



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (CARGO
HOLDS) ΤΩΝ ΦΟΡΤΗΓΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΞΗΡΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΥΔΗΝ (BULK CARRIERS)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Κ. ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
Πρόλογος	6
Περίληψη	7
Abstract	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	9
1.1 Ορισμός διάβρωσης	9
1.2 Ιστορικό διάβρωσης	10
1.3 Επιπτώσεις της διάβρωσης	12
1.4 Ηλεκτροχημεία της διάβρωσης	15
1.4.1 Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις	15
1.4.2 Ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις – Νόμος του Faraday	16
1.5 Θερμοδυναμική της διάβρωσης	18
1.5.1 Ελεύθερη ενέργεια	18
1.5.2 Πρότυπα ηλεκτροδιακά δυναμικά – Η εξίσωση του Nernst	19
1.5.3 Διαγράμματα δυναμικού – pH (Pourbaix)	20
1.6 Κινητική της διάβρωσης	21
1.6.1 Ρυθμοί διάβρωσης	21
1.6.2 Ηλεκτροχημική πόλωση	22
1.7 Τα είδη της διάβρωσης	23
1.7.1 Ομοιόμορφη ή γενική Διάβρωση (Uniform or General Corrosion)	25
1.7.2 Γαλβανική διάβρωση (Galvanic Corrosion)	25
1.7.3 Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray-Current Corrosion)	28
1.7.4 Διάβρωση τηγμένων αλάτων (Molten Salt Corrosion)	29
1.7.5 Αέρια διάβρωση υψηλών θερμοκρασιών (High-Temperature Gaseous Corrosion)	30
1.7.6 Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)	31
1.7.7 Διάβρωση χαραγής (Crevice Corrosion)	34
1.7.8 Νηματοειδής διάβρωση (Filiform Corrosion)	35
1.7.9 Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular Corrosion)	36
1.7.10 Ειλεκτική προσβολή – έκπλυση (Selective Attack – Leaching)	36
1.7.11 Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση (Cavitation Corrosion)	37
1.7.12 Διάβρωση εκτριβής ή ρευστομηχανική Διάβρωση (Erosion Corrosion)	38
1.7.13 Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)	38
1.7.14 Διάβρωση κόπωσης (Corrosion Fatigue)	39
1.7.15 Διάβρωση από τριβή παλινδρόμησης (Fretting Corrosion)	42
1.7.16 Μικροβιολογική διάβρωση (Microbiologically Influenced Corrosion)	42
1.7.17 Βλάβη από υδρογόνο (Hydrogen Damage)	43
1.8 Το περιβάλλον της διάβρωσης	44
1.9 Παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα της διάβρωσης	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ. ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	46
2.1 Η επιλογή του υλικού	46
2.2 Ο σχεδιασμός της κατασκευής	47
2.3 Καθοδική Προστασία	47
2.3.1 Καθοδική Προστασία με Θυσιαζόμενες Ανόδους (Cathodic Protection with Sacrificial Anodes)	47
2.3.2 Καθοδική Προστασία με Επιβαλλόμενο Ρεύμα (Impressed Current Cathodic	49

	Protection)	
2.3.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ειδών καθοδικής προστασίας	50
2.4	Ανοδική Προστασία – Παθητικοποίηση	50
2.5	Αναστολείς διάβρωσης (Corrosion Inhibitors)	52
2.6	Επιστρώματα	53
2.6.1	Μεταλλικά επιστρώματα	54
2.6.2	Μη μεταλλικά ανόργανα επιστρώματα	55
2.6.3	Οργανικά επιστρώματα	56
2.6.3.1	Γενικά – βασικά συστατικά οργανικών επιστρωμάτων	56
2.6.3.2	Προετοιμασία της επιφάνειας	57
2.6.3.3	Μέθοδοι και συνθήκες εφαρμογής επιστρωμάτων	62
2.6.3.4	Πάχος μεμβράνης επιστρώματος (film thickness)	65
2.6.3.5	Χρόνος ζωής – αντοχή – πρόσφυση επιστρώματος	65
2.6.3.6	Μορφές διάβρωσης υπό οργανικών Επιστρωμάτων	66
2.6.3.7	Αστοχία των προστατευτικών επιστρωμάτων	69
2.6.3.8	Επιστρώματα για ναυπηγικές εφαρμογές	70
2.7	Προσαυξήσεις διάβρωσης (Corrosion Additions)	74
2.8	Αντικατάσταση χάλυβα (Steel Renewals)	74
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	76
3.1	Το Θαλάσσιο περιβάλλον	76
3.1.1	Αλατότητα	76
3.1.2	Περιεκτικότητα οξυγόνου	77
3.1.3	Θερμοκρασία	78
3.1.4	Ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή	79
3.1.5	Επίδραση του pH	80
3.1.6	Επίδραση του βάθους	81
3.1.7	Η τοπογραφία της διάβρωσης του κοινού χάλυβα στο θαλάσσιο ύδωρ	83
3.2	Η θαλάσσια ατμόσφαιρα	86
3.2.1	Δάρκεια διαβροχής και σχετική υγρασία	89
3.2.2	Χλωρίοντα	90
3.2.3	Θερμοκρασία	91
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΟΡΤΗΓΑ ΠΛΟΙΑ ΧΥΔΗΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (BULK CARRIERS)	93
4.1	Γενικά	93
4.2	Κατασκευαστική σχεδίαση φορηγών πλοίων φορτίου χύδην	93
4.3	Άλλοι σχεδιαστικοί τύποι φορηγών πλοίων	95
4.4	Ταξινόμηση φορηγών πλοίων ανάλογα με το μέγεθος	96
4.5	Λειτουργία - φόρτωση φορηγών πλοίων χύδην φορτίου	98
4.6	Στατιστικά στοιχεία ζημιών σε φορηγά πλοία φορτίου χύδην	101
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ BULK CARRIERS	104
5.1	Γενικά	104
5.1.1	Περιοχές που υφίστανται διάβρωση	106
5.2	Πρόβλεψη ρυθμού γενικής διάβρωσης	107
5.2.1	Ανθεκτικότητα του επιστρώματος	109
5.2.2	Μετάβαση ανάμεσα στην ανθεκτικότητα του επιστρώματος και την εκκίνηση της διάβρωσης	110
5.2.3	Εξέλιξη της διάβρωσης	110
5.3	Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)	112

5.4	Διάβρωση Κόπωσης	116
5.4.1	Προσδιορισμός των φορτίων κόπωσης	117
5.4.2	Υπολογισμός της μακροπρόθεσμης κατανομής του εύρους τάσεων	117
5.4.3	Προσδιορισμός της αντοχής της κατασκευής σε κόπωση	118
5.4.4	Επίτιμηση της ζημίας λόγω κόπωσης	119
5.4.5	Αριθμητικό παράδειγμα – Η επίδραση της διάβρωσης	120
5.5	Γάστρα και κύριο κατάστρωμα	123
5.6	Δεξαμενές καυσίμων	124
5.7	Δεξαμενές έρματος (Ballast Tanks)	128
5.7.1	Μορφολογία της διάβρωσης δεξαμενών έρματος – διάβρωση εμβαπτίσεως και κλειστή ατμοσφαιρική διάβρωση	128
5.7.2	Μικροβιολογική διάβρωση (MIC)	133
5.7.3	Ο ρόλος των επιστρωμάτων και της καθοδικής προστασίας	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΚΥΤΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (CARGO HOLDS) ΤΩΝ BULK CARRIERS		136
6.1	Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση στα φορτηγά πλοία	136
6.1.1	Παράμετροι λειτουργίας	136
6.1.2	Σχεδιαστικές παράμετροι	137
6.2	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυτών φορτίου	138
6.3	Το περιβάλλον των κυτών φορτίου	141
6.4	Έλασμα εσωτερικού πυθμένα (tank top plating)	141
6.5	Κάτω εδράσεις (lower stools)	142
6.6	Άνω εδράσεις (upper stools)	144
6.7	Εγκάρσια φραγή με κατακόρυφες πτυχώσεις (corrugated bulkhead)	144
6.8	Νομείς πλευρικού ελάσματος (sideshell frames)	147
6.9	Δεξαμενές διπυθμένων – κάτω πλευρικές δεξαμενές (DBBT – Hopper Tanks)	152
6.10	Άνω πλευρικές δεξαμενές (Topside Tanks)	153
6.11	Στόμια κυτών – Κάτω πλευρά κυρίου καταστρώματος	154
6.12	Κενοί χώροι (Void Spaces)	155
6.13	Μηχανικές ζημιές από εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης	155
6.14	Συγκεντρικοί ρυθμοί διάβρωσης στα κύτη φορτίου και συμπεράσματα	156
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ		159
7.1	Γαιάνθρακας (Κάρβουνο)	159
7.1.1	Δραστικά φορτία	160
7.1.2	Η διαβρωτική δράση του γαιάνθρακα	162
7.1.3	Παράμετροι που επηρεάζουν τη διαβρωτικότητα του γαιάνθρακα	165
7.2	Σιδηρομετάλλευμα (Iron Ore)	168
7.2.1	Η διαβρωτική δράση του σιδήρου	169
7.2.2	Παράμετροι που επηρεάζουν τη διαβρωτικότητα του σιδήρου	169
7.3	Σιτηρά (Grain)	170
7.4	Θειάφι	171
7.4.1	Γενικά	171
7.4.2	Διάβρωση	172
7.4.3	Προετοιμασία κυτών φορτίου προ της φορτώσεως	174
7.4.4	Ασβέστωμα κυτών φορτίου	174
7.5	Αλάτι	176
7.6	Λοιπά διαβρωτικά φορτία	177
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ		178

8.1	Επίδραση μηχανικών δράσεων	178
8.1.1	Επίδραση των τάσεων στο ρυθμό διάβρωσης	178
8.2	Επίδραση του χάλυβα υψηλής αντοχής	181
8.3	Επίδραση της διπλής γάστρας	182
8.3.1	Επίδραση της θερμοκρασίας - Φαινόμενο «Θερμός»	183
8.3.2	Το «φαινόμενο Ντόμινο» και προβλήματα επιστρωμάτων σε φορτηγά πλοία διπλής γάστρας	184
8.3.3	Αυξημένη διάβρωση σε κύτη φορτίου φορτηγών πλοίων διπλής γάστρας	185
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ		187
9.1	Γενικά περί διάβρωσης συγκολλήσεων	187
9.1.1	Μικροδομές συγκολλήσεων	187
9.1.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των συγκολλήσεων	189
9.1.3	Είδη διάβρωσης συγκολλήσεων	190
9.1.4	Μέθοδοι για ελαχιστοποίηση της διάβρωσης συγκολλήσεων	195
9.2	Ρήξη επιστρωμάτων στις περιοχές συγκολλήσεων επί πλοίου	196
9.3	Διάβρωση συγκολλήσεων σε θαλάσσια ατμόσφαιρα	197
9.4	Διάβρωση λόγω κόπωσης σε συγκολλήσεις ναυπηγικών κατασκευών	199
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ		201
10.1	Επίδραση της γενικής διάβρωσης	201
10.2	Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς	204
10.2.1	Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό	204
10.2.2	Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε θλίψη	207
10.2.3	Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στο λυγισμό	209
10.2.4	Συμπεράσματα	210
10.3	Επίδραση της διάβρωσης στην κατάρρευση των καλυμμάτων των στομιών κυτών	211
10.4	Επίδραση της διάβρωσης στην αντοχή πλοίου που έχει υποστεί ζημία συγκρούσεως	212
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΘΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ BULK CARRIERS ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΥΤΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΥΤΩΝ		217
11.1	IACS – Κοινοί Κατασκευαστικοί Κανόνες – Common Structural Rules (CSR)	217
11.1.1	Ζωή σχεδίασεως (Κεφάλαιο 1 – Τομέας 3, 1.2)	218
11.1.2	Υπολογισμός πάχους ελάσματος (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 2, 3.1.1 έως 3.1.3)	218
11.1.3	Προσαυξήσεις διάβρωσης (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 3, 1 έως 1.2.2)	218
11.1.4	Προστασία από τη διάβρωση (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 5, 1 έως 3.3)	222
11.1.4.1	Περιοχές προς προστασία	222
11.1.4.2	Προστασία δεξαμενών έρματος	222
11.1.4.3	Προστασία από τη διάβρωση στα κύτη φορτίου	223
11.1.4.4	Προστασία κυτών έρματος	224
11.1.4.5	Θυσιαζόμενες άνοδοι	225
11.1.5	Παχυμετρήσεις και Κριτήρια Αποδοχής (Thickness Measurements, Acceptance Criteria)	225
11.2	Οδηγίες UR Z.10.2 και UR Z.10.5 (IACS)	227
11.2.1	Διάβρωση με βελονισμούς	227
11.2.2	Διάβρωση ακμής	228
11.2.3	Διάβρωση με αυλακώσεις	228
11.3	Κανονισμός για τη μεταφορά στερεών φορτίων χύδην	229
Συμπεράσματα		230
Βιβλιογραφία		233

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το πολύ σημαντικό φαινόμενο της διάβρωσης στα bulk carriers, έναν από τους σημαντικότερους τύπους φορτηγών πλοίων, και δη στις δεξαμενές φορτίων αυτών. Πρόκειται για φαινόμενο εξεχούσης σημασίας για τη Ναυπηγική και τη Ναυτιλία, με σημαντικές συνέπειες στους τομείς της σχεδίασης και κατασκευής των πλοίων, της λειτουργίας τους, την ασφάλεια των πλοίων και των πληρωμάτων καθώς και των παραμέτρων της οικονομικής τους εκμετάλλευσης.

Με αφετηρία τις θεμελιώδεις γενικές αρχές της διάβρωσης και επέκταση στις τελευταίες εξειδικευμένες αριθμητικές και πειραματικές μελέτες ερευνητών, Πανεπιστημίων και Οργανισμών, παρατηρούμε τις εκφάνσεις αυτής εντός των κυτών φορτίων, υπό τη συνδυασμένη δράση του επιθετικού θαλασσιού περιβάλλοντος, των διαφόρων ειδών φορτίου, των μηχανικών καταπονήσεων και διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων του πλοίου. Προσδιορίζεται, τέλος, το τρέχον θεσμικό πλαίσιο κανονισμών των Νηογνωμόνων που διέπουν τις απαιτήσεις έναντι της διάβρωσης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω με θερμή τον Επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Δημήτριο Ι. Παντελή για την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, το θέμα της οποίας τυγχάνει εξαιρετικού ενδιαφέροντος αλλά και σημασίας, καθώς και για τις πολύτιμες και καιρίες συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής. Ευχαριστώ, επίσης, τα έτερα μέλη της τριμελούς επιτροπής, Καθηγητή κ. Νικόλαο Τσούβαλη και Αν. Καθηγητή κ. Πέτρο Καρύδη. Επιθυμώ εδώ να ευχαριστήσω συγκεντρωτικά και τους τρεις προαναφερθέντες διδάσκοντες, στα προσφερόμενα μαθήματα των οποίων οι διαλέξεις, η βιβλιογραφία, τα εργαστήρια και οι εξεταστικές διαδικασίες συνέβαλλαν στην κτήση γνώσεων συναφών γνωστικών αντικειμένων, χωρίς τις οποίες θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Ναυπηγό Μηχ/γο Μηχ/ικό κ. Γεράσιμο Κουρούιλη για τις συμβουλές που μου έδωσε πάνω σε πρακτικά θέματα της διάβρωσης των πλοίων, καθώς και τον Ναυπηγό Μηχ/γο Μηχ/ικό κ. Σέργιο Λαζαρίδη, στο πλευρό του οποίου η απασχόληση με όπλισε με απαραίτητα εφόδια καθώς και για τη στήριξή του, στη δύσκολη αυτή εποχή.

Κλείνοντας, ευχαριστώ για την ατέρμονη στήριξη, υπομονή και αγάπη τους, την οικογένεια που με μεγάλωσε (Κώστας-Εύα-Γιώργος) και την οικογένεια που προσπαθώ να μεγαλώσω εγώ (Ντανιέλα-Κώστας-Εύα).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διάβρωσης των φορτηγών πλοίων ξηρού φορτίου χύδην (bulk carriers) με ειδικότερη και πιο ενδελεχή εξέταση του φαινομένου εντός των δεξαμενών φορτίων (cargo holds) αυτών.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ορισμοί, ένα σύντομο ιστορικό και οι επιπτώσεις της διάβρωσης, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται οι αρχές που τη διέπουν όσον αφορά στην ηλεκτροχημεία, τη θερμοδυναμική και την κινητική της και αναφέρονται τα κύρια είδη της.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι αρχές και οι μέθοδοι προστασίας από τη διάβρωση, με ιδιαίτερη αναφορά στην προστασία των πλοίων και των θαλασσίων κατασκευών, ενώ διερευνάται και η επίδραση του θαλασσίου περιβάλλοντος, τόσο του θαλασσίου ύδατος όσο και της θαλάσσιας ατμόσφαιρας, στο φαινόμενο της διάβρωσης.

Μετά από μια σύντομη αναφορά στα είδη, τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές λεπτομέρειες καθώς και στατιστικά στοιχεία του παγκοσμίου στόλου και των ζημιών σε bulk carriers, υπεισερχόμαστε λεπτομερώς στις εκφάνσεις, τους μηχανισμούς και την πρόβλεψη των ρυθμών της διάβρωσης για τα πλοία αυτά, με ιδιαίτερη έμφαση στη γενική διάβρωση, στη διάβρωση με βελονισμούς και στη διάβρωση κοπώσεως.

Η ανάπτυξη της μελέτης της διάβρωσης εντός των κυτών φορτίου λαμβάνει χώρα κατόπιν αναφοράς στις λειτουργικές και σχεδιαστικές παραμέτρους της διάβρωσης. Μελετάται διεξοδικά η διάβρωση στα επιμέρους τμήματα των κυτών φορτίου, χαρακτηρίζονται οι περιοχές υψηλού κινδύνου και παρατίθενται συγκριτικά οι ρυθμοί διάβρωσης εντός αυτών.

Εν συνεχεία μελετώνται οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση, κυρίως αυτή των διαφόρων ειδών φορτίου αλλά και οι μηχανικές δράσεις, η χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής και οι σχεδιάσεις bulk carriers διπλής γάστρας.

Εξετάζεται επίσης η διάβρωση των συγκολλήσεων, που είναι από τα σημεία των κυτών φορτίου που υφίστανται πιο έντονα υποβάθμιση λόγω διάβρωσης, ενώ καταλήγουμε παρουσιάζοντας την επίδραση της διάβρωσης στον ζωτικό τομέα της αντοχής των bulk carriers.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με αναφορά στο τρέχον πλαίσιο των κανονισμών των Νηογνομόνων που διέπουν τις απαιτήσεις κατασκευής, συντηρήσεων και επιθεωρήσεων για πρόληψη των συνεπειών της διάβρωσης στα bulk carriers.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to examine the corrosion of dry cargo bulk carriers, with particular emphasis on this phenomenon in way of the cargo holds.

In the introductory chapter, the definitions, a brief history and the repercussions of corrosion are presented, whilst the main principles of the electrochemistry, the thermodynamics and the kinetics of corrosion as well as the main types of corrosion are noted.

Additionally, the principles and methods of corrosion protection are reported, with special mention of the corrosion protection of ships and marine structures. Subsequently, the influence of the marine environment on corrosion, seawater and marine atmosphere alike, is explored.

Upon a brief reporting of the general types, the design and structural details as well as statistics of the world fleet and damages of bulk carriers, we enlarge upon the aspects and the mechanisms of corrosion, as well as the prediction of corrosion rates regarding this group of vessels, with the cases of general corrosion, pitting corrosion and corrosion fatigue duly looked into.

The study of corrosion within the cargo holds takes place upon recitation of the operational and design parameters of corrosion. Corrosion in way of the discrete sections of the cargo holds is thoroughly addressed, the areas of high susceptibility to corrosion are pointed out and the cumulative corrosion rates of the cargo holds' structural members are calculated.

Furthermore, the factors affecting corrosion are studied, including, but not limited to, the various cargo types, mechanical actions, the usage of high-tensile steel and the double side shell bulk carriers designs.

Corrosion in way of weldments, which constitute one of the cargo holds' sections most prone to deterioration due to corrosion, is also examined whilst we carry on by presenting the effect of corrosion on the vital issue of the strength of bulk carriers.

The present thesis is concluded by listing the current framework of regulations adopted by the Classification Societies, which govern the requirements of construction, inspection and maintenance for prevention of the adverse effects of corrosion on bulk carriers.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

1.1 Ορισμός Διάβρωσης ^{[4], [5]}

Διάφοροι ορισμοί αναφορικά με τη διάβρωση έχουν δοθεί κατά καιρούς, με θεωρούμενο ως πληρέστερο αυτόν της «Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Διάβρωσης», προταθείσα εις του Ομότιμου Καθηγητού Ε.Μ.Π. Κου Θ. Σκουλικίδη, που παρατίθεται κάτωθι:

«Διάβρωση λέγεται κάθε αυθόρμητη, κατά επέκταση ειβιασμένη, ηλεκτροχημικής, κατά επέκταση χημικής, κατά επέκταση μηχανικής κατά επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού.»

Κατά το ISO 8044 του 1986:

«Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του».

Άλλοι ορισμοί είναι οι εξής:

- Διάβρωση είναι η επιφανειακή απώλεια που συμβαίνει όταν μέταλλα εκτίθενται σε αντιδραστικά περιβάλλοντα.
- Διάβρωση είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ένα μέταλλο και περιβάλλοντα, η οποία οδηγεί στην σταδιακή καταστροφή αυτού.
- Διάβρωση είναι μια έκφραση της αποσύνθεσης υλικών από χημικούς ή βιολογικούς παράγοντες.
- Διάβρωση είναι μία αντίστροφη εξαγωγική μεταλλουργία. Για παράδειγμα, ο χάλυβας φτιάχνεται από αιματίτη, κατόπιν θερμάνσεως με άνθρακα. Ο σίδηρος διαβρώνεται και επανέρχεται σε σκουριά, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο ζωής του. Ο αιματίτης και η σκουριά έχουν την ίδια σύσταση (Fe_2O_3).
- Διάβρωση είναι η υποβάθμιση των ιδιοτήτων των υλικών ως αποτέλεσμα αντίδρασης με το περιβάλλον αυτών (Fontana).
- Διάβρωση είναι η καταστροφική επίθεση σε ένα μέταλλο από χημική ή ηλεκτροχημική αντίδραση με το περιβάλλον (Uhlig).

Παρά τους διαφορετικούς ορισμούς, εν γένει παρατηρούμε ότι η διάβρωση είναι κατά βάση το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε υλικά και το περιβάλλον αυτών. Έως το 1960, ο όρος διάβρωση περιοριζόταν μόνον σε μέταλλα και στα κράματά τους, ενώ δεν συμπεριελάμβανε κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά και ημιαγωγούς. Πλέον, ο όρος διάβρωση περιέχει όλα τα είδη των φυσικών και τεχνητών υλικών, ακόμη και βιο-υλικών και νανο-υλικών, δίχως να περιορίζεται αποκλειστικά σε μέταλλα και κράματα. Το εύρος της διάβρωσης συνάδει με τις ραγδαίες αλλαγές στην ανάπτυξη υλικών των προσφάτων ετών.

1.2 Ιστορικό Διάβρωσης ^{[4], [5], [6]}

Εδώ και χιλιάδες χρόνια, η διάβρωση είναι ευρέως γνωστή ως σκουριά, ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που καταστρέφει τη στιλπνότητα και την ομορφιά των αντικειμένων ενώ μειώνει και τη διάρκεια ζωής τους. Ο Ρωμαίος φιλόσοφος, Πλίνιος (23-79 μ.Χ.) έγραψε για την καταστροφή του σιδήρου στο έργο του 'Ferrum Corruptar'. Από την αρχαιότητα η διάβρωση έχει επηρεάσει όχι μόνο την ποιότητα της καθημερινής ζωής των ανθρώπων αλλά και την τεχνική τους πρόοδο. Υπάρχει ιστορικό παρατήρησης της διάβρωσης, αλλά δεν υπήρχε εκτεταμένο ενδιαφέρον σχετικά με τα αίτια και το μηχανισμό της διάβρωσης έως ότου ο Robert Boyle έγραψε τη «Μηχανική Προέλευση της Διαβρωτικότητας» ('Mechanical Origin of Corrosiveness.'). Φιλόσοφοι, συγγραφείς και επιστήμονες παρατήρησαν τη διάβρωση και την ανέφεραν στα γραπτά τους:

- Ο Πλίνιος ο Πρεσβύτερος (23–79 μ.Χ.) έγραψε για «χαλασμένο» σίδηρο.
- Ο Ηρόδοτος (τον 5^ο αιώνα π.Χ.) πρότεινε τη χρήση του κασσίτερου για την προστασία του σιδήρου.
- Ο Lomonosov (1743–1756) και στη συνέχεια ο Lavoisier μελέτησαν το φαινόμενο της αύξησης του βάρους των μετάλλων κατά τη θέρμανσή τους.
- Ο Austin (1788) παρατήρησε ότι το ουδέτερο ύδωρ γίνεται αλκαλικό όταν δρα επί του σιδήρου.
- Ο Thenard (1819) πρότεινε ότι η διάβρωση είναι ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο.
- Ο Hall (1829) απέδειξε ότι ο σίδηρος δεν σκουριάζει απουσία οξυγόνου.
- Ο Davy (1824) εισηγήθηκε μία μέθοδο θυσιαζόμενης προστασίας του σιδήρου από τον ψευδάργυρο.
- Ο De la Rive (1830) εισηγήθηκε την ύπαρξη μικροκελλιών στην επιφάνεια του ψευδάργυρου.

Στην ιστορική εξέλιξη της διαπίστωσης, της ερμηνείας του φαινομένου της διάβρωσης και των προσπαθειών καταπολέμησής της ξεχωρίζουν πέντε βασικοί σταθμοί.

Ο πρώτος σταθμός αναφέρεται στην Αρχαία Ελλάδα, περίπου το 2.000 π.Χ., κατά τη Μινωική εποχή. Είναι γνωστό ότι γινόταν μεγάλη χρήση του χαλκού κατά την εποχή εκείνη. Είχε παρατηρηθεί ότι η επιφάνεια των χάλκινων και μπρούντζινων αντικειμένων έχανε τη στιλπνότητά της, μετά από χρονικό διάστημα από την κατασκευή και χρήση τους. Αυτή ήταν, απ' όσο μπορούμε να γνωρίζουμε, η πρώτη παρατήρηση για τη διάβρωση των μετάλλων, γιατί, όπως ξέρουμε σήμερα, η απώλεια στιλπνότητας οφείλεται στη δημιουργία οξειδίων, υδροξειδίων η και άλλων ενώσεων στην επιφάνεια των μετάλλων, δηλαδή στο φαινόμενο της διάβρωσης. Παρατηρήθηκε τυχαία ότι, όταν πάνω σε χάλκινο αντικείμενο, που είχε χάσει τη στιλπνότητά του, έπεφταν σταγόνες λαδιού, αποκοιτούσε ξανά τη λάμψη του, γιατί με την οξύτητά του ελαίου, προκαλείται μερική διάλυση των οξειδίων και γιατί οποιοδήποτε αντικείμενο αλειφτεί με λιπαρή ουσία αποικτά λάμψη. Έτσι, διαδόθηκε η καταπολέμηση των επιπτώσεων της διάβρωσης με λάδι. Αργότερα, μερικές εκατοντάδες χρόνια π.Χ. άρχισε η ευρεία χρήση του σιδήρου,

που αντέχει λιγότερο στη διάβρωση από το χαλκό, αλλά η αντοχή του σ' αυτή εξαρτάται από τον τρόπο παρασκευής και σχηματοργίας του.

Ο δεύτερος σταθμός τοποθετείται μεταξύ του 100 και 200 μ.Χ. Ο Πλούταρχος μελέτησε επισταμένα τις επιφανειακές αλλοιώσεις των μπρούντζινων αγαλμάτων των Δελφών και αποκάλυψε την αλλοίωση αυτή «εξίωση», δηλ. εξάνθηση. Είπε ότι *«αυτός γάρ υφ' εαυτού παλαιούμενος ο χαλκός αποπνέει καί μεθίησιν τόν ίόν, όν η πυκνότητα συνέχουσα καί παχνούσα ποιεί εμφανή διά τό πλήθος»*, δηλαδή «ο χαλκός εξατμίζεται (εξαχνώνεται, διαχέεται), και δημιουργεί το άνθος» (δηλ. τα οξειδία, τα προϊόντα της διάβρωσης) και μάλιστα αυθόρμητα. Περιέγραψε δηλαδή τη δυνατότητα αντίδρασης ενός σώματος σε στερεή κατάσταση και τη δημιουργία των οξειδίων απ' την επιφάνεια προς το διαβρωτικό περιβάλλον σε συνηθισμένες συνθήκες (αυθόρμητη δράση). Η ακρίβεια των παρατηρήσεων του Πλουτάρχου αποδείχθη θεωρητικά και πειραματικά μόλις το 1958 από τον Wagner.

Μεταξύ δευτέρου και τρίτου σταθμού, το 1775 μεσολάβησε η αρχή για τη διαμόρφωση και η εξέλιξη της θεωρητικής ηλεκτροχημείας. Προσέτι, από τον 18^ο κιάλας αιώνα είχε παρατηρηθεί ότι ο σίδηρος διαβρώνεται ταχέως σε διαλυμένο νιτρικό οξύ, όμως παραμένει ανέπαφος σε συμπυκνωμένο νιτρικό οξύ. Ο Schönbein το 1836 έδειξε ότι ο σίδηρος μπορεί να παθητικοποιηθεί. Οι πλέον σημαντικές συνεισφορές έγιναν αργότερα από τον Faraday (1791–1867), ο οποίος απέδειξε μια ποσοτική σχέση ανάμεσα στη χημική δράση και το ηλεκτρικό ρεύμα. Ο πρώτος και δεύτερος νόμος του Faraday αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των ρυθμών διάβρωσης των μετάλλων. Ιδέες για τον έλεγχο της διάβρωσης ξεκίνησαν στις αρχές του 19^{ου} αιώνα.

Ο τρίτος σταθμός λαμβάνει χώρα περί το 1900, με τον Planck να καθιερώνει την Κβαντική Θεωρία η οποία εισήγαγε την έννοια του κβάντου ενέργειας. Διαμορφώθηκε, δηλαδή, η έννοια της κατοχής, απορρόφησης ή εκπομπής ενέργειας από το σύστημα κατά ακέραια πολλαπλάσια των κβάντων ενέργειας, η οποία και οδήγησε στη σκέψη ότι, για την πραγματοποίηση ενός φαινομένου, δεν ενδιαφέρει η μορφή (θερμική, ηλεκτρική, ηλεκτρομαγνητική κ.λπ.), της ενέργειας που προσφέρεται, αλλά το μέγεθος του κβάντου της. Μεταγενέστερη απόδειξη της σκέψης αυτής συνέβαλε στην κατανόηση της πραγματοποίησης της διάβρωσης με ηλεκτρική ενέργεια και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Την ίδια εποχή, ο Whitney (1903) προσέφερε μια επιστημονική βάση για τον έλεγχο της διάβρωσης, βασισμένη σε ηλεκτροχημικές παρατηρήσεις. Το 1923 ο U. R. Evans κατόρθωσε να παράσχει μια σύγχρονη εξήγηση των αιτίων και του ελέγχου της διάβρωσης, βασισμένος στην κλασική ηλεκτροχημική του θεωρία.

Ο τέταρτος σταθμός αναφέρεται στα χρόνια 1926 ως 1936, όποτε και διαμορφώθηκε η ερμηνεία αυτοδιάχυσης σε στερεή κατάσταση των ιόντων ιοντικών στερεών, που ανήκουν στη κατηγορία των Δαλτωνιδών, δηλαδή τέθηκαν οι βάσεις της Θεωρίας της Αταξίας των Στερεών Σωμάτων, που διαμορφώθηκε από τον Frenkel (1926) και διατυπώθηκε στην τελική της μορφή από τους Wagner και Schottky (1936-1958). Αποδείχθη επίσης η δυνατότητα αντίδρασης των στερεών και σε συνθήκες θερμοκρασίες. Σημειούται ότι πρώτος ο Hedvall, το 1936, δέχτηκε συνειδητά και υποστήριξε, ότι τα σώματα μπορούν να αντιδράσουν και σε στερεή κατάσταση και όχι μόνον σε ρευστή ως εθεωρείτο έως τότε.

Ως πέμπτος σταθμός λογίζεται ο Wagner, ο οποίος το 1958, ολοκλήρωσε και απέδειξε πλήρως τη θεωρία της Αταξίας και έδωσε την ερμηνεία του φαινομένου της διάβρωσης

Σημαντική πρόοδος προς τη σύγχρονη επεξήγηση του φαινομένου της διάβρωσης έγινε από τις συνεισφορές των Evans, Uhlig και Fontana. Εργαστήρια διάβρωσης που εγκαθιδρύθηκαν στο Μ.Ι.Τ. των ΗΠΑ και στο Cambridge του Ην. Βασιλείου συμμετείχαν καθοριστικά στην ανάπτυξη της επιστήμης και τεχνολογίας της διάβρωσης ως ενός διεπιστημονικού αντικειμένου. Στα πρόσφατα έτη, η επιστήμη και μηχανική της διάβρωσης έχει καθιερωθεί ως ένα αναπόσπαστο τμήμα της εκπαίδευσης μηχανικών παγκοσμίως.

1.3 Επιπτώσεις της Διάβρωσης ^{[1], [3], [7], [8]}

Οι επιπτώσεις του φαινομένου της διάβρωσης είναι εξαιρετικά εκτεταμένες, γεγονός που προσδίδει εξέχουσα σημασία στη μελέτη των μηχανισμών αυτής. Θεωρείται ότι το 40% των μετάλλων και των κραμάτων που παράγονται παγκόσμια, καταστρέφονται κάθε χρόνο από τη διάβρωση. Η διάβρωση αυτή καθαυτή δεν προσβάλλει το 40% των μετάλλων, αλλά για παράδειγμα, έστω και 10% του βάρους κατασκευαστικών ελασμάτων να προσβάλλει, καθιστά ολόκληρο το έλασμα αντικαθιστέο.

Οι επιπτώσεις της διάβρωσης εμπίπτουν σε τρεις (3) κύριους τομείς, την **ασφάλεια**, την **οικονομία** και την **εξοικονόμηση ενέργειας**.

Ο τομέας της *ασφάλειας* αφορά στην πρόκληση βλαβών ή την καταστροφή κατασκευών ή τμημάτων αυτών που δύναται να οδηγήσει στην πρόκληση κινδύνου για τον άνθρωπο. Στη ναυπηγική η διάβρωση συνιστά το κυριότερο αίτιο προκλήσεως φθοράς στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, οδηγώντας στη μείωση του πάχους των στοιχείων αυτής. Αυτό συνεπάγεται αύξηση των τάσεων και ελάττωση της αντοχής.

Οι *οικονομικές επιπτώσεις* της διάβρωσης διακρίνονται σε *άμεσες* και σε *έμμεσες*. Ως άμεσες λογίζονται αυτές που αφορούν στο αμιγές κόστος αντικατάστασης των κατασκευών ή των τμημάτων αυτών που έχουν υποστεί διάβρωση, συνυπολογίζοντας και το κόστος των εργατικών δια αυτές.

Πέρα από το αμιγές και άμεσο κόστος που προκαλεί η διάβρωση, αυτή καθίσταται υπεύθυνη και για πολύ υψηλές οικονομικές επιπτώσεις που έμμεσα προκαλεί. Η *διακοπή λειτουργίας εγκαταστάσεων* έως ότου αποκατασταθεί μια ζημία που προεκλήθη εκ της διάβρωσης είναι μία εξ αυτών και μάλιστα το κόστος της διακοπής της παραγωγής υπερβαίνει συνήθως κατά πολύ το κόστος αποκατάστασης της ζημίας. Έτερη έμμεση επίπτωση είναι η *απώλεια υλικού* (πχ διαρροές σε έναν αγωγό ή δεξαμενή). Προσέτι, επακόλουθο της διάβρωσης είναι η *χαμηλή απόδοση* λειτουργίας διαβρωμένων εγκαταστάσεων ή μηχανημάτων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ρύπανσης της γάστρας ενός πλοίου, η οποία αυξάνει την επιφανειακή τραχύτητα άρα και την αντίσταση τριβών, κατά 20 – 40 %, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μείωση της ταχύτητας περίπου 7 – 14 % ετησίως, γεγονός που αυξάνει αισθητά το λειτουργικό κόστος ενός πλοίου λόγω της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου. Ακόμη παρατηρείται η *πρόκληση μόλυνσεως* καθώς και η *υπερδιαστασιολόγηση* των κατασκευών που γίνεται εξ' αιτίας της διάβρωσης.

