κοιλότητας. Στην υγρή συγκόλληση, η επαφή

του τόξου με το νερό έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση, τον ιονισμό και τον ανασυνδυασμό οξυγόνου και υδρογόνου. Αυτός είναι και ο λόγος που υφίσταται διάβρωση. Ως διάβρωση ορίζεται η διεργασία κατά την οποία ένα μέταλλο, λόγω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, υποβαθμίζεται χημικά ή/και ηλεκτροχημικά και τείνει να μετατραπεί σε πιο σταθερές ενώσεις όπως οξείδια, υδροξείδια, άλατα ή ανθρακικά άλατα. Οι αρχικές ενώσεις (ορυκτά και μεταλλεύματα) ανακτώνται από τα μέταλλα μειώνοντας την ελεύθερη ενέργεια. Ως εκ τούτου, η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό των μετάλλων εκπέμπεται κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων διάβρωσης. Με άλλα λόγια, η Μεταλλουργία αντίστροφα. Κατά συνέπεια, η διάβρωση είναι ένα αυθόρμητο, συνήθως αργά εξελισσόμενο, χημικό/ηλεκτροχημικό φαινόμενο. Παρότι η διάβρωση αποτελεί φυσικό φαινόμενο, στη ναυτιλία μετατρέπεται σε σύνθετο τεχνικό πρόβλημα καθώς το πλοίο λειτουργεί σε ένα επιθετικό περιβάλλον: το θαλασσινό νερό διαθέτει υψηλή αγωγιμότητα και υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, ενώ η θαλάσσια ατμόσφαιρα περιέχει αλατούχα σταγονίδια και υγρασία που δημιουργούν αγωγίμα υμένια στις επιφάνειες. Επιπλέον, το πλοίο υφίσταται συνεχώς δυναμικά φορτία από τον κυματισμό, την πρόωση και τους κραδασμούς των μηχανών, γεγονός που δυσχεραίνει την κατάσταση και επιδεινώνει την κόπωση.

Από την άλλη, το οικονομικό αποτύπωμα της διάβρωσης είναι σημαντικό: απαιτείται περιοδική βαφή, αντικατάσταση ανόδων, επισκευές στις δεξαμενές έρματος, αποκατάσταση σωληνώσεων και επιθεωρήσεις. Σε επίπεδο κύκλου ζωής, οι αποφάσεις για το είδος των επιστρώσεων (coatings), την εγκατάσταση ICCP (Impressed Current Cathodic Protection), την ποιότητα συγκόλλησης και την οργάνωση επιθεωρήσεων επηρεάζουν άμεσα το κόστος όσο και τη διαθεσιμότητα του πλοίου (έμμεσο κέρδος).

Όσον αφορά την ασφάλεια, οι συνέπειες είναι ακόμη πιο κρίσιμες. Η διάβρωση προκαλεί απώλεια πάχους και μείωση αντοχής, ενώ η εντοπισμένη διάβρωση δημιουργεί τοπικές ατέλειες (pits) που αυξάνουν τις συγκεντρώσεις τάσεων. Η διάβρωση κόπωσης μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές που εξελίσσονται αθόρυβα με την πάροδο του χρόνου μέχρι να εμφανιστούν διαρροές ή δομική αστοχία. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των μηχανισμών και η εφαρμογή τεχνικών προστασίας αποτελούν βασική δεξιότητα για τον μηχανολόγο και το ναυπηγό.

Στην εργασία αυτή δίνεται έμφαση σε δύο μορφές διάβρωσης που συνδέονται άμεσα με τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας των πλοίων. Η γαλβανική διάβρωση αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής των υλικών και της ηλεκτρικής σύνδεσης εξαρτημάτων. Η διάβρωση κόπωσης αναδεικνύει την αλληλεπίδραση υλικού κατασκευής- περιβάλλοντος- φόρτισης και τη σημασία της λεπτομέρειας στη συγκόλληση και στη συντήρηση μέσω προστατευτικών τεχνικών και συστημάτων.

1.Βασικές Έννοιες και μηχανισμοί Διάβρωσης

Η διάβρωση ορίζεται ως η διεργασία κατά την οποία ένα μέταλλο, λόγω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, υποβαθμίζεται χημικά ή/και ηλεκτροχημικά και τείνει να μετατραπεί σε πιο σταθερές ενώσεις όπως οξείδια, υδροξείδια, άλατα ή ανθρακικά άλατα [1]. Ταξινομείται με βάση τη μορφολογία (γενικευμένη, pitting, hydrogen induced, fatigue, galvanic) αλλά και με βάση τον μηχανισμό και το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος του φαινομένου σε ηλεκτροχημική και χημική διάβρωση [Tsinopoulos, Stephanos, και Dimitrios Kalovelonis. *Corrosion of W/Ts*. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου· Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, εκπαιδευτική παρουσίαση Workshop: Design and Maintenance of Wind Turbines]. Ακόμη μπορεί να γίνει ταξινόμηση και με βάση τη μετανάστευση ιόντων (ελεγχόμενη από κατιόντα ή ανιόντα).

Η πρώτη αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή, ιδιαίτερα στα μέταλλα, η οποία περιλαμβάνει αντιδράσεις οξείδωσης-αναγωγής και τη δημιουργία γαλβανικών στοιχείων, ενώ η χημική διάβρωση αναφέρεται στην άμεση χημική αντίδραση ενός υλικού με το περιβάλλον (π.χ., οξείδωση μετάλλου σε ξηρό περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας). Αναφερόμενοι σε υγρό- θαλάσσιο περιβάλλον αναλύουμε την ηλεκτροχημική διάβρωση η οποία λαμβάνει χώρα σε ατομικό επίπεδο με βασικά στοιχεία τις: άνοδο (οξείδωση), κάθοδο (αναγωγή), ηλεκτρική σύνδεση (ροή ηλεκτρονίων) και ηλεκτρολύτης (ροή ιόντων που συνδέει τις ανοδικές με τις καθοδικές περιοχές). Στο θαλασσινό νερό, το ηλεκτρολυτικό μέσο έχει υψηλή αγωγιμότητα, άρα το ηλεκτροχημικό κύκλωμα «κλείνει» εύκολα και οι αντιδράσεις μπορούν να εξελιχθούν γρήγορα [Καρκατσούλης, Α. *Corrosion*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021].

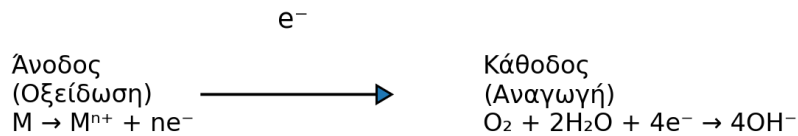
Τυπική ανοδική αντίδραση για χάλυβα (stainless steel): $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

Συνηθισμένη καθοδική αντίδραση (αναγωγή οξυγόνου): $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Οι ανοδικές και καθοδικές διεργασίες συνδέονται μέσω της ροής ηλεκτρονίων στο μέταλλο και της μεταφοράς ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Η «ταχύτητα» της διάβρωσης εκφράζεται μέσω της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης i_{corr} . Με βάση τον νόμο Faraday, ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να προσεγγιστεί ως:

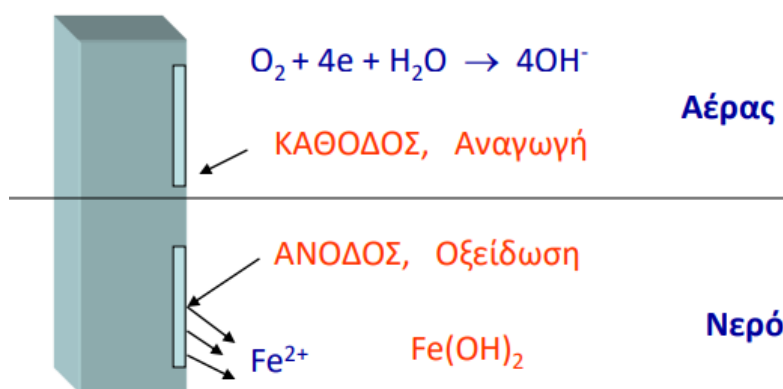
$$v = K \cdot i_{corr} / (n \cdot F \cdot \rho)$$

όπου K σταθερά μετατροπής μονάδων, n αριθμός ηλεκτρονίων της ανοδικής αντίδρασης, F σταθερά Faraday και ρ πυκνότητα υλικού. Η σχέση αυτή εξηγεί γιατί περιβάλλοντα που αυξάνουν το i_{corr} (π.χ. υψηλή οξυγόνωση και υψηλή αγωγιμότητα) οδηγούν σε μεγαλύτερη απώλεια υλικού.



Ηλεκτρολύτης (θαλασσινό νερό)

Εικ. 1



Εικ.2

Εικ.1,2: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού της ηλεκτροχημικής διάβρωσης

1.1 Θερμοδυναμική Διάβρωση, δυναμικά ηλεκτροδίων και Παθητικοποίηση

Όλα τα μέταλλα (και αυτά που προορίζονται για ναυπηγική χρήση) με εξαίρεση το χρυσό, τον υδράργυρο και το λευκόχρυσο δε βρίσκονται στη φύση σε καθαρή μορφή αλλά σε οξειδωμένη (μεταλλεύματα) καθώς είναι θερμοδυναμικά 'ασταθή' στην παρουσία νερού και οξυγόνου. Έτσι, τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα με κατάλληλες φυσικοχημικές κατεργασίες στις οποίες απαιτείται ενέργεια. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής με τη μορφή εντροπίας (ΔS) και ελεύθερης ενέργειας (ΔG) παραμένει στα μεταλλικά υλικά. Η αύξηση της ελεύθερης ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τα μέταλλα να αποκτούν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από αυτή του αρχικού μεταλλεύματος.

Κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί με μία σειρά διεργασιών είναι συνήθως υλικό αναβαθμισμένο ενεργειακά σε σχέση με τις πρώτες ύλες του. Επομένως, σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, έχει την προδιάθεση να ελαττώσει την ελεύθερη ενέργεια (G) ή την ελεύθερη ενθαλπία (H) και να αυξήσει την εντροπία

του (S). Έχει την τάση να υποβαθμιστεί ενεργειακά, γεγονός που στη περίπτωση των μετάλλων και των κραμάτων ισοδυναμεί με τάση προς οξείδωση (επιστροφή στην αρχική τους κατάσταση) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Αυτή είναι η αιτία διάβρωσης των μεταλλικών υλικών. Μια ηλεκτροχημική δράση, η οποία εξελίσσεται από μία κατάσταση A προς μία κατάσταση B, είναι θερμοδυναμικά δυνατή μόνο όταν η μετάβαση από την κατάσταση A στην κατάσταση B συνοδεύεται από μείωση της ελεύθερης ενέργειας ΔG του συστήματος [CORE. *Corrosion and Inspection Systems. CORE Repository*].

Στην περίπτωση των ηλεκτροχημικών δράσεων ισχύει: $\Delta G = -n FE$

όπου, n: ο αριθμός των ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται κατά την αντίδραση, F: η σταθερά του Faraday (96490 Cb·mol⁻¹) E: το δυναμικό ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων A και B [3].

Τέλος, ορισμένα κράματα (όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες ή το τιτάνιο) μπορούν να σχηματίσουν παθητικά υμένια οξειδίων που μειώνουν δραστικά τον ρυθμό διάβρωσης. Η σταθερότητα και η «επανόρθωση» του παθητικού υμενίου εξαρτάται από το περιβάλλον: τα χλωριόντα μπορούν να διαταράξουν την παθητικότητα και να οδηγήσουν σε διάβρωση με μορφή διάτρησης (pitting). Στη ναυπηγική, το δυναμικό ενός υλικού μετράται συνήθως ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς. Η έννοια του δυναμικού δεν αφορά μόνο τη θεωρία: είναι κεντρική στον έλεγχο καθοδικής προστασίας, όπου ο στόχος είναι να οδηγηθεί το προστατευόμενο μέταλλο σε αρκετά αρνητικό δυναμικό ώστε να μη λειτουργεί ανοδικά.

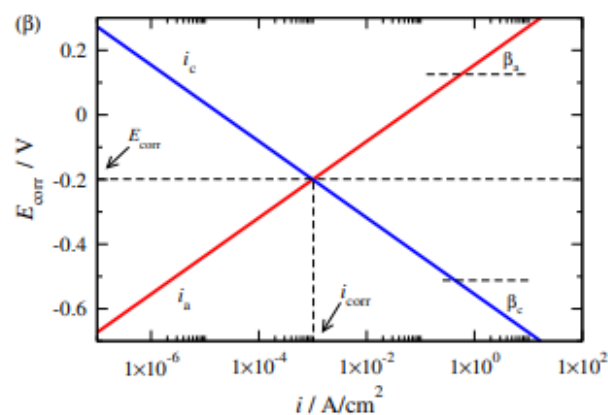
1.2 Κινητική Διάβρωσης: πόλωση, μεταφορά μάζας και ωμική αντίσταση

Η κινητική προσέγγιση του φαινομένου της διάβρωσης είναι εξίσου σημαντική με τη θερμοδυναμική, αφού και αυτή καθορίζει τη δυνατότητα διεξαγωγής του φαινομένου. Αν ο ρυθμός της αντίδρασης είναι πολύ αργός, η αντίδραση δε μπορεί να πραγματοποιηθεί. Εκτός από τον ρυθμό της αντίδρασης, οι αντιδράσεις μπορούν να περιορίζονται από ενεργοποίηση (reaction kinetics), από μεταφορά μάζας (π.χ. παροχή οξυγόνου στην επιφάνεια) ή από ωμική αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Στο θαλασσινό νερό, η ωμική αντίσταση είναι συνήθως μικρή, ενώ η μεταφορά μάζας οξυγόνου μπορεί να είναι ο καθοριστικός παράγοντας. Αυτό εξηγεί γιατί αυξημένη ροή νερού (π.χ. κοντά σε προπέλες ή intake θαλασσινού νερού) μπορεί να αυξήσει τη διάβρωση: η ροή ανανεώνει το οξυγόνο και απομακρύνει προϊόντα διάβρωσης.

