

# Υποβρύχιες Συγκολλήσεις Γαλβανική Διάβρωση και Διάβρωση Κόπωσης στα Πλοία

---

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



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**  
University of the Peloponnese



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**



**“Ουσιαστικό μέσο για την επισκευή και συντήρηση θαλάσσιων κατασκευών”**

Ταξινομείται:

- Υποβρύχια υγρή συγκόλληση UWW
- Υποβρύχια ξηρή συγκόλληση UDW

Παράγοντες που επιδρούν στην υποβρύχια συγκόλληση:

- Αύξηση βάθους: Μεταβολή ταχύτητας ψύξης τηγμένου μετάλλου με συνέπεια την ανομοιογένεια στο μέταλλο



- Δημιουργία πορώδους:
  - a) Αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης
  - b) Μειώνεται με την αύξηση του καθοδικού ρεύματος
  - c) Μειώνεται με τόσο μικρότερης διαμέτρου και υψηλότερη ταχύτητα συγκόλλησης.

Επαφή τόξου με νερό: ιονισμός και μέσω ανασυνδυασμού  $O_2$  και  $H_2$  προκαλείται διάβρωση.

Διάβρωση: το μέταλλο υποβαθμίζεται χημικά και ηλεκτροχημικά και μετατρέπεται σε πιο σταθερές ενώσεις



**Διάβρωση:** η διεργασία κατά την οποία ένα μέταλλο, υποβαθμίζεται χημικά ή/και ηλεκτροχημικά και τείνει να μετατραπεί σε πιο σταθερές ενώσεις.

**Χαρακτηριστικά:** Φυσικό φαινόμενο, αργά εξελισσόμενο

**Αποτελεί σύνθετο τεχνικό πρόβλημα για τη ναυτιλία:**

- Υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων (θαλασσινό νερό)
- Αλατούχα σταγονίδια και υγρασία (αγώγιμα υμένια στις επιφάνειες)
- Δυναμικά φορτία και κόπωση (κραδασμοί λόγω κυματισμών)

**Οικονομικό αποτύπωμα της διάβρωσης (άμεσο και έμμεσο)**

- Περιοδική βαφή
- Αντικατάσταση ανόδων
- Επισκευές στις δεξαμενές έρματος
- Αποκατάσταση σωληνώσεων και επιθεωρήσεις.
- Είδος επιστρώσεων (coatings)
- Εγκατάσταση ICCP (Impressed Current Cathodic Protection)
- Ποιότητα συγκόλλησης
- Οργάνωση επιθεωρήσεων/ διαθεσιμότητα του πλοίου

**Ασφάλεια**

- Τοπικές ατέλειες (pits) → αύξηση συγκέντρωσης τάσεων
- Ρωγμές → διαρροές ή δομική αστοχία



**Είδη Διάβρωσης που θα αναλυθούν:**

- Γαλβανική
- Κόπωσης

# Βασικές Έννοιες και Μηχανισμός Διάβρωσης



Ταξινόμηση με βάση:

## Μορφολογία

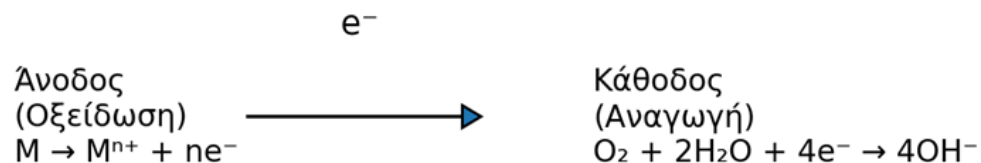
- Γενικευμένη
- Βελονισμών (Pitting)
- Εισχώρησης Υδρογόνου (Hydrogen Induced)
- Κόπωσης (Fatigue)
- Γαλβανική (Galvanic)

## Μηχανισμός και είδος διαβρωτικού περιβάλλοντος

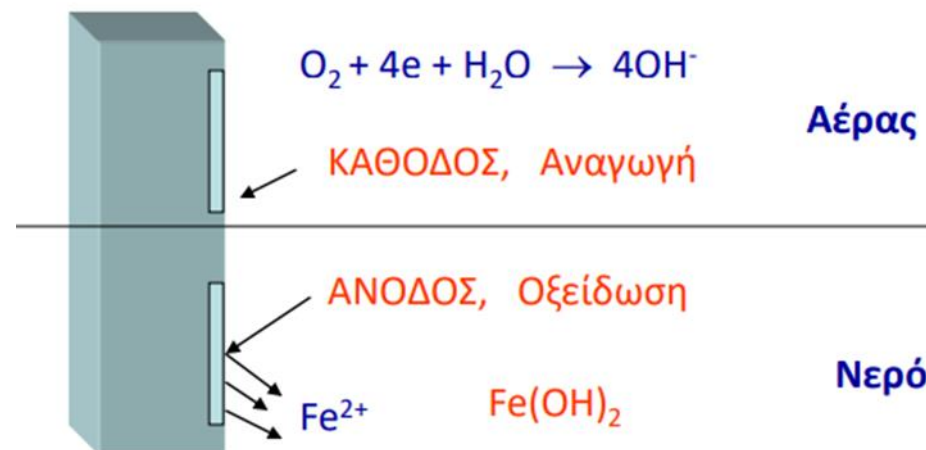
- ηλεκτροχημική
- χημική διάβρωση

## Μετανάστευση Ιόντων

- Ελεγχόμενη από κατιόντα
- Ελεγχόμενη από ανιόντα



Ηλεκτρολύτης (θαλασσινό νερό)



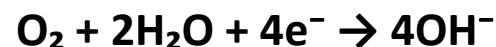
## Ηλεκτροχημική διάβρωση

Περιλαμβάνει: άνοδο (οξείδωση), κάθοδο (αναγωγή), ηλεκτρική σύνδεση (ροή ηλεκτρονίων) και ηλεκτρολύτης (ροή ιόντων).

Τυπική ανοδική αντίδραση για χάλυβα (stainless steel):



Συνηθισμένη καθοδική αντίδραση (αναγωγή οξυγόνου):



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



## Θερμοδυναμική προσέγγιση

Τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα αποβάλλοντας ενέργεια ( $2^{\text{ος}} \Theta.N$ ) = τάση προς οξείδωση

Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις:  $\Delta G = -n FE$

Ορισμένα κράματα (ανοξείδωτοι χάλυβες/ τιτάνιο) σχηματίζουν παθητικά υμένα οξειδίων

## Κινητική προσέγγιση

Παράγοντες διεξαγωγής της αντίδρασης:

- Ρυθμός αντίδρασης: πολύ αργός (αδύνατη αντίδραση)
- Ενέργεια Ενεργοποίησης
- Μεταφορά μάζας οξυγόνου
- Ωμική αντίσταση νερού (καταλυτικοί παράγοντες)

## Μηχανισμοί:

Μηχανισμός κατά Wagner: διάχυση ιόντων του μετάλλου σε στερεή κατάσταση

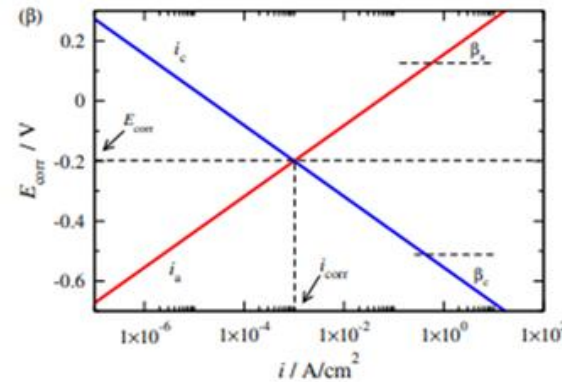
Μηχανισμός χημικής διάλυσης

Μηχανισμός διάχυσης ιόντων στην εγκοπή κατά μήκος του ενεργού δρόμου (περιπτώσεις ψαθυρής θραύσης από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση)

Μηχανισμός εξάχνωσης μόνο για τη σπηλαιώδη μηχανική διάβρωση



Καμπύλες πόλωσης: Εργαλείο ερμηνείας σημείου ισορροπίας μεταξύ ανοδικής και καθοδικής διεργασίας.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Evans που αντιστοιχεί στα διαγράμματα ρεύματος - δυναμικού του Σχ. 4.1.