Οι ενεργειακές, τέλος, επιπτώσεις της διάβρωσης συνίστανται στην τεράστια ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία παραγωγής των μετάλλων. Είναι χαρακτηριστική η περίπτωση του σιδήρου, το 1/4 της παγκόσμιας παραγωγής του οποίου (ήτοι 150 εκατομμύρια τόνοι) καταστρέφεται ετησίως εξ' αιτίας της διάβρωσης.

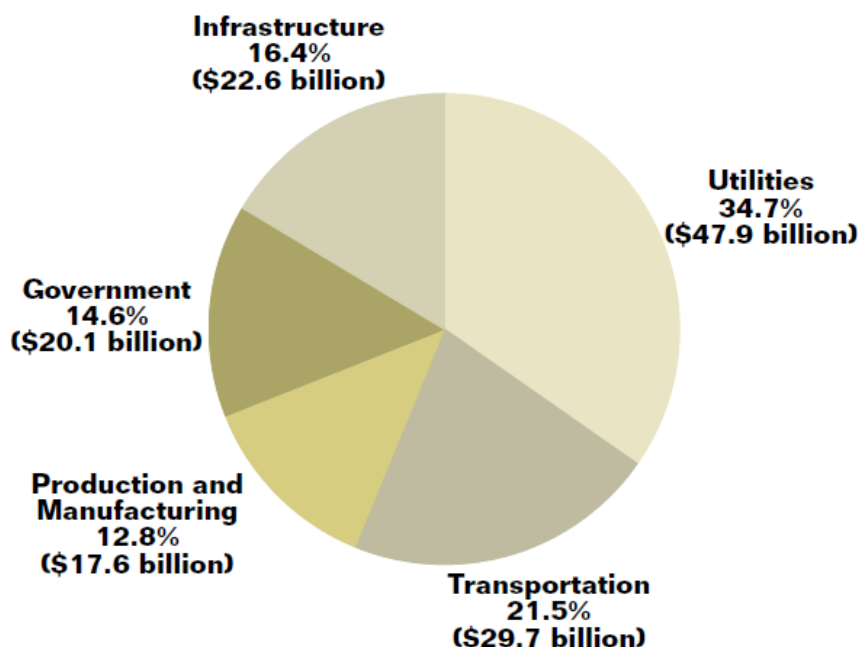
Διάφορες μελέτες που αφορούν στο κόστος της διάβρωσης έλαβαν χώρα τις τελευταίες δεκαετίες σε διάφορα κράτη και καταδεικνύουν το τεράστιο κόστος της. Πρώτα οι ΗΠΑ εκπόνησαν μελέτη το 1949 (H.H. Uhlig), αθροίζοντας το σύνολο του κόστους των υλικών με αυτό των διεργασιών σχετιζομένων με τον έλεγχο της διάβρωσης. Στη δεκαετία του '70 ακολούθησαν εθνικές μελέτες από την Ιαπωνία, το Ην. Βασίλειο και τις ΗΠΑ, και του '80 από το Κουβέιτ και την Αυστραλία. Τα αποτελέσματα συνοφίζονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μελετών εκτίμησης του κόστους της διάβρωσης σε διάφορα βιομηχανικά κράτη.^[3]

Χώρα	Συνολικό ετήσιο κόστος διάβρωσης	% ΑΕΠ	Έτος
ΗΠΑ	\$5.5 δις	2.1	1949
Ην. Βασίλειο	£1.365 εκ/μύρια	3.5	1970
Ιαπωνία	\$9.2 δις	1.8	1974
ΗΠΑ	\$70 δις	4.2	1975
Αυστραλία	\$2 δις	1.5	1982
Κουβέιτ	\$1 δις	5.2	1987
Δ.Γερμανία	\$6 δις	3.0	1967

Η πιο πρόσφατη, εκτεταμένη και πλέον αξιολογήσιμη μελέτη εγένετο το 2002 στις ΗΠΑ υπό τους G.H. Koch, M.P.H. Brongers, και N.G. Thompson της CC Technologies Laboratories (συν DNV Columbus), Y.P. Virmani της FHWA και J.H. Payer του Παν/μίου Case Western Reserve, για λογαριασμό της Ομοσπονδιακής Διεύθυνσης Αυτοκινητοδρόμων (U.S. Federal Highway Administration – FHWA) και του Εθνικού Συνδέσμου Μηχανικών Διάβρωσης (NACE). Σχετίζεται με το άμεσο κόστος της διάβρωσης των μετάλλων σχεδόν σε κάθε τομέα της βιομηχανίας (υποδομές, μεταφορές, παραγωγή, κατασκευαστικό τομέα κλπ) και καλείται «Κόστος Διάβρωσης και Στρατηγικές Πρόληψης στις ΗΠΑ» (Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States). Η οικονομία των ΗΠΑ χωρίστηκε σε πέντε (5) κύριους τομείς (υποδομή, υπηρεσίες, μεταφορές, παραγωγή και κατασκευές – βλ. Διάγραμμα 1) οι οποίοι χωρίστηκαν σε 26 υποτομείς.

Τα αποτελέσματα της μελέτης τοποθετούν το άμεσο κόστος της διάβρωσης στις ΗΠΑ στα \$276 δισεκατομμύρια ήτοι περίπου 3,1% του ΑΕΠ (\$970 κατά κεφαλήν), εκτιμώντας το έμμεσο κόστος αυτής να ανέρχεται στα ίδια επίπεδα με το άμεσο, για ένα σύνολο \$552 δις. ήτοι περίπου 6,2% του ΑΕΠ. Εδώ σημειούται ότι το τελικό νούμερο προέκυψε αθροίζοντας πρώτα το κόστος του κάθε τομέα (\$137,9 δις) και εν συνεχεία κάνοντας προεκβολή (extrapolation) στο σύνολο της οικονομίας των ΗΠΑ (\$8,79 τρις). Εκτιμάται, μάλιστα ότι ένα 25% - 30% του κόστους της ετήσιας διάβρωσης θα μπορούσε να αποφευχθεί εάν εφαρμόζοντο οι βέλτιστες πρακτικές πρόληψης και διαχείρισής της.



Διάγραμμα 1: Επιμέρους ανάλυση του κόστους της διάβρωσης ανά κατηγορία βιομηχανίας^[8]

Πίνακας 2: Ετήσια κόστη για τον έλεγχο της διάβρωσης.^[3]

Υλικά και Υπηρεσίες	Κόστος	
	Δισεκ. \$	%
Οργανικά επιστρώματα	107.2	88.3
Μεταλλικά επιστρώματα	1.4	1.2
Μέταλλα και κράματα	7.7	6.3
Αναστολείς διάβρωσης	1.1	0.9
Πολυμερή	1.8	1.5
Ανοδική και καθοδική προστασία	0.98	0.8
Υπηρεσίες	1.2	1.0
Έρευνα και ανάπτυξη	0.02	<0.1
Εκπαίδευση	0.01	<0.1
Σύνολο:	\$121.41	100%

Λεπτομερείς επιμέρους αναλύσεις ανά υποτομέα έγιναν, στα πλαίσια όμως του ενδιαφέροντος της τρέχουσας εργασίας θα αρκεστούμε να παραθέσουμε στοιχεία που αφορούν στη Ναυτιλία. Ο αριθμός των πλοίων στις ΗΠΑ περιλαμβάνει 737 σκάφη στις Μεγάλες Λίμνες, 33.668 πλοία στους ποταμούς και 7.014 στους ωκεανούς, 12.300.000 σκάφη αναψυχής και 122 κρουαζιερόπλοια. Το κόστος της διάβρωσης στο ναυτιλιακό τομέα ανέρχεται σε \$ 2,7 δις, εκ των οποίων 1,1 σε κατασκευές νέων πλοίων, 0,8 σε συντήρηση/επισκευές και 0,8 σε χρόνο μη λειτουργίας (down-time) σχετιζόμενο με τη διάβρωση.

1.4 Ηλεκτροχημεία της Διάβρωσης ^{[1], [9]}

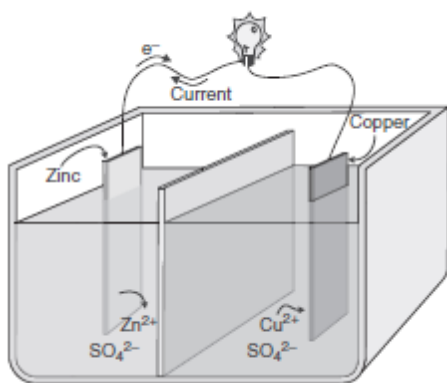
1.4.1 Ηλεκτροχημικές Αντιδράσεις

Ως ηλεκτροχημική αντίδραση καλείται η χημική αντίδραση που περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων καθώς επίσης και την οξειδωση και την αναγωγή. Εφόσον η μεταλλική διάβρωση είναι σχεδόν πάντα μια ηλεκτροχημική διαδικασία, είναι σημαντικό να κατανοηθεί η φύση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Ένα σημαντικό επίτευγμα νωρίς στην ιστορία της ηλεκτροχημείας ήταν η παραγωγή πηγών ενέργειας, όπως οι συσσωρευτές που παρήγαγε ο Alessandro Volta. Στο κάτωθι σχήμα φαίνεται η αρχή ενός κελιού Daniell. Κατά τη διαδικασία της αντίδρασης, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τον ψευδάργυρο που διαβρώνεται προς τον χαλκό διαμέσου ηλεκτρικά αγώγιμης διαδρομής. Ο ψευδάργυρος χάνει ηλεκτρόνια πιο εύκολα από ότι ο χαλκός, έτσι τοποθετώντας ψευδάργυρο και χαλκό σε διαλύματα αλάτων τους προκαλείται ροή ηλεκτρονίων διαμέσου εξωτερικού σύρματος από τον ψευδάργυρο στο χαλκό. Η διαφορά στην προδιάθεση των δύο μετάλλων για διάβρωση οδηγεί σε ένα φαινόμενο που καλείται γαλβανική διάβρωση, ως θα δούμε και παρακάτω (εκ του Luigi Galvani που πρώτος παρατήρησε το φαινόμενο).

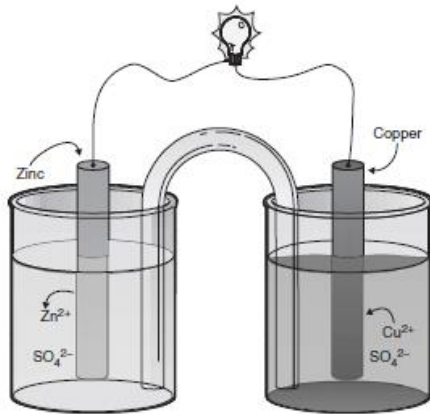
Άνοδος ψευδαργύρου: $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

Κάθοδος χαλκού: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)}$

Ο σκοπός του διαχωριστή στην πρώτη εικόνα είναι να διατηρεί κάθε μέταλλο σε επαφή με τα δικά του διαλυτά σουλφίδια, που είναι απαραίτητο για να διατηρηθεί η τάση του κελιού σχετικά σταθερή. Το ίδιο μπορεί να επιτευχθεί και με μια γέφυρα αλάτων, όπως φαίνεται στη δεύτερη εικόνα. Αυτή η γέφυρα παρέχει το ηλεκτρολυτικό μονοπάτι που απαιτείται για να κλείσει το κύκλωμα στο ηλεκτρολυτικό κελί. Η περίπτωση αυτή συναπαντάται συχνά σε κελιά φυσικής διάβρωσης όπου το περιβάλλον δρα ως τον ηλεκτρολύτη. Η αγωγιμότητα υδάτινων περιβαλλόντων συχνά σχετίζεται με τη διαβρωτική τους δράση.



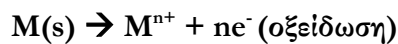
Σχήμα 1: Κελί Daniell ^[9]



Σχήμα 2: Κελί Daniell με γέφυρα αλάτων ^[9]

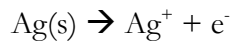
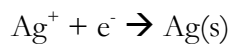
1.4.2 Ανοδικές και Καθοδικές Αντιδράσεις – Νόμος του Faraday

Η **ανοδική αντίδραση** που λαμβάνει χώρα κατά τη διάβρωση γράφεται στη γενική μορφή:



Αυτό σημαίνει ότι η διάβρωση του μετάλλου M έχει ως αποτέλεσμα την οξείδωση του μετάλλου M σε ένα ιόν φορτίου $n+$ και την απελευθέρωση n ηλεκτρονίων. Η τιμή του n εξαρτάται κυρίως από τη φύση του μετάλλου.

Εάν το ρεύμα που παράγεται από την ανοδική αντίδραση που προαναφέρθη ήταν γνωστό, θα μπορούσαμε να το μετατρέψουμε σε μία ισοδύναμη απώλεια μάζας ή ρυθμό διάβρωσης, χάρη στη χρήσιμη σχέση που ανακάλυψε ο Michael Faraday τον Δέκατο Ένατο αιώνα. Οι εμπειρικοί του νόμοι για την ηλεκτρόλυση σχετίζουν το ρεύμα μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης με τον αριθμό των moles του στοιχείου που υφίσταται την αντίδραση και με τον αριθμό των moles των ηλεκτρονίων που εμπλέκονται. Υποθέτοντας ότι το φορτίο που απαιτείται για τέτοια αντίδραση είναι ένα (1) ηλεκτρόνιο ανά μόριο, όπως επί παραδείγματι η διάβρωση του αργύρου που περιγράφεται στην κάτωθι εξίσωση:



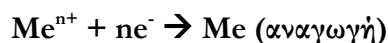
Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η αντίδραση με 1 mol αργύρου θα απαιτούσε 1 mol ηλεκτρονίων, ή έναν αριθμό Avogadro ηλεκτρονίων (6.022×10^{23}). Το φορτίο ενός mol ηλεκτρονίων είναι γνωστό ως ένα (1) faraday (F). Το F σχετίζεται με άλλες ηλεκτρικές μονάδες μέσω του ηλεκτρονικού φορτίου, το οποίο είναι $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb (C). Πολλαπλασιάζοντας το ηλ/κο φορτίο με τον αριθμό του Avogadro μας δίνει ότι 1 F ισούται με 96,485 C / (mol ηλ/νίων). Συνδυάζοντας τις αρχές του Faraday με συγκεκριμένες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις της γνωστής στοιχειομετρίας μας οδηγεί στην κάτωθι εξίσωση:

$$Q = F \cdot \Delta n \cdot n.$$

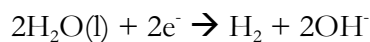
Το φορτίο Q περιγράφεται με όρους ηλ/κου ρεύματος ως:

$Q = \int_0^t I \cdot dt$, όπου I το ολικό ρεύμα (σε Amperes, A) και t η χρονική διάρκεια της η/χ αντίδρασης σε seconds.

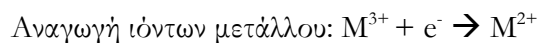
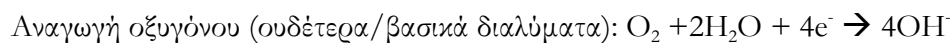
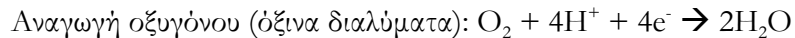
Όσον αφορά τις **καθοδικές αντιδράσεις**, γνωρίζουμε ότι όταν ιόντα υδρογόνου ανάγονται στην ατομική τους μορφή συχνά συνδυάζονται για την παραγωγή αέριου υδρογόνου μέσω αντίδρασης με ηλεκτρόνια σε καθοδική επιφάνεια. Επακολούθως, η ισορροπία ανάμεσα στα όξινα ιόντα υδρογόνου (H^+) και τα αλκαλικά υδροξύλια ιόντα (OH^-) διαταράσσεται και οδηγεί σε λιγότερο όξινο ή περισσότερο αλκαλικό ή βάση, στη διεπιφάνεια διαβρώσεως. Γενικότερα μια καθοδική αντίδραση (αναγωγή) δίδεται από την κάτωθι σχέση:

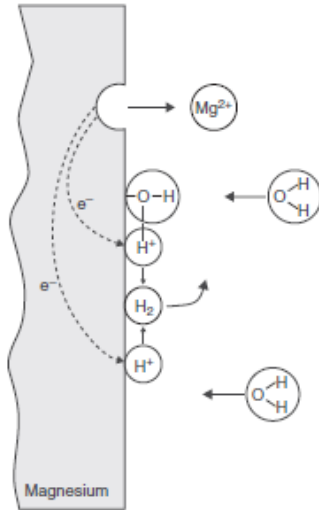


Σε ουδέτερα ύδατα, η ανοδική διάβρωση ορισμένων μετάλλων όπως το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος ή το μαγνήσιο αναπτύσσει αρκετή ενέργεια για να διασπάσει το ύδωρ, βάσει της ακόλουθης καθοδικής αντίδρασης:



Διάφορες άλλες καθοδικές αντιδράσεις συναπαντώνται κατά τη διάβρωση των μετάλλων, ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον:





Σχήμα 3: Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις κατά τη διάβρωση του Μαγνησίου σε ουδέτερο ύδωρ [9]

1.5 Θερμοδυναμική της Διάβρωσης [1], [3], [9], [10]

1.5.1 Ελεύθερη Ενέργεια

Σε ηλεκτρικές και ηλεκτροχημικές διεργασίες, ως ηλεκτρικό έργο ορίζεται το γινόμενο του φορτίου που μεταφέρθη (Q) επί το δυναμικό (E) μέσω του οποίου κινείται. Εφόσον το έργο αυτό παραχθεί σε ένα ηλεκτροχημικό κελί στο οποίο η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο ημιστοιχεία του είναι E και το φορτίο είναι ίσο με αυτό του ενός (1) mol αντιδρώντος στο οποίο μεταφέρονται n mol ηλεκτρονίων, τότε το ηλεκτρικό έργο (W) στο κελί ισούται με

$$W = \Delta G = -nFE$$

Όπου ΔG η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs. Από ηλεκτροχημικές μετρήσεις μπορούμε να εξάγουμε και άλλες θερμοδυναμικές ποσότητες, όπως τη μεταβολή της εντροπίας (ΔS) και τη μεταβολή της ενθαλπίας (ΔH) σε ένα κελί:

$$\Delta S = -\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p \rightarrow \Delta S = nF\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p$$

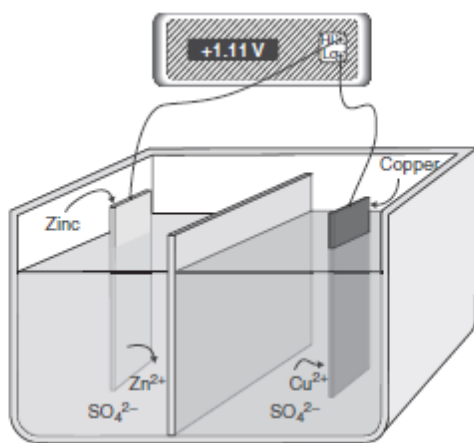
Και

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S = nF\left[T\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p - E\right]$$

Όπου T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Τα ηλεκτροδυναμικά συνδυάζονται αλγεβρικά για να δώσουν το δυναμικό του κελιού. Για γαλβανικό κελί, όπως το κελί Daniell που προαναφέρθη, θετική τάση κελιού προκύπτει σύμφωνα με την κάτωθι εξίσωση

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}}$$



Σχήμα 4: Κελί Daniell κατάλληλα συνδεδεμένο για μέτρηση του δυναμικού ισορροπίας του ^[9]

Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, μια αυθόρμητη δράση υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία έχει ως συνέπεια την ελάττωση της ελεύθερης ενθαλπίας του συστήματος. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας σε ένα γαλβανικό κελί ή σε μία αυθόρμητη αντίδραση κελιού, είναι αρνητική και η θετική τάση του κελιού είναι μέτρο της διαθέσιμης ενέργειας. Το αντίθετο ισχύει σε ένα ηλεκτρολυτικό κελί που απαιτεί την επιβολή εξωτερικού δυναμικού για να οδηγήσει την ηλεκτρολυτική αντίδραση, στην οποία περίπτωση το E_{cell} θα ήταν αρνητικό.

1.5.2 Πρότυπα Ηλεκτροδιακά Δυναμικά – Η Εξίσωση του Nernst

Η διαφορά δυναμικού σε ένα ηλεκτροχημικό κελί είναι η διαφορά δυναμικού που μετράται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρικούς αγωγούς συνδεδεμένους στα ηλεκτρόδια. Στο εξωτερικό κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια ρέουν από το πιο αρνητικό στο πιο θετικό σημείο και, κατά σύμβαση, το ρεύμα ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση. Εφόσον το ηλεκτροδιακό δυναμικό μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, τα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα μπορούν να οριστούν ότι ρέουν από το λιγότερο θετικό ηλεκτρόδιο προς το περισσότερο θετικό. Ένα βολτόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τις διαφορές δυναμικού σε ένα ηλεκτροχημικό κελί αλλά δεν μπορεί να μετρήσει απ' ευθείας το πραγματικό δυναμικό ενός μεμονωμένου ηλεκτροδίου. Υπάρχουν διάφορα ηλεκτρόδια αναφοράς για τη διεκπεραίωση των άνωθι μετρήσεων, με χαρακτηριστικότερα τα:

- Ηλεκτρόδιο αναφοράς Υδρογόνου
- Ηλεκτρόδιο Κορεσμένου Καλομέλανα
- Ηλεκτρόδιο Αργύρου – Χλωριούχου Αργύρου
- Ηλεκτρόδιο Χαλκού – Θεϊκού Χαλκού
- Ηλεκτρόδιο Υδραργύρου – Θεϊκού Υδραργύρου
- Ηλεκτρόδιο Οξειδίου του Υδραργύρου

Στον πίνακα που παρατίθεται κάτωθι διακρίνουμε τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά (αντιδράσεις ισορροπίας και Nernst, συνθήκες, διαφορά δυναμικού από το ΠΗΥ, θερμοκρασιακός συντελεστής) των ηλεκτροδίων αναφοράς στους 25° C.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά συνηθέστερων ηλεκτροδίων αναφοράς στους 25° C [9]

Name	Equilibrium reaction and Nernst equation	Conditions	Potential (V vs. SHE)	T coefficient (mV °C ⁻¹)
Standard hydrogen electrode (SHE)	$2 H^+ + 2 e^- = H_2$	pH = 0	0.00	
	$E^0 - 0.059 \text{ pH}$			
Silver chloride	$AgCl + e^- = Ag + Cl^-$	$a_{Cl^-} = 1$	0.2224	-0.6
	$E^0 - 0.059 \log_{10} a_{Cl^-}$	0.1 M KCl	0.2881	..
		1.0 M KCl	0.235	..
		Saturated (KCl)	0.199	..
Calomel	$Hg_2Cl_2 + 2 e^- = 2 Hg + 2 Cl^-$	$a_{Cl^-} = 1$	0.268	
	$E^0 - 0.059 \log_{10} a_{Cl^-}$	0.1 M KCl	0.3337	-0.06
		1.0 M KCl	0.280	-0.24
		Saturated	0.241	-0.65
Mercurous sulfate	$Hg_2SO_4 + 2 e^- = 2 Hg + SO_4^{2-}$	$a_{SO_4^{2-}} = 1$	0.6151	
	$E^0 - 0.0295 \log_{10} a_{SO_4^{2-}}$			
Mercuric oxide	$HgO + 2 e^- + 2 H^+ = Hg + H_2O$		0.926	
	$E^0 - 0.059 \text{ pH}$			
Copper sulfate	$Cu^{2+} + 2 e^- = Cu$ (sulfate solution)	$a_{Cu^{2+}} = 1$	0.340	
	$E^0 + 0.0295 \log_{10} a_{Cu^{2+}}$	saturated	0.318	

Η εξίσωση του Nernst είναι ονομασθείσα από τον Γερμανό χημικό Walther Nernst που απέδειξε πολύ χρήσιμες σχέσεις ανάμεσα στην ενέργεια και το δυναμικό ενός κελιού προς τις συγκεντρώσεις των ιόντων και άλλων χημικών ειδών.

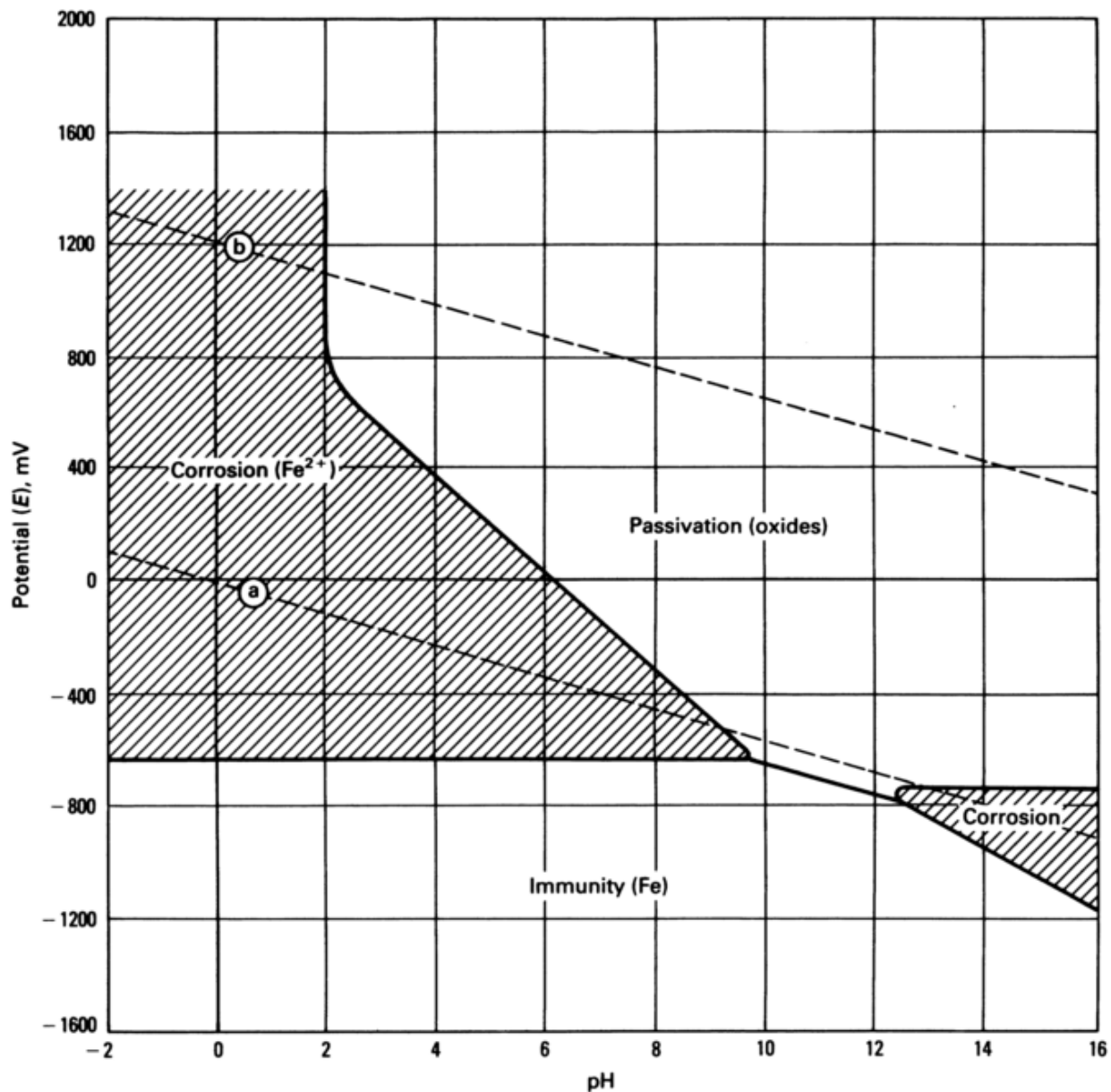
Στους 25° Κελσίου, η απλούστερη μορφή της εξίσωσης του Nernst για ηλεκτροδιακή αντίδραση σε αυτή τη θερμοκρασία είναι η:

$$E = E^0 - \frac{0.059}{n} \log_{10} Q_{\text{reaction}}$$

Όπου Q_{reaction} ο συντελεστής αντίδρασης, που ισούται με το λόγο της συγκέντρωσης των προϊόντων προς τη συγκέντρωση των αντιδρώντων σε μία αντίδραση.

1.5.3 Διαγράμματα Δυναμικού – pH (Pourbaix)

Τα διαγράμματα δυναμικού – pH μπορούν να θεωρηθούν ως χάρτες που δείχνουν τη σταθερότητα διαφόρων φάσεων ανάλογα με τις συνθήκες της οξειδωτικής ικανότητας του διαλύματος και της οξύτητας ή αλκαλικότητας (pH) σε υδατικά ηλεκτροχημικά συστήματα. Αμέσως ενδιαφέροντος είναι το διάγραμμα δυναμικού – pH του χάλυβα σε νερό, που παρατίθεται κάτωθι



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Δυναμικού/pH του Σιδήρου σε H₂O [3]

1.6 Κινητική της Διάβρωσης [1], [9]

1.6.1 Ρυθμοί Διάβρωσης

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από το ρεύμα της διάβρωσης, δηλαδή το ρυθμό της ροής των ηλεκτρονίων από ή προς τη διεπιφάνεια της αντίδρασης, και όχι από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου – καθόδου. Για αντίδραση οξείδωσης της μορφής $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$, ο νόμος του Faraday μας δίνει τη σχέση απώλειας μάζας m (g) της ουσίας του ηλεκτροδίου που απελευθερώνεται στην άνοδο συναρτήσει του χρόνου t (sec):

$$m = \frac{It(AB)}{nF}$$

Όπου I το ρεύμα της διάβρωσης, F η σταθερά του Faraday, AB το ατομικό βάρος του μετάλλου της ανόδου, n ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων του και t ο χρόνος.

Ο ρυθμός της διάβρωσης προκύπτει από την παραπάνω σχέση εάν τη διαιρέσουμε με το χρόνο t και το εμβαδόν της επιφάνειας της ανόδου A:

$$r = \frac{m}{tA} = \frac{i(AB)}{nF}$$

Όπου i η πυκνότητα του ρεύματος (ιση με I/A).

Ανάλογα τη μονάδα της ετήσιας διεισδύσεως που θέλουμε, mils/y (χιλιοίοντσες ανά έτος) ή μm/y ή mm/y, ο ρυθμός διάβρωσης λαμβάνεται από τις αντίστοιχες σχέσεις:

$$mpy = \frac{534W}{DAT}, \mu my = \frac{87600W}{DAT}, mmy = \frac{87,6W}{DAT}$$

Όπου W η απώλεια βάρους σε mg, D η πυκνότητα σε gr/cm³, T ο χρόνος σε h, A η επιφάνεια σε in² για την πρώτη σχέση και σε cm² για τις άλλες δύο.

1.6.2 Ηλεκτροχημική Πόλωση

Οι θερμοδυναμικές αρχές που συναντήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη των ρευμάτων ή των ρυθμών διάβρωσης. Οι διαβρωτικές διεργασίες διέπονται από τα καθοδικά και τα ανοδικά ρεύματα, τα οποία ελέγχονται από φαινόμενα **πόλωσης**.

Όταν δύο ή περισσότερες αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε μία μεταλλική επιφάνεια, το δυναμικό της διάβρωσης αποτελεί έναν «συμβιβασμό» ανάμεσα στα διάφορα δυναμικά ισορροπίας όλων των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων. Η απόκλιση ($E - E_{eq}$) από το δυναμικό ισορροπίας (E_{eq}) του ημι-στοιχείου ονομάζεται πόλωση και μετράται με όρους υπέρτασης ($\eta = E - E_{eq}$).

Η πόλωση καλείται *ανοδική* όταν οι ανοδικές διεργασίες στο ηλεκτρόδιο επιταχύνονται μετατοπίζοντας το δυναμικό στην θετική (ευγενή) κατεύθυνση και *καθοδική* όταν οι καθοδικές διεργασίες επιταχύνονται μετατοπίζοντας το δυναμικό στην αρνητική (δραστική) κατεύθυνση. Υπάρχουν τρία (3) ξεχωριστά είδη πόλωσης, και είναι αθροιστικά σύμφωνα με την κάτωθι εξίσωση:

$$\eta_{total} = \eta_{act} + \eta_{conc} + iR$$

Όπου η_{act} η υπέρταση (πόλωση) ενεργοποίησης, η_{conc} η υπέρταση συγκέντρωσης και iR η ωμική πτώση. Η υπέρταση ενεργοποίησης περιγράφει την κινητική της μεταφοράς φορτίου, είναι πάντα παρούσα και συνιστά το κύριο συστατικό της πόλωσης σε χαμηλά ρεύματα/τάσεις πόλωσης καθώς και σε ισχυρά οξέα. Η πόλωση συγκέντρωσης περιγράφει τους περιορισμούς της μεταφοράς **μάζας** στις ηλεκτροχημικές διεργασίες και είναι κυρίαρχη σε υψηλότερα ρεύματα/τάσεις πόλωσης καθώς και όταν

η συγκέντρωση του δραστικού στοιχείου είναι χαμηλή (πχ σε διάλυμα οξέως) ή σε αερισμένο ύδωρ όπου το δραστικό συστατικό (διαλυμένο οξυγόνο) ευρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Η ωμική πτώση λαμβάνει υπ' όψιν την ηλεκτρολυτική αντίσταση ενός περιβάλλοντος όταν τα ανοδικά και καθοδικά στοιχεία μιας διαβρωτικής αντίδρασης διαχωρίζονται από το περιβάλλον όσο ακόμα αυτά συνιστούν ηλεκτρικό ζεύγος και συνιστά πολύ σημαντικό παράγοντα σε φαινόμενα διάβρωσης όπου ο διαχωρισμός των περιοχών ανοδικής και καθοδικής διάβρωσης είναι έντονος (πχ στη διάβρωση χαραγής), καθώς και σε προστατευτικές μεθόδους όπως η ανοδική και καθοδική προστασία που εξαναγκάζουν τη μεταβολή του δυναμικού της προστατευόμενης κατασκευής μεταφέροντας ρεύμα στο περιβάλλον.

Γνώση του είδους της πόλωσης είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση των χαρακτηριστικών ενός διαβρωτικού συστήματος. Για παράδειγμα, εάν η διάβρωση διέπεται από πόλωση συγκέντρωσης, τότε αλλαγές στο ρυθμό διάχυσης του δραστικού συστατικού (π.χ. οξυγόνο) θα αυξήσει το ρυθμό διάβρωσης. Σε ένα τέτοιο σύστημα αναμένεται ότι η ανάδευση του υγρού τείνει να αυξήσει το ρυθμό διάβρωσης του μετάλλου. Αντίθετα, εάν μια αντίδραση διάβρωσης διέπεται από πόλωση ενεργοποίησης, τότε ενδεχόμενη ανάδευση δεν θα επηρέαζε το ρυθμό της διάβρωσης.

1.7 Τα είδη της Διάβρωσης ^{[1], [2], [3], [9], [11]}

Μια πρώτη διάκριση των ειδών της διάβρωσης είναι αυτή της *υγρής διάβρωσης*, η οποία λαμβάνει χώρα παρουσία υδατικού περιβάλλοντος και υπό την οποία εντάσσεται το μεγαλύτερο ποσοστό της διάβρωσης, και της *ξηρής διάβρωσης* ή *οξειδωσης*, η οποία λαμβάνει χώρα απουσία υγρής φάσης σε ξηρό αέριο περιβάλλον.

Σε λεπτομερέστερο βαθμό, τα είδη της διάβρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα κριτήρια. Στη συνέχεια κατονομάζονται τα είδη της διάβρωσης βάση του κριτηρίου της επίδρασης ή μη των εξωτερικών διεργασιών.