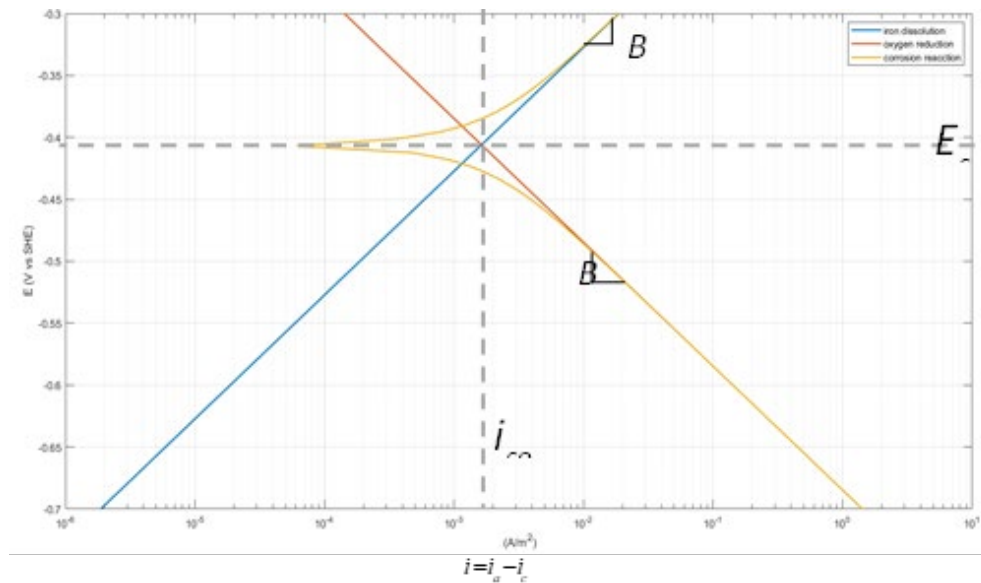
Η διάβρωση μπορεί να είναι αυθόρμητη ή εκβιασμένη, ανεξάρτητα από το είδος των δράσεων και την κλίμακα στην οποία πραγματοποιούνται και τέλος, ανεξάρτητα από το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Στην πράξη, όλες οι μορφές διάβρωσης ακολουθούν τους τέσσερις μηχανισμούς που είναι οι εξής:

- Μηχανισμός κατά Wagner: περιγράφει τη διάχυση ιόντων του μετάλλου σε στερεή κατάσταση. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός χαρακτηρίζεται ως γενικής ισχύος αφού ισχύει για όλες τις διαβρώσεις ηλεκτροχημικής φύσης και για μερικές διαβρώσεις μικτές δηλαδή ηλεκτροχημικής και χημικής φύσης.
- Μηχανισμός χημικής διάλυσης.
- Μηχανισμός διάχυσης ιόντων στην εγκοπή κατά μήκος του ενεργού δρόμου, για τις περιπτώσεις ψαθυρής θραύσης από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση.
- Μηχανισμός εξάχνωσης μόνο για τη σπηλαιώδη μηχανική διάβρωση [CORE. Corrosion and Inspection Systems. CORE Repository]

Τέλος, οι καμπύλες πόλωσης είναι χρήσιμες για να ερμηνευτεί το σημείο ισορροπίας μεταξύ ανοδικής και καθοδικής διεργασίας. Το E_{corr} είναι το δυναμικό στο οποίο οι ρυθμοί ανοδικής και καθοδικής αντίδρασης εξισώνονται, ενώ το i_{corr} αντιστοιχεί στο καθαρό ρεύμα διάβρωσης. Στην πράξη, οι καμπύλες πόλωσης χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν απαιτήσεις καθοδικής προστασίας, καθώς και για να αξιολογηθούν επιδράσεις επιστρώσεων ή αναστολέων.



Εικ.3: Διάγραμμα Evans που αντιστοιχεί στα διαγράμματα ρεύματος- δυναμικού



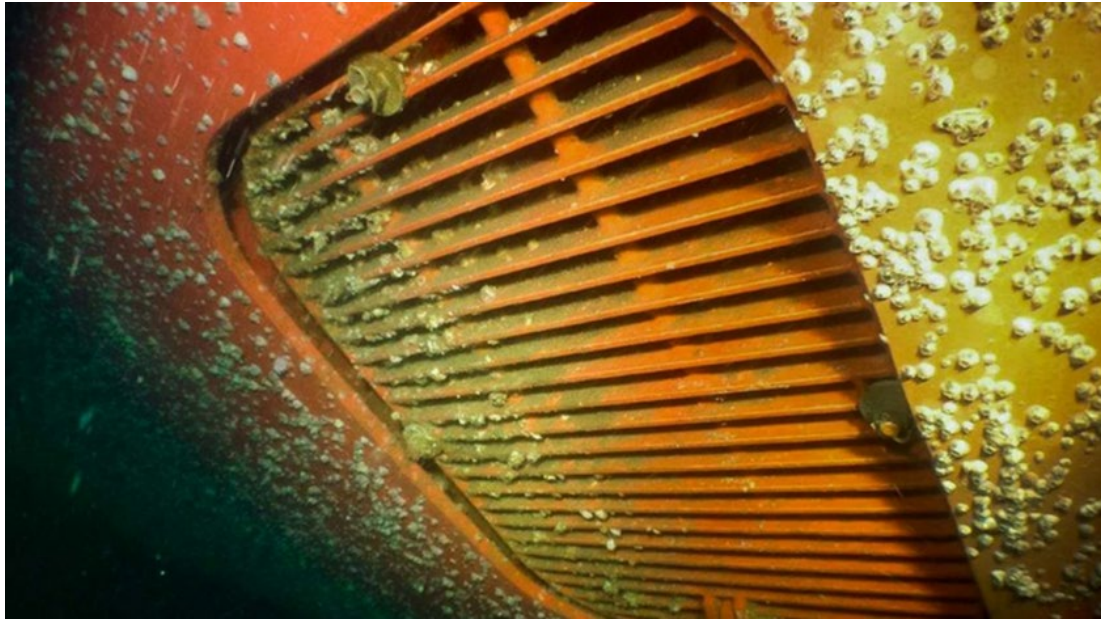
Εικ.4: Εννοιολογική καμπύλη πόλωσης για την ερμηνεία του δυναμικού διάβρωσης και του i_{corr}

Ο συνολικός ρυθμός της αντίδρασης διάβρωσης δίνεται από το άθροισμα των ανοδικών και καθοδικών ρυθμών [Tsinopoulos, Stephanos, και Dimitrios Kalovelonis. *Corrosion of W/Ts. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου-Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, εκπαιδευτική παρουσίαση (Workshop: Design and Maintenance of Wind Turbines)*]:

$$i = i_a - \sum_j i_{c,j}$$

1.3 Ζώνες έκθεσης σε πλοίο και κυρίαρχοι μηχανισμοί

Οι ρυθμοί και οι μορφές διάβρωσης διαφέρουν ανάλογα με τη ζώνη έκθεσης. Στη βυθισμένη ζώνη (fully immersed) η θερμοκρασία και η ροή καθορίζουν την παροχή οξυγόνου. Στη ζώνη παλίρροιας (tidal zone) η επαναλαμβανόμενη διαβροχή-ξηράνση και η υψηλή οξυγόνωση οδηγούν σε επιτάχυνση. Στη splash zone, τα αλατούχα σταγονίδια, η μηχανική δράση κυμάτων και η συχνή απομάκρυνση προστατευτικών προϊόντων καθιστούν το περιβάλλον ιδιαίτερα επιθετικό. Στη θαλάσσια ατμόσφαιρα, ο μηχανισμός εξαρτάται από την υγρασία και από τον χρόνο διαβροχής (time of wetness) [Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*].



Εικ.5: Πλήρως βυθισμένη ζώνη- ύφαλα, τμήματα εισρόφησης νερού- sea chests.

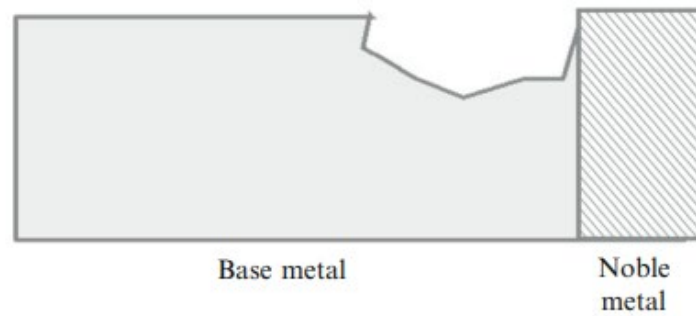
Η κατανόηση αυτών των ζωνών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό προστασίας, διότι κάθε ζώνη μπορεί να απαιτεί διαφορετικό σύστημα βαφής, διαφορετική πυκνότητα ανόδων ή διαφορετική στρατηγική επιθεώρησης.

2. Γαλβανική Διάβρωση

2.1 Ορισμός, Αρχή Λειτουργίας και συνθήκες εμφάνισης

Η γαλβανική διάβρωση, ή διμεταλλική διάβρωση, είναι η ηλεκτροχημική διάβρωση που συμβαίνει όταν δύο ανόμοια μέταλλα έρχονται σε επαφή σε παρουσία ηλεκτρολύτη (π.χ. νερό, υγρασία), δημιουργώντας ένα γαλβανικό στοιχείο όπου το πιο δραστικό μέταλλο (λιγότερο ευγενές κατά Π.Π) γίνεται άνοδος διαβρώνεται ταχύτερα, προστατεύοντας εν μέρει το πιο αδρανές (πιο ευγενές) μέταλλο που λειτουργεί ως κάθοδος. Αυτό οδηγεί στην απώλεια υλικού από το ένα μέταλλο και στη δημιουργία οξειδίων, που βλάπτουν συστήματα. [Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*] Η κινητήρια δύναμη εκφράζεται ως διαφορά δυναμικού: $\Delta E = E_{\text{καθόδου}} - E_{\text{ανόδου}}$

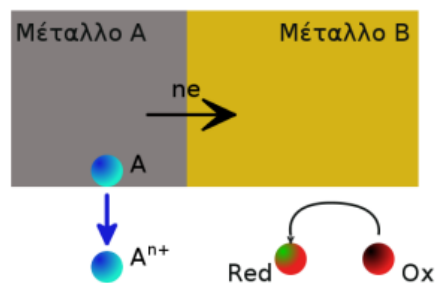
Για να εκδηλωθεί έντονα το φαινόμενο, πρέπει να υπάρχει επαρκής αγωγιμότητα στον ηλεκτρολύτη και διαδρομή ροής ιόντων. Το θαλασσινό νερό είναι ιδανικό υπό αυτή την έννοια, άρα τα πλοία είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε γαλβανικές επιδράσεις.



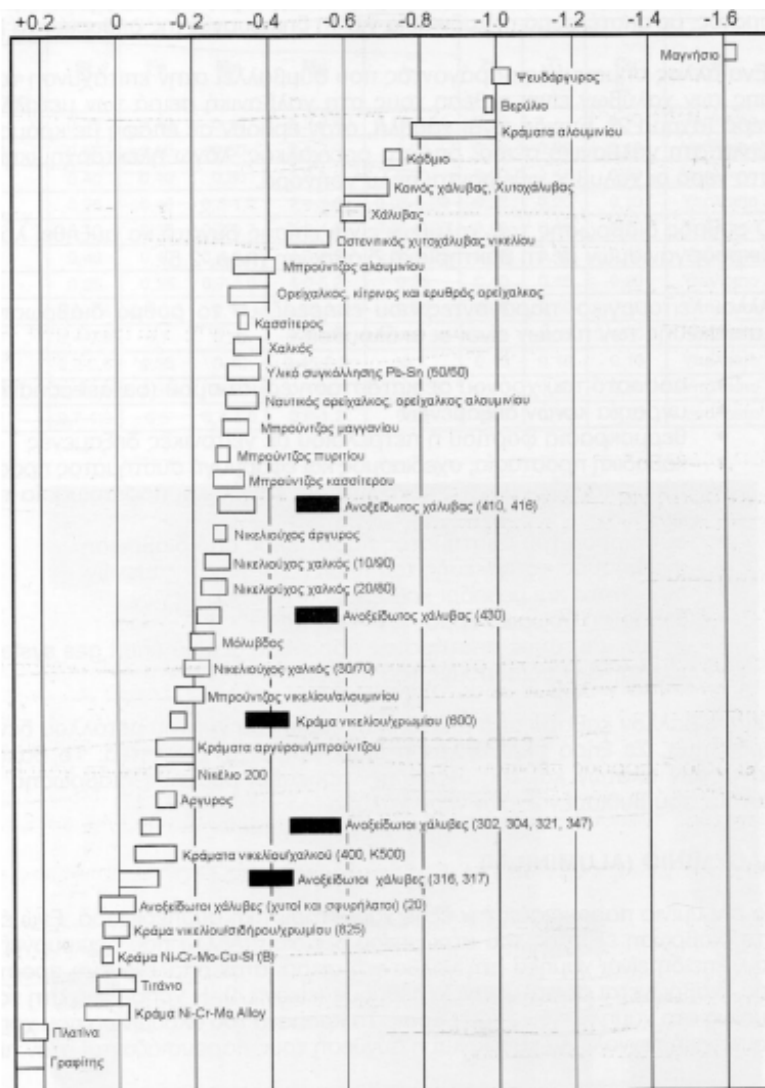
Εικ. 6: Σχηματική αναπαράσταση της γαλβανικής διάβρωσης.

2.2 Γαλβανική Σειρά και Παθητικότητα

Η γαλβανική σειρά κατατάσσει τα υλικά με βάση το δυναμικό τους στο θαλασσινό νερό. Υλικά όπως το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος είναι πολύ ενεργά, ενώ υλικά όπως ο χαλκός, το νικέλιο και το τιτάνιο είναι πιο ευγενή. Η παθητικότητα μπορεί να αλλάξει τη συμπεριφορά: ένας ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να εμφανίζεται πολύ ευγενής όταν είναι παθητικός, αλλά αν χάσει την παθητικότητα (π.χ. σε σχισμή), μπορεί να συμπεριφερθεί ως ενεργός άνοδος τοπικά. Αυτή η διπλή συμπεριφορά είναι κρίσιμη σε θαλασσινά συστήματα όπου συνυπάρχουν ανοξείδωτα και ανθρακούχοι χάλυβες.



Εικ. 7: Σχηματική αναπαράσταση της γαλβανικής διάβρωσης δύο μετάλλων Α και Β, όπου το Α διαβρώνεται ενώ το Β προστατεύεται. Το μέταλλο Α δρα ως άνοδος ενώ το Β ως κάθοδος.



Εικ. 8: Γαλβανική σειρά των μετάλλων σε θαλασσινό νερό.

2.3 Παράγοντες που καθορίζουν την ένταση της γαλβανικής διάβρωσης

(α) Λόγος επιφανειών: Όταν $A_{καθόδου} \gg A_{ανόδου}$, η άνοδος «φορτώνεται» με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος και διαβρώνεται έντονα. Αυτό συναντάται συχνά σε μικρές βίδες/πείρους από αλουμίνιο ή χάλυβα που συνδέονται με μεγάλες επιφάνειες πιο ευγενών υλικών.

(β) Απόσταση και γεωμετρία: Η ωμική πτώση στον ηλεκτρολύτη και η γεωμετρία καθορίζουν πόσο «μακριά» μπορεί να δράσει το γαλβανικό στοιχείο. Σε θαλασσινό νερό, ακόμη και σχετικά μεγάλες αποστάσεις μπορούν να υποστηρίξουν ρεύμα. Η μεγαλύτερη προσβολή ωστόσο είναι συνήθως κοντά στην επαφή. Η γεωμετρία του κυκλώματος επηρεάζει τη γαλβανική διάβρωση καθώς το ρεύμα δε διαρρέει εύκολα γύρω από γωνίες, καθώς διέπεται από την αρχή του μονοπατιού της ελάχιστης αντιστάσεως.

(γ) Ροή και οξυγόνωση: Η καθοδική αντίδραση του οξυγόνου είναι συχνά καθοριστική. Σε περιοχές υψηλής ροής, η καθοδική αντίδραση ενισχύεται και μπορεί να αυξήσει το γαλβανικό ρεύμα.

(δ) Κατάσταση επιφάνειας και επιστρώσεις: Αν το ευγενέστερο μέταλλο είναι εκτεθειμένο και το λιγότερο ευγενές έχει βλάβη στη βαφή, η διάβρωση συγκεντρώνεται στο γυμνό τμήμα. Η ασυμμετρία προστασίας είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη.