Ο συνολικός ρυθμός της αντίδρασης διάβρωσης: το άθροισμα των ανοδικών και καθοδικών ρυθμών:

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

# Ζώνες Έκθεσης στο πλοίο και κυρίαρχοι μηχανισμοί



## Βυθισμένη ζώνη (fully immersed):

Η θερμοκρασία και η ροή καθορίζουν την παροχή οξυγόνου.

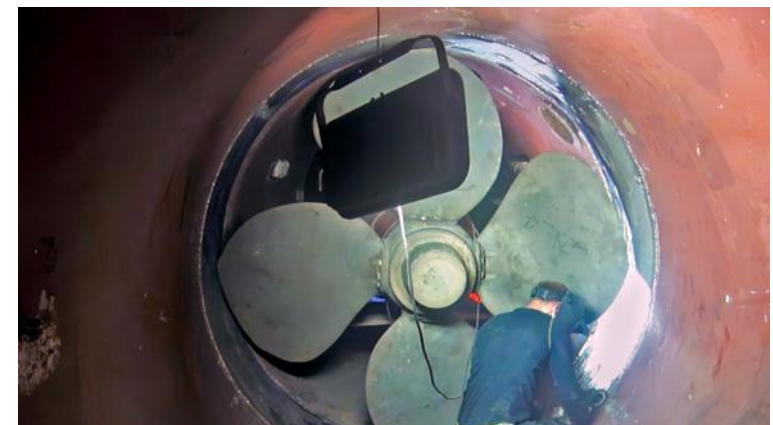
## Ζώνη παλίρροιας ή ίσαλος γραμμή (tidal zone):

Επαναλαμβανόμενη διαβροχή–ξήρανση και η υψηλή οξυγόνωση οδηγούν σε επιτάχυνση.

## 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).



# Γαλβανική Διάβρωση



**Γαλβανική διάβρωση:** Δύο ανόμοια μέταλλα σε επαφή παρουσία ηλεκτρολύτη (π.χ. νερό, υγρασία): δημιουργία γαλβανικού στοιχείου

Δραστικότερο μέταλλο = άνοδος, διαβρώνεται ταχύτερα

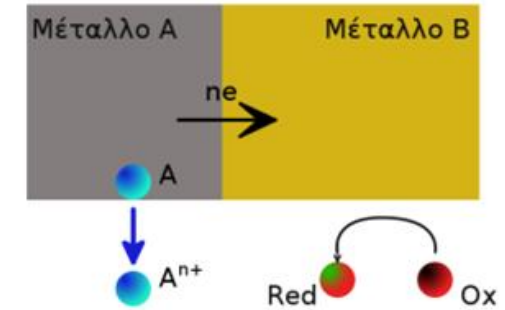
Πιο αδρανές μέταλλο = κάθοδος, προστατεύεται

Έτσι έχουμε απώλεια υλικού από το ένα μέταλλο και δημιουργία οξειδίων

Η κινητήρια δύναμη εκφράζεται ως διαφορά δυναμικού:

$$\Delta E = E_{\text{καθόδου}} - E_{\text{ανόδου}}$$

Γαλβανική Σειρά- Παθητικότητα: Κατατάσσει τα υλικά με βάση το δυναμικό τους στο θαλασσινό νερό.



Σχήμα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση της γαλβανικής διάβρωσης δύο μετάλλων A και B, όπου το A διαβρώνεται ενώ το δεύτερο προστατεύεται. Το μέταλλο A δρα ως άνοδος ενώ το μέταλλο B ως κάθοδος.

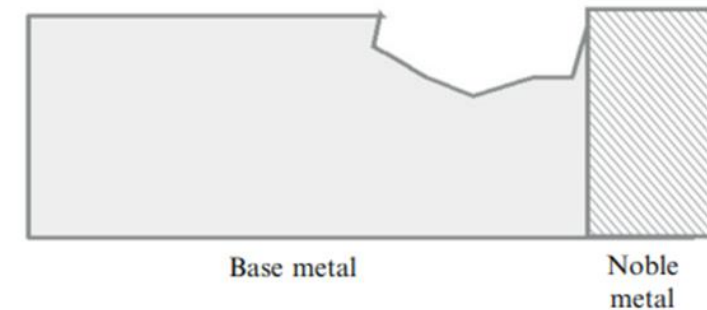


Figure 15.9 Schematic representation of galvanic corrosion.

# Γαλβανική Διάβρωση (συνέχεια)



## Ένταση γαλβανικής διάβρωσης:

(α) Λόγος επιφανειών: Ακαθόδου  $\gg$  Αανόδου, η άνοδος «φορτώνεται» με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος και διαβρώνεται έντονα.

(β) Απόσταση και γεωμετρία: Το ρεύμα δε διαρρέει εύκολα γύρω από γωνίες

(γ) Ροή και οξυγόνωση: Σε περιοχές υψηλής ροής, η καθοδική αντίδραση ενισχύεται

(δ) Κατάσταση επιφάνειας και επιστρώσεις: Το λιγότερο ευγενές μέταλλο έχει βλάβη στη βαφή, η διάβρωση συγκεντρώνεται στο γυμνό τμήμα.

(ε) Πόλωση ή βαθμός διαφοράς δυναμικού: Μετατόπιση του δυναμικού του πιο δραστικού μετάλλου στην κατεύθυνση της καθόδου, ο ρυθμός της γαλβανικής διάβρωσης μειώνεται.

(στ) Διαβρωτικότητα των περιβαλλόντων μέσων/ ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη: Εάν αυτή είναι χαμηλή, η διάβρωση είναι σχεδόν αμελητέα