I. Διάβρωση που δεν επηρεάζεται από καμία εξωτερική διεργασία

I.1 Ομοιόμορφη Διάβρωση (Uniform Corrosion)

- Υδατική Διάβρωση (Aqueous Corrosion)
- Ατμοσφαιρική Διάβρωση (Atmospheric Corrosion)
- Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic Corrosion)
- Διάβρωση από Ρεύματα Διαφυγής (Stray-Current Corrosion)
- Διάβρωση Τηγμένων Αλάτων (Molten Salt Corrosion)
- Διάβρωση Υγρών Μετάλλων (Liquid Metal Corrosion)
- Αέρια Διάβρωση Υψηλών Θερμοκρασιών (High-Temperature Gaseous Corrosion)

I.2. Εντοπισμένη Διάβρωση (Localized Corrosion)

- Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion)
- Διάβρωση Χαραγής ή σε σχισμές (Crevice Corrosion)

- Νηματοειδής Διάβρωση (Filiform Corrosion)
- Περιχρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)
- Εκλεκτική Προσβολή - Έκπλυση (Selective Attack - Leaching)

I.3. Μεταλλουργικά Επηρεασμένη Διάβρωση (Metallurgically Influenced Corrosion)

- Διάβρωση Συγκολλήσεων Ανθρακούχου Χάλυβα (Corrosion of Carbon Steel Weldments)
- Διάβρωση Συγκολλήσεων Ανοξειδωτού Χάλυβα (Corrosion of Stainless Steel Weldments)
- Διάβρωση Συγκολλήσεων Μη Σιδηρούχων Κραμάτων (Corrosion of Nonferrous Alloy Weldments)

I.4. Μικροβιολογική Διάβρωση (Microbiologically) Influenced Corrosion)

II. Διάβρωση που επηρεάζεται από άλλες διεργασίες

II.1. Μηχανικά Υποβοηθούμενη Υποβάθμιση (Mechanically Assisted Degradation)

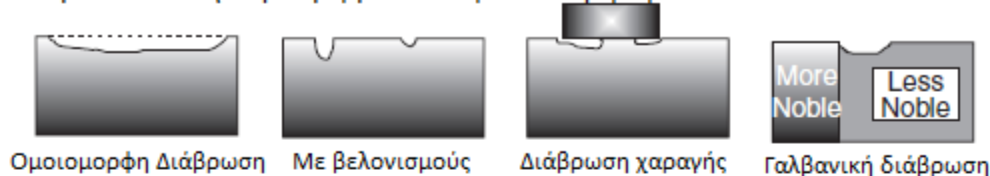
- Υδατικές Αλληλεπιδράσεις Διάβρωσης-Τριβής (Aqueous Corrosion-Wear Interactions)
 - Σπηλαιώδης Μηχανική Διάβρωση (Cavitation)
 - Διάβρωση Εκτριβής ή Ρευστομηχανική Διάβρωση (Erosion Corrosion)
- Αέριες Αλληλεπιδράσεις Διάβρωσης - Τριβής (Gaseous Corrosion-Wear Interactions)

II.2. Περιβαλλοντικά Υποβοηθούμενη Ρωγμάτωση (Environmentally Induced Cracking)

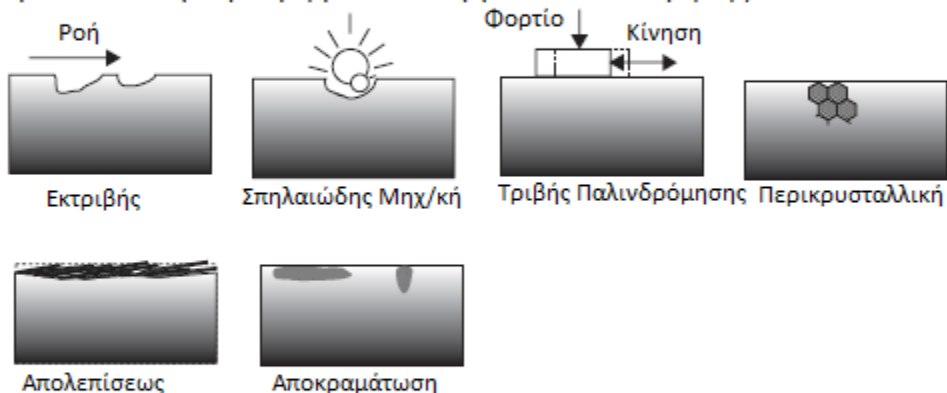
- Ρωγμάτωση από Διάβρωση με Μηχανική Καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)
 - Διάβρωση από Τριβή Παλινδρόμησης (Fretting Corrosion)
 - Διάβρωση Κόπωσης (Corrosion Fatigue)
 - Βλάβη από Υδρογόνο (Hydrogen Damage)
- Ψαθυροποίηση Επαγόμενη Υγρών Μετάλλων (Liquid Metal Induced Embrittlement)
- Ψαθυροποίηση Επαγόμενη Στερεών Μετάλλων (Solid Metal Induced Embrittlement)

Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης παρατίθενται κάτωθι σχηματικά, αυτή τη φορά ταξινομημένες με βάση το κριτήριο της ευκολίας παρατηρήσεώς τους και δη σε αυτές που εντοπίζονται με απλή οπτική παρατήρηση, σε αυτές που ενδεχομένως απαιτούν πρόσθετα μέσα ταυτοποίησης και, τέλος, σε αυτές που ταυτοποιούνται κατόπιν μικροσκοπικής επιθεωρήσεως:

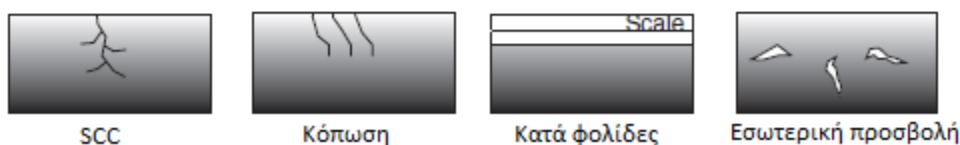
Ομάδα I: Αναγνωρίσιμη με οπτική επιθεώρηση



Ομάδα II: Αναγνωρίσιμη με ειδικά εργαλεία επιθεώρησης



Ομάδα III: Αναγνωρίσιμη κατόπιν μικροσκοπικής επιθεώρησης



Σχήμα 5: Ταξινόμηση συνηθέστερων μορφών διάβρωσης ως προς την ευκολία παρατηρήσως ^[9]

1.7.1 Ομοιόμορφη ή Γενική Διάβρωση (Uniform or General Corrosion)

Πρόκειται για το είδος διάβρωσης με τη μεγαλύτερη απώλεια σε βάρος μετάλλου και χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης στην επιφάνεια. Η ομοιόμορφη διάβρωση είναι εύκολα ανιχνεύσιμη και προβλέψιμη, για το λόγο αυτό θεωρείται λιγότερο επικίνδυνη από άλλες μορφές διάβρωσης, εκτός των περιπτώσεων βέβαια όπου η διαβρωθείσα επιφάνεια δεν είναι σε εμφανές σημείο (π.χ. εσωτερικό αγωγών). Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος ή κατασκευής, η πρόβλεψη ενός περιθωρίου διάβρωσης (corrosion allowance) είναι μία εκ των απλούστερων μεθόδων αντιμετώπισης της ομοιόμορφης διάβρωσης. Ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος μετρήσεως της εκτάσεως της ομοιόμορφης διάβρωσης είναι ο έλεγχος με υπέρηχους. Οι κυριότερες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της διάβρωσης αυτής είναι η επιλογή του βέλτιστου υλικού για το δεδομένο περιβάλλον, η εφαρμογή επικαλύψεων και η καθοδική προστασία.

1.7.2 Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic Corrosion)

Η γαλβανική διάβρωση αποτελεί μία εκ των συνηθέστερων μορφών διάβρωσης στο ναυπηγικό τομέα. Συχνά συναντάται στην καθομιλουμένη με τον εσφαλμένο όρο «ηλεκτρόλυση». Αφορά στη διάβρωση που λαμβάνει χώρα όταν δύο ανόμοια μέταλλα συνδέονται αγώγιμα, παρουσία ηλεκτρολύτη. Το λιγότερο ευγενές μέταλλο γίνεται άνοδος και τείνει να υφίσταται διάβρωση σε ταχύ ρυθμό, ενώ το πιο ευγενές μέταλλο δρα ως κάθοδος και υφίσταται μικρή έως μηδαμινή διάβρωση. Το φαινόμενο πρώτα ανακαλύφθηκε στα τέλη του 18^ο αιώνα από τον Luigi Galvani και εν συνεχεία τέθηκε σε εφαρμογή το 1800 από τον Alessandro Volta ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό κελί (μπαταρία). Εφαρμογή της αρχής για την προστασία μεταλλικών κατασκευών έλαβε χώρα στις αρχές του 19^{ου} αιώνα από τον Sir Humphry Davy.

Το δυναμικό ενός μετάλλου σε ένα διάλυμα σχετίζεται με την ενέργεια που απελευθερώνεται όταν το μέταλλο διαβρώνεται. Οι διαφορές στα δυναμικά διάβρωσης ανομοίων μετάλλων μετρώνται σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα από το ρεύμα που προκαλείται από τη γαλβανική δράση των μετάλλων αυτών. Η συμπεριφορά των μετάλλων προβλέπεται από την κατάταξή τους στη *γαλβανική σειρά*, ως αυτή παρατίθεται στο διάγραμμα 3. Μέταλλα με πιο θετικά δυναμικά διάβρωσης καλούνται ευγενή ή καθοδικά και αυτά με πιο αρνητικά δυναμικά διάβρωσης καλούνται δραστικά ή ανοδικά. Οι τιμές αυτές του δυναμικού δύνανται να αλλάξουν σε διαφορετικά διαλύματα ή σε δεδομένο διάλυμα με αλλαγή παραγόντων όπως η θερμοκρασία, ο αερισμός και η ταχύτητα της κίνησης. Για παράδειγμα, ο ψευδάργυρος είναι συνήθως πολύ ανοδικός σε σχέση με το χάλυβα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αλλά η διαφορά δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας έως ότου αυτή μηδενιστεί ή και ακόμα αναστραφεί στους 60° C.

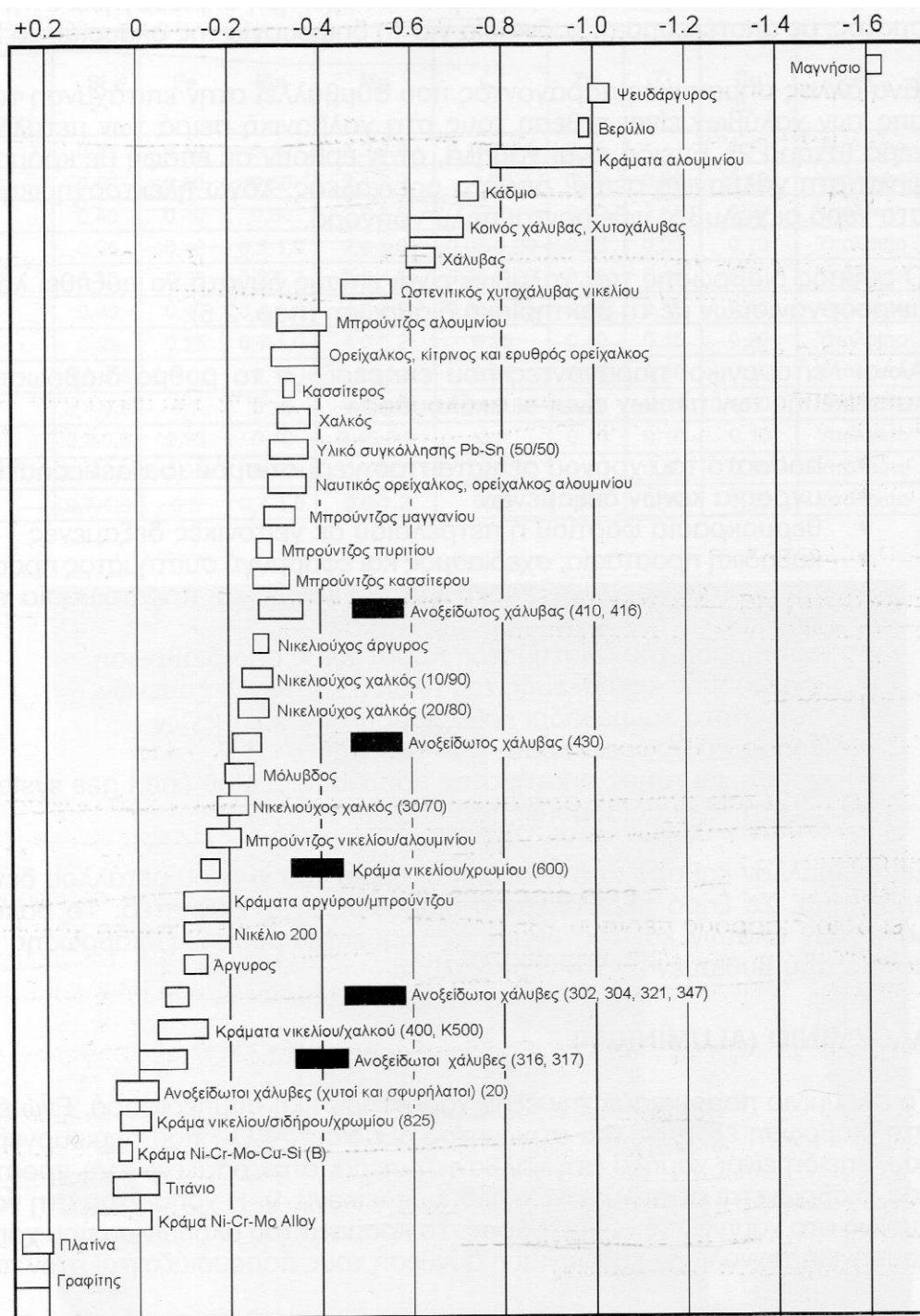
Η πόλωση είναι ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στη γαλβανική διάβρωση, καθώς εάν το πιο ευγενές μέταλλο πολώνεται πιο εύκολα το δυναμικό του μετατοπίζεται περισσότερο προς το πιο δραστικό μέταλλο. Η μετατόπιση του δυναμικού του πιο δραστικού μετάλλου στην κατεύθυνση της καθόδου, συνεπώς, ελαχιστοποιείται ώστε ο ρυθμός της γαλβανικής διάβρωσης μειούται. 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.

Γεωμετρικοί παράγοντες επιδρούν επίσης σημαντικά. Προεξέχων παράγοντας είναι η επίδραση της επιφάνειας, ή ο λόγος καθόδου προς την άνοδο. Όσο μεγαλύτερη είναι η άνοδος εν συγκρίσει με την άνοδο, τόσο περισσότερο ανάγεται το οξυγόνο και το γαλβανικό ρεύμα αυξάνεται. Δυσμενέστερη περίπτωση είναι η μεγάλη κάθοδος προς μικρή άνοδο. Η απόσταση, ακόμη, ανάμεσα στα μέταλλα επηρεάζει τη διάβρωση αντιστρόφως. 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.

Στη γαλβανική διάβρωση επιδρά ακόμη η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Εάν αυτή είναι χαμηλή, η διάβρωση είναι γενικά μικρή έως αμελητέα, εκτός ίσως στην περιοχή αμέσου επαφής των μετάλλων.

Μια υπο-μορφή της γαλβανικής διάβρωσης είναι η *διάβρωση εναπόθεσης*, κατά την οποία λαμβάνει χώρα διάβρωση με βελονισμούς σε υγρό περιβάλλον κατόπιν αποθέσεως ενός διαλυμένου καθοδικού μεταλλικού στοιχείου επί μεταλλικής επιφάνειας. Για παράδειγμα, γλυκό νερό διερχόμενο από χάλκινο αγωγό συσσωρεύει ιόντα χαλκού. Εάν το νερό αυτό συνεχίσει σε δοχείο από γαλβανισμένο χάλυβα ή αλουμίνιο, σωματίδια του μεταλλικού χαλκού δύνανται να εναποτεθούν επί αυτού, πιθανώς εκκινώντας διάβρωση με βελονισμούς. Τέτοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί ακόμα και σε συγκεντρώσεις ιόντων μικρότερων του ενός (1) ppm.

Διάφοροι είναι οι συνήθεις τρόποι αντιμετώπισης της γαλβανικής διάβρωσης. Κατ' αρχάς η επιλογή των υλικών, αποφεύγοντας συνδυασμούς μετάλλων/κεραμάτων μεγάλης διαφοράς ηλεκτραρνητικότητας. Έλεγχος του περιβάλλοντος διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με χρήση αναστολέων διάβρωσης. Προσέτι, δύναται να γίνει χρήση επιστρωμάτων μεταλλικής, οργανικής ή κεραμικής φύσης για το διαχωρισμό των επιφανειών των ανόμοιων μετάλλων. Χρησιμοποιούνται ακόμα διάφορες ηλεκτροχημικές τεχνικές όπως ο ηλεκτρικός αποκλεισμός (με χρήση μη μεταλλικών παρεμβυσμάτων ή επιστρωμάτων για την ηλεκτρική μόνωση) και η χρήση υλικών μετάβασης (transition materials), που είναι υλικά από τα ίδια μέταλλα με το γαλβανικό ζεύγος σε πολύστρωτη (laminar) δομή και τα οποία παρεμβάλλονται ανάμεσα στο ζεύγος ούτως ώστε τα όμοια μέταλλα να ζευγαρώνουν, επιτυγχάνοντας έτσι τον αποκλεισμό του ηλεκτρολύτη. Η καθοδική προστασία επίσης χρησιμοποιείται, είτε με τη μορφή των θυσιαζόμενων ανόδων είτε με του επιβαλλόμενου ρεύματος. Τέλος, ο σχεδιασμός της κατασκευής βοηθάει στον περιορισμό της γαλβανικής διάβρωσης, αποφεύγοντας δυσμενείς λόγους επιφάνειας, χαραγών κλπ.



Διάγραμμα 3: Γαλβανική Σειρά των μετάλλων σε θαλάσσιο ύδωρ [2]

1.7.3 Διάβρωση από Ρεύματα Διαφυγής (Stray-Current Corrosion)

Η διάβρωση από ρεύματα διαφυγής προκαλείται από εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Ως ρεύμα διαφυγής ορίζεται το ρεύμα εκείνο που ακολουθεί άλλη διαδρομή από αυτή του προβλεπόμενου κυκλώματός του, εξαιτίας συνάντησης διαδρομών με μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση (όπως π.χ. μια

μεταλλική κατασκευή ή έναν αγώγιμο ηλεκτρολύτη). Τα ρεύματα διαφυγής πηγάζουν συνήθως από γειώσεις ηλεκτρικών συστημάτων, εφαρμογές καθοδικής προστασίας και ηλεκτρικές μηχανές συγκόλλησης.

Μία από τις περιπτώσεις διάβρωσης από ρεύματα διαφυγής στη ναυπηγική που έχουν παρατηρηθεί είναι αυτή της πρόκλησης ρευμάτων διαφυγής από ηλεκτρική μηχανή συγκόλλησης επί πλοίου τα οποία προσβάλλουν τη γάστρα του πλοίου, καθώς τα ρεύματα που δημιουργούνται στα ηλεκτρόδια συγκόλλησης διέρχονται από το νερό σε μία γειωμένη γραμμή DC στην ξηρά. Άλλο παράδειγμα είναι χαλύβδινο πλοίο προσδεμένο σε εγκαταστάσεις ξηράς οι οποίες έχουν καθοδική προστασία. Αυτές μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση στο πλοίο.

Τα ρεύματα διαφυγής προκαλούν διάβρωση στο σημείο όπου εγκαταλείπουν τη μεταλλική κατασκευή και εισέρχονται στον ηλεκτρολύτη. Το σημείο εισόδου του ρεύματος στην κατασκευή γίνεται κάθοδος ενώ το σημείο εισόδου άνοδος. Τα σημεία αυτά δύνανται να απέχουν εκατοντάδες μέτρα. Συνήθως τα ρεύματα διαφυγής είναι συνεχούς ρεύματος αλλά ενίοτε εμφανίζονται και ως εναλλασσόμενου, τα οποία προκαλούν αύξηση της διάβρωσης όσο μειώνεται η συχνότητά τους. Συχνά τα τελευταία ευθύνονται για την καταστροφή του στρώματος παθητικοποίησης ή την εμφάνιση πορώδους σε αυτό σε διάφορα μέταλλα όπως π.χ. ο ανοξείδωτος χάλυβας.

Προστασία από τα ρεύματα διαφυγής επιτυγχάνεται πρώτιστα με τον περιορισμό της διαρροής του ρεύματος στον ηλεκτρολύτη, μέσω ζεύξεως (bonding) του αγωγού των ρευμάτων προς έναν προστατευόμενο αγωγό. Θυσιαζόμενες άνοδοι επίσης χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση του δυναμικού ώστε να αποφευχθεί η διαφυγή. Χρήση επιστρωμάτων επιφέρει αποτέλεσμα μόνον όταν συνδυάζεται με καθοδική προστασία και όχι μεμονωμένα. Συγκεκριμένα για την περίπτωση των ρευμάτων διαφυγής που προσβάλλουν τη γάστρα ενός πλοίου κατά την εκτέλεση εργασιών συγκολλήσεων, η αποφυγή τους επιτυγχάνεται απομονώνοντας πλήρως τα συστήματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων του πλοίου και του θαλασσίου ύδατος.

1.7.4 Διάβρωση Τηγμένων Αλάτων (Molten Salt Corrosion)

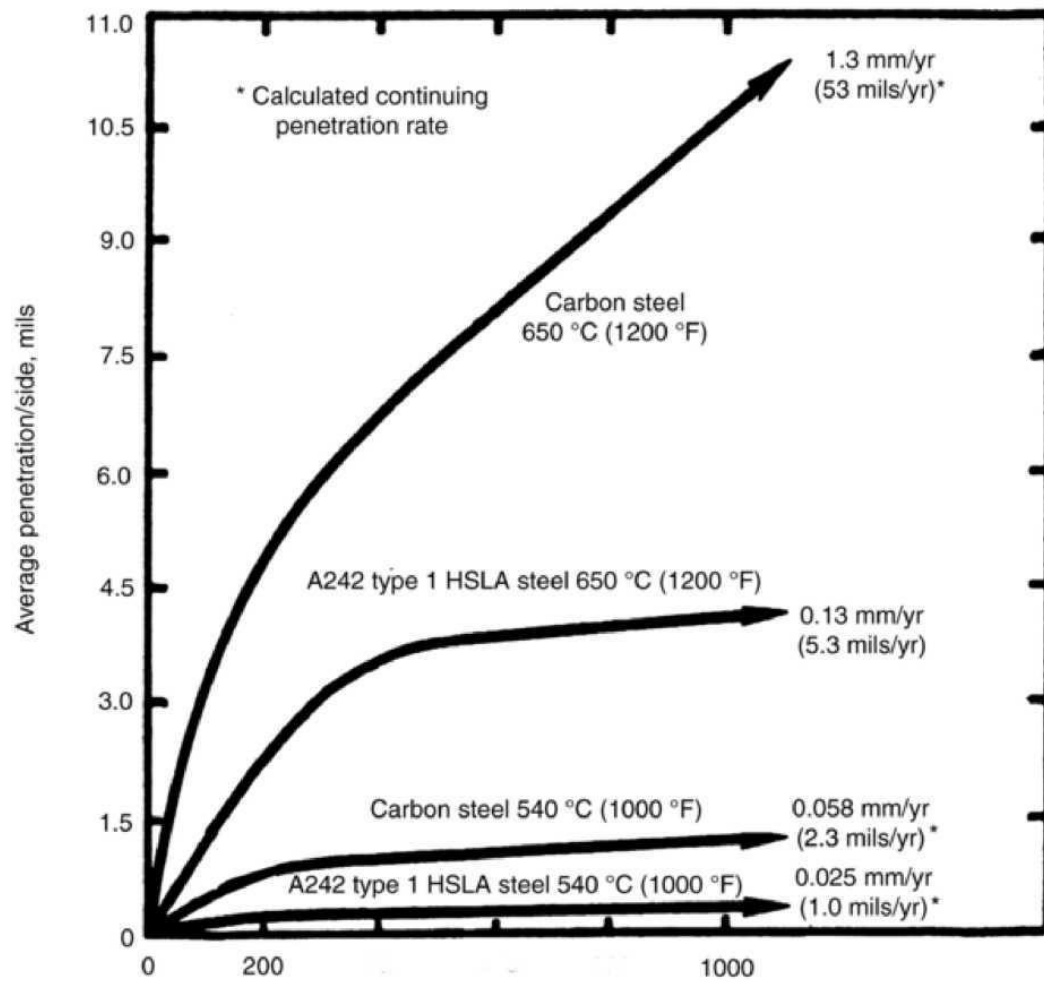
Εμφανίζεται με δύο (2) γενικούς μηχανισμούς. Ο πρώτος είναι η μεταλλική διάλυση που προκαλείται από τη διαλυτότητα του μετάλλου στο τήγμα. Ο δεύτερος και συνηθέστερος είναι η οξείδωση του μετάλλου σε ιόντα, μηχανισμός παραπλήσιος με αυτόν της υδατικής διάβρωσης. Το φαινόμενο της διάβρωσης λαμβάνει χώρα με τη μορφή της ομοιόμορφης ή γενικής οξείδωσης του μετάλλου, καθώς και σαν εκλεκτική επίπλυση σε υψηλότερες θερμοκρασίες και με τη μορφή της διάβρωσης με βελονισμούς και χαραγής σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, σε τηγμένα άλατα έχουν παρατηρηθεί και άλλες μορφές διάβρωσης αντίστοιχες με αυτές που συναντώνται σε υδατικά συστήματα, όπως η SCC, η γαλβανική, η εκτριβής και η τριβής με παλινδρομηση.

Για την προστασία από τη διάβρωση αυτή, κατ' αρχάς πρέπει το υλικό που θα επιλεγεί να δύναται να σχηματίζει παθητικό, αδιάλυτο στρώμα στο τήγμα. Ακόμα, ο περιορισμός της εισροής οξειδωτικών παραγόντων όπως το οξυγόνο και το νερό στο τήγμα επιβάλλεται. Η οξειδοαναγωγική δύναμη του τήγματος πρέπει να περιορίζεται, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με πρόσθετα. Τέλος σημαντική είναι η θερμοκρασία του λουτρού, η οποία πρέπει να είναι κατά το δυνατόν χαμηλή και ομοιόμορφη, για τον

περιορισμό του ρυθμού διάχυσης των ιόντων στο τήγμα και για την ελάττωση της διαλυτότητας των επιφανειακών παθητικών στρωμάτων.

1.7.5 Αέρια Διάβρωση Υψηλών Θερμοκρασιών (High-Temperature Gaseous Corrosion)

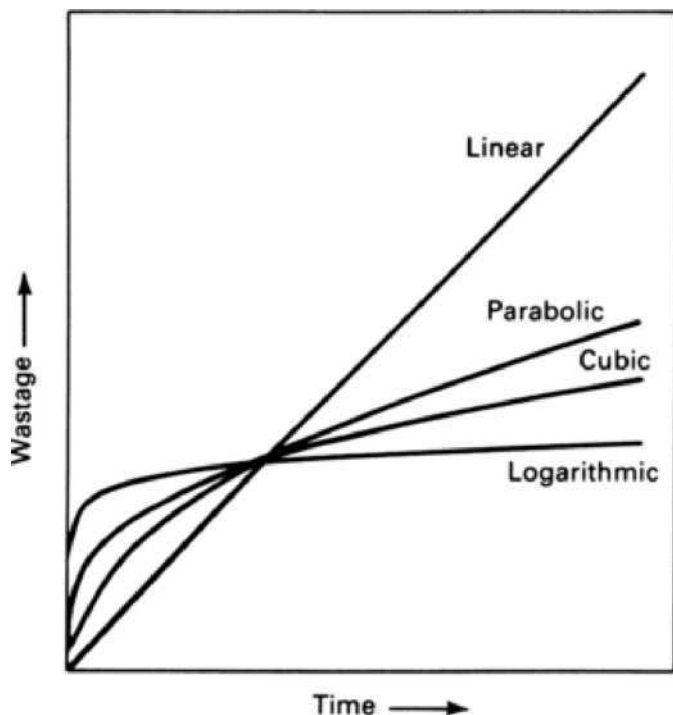
Συμβαίνει όταν μέταλλο εκτίθεται σε οξειδωτικό αέριο σε υψηλή θερμοκρασία, δίχως την ανάγκη παρουσίας υγρού ηλεκτρολύτη. Ο βαθμός της προσβολής (σε όρους αύξησης βάρους) αυξάνει σημαντικά με τη θερμοκρασία. Το επιφανειακό στρώμα παχύνει ως αποτέλεσμα της αντίδρασης στην διεπιφάνεια μετάλλου/στρώματος ή στρώματος/αερίου εξαιτίας μεταφοράς ανιόντων ή κατιόντων διαμέσου του στρώματος το οποίο συμπεριφέρεται ως στερεός ηλεκτρολύτης. Το στρώμα είναι συνήθως οξείδιο αλλά μπορεί επίσης να είναι και σουλφίδιο, καρβίδιο ή και συνδυασμός των ανωτέρων.



Διάγραμμα 4: Οξείδωση ανθρακούχου χάλυβα και μικρο-κραματωμένου χάλυβα υψηλής αντοχής (HSLA) στον αέρα ^[3]

Αρχικά το στρώμα αναπτύσσεται ταχύτατα και ο ρυθμός μειώνεται όταν φτάσει σε πάχος τις λίγες χιλιάδες Å. Όταν έχουμε διάχυση, η κινητική του ακολουθεί παραβολικό νόμο, ενώ για πορώδες

στρώμα ή στρώμα που δεν καλύπτει πλήρως τη μεταλλική επιφάνεια εμφανίζεται γραμμικός νόμος, ως βλέπουμε στο κάτωθι διάγραμμα:



Διάγραμμα 5: Μορφές κινητικής οξείδωσης ^[3]

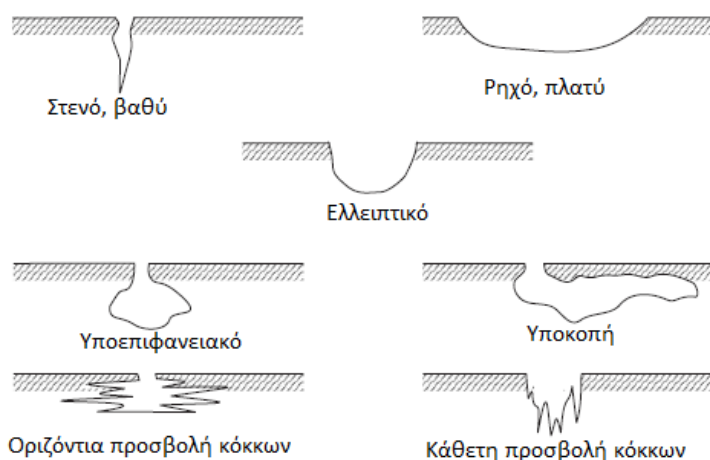
Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός στρώματος είναι τα ακόλουθα:

- Η υψηλή θερμοδυναμική ευστάθεια (ήτοι υψηλά αρνητική ελεύθερη ενέργεια Gibbs) ώστε να σχηματίζεται αυτό έναντι άλλων προϊόντων αντίδρασης υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες εκθέσεως.
- Χαμηλή πίεση ατμού ώστε το οξείδιο να είναι στερεό και να μην εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα.
- Λόγος Pilling-Bedworth (ο λόγος δηλαδή του όγκου του παραχθέντος οξειδίου προς τον όγκο του μετάλλου που καταναλίσκεται από την οξείδωση) μεγαλύτερος του 1.0 ώστε να έχουμε πλήρη κάλυψη της μεταλλικής επιφάνειας από το οξείδιο.
- Χαμηλό συντελεστή διάχυσης των αντιδρώντων (μεταλλικά κατιόντα και ανιόντα διάβρωσης) ώστε το στρώμα να έχει χαμηλό ρυθμό ανάπτυξης.
- Υψηλή θερμοκρασία τήξης.
- Καλή πρόσφυση στο μεταλλικό υπόστρωμα, που συνήθως απαιτεί συντελεστή θερμικής διαστολής παραπλήσιο με αυτό του μετάλλου και επαρκή πλαστικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να ανθίσταται στη θράυση από τάσεις διαφορικής θερμικής διαστολής.

1.7.6 Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion) ^[12]

Πρόκειται για το συνηθέστερο τύπο τοπικής διάβρωσης, κατά τον οποίο μικροί όγκοι μετάλλου αφαιρούνται λόγω διάβρωσης από διάφορα σημεία της επιφάνειας προκαλώντας εσοχές ή κρατήρες που

μπορούν να οδηγήσουν σε διαμπερή διάτρωση. Λαμβάνει χώρα παρουσία στάσιμου ή πολύ βραδέως ύδατος και θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνο είδος διάβρωσης γιατί είναι δύσκολο να προβλεφθεί, να εντοπιστεί και να αποφευχθεί. Οι εσοχές αυτές μπορούν να γεμίσουν και να υπερχειλίσουν από τα προϊόντα της διάβρωσης. Το σχήμα τους ποικίλλει αλλά συνήθως είναι δισκοειδές, κωνικό ή ημισφαιρικό για το χάλυβα και συναφή κράματα.



Σχήμα 6: Συνήθη σχήματα βελονισμών ^[9]

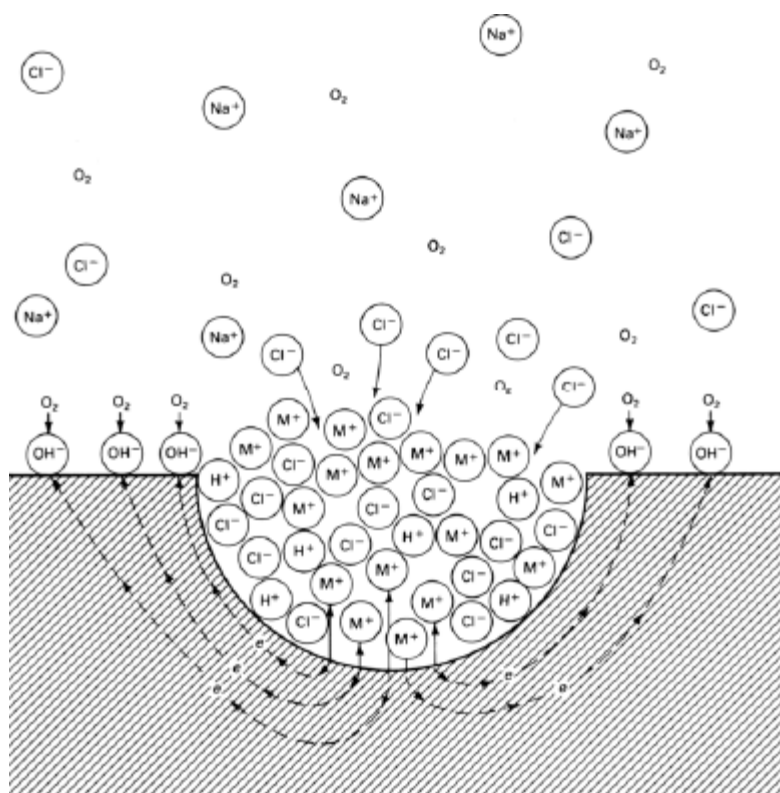
Κυριότεροι παράγοντες που συνεισφέρουν στην έναρξη και διάδοση των βελονισμών είναι οι εξής:

- Τοπική μηχανική ή χημική ζημία σε προστατευτικό φιλμ οξειδίου.
- Χημικοί παράγοντες του ύδατος (όπως οξύτητα, χαμηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου και υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων) που αποσταθεροποιούν το προστατευτικό στρώμα.
- Τοπική ζημία ή κακή εφαρμογή προστατευτικού επιστρώματος.
- Η παρουσία ατελειών της μεταλλικής κατασκευής, όπως π.χ. μη μεταλλικά εγκλείσματα.

Η πρακτική σημασία της διάβρωσης με βελονισμούς εξαρτάται από το πάχος του μετάλλου και το ρυθμό διεισδύσεως. Εν γένει, ο ρυθμός της διεισδύσεως ελαττώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των βελονισμών. Αυτό επειδή γειτονικοί βελονισμοί μοιράζονται την διαθέσιμη καθοδική επιφάνεια η οποία ελέγχει τη ροή του ρεύματος διάβρωσης.