(ε) Πόλωση ή βαθμός διαφοράς δυναμικού: είναι ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στη γαλβανική διάβρωση, καθώς εάν το πιο ευγενές μέταλλο πολώνεται πιο εύκολα το δυναμικό του μετατοπίζεται περισσότερο προς το πιο δραστικό μέταλλο. Η μετατόπιση του δυναμικού του πιο δραστικού μετάλλου στην κατεύθυνση της καθόδου, συνεπώς, ελαχιστοποιείται ώστε ο ρυθμός της γαλβανικής διάβρωσης μειώνεται. Αντίθετα, εάν το πιο ευγενές μέταλλο (ή κράμα) δεν πολώνεται εύκολα, το δυναμικό του πιο δραστικού μετάλλου μετατοπίζεται περισσότερο προς την κάθοδο (ήτοι στην διεύθυνση της ανοδικής πόλωσης), γεγονός που επιταχύνει τη γαλβανική διάβρωση.

(στ) Διαβρωτικότητα των περιβαλλόντων μέσων/ ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη: Εάν αυτή είναι χαμηλή, η διάβρωση είναι γενικά μικρή έως αμελητέα, εκτός ίσως στην περιοχή αμέσου επαφής των μετάλλων.

2.4 Εφαρμογές σε πλοία και πρακτικά παραδείγματα

Τα σημεία της μεταλλικής κατασκευής ενός φορτηγού πλοίου χύδην φορτίου που εμφανίζουν διάβρωση σε μεγαλύτερο βαθμό είναι τα εξής:

α) Ενισχυτικά του κεκλιμένου ελάσματος των άνω πλευρικών δεξαμενών

β) Κορμοί νομέων στις άνω πλευρικές δεξαμενές (συγκολλήσεις)

γ) Διαμήκη ενισχυτικά του καταστρώματος

δ) Οπές αποστραγγίσεως και εγκοπές στους νομείς

ε) Συγκολλήσεις κατά συμβολή στους κορμούς νομέων

στ) Ένωση σταυρωτών συνδέσμων μετά των νομέων

ζ) Έλασμα φρακτής στα άνω άκρα των δεξαμενών διπυθμένων

η) Νομείς, ιδίως στο κατώτερο, στο ανώτερο μέρος και στην απόληξη της βάσης των μπρακέτων στη ΘΕΖ

θ) Περίπου στο 40% του ύψους των κυτών φορτίου και των φρακτών, που είναι και το σύνηθες ύψος όπου ανέρχεται το φορτίο.

Η πλειοψηφία των περιοχών ευαίσθητων σε διάβρωση ευρίσκεται εντός ή περί των κυτών φορτίου. [Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*]

2.5 Ρόλος θαλάσσιων επικαθήσεων (biofouling)

Η θαλάσσια βιορύπανση, όπως ορίζεται από την Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), αναφέρεται στη συσσώρευση υδρόβιων οργανισμών όπως μικροοργανισμοί, φυτά και ζώα σε επιφάνειες και κατασκευές που βυθίζονται ή εκτίθενται στο υδάτινο περιβάλλον. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να περιλαμβάνει παθογόνους παράγοντες και επηρεάζει σημαντικά τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Η θαλάσσια βιορύπανση είναι μια φυσική διαδικασία όπου οι οργανισμοί προσκολλώνται σε βυθισμένες επιφάνειες. Ξεκινά με την αρχική προσκόλληση βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών, σχηματίζοντας ένα βιοφίλμ. Αυτό το βιοφίλμ στη συνέχεια προσελκύει πιο σύνθετους οργανισμούς όπως φύκια, πεταλίδες και μαλάκια. Η διαδικασία βιορύπανσης μπορεί να χωριστεί σε πρωτογενή (μικρορύπανση) και δευτερογενή (μακρορύπανση) στάδια, με κάθε στάδιο να επιδεινώνει την προσκόλληση διαφορετικών τύπων οργανισμών.

Η μικρορύπανση περιλαμβάνει τη συσσώρευση βακτηρίων και διατόμων, δημιουργώντας ένα γλοιώδες στρώμα στις επιφάνειες. Αυτό το στάδιο είναι κρίσιμο καθώς θέτει τα θεμέλια για τη μακρορύπανση, όπου προσκολλώνται μεγαλύτεροι οργανισμοί όπως φύκια, πεταλίδες και μύδια. Η παρουσία αυτών των οργανισμών μπορεί να μεταβάλει σημαντικά τις ιδιότητες των επιφανειών στις οποίες κατοικούν, οδηγώντας σε διάφορες αρνητικές επιπτώσεις. Η αποτελεσματική διαχείριση της βιορύπανσης απαιτεί έναν συνδυασμό προληπτικών μέτρων και προηγμένων τεχνολογιών. Ο τακτικός καθαρισμός και η συντήρηση των κυτών των πλοίων είναι απαραίτητοι για την ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης βιορύπανσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μηχανικού καθαρισμού, όπως βούρτσισμα ή ξύσιμο, και της χρήσης αντιρρυπαντικών επιστρώσεων. Αυτές οι επιστρώσεις είναι ειδικά σχεδιασμένες για να αποτρέπουν την προσκόλληση οργανισμών στις επιφάνειες, μειώνοντας τη συχνότητα καθαρισμού [What Is Marine Biofouling? MR Marine Group].



Εικ.9: Θαλάσσιες επικαθήσεις- Biofouling

3. Διάβρωση Κόπωσης

Κόπωση καλείται η αστοχία ενός μετάλλου λόγω ρωγμάτωσης όταν υφίσταται κυκλική καταπόνηση. Στη ναυπηγική, το κύτος υπόκειται σε εναλλασσόμενη κάμψη (hogging/sagging) λόγω κύματος, σε στρεπτικές καταπονήσεις, καθώς και σε τοπικές δυναμικές επιδράσεις από την πρόωση. Επίσης, κραδασμοί από μηχανές και προπέλες προκαλούν υψηλού κύκλου κόπωση. Η κόπωση των μετάλλων αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία με την αύξηση του ορίου διαρροής, επειδή τα κράματα υψηλότερης αντοχής σπάνια, αν όχι ποτέ, προσφέρουν ανώτερη αντοχή στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης σε σύγκριση με υλικά χαμηλότερης αντοχής, ωστόσο αναμένεται να υποστούν υψηλότερες καταπονήσεις κατά τη λειτουργία, με αποτέλεσμα την τάση να «υπερκατασκευάζονται» κράματα υψηλής αντοχής σε καταστάσεις κόπωσης, επιταχύνοντας έτσι την αστοχία λόγω κόπωσης. [Crooker, T. W., R. W. Judy, Jr., και R. J. Goode. *Fundamental Considerations of Fatigue, Stress-Corrosion Cracking and Fracture in Advanced Ship Structures*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1975. Παρουσίαση στο Ship Structure Symposium, Washington, D.C., 6–8 Οκτωβρίου 1975]

Συνήθως ασκούνται ταχέως μεταβαλλόμενες τάσεις που μπορεί να είναι αρκετά χαμηλότερες του ορίου διαρροής. Με αύξηση της τάσης ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για αστοχία μειώνεται. Στους χάλυβες συνήθως υπάρχει μια τιμή τάσης κάτω από την οποία δεν θα επέλθει αστοχία ακόμα και για άπειρο αριθμό κύκλων, και καλείται όριο αντοχής σε κόπωση. Μια συνήθης καμπύλη S – N (καμπύλη Wöhler) παριστάνει τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για θραύση συναρτήσει δεδομένης τιμής τάσης.

Όταν ένα μέταλλο υπόκειται σε κυκλική φόρτιση σε διαβρωτικό περιβάλλον, ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων για πρόκληση αστοχίας σε δεδομένη τάση δύναται να μειωθεί σημαντικά σε σχέση με το ίδιο μέταλλο. Αυτή η επιτάχυνση της διάβρωσης καλείται διάβρωση κόπωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη S – N παρουσία διάβρωσης τείνει να εξακολουθεί να μειώνεται, χωρίς να παραλληλίζεται με τον οριζόντιο άξονα, όπως συμβαίνει στις συνήθεις καμπύλες S – N. Επίσης, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή είναι η Basquin:

$$\sigma_a = \sigma'_f \left(\frac{2N}{\epsilon'_F} \right)^b,$$

όπου σ'_f και b είναι παράμετροι υλικού/λεπτομέρειας. Στη ναυπηγική, οι καμπύλες συχνά δίνονται ανά κατηγορία λεπτομέρειας συγκόλλησης, όχι μόνο ανά υλικό, διότι η γεωμετρία και η ποιότητα ραφής είναι καθοριστικές.

3.1 Πως η διάβρωση επιδεινώνει την κόπωση

Η διάβρωση επιδρά στην κόπωση με πολλαπλούς μηχανισμούς:

- Δημιουργεί pits που αυξάνουν τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης. Η έναρξη της κόπωσης είναι τοπικό φαινόμενο που εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής και τη συγκέντρωση τάσεων. Σε συγκολλητές κατασκευές όπως τα πλοία, οι ρωγμές εκκινούν σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων που προκαλούνται από ατέλειες της διαδικασίας συγκόλλησης καθώς και σε ενώσεις ελασμάτων όπου απότομες γεωμετρικές μεταβολές προκαλούν τοπικές αυξήσεις στην ένταση των τάσεων. Τέλος, ακόμη και μικρά pits μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή σε κόπωση.
- Υποβαθμίζει την επιφάνεια και αυξάνει την τραχύτητα, άρα μειώνει τη «φάση έναρξης» ρωγμής. Οι μεταβολές των δυναμικών φορτίσεων κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης ενός πλοίου προκαλούν την εκκίνηση ρωγμών κοπώσεων, σε περιοχές της κατασκευής πλημμελώς σχεδιασμένες, κατασκευασμένες ή συντηρημένες. Η επακόλουθη διάδοση των ρωγμών μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των κύριων κατασκευαστικών μελών.
- Στο άκρο ρωγμής, το διαβρωτικό περιβάλλον μπορεί να επιταχύνει τη διάδοση, π.χ. μέσω διάλυσης προϊόντων, μεταβολής pH ή τοπικής ηλεκτροχημείας [Surojo, E., J. Anindito, F. Paundra, A. R. Prabowo, E. P. Budiana, N. Muhayat, M. Badaruddin, και Triyono. *Effect of Water Flow and Depth on Fatigue Crack Growth Rate of Underwater Wet Welded Low Carbon Steel SS400*. Open Engineering, vol. 11, 2021, σσ. 329–338. De Gruyter,.]

Συνεπώς, σε θαλασσινό περιβάλλον, οι καμπύλες S–N μετατοπίζονται προς χαμηλότερες τάσεις και η έννοια του ορίου κόπωσης τείνει να εξαφανίζεται, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμη και χαμηλές τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία για πολύ μεγάλους αριθμούς κύκλων.

3.2 Θραυστομηχανική προσέγγιση διάδοσης ρωγμών

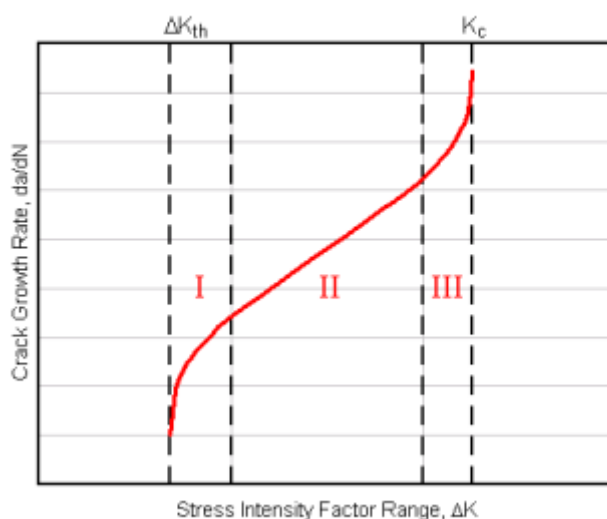
Τα πλοία υποβάλλονται σε διάφορους τύπους φόρτισης, εκ των οποίων για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κόπωση λαμβάνονται υπ' όψιν οι στατικές φορτίσεις (υδροστατική πίεση, ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό) και οι φορτίσεις προκληθείσες από θαλάσσιους κυματισμούς (ροπή σε κυματισμό, εξωτερικές υδροδυναμικές πιέσεις, εσωτερική αδράνεια και μεταβαλλόμενα φορτία λόγω κινήσεων του πλοίου). Τα φορτία υπολογίζονται με βάση τα κριτήρια του κάθε νηογνώμονα και οι διάφορες συνιστώσες της φόρτισης συνδυάζονται με διαφορετικές γωνίες φάσης για διαφορετικά μέρη της κατασκευής του πλοίου. Προτείνεται δε οι συνιστώσες του φορτίου να καθορίζονται με μετριοπαθές επίπεδο πιθανότητας υπέρβασης 10⁻³ έως 10⁻⁵ (IACS, 1999)[Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*]. Οι Paris και Erdogan πρότειναν έναν τρόπο παρακολούθησης της διάδοσης της ρωγμής με τη μέτρηση της ταχύτητάς της.

Βασισμένοι στην υπόθεση ότι υπάρχει μια σχέση που συνδέει την ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής (da/dN) με το συντελεστή έντασης τάσης (K) πρότειναν τη σχέση:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

Όπου C παράμετρος χαρακτηριστική του υλικού και n κυμαίνεται μεταξύ 2 και 7, με συνηθέστερες τιμές μεταξύ 3 και 4. Σχηματικά διακρίνεται κάτωθι, όπου το εύρος του συντελεστή έντασης τάσης ορίζεται ως

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$



Εικ. 10: Διάγραμμα που συνδέει την ταχύτητα διάδοσης ρωγμής, da/dN με την μεταβολή του συντελεστή έντασης της τάσης, ΔK .

Οι τρεις (3) περιοχές είναι οι: I) Η χαρακτηριστική περιοχή κατωφλίου (threshold) διάδοσης της ρωγμής II) Η περιοχή του Paris III) Η περιοχή επιτάχυνσης πριν την τελική θραύση.

3.3 Κρίσιμες λεπτομέρειες Πλοίων και παραδείγματα

Διάβρωση του Πλευρικού Ελάσματος της Γάστρας Φορτηγού Πλοίου

Παρακάτω περιγράφονται οι τρεις διαφορετικοί τύποι περιβαλλόντων στους οποίους εκτίθεται το πλευρικό έλασμα της γάστρας ενός φορτηγού πλοίου και πώς αυτά τα περιβάλλοντα συμβάλλουν στη διάβρωση. Το άνω τμήμα εκτίθεται σε ένα επιθετικό ατμοσφαιρικό περιβάλλον, το κάτω τμήμα είναι πλήρως βυθισμένο στο θαλάσσιο νερό και το τμήμα ισάλου γραμμής εκτίθεται σε ένα πολύ επιθετικό περιβάλλον λόγω της τύρβης της θάλασσας και των εναλλαγών υγρών και ξηρών κύκλων.

Άνω Τμήμα

Το άνω τμήμα υφίσταται τη δράση του επιθετικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος που έχει υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, οξυγόνου και άλλων διαβρωτικών στοιχείων. Επιπροσθέτως, δέχεται και την πρόσπτωση νέφωσης θαλασσίου ύδατος που

προκαλείται από την κίνηση του πλοίου και κυματικά φαινόμενα. Η περιοχή αυτή διακατέχεται, επίσης, από υψηλή σχετική υγρασία.