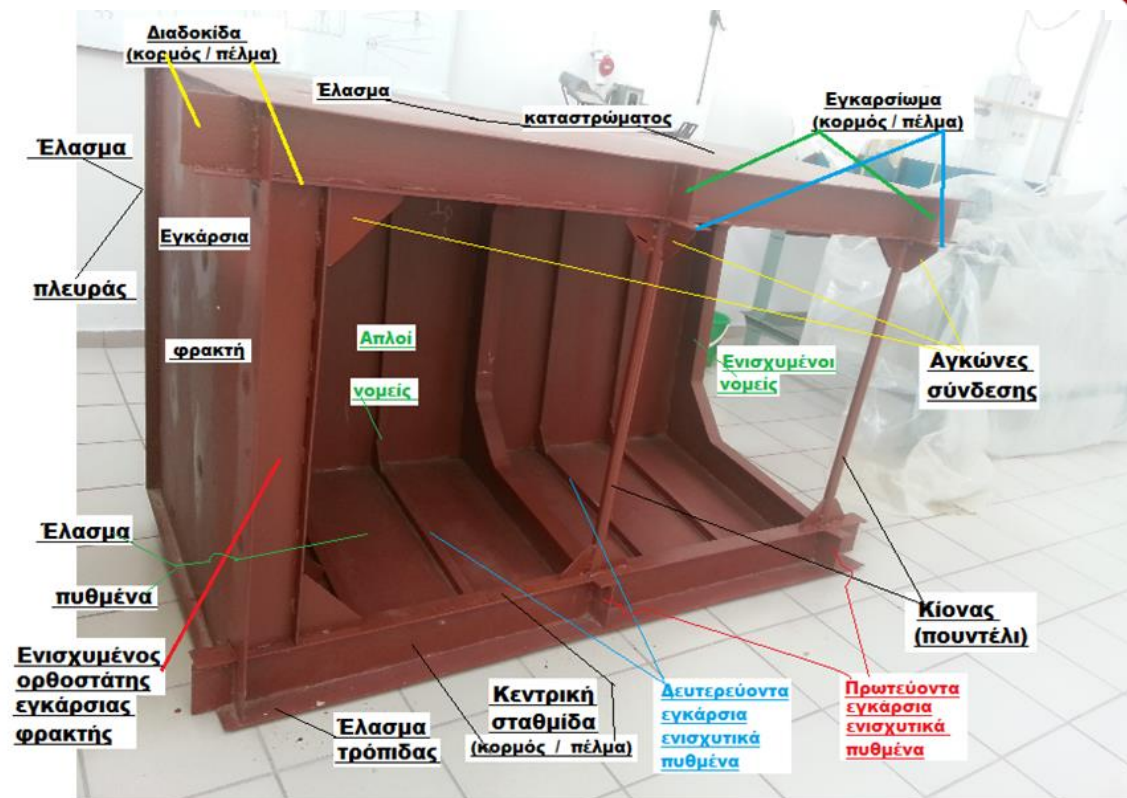


# Εφαρμογές σε πλοία και πρακτικά παραδείγματα



## Σημεία του πλοίου επιρρεπή στη Διάβρωση:

- 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.

# Θαλάσσιες Επικαθήσεις (biofouling)



## Θαλάσσια βιορύπανση:

Συσώρευση υδρόβιων οργανισμών (μικροοργανισμοί, φυτά, ζώα) σε επιφάνειες και κατασκευές που βυθίζονται ή εκτίθενται στο υδάτινο περιβάλλον.

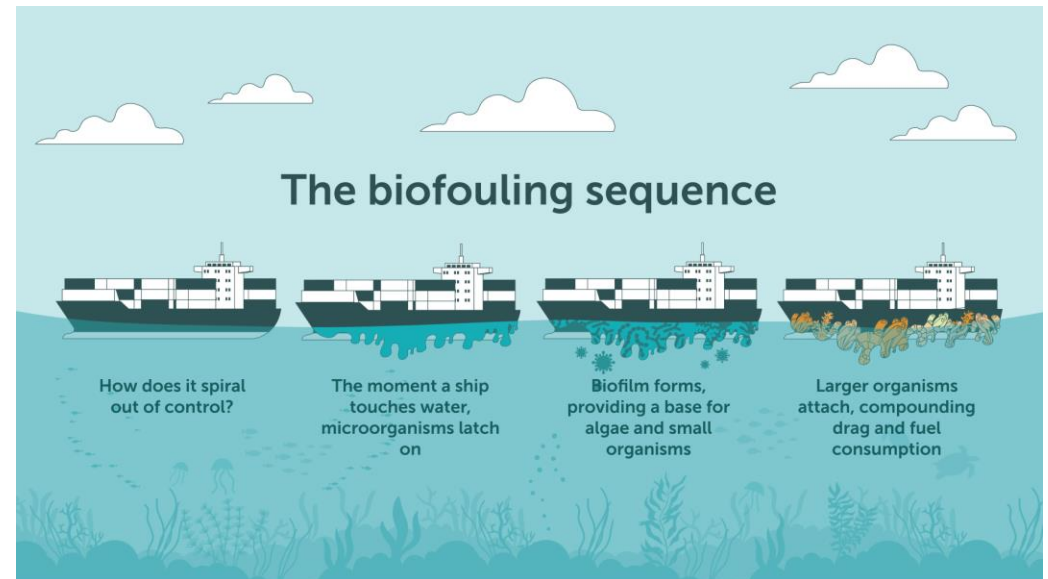
Αυτό οδηγεί σε προσκόλληση βακτηρίων και τελικά δημιουργείται βιοφίλμ, φύκια, πεταλίδες και μαλάκια.

## Η διαδικασία βιορύπανσης:

- Πρωτογενής (μικρορύπανση)
- Δευτερογενής (μακρορύπανση)

## Απαιτείται:

- Μηχανικός καθαρισμός (βούρτσισμα ή ξύσιμο)
- Χρήση αντιρρυπαντικών επιστρώσεων



# Διάβρωση Κόπωσης



## Κόπωση:

Αστοχία ενός μετάλλου λόγω ρωγμάτωσης όταν υφίσταται κυκλική καταπόνηση.

- Εναλλασσόμενη κάμψη (hogging/sagging) λόγω κύματος
- Στρεπτικές καταπονήσεις
- Τοπικές δυναμικές επιδράσεις από την πρόωση

Κράματα υψηλής αντοχής δεν προσφέρουν ανώτερη αντοχή στην ανάπτυξη ρωγμών λόγω κόπωσης, τείνουν να υπερκατασκευάζονται και τελικά να αστοχούν

## Μαθηματική προσέγγιση:

Η Καμπύλη S – N (καμπύλη Wöhler) παριστάνει τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για θραύση συναρτήσει δεδομένης τιμής τάσης.

Μορφή Basquin:

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



## Πως η διάβρωση επιδεινώνει την κόπωση:

- Δημιουργεί pits που αυξάνουν τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης.
- Υποβαθμίζει την επιφάνεια και αυξάνει την τραχύτητα, άρα μειώνει τη «φάση έναρξης» ρωγμής.
- Στο άκρο ρωγμής, το διαβρωτικό περιβάλλον μπορεί να επιταχύνει τη διάδοση

# Θραυστομηχανική Προσέγγιση της Διάβρωσης Κόπωσης



- Οι διάφορες συνιστώσες της φόρτισης συνδυάζονται με διαφορετικές γωνίες φάσης για διαφορετικά μέρη της κατασκευής του πλοίου.
- Paris και Erdogan: Διάδοσης ρωγμής με μέτρηση της ταχύτητάς της. Πρότειναν τη σχέση:

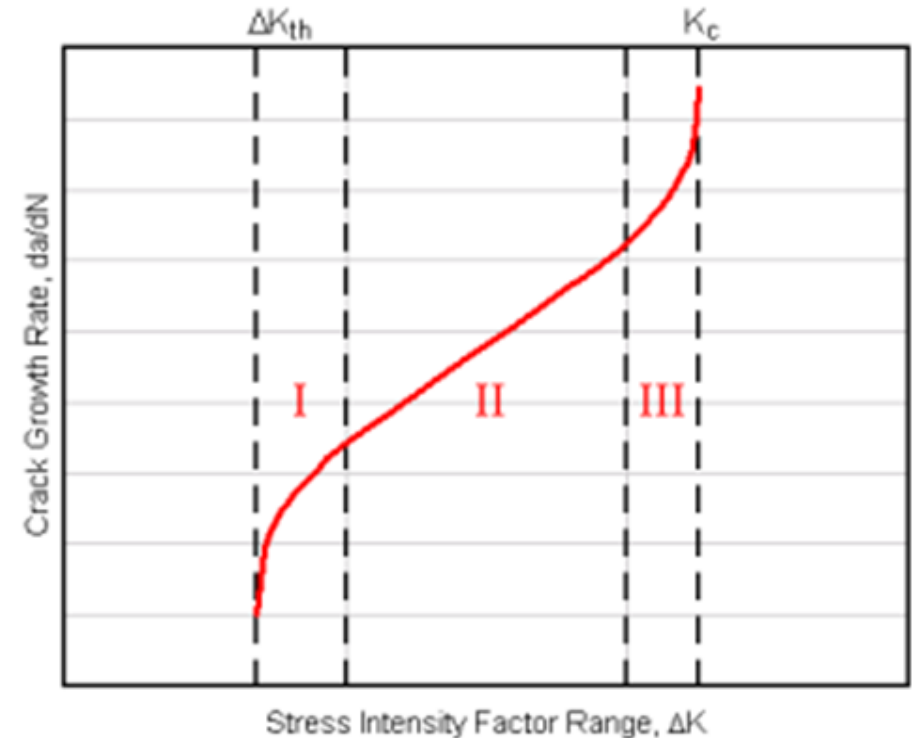
$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