Ένας βελονισμός εξελίσσεται σε τέσσερα(4) στάδια, την *έναρξη*, τη *διάδοση*, τον *τερματισμό* και την *επανεκκίνηση*. Συνήθως, ένα τοπικό κελί οδηγεί στην έναρξη του βελονισμού εξαιτίας μιας ανώμαλης ανοδικής περιοχής που περιβάλλεται από κανονική επιφάνεια που δρα ως κάθοδος ή από την παρουσία μιας ανώμαλης καθοδικής περιοχής που περιβάλλεται από κανονική επιφάνεια. Κατά το στάδιο της διάδοσης, ο ρυθμός αυξάνει εξαιτίας μεταβολών στο ανοδικό και το καθοδικό περιβάλλον που γίνονται, αντίστοιχα, πιο όξινα και αλκαλικά. Ένας βελονισμός μπορεί να τερματιστεί εξαιτίας αυξημένης εσωτερικής αντίστασης του τοπικού κελιού είτε λόγω πλήρωσης με προϊόντα διάβρωσης είτε λόγω δημιουργίας στρώματος στην κάθοδο. Εάν μια επιφάνεια με βελονισμούς αποστραγγισθεί, προσωρινά το φαινόμενο θα σταματήσει να επεκτείνεται, εάν όμως επαναβραχεί κάποιοι βελονισμοί μπορούν να

επανεικηθηθών. Εάν το διάλυμα δεν είναι στάσιμο ως προς την επιφάνεια αλλά έχει ταχύτητα, συχνά μειώνεται έως και αποφεύγεται το φαινόμενο. Συχνά η διάβρωση με βελονισμούς σχετίζεται με άλλες μορφές διάβρωσης. Περικρυσταλλική διάβρωση μπορεί να ξεκινήσει από την κοιλότητα του βελονισμού και να διαδοθεί στο μέταλλο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η περικρυσταλλική διάβρωση μπορεί να προηγηθεί και να οδηγήσει σε βελονισμούς. Η διάβρωση χαραγής θεωρείται μια επιδεινωμένη περίπτωση διάβρωσης με βελονισμούς ενώ βελονισμοί προκαλούνται και κατόπιν διάβρωσης από ρεύματα διαφυγής που είδαμε προηγουμένως. Η φύση της διάβρωσης με βελονισμούς θεωρείται *αυτοκαταλυτική*, με την έννοια ότι μόλις ξεκινήσει ένας βελονισμός οι τοπικές συνθήκες μεταβάλλονται, ενθαρρύνοντας την περαιτέρω ανάπτυξή του. Αυτό το παρατηρούμε στο κάτωθι σχήμα, όπου και το μέταλλο (M) υφίσταται διάβρωση με βελονισμούς από διάλυμα NaCl, εντός του βελονισμού λαμβάνει χώρα ταχεία υδρόλυση ενώ στη γειτονική επιφάνεια συμβαίνει αναγωγή οξυγόνου.



Σχήμα 7: Αυτοκαταλυτική διεργασία εντός βελονισμού [3]

Οι αυτοκαταλυτικές συνθήκες σε ένα βελονισμό είναι οι ακόλουθες:

- 1) Εντός του βελονισμού:
 - Εμποδίζοντας την παθητικοποίηση:
 - A) Μικρή παροχή οξυγόνου
 - B) Δημιουργία όξινου διαλύματος μέσω αντίδρασης υδρόλυσης
 - Γ) Διάλυση σουλφιδίων, οδηγώντας σε υδρόθειο (H_2S)
 - Δ) Εμπλουτισμός ανιόντων (Cl^- , SO_4^{2-}) που έλκονται από κατιόντα στο βελονισμό
 - E) Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης του βελονισμού

2) Στο χείλος του βελονισμού:

- Δημιουργία φλοιού που διατηρεί το κελί συγκέντρωσης οξυγόνου

3) Γύρω από το βελονισμό:

- Μείωση της γενικής διάβρωσης:

A) Μερική καθοδική προστασία από το ρεύμα της διάβρωσης

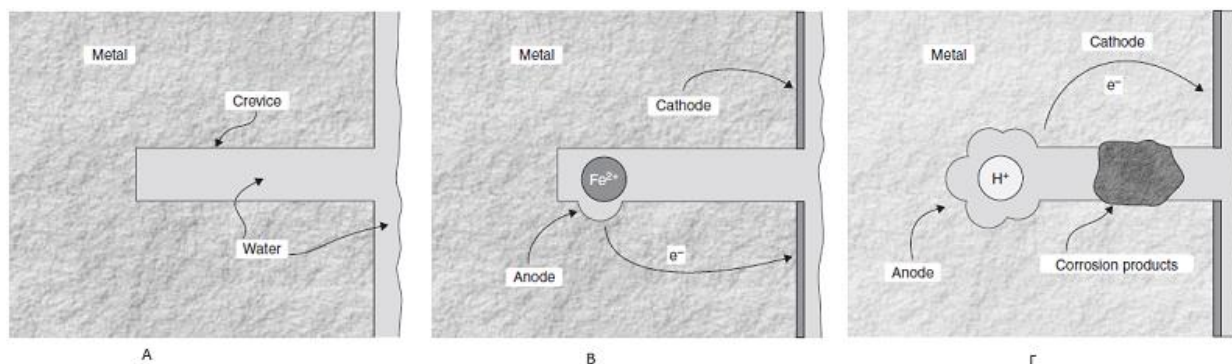
B) Παθητικοποίηση λόγω καθοδικά σχηματισμένων αλκαλίων, ιδίως σε σκληρά ύδατα.

Προστασία από τη συγκεκριμένη μορφή διάβρωσης επιτυγχάνεται πρώτιστα με την επιλογή κατάλληλου ανθεκτικού υλικού, καθώς και με καθοδική προστασία, με αλλαγή παραγόντων του διαβρωτικού περιβάλλοντος όπως το pH ή και με εξασφάλιση ταχύτητας ροής του περιρρέοντος υγρού.

1.7.7 Διάβρωση Χαραγής (Crevice Corrosion)

Η διάβρωση χαραγής εμφανίζεται σε ρωγμές ή σχισμές ανάμεσα σε ζευγαρωμένες επιφάνειες ή μεταλλικές κατασκευές και συνήθως έχει τη μορφή βελονισμών ή χαραγών. Αμφότερες οι επιφάνειες μπορεί να είναι του ίδιου μετάλλου ή διαφορετικών ή η μία να μην είναι μεταλλική, ενώ μπορεί να συμβεί και κάτω από στρώματα παθητικοποίησης, επιφανειακές αποθέσεις, παρεμβύσματα και φλάντζες αρκεί να επιτρέπουν αυτά την εισροή ύδατος.

Η εξέλιξη της δημιουργίας μιας χαραγής ακολουθεί γενικά τρία στάδια. Στο πρώτο, ξεινά ως αποτέλεσμα διαφορικού αερισμού. Διαλυμένο οξυγόνο στο υγρό μέσα στη χαραγή καταναλώνεται κατόπιν αντίδρασης με το μέταλλο. Στο δεύτερο, καθώς η διάχυση του οξυγόνου στη χαραγή είναι περιορισμένη, ένα κελί διαφορικού αερισμού δημιουργείται ανάμεσα στο μικρο-περιβάλλον της χαραγής και την εξωτερική επιφάνεια. Η χαραγή γίνεται άνοδος και η επιφάνεια που έχει πρόσβαση στον περιβαλλοντικό αέρα κάθοδος. Ο υψηλός λόγος καθοδικής/ανοδικής επιφάνειας επιτείνει την ανοδική αντίδραση διάβρωσης. Στο τρίτο στάδιο, καθώς η καθοδική αναγωγική αντίδραση δε μπορεί να συντηρηθεί στην επιφάνεια της χαραγής, λόγω ανοδικής ανισορροπίας, δημιουργούνται υψηλά διαβρωτικές μικρο-περιβαλλοντικές συνθήκες στη χαραγή, που προκαλούν περαιτέρω διάλυση μετάλλου. Πιστεύεται ακόμα ότι επακόλουθες αλλαγές του pH στις ανοδικές και καθοδικές περιοχές κινητοποιούν τη δράση τοπικών κελιών.



Σχήμα 8: Τα τρία στάδια εξέλιξης της διάβρωσης χαραγής ^[9]

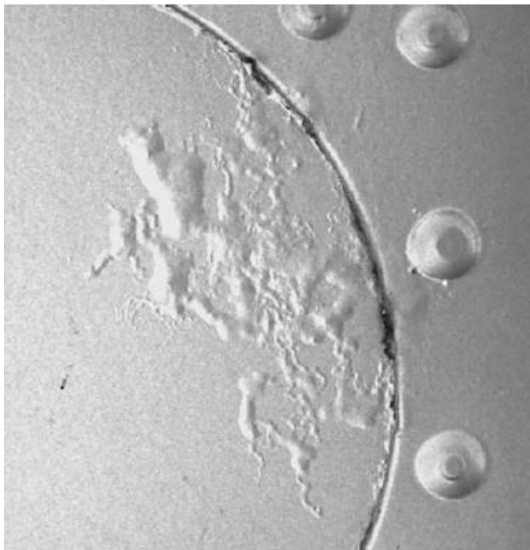
Σε μία πλήρως αναπτυγμένη χαραγή, οι παράγοντες που την επιτείνουν συνοψίζονται ως εξής:

- Τα μεταλλικά ιόντα που παράγονται από την ανοδική αντίδραση διάβρωσης υδρολύονται, ειλύνοντας πρωτόνια και σχηματίζοντας προϊόντα διάβρωσης. Το pH στη χαραγή αποκτά πολύ όξινες τιμές.
- Συνέπεια της όξινης κυριαρχίας στο τοπικό περιβάλλον είναι η αύξηση του ρυθμού διάβρωσης.
- Τα προϊόντα της διάβρωσης σφραγίζουν ακόμα περαιτέρω το περιβάλλον της χαραγής.
- Η συγκέντρωση θετικού φορτίου στη χαραγή έλκει αρνητικά ιόντα στο περιβάλλον, όπως χλωρίδια και σουλφίδια που είναι διαβρωτικά αυτά καθεαυτά.

Η διάβρωση χαραγής αντιμετωπίζεται με την εκλογή του κατάλληλου υλικού, τον προσεκτικό σχεδιασμό της κατασκευής ώστε να αποφεύγονται χαραγές και εγκοπές, καθώς και με καθοδική προστασία.

1.7.8 Νηματοειδής Διάβρωση (Filiform Corrosion)

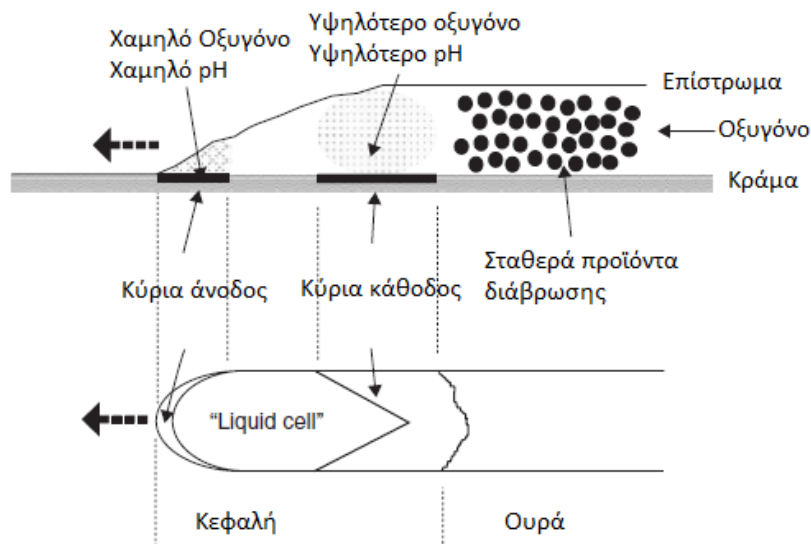
Η νηματοειδής διάβρωση αποτελεί ειδική μορφή της διάβρωσης χαραγής και λαμβάνει χώρα κάτω από οργανικά ή μεταλλικά επιστρώματα στο χάλυβα, τον ψευδάργυρο, το αλουμίνιο και το μαγνήσιο. Συνήθως ξεκινά από μικρές έως μικροσκοπικές ατέλειες στο επίστρωμα. Λάκες και χρώματα γρήγορης στέγνωσης είναι πιο επιρρεπή. Αποτέλεσμα της προσβολής είναι ένα δίκτυο από τυχαία νήματα προϊόντων διάβρωσης που αναπτύσσονται ως ρηχές αυλακώσεις της μεταλλικής επιφάνειας κάτω από το επίστρωμα.



Εικόνα 1: Νηματοειδής διάβρωση αεροπλάνου ^[9]

Στο κάτωθι σχήμα βλέπουμε τα μικρο-περιβάλλοντα της νηματοειδούς διάβρωσης σε χαλύβδινη επιφάνεια. Κελί διαφορικού αερισμού προκαλείται υπό του επιστρώματος, με τη χαμηλότερη συγκέντρωση οξυγόνου στην κεφαλή του νήματος, καθώς το οξυγόνο διαχέεται μέσω της πορώδους ουράς προς την κεφαλή. Το περιβάλλον γίνεται όξινο, γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό περιοχής

ανοδικής διάχυσης μετάλλου στο εμπρόσθιο τμήμα της κεφαλής. Για τον χάλυβα, οι τιμές του pH στο εμπρόσθιο τμήμα της κεφαλής κυμαίνονται από 1 – 4 και το δυναμικό διάβρωσης $-0.44V$ (ΠΗΥ). Σε αντιπαράθεση, στο πίσω τμήμα της όπου κυριαρχεί η καθοδική αντίδραση, το pH κυμαίνεται περί το 12.



Σχήμα 9: Γραφική αναπαράσταση μικρο-περιβάλλοντος νηματοειδούς διάβρωσης ^[9]

Προστασία και περιορισμός της νηματοειδούς διάβρωσης επιτυγχάνεται με μεταβολή του περιβάλλοντος, σωστή επιλογή επιστρώματος και εξασφάλιση σωστής προσφύσεως αυτού, μείωση σχετικής υγρασίας κάτω από το 60%, χρήση ασταριών, ανοδίωση ή και γαλβανισμό του μετάλλου.

1.7.9 Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)

Είναι μορφή τοπικής προσβολής κατά την οποία διαβρώνεται στενό μονοπάτι κατά μήκος των ορίων των κόκκων ενός μετάλλου. Συχνά ξεκινά στην επιφάνεια και συνεχίζει διαμέσου της δράσης τοπικών κελιών πλησίον στο όριο ενός κόκκου. Η προσβολή αυτή επιδρά ιδιαιτέρως δυσμενώς στις μηχανικές ιδιότητες. Κινητήριος δύναμη είναι μια διαφορά δυναμικού διάβρωσης ανάμεσα στο όριο του κόκκου και το υλικό στους γειτονικούς κόκκους, προκληθείσα εξαιτίας διαφοράς στη χημική σύσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, ως αποτέλεσμα μετακίνησης ακαθαρσιών ή στοιχείων κραμάτωσης προς τα όρια των κόκκων. Εάν η συγκέντρωση των στοιχείων κραμάτωσης στο όριο του κόκκου γίνει επαρκής, μια δεύτερη φάση ή μικροσυστατικό μπορεί να χωριστεί ή να κατακρημνιστεί. Αυτό μπορεί να έχει διαφορά δυναμικού διάβρωσης από τους κόκκους και να δημιουργήσει τοπικό κελί. Το μικροσυστατικό αυτό μπορεί να είναι ανοδικό (πχ Fe_4N), καθοδικό (Fe_3C) ή ουδέτερο προς το μέταλλο βάσης.

1.7.10 Εκλεκτική Προσβολή - Έκπλυση (Selective Attack - Leaching)

Αφορά στην εκλεκτική διάβρωση ενός κραματικού στοιχείου είτε με εκλεκτική προσβολή είτε με διάλυση του υλικού της μήτρας. Συνηθέστερη περίπτωση είναι η αποψευδαργύρωση (*dezincification*), δηλαδή η εκλεκτική απομάκρυνση του ψευδαργύρου σε κράματα όπως ο ορείχαλκος, με περιεκτικότητα σε Zn μεγαλύτερη του 15%. Μια περιοχή προσβεβλημένη από αποψευδαργύρωση εμφανίζει χάλκινη

χροιά, ενώ συγχρόνως αδυνατίζει και ψαθυροποιείται, κατ' επέκτασιν είναι επιρρεπής σε μη προειδοποιητική αστοχία. Η δημιουργία της ευνοείται από την παρουσία ηλεκτρολύτη (π.χ. θαλάσσιο ύδωρ), σχετικά όξινης συνθήκης, παρουσία CO₂ ή αμμωνίας, και υπολογισμο οξυγόνο. Δύο είναι οι γενικοί τύποι αποψευδαργύρωσης, η *ομοιόμορφη*, όπου το μέτωπο της εκλεκτικής προσβολής είναι σχεδόν ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια και εμφανίζεται σε ορείχαλμο υψηλής περιεκτικότητας σε Zn, και η *εντοπισμένη*, που εμφανίζεται σε τυχαία και τοπικά σημεία και σε ορείχαλμο χαμηλής περιεκτικότητας σε Zn.

Έτερη περίπτωση εκλεκτικής προσβολής είναι η γραφίτιση ή σπογγίωση (graphitization η graphitic corrosion). Αυτή εμφανίζεται σε φαιό χυτοσίδηρο, ως συνέπεια της εκλεκτικής διάλυσης του φερριτη στο κράμα, αφήνοντας πορώδη μήτρα αποτελούμενη από 4 – 4,5% γραφίτη. Γραφίτιση λαμβάνει χώρα σε θαλάσσια ύδατα, όξινα υπόγεια ύδατα, διαλυμένα οξέα, και εδάφη υψηλής περιεκτικότητας σε χλωριόντα ή θαλάσσιο ύδωρ ή η βακτηρια αναγωγής σουλφιδίων. Μια τελική επιφάνεια κατόπιν γραφίτισης είναι μαλακή, σπογγώδης και εύκολα τεμαχίσιμη.

1.7.11 Σπηλαιώδης Μηχανική Διάβρωση (Cavitation Corrosion)

Ως σπηλαιώση ορίζεται η υποβάθμιση της επιφάνειας εξαιτίας της ξαφνικής δημιουργίας και ρήξεως φυσαλίδων ενός υγρού. Είναι μορφή τοπικής διάβρωσης σε συνδυασμό με μηχανική ζημία και συμβαίνει σε τυρβώδη ή ταχέως κινούμενα υγρά και δημιουργούν βελονισμούς που οδηγούν σε τραχιές, σπογγώδεις επιφάνειες. Συναντάται σε έλικες πλοίων, υδραυλικές αντλίες, τουρμπίνες, βαλβίδες και γενικότερα εκεί όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές της στατικής πίεσης. Συναντάται ακόμα σε περιοχές υψηλών δονήσεων όπως έμβολα και χιτώνια κινητηρων.

Βάσει της εξίσωσης του Bernoulli:

$$P + \frac{\rho}{2}V^2 + \rho gh = \text{σταθ}$$

Όπου P η απόλυτη τιμή της στατικής πίεσης, h η ανύψωση, ρ η πυκνότητα του υγρού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η επιτάχυνση ενός υγρού, όταν π.χ. διέρχεται μέσω μιας φτερωτής, οδηγεί σε πτώση της τοπικής στατικής πίεσης. Παρεπόμενη μείωση της ταχύτητας αυξάνει την τοπική πίεση οδηγώντας στην κατάρρευση των φυσαλίδων που δημιουργήθηκαν από την προηγούμενη πτώση πίεσης. Η ανώμαλη επιφάνεια που προκύπτει επιτείνει το φαινόμενο καθώς οδηγεί στην πρόκληση περισσότερων φυσαλίδων.

Ο αριθμός σπηλαιώσης (σ) είναι αδιάστατος και προσφέρει μια εκτίμηση της προδιάθεσης για σπηλαιώση ενός ρέοντος υγρού.

$$\sigma = \frac{2 \cdot (P - P_u)}{\rho V^2}$$

Όπου P_u η πίεση ατμού. Όταν ο αριθμός σπηλαιώσης μηδενίζεται, η πίεση εξισώνεται με αυτή του ατμού και συμβαίνει η σπηλαιώση.

Κυριότεροι τρόποι αντιμετώπισης είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός, για να ελαχιστοποιούνται οι διαφορές της υδροδυναμικής πίεσεως, επιλογή ανθεκτικών υλικών, εξασφάλιση λείων επιφανειών, καθοδική προστασία, επιστρώματα (όπως το νεοπρένιο), περὺγια αντισπηλαιώσης και χρήση αναστολέων.

1.7.12 Διάβρωση Εκτριβής ή Ρευστομηχανική Διάβρωση (Erosion Corrosion)

Η διάβρωση εκτριβής συνδέεται με τη μηχανική απομάκρυνση του προστατευτικού επιφανειακού στρώματος, με συνέπεια την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης μέσω ηλεκτροχημικών ή χημικών διεργασιών. Για δεδομένο υλικό, θα πρέπει η ταχύτητα του ρευστού να υπερβεί μια κρίσιμη τιμή. Η μηχανική ζημία προκληθείσα εκ του ρευστού προκαλεί διατμητικές τάσεις ή μεταβολές πίεσεως στην επιφάνεια του υλικού ή/και στο προστατευτικό επιφανειακό φιλμ. Η διάβρωση εκτριβής ενισχύεται από στερεά σωματίδια ή φυσαλίδες ατμού, από την τυρβώδη ροή και τις πολυφασικές ροές (πχ ατμός και σωματίδια νερού). Η επιφανειακή μορφολογία της προσβολής από αυτόν τον τύπο διάβρωσης είναι με ρηχούς βελονισμούς ή πέταλα αλόγου.

Για την πρόβλεψη του ρυθμού διάβρωσης εκτριβής έχει προταθεί (εκ του Ομ. Καθηγητού Berkeley, I.Finnie) το ακόλουθο μαθηματικό μοντέλλο που τον συσχετίζει με την κινητική ενέργεια του διαβρωτικού μέσου:

$$\frac{\text{Απώλειες Διάβρωσης}}{\text{Ποσότητα διαβρωτικού μέσου}} = C \cdot F(\theta) \cdot \frac{\rho v^2}{HV}$$

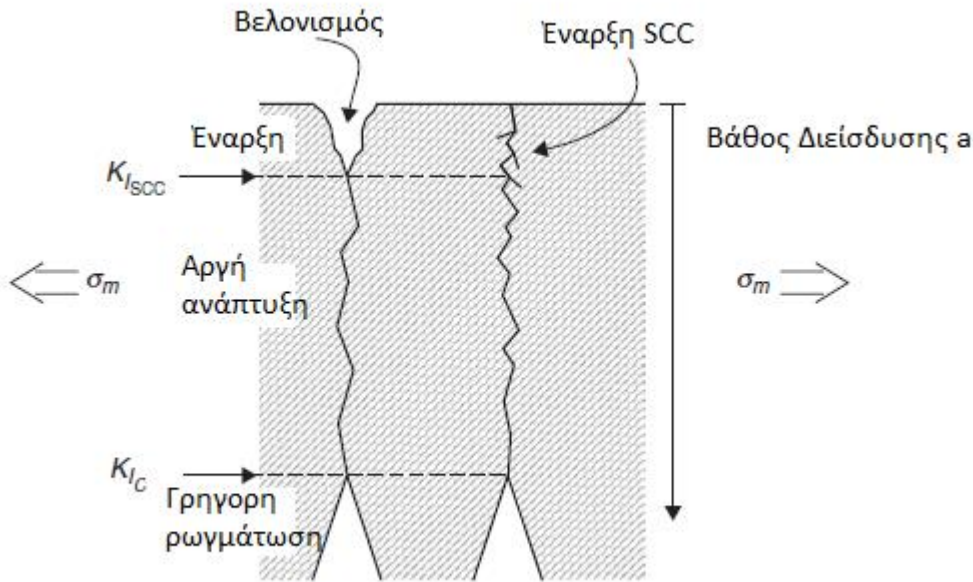
Όπου C μια σταθερά του συστήματος, F(θ) μια συνάρτηση της γωνίας προσβολής, ρ, v η πυκνότητα και η ταχύτητα αντίστοιχα του διαβρωτικού μέσου και HV η σκληρότητα του διαβρωθέντος μετάλλου.

Η διάβρωση εκτριβής αντιμετωπίζεται με κατάλληλο σχεδιασμό της κατασκευής για περιορισμό μεγάλων ταχυτήτων και της τυρβώδους ροής, επιλογή ανθεκτικών υλικών, μεταβολές στις ιδιότητες του ρευστού, χρήση αναστολέων διάβρωσης ή ουσιών που ευνοούν την παθητικοποίηση (για κλειστά συστήματα) και πρόβλεψη μεγαλύτερου πάχους στα ευπαθή τμήματα.

1.7.13 Ρωγμάτωση από Διάβρωση με Μηχανική Καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking – SCC)

Η SCC είναι μηχανική – χημική διεργασία που οδηγεί στη ρωγμάτωση ορισμένων κραμάτων σε τάσεις χαμηλότερες του ορίου αντοχής τους σε εφελκυσμό. Απαιτεί ένα ευπαθές κράμα, το κατάλληλο χημικό περιβάλλον και την επιβολή εφελκυστικής τάσης. Συνήθως προηγείται μια περίοδος επώασης κατά την οποία η ρωγμάτωση πυρηνοποιείται σε μικροσκοπικό επίπεδο η οποία μπορεί να διαρκέσει ακόμα και μήνες ή και χρόνια έως ότου αρχίσει να διαδίδεται. Η SCC θεωρείται από τις πιο ‘ύπουλες’ μορφές διάβρωσης γιατί ο μόνος τρόπος εντοπισμού των ρωγμών στο αρχικό τους στάδιο είναι μικροσκοπική εξέταση. Καθώς η ρωγμάτωση διαδίδεται στο υλικό, σταδιακά μειώνει την αποτελεσματική διατομή στήριξης έως ότου προκληθεί κατάρρευση της κατασκευής. Η ρωγμάτωση είναι είτε διακρυσταλλική (intergranular), ακολουθώντας τα όρια των κόκκων είτε ενδοκρυσταλλική (transgranular), διασχίζοντας τους κόκκους αυτούς καθαυτούς. Εξωτερικά ασκούμενες τάσεις προστίθενται σε υπάρχουσες

παραμένουσες τάσεις στο μέταλλο. Μπορεί ακόμα να προστεθούν τάσεις από προϊόντα διάβρωσης που έχουν προηγηθεί. Όλες αυτές οι τάσεις συνδυαστικά μπορούν να επιφέρουν την SCC. Η SCC είναι ανοδική διεργασία, κάτι που πιστοποιείται από την αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας ως μέτρο αντιμετώπισης.



Σχήμα 10: Μορφολογία SCC ^[9]

Συχνά οι ρωγμές θεωρούνται αποδεικτές όσο είναι κάτω από μια κρίσιμη τιμή, ως φαίνεται στο άνωθεν σχήμα, σύμφωνα με τη σχέση:

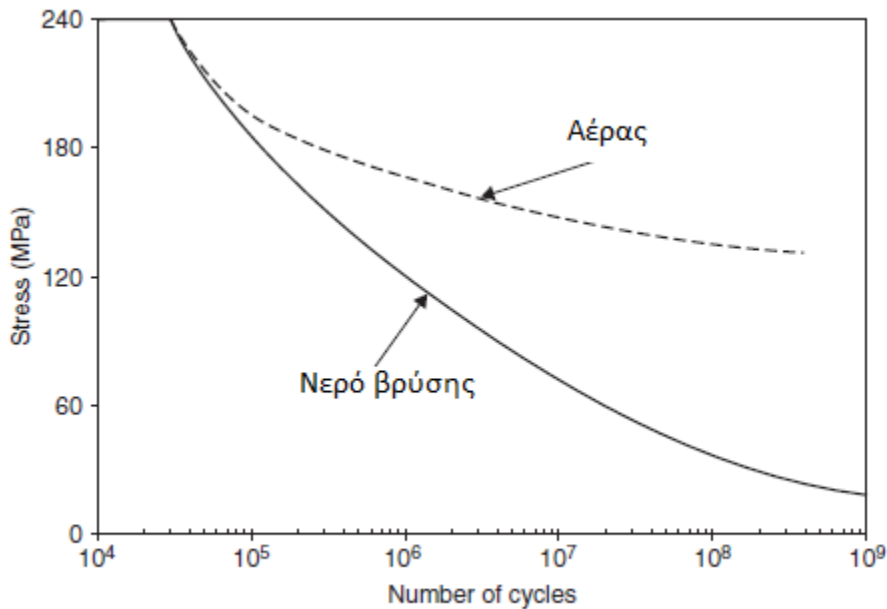
$$K_{Ic} = \sigma_m \sqrt{C\pi a}$$

Όπου K_{Ic} ο κρίσιμος συντελεστής έντασης – τάσης, σ_m η μέση τάση, C μια γεωμετρική σταθερά και a το βάθος διείσδυσης.

1.7.14 Διάβρωση Κόπωσης (Corrosion Fatigue) ^{[13] - [16]}

Κόπωση καλείται η αστοχία ενός μετάλλου λόγω ρωγμάτωσης όταν υφίσταται κυκλική καταπόνηση. 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) παριστά 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 στον αέρα, ως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα. Αυτή η επιτάχυνση της διάβρωσης

καλείται διάβρωση κόπωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη S – N παρουσία διάβρωσης τείνει να εξακολουθεί να μειούται, χωρίς να παραλληλίζεται με τον οριζόντιο άξονα, όπως συμβαίνει στις συνήθεις καμπύλες S – N.



Διάγραμμα 6: Καμπύλες κόπωσης για κράμα αλουμινίου σε νερό και αέρα αντίστοιχα [9]

Σημαντική πτώση ή ακόμα και εξαφάνιση του ορίου αντοχής σε κόπωση μπορεί να συμβεί και σε ηπίως διαβρωτικό περιβάλλον, ειδικά για κράματα που εμφανίζουν παθητικά στρώματα. Αυτό αποδίδεται στις εναλλαγές της τάσης που προκαλούν αλληπάλληλες ρωγμές στο επιφανειακό στρώμα, γεγονός που επιτρέπει την παρείσφρηση ύδατος στο απροστάτευτο μέταλλο κάτω από αυτό, οδηγώντας το σε διάβρωση. Έτσι λοιπόν, η διάβρωση κόπωσης συναντάται σε κατασκευές που υπόκεινται σε δονήσεις και κραδασμούς, καθώς και σε ατμολέβητες, εξαιτίας εναλλασσόμενων τάσεων προκληθείσών από θερμικές κυκλικές μεταβολές.

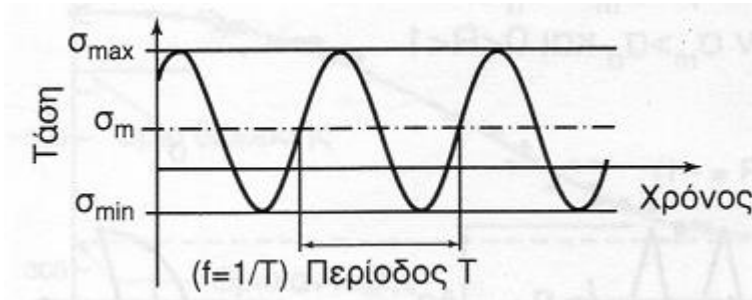
Η διάβρωση κόπωσης αντιμετωπίζεται με μεθόδους όπως η ελάττωση των εφελκυστικών τάσεων της επιφάνειας, που επιτυγχάνεται με αλλαγή σχεδιασμού, κατάλληλη θερμική κατεργασία ή κατεργασία σφαιροβολής ώστε να αναπτυχθούν θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια. Μπορεί ακόμα να θεραπευτεί με χρήση αναστολέων διάβρωσης η και με την εφαρμογή κατάλληλων επιστρωμάτων.

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε τα *χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμών κόπωσης*

- Η μέγιστη σ_{max} και η ελάχιστη σ_{min} καταπόνηση
- Το εύρος της καταπόνησης: $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
- Η μεταβολή της καταπόνησης: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$
- Η μέση τιμή της καταπόνησης: $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

- Ο λόγος των καταπονήσεων: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Σχηματικά τα μεγέθη τα διακρίνουμε στην απλούστερη και συνηθέστερη περίπτωση φόρτισης, τη ημιτονοειδή:



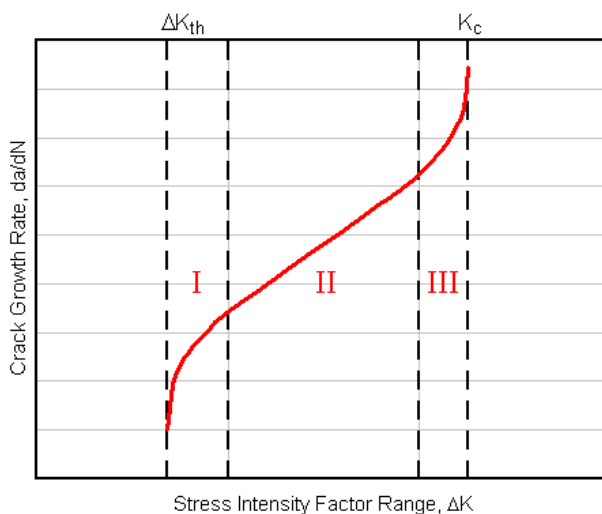
Διάγραμμα 7: Ημιτονοειδής εναλλασσόμενη φόρτιση ^[13]

Ακόμη, ιδιαίτερως σημαντική είναι η διάδοση των ρωγμών λόγω κόπωσης. 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

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



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης ρωγμής συναρτήσει της μεταβολής της τιμής του συντελεστή έντασης τάσης ^[15]

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

1.7.15 Διάβρωση από Τριβή Παλινδρόμησης (Fretting Corrosion)

Αυτή η μορφή της διάβρωσης αφορά στα σημεία επαφής μεταξύ δύο επιφανειών σε επαναλαμβανόμενη σχετική κίνηση και υπό φορτίο. Η ζημία αυτής χαρακτηρίζεται από βελονισμούς, αυλακιές και κατάλοιπα οξειδίων και συναπαντάται σε μηχανήματα, βιδωτές κατασκευές και ένσφαιρους τριβείς.

Ο πιο συχνός τύπος διάβρωσης από τριβή παλινδρόμησης προκαλείται από κραδασμούς. Το προστατευτικό φιλμ της μεταλλικής επιφάνειας απομακρύνεται από την εκτριβή και εκθέτει καινούρια δραστική επιφάνεια μετάλλου στη διαβρωτική δράση της ατμόσφαιρας. Οι απαραίτητες συνθήκες για την εμφάνιση αυτής της μορφής διάβρωσης είναι η ύπαρξη φορτίου στη διεπιφάνεια και κίνηση δόνησης ή ταλάντωσης μικρού πλάτους ώστε οι επιφάνειες να έρχονται σε επαφή. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης από τριβή παλινδρόμησης είναι η απώλεια μετάλλου στη διεπιφάνεια, η παραγωγή καταλοίπων οξειδίου και τέλος η κόπωση ή η ρωγμάτωση του μετάλλου.

Στις μεθόδους αντιμετώπισης της φθοράς από τριβή παλινδρόμησης συγκαταλέγονται η λίπανση με έλαια χαμηλού ιξώδους, η αύξηση της σκληρότητας ενός ή και των δύο εφραπτόμενων υλικών, η αύξηση της τραχύτητας των επιφανειών και η χρήση παρεμβυσμάτων για απορρόφηση των δονήσεων και ελάττωση της προσέγγισης οξυγόνου.

1.7.16 Μικροβιολογική Διάβρωση (Microbiologically Influenced Corrosion)

Μικρόβια βρίσκονται σχεδόν σε όλα τα είδη περιβάλλοντος με επίταση εκεί όπου οι συνθήκες ευνοούν την εκθετική εξάπλωσή τους. Η διάβρωση αυτού του είδους ευθύνεται για την υποβάθμιση των ιδιοτήτων ευρείας γιάμας υλικών, όπως τα περισσότερα μέταλλα και τα κράματά τους (π.χ. ανοξείδωτοι χάλυβες, αλουμίνιο και κράματα χαλκού), πολυμερή, κεραμικά και τσιμέντο.

Οι πιθανότεροι μηχανισμοί της MIC είναι οι ακόλουθοι:

- Καθοδική αποπόλωση, όπου η μικροβιολογική δράση επιταχύνει τον περιορισμό των καθοδικών αντιδράσεων.
- Δημιουργία κλειστών επιφανειακών κελιών, όπου οι μικροοργανισμοί σχηματίζουν ανομοιογενείς επιφανειακές αποικίες.
- Στερέωση περιοχών ανοδικών αντιδράσεων, όπου μικροβιολογικές επιφανειακές αποικίες οδηγούν στο σχηματισμό βελονισμών διάβρωσης.
- Όξινη προσβολή του υποστρώματος, η οποία επιταχύνεται από όξινα προϊόντα του μεταβολισμού των μικροβίων και κυρίως λιπαρά οξέα κοντής αλυσίδας.