Τα εντοπιζόμενα άλατα προκύπτουν από την αλατονέφωση εκ του ανέμου. Οι δε μεταβολές στην σχετική υγρασία του αέρα προκαλούν είτε την εξάτμιση είτε τη συμπύκνωση του νερού.

Τα αέρια που περιέχονται στον αέρα μπορούν να φέρουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), διοξείδιο του θείου (SO_2) ή τριοξείδιο του θείου (SO_3). Τα αέρια αυτά ενεργοποιούν το λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη και επιταχύνουν περαιτέρω το ρυθμό της διάβρωσης, μιας και η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα παρουσίας ατμόσφαιρας πλούσιας σε οξυγόνο. Σημαντική επίδραση έχει και η θερμοκρασία.

Κάτω Τμήμα

Το κάτω τμήμα του πλευρικού ελάσματος της γάστρας του πλοίου είναι πλήρως βυθισμένο στο θαλασσίνο νερό. Οι ιδιότητες του νερού όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, το pH και η χημική σύσταση ποικίλλουν ανάλογα με τη θέση και το βάθος του νερού. Η διάβρωση, επομένως, στο τμήμα αυτό του πλοίου επηρεάζεται από τις ιδιότητες αυτές, ενώ και η ροή του νερού οδηγεί σε επιτάχυνσή της.

Τμήμα Ισάλου

Το τμήμα ισάλου ευρίσκεται ανάμεσα στο βυθισμένο και το ατμοσφαιρικό τμήμα του πλευρικού ελάσματος του πλοίου και υπόκειται σε πολύ επιθετικό περιβάλλον. Η περιοχή αυτή εμφανίζει υψηλό αερισμό λόγω της τύρβης της θάλασσας περί της γάστρας του πλοίου. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει την περιεκτικότητα οξυγόνου στην περιοχή αυτή, σε συνδυασμό με φαινόμενα φθοράς που προκαλούνται από την κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας περί του πλευρικού ελάσματος και τις εναλλαγές υγρών και ξηρών κύκλων, έτσι η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται ως υψηλής διάβρωσης. Η έκταση της μέγιστης διάβρωσης στη ζώνη ισάλου καθορίζεται από την κατάσταση της θάλασσας και την ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Ο μέγιστος ρυθμός προσβολής σε ψυχρά κλίματα είναι μικρότερος από ότι σε θερμά κλίματα, με έντονη δράση κυματισμών.

Διάβρωση Ελασμάτων Καταστρώματος

Η διάβρωση των ελασμάτων του καταστρώματος επηρεάζεται από την «πράσινη θάλασσα» (η επικάλυψη από θαλάσσιο νερό σε καταστάσεις έντονων κυματισμών), το νερό βροχής καθώς και τη συσσώρευση υδάτων κατά τη λειτουργία του πλοίου, σε συνδυασμό με την υψηλή υγρασία και την επιθετική θαλάσσια ατμόσφαιρα.

Οι δεξαμενές έρματος [Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*] αποτελούν από τα πιο ευπαθή σημεία του πλοίου σε διάβρωση και συχνά αυτή αποτελεί το λόγο που οδηγεί ένα πλοίο στα διαλυτήρια. Ιστορικά, το νερό χρησιμοποιείται σαν έρμα από το 1880. Στα φορτηγά πλοία οι δεξαμενές έρματος ευρίσκονται στα διπύθμενα, στις άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές, καθώς και στην πρωραία και πρυμναία δεξαμενή ζυγοστάθμισης. Δύσκολες λειτουργικές συνθήκες όπως υγρές/στεγνές φάσεις κατά τις συνθήκες φορτοεκφόρτωσης και κατασκευαστικές λεπτομέρειες κάνουν την επιθεώρηση και συντήρηση των δεξαμενών έρματος δύσκολη και ακριβή διαδικασία. Η δομή μιας δεξαμενής έρματος είναι εξαιρετικά πολύπλοκη εξαιτίας ενισχυτικών, ακμών και γωνιών που συνθέτουν

το σκελετό του πλοίου ενώ και οι εσωτερικές επιφάνειες είναι τεράστιες, κυμαινόμενες συνήθως μεταξύ 1,5 και 7 εκατομμύρια m². Η χωρητικότητα σε έρμα ποικίλλει αναλόγως του μεγέθους του πλοίου και μπορεί να φτάσει τιμές έως τα 200.000 m³. Η εισροή του έρματος γίνεται μέσω αναρροφήσεων (sea chests), αντλιών ή βαρυτικής παροχής.

Η έναρξη της κόπωσης είναι τοπικό φαινόμενο που εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής και τη συγκέντρωση τάσεων. Σε συγκολλητές κατασκευές όπως τα πλοία, οι ρωγμές εκκινούν σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων που προκαλούνται από ατέλειες της διαδικασίας συγκόλλησης καθώς και σε ενώσεις ελασμάτων όπου απότομες γεωμετρικές μεταβολές προκαλούν τοπικές αυξήσεις στην ένταση των τάσεων. Στα φορτηγά πλοία, περιοχές που πρέπει να επιθεωρούνται με ιδιαίτερη προσοχή είναι:

1. Τα μπρακέτα στη σύνδεση των νομέων με τις άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές
2. Οι άνω και κάτω συνδέσεις των πτυχωτών εγκαρσίων φρακτών
3. Γωνίες των στομίων κυτών, εκεί όπου συνδέονται με το κυρίως κατάστρωμα.
4. Ραφές συγκόλλησης σε διαφράγματα και ενισχυτικά, όπου υπάρχουν εγκοπές και υπολειμματικές τάσεις.
5. Οπές (manholes), κοψίματα και μεταβάσεις πάχους, που αυξάνουν τις τάσεις.
6. Δεξαμενές έρματος, λόγω εναλλαγής υγρού–αερίου, υψηλής οξυγόνωσης και συχνών βλαβών επιστρώσεων.
7. Περιοχές κοντά σε μηχανές και άξονες, όπου υπάρχουν κραδασμοί και δυναμικά φορτία.

4. Διαγνωστικές Μέθοδοι και παρακολούθηση Διάβρωσης

4.1 Επιθεωρήσεις και τεκμηρίωση

Η οπτική επιθεώρηση είναι το πρώτο βήμα, αλλά για να έχει αξία πρέπει να είναι συστηματική και τεκμηριωμένη. Χρησιμοποιούνται checklists, φωτογραφική τεκμηρίωση και χαρτογράφηση σε σχέδια. Η σύγκριση με προηγούμενες επιθεωρήσεις επιτρέπει να εκτιμηθεί ο ρυθμός επιδείνωσης και να γίνει προγραμματισμός συντήρησης.

Γενική Οπτική Επιθεώρηση (General Visual Inspection - GVI): Μια γρήγορη μέθοδος για την ανίχνευση ορατών ελαττωμάτων στην επιφάνεια του πλοίου, όπως σκουριά, διάβρωση, ξεφλουδισμένο χρώμα ή βιολογική ρύπανση (biofouling), χωρίς τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού παρά μόνο γυμνού ματιού.

Λεπτομερής/Στενή Οπτική Επιθεώρηση (Close Visual Inspection - CVI): Μια πιο ενδελεχής εξέταση, που συνήθως απαιτεί ο επιθεωρητής να βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια που ελέγχεται. Μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση βοηθημάτων όπως μεγεθυντικούς φακούς, καθρέφτες και ισχυρό φωτισμό για τον εντοπισμό μικρότερων ρωγμών ή ατελειών.

Η χρήση ρομπότ ως Οχήματα Απομακρυσμένης Επιθεώρησης (RIV) είναι μια από τις πιο σχετικές αναδυόμενες τάσεις στις επιθεωρήσεις κατασκευών. Η τεχνολογία RIV παίζει ήδη έναν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στη ναυτιλιακή βιομηχανία, βοηθώντας στην επιθεώρηση και την έρευνα -εργασία, προσφέροντας μειωμένο κόστος, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και μεγαλύτερη ασφάλεια.

Τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) είναι ο τύπος ρομπότ που χρησιμοποιείται ευρύτερα από τη ναυτιλιακή βιομηχανία για υποβρύχιες έρευνες και επιθεωρήσεις. Επίσης, τα τελευταία χρόνια, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) αρχίζουν να χρησιμοποιούνται ως RIV για εσωτερικές και εξωτερικές επιθεωρήσεις πλοίων. Σήμερα, ένας μικρός αλλά αυξανόμενος αριθμός χειριστών ήδη χρησιμοποιεί UAV για επιθεωρήσεις και έρευνες πλοίων. Αρκετοί Νηογνώμονες έχουν ήδη αναγνωρίσει αυτό το γεγονός και εκδίδουν οδηγίες, συστάσεις και απαιτήσεις για να βοηθήσουν στη χρήση των UAV ως RIV. Προς το παρόν, η κύρια χρήση των UAV σε επιθεωρήσεις πλοίων είναι ως συμπληρωματική τεχνική τηλεχειρισμού για να βοηθήσει τον επιθεωρητή κατά τη διεξαγωγή μιας συνολικής ή Γενικής Οπτικής Επιθεώρησης (GVI), αλλά η χρήση τους ως εργαλείου στενής οπτικής επιθεώρησης (CVI) γίνεται όλο και πιο συχνή. Επιπλέον, η συμπερίληψη της επεξεργασίας εικόνας επί του σκάφους επιτρέπει τη βελτίωση της έρευνας εντοπίζοντας, αξιολογώντας και καταγράφοντας μοτίβα ρωγμών και διάβρωσης. Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στις Τεχνικές Απομακρυσμένης Επιθεώρησης (RIT) θα βελτίωνε τον χρόνο και την ποιότητα των ερευνών [*Marine Inspection Services. Visual Inspection. Marine Inspection Services Ltd*].



Εικ. 11: Γενική Οπτική Επιθεώρηση- General Visual Inspection (GVI)

4.2 Μετρήσεις πάχους (UT) και αξιολόγηση υπολειπόμενης αντοχής

Ο υπερηχητικός έλεγχος (ultrasonic) πάχους είναι τυπική τεχνική για κύτος, δεξαμενές και σωληνώσεις. Τα δεδομένα πάχους συνδυάζονται με απαιτήσεις κανονισμών και με υπολογισμούς αντοχής για να κριθεί αν απαιτείται

επισκευή/ένισχυση. Σημαντικό είναι η σωστή βαθμονόμηση και η επιλογή αντιπροσωπευτικών σημείων μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποκλίσεις των ελασμάτων ενισχυτικών από τα αρχικά τους πάχη δίνονται σε πίνακα της εγκυκλίου 1422 ΒΝΓ/67/13-4-98 ΥΕΝ/ΔΕΕΠ/Β&Γ-Ν/Γ [Υπουργείο Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής. *Τεχνικές απαιτήσεις πλοίων. Ελληνική Δημοκρατία*]. Όταν παρατηρείται υπερβολική φθορά σε κάποιο έλασμα ή ενισχυτικό, πρέπει να λαμβάνονται πρόσθετες μετρήσεις στα γειτονικά ελάσματα και ενισχυτικά προς καθορισμό πλήρους έκτασης της φθοράς.

Τέλος, προκειμένου να διατηρηθεί η απαιτούμενη διαμήκης αντοχή του πλοίου, θα πρέπει: να προσδιορίζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες αποκλίσεις των ελασμάτων του πυθμένα και των πλευρών σε πίνακα της εγκυκλίου : '1422 ΒΝΓ/67/13-4-98 ΥΕΝ/ΔΕΕΠ/Β&Γ-Ν/Γ.

ΠΛΟΙΑ ΗΛΙΚΙΑΣ 9 ΜΕΧΡΙ 10 ΕΤΩΝ	ΠΛΟΙΑ ΗΛΙΚΙΑΣ 14 ΜΕΧΡΙ 15 ΕΤΩΝ	ΠΛΟΙΑ ΗΛΙΚΙΑΣ 18 ΜΕΧΡΙ 20 ΕΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΩ ΑΝΑ ΤΕΤΡΑΕΤΙΑ ΜΕΧΡΙ ΠΕΝΤΑΕΤΙΑ
1. Περιοχή δεξαμενών φορτίου: (α) Όλα τα ελάσματα καταστρώματος (Σημ.1) (β) Μια εγκάρσια τομή 2. Μετρήσεις προς υπολογισμό του ποσοστού φθοράς των κατασκευαστικών στοιχείων που επιθεωρούνται σύμφωνα με την «εξ επαφής» επιθεώρηση, όπως φαίνεται στους πίνακες Α II, ΑIII και ΑIV. 3. Επιλεγμένα καλύμματα στομίων κυτών φορτίου και τοιχώματα (ελάσματα και ενισχυτικά). 4. Επιλεγμένες περιοχές ελασμάτων καταστρώματος εντός της γραμμής των ανοιγμάτων μεταξύ των στομίων κυτών φορτίου. 5. Επιλεγμένες διαμήκεις σειρές ελασμάτων των εξάλων και υφάλων εκτός περιοχής δεξαμενών φορτίου. 6. Κρίσιμες περιοχές, με υπόδειξη του επιθεωρητή.	1. Περιοχή δεξαμενών φορτίου: (α) Όλα τα ελάσματα καταστρώματος (Σημ.1) (β) Δύο εγκάρσιες τομές (Σημ. 2) 2. Μετρήσεις προς υπολογισμό του ποσοστού φθοράς των κατασκευαστικών στοιχείων που επιθεωρούνται σύμφωνα με την «εξ επαφής» επιθεώρηση, όπως φαίνεται στους πίνακες ΑII, ΑIII, και ΑIV. 3. Όλα τα καλύμματα στομίων κυτών φορτίου και τοιχώματα (ελάσματα και ενισχυτικά). 4. Όλα τα ελάσματα καταστρώματος εντός της γραμμής των ανοιγμάτων μεταξύ των στομίων κυτών φορτίου. 5. Επιλεγμένες διαμήκεις σειρές ελασμάτων των εξάλων και υφάλων εκτός περιοχής δεξαμενών φορτίου. 6. Κρίσιμες περιοχές, με υπόδειξη του επιθεωρητή.	1. Περιοχή δεξαμενών φορτίου: (α) Όλα τα ελάσματα καταστρώματος (Σημ.1) (β) Τρεις εγκάρσιες τομές (Σημ. 3) (γ) Όλα τα ελάσματα πυθμένα. 2. Μετρήσεις προς υπολογισμό του ποσοστού φθοράς των κατασκευαστικών στοιχείων που επιθεωρούνται σύμφωνα με την «εξ επαφής» επιθεώρηση, όπως φαίνεται στους πίνακες ΑII, ΑIII, και ΑIV. 3. Όλα τα καλύμματα στομίων κυτών φορτίου και τοιχώματα (ελάσματα και ενισχυτικά). 4. Όλα τα ελάσματα καταστρώματος εντός της γραμμής των ανοιγμάτων μεταξύ των στομίων κυτών φορτίου. 5. Επιλεγμένες διαμήκεις σειρές ελασμάτων των εξάλων και υφάλων εκτός περιοχής δεξαμενών φορτίου. 6. Όλα τα ελάσματα εξάλων και υφάλων εντός της περιοχής δεξαμενών φορτίου. 7. Κρίσιμες περιοχές, με υπόδειξη του επιθεωρητή.