Σε θαλασσινό περιβάλλον, οι καμπύλες S–N μετατοπίζονται προς χαμηλότερες τάσεις, γεγονός που σημαίνει ότι ακόμη και χαμηλές τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία για πολύ μεγάλους αριθμούς κύκλων.

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

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



# Κρίσιμες λεπτομέρειες Πλοίων και παραδείγματα

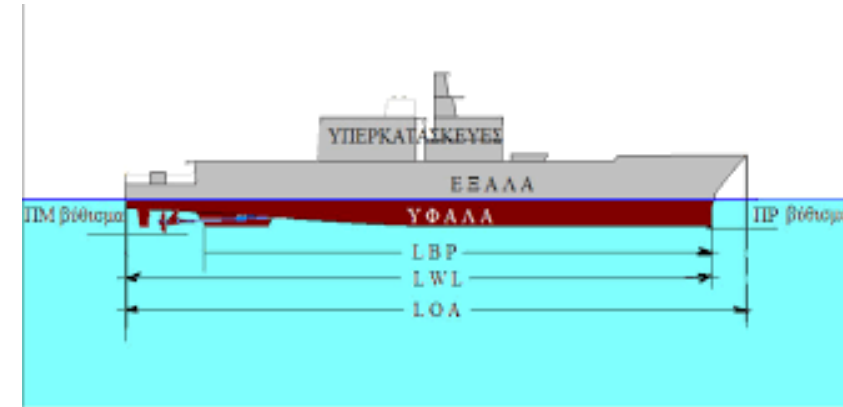


## Διάβρωση του Πλευρικού Ελάσματος της Γάστρας Φορτηγού Πλοίου

Υπόκειται σε τρία (3) διαφορετικά επιθετικά περιβάλλοντα, τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τη διάβρωση του.

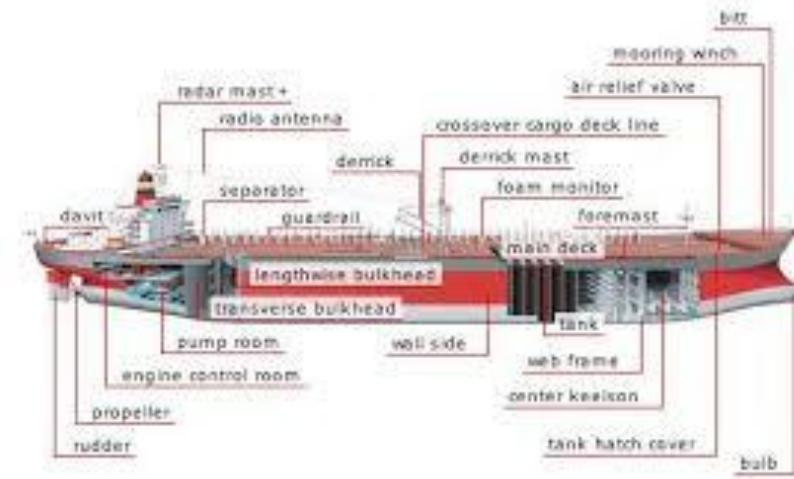
### Άνω Τμήμα

- Υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων και οξυγόνου
- Πρόσπτωση νέφωσης θαλασσίου ύδατος (κίνηση του πλοίου)
- Υψηλή σχετική υγρασία
- Άλατα (αλατονέφωση εκ του ανέμου)
- Μεταβολές στην σχετική υγρασία του αέρα: εξάτμιση ή συμπύκνωση του νερού.
- Αέρια που περιέχονται στον αέρα: (CO<sub>2</sub>), υδρόθειο (H<sub>2</sub>S), διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) ή τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>). Ενεργοποίηση λεπτού στρώματος ηλεκτρολύτη οδηγεί σε επιτάχυνση ρυθμού διάβρωσης
- Θερμοκρασία



### Κάτω Τμήμα (Πλήρως βυθισμένο τμήμα στο θαλασσινό νερό)

- Αλατότητα
- Θερμοκρασία
- Περιεκτικότητα σε οξυγόνο
- pH και η χημική σύσταση ποικίλλουν ανάλογα με τη θέση και το βάθος του νερού.
- Ροή νερού: επιτάχυνση ρυθμού διάβρωσης

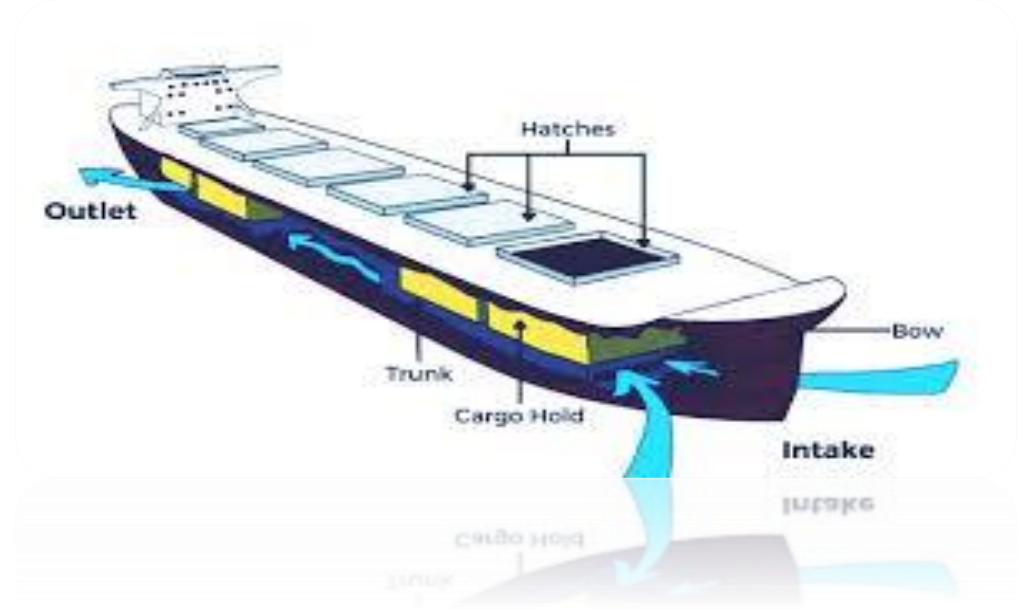


# Κρίσιμες λεπτομέρειες Πλοίων και παραδείγματα (συνέχεια)



**Τμήμα Ισάλου** (ανάμεσα στο βυθισμένο και το ατμοσφαιρικό τμήμα του πλευρικού ελάσματος του πλοίου)

- Υψηλός αερισμός λόγω τύρβης της θάλασσας περί της γάστρας του πλοίου: αύξηση περιεκτικότητας οξυγόνου
- Φαινόμενα φθοράς λόγω κίνησης της θαλάσσιας επιφάνειας γύρω από το πλευρικό έλασμα
- Εναλλαγές υγρών και ξηρών κύκλων: περιοχή υψηλής διάβρωσης
- Έκταση μέγιστης διάβρωσης: κατάσταση της θάλασσας και ατμοσφαιρική θερμοκρασία



## **Διάβρωση Ελασμάτων Καταστρώματος**

- «Πράσινη θάλασσα» (η επικάλυψη από θαλάσσιο νερό σε καταστάσεις έντονων κυματισμών)
- Νερό βροχής
- Συσώρευση υδάτων κατά τη λειτουργία του πλοίου, σε συνδυασμό με την υψηλή υγρασία και την επιθετική θαλάσσια ατμόσφαιρα.