Για να επηρεάσουν οι μικροοργανισμοί την έναρξη ή το ρυθμό της διάβρωσης, πρώτα επικιάθονται στην επιφάνεια διάβρωσης, είτε με τη μορφή ενός λεπτού, κατανεμημένου φιλμ είτε με τη μορφή διακριτής βιο-εναπόθεσης. Το λεπτό φιλμ (βιοφιλμ) είναι επικρατέστερο σε ανοικτά συστήματα εκτιθέμενα σε ρέον θαλάσσιο ύδωρ αν και συναπαντάται και σε ανοικτά συστήματα γλυκού ύδατος. Το φιλμ αρχίζει να σχηματίζεται κατά τις πρώτες 2 – 4 ώρες της εμβαπτίσεως και χρειάζεται εβδομάδες για να ωριμάσει. Τα φιλμ είναι συνήθως ασυνεχή και «κηλιδωτά» και καλύπτουν μεγάλο τμήμα της εκτιθέμενης μεταλλικής επιφάνειας. Οι βιο-εναποθέσεις διαφέρουν από τα κατανεμημένα φιλμ και δύνανται να είναι μεγέθους αρκετών τετραγωνικών εκατοστών, καλύπτοντας μικρό μόνον ποσοστό της συνολικής επιφάνειας και οδηγώντας σε τοπική διάβρωση.

Με βάση την ανοχή τους στην παρουσία οξυγόνου οι μικροοργανισμοί ταξινομούνται σε:

- *Αυστηρώς αναερόβιοι*, που δε μπορούν να λειτουργήσουν παρουσία οξυγόνου.
- *Αερόβιοι*, που απαιτούν οξυγόνο για το μεταβολισμό τους.
- *Εκλεκτικά αναερόβιοι*, που δύνανται να λειτουργήσουν είτε παρουσία είτε απουσία οξυγόνου.
- *Μικροαερόφιλοι*, που χρησιμοποιούν οξυγόνο αλλά προτιμούν χαμηλά επίπεδα αυτού.

Τα δε κύρια είδη των μικροοργανισμών που ευθύνονται για ζημιές λόγω διάβρωσης είναι τα ακόλουθα:

- *Μύκητες* που παράγουν διαβρωτικά υπο-προϊόντα του μεταβολισμού τους, όπως οργανικά οξέα. Προσβάλλουν μέταλλα και κράματά τους, οργανικά επιστρώματα και το ξύλο.
- *Δημιουργοί γλίνας* που παράγουν κελιά συγκεντρωμένης διάβρωσης στις επιφάνειες.
- *Αναερόβια βακτήρια* που παράγουν ισχυρώς διαβρωτικά είδη κατά το μεταβολισμό τους.
- *Αερόβια βακτήρια* που παράγουν διαβρωτικά ανόργανα οξέα.

1.7.17 Βλάβη από Υδρογόνο (Hydrogen Damage) ^[17]

Διάφορα μεταλλικά κράματα, ιδίως ορισμένοι χάλυβες, παρουσιάζουν σημαντική μείωση στην ολκιμότητα και την αντοχή τους σε εφελκυσμό όταν ατομικό υδρογόνο (H) διεισδύει στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό καλείται *ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου* (hydrogen embrittlement) ενώ οι όροι *ρωγμάτωση λόγω υδρογόνου* (hydrogen induced cracking) και *ρωγμάτωση λόγω υδρογόνου και φόρτισης* (hydrogen stress cracking) επίσης χρησιμοποιούνται. Το υδρογόνο στην ατομική του μορφή (H σε αντίθεση με H₂ που είναι η μοριακή του μορφή) διαχέεται μέσω του κρυσταλλικού πλέγματος και συγκεντρώσεις ακόμα και λίγων ppm (parts per million) μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμάτωση. Προσέτι, ρωγμάτωση λόγω υδρογόνου είναι συνήθως ενδοκρυσταλλική, αν και παρατηρείται και διακρυσταλλική θραύση σε ορισμένα κράματα. Οι μηχανισμοί που έχουν κατά καιρούς προταθεί για την εξήγηση του φαινομένου στηρίζονται στην παρέμβαση του διαλυμένου υδρογόνου στην κίνηση των διαταραχών.

Η ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου ομοιάζει με την SCC ως είδαμε προηγουμένως, ως προς το ότι ένα όλκιμο υλικό υφίσταται ψαθυρή θραύση όταν εκτίθεται σε εφελκυστική τάση σε συνδυασμό με διαβρωτική ατμόσφαιρα. Η διαφορά των δύο φαινομένων έγκειται σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις των με εφαρμοζόμενα ηλεκτρικά ρεύματα. Καίτοι η καθοδική προστασία μειώνει η παύει την SCC, μπορεί να οδηγήσει στην έναρξη της ψαθυροποίησης λόγω υδρογόνου. Για να συμβεί η τελευταία, πρέπει να

υπάρχει πηγή υδρογόνου και, επιπρόσθετα, η δυνατότητα σχηματισμού της ατομικής του μορφής. Παραδείγματα περιπτώσεων που πληρούνται οι άνωθεν συνθήκες είναι εμβάπτιση χάλυβα σε θειικό οξύ, η επιμεταλλώσεις και η παρουσία ατμόσφαιρας φέρουσας υδρογόνου (συμπεριλαμβανομένων των υδρατμών) σε αυξημένες θερμοκρασίες, όπως κατά τη συγκόλληση και τις θερμικές κατεργασίες. Επίσης, η παρουσία δηλητηρίων όπως H_2S και αρσενικό επιταχύνει την ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου. Οι ουσίες αυτές επιβραδύνουν το σχηματισμό μοριακού υδρογόνου και κατά συνέπεια αυξάνουν το χρόνο παραμονής του ατομικού υδρογόνου στη μεταλλική επιφάνεια.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι επιρρεπείς σε ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου, ενώ όσο αυξάνει η αντοχή το υλικό τείνει να γίνεται ακόμα πιο επιρρεπές. Οι μαρτενσιτικοί χάλυβες είναι πολύ ευπαθείς σε αυτού του είδους διάβρωση, ενώ οι μπαινιτικοί και φερριτικοί είναι πιο ανθεκτικοί. Ακόμη, κράματα FCC (όπως ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα χαλκού, αλουμινίου και νικελίου) είναι σχετικά ανθεκτικά στη ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου κυρίως εξαιτίας της εγγενώς υψηλής τους ολκιμότητας.

Κάποιες από τις κυριότερες τεχνικές αντιμετώπισης της ψαθυροποίησης από υδρογόνο συμπεριλαμβάνουν τη μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του κράματος μέσω θερμικής κατεργασίας, την απομάκρυνση πηγών υδρογόνου, την έκθεση του κράματος σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να απομακρυνθεί το διαλυμένο υδρογόνο και αντικατάσταση από κράμα με μεγαλύτερη αντοχή στη ψαθυροποίηση.

1.8 Το περιβάλλον της διάβρωσης ^[4]

Διάβρωση δύνανται να λάβει χώρα στα ακόλουθα διαβρωτικά περιβάλλοντα (Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης):

1. Διάβρωση στον αέρα (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο).
2. Διάβρωση πάνω ή μέσα στο έδαφος.
3. Διάβρωση σε γλυκό νερό.
4. Διάβρωση στο θαλασσινό νερό.
5. Διάβρωση με καυσαέρια ή θερμά αέρια.
6. Χημική διάβρωση (με χημικά μέσα).
7. Πυρηνική διάβρωση

1.9 Παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα της διάβρωσης ^[4]

- 1 Η επίδραση της τριεπιφάνειας.

- 2 Η επίδραση της αγωγιμότητας του διαβρωτικού περιβάλλοντος
- 3 Η επίδραση της ανομοιογένειας της επιφάνειας.
- 4 Η επίδραση της εναλλαγής του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του.
- 5 Το τοποχημικό της διάβρωσης.
- 6 Η διόγκωση των μετάλλων και των κραμάτων κατά τη διάβρωση και ρήξη των γύρω υλικών.
- 7 Η μακροσκοπική κινητικότητα (διάχυση) των μεταλλικών ιόντων και σχηματισμός προϊόντων διάβρωσης πάνω σε μεταλλικά ή μη καλυπτικά επιστρώματα του διαβρωμένου μετάλλου ή κράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ. ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι μέθοδοι προστασίας από τη διάβρωση διακρίνονται σε πέντε (5) κύριες κατηγορίες:

- Μέθοδοι επέμβασης στο *ίδιο το υλικό* (επιλογή καταλλήλου υλικού, επέμβαση στη μικροδομή ή τη σύσταση του υλικού)
- *Σχεδιασμός της κατασκευής* ούτως ώστε να αποφεύγονται συνθήκες που ευνοούν τη διάβρωση.
- Μέθοδοι επέμβασης στο *δυναμικό του συστήματος* ώστε το δυναμικό που τελικά θα εμφανίσει το μέταλλο να βρίσκεται είτε στην περιοχή μη προσβολής (καθοδική προστασία) είτε στην περιοχή παθητικοποίησης (ανοδική προστασία).
- Μέθοδοι επέμβασης στο *διαβρωτικό περιβάλλον* ούτως ώστε να επιβραδυνθεί η κινητική της διάβρωσης
- Μέθοδοι επέμβασης στην *επιφάνεια του υλικού* με εφαρμογή επιστρωμάτων ή επιφανειακών κατεργασιών.

2.1 Η επιλογή του υλικού ^[1]

Για την κατάλληλη εκλογή υλικού η πρώτη παράμετρος που εξετάζεται είναι αυτή του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο και το υλικό θα εκτεθεί καθώς και οι λειτουργικές του συνθήκες. Τα διαβρωτικά περιβάλλοντα αναφέρθηκαν στην ¶ 1.8, ενώ σαν λειτουργικές συνθήκες λογίζονται η θερμοκρασία, η πίεση, ο ρυθμός ροής, υγρές προς αέριες φάσεις, υδατικές προς άνυδρες φάσεις, συνεχής προς διακεκομμένη λειτουργία, το χρησιμοποιούμενο μέσο θέρμανσης ή ψύξης, εξωτερικό προς εσωτερικό περιβάλλον και η καθαρότητα του προϊόντος.

Εν γένει για αναγωγικό ή μη οξειδωτικό περιβάλλον προτιμώνται ο χαλκός, το νικέλιο και τα κράματά τους, για οξειδωτικά διαλύματα τα κράματα που περιέχουν χρώμιο και για εξαιρετικά οξειδωτικά διαλύματα το τιτάνιο και τα κράματα αυτού. Ένα μέταλλο με εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες σε ένα περιβάλλον μπορεί να εμφανίσει αντίθετα αποτελέσματα σε άλλο περιβάλλον. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα. Κοινή παρανόηση αποτελεί η άποψη ότι είναι άτρωτοι σε διάβρωση, το οποίο απέχει παρσάγγας από την πραγματικότητα, εξ ου και η ονομασία τους αγγλιστί ως “stainless” και όχι “stainproof”. Ενώ, λοιπόν, εν γένει οι ανοξείδωτοι χάλυβες παρουσιάζουν άριστη αντίσταση σε διάβρωση, όταν εκτίθενται σε περιβάλλον υψηλής περιεκτικότητας σε χλωριόντα εμφανίζουν εντοπισμένη διάβρωση (περικρυσταλλική και με βελονισμούς) ενώ όταν βρεθούν υπό τάση υφίστανται SCC. Στις ανωτέρω περιπτώσεις ο κοινός κατασκευαστικός χάλυβας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά.

Το επιλεχθέν υλικό δύναται να υποστεί σειρά επεμβάσεων που το καθιστούν πιο ανθεκτικό στη διάβρωση για ένα δεδομένο περιβάλλον. Οι επεμβάσεις αυτές αφορούν στην τροποποίηση της συστάσεώς του (κρυστάτωση ή εξευγενισμός), της δομής του (θερμική κατεργασία) ή των εσωτερικών του τάσεων (θερμική κατεργασία ή κατεργασία διαμόρφωσης εν θερμώ) και ευνοούν την παθητικοποίηση του υλικού ενώ μειώνουν τις κρυσταλλικές του ατέλειες.

2.2 Ο σχεδιασμός της κατασκευής ^{[1], [6], [9]}

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 θερμοκρασίας 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.

2.3 Καθοδική Προστασία ^{[3], [9]}

Πρώτος ο Sir Humphrey Davy το 1824 εφήρμοσε καθοδική προστασία, χρησιμοποιώντας ανόδια σιδήρου για την προστασία των χάλκινων ελασμάτων που ετοποθετούντο στη γάστρα των ξύλινων πλοίων (για προστασία από τον σκώληκα *Teredo*). Όταν εν συνεχεία ο σίδηρος αντικατέστησε το ξύλο για την κατασκευή της γάστρας ξεκίνησε η προσάρτηση ανοδίων ψευδαργύρου. Τη δεκαετία του '50 εδραιώθηκαν οι σύγχρονες προδιαγραφές για την καθοδική προστασία ποντοπόρων πλοίων και έκτοτε η εξέλιξη είναι ραγδαία. Κατασκευάζονται συνεχώς καλύτερες θυσιαζόμενες άνοδοι και τα κυλώματα για χρήση συστημάτων ελεγχόμενου επιβαλλόμενου ρεύματος, χρησιμοποιώντας αδρανή ανόδια, έχουν βελτιστοποιηθεί.

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. Θα γίνει αναφορά στις δύο κυριότερες εκφάνσεις της καθοδικής προστασίας με εφαρμογή σε υδατικά περιβάλλοντα.

2.3.1 Καθοδική Προστασία με Θυσιαζόμενες Ανόδους (Cathodic Protection with Sacrificial Anodes)

Κατά τη μέθοδο αυτή, πάνω στην προστατευόμενη μεταλλική επιφάνεια συνδέεται μέταλλο ανοδικότερο αυτής. Δημιουργείται έτσι γαλβανικό στοιχείο όπου το ανοδικότερο μέταλλο διαβρώνεται ταχύτερα, παρέχοντας ρεύμα για την προστασία του λιγότερο ανοδικού.

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι είναι σχετικά φθηνές, εύκολο να εγκατασταθούν και σε αντίθεση με συστήματα επιβαλλόμενου ρεύματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χωρίς την ύπαρξη παροχής ρεύματος. Επιπλέον πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται να αγοραστεί ακριβός ηλεκτρικός εξοπλισμός καθώς και ότι δε μπορεί το ρεύμα να παρέχεται προς τη λάθος κατεύθυνση.

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 ανοδίων 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 1/3 και το 1/2 του μετάλλου τους.



Εικόνα 2: Θυσιαζόμενα ανόδια ψευδαργύρου στην τρόπιδα και το πηδάλιο ιστιοπλοϊκού σκάφους [9]

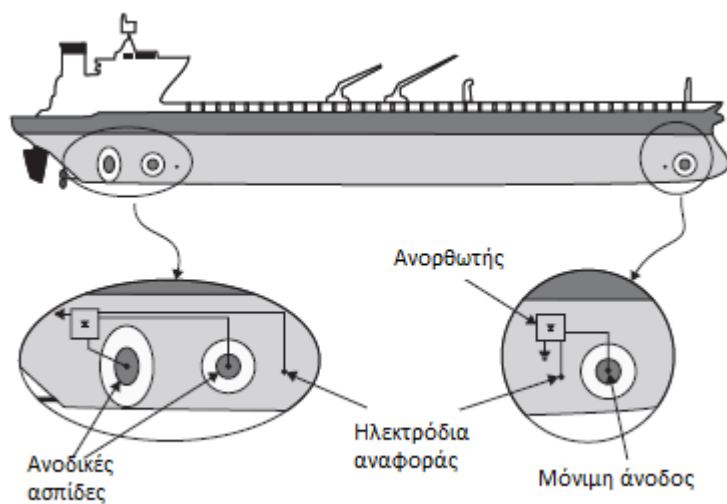
Πίνακας 4: Ενεργειακά χαρακτηριστικά κραμάτων θυσιαζόμενων ανόδων [3]

Κράμα	Ενεργειακή απόδοση	Ρυθμός Κατανάλωσης
	$A \cdot h/kg$	$Kg/A \cdot \text{έτος}$
Αλουμίνιο-Ψευδάργυρος-Υδράργυρος	2750 – 2840	3,0 – 3,2
Αλουμίνιο-Ψευδάργυρος-Ινδίο	1670 – 2400	3,6 – 5,2
Αλουμίνιο-Ψευδάργυρος-Κασσίτερος	920 – 2600	3,4 – 9,4
Ψευδάργυρος	810	10,7
Μαγνήσιο	1100	7,9

2.3.2 Καθοδική Προστασία με Επιβαλλόμενο Ρεύμα (Impressed Current Cathodic Protection)

Κατά τη μέθοδο αυτή, στο προς προστασία μέταλλο παρέχεται ρεύμα με ρυθμούς μεγαλύτερους ή ίσους με αυτούς που το ρεύμα εξέρχεται κατά τη διάβρωση του μετάλλου. Αυτή η παροχή του ρεύματος επιτελείται μέσω της σύνδεσης της προστατευόμενης επιφάνειας με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος της συνδέεται με ένα κατάλληλο βοηθητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

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



Εικόνα 3: Τυπικό σύστημα επιβαλλόμενου ρεύματος για δεξαμενόπλοιο μεταφοράς αργού πετρελαίου ^[9]

Υπάρχουν αρκετές αιτίες γιατί δυναμικοστατικά συστήματα συχνά αποτυγχάνουν να παράσχουν αρκετή προστασία:

- Το γαλβανικό αποτέλεσμα άβαφων μπρούντζινων ελίκων (προπέλες).
- Μεταβλητές ταχύτητες θαλασσιού ύδατος.
- Αυξανόμενη έκθεση γυμνού χάλυβα ως αποτέλεσμα ζημιάς των επιστρωμάτων.

- Ηλεκτροδία 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 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 E.P. 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.

2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ειδών καθοδικής προστασίας ^{[4], [18]}

Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

<u>Πλεονεκτήματα</u>	<u>Μειονεκτήματα</u>
Δεν απαιτείται παροχή ρεύματος	Το ρεύμα εξαρτάται από την επιφάνεια ανόδου, κάτι που είναι δύσκολο να ελεγχθεί για μεγάλα πλοία
Απλή εγκατάσταση	Προστασία μόνο όταν η άνοδος είναι πλήρως βυθισμένη
Απλή συντήρηση	Πιο ακριβή συντήρηση από σύστημα E.P.
Το ρεύμα δεν μπορεί να αναστραφεί	Οι καλωδιώσεις για μεγάλες διατάξεις ανόδων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες για τη μείωση απωλειών αντίστασης

Καθοδική προστασία με επιβαλλόμενο ρεύμα

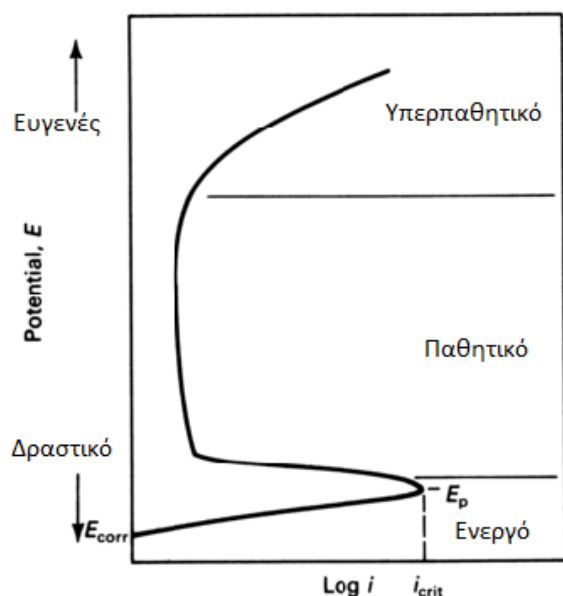
<u>Πλεονεκτήματα</u>	<u>Μειονεκτήματα</u>
Το ρεύμα είναι ευέλικτο για να ανταποκριθεί σε κάθε ανάγκη	Συνεχής παροχή ρεύματος DC απαιτείται
Η καλωδίωση δε χρειάζεται να είναι μεγάλη μιας και η τάση προσαρμόζεται ανάλογα με τις απώλειες αντίστασης	Το ρεύμα απαγορεύεται να συνδεθεί στη λάθος κατεύθυνση
Δεν αυξάνει την αντίσταση του πλοίου σε εφαρμογή επί της γάστρας (οι θυσιαζόμενες άνοδοι την αυξάνουν περί το 0,5%)	Απαιτείται ικανά εκπαιδευμένο προσωπικό
	Ασπίδες ρεύματος απαιτούνται αν χρησιμοποιούνται μόνιμες άνοδοι

2.4 Ανοδική Προστασία – Παθητικοποίηση ^{[1], [3]}

Η ανοδική προστασία είναι μία από τις πιο πρόσφατες ηλεκτροχημικές μεθόδους για τον περιορισμό της διάβρωσης. Πρώτες βιομηχανικές εφαρμογές έλαβαν χώρα στα τέλη της δεκαετίας του '50 και γνώρισε εμπορική επιτυχία στις αρχές της δεκαετίας του '70. Δεν είναι, πάντως, ευρύτατα διαδεδομένη σε σχέση με άλλες μεθόδους προστασίας εξαιτίας της θεμελιώδους ηλεκτροχημείας της.

Βασίζεται στην αρχή της **παθητικοποίησης**, η οποία πρώτα μελετήθηκε πειραματικά το 19^ο αιώνα από τους Faraday και Schöbein. Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα εκ της εργασίας του C.D. Edeleanu διαλογαριασμό της «Continental Oil Company» καθώς και αντίστοιχων ερευνών του Ινστιτούτου Πολτού και Χάρτου του Καναδά οδηγήθηκε στην εμπορική της αξιοποίηση. Η πιο ευρεία της εφαρμογή είναι στην προστασία εξοπλισμού αποθήκευσης και χειρισμού θειικού οξέως., κυρίως αποθηκευτικών δοχείων και εναλλακτών θερμότητας. Προσέτι χρησιμοποιείται στη βιομηχανία χάρτου και πολτού, σε χωνευτήρια και δεξαμενές αποθήκευσης.

Παθητικοποιήσιμα είναι συγκεκριμένα μέταλλα και σε συγκεκριμένο πλήθος χημικών περιβαλλόντων. Η ηλεκτροχημική φύση της επίτευξης της παθητικοποίησης απαιτεί τον έλεγχο του δυναμικού του μετάλλου. Η ανοδική προστασία χρησιμοποιείται για προστασία μετάλλων σε χημικά περιβάλλοντα που εμφανίζουν χαρακτηριστική συμπεριφορά όταν υπόκεινται σε ανοδική πόλωση. Εάν το απαιτούμενο ρεύμα έχει γενική συμπεριφορά όπως αυτή που παρουσιάζεται στο κάτωθι διάγραμμα Evans, το μέταλλο καλείται ενεργο-παθητικό και μπορεί να προστατευθεί ανοδικά. Κάποια μέταλλα που εμπίπτουν στην εν λόγω κατηγορία είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, το νικέλιο και το χρώμιο, ενώ αντίστοιχα διαλύματα είναι το θειικό οξύ, το φωσφορικό οξύ, το νιτρικό οξύ, η υδατική αμμωνία κ.α.



Διάγραμμα 9: Καμπύλη ανοδικής πόλωσης (διάγραμμα Evans) παθητικοποιήσιμου μετάλλου ^[3]

Ο ρυθμός διάβρωσης ενός ενεργο-παθητικού μετάλλου μπορεί να μειωθεί σημαντικά μεταθέτοντας το δυναμικό του μετάλλου ώστε να λάβει τιμή εντός της παθητικής περιοχής. Το ρεύμα που απαιτείται για να μεταθέσει το δυναμικό προς την ανοδική κατεύθυνση από το δυναμικό διάβρωσης, E_{corr} , είναι

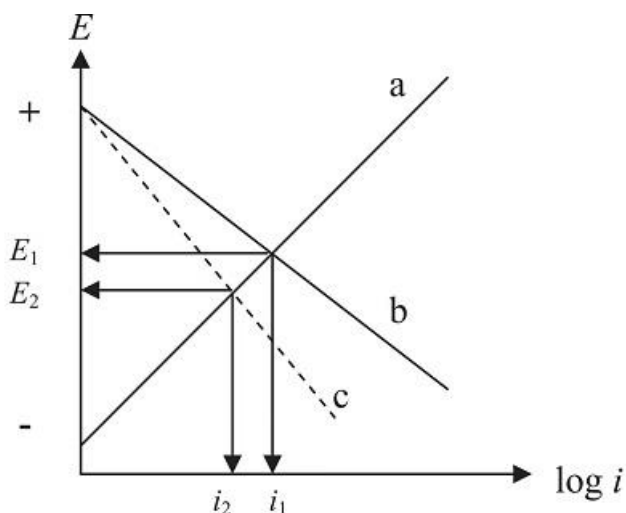
αρκυτές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το δυναμικό σε μια παθητική τιμή. Το ρεύμα μεγιστοποιείται στην πρωτεύουσα τιμή δυναμικού παθητικοποίησης (E_p). Η πυκνότητα ρεύματος που απαιτείται για να επιτευχθεί παθητικοποίηση είναι συνήθως λίγες χιλιάδες mA/m^2 βρεχόμενης επιφάνειας. Το απαιτούμενο ρεύμα για να διατηρηθεί η παθητικοποίηση είναι το πολύ $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη δημιουργία του επιφανειακού στρώματος οξειδίου επί του μετάλλου το οποίο παρουσιάζει ηλεκτρική αντίσταση και αδιαλυτότητα στο χημικό περιβάλλον. Όταν σχηματιστεί το στρώμα το μέταλλο καλείται παθητικό.

Παθητικοποίηση μπορεί να επιτευχθεί πέρα από την περιγραφείσα ηλεκτροχημική μέθοδο και με κρυστάτωση αλλά και με χημικά μέσα. Η ανοδική προστασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχηματίσει το παθητικό φιλμ σε μέταλλα σε χημικά συστήματα που φυσιολογικά θα ήταν διαβρωτικά, ενώ επιπροσθέτως μέσω της ανοδικής προστασίας μπορεί να διατηρηθεί η παθητικοποίηση του μετάλλου ώστε τυχόν αλλαγές στη διαδικασία να μην αναγκάσουν το μέταλλο να γίνει ενεργό και να διαβρωθεί. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι εσφαλμένη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενδέχεται να επιφέρει το αντίθετο αποτέλεσμα, προκαλώντας αποπαθητικοποίηση και εν τέλει επιτάχυνση της διάβρωσης.

Οι σημαντικότερες διαφορές της ανοδικής από την καθοδική προστασία που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι αφενός ότι στην καθοδική προστασία προστατεύεται η κάθοδος και στην ανοδική η άνοδος και αφετέρου ότι οι απαιτήσεις της ανοδικής προστασίας σε ρεύμα είναι συνήθως πολύ χαμηλότερες από την καθοδική.

2.5 Αναστολείς διάβρωσης (Corrosion Inhibitors) ^{[1], [19], [20]}

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.



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

Διάγραμμα 10: Διάγραμμα Evans που απεικονίζει την επίδραση καθοδικού αναστολέα επί του δυναμικού (E_{corr}) και του ρεύματος διάβρωσης (i_{corr})^[20]

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

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

Η αποτελεσματικότητα ενός αναστολέα διάβρωσης παρέχεται από την εξίσωση:

$$I_{eff} = \frac{R_o - R_i}{R_o} \times 100$$

Όπου I_{eff} η απόδοση του αναστολέα (%), R_o ο ρυθμός διάβρωσης του μετάλλου απουσία αναστολέα και R_i ο ρυθμός διάβρωσης του μετάλλου παρουσία αναστολέα.

Γενικά οι αναστολές διάβρωσης χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου το διάλυμα ηλεκτρολύτη είναι γνωστής και ελεγχόμενης ποσότητας. Στα πλοία, συγκεκριμένα, αυτό γίνεται σε περιοχές όπως λέβητες, δεξαμενές και σωληνώσεις.

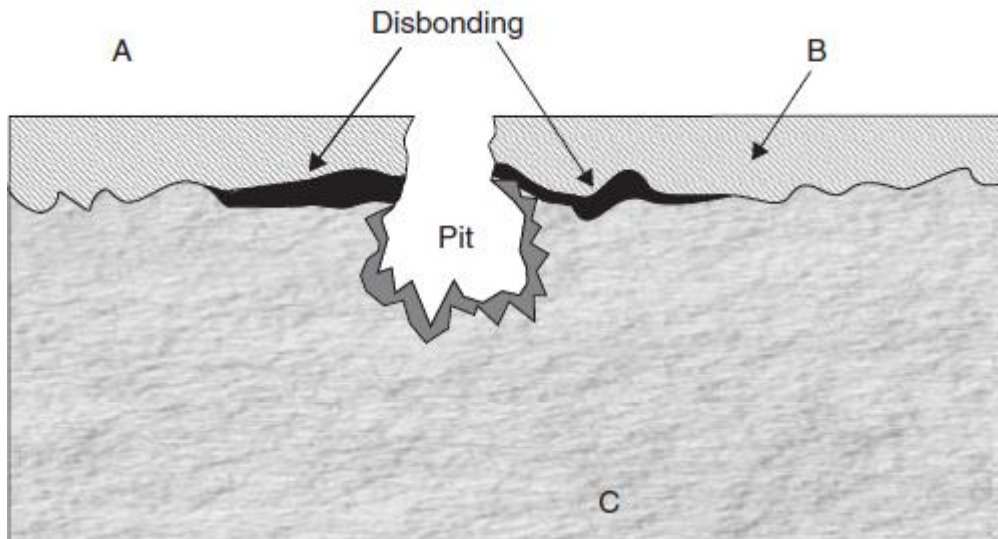
2.6 Επιστρώματα^{[1], [9]}

Η εφαρμογή επιστρώματων συνιστά μία εκ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων προστασίας των υλικών από τη διάβρωση και αποδίδει την λειτουργία της στην απομόνωση της επιφάνειάς τους από το διαβρωτικό περιβάλλον. Προσέτι είναι και η αρχαιότερη μέθοδος προστασίας, με πρώτη καταγεγραμμένη χρήση από τους Αιγύπτιους που έκαναν χρήση βερνικιών περί το 4.000 πΧ. 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

2.6.1 Μεταλλικά επιστρώματα

Τα μεταλλικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έντονων συνθηκών κρούσης, τριβών και υψηλών θερμοκρασιών. Για χρήση, όμως, παρουσία ηλεκτρολύτη πρέπει να εξετάζονται τυχόν γαλβανικές ασυμβατότητες ανάμεσα στο υπόστρωμα και στο εφαρμοζόμενο μεταλλικό επίστρωμα. Εάν υπάρχει ρήξη του προστατευτικού επιστρώματος και τα δύο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή παρουσία υδατικού ηλεκτρολύτη, η διάβρωση του ενός μπορεί να επιταχυνθεί ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες.



Σχήμα 11: Πρόκληση βελονισμού στο μέταλλο βάσης εξαιτίας αστοχίας του επιστρώματος. Α) Ηλεκτρολύτης Β) Καθοδικό επίστρωμα C) Μέταλλο βάσης^[9]

Ανάλογα με το μεταλλικό υπόστρωμα, τα επιστρώματα διακρίνονται σε *περισσότερο ευγενή*, που απομονώνουν το μεταλλικό υπόστρωμα από το διαβρωτικό περιβάλλον και επιβάλλουν το δικό τους χαμηλότερο δυναμικό διάβρωσης (π.χ. επιχάλκωση, επινικέλωση, επιχρωμίωση χάλυβα) και σε *λιγότερο ευγενή* που είναι θυσιαζόμενα επιστρώματα που διαβρώνονται, προστατεύοντας το υπόστρωμα (π.χ. επιψευδαργύρωση).

Οι τρεις (3) κυριότερες τεχνικές επιμετάλλωσης είναι οι επιμεταλλώσεις με *εμβάπτιση σε λουτρό τήγματος*, οι *ηλεκτρολυτικές επιμεταλλώσεις* και οι *επιμεταλλώσεις με ψεκασμό*.

2.6.2 Μη μεταλλικά ανόργανα επιστρώματα

Οι κυριότεροι αντιπρόσωποι των ανόργανων επιστρωμάτων ανεφέρθησαν επιγραμματικά στην αρχή της τρέχουσας παραγράφου και εν συνεχεία θα αναπτυχθούν σύντομα.

Τα **οξειδία** κατασκευάζονται με ανοδική οξείδωση μεταλλικής επιφάνειας σε κατάλληλο λουτρό. Μειώνουν το ρεύμα της διάβρωσης λόγω της χαμηλής τους αγωγιμότητας και σε βιομηχανικές εφαρμογές ανοδική οξείδωση εφαρμόζεται στο αλουμίνιο και στο μαγνήσιο. Τα **φωσφορικά επιστρώματα** χρησιμοποιούνται σαν πρώτο στρώμα πριν το χρωματισμό των χαλύβων για να προσδώσουν καλή συνάφεια του χρωστικού επιστρώματος και όχι σαν καθαυτό προστατευτικό μέσο. Παρασκευάζονται με εμβάπτιση ή ψεκασμό του μεταλλικού υποστρώματος σε διάλυμα αραιού φωσφορικού οξέως με φωσφορικά άλατα Zn, Mn, Fe, Ca και κάποιο οξειδωτικό ως διαλύτη. Τα **χρωμικά** ιόντα (CrO_4^{2-}) συνιστούν οξειδωτικό παράγοντα που ευνοεί την παθητικοποίηση των μετάλλων. Στρώματα χρωμικών αλάτων και οξειδίου σχηματίζονται με οξείδωση της μεταλλικής επιφάνειας σε λουτρό χρωμικού οξέως ή αλάτων και ανιόντων που δρουν σαν επιταχυντές. Συχνότερες εφαρμογές τους είναι στον ψευδάργυρο και στο χάλυβα κατόπιν φωσφατώσεως. Το **εμαγιέ** είναι επίστρωμα πυριτικής βάσης που έχει τα πλεονεκτήματα του υάλου (αντοχή σε οξέα, σε υψηλές θερμοκρασίες) αλλά και τα μειονεκτήματα αυτού (ευθραυστότητα, υψηλό κόστος). Τέλος, η

τσιμεντοκονία είναι επίστρωμα σκόνης τσιμέντου, χαμηλού κόστους που βρίσκει εκτεταμένες εφαρμογές στην προστασία αγωγών ύδρευσης.

2.6.3 Οργανικά επιστρώματα ^{[1], [2], [9], [19], [21]}

2.6.3.1 Γενικά – βασικά συστατικά οργανικών επιστρωμάτων

Τρεις (3) είναι οι ευρείες κατηγορίες των οργανικών επιστρωμάτων, οι **λάκες**, τα **βερνίκια** και τα **χρώματα**. Τα βερνίκια είναι υλικά που συνιστούν διαλύματα είτε μιας ρητίνης σε ένα διαλύτη ή ένα έλαιο και μια ρητίνη μαζί σε ένα διαλύτη. Η λάκα θεωρείται υλικό του οποίου το φιλμ σχηματίζεται από νιτροκυτταρίνη, αιθυλική κυτταρίνη, ακρυλική ρητίνη ή άλλη ρητίνη που στεγνώνει με εξάτμιση του διαλύτη. Τα χρώματα είναι πιο περίπλοκες συνθέσεις υγρού μίγματος που στεγνώνει ή σκληραίνει για να σχηματίσει προστατευτικό επίστρωμα.

Η συνήθης προσέγγιση του συστήματος επιστρώσεων συνίσταται από το **αστάρι (primer)**, το **ενδιάμεσο στρώμα (secondary or intermediate coat)** και το **τελικό επίστρωμα (topcoat)**.

Το αστάρι είναι επίστρωμα που πρώτο τοποθετείται στο υπόστρωμα για να προσδώσει καλύτερη πρόσφυση για επακόλουθο επίστρωμα, ενώ συγχρόνως λειτουργεί ως κομιστής για κάποιον αναστολέα ή για κάποιο ανοδικό μέταλλο (πχ ψευδάργυρος). Είναι λεπτό φιλμ (μέχρι 75 μm) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταλλικές, ξύλινες ή και τσιμεντένιες επιφάνειες.