Εικ. 12: Ενδεικτικός πίνακας με βάση τη νομοθεσία παχυμετρήσεων ελασμάτων για πλοία κατηγορίας Α.

4.3 NDT για ρωγμές (MT, PT, UT/PAUT, RT)

Η οπτική επιθεώρηση συχνά συμπληρώνεται από άλλες μεθόδους NDT για την αξιολόγηση της ακεραιότητας του υλικού, όπως:

- Υπερηχογραφία (Ultrasonic Testing): Για τη μέτρηση του πάχους του μετάλλου (π.χ., λέπτυνση λόγω διάβρωσης) ή τον εντοπισμό εσωτερικών ελαττωμάτων.
- Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particle Inspection): Για την ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά υλικά.
- Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Penetrant Testing): Για τον εντοπισμό πολύ μικρών ρωγμών στην επιφάνεια.



Εικ. 13: Δοκιμή διείσδυσης

Για την ανίχνευση ρωγμών, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλογα με το υλικό και τη γεωμετρία: μαγνητικά σωματίδια για σιδηρομαγνητικά υλικά, διεισδυτικά υγρά για επιφανειακές ρωγμές σε λείες επιφάνειες, υπερηχητικές τεχνικές (συμπεριλαμβανομένου PAUT) για εσωτερικές ασυνέχειες, και ακτινογραφία για κρίσιμες συγκολλήσεις. Η επιλογή μεθόδου πρέπει να λαμβάνει υπόψη προσβασιμότητα, κόστος και κρίσιμότητα στοιχείου. Η τεχνολογία δεν καταστρέφει εξαρτήματα ή υλικά, μπορεί να εντοπιστεί απευθείας στο χώρο με υψηλή απόδοση. Επί του παρόντος, οι πιο κοινές μη καταστροφικές δοκιμές υπάρχουν πέντε είδη: [YZ Pipes. *Non-Destructive Testing (UT, RT, MT, PT, ET). YZ Pipes*]

- UT (Δοκιμή υπερήχων)
- RT (ακτινολογικός έλεγχος)
- MT (Δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων)
- PT (Δοκιμή διεισδυτικού υλικού)
- ET (Eddy Current Testing)

UT ή Δοκιμή Υπερήχων

Τα υπερηχητικά κύματα χτυπούν το ελάττωμα και στη συνέχεια αντανακλούν ενέργεια από την αρχική διαδρομή προς τον ανιχνευτή. Ο αισθητήρας τον μετατρέπει σε ηλεκτρικό παλμό και εμφανίζεται στην οθόνη του παλμογράφου. Ανάλογα με τη θέση και το πλάτος του κύματος, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση και το κατά προσέγγιση μέγεθος του ελαττώματος.

RT (Ακτινογραφικός Έλεγχος)

Αυτή είναι η πιο βασική και διαδεδομένη μέθοδος NDT. Χαρακτηριστικό ακτίνων Χ: Η ακτινογραφία είναι ένα φωτόνιο. Το ηλεκτρομαγνητικό του κύμα είναι σύντομο, το μήκος κύματος $10 \sim 10 \text{ cm}$.

Η ακτινογραφία έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1) Διαπεραστικό. Η ακτινογραφία μπορεί να διαπεράσει το γενικό ορατό φως διαμέσω του υλικού. Η δύναμη της διεισδυτικής του ικανότητας σχετίζεται με το μήκος κύματος των ακτίνων Χ και την πυκνότητα και το πάχος της διεισδυμένης ύλης. Όσο μικρότερο είναι το κύμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη διείσδυσης. Αλλά η πυκνότητα και το πάχος θα μειωθούν καθώς το κύμα μικραίνει. Στην πράξη, η τιμή volt τάσης του σωλήνα (kV) καθορίζει τη διείσδυση των ακτίνων Χ (δηλ. τη μάζα ακτίνων Χ). Και η τιμή των ακτίνων Χ = το ρεύμα ακτίνων Χ (mA) επί τη μονάδα χρόνου.

2) Ιοντισμός είναι ότι το υλικό απορροφά ακτίνες Χ ή άλλες ακτίνες (π.χ. ακτίνες γάμμα), με τα μόριά του να αποσυντίθενται σε θετικά ανιόντα. Η ποσότητα των ακτίνων Χ μπορεί να υπολογιστεί από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Βαθμός ιοντισμού του αέρα
- Βαθμός ιοντισμού άλλων ουσιών

Η αρχή του σχηματισμού εικόνας ακτίνων Χ είναι: η διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών της ακτινογραφίας και της πυκνότητας και του πάχους των εξαρτημάτων [YZ Pipes. *Non-Destructive Testing (UT, RT, MT, PT, ET)*. YZ Pipes].

MT (Δοκιμή Μαγνητικών Σωματιδίων)

Η ανίχνευση μαγνητικών σωματιδίων μπορεί να ανιχνεύσει μόνο την επιφάνεια σιδηρομαγνητικών υλικών ή ελαττώματα κοντά στην επιφάνεια. Επειδή τα μαγνητικά ίχνη συσσωρεύονται στην ανιχνευμένη επιφάνεια, έτσι μπορεί να εμφανιστεί οπτικά το ασυνεχές σχήμα, θέση και μέγεθος. Μπορεί επίσης να καθορίσει το γενικό χαρακτηριστικό.

Η ευαισθησία της ανίχνευσης μαγνητικών σωματιδίων μπορεί να φτάσει τα $0,1 \mu\text{m}$ από το ασυνεχές πλάτος. Με πολλαπλές μεθόδους μαγνήτισης, το μέγεθος και το γεωμετρικό σχήμα του τεμαχίου εργασίας σχεδόν δεν μπορούν να επηρεάσουν την ανίχνευση μαγνητικών σωματιδίων. Επιπλέον, μπορεί να ανιχνεύσει ελαττώματα σε όλες τις κατευθύνσεις του τεμαχίου εργασίας. Ταιριάζει ιδιαίτερα στις μη καταστροφικές δοκιμές για εξαρτήματα από ανοξείδωτο χάλυβα.

PT (Δοκιμή Διείσδυσης)

Η βασική αρχή λειτουργίας της ανίχνευσης διείσδυσης:

- Τριχοειδής δράση υγρού.
- Φαινόμενο φωταύγειας στερεών βαφών υπό ορισμένες συνθήκες.

Επομένως, η ανίχνευση διείσδυσης είναι για να ελεγχθεί εάν υπάρχει επικαλυμμένη βαφή που διεισδύει στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας. Εάν υπάρχει κάποιο ελάττωμα, τα ίχνη της διείσδυσης θα εμφανιστούν κάτω από μια συγκεκριμένη πηγή φωτός. Ανιχνεύει την εμφάνιση και την κατανομή των ελαττωμάτων.

ΕΤ (Δοκιμή Δινορρευσμάτων)

Τοποθετώντας πηνίο με εναλλασσόμενο ρεύμα στη μεταλλική πλάκα ή σωλήνα. Ταυτόχρονα, δημιουργείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα και γύρω από το πηνίο. Στη συνέχεια, το δείγμα παρήγαγε εναλλασσόμενο ρεύμα επαγωγής που μοιάζει με δίνη, γνωστό ως δινορεύμα.

4.4 Μετρήσεις δυναμικού και έλεγχος καθοδικής προστασίας

Η καθοδική προστασία αξιολογείται με μετρήσεις δυναμικού ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς. Για χάλυβα σε θαλασσινό νερό, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο επαρκούς προστασίας είναι: $E \leq -0.85 \text{ V (Ag/AgCl)}$

Ανεπαρκής πόλωση συνεπάγεται κίνδυνο διάβρωσης, ενώ υπερπόλωση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως αποκόλληση επιστρώσεων ή ζητήματα σε ευαίσθητα υλικά. Συνεπώς, απαιτείται ισορροπημένος έλεγχος και συνδυασμός με επιθεώρηση ανόδων και επιστρώσεων.

4.5 SHM (Structural Health Monitoring), αισθητήρες και προγνωστική συντήρηση

Η χρήση αισθητήρων (strain, accelerometers, corrosion probes) επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων λειτουργίας. Με αυτά τα δεδομένα μπορούν να εφαρμοστούν προγνωστικά μοντέλα για κόπωση και διάβρωση, καθώς και risk-based inspection, όπου οι επιθεωρήσεις εστιάζουν σε περιοχές υψηλού κινδύνου. Έχει σημασία να γίνει κατανοητό ότι η αξία του monitoring βρίσκεται στη δυνατότητα λήψης καλύτερων αποφάσεων συντήρησης με βάση πραγματικές συνθήκες και όχι μόνο ημερολογιακά διαστήματα.

5. Μέθοδοι Πρόληψης και Αντιμετώπισης/ Προστασίας από τη Διάβρωση

5.1 Σχεδιαστικές κατευθύνσεις για μείωση γαλβανικής διάβρωσης

Η πρόληψη είναι αποτελεσματικότερη από την επισκευή. Για γαλβανική διάβρωση, οι βασικές κατευθύνσεις είναι: επιλογή υλικών με μικρή διαφορά στη γαλβανική σειρά, αποφυγή μικρής ανόδου σε μεγάλη κάθοδο, χρήση μονωτικών παρεμβολών και σωστός σχεδιασμός ώστε να αποφεύγεται εγκλωβισμός ηλεκτρολύτη. Η ομοιογένεια προστασίας με επιστρώσεις είναι κρίσιμη: μια μικρή

αστοχία βαφής σε άνοδο μπορεί να οδηγήσει σε πολύ επιταχυνόμενη διάβρωση αν η κάθοδος παραμένει εκτεθειμένη. Μια κατασκευή οφείλει να σχεδιάζεται ούτως ώστε να παρέχει την επιθυμητή λειτουργική ποιότητα για την απαιτούμενη περίοδο λειτουργίας. Έτσι η κατασκευή δεν πρέπει ούτε να υπο-σχεδιαστεί (πολύ επικίνδυνο) ούτε να υπερ-σχεδιαστεί (πολύ ασύμφορο). Σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα κατάλληλη επιλογή υλικού υπάρχουν ορισμένα σημεία του σχεδιασμού στα οποία πρέπει να αποδοθεί κατάλληλη έμφαση:

- Αποφυγή γεωμετρικών μακροσκοπικών και μικροσκοπικών ατελειών
- Αποφυγή αταξιών δομής
- Αποφυγή επαφής ανόμοιων μετάλλων ή κραμάτων για αποτροπή της γαλβανικής διάβρωσης
- Αποφυγή ετερογένειας τόσο επιφανειακής όσο και κατανομής θερμότητας και τάσεων
- Αποφυγή τριεπιφανειών
- Αποφυγή ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων καθώς και εσωτερικών μηχανικών τάσεων
- Αποφυγή περιπατητικών ρευμάτων
- Να λαμβάνεται υπ' όψιν το φαινόμενο της διόγκωσης
- Παροχή εύκολης απορροής και αποστραγγίσεως
- Ευκολία επιθεώρησης των στοιχείων της κατασκευής και προσβασιμότητα για εκπόνηση διορθωτικών εργασιών ή εργασιών συντήρησης.
- Τήρηση προβλεπόμενων προδιαγραφών και κανονισμών
- Τήρηση συγκεκριμένων διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης όπως προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας. Υπάρχουν αρκετές αιτίες γιατί δυναμικοστατικά συστήματα συχνά αποτυγχάνουν να παράσχουν αρκετή προστασία:
- Το γαλβανικό αποτέλεσμα άβαφων μπρούντζινων ελίκων (προπέλες).
- Μεταβλητές ταχύτητες θαλασσίου ύδατος.
- Αυξανόμενη έκθεση γυμνού χάλυβα ως αποτέλεσμα ζημιάς των επιστρωμάτων.
- Ηλεκτρόδια αναφοράς λαμβάνουν μετρήσεις μόνο πλησίον αυτών.
- Τοποθέτηση ηλεκτροδίων και ανόδων σε λάθος θέσεις.

Η ύφαλος περιοχή ενός πλοίου είναι μια μεγάλη και περίπλοκη κάθοδος με τουλάχιστον τρία συστατικά: Βαμμένο χάλυβα, γυμνό χάλυβα και μπρούντζο. Αυτά έχουν διαφορετικές απαιτήσεις πυκνότητας ρεύματος για να επιτευχθεί η σωστή πόλωση και να αποκρίνονται διαφορετικά σε αλλαγές στις υπηρεσιακές συνθήκες, ιδίως τη ροή θαλασσίου ύδατος. Για παράδειγμα, υπολογίστηκε ότι πυκνότητα ρεύματος προστασίας 30 mA/m² σε ήσυχο νερό ανέρχεται σε πάνω από 110 mA/m² σε ταχύτητες άνω των 15 κόμβων. Τα ανόδια (μέταλλα υψηλής δραστηριότητας που τοποθετούνται για την προστασία κατασκευών και σκαφών) Ε.Ρ. ενός πλοίου είναι

λίγα σε αριθμό και πολύ μικρά σε σχέση με την επιφάνεια καθοδικής προστασίας, έτσι η κατανομή δυναμικού εξ αυτών είναι, αναπόφευκτα, άνιση. Κατά τη σχεδιαστική διαδικασία, η δυσκολία της πρόγνωσης της απαιτούμενης κατανομής δυναμικού είναι μεγάλη. Το πιο σημαντικό μέρος του πλοίου για τον καθορισμό της κατανομής δυναμικού στη γάστρα είναι η πρυμναία περιοχή, εκεί δηλαδή όπου βρίσκονται οι έλικες.

5.2 Επιστρώσεις (coatings) και προετοιμασία επιφάνειας

Οι οργανικές επικαλύψεις δρουν ως φυσικά εμπόδια μεταξύ του μετάλλου και του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Επίσης μπορεί να δρουν και ως “δεξαμενές” αναστολέων διάβρωσης. Οι μεταλλικές επικαλύψεις δρουν ως ανθεκτικά ως προς τη διάβρωση φυσικά εμπόδια καθώς και ως θυσιαζόμενοι άνοδοι (καθοδική προστασία).