## **Δεξαμενές Έρματος**

- Υγρές/στεγνές φάσεις κατά τις συνθήκες φορτοεκφόρτωσης
- Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

# Επιρρεπή σημεία του πλοίου στη διάβρωση κόπωσης



## Έναρξη κόπωσης:

Τοπικό φαινόμενο που εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατασκευής και τη συγκέντρωση τάσεων.

## Σε συγκολλητές κατασκευές (πλοία):

Έναρξη σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων (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 επιστροφών.
7. Περιοχές κοντά σε μηχανές και άξονες, όπου υπάρχουν κραδασμοί και δυναμικά φορτία.

# Διαγνωστικές Μέθοδοι και παρακολούθηση Διάβρωσης



## Επιθεωρήσεις και τεκμηρίωση:

- Γενική Οπτική Επιθεώρηση (General Visual Inspection - GVI): Ανίχνευση ορατών ελαττωμάτων στην επιφάνεια (σκουριά, διάβρωση, ξεφλουδισμένο χρώμα ή βιολογική ρύπανση (biofouling))
- Λεπτομερής/Στενή Οπτική Επιθεώρηση (Close Visual Inspection - CVI): Ενδελεχής εξέταση
- Ρομπότ ως Οχήματα Απομακρυσμένης Επιθεώρησης (RIV)
- Τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROV) τύπος ρομπότ: Ναυτιλιακή βιομηχανία για υποβρύχιες έρευνες και επιθεωρήσεις
- Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV): εσωτερικές και εξωτερικές επιθεωρήσεις πλοίων

## Μετρήσεις πάχους (UT) και αξιολόγηση υπολειπόμενης αντοχής

### Υπερηχητικός έλεγχος (ultrasonic) πάχους:

Τυπική τεχνική για κύτος, δεξαμενές και σωληνώσεις.

Τα δεδομένα πάχους συνδυάζονται με απαιτήσεις κανονισμών και με υπολογισμούς αντοχής για να κριθεί αν απαιτείται επισκευή/ενίσχυση.

- Υπερβολική φθορά σε κάποιο έλασμα ή ενισχυτικό: Πρόσθετες μετρήσεις για καθορισμό πλήρους έκτασης της φθοράς
- Διατήρηση απαιτούμενης διαμέτρου αντοχής του πλοίου: Προσδιορισμός μέγιστων επιτρεπόμενων αποκλίσεων των ελασμάτων του πυθμένα και των πλευρών ('1422 ΒΝΓ/67/Ι3-4-98 ΥΕΝ/ΔΕΕΠ/Β&Γ-Ν/Γ)





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

Συμπληρωματικές μέθοδοι NDT για την αξιολόγηση της ακεραιότητας του υλικού, όπως:

- Υπερηχογραφία (Ultrasonic Testing): Μέτρηση πάχους του μετάλλου (π.χ., λέπτυνση λόγω διάβρωσης) ή εντοπισμός εσωτερικών ελαττωμάτων
- Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particle Inspection): Ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών σε σιδηρομαγνητικά υλικά
- Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Penetrant Testing): Εντοπισμός πολύ μικρών ρωγμών στην επιφάνεια
- UT (Δοκιμή υπερήχων): Υπερηχητικά κύματα χτυπούν το ελάττωμα και στη συνέχεια αντανακλούν ενέργεια
- RT (ακτινολογικός έλεγχος): Η δύναμη της διεισδυτικής του ικανότητας σχετίζεται με το μήκος κύματος των ακτίνων X και την πυκνότητα και το πάχος της διεισδυμένης ύλης.
- MT (Δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων): Ανίχνευση μόνο στην επιφάνεια σιδηρομαγνητικών υλικών ή ελαττώματα κοντά στην επιφάνεια.
- PT (Δοκιμή διεισδυτικού υλικού): Έλεγχος ύπαρξης επικαλυμμένης βαφής που διεισδύει στην επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας
- ET (Eddy Current Testing): Τοποθέτηση πηνίου με εναλλασσόμενο ρεύμα στη μεταλλική πλάκα ή σωλήνα.

# Μετρήσεις Δυναμικού και Καθοδική Προστασία

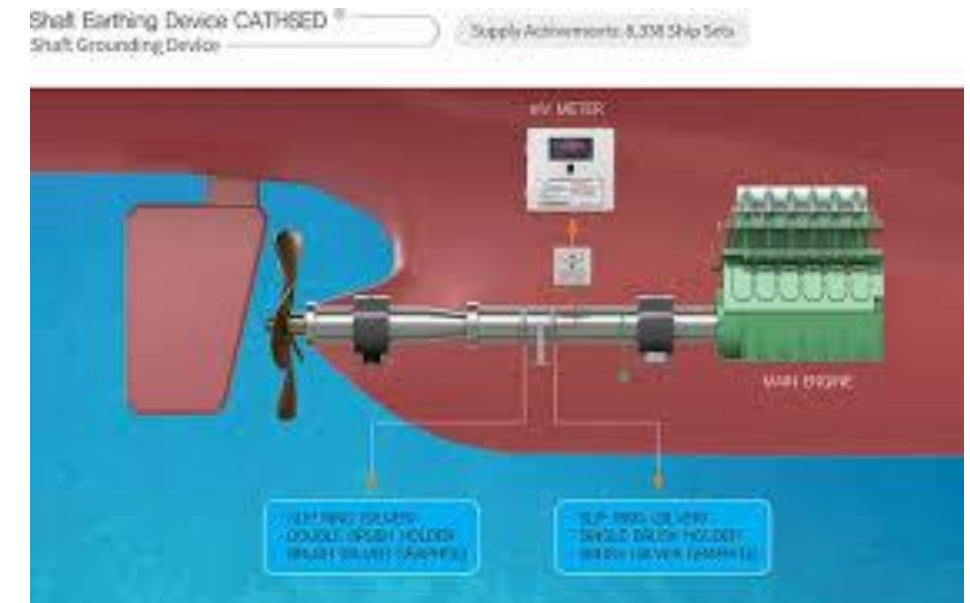


## Μετρήσεις Δυναμικού:

- Κριτήριο επαρκούς προστασίας:  $E \leq -0.85 \text{ V (Ag/AgCl)}$
- Ανεπαρκής πόλωση: Κίνδυνος διάβρωσης
- Υπερπόλωση: Αποκόλληση επιστρώσεων ή ζητήματα σε ευαίσθητα υλικά