Τα ενδιάμεσα στρώματα λειτουργούν σαν «δεσμός» ανάμεσα στο αστάρι και σε επόμενο/α στρώμα/τα και μπορεί να έχει διαφορετική σύσταση από αυτά. Όταν και τα τρία έχουν διαφορετική σύσταση, συνήθως το ενδιάμεσο στρώμα αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού πάχους του επιστρώματος.

Τέλος, το τελικό επίστρωμα είναι συνήθως πιο πυκνό και υδρόφοβο από το υπόλοιπο σύστημα, για να μειώσει το ρυθμό της διαπερατότητας υγρασίας προς τα υποκείμενα στρώματα. Άλλοι παράγοντες για την επιλογή του τελικού επιστρώματος είναι η επίτευξη ανακλαστικότητας, η μείωση της αποδόμησης λόγω του φωτός καθώς και η πρόσδοση του επιθυμητού χρώματος.

Όσον αφορά τα βασικά συστατικά των επιστρωμάτων, αυτά είναι το **συνδετικό υλικό (binder)**, το **πιγμέντο (pigment)**, ο **διαλύτης (solvent)**, οι **πληρωτές (fillers ή extenders)** και τα **πρόσθετα ή βελτιωτικά (additives)**.

Το **συνδετικό υλικό** είναι συνήθως ρητίνη. Σχηματίζει το πλέγμα του επιστρώματος, τη συνεχή δηλαδή πολυμερική φάση στην οποία θα ενσωματωθούν όλα τα υπόλοιπα συστατικά. Η πυκνότητα και η σύνθεσή του καθορίζουν τη διαπερατότητα και την αντίσταση σε διάβρωση καθώς και σε υπερϊώδη ακτινοβολία του επιστρώματος. Κυριότεροι εκπρόσωποι του συνδετικού υλικού είναι τα βινύλια, τα ακρυλικά, τα χλωριωμένα ελαστικά, οι ουρεθάνες, οι πολυεστέρες, υδατοδιαλυτές ρητίνες και εποξειδικές ρητίνες. Στην περίπτωση των τελευταίων είναι αναγκαία η χρήση σκληρυντών για τη σκλήρυνσή των.

Τα **πιγμέντα** προστίθενται στο επίστρωμα για δύο (2) λόγους: Α) Παρέχουν χρώση και αδιαφάνεια στο σύστημα επιστρώματος και Β) Βελτιώνουν τις αντιδιαβρωτικές ιδιότητές του.

Τα **πιγμέντα αποκλεισμού** (blocking pigments) προσκολλώνται στη μεταλλική επιφάνεια. Μειώνουν την ενεργό επιφάνεια διάβρωσης και σχηματίζουν ένα φράγμα για ιόντα από και προς το υπόστρωμα. Τα **γαλβανικά πιγμέντα** είναι μεταλλικά σωματίδια ανοδικότερα του υποστρώματος. Τα σωματίδια αυτά (πχ σκόνη ψευδαργύρου επί χάλυβα) διαβρώνονται εκλεκτικά ενώ στην αρχική μεταλλική επιφάνεια μόνο καθοδικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα. Τέλος τα **πιγμέντα παθητικοποίησης** (passivating pigments) ανακατασκευάζουν και σταθεροποιούν το φιλμ οξειδίου στο εκτεθειμένο μεταλλικό υπόστρωμα.

Οι οργανικοί **διαλύτες** χρησιμεύουν κατά τη διαδικασία επίστρωσης και είναι σχεδιασμένοι να εξατμίζονται μετά το πέρας αυτής. Ο ρυθμός εξατμίσσης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του επιστρώματος. Είναι αναγκαίο να εξατμισθεί πλήρως ο διαλύτης ειδάλλως είναι πολύ πιθανή η αστοχία του επιστρώματος. Τα περισσότερα επιστρώματα είναι ενδεδειγμένο να εφαρμόζονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, 24° C και 50% σχετική υγρασία. Εάν οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την εφαρμογή διαφέρουν σημαντικά, ενδέχεται ο διαλύτης να δημιουργήσει πρόβλημα. Το πιθανό αυτό πρόβλημα μπορεί να θεραπευτεί αλλάζοντας την ισορροπία του διαλύτη. Σε γενικές γραμμές, σε ψυχρό περιβάλλον είθισται να χρησιμοποιούνται ταχέως εξατμιζόμενοι διαλύτες και σε θερμό περιβάλλον βραδέως εξατμιζόμενοι. Οι κυριότερες κατηγορίες διαλυτών είναι οι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οι κετόνες, οι εστέρες, οι αλκοόλες, η γλυκόλη και οι αιθέρες.

Η κύρια λειτουργία των **πληρωτών** στα οργανικά επιστρώματα είναι η αύξηση του όγκου του επιστρώματος μέσω της ενσωμάτωσης υλικών χαμηλού κόστους, όπως το ταλκ, η μίκα ή η σκόνη ξύλου. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τις ιδιότητες του επιστρώματος όπως η αντίσταση σε κρούση και εκτριβή καθώς και η διαπερατότητα από νερό και οξυγόνο.

Με τον όρο **πρόσθετα ή βελτιωτικά** περιγράφεται μια μεγάλη κατηγορία συστατικών με πολύ εξειδικευμένες ιδιότητες, τα οποία προστίθενται στο επίστρωμα σε πολύ μικρές ποσότητες. Διαφορετικά πρόσθετα παρέχουν εντελώς διαφορετικό είδος λειτουργιών. Παραδείγματα είναι οι πηκτικοί, οι αντιμυκητιακοί, οι αντι-αφρώδεις και οι πυρίμαχοι παράγοντες, οι απορροφητές UV κ.ά.

2.6.3.2 Προετοιμασία της επιφάνειας ^{[2], [22], [23]}

Για να παράσχει ένα επίστρωμα τη βέλτιστη προστασία, είναι αναγκαία η σωστή προετοιμασία της επιφάνειας που πρόκειται να επιστρωθεί, δηλαδή ο καθαρισμός της από οιαδήποτε ακαθαρσία δύναται να επιδράσει στην αποδοτικότητα του συστήματος επιστρωμάτων. Ακαθαρσία (contamination) σε μια μεταλλική επιφάνεια ονομάζονται τα συστατικά που παραμένουν στην επιφάνεια μετά τον καθαρισμό αυτής με συμβατικά μέσα και έχουν επιζήμια αντίδραση στο σύστημα της επικάλυψης. Οι ακαθαρσίες διακρίνονται σε δύο (2) κύριες κατηγορίες, τις *υδατοδιαλυτές* (πχ άλατα σιδήρου, χλωριούχα άλατα, αλκάλια κλπ) και της *μη υδατοδιαλυτές* (πχ θειούχα άλατα, έλαια, λιπαρά οξέα κλπ). Το ακριβές σύστημα προετοιμασίας εξαρτάται από το σύστημα επιστρωμάτων που θα χρησιμοποιηθεί. Πέρα από την απομάκρυνση ακαθαρσιών, η προετοιμασία της επιφάνειας αποσκοπεί και στην ειτράχυνση αυτής, ούτως ώστε να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση του επιστρώματος επ'αυτής.



Εικόνα 4: Προετοιμασία επιφάνειας δεξαμενής έρματος ^[22]

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες μέθοδοι προετοιμασίας χαλύβδινων επιφανειών προ της επιστρώσεως είναι οι κάτωθι:

1. Απολίπανση (Degreasing)

Πρόκειται για την απομάκρυνση ελαίων και λιπών αρχικά δια της αποξέσεως και εν συνεχεία, για πληρέστερο καθαρισμό, δια της 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. Τελικά, προκαλούν την καταστροφή του επιστρώματος. Τα κυριότερα οργανικά διαλυτικά που εφαρμόζονται είναι η ακετόνη, οι αλκοόλες, το βενζόλιο, το ξυλένιο, ο τετραχλωράνθρακας και το χλωρομεθάνιο, ενώ η επιλογή τους εξαρτάται από τον τύπο της μεταλλικής επιφάνειας και το είδος των ακαθαρσιών.

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

Καλαμίνα (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). Η καλαμίνα 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 καλαμίνα 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”. Κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ο υψηλός απαιτούμενος χρόνος (τουλάχιστον 6 μήνες σε βιομηχανικό περιβάλλον), η κατά σημεία εμφάνιση διάβρωσης με βελονισμούς και η συσσώρευση αλάτων από τη θαλάσσια ατμόσφαιρα ή από βιομηχανικές διεργασίες επί των εκτεθειμένων ελασμάτων, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό φλυκταινών και την αποφλοιώση του χρώματος.

3. 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 *μηχάνηματα εξομάλυνσης (chisels)*. Με τη μέθοδο αυτή απομακρύνεται η ελαφρώς προσκολλημένη σκουριά και καλαμίνα, τα επιστρώματα και οι επιφανειακές ακαθαρσίες. Είναι μέθοδος επίπονη, χρονοβόρα και με αποτέλεσμα χαμηλής ποιότητας και η χρήση της περιορίζεται κυρίως σε τοπικές επισκευές ή σε μέρη του πλοίου απρόσιτα για καθαρισμό με ψηγματοβολή. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρικά εργαλεία είναι φορητά και υδραυλικού τύπου και η διαδικασία του καθαρισμού επιτυγχάνεται με πρόσκρουση (impact cleaning), με περιστροφή (rotary cleaning) ή με συνδυασμό των δύο. Είθισται να αποφεύγεται ο παρατεταμένος διάρκειας καθαρισμός με περιστροφικά εργαλεία, γιατί οδηγεί σε εξαιρετικά λεία επιφάνεια με αποτέλεσμα να μειώνεται η πρόσφυση του επιστρώματος στο μέταλλο. Η μέθοδος αυτή είναι ταχύτερη και δίνει αποτελέσματα υψηλότερης ποιότητας από το χειρωνακτικό μηχανικό καθαρισμό. Είναι, όμως, ακριβότερη από τον καθαρισμό με ψηγματοβολή, ιδιαίτερα για μεγάλες επιφάνειες. Η χρήση της έγκνεται σε τοπικές επισκευές για την απομάκρυνση σκουριάς και την επεξεργασία κατεστραμμένων ή καμένων περιοχών και ραφών συγκόλλησης. Αμφότερες οι μέθοδοι έπονται της απολιπάνσεως ενώ απαιτούν και άμεση εφαρμογή του πρώτου επιστρώματος κατόπιν περατώσεώς τους.



Εικόνα 5: Περιστροφική συρματόβουρτσα ^[23]

4. Καθαρισμός με ψηγματοβολή (Blast Cleaning)

Ο καθαρισμός μεταλλικών επιφανειών με ψηγματοβολή αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο προετοιμασίας των χαλύβδινων επιφανειών, συνήθως με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά την ψηγματοβολή επιτελείται πρόσκρουση μικρών μεταλλικών ή ορυκτών σωματιδίων (ψηγμάτων) με μεγάλη ταχύτητα πάνω στη χαλύβδινη επιφάνεια προς καθαρισμό.

Οι σημαντικότερες παράμετροι του καθαρισμού με ψηγματοβολή είναι οι εξής:

- κατάλληλη επιλογή ψήγματος (υλικό, μέγεθος, πιθανή ρύπανση)
- έγκαιρη απομάκρυνση σκόνης και ακαθαρσιών
- κατάλληλη πίεση βολής
- ξηρός αέρας (όταν χρησιμοποιείται)
- κατάλληλος διαχωρισμός ελαίου και νερού
- κατάλληλη αναλογία ψήγματος και μέσου μεταφοράς (αέρας ή νερό)

Οι δε κύριες μέθοδοι παρατίθενται κάτωθι και οι δύο (2) πρώτες θα αναπτυχθούν καθώς συνιστούν τις συχνότερα εφαρμοζόμενες σε ναυπηγοεπισκευαστικές εργασίες:

- Υδροβολή (Water jet Blasting)
- Αμμοβολή (Sandblasting)
- Ψηγματοβολή με ακροφύσιο (Nozzle Blasting)
- Ψηγματοβολή με φυγόκεντρο συμπιεστή (Centrifugal B)
- Ψηγματοβολή στο κενό (Vacuum Blasting)

Κατά την **υδροβολή** χρησιμοποιείται ένας εκτοξευτήρας νερού υψηλής πίεσης (150-300 bar) και η συνήθης εφαρμογή της είναι επί της γάστρας των πλοίων όπου απομακρύνονται οι θαλάσσιοι οργανισμοί που προσκολλώνται στην επιφάνειά της, η ελαφρώς προσκολλημένη σκουριά και τα άλατα που διαλύονται στο νερό. Παραλλαγές της υδροβολής είναι η υδροεκτόξευση (hydro-jetting), όπου με χρήση ειδικού εξοπλισμού, μπορεί να εφαρμοστεί σημαντικά υψηλότερη πίεση, της τάξης των 3000 bar καθώς και η υδατοψηγματοβολή (wet abrasive blast-cleaning) που συνίσταται στο συνδυασμό πεπιεσμένου αέρα, νερού και ψήγματος. Στα πλεονεκτήματα της υδροβολής συγκαταλέγονται ο εξαιρετικός καθαρισμός της επιφάνειας, η δυνατότητα εφαρμογής της κάτω από συνθήκες υγρασίας, η μικρή ποσότητα ψήγματος που χρησιμοποιείται, η αποφυγή περιβαλλοντικής μόλυνσης και η ασφάλεια.

Κατά την **αμμοβολή**, ο καθαρισμός γίνεται με εκτόξευση σωματιδίων άμμου πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, αφαιρώντας έτσι παλαιότερα επιστρώματα και οξείδια, καθώς και επιτυγχάνοντας κατάλληλη τραχύτητα, ώστε να ευνοείται η πρόσφυση του επιστρώματος στη μεταλλική επιφάνεια. Η επιλογή του ψήγματος (abrasive) εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την σκληρότητά του καθώς και από την επιθυμητή ποιότητα και τραχύτητα της τελικής επιφάνειας. Τα ψήγματα που κυρίως χρησιμοποιούνται στις συνήθεις μεθόδους είναι τα μεταλλικά (metallic abrasives) και τα ορυκτά (mineral abrasives).

5. Καθαρισμός με φλόγα (Flame Cleaning)

Ο καθαρισμός με φλόγα συνίσταται στη χρήση φλόγας οξυγόνου-ασετιλίνης η οποία προκαλεί διαφορετική θερμική διαστολή μεταξύ του χάλυβα και της καλαμίνης/σκουριάς οδηγώντας στην απομάκρυνσή των από την επιφάνεια του χάλυβα. Προηγείται η απομάκρυνση των διαφόρων στρωμάτων σκουριάς με απόξεση και έπεται καθαρισμός με ηλεκτροκίνητη συρματόβουρτσα. Η ταχύτητα της φλόγας κυμαίνεται μεταξύ 1 και 5 m/min, αναλόγως της αρχικής κατάστασης της επιφάνειας. Απαιτείται προσοχή στη ρύθμιση της αναλογίας οξυγόνου και ασετιλίνης, ώστε να μην εναποτίθενται ποσότητες αιθάλης επί των ελασμάτων. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η ατελής απομάκρυνση της καλαμίνης και της σκουριάς από την επιφάνεια των χαλύβδινων ελασμάτων, το πτωχό σχετικά τελικό αποτέλεσμα καθώς και ο αυξημένος κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς.

6. Καθαρισμός με εμβάπτιση σε οξέα (Pickling)

Κατά τη μέθοδο αυτή, το έλασμα εμβαπτίζεται σε θερμό λουτρό οξέων, που συντελούν στον καθαρισμό του από την καλαμίνα και τη σκουριά. Στο χρησιμοποιούμενο διάλυμα προστίθενται κατάλληλες ουσίες (επιβραδυντές διάβρωσης), ώστε να αποφευχθεί η προσβολή του μετάλλου από τα οξέα. Είθισται να προηγείται η απολίπανση και η απομάκρυνση της κόνεως από την επιφάνεια προ της εμβάπτισης, ενώ έπεται ο καθαρισμός της επιφάνειας με καθαρό νερό (ξέπλυμα), ώστε να απομακρυνθούν και τα τελευταία κατάλοιπα των οξέων, διαδικασία που πρέπει να επιτελεστεί σχολαστικά για να αποφευχθεί η εμφάνιση φλυκταινών και η πρόωγη καταστροφή του επικαλυπτικού συστήματος. Εν συνεχεία, με κατάλληλο διάλυμα (φωσφορικό οξύ 2% κ.β. – 0.5% κ.β. για εποξειδικά επιστρώματα) επιτελείται η παθητικοποίηση του χάλυβα. Το τελικό αποτέλεσμα του χημικού καθαρισμού αποδίδει πιο λείες επιφάνειες από την ψηγματοβολή. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το μεγάλο μέγεθος των δεξαμενών που απαιτούνται για την εμβάπτιση των ελασμάτων, η έκλυση διαβρωτικών και επιβλαβών αερίων, οι μεγάλες απαιτούμενες ποσότητες νερού για ξέπλυμα και η απόρριψη των διαφόρων οξέων κατόπιν της αποπερατώσεως της διαδικασίας. Οι συνηθέστερες διαδικασίες καθαρισμού με εμβάπτιση σε οξέα είναι η μέθοδος θειικού οξέος/φωσφορικού οξέος, η μέθοδος υδροχλωρικού οξέος/φωσφορικού οξέος και η μέθοδος φωσφορικού οξέος/φωσφορικού οξέος.



Εικόνα 6: Σωλήνες κατά τον καθαρισμό με εμβάπτιση σε οξέα ^[23]

Το πρότυπο ISO 8501

Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, οι επιφανειακές συνθήκες χαλύβδινων κατασκευών χωρίζονται σε τέσσερις (4) κατηγορίες και συμβολίζονται με τα γράμματα Α,Β,С, D αντιστοίχως:

- Χαλύβδινες επιφάνειες καλυμμένες με καλαμίνα και ελαφρά σκουριά (Α)
- Χαλύβδινες επιφάνειες που έχουν αρχίσει να οξειδώνονται και η καλαμίνα έχει αρχίσει να αποφλοιώνεται (Β)
- Χαλύβδινες επιφάνειες από τις οποίες έχει απομακρυνθεί η καλαμίνα ή μπορεί να αποξεστεί και τα πρώτα ορατά σημάδια βελονισμών (С)
- Χαλύβδινες επιφάνειες εμφανώς διαβρωθείσες και επηρεασμένες από βελονισμούς (D)

Σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο, η ποιότητα προετοιμασίας χαλύβδινων επιφανειών εκπροσωπείται από τους εξής βαθμούς:

- “Sa 2”: Λεπτομερής καθαρισμός
- “Sa 2.5”: Πολύ λεπτομερής καθαρισμός με ψηγματοβολή
- “Sa 3”: Οπτικά καθαρός χάλυβας
- “St 3”: Πολύ λεπτομερής καθαρισμός με εργαλεία χειρός ή με εργαλεία ισχύος

2.6.3.3 Μέθοδοι και συνθήκες εφαρμογής επιστρωμάτων

Οι κυριότερες μέθοδοι εφαρμογής των συστημάτων επιστρωμάτων είναι οι εξής:

1. Με πινέλο (brushing)

Χρησιμοποιείται ευρέως σε μικρές επιφάνειες και δυσπρόσιτα σημεία όπως γωνίες και συγκολλήσεις. Στα θετικά της μεθόδου συγκαταλέγεται η πολύ μικρή φύρα υλικού και η καλύτερη διείσδυση σε πόρους, ρωγμές και χαραγές. Στα μειονεκτήματα αρχικά καταλογίζεται ότι είναι επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Προσέτι, το τελικό αποτέλεσμα επαφίεται στην ατομική ικανότητα και εμπειρία του εργάτου και δύναται να διαφέρει σημαντικά. Ακόμη, υφέρπει κίνδυνος για την υγεία του εργάτου ιδίως σε διαλυτικά χρώματα και σε κλειστούς χώρους. Τέλος, η μέθοδος κρίνεται ακατάλληλη για προϊόντα ταχείας στεγνώσεως καθώς το πινέλο αφήνει χνάρια και το επίστρωμα δεν έχει ομογενή χροιά.

2. Με εκνέφωση αέρος (air spraying)

Το επίστρωμα μεταφέρεται από το δοχείο του στο πιστόλι μέσω πεπιεσμένου αέρος ή αντλίας. Καθώς διέρχεται από το επιστόμιο, αναμιγνύεται με αέρα και υφίσταται εκνέφωση σε πιέσεις 2-4 bar. Η μέθοδος αυτή είναι ταχύτερη αυτών με πινέλο ή ρολό ενώ τα τελικά στρώματα είναι πιο ομοιόμορφου πάχους. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγαλύτερη φύρα, είτε λόγω υπερψεκιάσεως (overspray) είτε λόγω αναπηδήσεως (rebound) του αέρος ψεκασμού από την επιφάνεια. Οι απώλειες αυτές μπορεί να είναι αραιτά υψηλές σε ψεκασμούς σε εξωτερικούς χώρους. Πολύ σημαντικές παράμετροι είναι η απόσταση ψεκασμού, η πίεση και το είδος του ακροφυσίου.

3. Με εκνέφωση άνευ αέρος (airless spraying)

Ασκείται υψηλή πίεση (75–300 bar) μέσω αντλίας και η μπογιά διέρχεται από στενό επιστόμιο όπου και εκνεφώνεται. Σε αντίθεση με την εκνέφωση αέρος, η απουσία του αέρα οδηγεί σε λιγότερη υπερψέκαση και αναπήδηση. Ακόμη υπάρχει ελάχιστο ρίσκο παρουσίας ακαθαρσιών όπως έλαια και νερό. Πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι ο υψηλότερος ρυθμός ψεκασμού, η δυνατότητα επίστρωσης σε υψηλότερο ιξώδες άρα και μεγαλύτερο πάχος ξηρού φιλμ, μικρότερες απώλειες διαλύτη και δυνατότητα χρήσης περισσότερο πτητικών διαλυτών. Στα αρνητικά της μεθόδου συγκαταλέγονται η απαίτηση γρήγορης και συγκεντρωμένης εργασίας λόγω του υψηλού ρυθμού αποθέσεως, η ακαταλληλότητα για επίστρωση μικρών αντικειμένων, η απαίτηση στενών επιστομιών για επίτευξη λεπτών στρώσεων τα οποία με τη σειρά τους υφίστανται υπερθερμάνσεις και δυσλειτουργίες και, τέλος, η υψηλή ταχύτητα του ψεκασμού είναι επικίνδυνη για πρόκληση ατυχημάτων.



Εικόνα 7: Εφαρμογή επιστρώματος με εκνέφωση άνευ αέρος στα έξαλα ενός πλοίου ^[23]

4. Με ρολό (rolling)

Επίστρωση με ρολό είναι ταχύτερη από αυτή με πινέλο. Είναι κατάλληλη για μεγάλες, επίπεδες επιφάνειες αλλά ακατάλληλη για γωνίες, εγκοπές και συγκολλήσεις, οπότε και απαιτείται πρόσθετη επίστρωση με πινέλο. Προσέτι, το είδος του χρησιμοποιούμενου επιστρώματος υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς ως και η επίστρωση με πινέλο.

5. Ηλεκτροστατικής εκνεφώσεως (electrostatic spraying)

Κατά τη διαδικασία αυτή η εκνεφωθείσα μπογιά και το αντικείμενο προς επίστρωση είναι αρνητικά και θετικά φορτισμένα αντίστοιχα. Αυτό οδηγεί σε καλή πρόσφυση και ομοιόμορφο στρώμα. Επιπρόσθετα, είναι οικονομική μέθοδος με χαμηλή φύρα. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ο περιορισμός της επίστρωσης μόνον της εξωτερικής επιφάνειας αντικειμένων και η παρουσία ατελειών λόγω εσφαλμένης ισορροπίας ιξώδους – διαλύτη.

6. Κόνεως (powder coating)

Η επίστρωση κόνεως θεωρείται παραλλαγή της προηγούμενης τεχνικής. Συνεχής ροή κόνεως, ρευστοποιημένη σε ρεύμα αέρος, διέρχεται μέσω μιας υψηλά φορτισμένης (40–150V) περιοχής

ιονίζουσας εκκένωσης. Τα φορτισμένα σωματίδια του επιστρώματος κατευθύνονται στο γειωμένο υπόστρωμα. Σε συνδυασμό με την ηλεκτροστατική έλξη, μια επιβαλλόμενη ροή αέρος αυξάνει την ταχύτητα των σωματιδίων προς το υπόστρωμα. Κατόπιν αποθέσεως, το στρώμα συντήκεται σε φούρνο στους 180° C για 10 έως 15 λεπτά, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κόνεως. Πάχη επιστρώσεως έως 500 μm είναι πιθανά με αυτή τη μέθοδο, με συχνότερα πάχη ανάμεσα στα 300 και τα 450 μm.

7. Ηλεκτροαπόθεση (electrodeposition)

Φορτισμένα σωματίδια μπογιάς σε διάλυμα υδατοδιαλυτών ρητινών κατευθύνονται στην επιφάνεια του αντικειμένου λόγω δυναμικού πεδίου ανάμεσα στην κάθοδο (αντικείμενο) και την άνοδο (δεξαμενή λουτρού). Στα πλεονεκτήματά της εντάσσονται η απόκτηση ομοιόμορφου επιστρώματος, η διεύθυνση σε στενά σημεία (πχ ραφές), η ταχύτητα και η απουσία κινδύνου πυρκαγιάς. Αρνητικό της μεθόδου είναι ο περιορισμός του πάχους εξαιτίας της ηλεκτρικής αντιστάσεως του σχηματιζόμενου επιστρώματος, που είναι κατά μέγιστο 25 μm, ενώ μόνο ένα στρώμα γίνεται να περασθεί.

8. Εμβαπτίσεως (dip coating)

Το προς επίστρωση αντικείμενο εμβαπτίζεται στο επίστρωμα. Πρόκειται για απλή, οικονομική και ταχεία μέθοδο. Η ποιότητα εξαρτάται από το χρόνο αναδύσεως, το ιξώδες, το ρυθμό απώλειας του διαλύτη και την ανάμιξη του επιστρώματος. Η μέθοδος αυτή δύναται να αυτοματοποιηθεί για χρήση σε μεγάλες ποσότητες αντικειμένων προς επίστρωση.

Σε ναυπηγικές επιστρώσεις, συνηθέστερες μέθοδοι είναι με πινέλο, με ρολό ή με εκνέφωση.

Αναφορικά τώρα με τις **συνθήκες εφαρμογής των επιστρωμάτων**, **απαρτίζονται από τη θερμοκρασία και την υγρασία.**

Η θερμοκρασία τόσο του αέρα όσο και του χάλυβα επηρεάζουν παραμέτρους όπως η εξάτμιση του διαλυτικού, οι ιδιότητες του βουρτσίσματος και του ψεκασμού και ο χρόνος του στεγνώματος και της σκλήρυνσης. Θέρμανση, όπου αυτή απαιτείται, πρέπει να γίνεται με έμμεσες μεθόδους. Υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν σε πορώδη και ανομοιογενούς πάχους επιστρώματα με τραχιά επιφάνεια. Χαμηλές θερμοκρασίες (<1° C) επίσης πρέπει να αποφεύγονται γιατί η πιθανή παρουσία πάγου στους πόρους της χαλύβδινης επιφάνειας προκαλεί μειωμένη πρόσφυση του επιστρώματος και ελαττωμένη προστασία από τη διάβρωση. Εν γένει, συνιστανται θερμοκρασίες όχι χαμηλότερες των 5° C για επιστρώματα πολυουρεθάνης και των 10° C για εποξειδικά επιστρώματα, και όχι υψηλότερες των 30° C.

Η παρουσία υγρασίας ενέχει κίνδυνο συμπύκνωσης και εγκλωβισμού υδρατμών στην επιφάνεια, προκαλώντας πρόωρη διάβρωση του χάλυβα, μειωμένη πρόσφυση του επιστρώματος, δημιουργία φλυκταινών και, τελικά, αστοχία του επιστρώματος. Η υγρασία του αέρα εκφράζεται με τη σχετική υγρασία (relative humidity), δηλαδή το λόγο της ποσότητας των υδρατμών που περιέχονται σε δεδομένο όγκο αέρα υπό δεδομένη θερμοκρασία προς τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που ο ίδιος όγκος αέρα μπορεί να περιέχει στην ίδια θερμοκρασία. Συνήθως κυμαίνεται από 50% - 90%. Στο 100% της σχετικής υγρασίας ο αέρας είναι κορεσμένος και η θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει αυτό καλείται σημείο δρόσου (dew point). Για να αποφευχθούν αστοχίες σχετιζόμενες με την υγρασία,

πρέπει η βαφή να μην εφαρμόζεται σε σχετική υγρασία άνω του 85% ούτε σε ανοιχτό περιβάλλον με βροχή, χιόνι, πάγο, ομίχλη ή μολυσμένη ατμόσφαιρα, ενώ πρέπει να εφαρμόζεται σε θερμοκρασία 2° με 3° C υψηλότερη αυτής του σημείου δρόσου.

Για να αποφευχθεί η δυσμενής επίδραση των ανωτέρω συνθηκών, εργασίες επιστρώσεως εΐθισται να λαμβάνουν χώρα σε στεγασμένους χώρους (π.χ υπόστεγα ναυπηγείων – hangars) ή όπου αυτό δεν είναι εφικτό, να σκεπάζονται με nylon οι προς βαφή επιφάνειες και να τηρούνται προσεκτικά (με κατάλληλο εξοπλισμό και μονώσεις) οι απαιτούμενες συνθήκες υγρασίας/θερμοκρασίας.



Εικόνα 8: Θαλαμηγός προ της εφαρμογής επιστρωμάτων, καλυμμένη με nylon και εντός υποστέγου, σε ναυπηγείο του Περάματος [φωτ. προσωπικού αρχείου]

2.6.3.4 Πάχος μεμβράνης επιστρώματος (film thickness)

Τα στερεά συστατικά στο τελικό επίστρωμα καθορίζουν το τελικό πάχος μεμβράνης του επιστρώματος, ανάλογα της ποσότητας που εφηρμόσθη επί συγκεκριμένης επιφάνειας, εμβαδού Α, σύμφωνα με τα σχέση:

$$\text{πάχος μεμβράνης}(\mu\text{m}) = \frac{\text{Όγκος υγρού επιστρώματος} \times \% \text{ Στερεά}}{A(\text{m}^2)}$$

Αυτό είναι θεωρητικά υπολογιζόμενο ποσόν, και αναμένεται να υπάρξουν αποκλίσεις στην πραγματικότητα, εξαιτίας της τραχύτητας της επιφάνειας και των απωλειών κατά την εφαρμογή του υγρού επιστρώματος. Για εφαρμογές εκνέφωσης, αναμένεται απώλεια της τάξης του 15%.

2.6.3.5 Χρόνος ζωής – αντοχή – πρόσφυση επιστρώματος

Για να είναι αποτελεσματικό ένα επίστρωμα, πρέπει να έχει μηχανική αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις και αντίσταση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τα συχνότερα ελαττώματα που συναντώνται στο τελικό επίστρωμα είναι:

1. Ανομοιογένεια της μοριακής δομής
2. Κατάλοιπα διαλύτη
3. Παραμένουσες τάσεις
4. Διαφορές στους συντελεστές διαστολής σε πολυστρωματικά συστήματα επίστρωσης
5. Πτώχή πρόσφυση του πολυμερούς στο πιγμέντο

Η μηχανική αντοχή ενός επιστρώματος περιγράφεται από τη σκληρότητα και την πλαστικότητά του, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας και την επιμήκυνση ως τη θραύση από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του επιστρώματος. Οι δομικές ατέλειες του επιστρώματος προκαλούν αστοχίες που καθορίζονται από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμική αντίδραση, οξείδωση, φωτο-οξείδωση και φωτο-θερμική αντίδραση. Ο πλέον σημαντικός παράγοντας επίδρασης στις φυσικές ιδιότητες του επιστρώματος είναι η **θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως, T_g**. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες της T_g, η κίνηση των μορίων της ρητίνης γίνεται πιο δραστική, ώστε η σκληρότητα, η πλαστικότητα και η διαπερατότητα νερού και οξυγόνου να διαφέρουν σημαντικά.

Η υποβάθμιση των επιστρωμάτων ενθαρρύνεται από φωτόλυση, φωτο-οξείδωση ή φωτο-θερμικές αντιδράσεις ως αποτέλεσμα της εκθέσεως σε φυσικό φως. Ειδικότερα, το υπεριώδες φως (μήκους κύματος 40 – 400 nm) αποσυνθέτει σταδιακά πολυμερείς δομές, ρητίνες βινυλοχλωριδίου. Η θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως ενός πολυμερούς είναι καθοριστικής σημασίας και για τη διαδικασία της φωτόλυσης. Ελεύθερες ρίζες σχηματισμένες από τη φωτόλυση εγκλωβίζονται στο πλέγμα αλλά διαχέονται και αντιδρούν σε θερμοκρασίες υψηλότερες της T_g, επιταχύνοντας την αποσύνθεση του πολυμερούς.

Η πρόσφυση του επιστρώματος επηρεάζεται από ατμοσφαιρικούς παράγοντες, με προεξέχοντες την υγρασία και το νερό. Όλα τα οργανικά πολυμερή είναι υδατοδιαπερατά. Όταν, λοιπόν, η υγρασία διεισδύει στο υπόστρωμα, έχουμε το **σχηματισμό φλυκταινών (blistering)**. Τέσσερις (4) είναι οι μηχανισμοί σχηματισμού φλυκταινών:

1. Αύξηση όγκου λόγω «φουσκώματος» (swelling)
2. Εγκλείσεις ή σχηματισμός αερίου
3. Διαδικασία όσμωσης εξαιτίας διαλυτών ατελειών στη διεπιφάνεια επιστρώματος – υποστρώματος
4. Ηλεκτρο-οσμωτικές φλύκταινες

Εκ των μηχανισμών αυτών, συχνότερος και σημαντικότερος είναι αυτός της όσμωσης. Εκτιμάται ότι 70% των αστοχιών επιστρωμάτων είναι αποτέλεσμα εσφαλμένης ή ανεπαρκούς επιφανειακής προετοιμασίας προ της επιστρώσεως.

2.6.3.6 Μορφές Διάβρωσης υπό Οργανικών Επιστρωμάτων

Η **διάβρωση** ενός υποστρώματος κάτω από οργανικό επίστρωμα είναι ηλεκτροχημική διαδικασία βασισμένη στις ίδιες αρχές με της διάβρωσης άνευ του επιστρώματος. Διαφέρει από τη διάβρωση χαραγής γιατί τα αντιδρώντα συχνά φτάνουν στο υπόστρωμα διαμέσου ενός στερεού. Προσέτι, κατά τα αρχικά στάδια της διάβρωσης υπάρχουν μικρές ποσότητες υγρού που οδηγούν σε ακραίες τιμές pH και συγκέντρωσης ιόντων. Γενικά η διαδικασία της διάβρωσης εξελίσσεται ως ακολούθως:

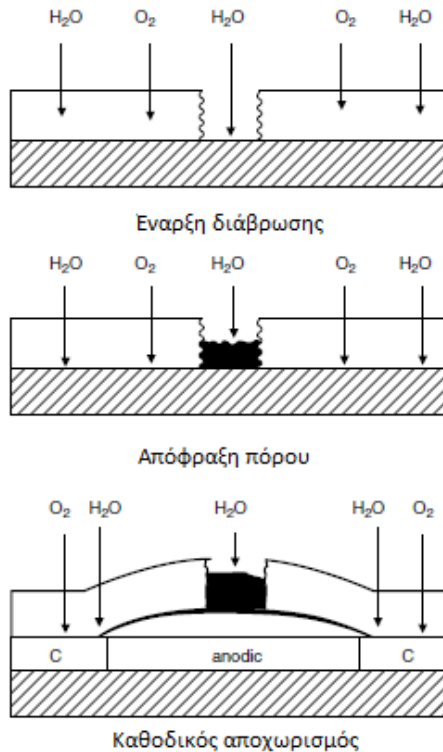
1. Εισροή νερού, οξυγόνου και ιόντων μέσω του επιστρώματος
2. Ανάπτυξη υδατικής φάσης στη διεπιφάνεια υποστρώματος/επιστρώματος
3. Πραγματοποίηση ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων στην επιφάνεια του υποστρώματος.
4. Υποβάθμιση του δεσμού επιστρώματος/υποστρώματος.