Τέλος οι αναστολείς διάβρωσης δρουν ως φυσικά εμπόδια προσκολλούμενοι στην επιφάνεια. Συνήθως μία ή περισσότερες μονοστοιβάδες αρκούν ώστε να προσφέρουν προστασία. Ακόμη, η χρήση επικάλυψης μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση στη χρήση ωστενιτικών ηλεκτροδίων και ηλεκτροδίων από ανοξείδωτο χάλυβα με βάση το νικέλιο σε υγρή υποβρύχια συγκόλληση, υπό την προϋπόθεση ότι η επικάλυψη δεν θα υποστεί ζημιά κατά τη λειτουργία. [*Vijay, Abhiram, και N. Radhika. A Comprehensive Review on Underwater Welding: Methods, Property Evaluations and Challenges. **Advances in Materials and Processing Technologies**, τόμ. 10, αρ. 2, 2024, σσ. 923–959. Taylor & Francis,*]

Τα επιστρώματα κατατάσσονται στις κάτωθι κατηγορίες:

- Μεταλλικά επιστρώματα
 - Περισσότερο ευγενή
 - Λιγότερο ευγενή
- Μη μεταλλικά ανόργανα επιστρώματα
 - Οξείδια
 - Φωσφορικά
 - Χρωμικά
 - Εμαγιέ
 - Τσιμεντοκονία
- Οργανικά επιστρώματα
 - Χρώματα
 - Βερνίκια
 - Λάκες

Οργανικές επικαλύψεις

- Σύσταση: Διαλύτης, ρητίνη και χρώμα (pigment).
- Ρόλος του διαλύτη: Φορέας της ρητίνης και του χρώματος τα οποία προσκολλώνται στη μεταλλική επιφάνεια μετά την εξάτμιση του διαλύτη. Άλλες φορές, κατά την εξάτμιση του διαλύτη η ρητίνη και το χρώμα απλά επικάθονται στην μεταλλική επιφάνεια και άλλες φορές πολυμερίζονται και κάνουν cross-linking.
- Ρόλος της ρητίνης: (Ρητίνη: Χημική ένωση με μεγάλο ιξώδες που έχει την ιδιότητα να στερεοποιείται σε υλικό μεγάλης σκληρότητας μη αντιστρεπτά). Προσφέρει τις αντιδιαβρωτικές ικανότητες της επικάλυψης.
- Ρόλος του χρώματος: Μείωση του πορώδους του υλικού και διακοσμητικοί λόγοι. Επίσης, προστασία από την UV ακτινοβολία. Η επικάλυψη είναι συνήθως ένα σύνθετο πολυστρωματικό σύστημα:
- Primer (αρχικό στρώμα): Προσφέρει τη δυνατότητα προσκόλλησης των επόμενων στρωμάτων και έχει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες.
- Επόμενα στρώματα: Προσφέρουν χρώμα ή προστασία από UV και χημικά του περιβάλλοντος. Οι κατηγορίες των οργανικών επικαλύψεων σύμφωνα με τη ρητίνη είναι οι εξής:

1. Αλκυδικές ρητίνες (πολυεστέρες τροποποιημένη με λιπαρά οξέα): Γνωστά και ως σμάλτοι. Πολυμερίζονται και κάνουν cross-linking κατά την εξάτμιση του διαλύτη και υπό την επίδραση του αέρα. Χαμηλό κόστος, προσφέρουν προστασία σε ήπιο διαβρωτικό μέσο.

2. Τροποποιημένες αλκυδικές ρητίνες: Διατηρούν την καλή συγκολλητική ικανότητα και την εύκολη εφαρμογή της αλκυδικής ρητίνης αλλά βελτιώνονται λόγω του τροποποιητή. Π.χ. Πυρίτιο αυξάνει την αντοχή σε υγρασία και θερμοκρασία. Αμίνες καλές σε υψηλή υγρασία (π.χ. Ψυγεία και πλυντήρια). Φαινόλες, σε υλικά εμβαπτισμένα σε νερό.

3. Εποξυ-εστέρες: Αντίστοιχοι με τις αλκυδικές ρητίνες. Καλύτερα αντιδιαβρωτικά αλλά πιο ακριβοί.

4. Βινύλια (86% PVC και 14% PVA): Δεν κάνουν cross-linking. Καλά primers, ανθεκτικά σε νερό, οξέα και βάσεις. Προσθήκη TiO_2 προσφέρει προστασία από UV. Διαλύονται σε οργανικούς διαλύτες και για αυτό συνδυάζονται με επόμενες στρώσεις πιο ανθεκτικών επιστρωμάτων.

5. Χλωριωμένα ελαστικά: Ανάλογες ιδιότητες με τα βινύλια. Δεν αντέχουν σε UV.

6. Ακρυλικές ρητίνες: Είτε υδατοδιαλυτές ή οργανοδιαλυτές. Δεν κάνουν cross-linking αλλά αντέχουν στο φως και τη διαβροχή,

διατηρούν χρώμα και λάμψη. Καλύτεροι αν εφαρμοσθεί υψηλή θερμοκρασία (π.χ. Top coating σε αυτοκίνητα).

7. Φαινολικές ρητίνες: Το τελικό στρώμα προκύπτει μετά από χημικά αντίδραση δύο οργανικών μορίων. Επειδή προϊόν είναι και το νερό θα πρέπει να εφαρμόζονται σε λεπτές στρώσεις ώστε το νερό να φεύγει (π.χ. Φαινόλη και φορμαλδεΰδη)

8. Πολυουρεθάνες: Προϊόν αντίδρασης ισοκυανίου και πολυ-υδροξυλίου. Οι ιδιότητες εξαρτώνται από τη χημική σύσταση των οργανικών μορίων.

9. Εποξικά: Αντίστοιχα με την πολυουρεθάνες.

10. Επιστρώματα με ψευδάργυρο: (α) Ψευδαργυρικά χρώματα: Περιέχουν 20% ZnO_2 . Δεν έχουν αρκετό Zn για να προσφέρουν γαλβανική προστασία αλλά το ZnO_2 προσφέρει προστασία από ατμοσφαιρική διάβρωση. Εύκολη εφαρμογή ακόμα και σε σκουριασμένες επιφάνειες. (β) Επιστρώματα πλούσια σε Zn : Επιτρέπει προστασία με θυσιαζόμενη άνοδο ενώ τα προϊόντα της διάβρωσης (Zn) καλύπτουν τις ατέλειες και τις οπές. Θα πρέπει να εφαρμοσθούν έτσι ώστε να υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ των σωματιδίων Zn και της επιφάνειας του μετάλλου. Γι' αυτό, η επιφάνεια θα πρέπει να έχει προετοιμασθεί πολύ καλά.

Μεταλλικές επικαλύψεις

Οι μεταλλικές επιστρώσεις αποτελούνται γενικά από μη σιδηρούχα μέταλλα, συνήθως ψευδάργυρο, αλουμίνιο και τα κράματά του. Τα μη σιδηρούχα μέταλλα είναι πιο ηλεκτροαρνητικά από τον ανθρακούχο χάλυβα. Αυτές οι μεταλλικές επιστρώσεις παρέχουν προστασία στις χαλύβδινες κατασκευές από τη διάβρωση τόσο μέσω γαλβανικής δράσης όσο και μέσω φραγμού. Επιπλέον, οι μεταλλικές επιστρώσεις προστατεύουν τον χάλυβα θυσιαστικά σε κατεστραμμένες περιοχές ή σε μικρούς πόρους στις επιστρώσεις.

Η προετοιμασία της επιφάνειας γίνεται με καθαρισμό με διαλυτικά, με το χέρι ή μηχανικά. Καταστροφή της επικάλυψης μπορεί να γίνει με:

- Καθοδική αποδέσμευση: Λόγω της αντίδρασης $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$ τα υδροξύλια προκαλούν τη σαπωνοποίηση του πολυμερούς (όλα αυτά μέσα στη βάση του πόρου της επικάλυψης)
- Ανασήκωση λόγω οξειδίου: Συσσώρευση των προϊόντων της οξείδωσης, συνήθως σε μεταβλητές συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας

5.3 Απολίπανση (Degreasing)

Πρόκειται για την απομάκρυνση ελαίων και λιπών αρχικά μέσω αποξέσεως και εν συνεχεία, για πληρέστερο καθαρισμό, μέσω χρήσης οργανικών διαλυτικών (organic solvents) ή απορρυπαντικών (detergents) σε υδατική διάλυση, τα οποία συχνά συνδυάζονται με γαλακτοποιημένα οργανικά διαλυτικά. Τα λίπη και τα έλαια πρέπει οπωσδήποτε να απομακρύνονται, γιατί προσδίδουν ανομοιογένεια στην επιφάνεια, συνιστούν παράγοντα πρόκλησης διάβρωσης με βελονισμούς και μειώνουν την πρόσφυση του επιστρώματος με το μέταλλο.

5.4 Απομάκρυνση της καλαμίνας με έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον (Removal of millscale by weathering)

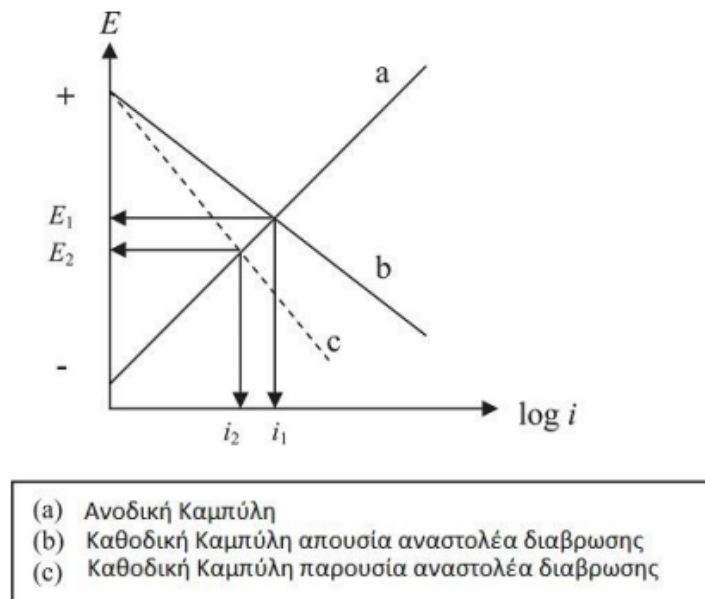
Καλαμίνη (millscale) ονομάζεται το στρώμα οξειδίων που σχηματίζεται κατόπιν αντίδρασης του θερμού χάλυβα με το οξυγόνο, κατά τη διάρκεια της παραγωγής θερμικά ανοπτημένων χαλύβων (annealed steels) [Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*]. Η καλαμίνη ποικίλλει ως προς το πάχος καθώς και τη σύνθεση αυτής ανάλογα με τη θερμοκρασία έλασης και το μέγεθος του χάλυβα. Ανάμεσα στο χάλυβα και την καλαμίνη δημιουργείται γαλβανικό στοιχείο αποδιδόμενο στη διαφορά δυναμικού μεταξύ τους, το οποίο αφενός επιταχύνει την καταστροφή του συστήματος βαφής και αφετέρου προσδίδει πτωχή πρόσφυση του επιστρώματος επί του χάλυβα. Η έκθεση στο εξωτερικό περιβάλλον (weathering) συνιστά την παλαιότερη μέθοδο για την απομάκρυνσή της, όταν δε αυτό συμβεί κατά την ανέγερση του πλοίου καλείται “building in rust”.

5.5 Μηχανικός καθαρισμός (Mechanical Cleaning)

Διακρίνεται στον καθαρισμό με εργαλεία χειρός (hand-tool cleaning) και στον καθαρισμό με χρήση ηλεκτρικών εργαλείων (power tool cleaning). Τα συνηθέστερα εργαλεία χειρός που χρησιμοποιούνται είναι τα ματσακόνια (chipping hammers), τα κοπίδια (scrapers), οι ξύστρες και τα μηχανήματα εξομάλυνσης (chisels). Με τη μέθοδο αυτή απομακρύνεται η ελαφρώς προσκολλημένη σκουριά και καλαμίνη, τα επιστρώματα και οι επιφανειακές ακαθαρσίες.

5.6 Αναστολείς

Αναστολείς καλούνται οι ουσίες εκείνες που όταν προστεθούν σε μικρές συγκεντρώσεις σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον ελαττώνουν την ταχύτητα διάβρωσης (κατά μία έννοια «ανάστροφοι καταλύτες» δηλαδή). Δρουν επί της καθοδικής πόλωσης, ώστε το στοιχείο διάβρωσης να λειτουργεί υπό καθοδικό έλεγχο και το ρεύμα διάβρωσης να είναι μειωμένο, ως παρίσταται στο κάτωθι διάγραμμα. Ευρέως γνωστό καταναλωτικό προϊόν η δράση του οποίου αποδίδεται στους αναστολείς διάβρωσης είναι το WD-40. [Αναστολείς Διάβρωσης, M. Finšgarand and I. Milošev "Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review" *Corrosion Science* 2010, Volume 52, Pages 2737-2749]



Εικ. 14: Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας των αναστολών (μεταβολή λογαρίθμου του ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού E)

Βάσει του μηχανισμού και της σύστασής των, οι αναστολείς διάβρωσης χωρίζονται στις κάτωθι κατηγορίες:

- Αναστολείς ρόφησης (absorption inhibitors)
- Αναστολείς παραγωγής υδρογόνου
- Scavengers
- Oxidizers
- Αναστολείς φάσης ατμού (vapor phase)

5.7 Καθοδική προστασία

Η βασική αρχή που διέπει όλες τις τεχνικές καθοδικής προστασίας είναι ότι οι ανεπιθύμητες ανοδικές αντιδράσεις διάβρωσης «καταπιέζονται» από την εφαρμογή ενός αντίθετου ρεύματος που αναγκάζει τις ανόδους να πολωθούν στο δυναμικό των τοπικών καθόδων [Dreym Engineering. *Πώς η καθοδική προστασία αποτρέπει τη διάβρωση*]. Θα γίνει αναφορά στις δύο κυριότερες εκφάνσεις της καθοδικής προστασίας με εφαρμογή σε υδατικά περιβάλλοντα. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι καθοδικής προστασίας. Ο πρώτος είναι η γαλβανική άνοδος και ο δεύτερος είναι το εντυπωμένο ρεύμα. Καθένας λειτουργεί με μοναδικό τρόπο για να επιτύχει παρόμοια αποτελέσματα.

Καθοδική προστασία με γαλβανική άνοδο

Η χρήση των θυσιαζόμενων ανόδων για την προστασία της γάστρας σε πλοία είναι περιορισμένη σε μεγάλα πλοία σε σχέση με τη μέθοδο επιβαλλόμενου ρεύματος, αλλά είναι η επικρατέστερη σε μικρότερα σκάφη, καθώς είναι

οικονομικότερη. Ο ψευδάργυρος είναι το πιο διαδεδομένο υλικό ανόδων για εφαρμογές σε θαλάσσια περιβάλλοντα, ενώ το αλουμίνιο και το μαγνήσιο προσφέρουν υψηλότερη τάση για λιγότερο αγωγίμα ύδατα. Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των συνηθέστερων κραμάτων των θυσιαζόμενων ανόδων παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα. Ένας συνηθής εμπειρικός κανόνας που αφορά το πότε πρέπει να αντικατασταθούν τα ανόδια είναι όταν έχει απολεσθεί υλικό ανάμεσα στο $\frac{1}{3}$ και το $\frac{1}{2}$ του μετάλλου τους.

Αυτός ο τύπος καθοδικής προστασίας παρέχει ροή προστασίας από καθοδικές ανόδους που τοποθετούνται στον ίδιο ηλεκτρολύτη με το προστατευόμενο μέταλλο. Αυτή η ροή ταξιδεύει από την άνοδο στον ηλεκτρολύτη και εκφορτίζεται πάνω στο προστατευόμενο μέταλλο. Στην γαλβανική άνοδο, τα υλικά ανόδου είναι κράματα ψευδαργύρου, αλουμινίου ή μαγνησίου. Αυτά τα κράματα μετάλλων είναι πιο ενεργά από τον χάλυβα και τα περισσότερα άλλα μέταλλα. Αναφέρονται ως θυσιαζόμενες άνοδοι επειδή ελέγχουν τη διάβρωση, ώστε το προστατευόμενο μέταλλο να μην την εμφανίσει. Σε υπεράκτιες εφαρμογές ή σε υδάτινες εφαρμογές, όπως πλοία, δεξαμενόπλοια και άλλα, οι άνοδοι συγκολλούνται στη δομή κατά την κατασκευή της.