## SHM (structural Health Monitoring), αισθητήρες και προγνωστική συντήρηση

- Χρήση αισθητήρων (strain, accelerometers, corrosion probes) για συλλογή δεδομένων λειτουργίας
- Προγνωστικά μοντέλα για κόπωση και διάβρωση
- Risk-based inspection
- Monitoring (δυνατότητα λήψης καλύτερων αποφάσεων συντήρησης με βάση πραγματικές συνθήκες)





## Σχεδιαστικές Κατευθύνσεις για Μείωση Γαλβανικής Διάβρωσης

### 1. Επιλογή Υλικών

- Επιλογή υλικών με μικρή διαφορά στη γαλβανική σειρά
- Αποφυγή μικρής ανόδου σε μεγάλη κάθοδο

### 2. Μόνωση

- Χρήση μονωτικών παρεμβολών: μονωτικά υλικά (π.χ. πλαστικά, κεραμικά)

### 3. Γεωμετρικός Σχεδιασμός

- Σωστός σχεδιασμός ώστε να αποφεύγεται εγκλωβισμός ηλεκτρολύτη: επαρκή αποστράγγιση.
- Αποφυγή γεωμετρικών μακροσκοπικών και μικροσκοπικών ατελειών (αταξίες δομής): Αποφυγή αιχμηρών γωνιών, Αποφυγή τριεπιφανειών: Σημεία όπου τρία διαφορετικά υλικά συναντώνται= σημεία έναρξης διάβρωσης.
- Παροχή εύκολης απορροής και αποστραγγίσεως

### 4. Προστασία

- Ομοιογένεια προστασίας με επιστρώσεις
- Υπο-σχεδίαση (πολύ επικίνδυνο)/ Υπερ-σχεδίαση (ασύμφορο)





## 5. Άλλοι Παράγοντες

- Αποφυγή επαφής ανόμοιων μετάλλων ή κραμάτων: Αποτροπή γαλβανικής διάβρωσης (μπρούντζινες έλικες, προπέλες)
- Αποφυγή ετερογένειας τόσο επιφανειακής όσο και κατανομής θερμότητας και τάσεων
- Αποφυγή ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων καθώς και εσωτερικών μηχανικών τάσεων
- Αποφυγή περιπατητικών ρευμάτων (stray currents)
- Φαινόμενο της διόγκωσης (crevice corrosion)
- Ευκολία επιθεώρησης των στοιχείων της κατασκευής και προσβασιμότητα με στόχο τη συντήρηση
- Τήρηση προβλεπόμενων προδιαγραφών και κανονισμών
- Τήρηση συγκεκριμένων διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης όπως προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας



## 6. Παράγοντες Περιβάλλοντος

- Μεταβλητές ταχύτητες θαλάσσιου περιβάλλοντος:
- Αυξανόμενη έκθεση γυμνού χάλυβα ως αποτέλεσμα ζημιάς των επιστρωμάτων

## 7. Ηλεκτροχημική Προστασία

- Ηλεκτρόδια αναφοράς λαμβάνουν μετρήσεις μόνο πλησίον αυτών
- Τοποθέτηση ηλεκτροδίων και ανόδων σε λάθος θέσεις



Επιστρώσεις (coatings) και προετοιμασία επιφάνειας:

Φυσικά εμπόδια μεταξύ του μετάλλου και του διαβρωτικού περιβάλλοντος

Διαχωρίζονται σε:

- 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 διαλύτη: Φορέας ρητίνης και χρώματος που προσκολλώνται στη μεταλλική επιφάνεια
- Ρόλος ρητίνης: Αντιδιαβρωτικές ικανότητες επικάλυψης
- Ρόλος χρώματος: Μείωση πορώδους του υλικού και διακοσμητικοί λόγοι. Προστασία από UV ακτινοβολία. Η επικάλυψη είναι συνήθως ένα σύνθετο πολυστρωματικό σύστημα:
- Primer (αρχικό στρώμα): Δυνατότητα προσκόλλησης των επόμενων στρωμάτων και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες
- Επόμενα στρώματα: Προσφέρουν χρώμα ή προστασία από UV και χημικά του περιβάλλοντος

## Κατηγορίες των οργανικών επικαλύψεων σύμφωνα με τη ρητίνη είναι οι εξής:

1. Αλκυδικές ρητίνες
2. Τροποποιημένες αλκυδικές ρητίνες
3. Εποξυ-εστέρες
4. Βινύλια (86% PVC και 14% PVA)
5. Χλωριωμένα ελαστικά
6. Ακρυλικές ρητίνες



7. Φαινολικές ρητίνες

8. Πολυουρεθάνες

9. Εποξικά

10. Επιστρώματα με ψευδάργυρο:

(α) Ψευδαργυρικά χρώματα: Περιέχουν 20%  $ZnO_2$ .

(β) Επιστρώματα πλούσια σε Zn



## Μεταλλικές επικαλύψεις:

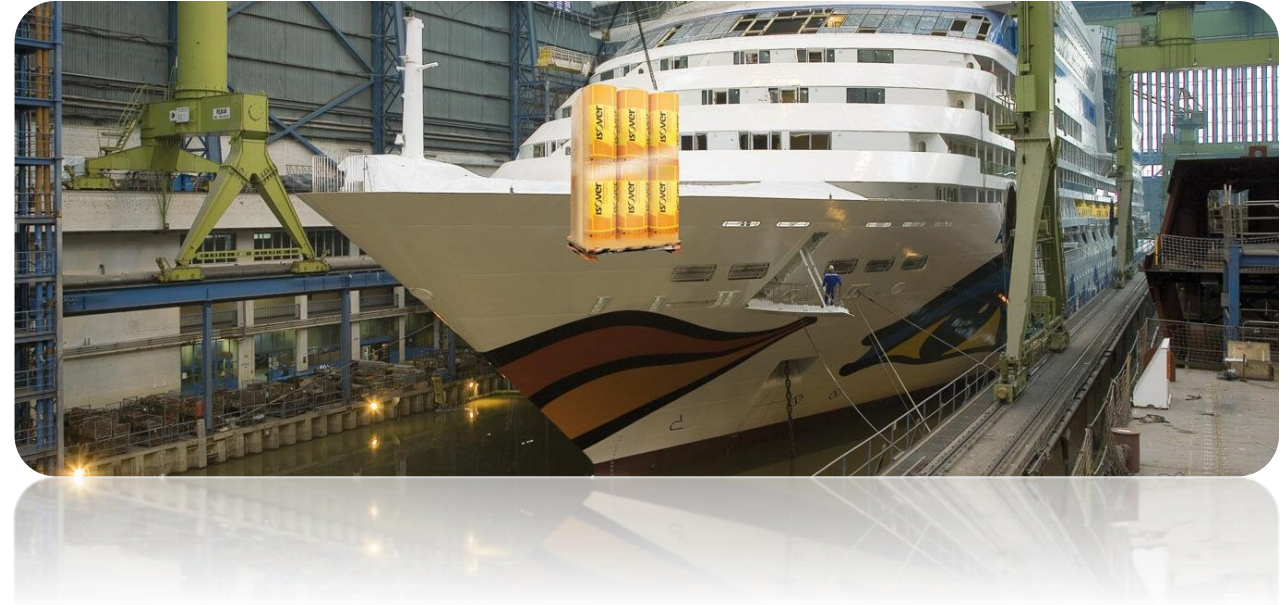
Αποτελούνται από μη σιδηρούχα μέταλλα (ψευδάργυρο, αλουμίνιο και τα κράματά του). Τα μη σιδηρούχα μέταλλα είναι πιο ηλεκτροαρνητικά από τον ανθρακούχο χάλυβα.

## Προετοιμασία επιφάνειας:

Καθαρισμός με διαλυτικά, με το χέρι ή μηχανικά.