Τα μόρια του νερού φτάνουν στην διεπιφάνεια υποστρώματος/επιστρώματος κατόπιν εκθέσεως σε υδατικό διάλυμα ή υγρής ατμόσφαιρας και επηρεάζουν το δεσμό μεταξύ των, καταλήγοντας στην απώλεια της πρόσφυσης και την έναρξη της διάβρωσης αν μια καθοδική αντίδραση μπορεί να λάβει χώρα. Για να συνεχίσει η διάβρωση, απαιτείται συνεχής παροχή καθοδικού είδους, όπως το νερό ή το οξυγόνο. Η υδατοδιαπερατότητα μπορεί ακόμα να οδηγήσει στη συσσώρευση υψηλής οσμωτικής πίεσης που ευθύνεται για σχηματισμό φλυκταινών (blistering) και αποχωρισμό (delamination).

Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης είναι:

- **Καθοδικός Αποχωρισμός (Cathodic Delamination)**

Όταν εφαρμόζεται καθοδική προστασία σε επιστρωμένο μέταλλο συχνά συμβαίνει απώλεια της πρόσφυσης υποστρώματος/επιστρώματος, η οποία καλείται καθοδικός αποχωρισμός. Το αυτό δύναται να συμβεί και απουσία εφηρμοσμένου δυναμικού. Ο διαχωρισμός περιοχών ανοδικής και καθοδικής αντίδρασης κάτω από το επίστρωμα επιφέρει αντίστοιχη τοπική κινητήριο δύναμη με αυτήν της εξωτερικής πόλωσης. Η διάδοση μιας φλυκταινας εξαιτίας καθοδικού αποχωρισμού κάτω από επίστρωμα σε χαλύβδινη επιφάνεια παρουσιάζεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 12: Έναρξη και διάδοση φλυκταίνης κάτω από ελαττωματικό επίστρωμα ^[19]

Όταν υπάρχει μικρή ατέλεια στο επίστρωμα, μέρος του υποστρώματος εκτίθεται άμεσα στο διαβρωτικό περιβάλλον. Τα προϊόντα διάβρωσης που αμέσως σχηματίζονται φράσσουν την εισροή οξυγόνου. Η ατέλεια αυτή σφραγίζεται από τα προϊόντα της διάβρωσης και μετέπειτα λαμβάνει χώρα η διάδοση της διάβρωσης

- **Ανοδική υπόσκαψη (Anodic Undermining)**

Ανοδική υπόσκαψη προκύπτει από την απώλεια της πρόσφυσης εξαιτίας ανοδικής διαλύσεως του μετάλλου του υποστρώματος ή του οξειδίου αυτού. Σε αντίθεση με τον καθοδικό αποχωρισμό, το μέταλλο είναι ανοδικό στις άκρες της φλύνταινας. Ελαττώματα στο επίστρωμα μπορούν να προκαλέσουν ανοδική υπόσκαψη, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις σχετίζεται με περιοχή ευαίσθητη στη διάβρωση κάτω από το επίστρωμα, όπως ένα σωματίδιο από διαδικασία καθαρισμού ή ψηγματοβολής ή μια περιοχή με ειδορές. Οι περιοχές αυτές γίνονται δραστικές όταν διαβρωτικοί παράγοντες διεισδύουν στη μεταλλική επιφάνεια. Ο αρχικός ρυθμός διάβρωσης είναι χαμηλός, εν τούτοις η αναπτυξη φλυνταίνων εντείνεται εξαιτίας οσμωτικής πίεσης προκληθείσης από διαλυτά προϊόντα διάβρωσης. Κατόπιν σχηματισμού, η φλύνταινα επεκτείνεται λόγω ανοδικής διάβρωσης χαραγής στα άκρα της. Γενικά το επιστρωμένο αλουμίνιο είναι πολύ ευαίσθητο στην ανοδική υπόσκαψη, αντίθετα ο χάλυβας στον καθοδικό αποχωρισμό.

- **Νηματοειδής διάβρωση (Filiform Corrosion)**

Η νηματοειδής διάβρωση αναπτύχθηκε στην ¶ 1.7.8

2.6.3.7 Αστοχία των προστατευτικών επιστρώματων

Δύο (2) είναι οι κύριες αιτίες που προκαλούν αστοχία των επιστρώματων, πτωχή ή ανεπαρκής προετοιμασία επιφάνειας / εφαρμογή επιστρώματος και ατμοσφαιρικοί παράγοντες.

Μορφές αστοχίας εξαιτίας προβλημάτων προετοιμασίας επιφάνειας και εφαρμογής είναι:

1. Ρωγμάτωση (cracking). Προκαλείται με τη γήρανση και την επακόλουθη συρρίκνωση του επιστρώματος. Ειδική περίπτωση είναι η ρήξη του επιστρώματος που προκαλείται με εφαρμογή σκληρού ψαθυρού φιλμ πάνω σε πιο εύκαμπτο και καλείται κροκοδειλίαση (alligatoring).
2. Αποφλοίωση, απολέπιση και αποχωρισμός (peeling, flaking, delamination). Οι αστοχίες αυτές προκαλούνται από πτωχή πρόσφυση. Όταν αποφλοίωση ή απολέπιση λάβει χώρα ανάμεσα σε στρώσεις καλείται αποχωρισμός.
3. Σιωρίαση (rusting). Εμφανίζεται ως α) τοπική σκουριά σε σημεία β) σκουριά κατά οπές (pinhole rusting) σε μικρές επιφάνειες γ) κόμβοι σκουριάς (rust nodules) διαπερνώντας το επίστρωμα και δ) υποστρωματική σκουριά (underfilm coating) η οποία εν τέλει προκαλεί αποφλοίωση του επιστρώματος.
4. Μάζεμα και ρυτίδωση (lifting και wrinkling). Όταν ο διαλύτης ενός μετέπειτα εφαρμοσμένου στρώματος μαλακώνει ταχέως το προηγούμενο στρώμα συμβαίνει το «μάζεμα» (lifting). Ταχεία επιφανειακή στέγνωση ενός επιστρώματος χωρίς ομοιόμορφη στέγνωση του υπόλοιπου φιλμ προκαλεί τη ρυτίδωση (wrinkling).
5. Αστοχίες σε περιοχές συγκόλλησης. Η πρόσφυση του επιστρώματος μπορεί να προσβληθεί από κατάλοιπα σκόνης τόξου συγκόλλησης (flux) τα οποία επίσης επιταχύνουν τη διάβρωση του υποστρώματος. Ακόμη, οι εκτοξεύσεις (spattering) της συγκόλλησης προκαλούν κενά και κοιλότητες που μπορεί να μην επιστρωθούν επαρκώς για προστασία.
6. Αστοχίες ακμής (edge failures). Έχουν τη μορφή σκουριάς μέσω της ακμής του φιλμ, όπου το επίστρωμα συνήθως είναι πιο λεπτό. Αυτό συχνά συνοδεύεται με ανάπτυξη σκουριάς υπό του φιλμ.
7. Αστοχία μικρών οπών (pinholing). Μικρές οπές που εκθέτουν το υπόστρωμα προκαλούνται από ατελή ενέφωση του ψεκαζόμενου χρώματος ή διαχωρισμό ρητίνης στο επίστρωμα. Απαιτεί πέραςμα επιπλέον στρώματος.

Τα επιστρώματα πολυμερών εκτίθενται στο περιβάλλον και υπόκεινται σε υποβάθμιση εξαιτίας αυτού. Κύριοι παράγοντες είναι θερμικοί, μηχανικοί, ακτινοβολίας, χημικοί και βιολογικοί. Κάθε ατμοσφαιρικό περιβάλλον εμφανίζει υγρούς και ξηρούς κύκλους. Το νερό και η υγρασία έχουν καθοριστικό ρόλο στην υποβάθμιση γι' αυτό και ο χρόνος έκθεσης σε βροχή, ομίχλη, δρόσο, χιόνι και παρουσία ατμού στην ατμόσφαιρα είναι σημαντικός. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η σχετική υγρασία (relative humidity), καθώς ως φαίνεται στον κάτωθι πίνακα, όσο αυξάνεται ο χρόνος έκθεσης σε 100% σχετική υγρασία τόσο μειώνεται η αντοχή των δεσμών ενός επιστρώματος.

Πίνακας 5: Συσχέτιση της αντοχής δεσμού επιστρώματος με το χρόνο έκθεσης σε 100% σχετική υγρασία ^[19]

Χρόνος έκθεσης (h)	Αντοχή δεσμού (psi)		
	Εποξικός εστέρας	Πολυουρεθάνη	Θερμοσκληρυνόμενο ακρυλικό
Αρχικός	4790	3410	5700
24	1640	1500	3650
48	1500	1430	3420
120	-	1390	2400
195	1400	1130	1850
500	1390	670	480

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές και ο μεγαλύτερος χρόνος διαβροχής τείνει να δημιουργήσει συσσώρευση νερού η οποία επιταχύνει την υποβάθμιση του οργανικού επιστρώματος, ιδίως σε θαλάσσιες ατμόσφαιρες, που θεωρούνται οι πιο ακραίες ατμόσφαιρες για τα επιστρώματα. Οι τρόποι της υποβάθμισης περιλαμβάνουν τον αποπολυμερισμό, τη διάσπαση των συστατικών του πολυμερούς, την κατάτμηση των αλυσίδων, τη διακλάδωση αυτών, την οξείδωση και την υδρόλυση. Επίσης, τα πολυμερή είναι ευπαθή σε ρωγμές κατόπιν εξασκήσεως εφελκυστικής δύναμης, ιδίως όταν είναι εκτεθειμένα σε υγρά περιβάλλοντα, φαινόμενο που είδαμε ως SCC.

Έτεροι ατμοσφαιρικοί παράγοντες που προκαλούν διάβρωση ή υποβάθμιση του επιστρώματος είναι η υπεριώδης ακτινοβολία, η θερμοκρασία, το οξυγόνο, οι ρύποι και ο άνεμος. Είδη αστοχίας προκληθείσες εκ των ανωτέρω παραγόντων είναι:

1. Κονιορτοποίηση (chalking). Η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, το οξυγόνο και διάφορα χημικά υποβαθμίζουν το επίστρωμα οδηγώντας στην επιφανειακή κονιορτοποίησή του. Αυτό μπορεί να θεραπευτεί εφαρμόζοντας ένα επιπλέον τελικό στρώμα με κατάλληλο αναστολέα UV.
2. Ξεθώριασμα ή μεταβολή χρώματος. Αυτό μπορεί να προκληθεί από κονιορτοποίηση της επιφάνειας ή κατάρρευση των χρωστικών πιγμέντων. Τα τελευταία υποβαθμίζονται ή αποσυντίθενται με UV φως ή αντίδραση με χημικά.
3. Σχηματισμός φλυκταινών (blistering). Μπορεί να συμβεί από
 - α) Ανεπαρκή έκλυση διαλύτη κατά την εφαρμογή και την στέγνωση του συστήματος επίστρωσης.
 - β) Ατμό υγρασίας που διαπερνά το φιλμ και υδροποιείται σε σημείο χαμηλής πρόσφυσης.
 - γ) Πτωχή επιφανειακή προετοιμασία.
 - δ) Πτωχή πρόσφυση του επιστρώματος στο υπόστρωμα ή πτωχή διαστρωματική πρόσφυση.
 - ε) Κάποιο στρώμα στο σύστημα επιστρώματος δεν είναι ανθεκτικό στο περιβάλλον.
 - στ) Εφαρμογή επιστρώματος ταχείας στέγνωσης επί πορώδους επιφάνειας.
 - ζ) Αστοχίες εξαιτίας χημικής ή διαλυτικής προσβολής.
4. Εκτριβή (erosion).

2.6.3.8 Επιστρώματα για Ναυπηγικές εφαρμογές ^[24]

Το θαλάσσιο ύδωρ και η ατμόσφαιρα άνωθεν αυτού είναι εξαιρετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Τα οργανικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται ευρέως για την προστασία του χάλυβα σε αυτές τις

περιπτώσεις. Η προστασία των υφάλων της γάστρας του πλοίου ή θαλασσίων κατασκευών απαιτεί αναστολή διάβρωσης, αντίσταση στη διάβρωση από νερό, αντιρρυσπαντικές ιδιότητες και συμβατότητα με καθοδική προστασία. Η τελευταία χρησιμοποιείται για την προστασία του χάλυβα όπου το επίστρωμα έχει ζημιωθεί. Η αναστολή διάβρωσης και η αντίσταση στη διάβρωση από νερό εξασφαλίζονται από συστήματα επιστρώματων που αποτελούνται από διάφορα αντιδιαβρωτικά στρώματα βασισμένα σε εποξειδικά (epoxy), βινυλικά (vinyl), χλωριωμένου ελαστικού (chlorinated rubber) ή ασφαλτικά (bituminous) επιστρώματα.

Εποξειδικά επιστρώματα με πίσσα (coal-tar epoxy) και βινυλικά πίσσας (vinyl-tar) έχουν χρησιμοποιηθεί με σημαντική επιτυχία τεχνικά, αλλά η χρήση τους έχει απαγορευτεί σε ορισμένες βιομηχανικές χώρες λόγω της επίδρασης των στην ανθρώπινη υγεία. Αντί αυτών, εποξειδικά επιστρώματα ελεύθερα πίσσας (high solid tar-free epoxy) και ενισχυμένα με ύαλο-νιφάδες (glass flake-reinforced epoxies) χρησιμοποιούνται. Νιφάδες αλουμινίου προστίθενται συνήθως σε ασφαλτικά επιστρώματα αλλά και σε εποξειδικά συστήματα ως δραστικοί αντιδιαβρωτικοί παράγοντες.

Ένα σύνθετο προστατευτικό σύστημα επιστρώματων έχει την ακόλουθη διάταξη:

- Αστάρι (περί τα 50 μm)
- Μία ή δύο στρώσεις αντιδιαβρωτικού επιστρώματος (περί τα 250 με 400 μm)
- Tiecoat/sealer (περί τα 75 μm) που δρα ως ενδιάμεσο στρώμα ανάμεσα στο αντιδιαβρωτικό και το αντιρρυσπαντικό σύστημα (π.χ. για να βελτιώσει την πρόσφυση ή να εμποδίσει τη διάχυση (bleeding) της πίσσας).
- Αντιρρυσπαντικό στρώμα (περί τα 200 μm)

Αντιρρυσπαντικά επιστρώματα (antifouling paints).

Τα αντιρρυσπαντικά επιστρώματα συνιστούν υπο-ομάδα των οργανικών επιστρώματων, που αποσκοπεί στην προστασία πλοίων και θαλασσίων κατασκευών από ζωικούς και φυτικούς θαλάσσιους μικροοργανισμούς. Στη θάλασσα και στις εκβολές ποταμών η ρύπανση συνίσταται κυρίως από μικροοργανισμούς, άλγες (φύκια), όστρακα κλπ. Η ρύπανση αναπτύσσεται ταχύτερα σε ακίνητα ή βραδέως κινούμενα (< 4 κόμβων) πλοία.

Τα αρνητικά της ρύπανσης των πλοίων περιλαμβάνουν υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου, μείωση της μέγιστης ταχύτητας, δυσχέρεια πηδαλιουχίας, πρόκληση διάβρωσης, μηχανικές ζημιές και υψηλό κόστος συντηρήσεως. Η ρύπανση σε πλοία μεταξύ των 1.850 και των 35.000 τόνων προκαλεί αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου περί το 35-50% μετά από 6 μήνες σε εύκρατα ύδατα. Ακόμα και ένα λεπτό βιο-φίλμ οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης και κατ' επέκτασιν απώλεια καυσίμου έως και 20%.

Η ρύπανση στα πλοία αντιμετωπίζεται κυρίως με επιστρώματα από τα οποία διαρρέουν τοξικά συστατικά με αντιρρυσπαντική δράση. Τα δραστικά αυτά συστατικά ελευθερώνονται στη διεπιφάνεια νερού – επιστρώματος και οι οργανισμοί που επικάθονται στη γάστρα σκιοτώνονται.

Οι κυριότεροι τύποι χρησιμοποιούμενων αντιρρυσπαντικών επιστρώματων είναι:

- Συμβατικά αντιρρυσπαντικά διαλυτής μήτρας (conventional soluble matrix type)
- Αντιρρυσπαντικά αδιάλυτης μήτρας (insoluble matrix type)

- Αυτολειαινόμενα αντιρρυπαντικά (self-polishing)
- Αντιρρυπαντικά λειαινόμενα από τριβή (self-polishing/ablative)

Μεγαλύτερη επιτυχία και εξάπλωση γνώρισε ο τύπος αντιρρυπαντικών βασισμένα σε οργανοκασσιτερικά συμπολυμερή. Συγκεκριμένα, συνδύαζαν τις τοξικές ιδιότητες των τριβουτυλοκασσιτερικών ενώσεων (TBT – tributyltin) με μηχανισμό ελεγχόμενης απελευθέρωσης. Ελεγχόμενη και αργή χημική αντίδραση με το θαλάσσιο ύδωρ στην επιφάνεια του επιστρώματος λαμβάνει χώρα και επιτρέπει τη συνεχή αλλά αργή έκλυση TBT. Το συνδετικό μέσο της TBT υδρολύεται στο θαλάσσιο ύδωρ με σταθερό γραμμικό ρυθμό. Το συνδετικό μέσο γίνεται υδατοδιαλυτό όταν επαρκής ποσότητα TBT έχει υδρολυθεί και το ρέων θαλάσσιο νερό στη γάστρα του πλοίου παρασέρνει τα υδρολυμένα κατάλοιπα. Τα επιστρώματα αυτά έχουν χρόνο ζωής έως και πέντε (5) έτη. Μειονέκτημα, ωστόσο, επιστρωμάτων βασισμένα στη TBT είναι η περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλούν λόγω έκλυσης βιοκτόνων. Ως αποτέλεσμα, τέθηκαν νομικοί περιορισμοί για τη χρήση τους. Εν αρχή απαγορεύτηκε η χρήση τους σε σκάφη μήκους μικρότερου των 25 μέτρων, ενώ στη Διεθνή Σύμβαση του Ελέγχου των Επιβλαβών Αντιρρυπαντικών Συστημάτων επί Πλοίων (International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems in Ships (AFS Convention)) του IMO, που ετέθη σε ισχύ τις 17 Σεπτεμβρίου 2008, η χρήση τους απαγορεύτηκε, σταδιακά, σε όλα τα πλοία. Μέχρι το 2013 είχε επικυρωθεί από 67 κράτη-μέλη του IMO, εκπροσωπώντας 82% του συνολικού τονάζ του παγκόσμιου εμπορικού στόλου.

Αναλυτικά τα χρησιμοποιούμενα επιστρώματα σε κάθε περιοχή της κατασκευής του πλοίου, τα κύρια συστατικά τους και η μέθοδος προετοιμασίας επιφάνειας παρίστανται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 6: Συστήματα βαφής στα πλοία ^[2]

Περιοχή της κατασκευής	Προετοιμασία επιφάνειας	Ιδιότητες επιστρώματος	Σύστημα βαφής
	Έξοσμο	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά (>250 μm)
Υφάλα	Υδροβολή	Αντοχή στο νερό	Πισσώδη πολυουρεθανικά (>250μm)
	Αιμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή στη φθορά τριβής	Πισσώδη βινυλικά (>200 μm)
		Αντιρρυπαντικό	Χλωριωμένον ελαστικού >200μm
		Λείο	Βινυλικά >200 μm
		Συμβατό με καθοδική προστασία	Αντιρρυπαντικό
	Υδροβολή	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά >250 μm
	Αιμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή στο νερό	Πισσώδη πολυουρεθανικά >250 μm
Αντοχή σε κρούση		Πισσώδη βινυλικά >200 μm	
Αντιρρυπαντικό		Χλωριωμένον ελαστικού >200 μm	
		Λείο	Βινυλικά >200μm
Ίσαλος ζώνη		Συμβατό με καθοδική προστασία	Τελικά χρώματα ισάλου
		Αντοχή στις καιρικές συνθήκες	

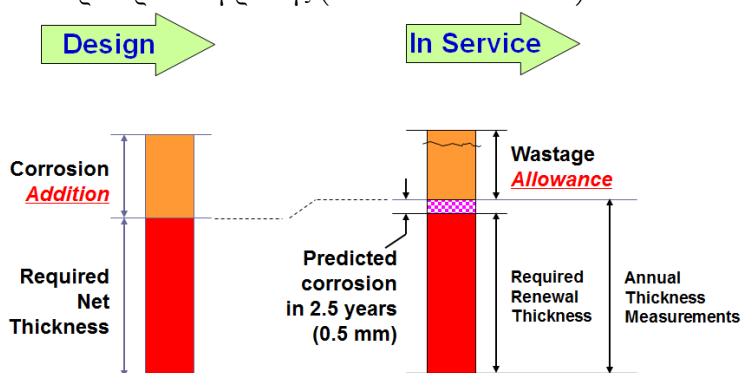
		Αντοχή σε ξέση	
		Αντοχή σε λάδια	
		Εύκολο στον καθαρισμό	
	Πλύσιμο	Αντιδιαβρωτικό	Εποξειδικά >200 μm
Έξαιλα και εκτεθειμένα τμήματα καταστρωμάτων	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή στις καιρικές συνθήκες	Πολυουρεθανικά >200 μm Χλωριωμένου ελαστικού >200 μm
		Αντοχή σε κρούση	Βινυλικά >200 μm
		Αντοχή σε ξέση	Συμβατικά αλκυδικά >140 μm
		Εύκολο στον καθαρισμό	
		Διακοσμητικό	
Κύτη φορτίου	Υδροβολή ή πλύσιμο	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά >200 μm
	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή σε φθορά	Πισσώδη πολυουρεθανικά >200 μm
		Αντοχή σε κρούση	Εποξειδικά >200 μm
	Ματσακόνι	Αντοχή σε ξέση	Πολυουρεθανικά >200 μm
		Αποδεκτό για τρόφιμα	Πυριτικά ψευδαργύρου 75-200 μm
			Συμβατικά αλκυδικά >140 μm
	Υδροβολή ή πλύσιμο	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά >250 μm
Δεξαμενές ακάθαρτου πετρελαίου	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Χωρίς πόρους	Εποξειδικά >250 μm
		Αντοχή στο νερό	Πισσώδη πολυουρεθανικά >250 μm
		Αντοχή στο ακάθαρτο πετρέλαιο	
		Συμβατό με καθοδική προστασία	
	Υδροβολή	Αντιδιαβρωτικό	Εποξειδικά >250 μm
Δεξαμενές πόσιμου νερού	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Χωρίς πόρους	Βινυλικά >250 μm
		Αντοχή στο νερό	
		Μη τοξικό	
		Να μη διαλύεται στο νερό χρωματίζοντάς το	
Μηχανοστάσιο	Πάνω από τους επιφράκτες (πανιόλα)	Αντιδιαβρωτικό	Πολυουρεθανικά >150 μm
		Αντοχή στο λάδι	Συμβατικά αλκυδικά >100 μm
	Πλύσιμο	Εύκολο στον καθαρισμό	
	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Να μην κίτρινίζει	
	Κάτω από τα πανιόλα	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά >200 μm
	Υδροβολή	Αντοχή στο λάδι	Πισσώδη πολυουρεθανικά >200 μm
	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα		Εποξειδικά >200 μm
	Καθαρισμός με χημικό	Αντοχή σε λάδια	Εποξειδικά >200 μm
Δεξαμενές καυσίμου	Υδροβολή ή πλύσιμο		
	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα		
	Υδροβολή ή πλύσιμο	Αντιδιαβρωτικό	Πισσώδη εποξειδικά >250 μm

Δεξαμενές έργματος	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Χωρίς πόρους	Πισσώδη πολυουρεθανικά >250 μm
		Αντοχή στο νερό	Εποξειδικά >250 μm
		Συμβατό με καθοδική προστασία	Πισσώδη βινυλικά >200 μm
	Γλόσμιο	Αντιδιαβρωτικό	Εποξειδικά >200 μm
Καταστρώματα	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή στις καιρικές συνθήκες	Πολυουρεθανικά >200 μm
		Αντοχή σε κρούση	Χλωριωμένοι ελαστικού >200 μm
		Αντοχή σε ξέση	Γκριτικά ψευδαργύρου 75- 120 μm
		Αντοχή σε φθορά τριβής	Συμβατικά αλκυδικά >140 μm
		Αντιολισθητικό	
		Αντοχή σε νερό, λάδια κ.λπ.	
	Γλόσμιο	Αντιδιαβρωτικό	Εποξειδικά >200 μm
Εξωτερικοί χώροι	Αμμοβολή ή καθαρισμός με μηχανικά μέσα	Αντοχή στο νερό	Πολυουρεθανικά >200 μm
		Αντοχή σε σάπουνες	Συμβατικά αλκυδικά >120 μm
		Αντοχή σε ξέση	
Ενδιαίτηση		Εύκολο στον καθαρισμό	
Εσωτερικοί χώροι ενδιαίτησης	Καθαρισμός	Εύκολο στον καθαρισμό	Αλκυδικά (σε ελάσματα) >120 μm
		Εύκολο στην επαναβαφή	Βερνίκι και αλκυδικό (σε ξύλο)
		Διακοσμητικό	

Πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι προσφάτως οι πολυουρεθάνες και τα πισσώδη εποξειδικά επιστρώματα έχουν απαγορευτεί για χρήση επί των υφάλων για περιβαλλοντικούς λόγους.

2.7 Προσαυξήσεις διάβρωσης (Corrosion Additions) ^[87]

Οι νηογώμονες έχουν απαιτήσεις για αύξηση του πάχους των ελασμάτων του πλοίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν το περιθώριο διάβρωσης (corrosion allowance).



Σχήμα 13: Προσαυξήσεις διάβρωσης κατά IACS

2.8 Αντικατάσταση χάλυβα (Steel Renewals) ^[37]

Αρκετά συχνά το πρόβλημα της μείωσης του πάχους των ελασμάτων εξαιτίας της διάβρωσης αντιμετωπίζεται προσθέτοντας καινούριο χάλυβα.

Πρόβλημα, πάντως, με τη διαδικασία αυτή είναι ότι ο καινούριος χάλυβας συγκολλείται επί διαβρωμένης κατασκευής. Οι συγκολλήσεις ανάμεσα στον καινούριο και τον παλιό, διαβρωμένο χάλυβα μπορεί να έχει ατέλειες. Ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) των παλαιών ελασμάτων κατά τη φλογοκοπή και τη συγκόλληση, ενώ και το επίστρωμα του παλαιού ελάσματος μπορεί να φέρει ανεπισκεύαστες ζημιές. Κατά συνέπεια, η διάβρωση του παλαιού χάλυβα μπορεί να επιταθεί, και τα επίπεδα και οι κατανομές των τάσεων στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου μπορεί να επηρεαστούν από τις διαφορές στα πάχη των νέων και των παλαιών ελασμάτων, κάτι που σε ακραίες περιπτώσεις έχει προκαλέσει μέχρι και αποκόλληση τμημάτων του πλοίου εν πλω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 Το Θαλάσσιο περιβάλλον ^{[1], [9], [25] – [29]}

Το θαλάσσιο ύδωρ αποτελείται από την πλειοψηφία των στοιχείων που υπάρχουν στη Γη, έντεκα (11) όμως είναι τα συστατικά που το απαρτίζουν κατά 99,95%, με τα ιόντα χλωρίου να αποτελούν την ισχυρή πλειοψηφία, ως βλέπουμε στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 7: Μέση συγκέντρωση των 11 κυριότερων ιόντων και μορίων σε καθαρό θαλάσσιο ύδωρ (3.5% αλατότητα, 1,023 g/mL στους 25° C) ^[9]

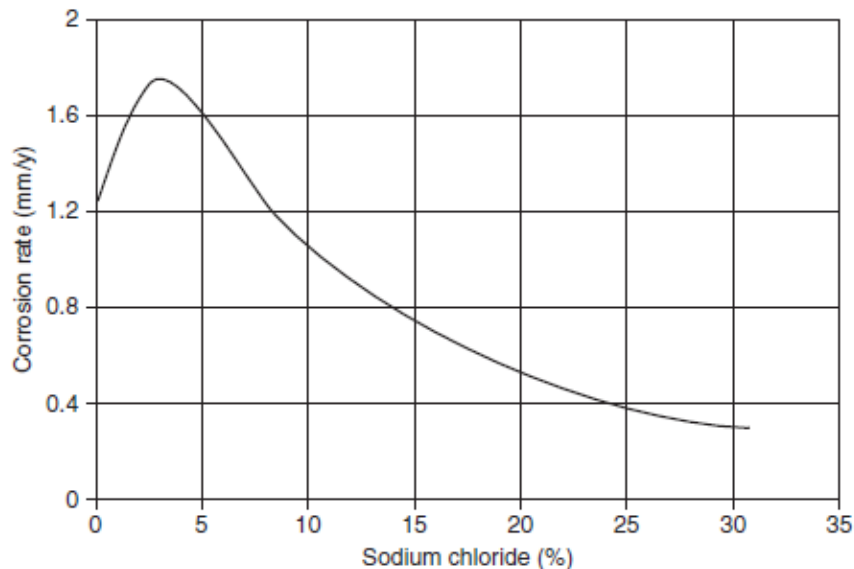
Είδος	Συγκέντρωση	
	mmol ⁻¹ kg ⁻¹	g kg ⁻¹
Na ⁺	468.5	10.77
K ⁺	10.21	0.399
Mg ²⁺	53.08	1.290
Ca ²⁺	10.28	0.4121
Sr ²⁺	0.090	0.0079
Cl ⁻	545.9	19.354
Br ⁻	0.842	0.0673
F ⁻	0.068	0.0013
HCO ₃ ⁻	2.30	0.140
SO ₄ ²⁻	28.23	2.712
B(OH) ₃	0.416	0.0257

Εν συγκρίσει με το γλυκό ύδωρ, το θαλάσσιο είναι πιο διαβρωτικό εξαιτίας της μεγαλύτερης αγωγιμότητάς του και της διεισδυτικής ικανότητας των χλωριόντων μέσω επιφανειακών στρωμάτων σε ένα μέταλλο. Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση στο θαλάσσιο ύδωρ είναι η περιεκτικότητα του νερού σε αλάτι (αλατότητα), η περιεκτικότητά του σε οξυγόνο, η θερμοκρασία του νερού, το pH του, η ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή και η ρύπανση της κατασκευής. Κάποιοι από τους ανωτέρω παράγοντες συνδέονται μεταξύ τους και εξαρτώνται από φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους.

3.1.1 Αλατότητα

Το θαλάσσιο ύδωρ συνήθως περιέχει περίπου 3,5 % NaCl, αν και η αλατότητά του διαφέρει κατά περιοχές, όντας μειωμένη όπου εκβάλλει γλυκό ύδωρ και αυξημένη όπου παρατηρείται εξάτμιση λόγω ηλιακής ακτινοβολίας (πχ Νεκρά Θάλασσα). Η περιεκτικότητα αλατιού κατά 3,5% συνιστά πιθανώς το πιο διαβρωτικό διάλυμα αλάτων. Σε αυτό το σημείο ο συνδυασμός υψηλής αγωγιμότητας και διαλυτότητας οξυγόνου έχει τη μέγιστη τιμή (η διαλυτότητα του οξυγόνου μειώνεται όσο αυξάνεται η αλατότητα). Ο ρυθμός διάβρωσης σιδήρου βυθισμένου σε θαλασσινό νερό (περιεκτικότητα σε αλάτι από 8g/Kg στη Βαλτική θάλασσα, 37 g/Kg στον Ατλαντικό Ωκεανό και 260 g/Kg στη Νεκρά Θάλασσα), μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε αλάτι, εξαιτίας της μείωσης της

περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Ειδική περίπτωση είναι τα υφάλμυρα ύδατα (brackish water). Η αλατότητα αυτών κυμαίνεται από 0,1 έως 2,5%.



Διάγραμμα 11: Η διάβρωση του χάλυβα συναρτήσει της αλατότητας ^[9]

3.1.2 Περιεκτικότητα οξυγόνου

Η παρουσία οξυγόνου στο θαλάσσιο ύδωρ αποτελεί ίσως το σημαντικότερο παράγοντα διάβρωσης. Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου αυξάνει το ρυθμό της καθοδικής αντίδρασης της αναγωγής νερού και περιορίζει την πυκνότητα ρεύματος της πόλωσης συγκέντρωσης. Η συγκέντρωση του οξυγόνου στο θαλάσσιο ύδωρ εξαρτάται κυρίως από την αλατότητα και τη θερμοκρασία. Γνωρίζοντας την τιμή της απόλυτης θερμοκρασίας T (K) και αλατότητας S (‰), η συγκέντρωση ισορροπίας υπολογίζεται από τη σχέση^[25]:

$$\ln[O_2] \text{ (ml/L)} = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln (T/100) + A_4(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2]$$

όπου:

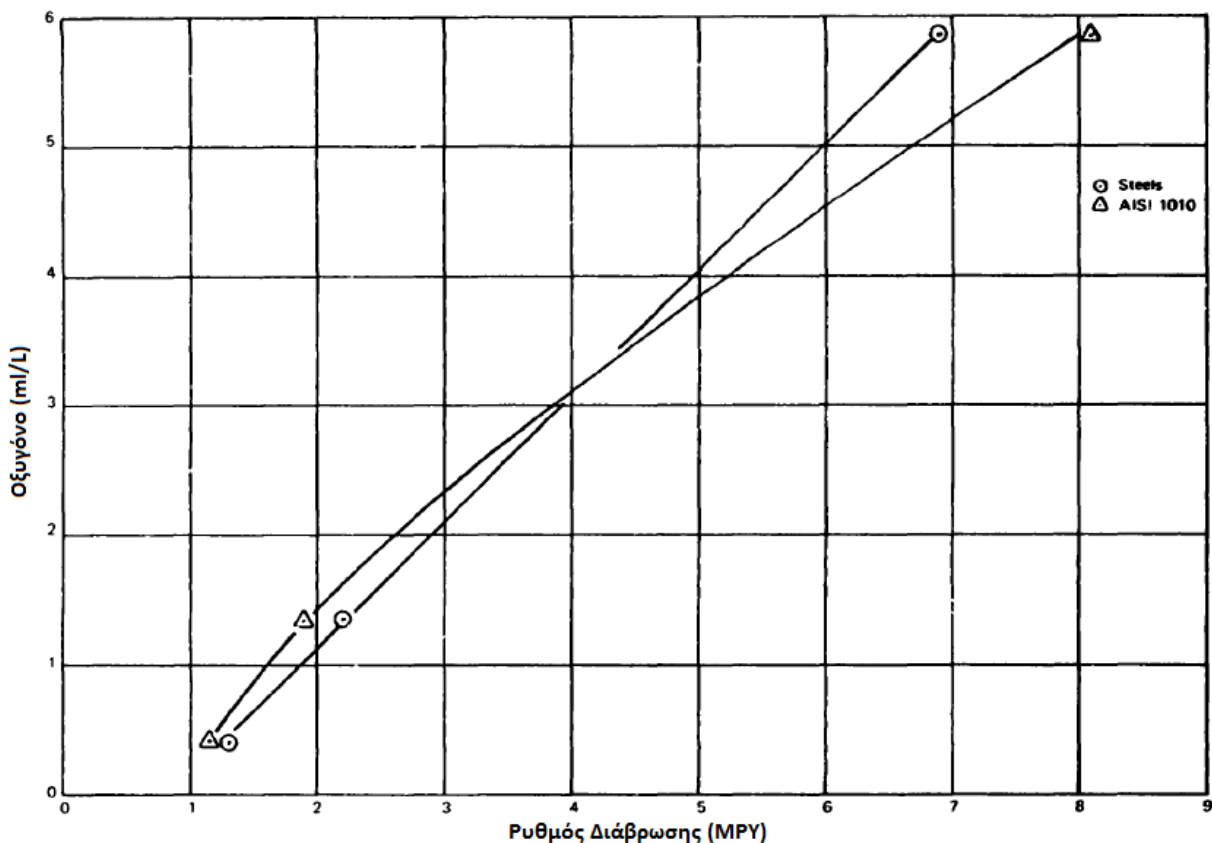
- $A_1 = -173.4292$
- $A_2 = 249.6339$
- $A_3 = 143.3483$
- $A_4 = -21.8492$
- $B_1 = -0.033096$
- $B_2 = 0.014259$
- $B_3 = -0.0017000$

Για ανθρακούχους χάλυβες και χάλυβες χαμηλής κραματώσεως, ο (μέσος όρος) ρυθμός διάβρωσης (σε mils / έτος) συναρτήσει του οξυγόνου αλλά και της θερμοκρασίας δίδεται από την κάτωθι σχέση^[26]:

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης (MPY)} = 0.84 + 1.0(O_2) + 0.014(T)$$

Όπου (O_2) η περιεκτικότητα του οξυγόνου σε (ml/l) και (T) η θερμοκρασία σε °C. Σημειούται ότι η σχέση αυτή υπολογίστηκε (με ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης) κατόπιν πειραματικών μετρήσεων διεξαχθέντων στα τέλη της δεκαετίας του '60 στον Ειρηνικό Ωκεανό (πλησίον των ακτών της Καλιφόρνια) και δε μπορεί να γενικευθεί για άλλες περιοχές.