Εικ.15



Εικ.16

Εικ. 15, 16: Τοποθέτηση ανοδίων στις προπέλες

Καθοδική προστασία με εντυπωμένο ρεύμα ICCP

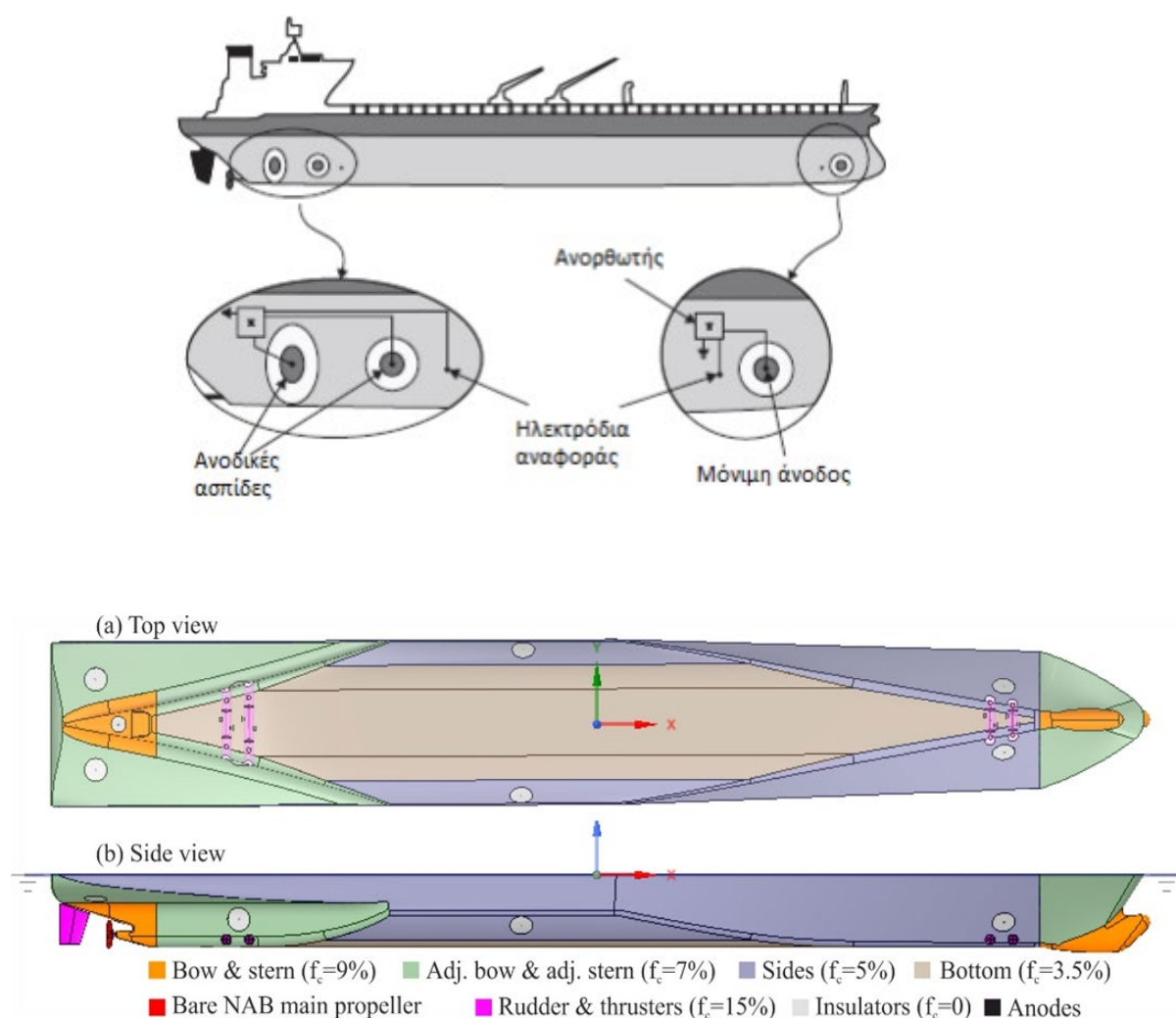
Η καθοδική προστασία με ηλεκτροπληξία είναι όταν μια πηγή συνεχούς ρεύματος συνδέεται μεταξύ του προστατευόμενου μετάλλου και των ανόδων καθοδικής προστασίας. Σε αντίθεση με τη γαλβανική άνοδο, το ρεύμα προέρχεται από την πηγή συνεχούς ρεύματος και όχι από τη διάβρωση της ανόδου. Τα συστήματα ICCP αποτελούνται από τρία κύρια εξαρτήματα: μια άνοδο, έναν ανορθωτή και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Οι άνοδοι σε αυτόν τον τύπο καθοδικής προστασίας μπορεί να είναι θραύσματα χάλυβα, σίδηρος υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο ή μικτά οξειδία μετάλλων με επικάλυψη σε τιτάνιο. Υπάρχουν περισσότερα κράματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά αυτά θεωρούνται τα πιο αποτελεσματικά. Για υπεράκτιες

και υδάτινες εφαρμογές, οι άνοδοι είναι συχνά μικτό τιτάνιο με επικάλυψη οξειδίου μετάλλου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θαλασσινό νερό και αλμυρή λάσπη και διατηρούν σχετικά χαμηλούς ρυθμούς κατανάλωσης.

Η καθοδική προστασία με επιβαλλόμενο ρεύμα στα πλοία παραδοσιακά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με προστατευτικά επιστρώματα. Τα επιστρώματα αποτελούν την πρωτεύουσα προστασία και το Ε.Ρ. χρησιμοποιείται επικουρικά εκεί όπου ελαττώματα των επιστρωμάτων μπορούν να υπάρχουν. Σε ένα φρέσκο επίστρωμα το σύστημα Ε.Ρ. έχει λίγη χρησιμότητα, αλλά όσο υποβαθμίζεται η κατάστασή του, τόσο αυξημένη είναι η ανάγκη ρεύματος καθοδικής προστασίας.

Τελικά, η απαίτηση Ε.Ρ. μπορεί να υπερβεί τις κατασκευαστικές δυνατότητες, με υψηλά ανοδικά ρεύματα να προκαλούν μεγαλύτερη ζημιά στο επίστρωμα, ιδίως σε περιοχές κοντά στα ανόδια. Επιπρόσθετα, υψηλά τοπικά ρεύματα μπορούν να ελαττώσουν την προστασία προς την υπόλοιπη κατασκευή. Σε ένα supertanker, αρχικό ρεύμα της τάξης των 10 A μπορεί να υπερβεί τα 1000 A κατά την υπηρεσιακή ζωή του. Σύγχρονες μελέτες συστημάτων Ε.Ρ. συνήθως τοποθετούν τα ανόδια σε συμμετρικές θέσεις.



5.8 Μείωση κινδύνου διάβρωσης κόπωσης μέσω σχεδιασμού και κατεργασιών

Για τη διάβρωση κόπωσης, βασικά μέτρα είναι η μείωση συγκεντρώσεων τάσης και η βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας. Τεχνικές όπως weld toe grinding, TIG dressing και peening μπορούν να μειώσουν τοπικές τάσεις και να καθυστερήσουν την έναρξη ρωγμών [Surojo, E., J. Anindito, F. Paundra, A. R. Prabowo, E. P. Budiana, N. Muhayat, M. Badaruddin, και Triyono. *Effect of Water Flow and Depth on Fatigue Crack Growth Rate of Underwater Wet Welded Low Carbon Steel SS400*. **Open Engineering**, vol. 11, 2021, σσ. 329–338. De Gruyter,]. Παράλληλα, η διατήρηση της αντιδιαβρωτικής προστασίας περιορίζει τη δημιουργία pits που λειτουργούν ως εστίες κόπωσης.

Η λείανση της συγκόλλησης (weld toe grinding) είναι μια καθιερωμένη τεχνική για τη βελτίωση της αντοχής στην κόπωση των συγκολλημένων αρμών. Οι κύριοι στόχοι της λειτουργίας είναι η μείωση της τοπικής συγκέντρωσης τάσεων και η αφαίρεση των ρηγματοειδών ελαττωμάτων στο δάχτυλο συγκόλλησης. Για να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης, συνιστάται η λείανση σε βάθος τουλάχιστον 0,5 mm κάτω από οποιαδήποτε ορατή υποτομή, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι διεισδύσεις και τα ρηγματοειδή ελαττώματα έχουν αφαιρεθεί. Μια τέτοια επεξεργασία δικαιολογεί αύξηση της αντοχής σχεδιασμού λόγω κόπωσης τουλάχιστον 2,2 φορές.

Δεδομένου ότι όλα τα ελαττώματα αναμένεται να έχουν αφαιρεθεί μετά την λείανση, το ποσοστό της αντοχής στην κόπωση που δαπανάται για την έναρξη μιας ρωγμής αναμένεται να είναι σημαντικό. Κατά συνέπεια, η τοπική προσέγγιση για την αξιολόγηση της έναρξης ρωγμών λόγω κόπωσης σε συγκολλημένους αρμούς που αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε γειωμένους αρμούς.

5.9 Οργάνωση συντήρησης και βελτιστοποίηση (risk-based inspection)

Η επιθεώρηση βάσει κινδύνου (RBI) είναι η διαδικασία ανάπτυξης ενός σχήματος επιθεώρησης βασισμένου στη γνώση του κινδύνου αστοχίας. Η βασική διαδικασία είναι η ανάλυση κινδύνου. Αυτός είναι ο συνδυασμός μιας αξιολόγησης της πιθανότητας αστοχίας λόγω ζημιάς, φθοράς ή υποβάθμισης με μια αξιολόγηση των συνεπειών μιας τέτοιας αστοχίας [Wikipedia. *Risk-Based Inspection – Objectives*. Wikimedia Foundation]

Οι πληροφορίες που αποκτώνται από αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό (α) του είδους της ζημιάς που ενδέχεται να υπάρχει, (β) πού θα μπορούσε να συμβεί τέτοια ζημιά, (γ) του ρυθμού με τον οποίο θα μπορούσε να εξελιχθεί μια τέτοια ζημιά και (δ) πού η αστοχία θα μπορούσε να προκαλέσει κίνδυνο. Οι περιοχές υψηλού κινδύνου συνήθως έχουν αξιόπιστους μηχανισμούς ζημιάς σε

συνδυασμό με υψηλές συνέπειες από δομική αστοχία, απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών ή αποθηκευμένης ενέργειας [*Επιθεωρήσεις Πλοίων βάσει Ανάλυσης Ρίσκου με Χρήση Δυναμικών Δικτύων Πιστέως*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016]. Ένα κατάλληλο σχήμα επιθεώρησης εφαρμόζει τεχνικές με συχνότητα που παρέχει επαρκή εμπιστοσύνη σχετικά με την κατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς ζημιάς και την αξιοπιστία των τεχνικών επιθεώρησης που χρησιμοποιούνται.

6. Σύγχρονες τεχνολογίες και Βελτιστοποιήσεις στη Ναυτιλία

Οι εξελίξεις περιλαμβάνουν αυτοεπουλωτικές επιστρώσεις, μικροκάψουλες αναστολέων διάβρωσης και βελτιωμένα anti-fouling συστήματα που μειώνουν βιοπροσκόλληση και σταθεροποιούν συνθήκες ροής. Η ενσωμάτωση αισθητήρων και η αξιοποίηση δεδομένων οδηγούν σε ψηφιακά δίδυμα (digital twins) και σε προγνωστικά μοντέλα υπολειπόμενης ζωής. Η μετάβαση αυτή υποστηρίζει τη βιωσιμότητα, διότι καλύτερη κατάσταση επιφάνειας σημαίνει μειωμένη αντίσταση και κατανάλωση καυσίμου. Τα υπάρχοντα παραδείγματα έξυπνων επιστρώσεων (smart coatings) και υλικών περιλαμβάνουν φωτοχρωμικούς φακούς γυαλιών που σκουραίνουν ως απόκριση στο ηλιακό φως και υδρόφοβες επιστρώσεις που απωθούν το νερό χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό και δομή παρόμοια με αυτή του φύλλου λωτού.

Υπάρχουν πολλοί τομείς ενδιαφέροντος και αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, με αναμφισβήτητο το υψηλότερο επίπεδο προσοχής να δίνεται στις αυτοθεραπευόμενες επιστρώσεις και υλικά, στις αντιρρυπαντικές θαλάσσιες επιστρώσεις κάτω από την ίσαλο γραμμή και στα αισθητήρια υλικά.

6.1 Αυτοθεραπευόμενες επιστρώσεις και υλικά

Η έννοια της αυτοθεραπείας παρουσιάζει ενδιαφέρον εδώ και πολλά χρόνια, αλλά πρόσφατα έχουν σημειωθεί αρκετές ανακαλύψεις τόσο στις παραδοσιακές επιστρώσεις, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εφαρμογές, όσο και στους ιατρικούς επιδέσμους, οι οποίες είναι επίσης επιστρώσεις αυτές καθαυτές.

Η αυτοθεραπεία αναφέρεται στον αυθόρμητο σχηματισμό νέων δεσμών όταν οι παλιοί δεσμοί σπάνε μέσα σε ένα υλικό [UL Prospector. *Smart Coatings*. UL Solutions]. Υπάρχουν επί του παρόντος τρεις κύριες μέθοδοι για την αυτοθεραπευτική αποκατάσταση: η εγγενής αυτοθεραπεία, η αγγειακή αυτοθεραπεία και η βασισμένη σε κάψουλες.

6.2 Αντιρρύπανση κάτω από τη θαλάσσια ίσαλο γραμμή

Ρύπανση κύτους

Οι επιστρώσεις του πυθμένα των πλοίων έχουν εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία 20 χρόνια. Οι θαλάσσιοι οργανισμοί, όπως οι πεταλίδες και άλλα είδη χλωρίδας και πανίδας, αυξάνουν την αντίσταση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε 5-7% επιπλέον κατανάλωση καυσίμου για την υπερνίκηση της τριβής σε σχέση με ένα καθαρό κύτος. Στο γλυκό νερό, τα μύδια ζέβρα συνεχίζουν να αποτελούν ενόχληση για τις σωληνώσεις εισαγωγής και εκκένωσης νερού για πόσιμο νερό, σταθμούς παραγωγής ενέργειας και άλλες λειτουργίες. Επομένως, η μείωση ή η εξάλειψη της ικανότητας των οργανισμών να προσκολλώνται σε επιφάνειες αποτελεί αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος, καθώς είναι πολύ ακριβό να αφιερωθεί χρόνος διακοπής για καθαρισμό.

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Υδροφίλες επιστρώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί με κυτταρινικά υλικά, τα οποία αποκολλώνται αργά με την πάροδο του χρόνου και επιτρέπουν ελάχιστα την προσκόλληση. Αυτά είναι εξαιρετικά μικροπορώδη και έχουν την τάση να διογκώνονται. Οι υδρόφοβες επιστρώσεις, από την άλλη πλευρά, παρέχουν μια σκληρή επιφάνεια στην οποία είναι πολύ δύσκολο να προσκολληθεί οτιδήποτε και συνήθως είναι σιλικονούχες ή φθοριωμένες ρητίνες. Η πολύ χαμηλή επιφανειακή ενέργεια αναστέλλει την προσκόλληση βιολογικών οργανισμών. Μια νεότερη προσέγγιση χρησιμοποιεί την αυτοσυναρμολόγηση για την αναστολή της πρόσφυσης.