## Καταστροφή της επικάλυψης:

- Καθοδική αποδέσμευση: Λόγω της αντίδρασης  $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$  (σαπωνοποίηση του πολυμερούς)
- Ανασήκωση λόγω οξειδίου: Συσσώρευση των προϊόντων της οξείδωσης, συνήθως σε μεταβλητές συνθήκες υγρασίας/ξηρασίας





## Απολίπανση (Degreasing):

Απομάκρυνση ελαίων και λιπών μέσω αποξέσεως

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

Καλαμίνη (millscale): Στρώμα οξειδίων που σχηματίζεται κατόπιν αντίδρασης του θερμού χάλυβα με το οξυγόνο, κατά τη διάρκεια της παραγωγής θερμικά ανοπτημένων χαλύβων (annealed steels).

## Μηχανικός καθαρισμός (Mechanical Cleaning):

- Καθαρισμός με εργαλεία χειρός
- Καθαρισμό με χρήση ηλεκτρικών εργαλείων ματσакόνια, τα κοπίδια , οι ξύστρες και τα μηχανήματα εξομάλυνσης. Απομάκρυνση ελαφρώς προσκολλημένης σκουριά και καλαμίνας , τα επιστρώματα και οι επιφανειακές ακαθαρσίες.





## Αναστολείς:

Ουσίες που όταν προστεθούν σε μικρές συγκεντρώσεις σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον ελαττώνουν την ταχύτητα διάβρωσης. Δρουν επί της καθοδικής πόλωσης, ώστε το στοιχείο διάβρωσης να λειτουργεί υπό καθοδικό έλεγχο και το ρεύμα διάβρωσης να είναι μειωμένο.

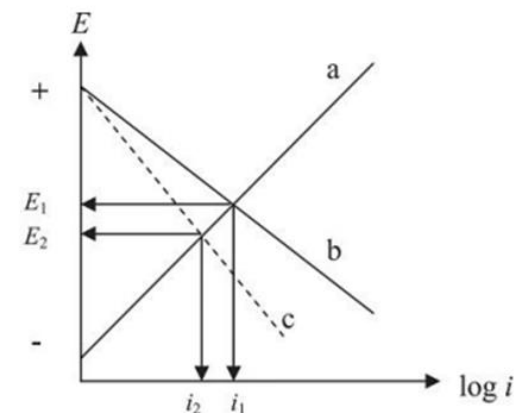
Διακρίνονται σε:

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

## Καθοδική προστασία

Βασική αρχή: Οι ανεπιθύμητες ανοδικές αντιδράσεις διάβρωσης «καταπιέζονται» από την εφαρμογή ενός αντίθετου ρεύματος που αναγκάζει τις ανόδους να πολωθούν στο δυναμικό των τοπικών καθόδων. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι καθοδικής προστασίας.

- Γαλβανική άνοδος
- Εντυπωμένο ρεύμα (ICCP)



- (a) Ανοδική Καμπύλη
- (b) Καθοδική Καμπύλη απουσία αναστολέα διαβρωσης
- (c) Καθοδική Καμπύλη παρουσία αναστολέα διαβρωσης



## Καθοδική προστασία με γαλβανική άνοδο

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.

Θυσιαζόμενες άνοδοι: 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.





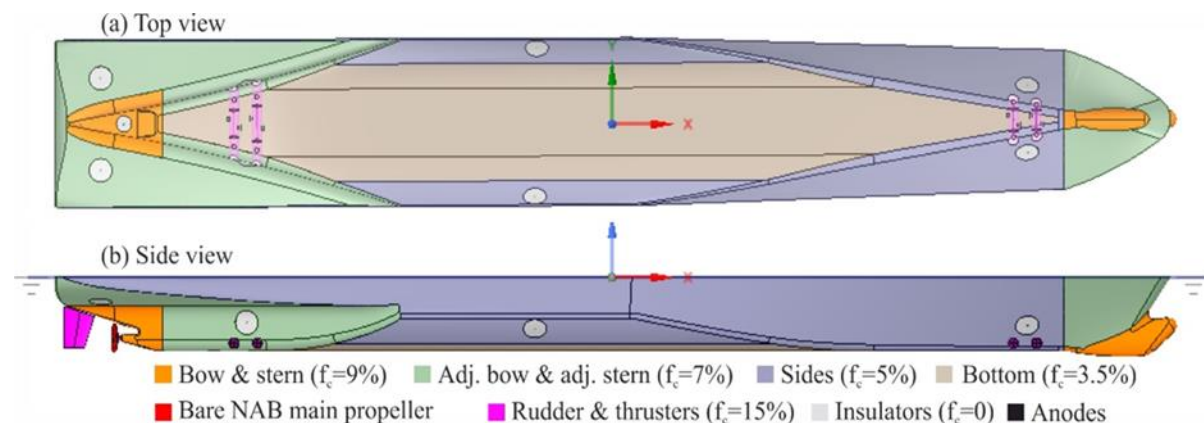
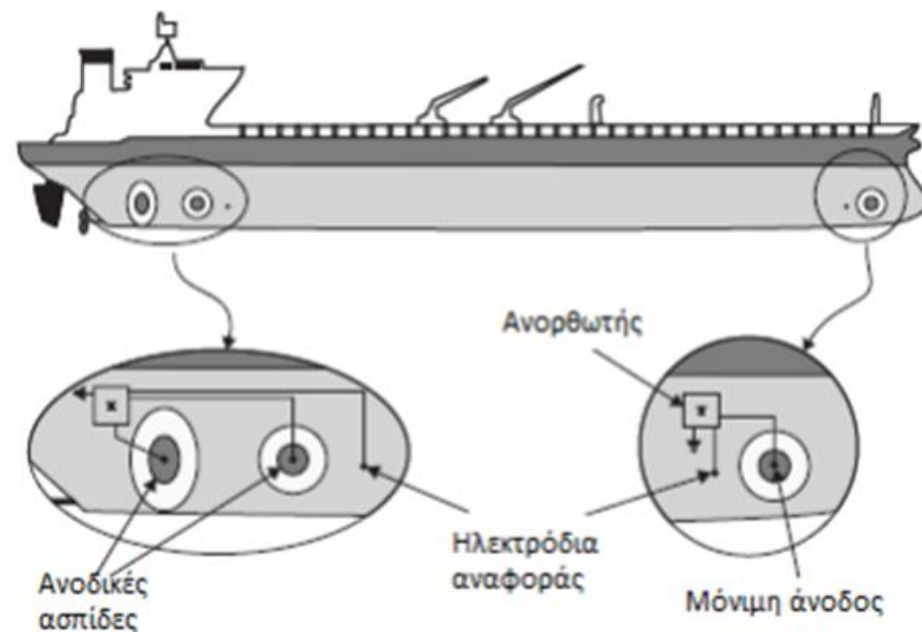
## Καθοδική προστασία με εντυπωμένο ρεύμα ICCP

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.

Αποτελούνται από τρία κύρια εξαρτήματα:

- Άνοδος
- Ανορθωτής
- Ηλεκτρόδιο αναφοράς

Η καθοδική προστασία με επιβαλλόμενο ρεύμα στα πλοία 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.





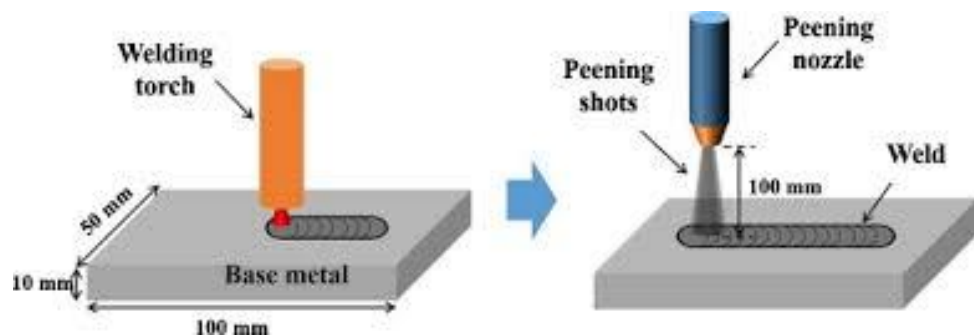
## Μείωση κινδύνου διάβρωσης κόπωσης μέσω σχεδιασμού και κατεργασιών

Για τη διάβρωση κόπωσης:

- Μείωση συγκεντρώσεων τάσης
- Βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας

Τεχνικές μείωσης των τοπικών τάσεων και καθυστέρησης της έναρξης ρωγμών:

- Weld toe grinding: Λείανση της συγκόλλησης (weld toe grinding) για τη βελτίωση της αντοχής στην κόπωση των συγκολλημένων αρμών
- TIG dressing
- Peening



## Οργάνωση συντήρησης και βελτιστοποίηση (risk-based inspection- RBI)

Ανάλυση κινδύνου μέσω συνδυασμού αξιολόγησης της πιθανότητας αστοχίας λόγω ζημιάς, φθοράς ή υποβάθμισης με μια αξιολόγηση των συνεπειών μιας τέτοιας αστοχίας.

Εντοπισμός:

(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

(δ) πού η αστοχία θα μπορούσε να προκαλέσει κίνδυνο.



## Αυτοθεραπευόμενες επιστρώσεις και υλικά

Η αυτοθεραπεία αναφέρεται στον αυθόρμητο σχηματισμό νέων δεσμών όταν οι παλιοί δεσμοί σπάνε μέσα σε ένα υλικό.

Τρεις κύριες μέθοδοι για την αυτοθεραπευτική αποκατάσταση:

- Εγγενής αυτοθεραπεία,
- Αγγειακή αυτοθεραπεία
- Βασισμένη σε κάψουλες

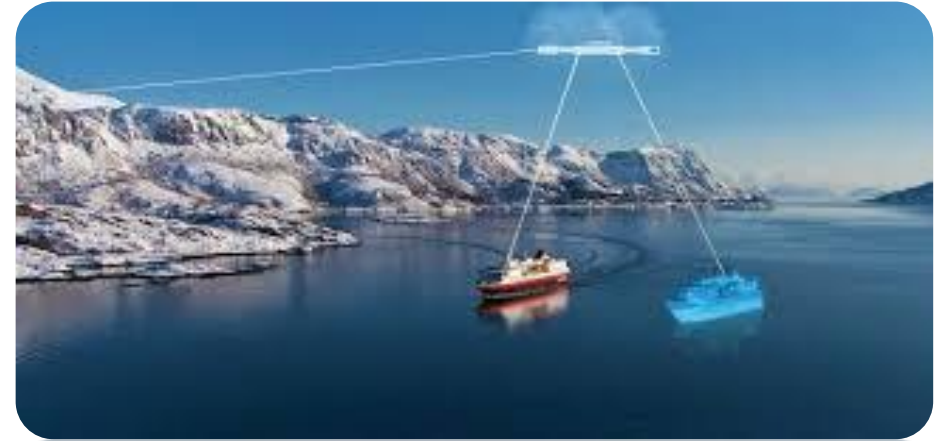
## Αντιρρύπανση κάτω από τη θαλάσσια ίσαλο γραμμή

Υδρόφιλες επιστρώσεις με κυτταρινικά υλικά τα οποία αποκολλώνται.

Υδρόφοβες επιστρώσεις: σκληρή επιφάνεια που είναι δύσκολο να προσκολληθεί οτιδήποτε (σιλικονούχες ή φθοριωμένες ρητίνες).

## Αισθητήρια υλικά

Σειρά υλικών που έχουν αναπτυχθεί, τα οποία χρησιμοποιούνται σε επιστρώσεις και μπορούν να ανιχνεύσουν τη διάβρωση.



## Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

Αισθητήρες τοποθετημένοι πάνω στα πλοία, οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς βασικές παραμέτρους (απόδοση κινητήρων, κατανάλωση καυσίμου, ακεραιότητα δομής και περιβαλλοντικές συνθήκες).

- Προσομοίωση πραγματικών σεναρίων: πρόβλεψη πιθανών βλαβών (προληπτική συντήρηση, μείωση χρόνου εκτός λειτουργίας)
- Βελτίωση κατασκευής πλοίων: εικονική δοκιμή σχεδίων πριν την κατασκευή, μείωση κινδύνου λαθών, επιτάχυνση παραγωγής



## Νηογνώμονας:

- Υπεύθυνος για την παρακολούθηση του πλοίου κατά την κατασκευή
- 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
- Επιβλέπει τις δοκιμαστικές διαδρομές του πλοίου.
- Υπεύθυνος για την απονομή της κλάσης και την συνεχή παρακολούθηση του πλοίου και μετά την ναυπήγηση
- Εκτελεί επιθεωρήσεις

**Επιθεωρήσεις:** Έχουν σαν σκοπό την αξιολόγηση του ακτοπλόου  
Διαχωρίζονται με βάση:

- Χρονική περίοδο που διενεργούνται
- Τεχνικός έλεγχος 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





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

**A. Επιθεώρηση Ανανέωσης Κλάσης / Ειδική Επιθεώρηση (*Class Renewal Survey / Special Survey*).** Κάθε 5 χρόνια. Αφορά κύτος και μηχανές (*Hull & Machinery*) αλλά και τον εξοπλισμό τους. Περιλαμβάνει Επιθεώρηση Πυθμένα (*Bottom/Docking Survey*), Επιθεώρηση Τελικού Άξονα (*Tail Shaft Survey*) και Επιθεώρηση Λέβητα (*Boiler Survey*).

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

**Γ. Ενδιάμεση Επιθεώρηση (*Intermediate Survey*):** κάθε 2,5 χρόνια με χρονικό περιθώριο 6 μήνες πριν ή 6 μήνες μετά την ημερομηνία της τελευταίας ενδιάμεσης επιθεώρησης. Περιλαμβάνει Επιθεώρηση Πυθμένα (*Bottom/Docking Survey*).



Ενδεικτικά θεσμοθετημένες επιθεωρήσεις (*Survey Status* της Κλάσης):

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

# Επιθεωρήσεις, Κανονισμοί και Απαιτήσεις Νηογνομόνων (συνέχεια)

## Κυριότεροι Νηογνώμονες

- **American Bureau of Shipping (A.B.S).** Μετεξέλιξη της Αμερικανικής Ένωσης Πλοιάρχων με ημερομηνία (1862). Βασικός σκοπός: η επάρκεια των αξιωματικών – πληρώματος του πλοίου και όχι η κατάταξη των πλοίων. Το 1898 έγινε η τελική μετατροπή σε Αμερικανικό Νηογνώμονα.
- **Bureau Veritas (B.V.).** Ο Γαλλικός νηογνώμονας. (1828, Αμβέρσα)  
Πρωταρχικός σκοπός ήταν η ενημέρωση των ασφαλιστών για τα πλοία.
- **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. (αρχές 17<sup>ου</sup> αιώνα, Edward Lloyd)
- **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



Ευχαριστώ για την προσοχή σας.

---

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