6.3 Αισθητήρια υλικά

Τέλος, υπάρχει μια σειρά υλικών που έχουν αναπτυχθεί και βρίσκονται υπό αξιολόγηση, τα οποία χρησιμοποιούνται σε επιστρώσεις και μπορούν να ανιχνεύσουν τη διάβρωση. Αντί να απαιτούνται δαπανηρές και χρονοβόρες επιθεωρήσεις ή να βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) για την πρόβλεψη βλαβών, οι αισθητήρες παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση της υγείας του μεταλλικού υποστρώματος.

6.4 Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

Η ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων στη ναυτιλία μεταμορφώνει τον τρόπο διαχείρισης των ναυτιλιακών επιχειρήσεων, από τον σχεδιασμό πλοίων μέχρι τη διαχείριση του κύκλου ζωής τους. Αυτά τα προηγμένα εικονικά μοντέλα δημιουργούνται με τη χρήση δεδομένων από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι πάνω στα πλοία, οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς βασικές παραμέτρους, όπως την απόδοση των κινητήρων, την κατανάλωση καυσίμου, την ακεραιότητα της δομής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Μέσω της προσομοίωσης πραγματικών σεναρίων, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προβλέψουν πιθανές βλάβες, επιτρέποντας προληπτική συντήρηση και μειώνοντας τον χρόνο εκτός λειτουργίας. Επιπλέον, τα ψηφιακά δίδυμα βελτιώνουν την κατασκευή πλοίων, επιτρέποντας την εικονική δοκιμή σχεδίων πριν από την κατασκευή, μειώνοντας τον κίνδυνο λαθών και

επιταχύνοντας την παραγωγή [Ολυμπία Μπουραντά. *Ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων στη Ναυτιλία*]. Στην εφοδιαστική αλυσίδα, συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση των διαδρομών, τη βελτίωση της απόδοσης καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών ρύπων, συνεισφέροντας σε πιο βιώσιμες πρακτικές.

7. Επιθεωρήσεις, Κανονισμοί και Απαιτήσεις Νηογνομόνων

Ο νηογνώμονας είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση του πλοίου κατά την κατασκευή κατόπιν σύμβασης είτε με το ναυπηγείο είτε με τον πλοιοκτήτη. Είναι αρμόδιος για την επιθεώρηση των σχεδίων ναυπήγησης, των υλικών κατασκευής, των εργασιών που εκτελούνται, του εξοπλισμού καθώς και των εγκαταστάσεων – ηλεκτρικών, μηχανικών, ασφαλείας, φόρτωσης εκφόρτωσης. Τέλος είναι παρόν και επιβλέπει τις δοκιμαστικές διαδρομές του πλοίου. [Ξηραδάκης, Μιχαήλ. *Ελληνικός Νηογνώμονας, SWOT Analysis και αναγκαία μελλοντική στρατηγική. Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ναυτιλία, Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2018*] Έχοντας συγκεκριμένους κανονισμούς κρίνει ότι το πλοίο εφαρμόζει και πληροί όλους τους τεχνικούς όρους και κατόπιν απονέμει την κλάση. Οι κανονισμοί των νηογνομόνων έχουν τεθεί από ειδικό επιστημονικό προσωπικό, όπως ναυπηγοί, αρχιμηχανικοί, μηχανολόγοι και είναι εγκεκριμένοι από αρμόδιες επιτροπές για κάθε αντικείμενο.

Ο νηογνώμονας δεν είναι υπεύθυνος μόνο για την απονομή της κλάσης, αλλά και για την συνεχή παρακολούθηση του πλοίου και μετά την ναυπήγηση. Το πλοίο όσο βρίσκεται στο στάδιο της ναυπήγησης, πριν την πλοήγηση αλλά και σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, είναι κάτω από συνεχείς τακτικές και έκτακτες επιθεωρήσεις από τους νηογνώμονες. Όλες αυτές οι επιθεωρήσεις έχουν σαν σκοπό την αξιολόγηση του ακτοπλόου. Μετά από κάθε επιθεώρηση ο νηογνώμονας είναι υπεύθυνος για την έκδοση κατάλληλου πιστοποιητικού, το οποίο βεβαιώνει την κατάσταση του πλοίου.

Μπορούμε να κατατάξουμε τις επιθεωρήσεις είτε με βάση την χρονική περίοδο που διενεργούνται είτε με βάση τον τεχνικό έλεγχο που γίνεται.

Υπάρχουν οι εξής επιθεωρήσεις:

- Επιθεώρηση του σκάφους, των μηχανών και του εξοπλισμού, κάθε έτος
- Επιθεώρηση στα ύφαλα του πλοίου,
- Λεπτομερειακή επιθεώρηση και έλεγχος του σκάφους, των μηχανών και του εξοπλισμού,
- Ανά δύο έτη επιθεώρηση του λέβητα
- Επιθεώρηση του έλικα και του αξονικού συστήματος του πλοίου.

Σε όλες τις παραπάνω επιθεωρήσεις προστίθενται και οι έκτακτες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε περίπτωση είτε ατυχήματος, είτε μετασκευής, είτε πώλησης είτε όταν βρίσκεται κάποιο πρόβλημα από τον ίδιο τον πλοιοκτήτη και μπορεί να επηρεάσει την κλάση του.

Οι επιθεωρήσεις διακρίνονται σε περιοδικές και έκτακτες επιθεωρήσεις. Οι περιοδικές ή τακτικές επιθεωρήσεις διακρίνονται σε:

Α. Επιθεώρηση Ανανέωσης Κλάσης / Ειδική Επιθεώρηση (*Class Renewal Survey / Special Survey*) η οποία πραγματοποιείται κάθε 5 χρόνια. Αφορά Κύτος και Μηχανές (*Hull & Machinery*) αλλά και τον εξοπλισμό του. Περιλαμβάνει Επιθεώρηση Πυθμένα (*Bottom/Docking Survey*), Επιθεώρηση Τελικού Άξονα (*Tail Shaft Survey*) και Επιθεώρηση Λέβητα (*Boiler Survey*).

Β. Ετήσια Επιθεώρηση (*Annual Survey*) η οποία πραγματοποιείται κάθε χρόνο με χρονικό περιθώριο 3 μήνες πριν ή 3 μήνες μετά την ημερομηνία της τελευταίας ετήσιας επιθεώρησης.

Γ. Ενδιάμεση Επιθεώρηση (*Intermediate Survey*) η οποία πραγματοποιείται κάθε 2,5 χρόνια με χρονικό περιθώριο 6 μήνες πριν ή 6 μήνες μετά την ημερομηνία της τελευταίας ενδιάμεσης επιθεώρησης. Γίνεται πιο ενδελεχής έλεγχος του σκάφους των μηχανών και του εξοπλισμού. Περιλαμβάνει Επιθεώρηση Πυθμένα (*Bottom/Docking Survey*).

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά θεσμοθετημένες επιθεωρήσεις όπως φαίνονται σε ένα *Survey Status* της Κλάσης¹:

- Load Line (LL) Renewal Survey Load Line Annual Survey
- Safety Construction (SC)
- Renewal Survey Safety Construction
- Intermediate Survey Safety Construction Annual Survey

7.1 Κυριότεροι Νηογνώμονες

Οι νηογνώμονες που αποτελούν μέλη της Διεθνούς Ένωσης Νηογνωμόνων και η φήμη τους είναι διεθνής είναι:

- American Bureau of Shipping (A.B.S). Ο Αμερικανικός Νηογνώμονας είναι μετεξέλιξη της Αμερικανικής Ένωσης Πλοιάρχων με ημερομηνία ίδρυσης το 1862. Βασικός σκοπός ήταν της ένωσης ήταν η επάρκεια των αξιωματικών – πληρώματος του πλοίου και όχι η κατάταξη των πλοίων. Σταδιακά και μετά τη δημοσίευση το 1867 του πρώτου καταλόγου με ταξινομημένα πλοία η δραστηριότητα άλλαξε και στράφηκε από το έμπυχο δυναμικό στο πλοίο και στην αξιοπλοΐα αυτού. Το 1898 έγινε η τελική μετατροπή σε Αμερικανικό Νηογνώμονα.
- Bureau Veritas (B.V.). Ο Γαλλικός νηογνώμονας. Ιδρύθηκε το 1828 από Βέλγους εφοπλιστές στην Αμβέρσα. Πρωταρχικός σκοπός ήταν η ενημέρωση των ασφαλιστών για τα πλοία. Σήμερα ο γαλλικός νηογνώμονας έχει παγκόσμια

¹

φήμη τόσο στην παροχή υπηρεσιών αξιολόγησης όσο και στην πιστοποίηση των πλοίων.

- China Classification Society (C.C.S). Ο Κινέζικος νηογνώμονας
- Det Norske VERITAS (D.N.V). Ο Νορβηγικός νηογνώμονας
- Germanischer Lloyd's (G.L.). Ο Γερμανικός νηογνώμονας
- Korean Register of Shipping (K.R.). Ο Κορεάτικος νηογνώμονας
- Lloyd's Register of Shipping (L.R.S.) Ο Αγγλικός νηογνώμονας. Ο Αγγλικός Νηογνώμονας είναι ο πρώτος που δημιουργήθηκε στην αρχή του 17^{ου} αιώνα. Σκοπός του ιδιοκτήτη Edward Lloyd ήταν μέσα από την παροχή πληροφοριών για τα πλοία να προσελκύσει πελάτες. Στη συνέχεια το 1764 έγινε δημοσίευση της πρώτης λίστας με πλοία. Σε αυτή τη λίστα υπήρχαν 15.000 πλοία.
- Nippon Kaijikyokai (N.K.K.). Ο Ιαπωνικός νηογνώμονας
- Registro Italiano Navale (R.I.N.A.). Ο Ιταλικός νηογνώμονας
- Russian Maritime Register of Shipping (R.S.) Ο Ρωσικός νηογνώμονας

Συμπεράσματα

Η γαλβανική διάβρωση και η διάβρωση κόπωσης αποτελούν καίρια ζητήματα στη ναυτιλία. Η πρώτη συνδέεται με επιλογή υλικών και ηλεκτρική επαφή ανόμοιων μετάλλων, ενώ η δεύτερη με την αλληλεπίδραση κυκλικών φορτίων και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση απαιτεί ολιστική στρατηγική: πρόληψη μέσω σχεδιασμού, ποιοτικές επιστρώσεις, καθοδική προστασία (ανόδοι ή ICCP) και συστηματική παρακολούθηση με NDT και μετρήσεις δυναμικού. Η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι η διάβρωση είναι διεπιστημονικό πρόβλημα. Οι μηχανισμοί ηλεκτροχημείας μεταφράζονται σε απώλεια υλικού, ενώ οι μηχανικές ατέλειες και οι συγκεντρώσεις τάσεων μετατρέπουν την εντοπισμένη διάβρωση σε κίνδυνο κόπωσης. Η τεχνική επάρκεια προκύπτει από τη σύνδεση θεωρίας και πρακτικής: σωστή επιλογή υλικών, έλεγχος λεπτομερειών συγκόλλησης, και οργανωμένη συντήρηση βασισμένη σε δεδομένα.

Βιβλιογραφία

- Αντώνιος Κ. Τασιόπουλος. *Thesis*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/41573/Thesis.pdf>.
- MR Marine Group. *What Is Marine Biofouling?* MR Marine Group, <https://mr-marinegroup.com/what-is-marine-biofouling/>.
- Wikipedia. *Risk-Based Inspection – Objectives*. Wikimedia Foundation, https://en.wikipedia.org/wiki/Risk-based_inspection#Objectives.
- TWI Global. *What Is Risk-Based Inspection (RBI)?* TWI Ltd, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-risk-based-inspection-rbi>.
- Marine Inspection Services. *Visual Inspection*. Marine Inspection Services Ltd, <https://www.marineinspectionservices.co.uk/visual-inspection>.
- UL Prospector. *Smart Coatings*. UL Solutions, <https://www.ulprospector.com/knowledge/3657/pc-smart-coatings/>.
- Ολυμπία Μπουραντά. *Ανάπτυξη Ψηφιακών Διδύμων στη Ναυτιλία*. Πανεπιστήμιο Πειραιώς, <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/18550>
- Dreiyim Engineering. *Πώς η καθοδική προστασία αποτρέπει τη διάβρωση*. Dreiyim Engineering, <https://www.dreiyim.com/el/2021/04/16>.
- Υπουργείο Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής. *Τεχνικές απαιτήσεις πλοίων*. Ελληνική Δημοκρατία, https://www.ynanp.gr/media/documents/document_i4gHcbm.pdf.
- YZ Pipes. *Non-Destructive Testing (UT, RT, MT, PT, ET)*. YZ Pipes, <https://gr.yzpipes.com/info/nondestructive-testing-of-ut-rt-mt-pt-et-75565999.html>.
- Δρακάκης, Μιχαήλ. *Επιθεωρήσεις Πλοίων βάσει Ανάλυσης Ρίσκου με Χρήση Δυναμικών Δικτύων Πιστέως*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- CORE. *Corrosion and Inspection Systems*. CORE Repository, <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/81560589.pdf>.
- Καρκατσούλης, Α. *Corrosion*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021, <http://users.ntua.gr/antkar/notes/Corrosion-2021-v2.pdf>.
- CORE. *Risk-Based Inspection Methodologies*. CORE Repository, <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/81560698.pdf>.
- ScienceDirect. *Risk-Based Inspection Applications in Marine Structures*. Elsevier, <https://pdf.sciencedirectassets.com/1-s2.0-S0263224124011473>.
- Crooker, T. W., R. W. Judy, Jr., και R. J. Goode. *Fundamental Considerations of Fatigue, Stress-Corrosion Cracking and Fracture in Advanced Ship Structures*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1975. Παρουσίαση στο **Ship Structure Symposium**, Washington, D.C., 6–8 Οκτωβρίου 1975.
- Surojo, E., J. Anindito, F. Paundra, A. R. Prabowo, E. P. Budiana, N. Muhayat, M. Badaruddin, και Triyono. *Effect of Water Flow and Depth on Fatigue Crack Growth Rate of Underwater*

Wet Welded Low Carbon Steel SS400. **Open Engineering**, vol. 11, 2021, σσ. 329–338. De Gruyter, <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0036>

Tsinopoulos, Stephanos, και Dimitrios Kalovelonis. *Corrosion of W/Ts*. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου· Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, εκπαιδευτική παρουσίαση (Workshop: **Design and Maintenance of Wind Turbines**)

Vaccari, Leandro, Thomas Scheithauer, Ivan Lendiel, Jan Klett, Thomas Hassel, και Hans Jürgen Maier. *Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel and Nickel-Based Welded Joints in Underwater Wet Welding*. **npj Materials Degradation**, τόμ. 8, 2024, άρθρο 51. Springer Nature, <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00471-9>

Vijay, Abhiram, και N. Radhika. *A Comprehensive Review on Underwater Welding: Methods, Property Evaluations and Challenges*. **Advances in Materials and Processing Technologies**, τόμ. 10, αρ. 2, 2024, σσ. 923–959. Taylor & Francis, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2184582>

Ξηραδάκης, Μιχαήλ. *Ελληνικός Νηογνώμονας, SWOT Analysis και αναγκαία μελλοντική στρατηγική*. Διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ναυτιλία, Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2018

Αναστολείς Διάβρωσης, M. Finšgarand and I. Milošev "Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review" *Corrosion Science* 2010, Volume 52, Pages 2737-2749 [doi:10.1016/j.corsci.2010.05.002](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.002)