Από την ανωτέρω σχέση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση του οξυγόνου στο θαλάσσιο ύδωρ αποτελεί μεταβλητή εξεχούσης σημασίας για το ρυθμό διάβρωσης, επί του οποίου επιδρά γραμμικά.



Διάγραμμα 12: Διάβρωση χαλύβων συναρτήσει της περιεκτικότητας του θαλασσιού ύδατος σε οξυγόνο, μετά από ένα (1) έτος^[26]

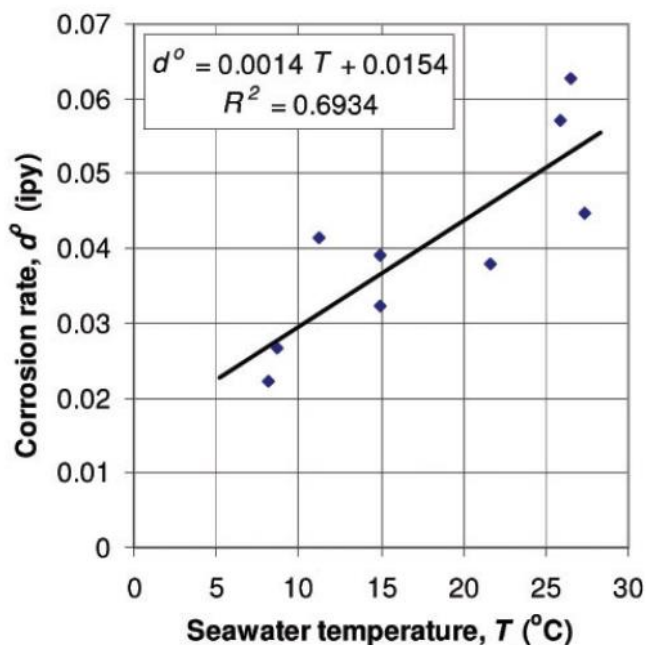
3.1.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι πολύ σημαντικός παράγων επίδρασης, καθώς επηρεάζει την κινητική της διάβρωσης, τη συγκέντρωση του οξυγόνου καθώς και βιολογική δραστηριότητα. Οι ρυθμοί διάβρωσης είναι υψηλότεροι σε θερμά, επιφανειακά ύδατα από ότι σε ψυχρά και βαθιά. Έχει υπολογισθεί ότι ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα σε τροπικά ύδατα είναι περίπου διπλάσιος από ότι στις Πολικές περιοχές. Από τη δεύτερη σχέση που αναφέρθηκε στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο (της επίδρασης της περιεκτικότητας του οξυγόνου), παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του νερού επηρεάζει και αυτή γραμμικά τους ρυθμούς διάβρωσης. Με βάση παλαιότερη μελέτη του LaQue, ο οποίος

απομόνωσε την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάβρωση χάλυβα στο θαλάσσιο ύδωρ από συμπληρωματικές επιδράσεις όπως, για παράδειγμα, οι θαλάσσιοι μικροοργανισμοί, προέκυψε (Guedes Soares et al) η γραμμική σχέση^[28]:

$$d^0 = 0.0014T + 0.0154 \quad (T, \text{ }^\circ\text{C})$$

Όπου: d^0 ο ρυθμός διάβρωσης σε ίντσες/έτος (ipy). Η σχέση αυτή επετεύχθη με $R^2 = 0.69$, όπου R^2 το τετράγωνο της συσχέτισης ανάμεσα στις τιμές απόκρισης και τις προβλεπόμενες τιμές απόκρισης (γενικά, $0 < R^2 < 1$, με καλύτερο ταιριασμα να επιτυγχάνεται για τιμές κοντά στο 1).

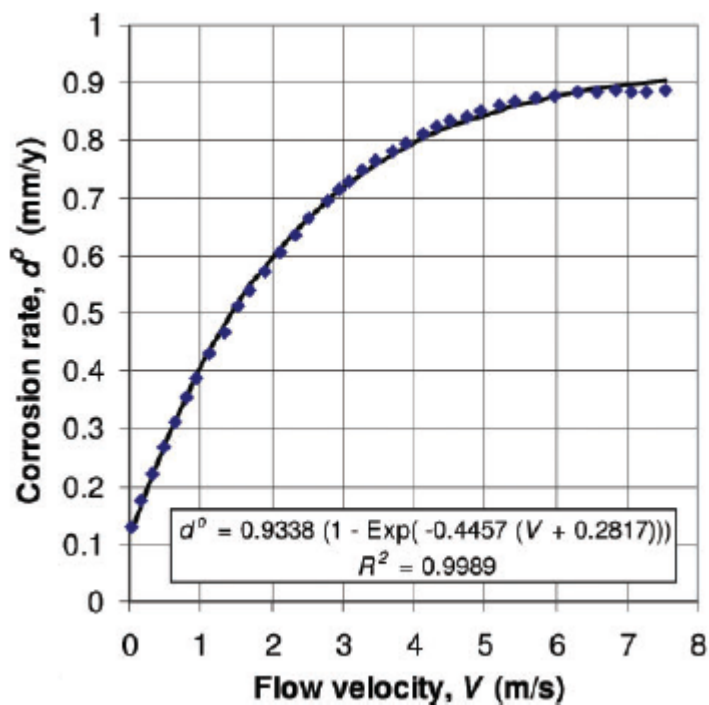


Διάγραμμα 13: Επίδραση της θερμοκρασίας στη διάβρωση του χάλυβα στο θαλάσσιο ύδωρ ^[28]

3.1.4 Ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή

Η ταχύτητα του θαλασσιού ύδατος μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό διάβρωσης των μετάλλων ποικιλοτρόπως. Μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του οξυγόνου που φτάνει στην επιφάνεια και στην αφαίρεση των προστατευτικών στρωμάτων. Σε υψηλές ταχύτητες, μπορεί να προκαλέσει μηχανικές ζημιές όπως η σπηλαιώση. Οι ανθρακώδη χάλυβες διαβρώνονται σε υψηλότερους ρυθμούς με αυξημένη ταχύτητα. Σε γλυκά ύδατα, η ταχύτητα του νερού αυξάνει αρχικά το ρυθμό διάβρωσης μεταφέροντας περισσότερο οξυγόνο στην επιφάνεια, ενώ σε υψηλότερες ταχύτητες αραιωτό οξυγόνο φτάνει στην επιφάνεια ώστε να προκαλέσει μερική παθητικοποίηση, γεγονός που μειώνει το ρυθμό μετά από την αρχική αύξηση. Στο θαλάσσιο ύδωρ, όμως, εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων σε καμία ταχύτητα δεν επιτυγχάνεται παθητικοποίηση και ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνει χωρίς παρατηρηθείσα μείωση σε κάποια ενδιάμεση ταχύτητα.

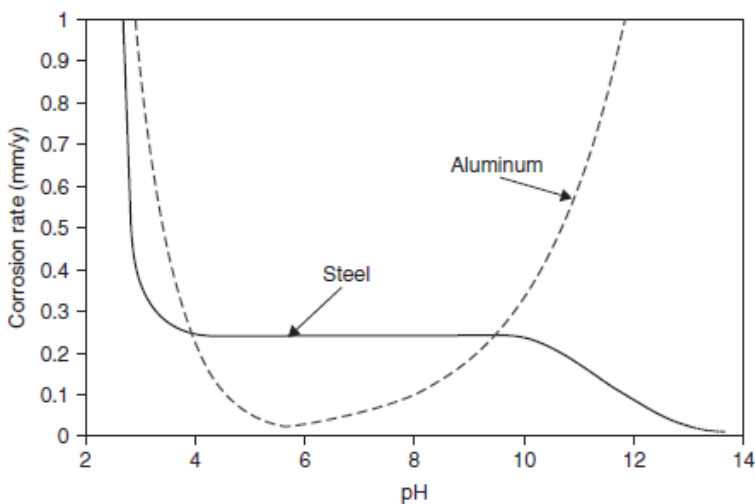
Η ταχύτητα αυξάνει το ρυθμό διάβρωσης μη γραμμικά. Άπαξ και επαρκής προστασία από τη διάβρωση έχει επιτευχθεί, χάρη σε προϊόντα διάβρωσης και ανάπτυξη θαλάσσιων οργανισμών (biofouling), κάτι που συμβαίνει περίπου μετά από 2-3 μήνες σε εύκρατες θαλάσσιες συνθήκες, η ταχύτητα έχει πολύ μικρό περαιτέρω αποτέλεσμα. Εάν όμως τα προϊόντα διάβρωσης και/ή οι θαλάσσιοι οργανισμοί διαταραχθούν ή αφαιρεθούν (πχ λόγω εκτριβής), η επίδραση της ταχύτητας του νερού στη διάβρωση θα είναι πιο έντονη. Κατ' αντιστοιχία με όσα είδαμε για τη θερμοκρασία η σχέση του LaQue ανάμεσα στην ταχύτητα ροής και το ρυθμό διάβρωσης ταιριάζει ικανοποιητικά σε εκθετική συνάρτηση με $R^2 = 0,9989$.



Διάγραμμα 14: Επίδραση της ταχύτητας ροής στη διάβρωση χάλυβα στο νερό ^[28]

3.1.5 Επίδραση του pH

Ο ρυθμός διάβρωσης είναι υψηλός σε χαμηλές τιμές pH λόγω διαβρώσεως από οξέα. Σε ενδιάμεσες τιμές του pH (8.5 – 12) ο ρυθμός υποχωρεί λόγω του σχηματισμού στρώματος παθητικοποίησης. Στις περισσότερες θαλάσσιες περιοχές, το pH στην επιφάνεια κυμαίνεται από 8.0 – 8.3.

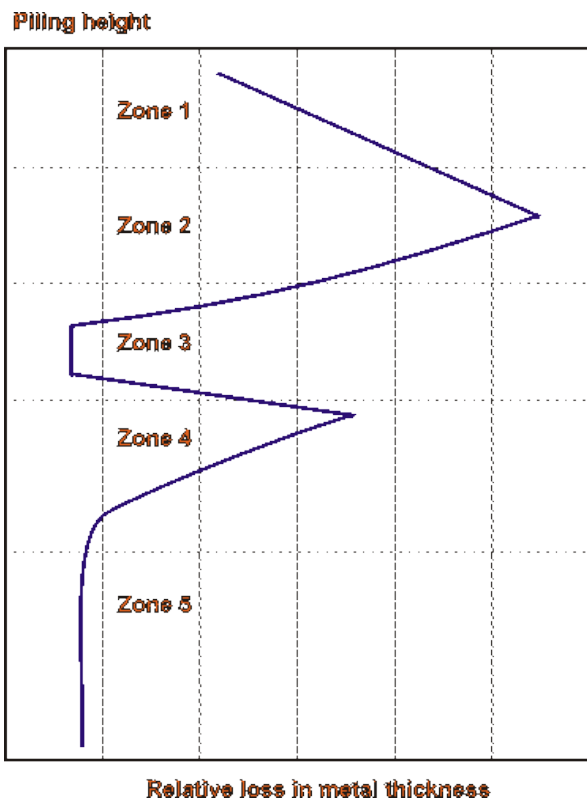


Διάγραμμα 15: Διάγραμμα διάβρωσης του χάλυβα και του αλουμινίου συναρτήσει του pH στους 22° C^[9]

3.1.6 Επίδραση του βάθους

Η διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον εμφανίζεται σε διαφορετικές μορφές ανάλογα με τη θέση της ναυπηγικής κατασκευής συγκριτικά με την επιφάνεια της θάλασσας. Διακρίνονται έτσι οι κάτωθι χαρακτηριστικές ζώνες, οι οποίες παρουσιάζονται και σχηματικά στο αμέσως επόμενο διάγραμμα:

- Ατμοσφαιρική ζώνη, με υψηλά ποσοστά αλατονέφωσης
- Ζώνη ψεκασμού πάνω από το μέγιστο ύψος της παλίρροιας, εδώ εναλλάσσονται υγροί και στεγνοί κύκλοι
- Ζώνη παλίρροιας
- Ζώνη μονίμου βύθισης
- Ζώνη υπό του θαλασσίου πυθμένα, όπου λαμβάνει χώρα διάβρωση χαραγής.



Διάγραμμα 16: Σχετική μείωση του πάχους μετάλλου συναρτήσει της θέσης του ως προς την επιφάνεια της θάλασσας ^[25]

Η επίδραση της ατμόσφαιρας θα αναπτυχθεί διεξοδικότερα στην αμέσως επόμενη παράγραφο. Ο ρυθμός διάβρωσης στη ζώνη ψεκασμού η οποία δέχεται συνεχώς αλατονέφωση είναι πολύ υψηλός ενώ στη ζώνη παλίρροιας, εμφανίζονται χαμηλότεροι ρυθμοί διάβρωσης. Τυπικοί ρυθμοί διάβρωσης χάλυβα φαίνονται στον κάτωθι πίνακα.

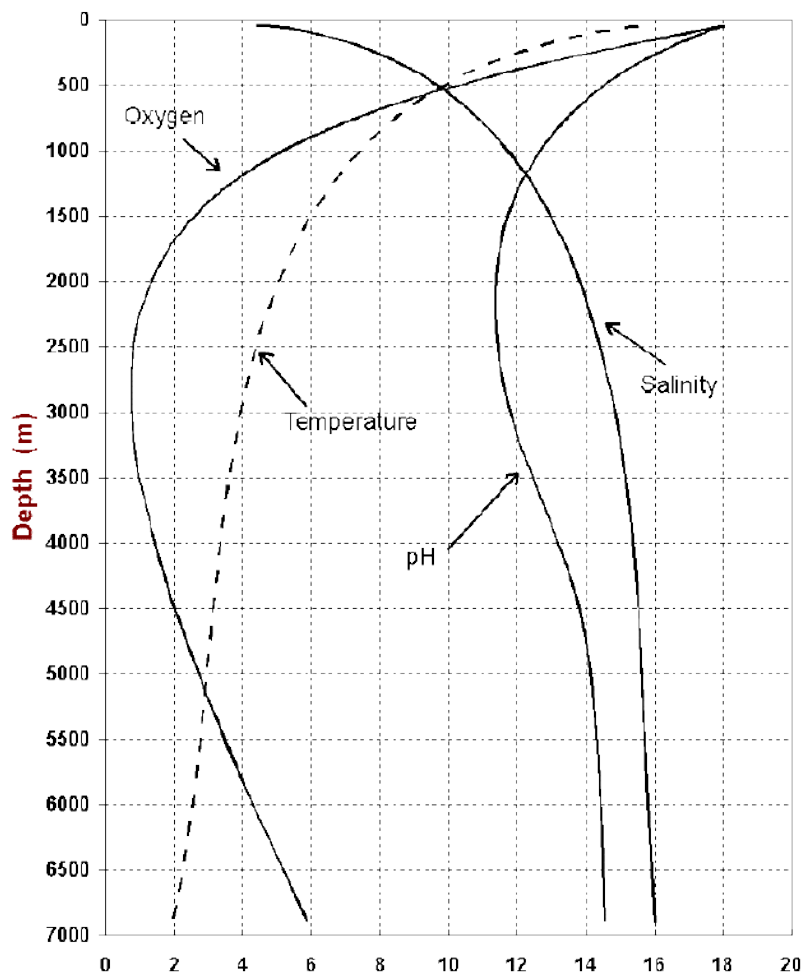
Πίνακας 8: Ρυθμός διάβρωσης χάλυβα για διαφορετικές συνθήκες έκθεσης ^[1]

Περιβαλλοντικές συνθήκες	Ρυθμός διάβρωσης (mm/y)
Ατμοσφαιρική ζώνη	0,128
Ζώνη ψεκασμού	0,272
Ζώνη παλίρροιας	0,083
Ζώνη βύθισης	0,090
Υπό του θαλασσιού πυθμένα	0,075

Γενικά, οι κυριότερες παράμετροι του θαλασσιού ύδατος που αναφέρθηκαν προηγουμένως (οξύγONO, pH, θερμοκρασία και αλατότητα), συναρτώνται από το βάθος σύμφωνα με το κάτωθι διάγραμμα. Σημειούται ότι οι μονάδες μέτρησης είναι υπό κλίμακα και απαιτούν τις αντίστοιχες μετατροπές:

- Θερμοκρασία: κλίμακα x 1° (C)
- ΟξύγONO: κλίμακα x 0,333 (ppm)
- pH: 6,4 + κλίμακα x 0,1 (μονάδα pH)

- Αλατότητα: $33,0 + κλίμακα \times 0,1$ (‰)

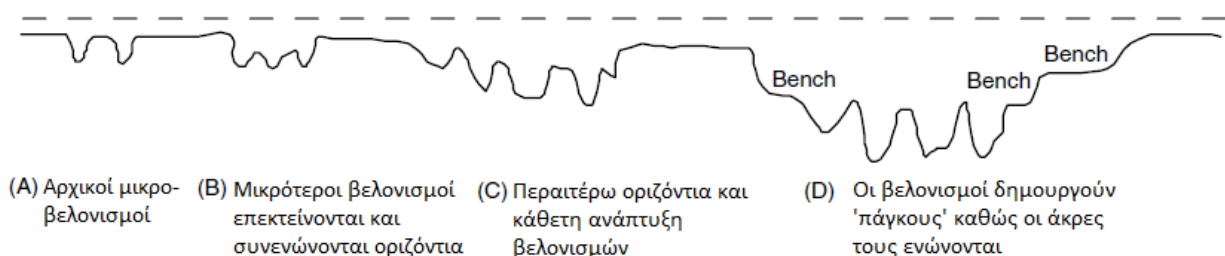


Διάγραμμα 17: Μεταβολές ιδιοτήτων θαλασσίου ύδατος συναρτήσει του βάθους σε περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού ^[25]

3.1.7 Η τοπογραφία της διάβρωσης του κοινού χάλυβα στο θαλάσσιο ύδωρ

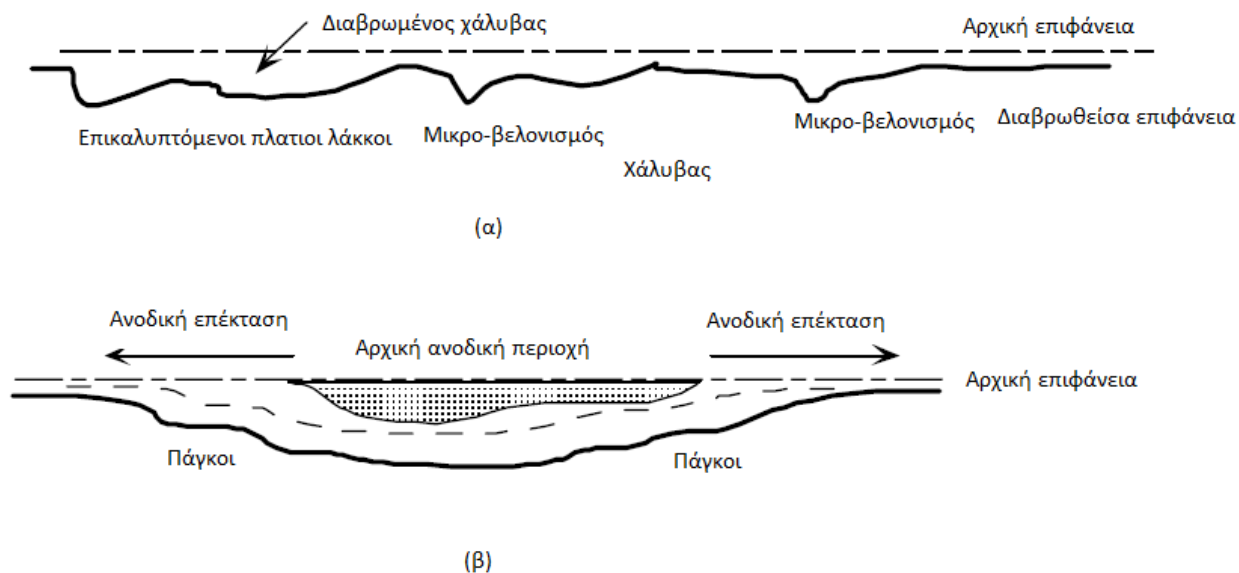
Η διάβρωση του κοινού χάλυβα εκτεθειμένου σε συνθήκες εμβαπτίσεως στο θαλάσσιο ύδωρ συνήθως δεν είναι ομοιόμορφη. Η διαδοχή της επιφανειακής τοπογραφίας του κοινού χάλυβα λαμβάνει χώρα ως εξής:

- 1) Σχηματισμός ανοδικών περιοχών
- 2) Δημιουργία μικρών βελονισμών και ρηχών πλατιών βελονισμών
- 3) Συνένωση των μικρών βελονισμών σε μεγαλύτερη τοπική διάβρωση
- 4) Εμφάνιση πλατιών μακρο-βελονισμών.



Σχήμα 14: Σχηματική αναπαράσταση του ρόλου της ανάπτυξης βελονισμών στη μακροπρόθεσμη τοπογραφία της επιφάνειας διάβρωσης^[29]

Από το πείραμα των Jeffrey και Melchers με εμβάπτιση δοκιμίων σε παράκτιο ύδωρ και τακτό έλεγχο της προόδου της διάβρωσης σε βάθος χρόνου τριών (3) ετών μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Παρατηρείται η δημιουργία και η τελική κατάτμηση των ανοδικών και καθοδικών περιοχών καθώς και η ανάπτυξη μικρο-ανόδων, οι δε καθοδικές περιοχές ενώ μέχρι τη 10^η εβδομάδα καταλάμβαναν περιοχή άνω του 50%, τη 12^η εβδομάδα καταλάμβαναν κάτω του 20% και τη 14^η κάτω του 10%. Σημαντική είναι η κάλυψη από βιομάζα, η οποία καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια μέχρι τον 5^ο μήνα. Οι βελονισμοί που αναπτύσσονται στη μεταλλική επιφάνεια συνενώνονται σε τοπικές περιοχές σχηματίζοντας μεγαλύτερες και σχετικά επίπεδες εσοχές, οι οποίες καλούνται 'πλατιοί' ή μακρο-βελονισμοί. Ο πυθμένας των τελευταίων εμφανίζει ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη νέων βελονισμών, επιτρέποντας τον κύκλο να επανεικινήσει. Αυτό τείνει να προκαλέσει κλιμακωτή οριζόντια και κάθετη διάβρωση που τελικώς οδηγεί σε διαβρωτική όψη μορφής «πάγκου» (bench-like). Οι αλλαγές αυτές συμβαίνουν πιο ραγδαία όταν τελείται η αλλαγή από κυρίως αερόβιες σε κυρίως αναερόβιες συνθήκες, γεγονός που υποδεικνύει την εξέχουσα επίδραση των βακτηρίων αναγωγής θείου (SRB).



Σχήμα 15: (α) Σχηματική αναπαράσταση της ανάπτυξης και της επικάλυψης των ανοδικών περιοχών που δίνουν την εντύπωση ομοιόμορφης διάβρωσης (β) Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας λάκκων μορφής 'πάγκου' λόγω ανώμαλης τοπικής διάβρωσης^[29]

Στις κάτωθι φωτογραφίες διακρίνουμε τη χρονική εξέλιξη της τοπογραφίας της διάβρωσης. Στην (α) παρατηρούμε δοκίμιο κατόπιν εκθέσεως τεσσάρων (4) εβδομάδων και διακρίνονται οι ανοδικές περιοχές (άνω αριστερά και δεξιά), οι καθοδικές περιοχές (κέντρο και κάτω αριστερά) και η βιομάζα (κέντρο και αριστερά). Στη (β) ο χρόνος έκθεσης είναι τέσσερις (4) μήνες και διακρίνουμε περιοχές μικροσκοπικών βελονισμών καθώς και ορισμένους ρηχούς και πλατιούς βελονισμούς (άνω δεξιά και κάτω κεντρικά). Στη (γ) το δοκίμιο έχει εκτεθεί για δώδεκα (12) μήνες, διακρίνουμε δε πλατιούς βελονισμούς με σχηματισμό πάγκων. Στη φωτογραφία (δ) τα δοκίμια ανασύρθηκαν κατόπιν τριών (3) ετών και διακρίνουμε εκτεταμένη παρουσία πλατιών βελονισμών και μικρο-βελονισμούς στον πυθμένα των τελευταίων. Τέλος, στην (ε) το δοκίμιο έχει εκτεθεί για χρόνο πλέον των τριών (3) ετών, και έχει υποστεί διάτρηση σε πολλαπλά σημεία, αποδιδόμενη σε βελονισμούς από αμφότερες τις πλευρές του.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Εικόνα 9: Δοκίμια εμβαπτισμένα σε θαλάσσιο ύδωρ και εξέλιξη της διάβρωσής των με την πάροδο του χρόνου ^[29]

3.2 Η θαλάσσια ατμόσφαιρα ^{[3], [30], [31]}

Όχι μόνον το θαλάσσιο ύδωρ, αλλά και η ατμόσφαιρα σε θαλάσσιες περιοχές συνιστά περιβάλλον υψηλής διαβρωτικότητας. Η διάβρωση συνεπάγεται την αλληλεπίδραση μετάλλου ή κράματος και του περιβάλλοντός του και επηρεάζεται από τις ιδιότητες και των δύο. Η ατμοσφαιρική διάβρωση λαμβάνει χώρα σε χαλύβδινη επιφάνεια σε επαφή με την ατμόσφαιρα, άνευ εμβαπτίσεως στο θαλάσσιο ύδωρ. Όμως, για να λάβει χώρα η διάβρωση, ένα λεπτό υγρό φιλμ πρέπει να σχηματιστεί από την υγρασία του αέρα σε συνδυασμό με ακαθαρσίες. Το είδος της διάβρωσης εμπίπτει στην ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση.

Τα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα ποικίλλουν ανάλογα με τα χημικά συστατικά των. Τα κύρια χημικά συστατικά του ατμοσφαιρικού θαλασσίου περιβάλλοντος είναι σχετικά σταθερά παγκοσμίως. Τα δευτερεύοντα συστατικά, όμως, ποικίλλουν ανάλογα με την περιοχή, την εποχή και τον καιρό. Οι μεταβολές στη χημεία των ανοικτών ωκεάνιων ατμοσφαιρών τείνουν να συμβαίνουν αργά και σε μεγάλη οριζόντια και κάθετη κλίμακα σε σχέση με τις διαστάσεις των περισσότερων θαλασσίων κατασκευών. Τέτοιες σταδιακές αλλαγές δύνανται να παραξούν αντίστοιχη σταδιακή μεταβολή στο ρυθμό διάβρωσης δομικών υλικών, αλλά θεωρείται απίθανο να προκαλέσουν απότομες μεταβολές στο μηχανισμό ή στο ρυθμό της διάβρωσης.

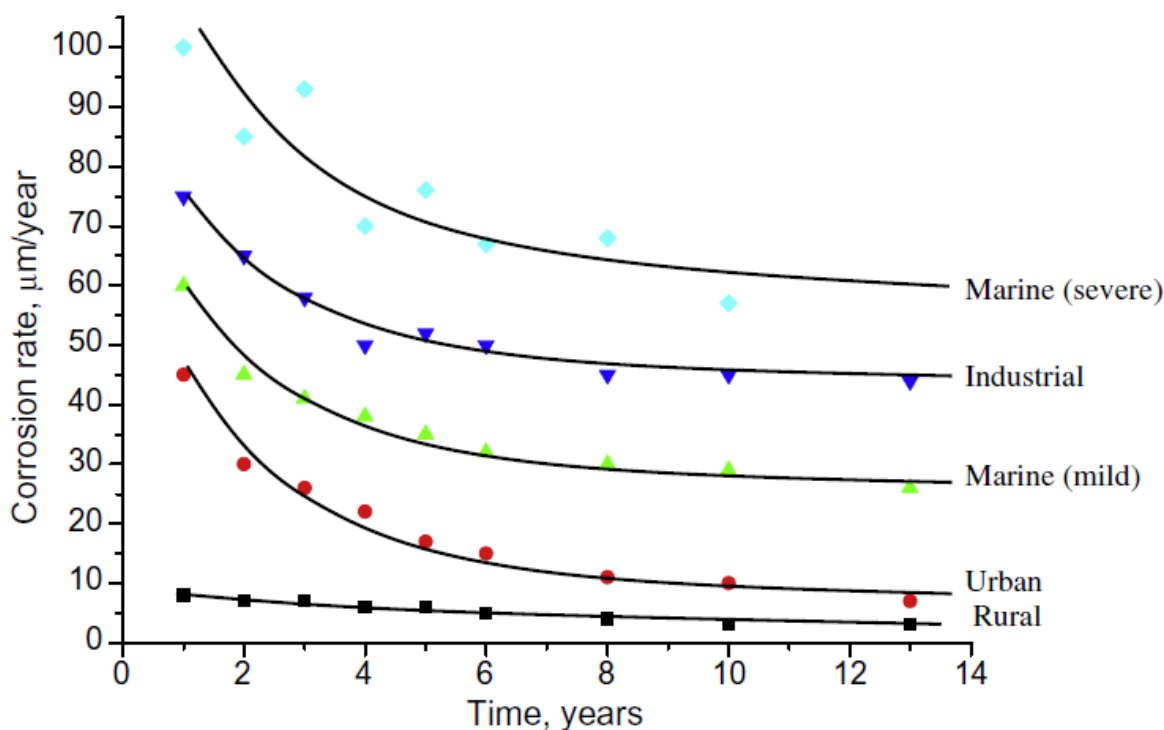
Ως είδαμε και στο διάγραμμα 6 της προηγούμενης παραγράφου, η ατμοσφαιρική ζώνη υπόκειται σε επιθετικό ατμοσφαιρικό περιβάλλον, πλούσιο σε χλωριόντα, οξυγόνο και άλλες διαβρωτικές ουσίες, σε συνδυασμό με την αλατονέφωση που προκαλείται από την κίνηση του πλοίου και τους κυματισμούς. Η περιοχή αυτή, επιπρόσθετα υπόκειται σε υψηλή σχετική υγρασία. Υπάρχει παρουσία αλάτων, λόγω αερομεταφερόμενης αλατονέφωσης. Οι μεταβολές στη σχετική υγρασία του αέρα προκαλούν είτε την εξάτμιση είτε την υγροποίηση του νερού. Τα αέρια που περιέχονται στον αέρα δύνανται να αποτελούνται από CO₂, H₂S, SO₂ ή SO₃. Αυτά ενεργοποιούν το λεπτό στρώμα του ηλεκτρολύτη και επιταχύνουν περαιτέρω το ρυθμό της διάβρωσης, μιας και η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε ατμόσφαιρα πλούσια σε οξυγόνο. Ανάμεσα στη μονίμως βυθισμένη ζώνη και την ατμοσφαιρική ζώνη, το περιβάλλον είναι πιο επιθετικό. Η ζώνη αυτή είναι περιοχή υψηλού αερισμού εξαιτίας της τύρβης της επιφάνειας της θάλασσας περί της γάστρας του πλοίου. Οι δράσεις αυτές αυξάνουν το ποσοστό οξυγόνου και σε συνδυασμό με φαινόμενα τριβής καθώς και τις εναλλαγές υγρών και στεγνών κύβλων, η περιοχή αυτή υφίσταται έντονη διάβρωση.

Η μακροχρόνια επίδραση της θαλάσσιας ατμόσφαιρας στη διάβρωση του κοινού χάλυβα μελετήθηκε πειραματικά από το Εθνικό Κέντρο Μεταλλουργικών Ερευνών της Ισπανίας. Στη μελέτη αυτή, πέντε (5) δοκίμια κοινού χάλυβα συστάσεως (κ.β. %) 0.44 C, 0.40 Mn, 0.018 S, <0.22 P, <0.05 Si, <0.1 Cr, <0.1 Ni, <0.1 Mo και <0.05 Cu, εκτέθηκαν σε πέντε (5) περιοχές διαφορετικής ατμόσφαιρας, επαρχία, αστική, βιομηχανική, ήπια θαλάσσια (Βαριελώνη) και έντονη θαλάσσια (Αλικάντε). Στις δυο τελευταίες τα δοκίμια τοποθετήθηκαν 30 μέτρα από την ακτή. Στην περιοχή του Αλικάντε λόγω γεινιάσεως με εργοστάσιο αλουμινίου υπήρχαν αυξημένα επίπεδα Cl⁻ και SO₂. Στον κάτωθι πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 9: Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά και διαβρωτικότητα στους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής διάβρωσης^[31]

Ατμόσφαιρα	Περιοχή	Χρόνος διαβροχής (σχετική υγρασία >85%)	Ρυθμός απόθεσης (mg/m ² /ημέρα)		Κοινός Χάλυβας	
			SO ₂	Cl ⁻	Διάβρωση πρώτου έτους (μm)	Κατηγορία διάβρωσης κατά ISO
Επαρχία	Ελ Εσκόριαλ	3900	8	Αμελητέα	7,5	C2
Αστική	Μαδρίτη	2100	56	Αμελητέα	43,7	C3
Βιομηχανική	Μπιλμπάο	3000	81	41	69,6	C4
Ήπια Θαλάσσια	Βαρκελώνη	3200	52	27	49,9	C4
Έντονη Θαλάσσια	Αλικάντε	4300	126	219	92,6	C5

Τα πειραματικά αποτελέσματα μετά από 13 έτη παρατίθενται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 18: Ρυθμός διάβρωσης χάλυβα σε διαφορετικές ατμόσφαιρες^[31]

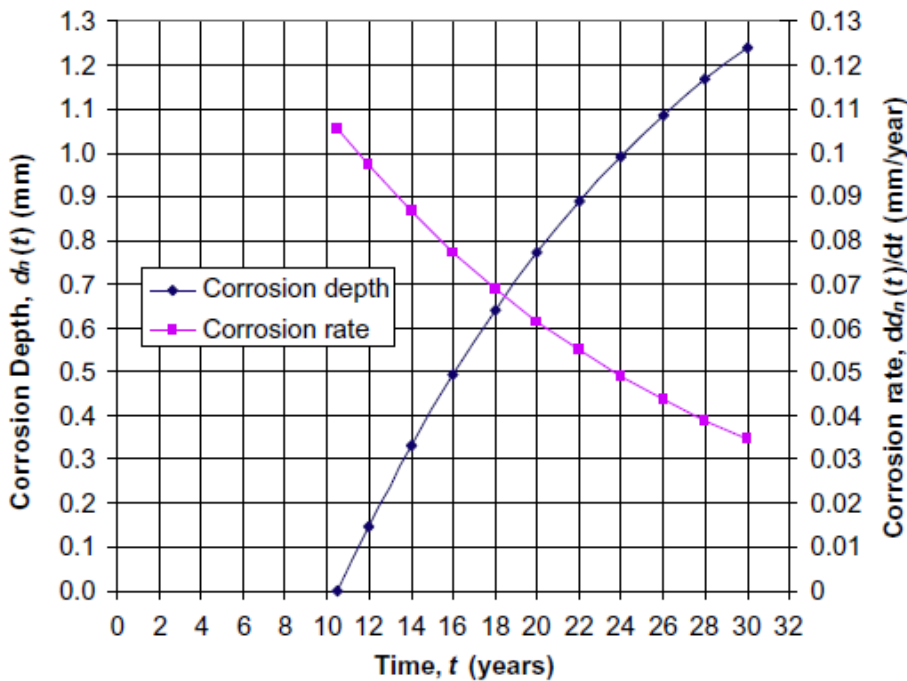
Η χρονικά εξαρτώμενη ατμοσφαιρική διάβρωση αναφοράς εκπροσωπείται από το μη γραμμικό μοντέλο προταθέν από τους Guedes Soares και Garbatov^[30]:

$$\frac{\partial d_n(t)}{\partial t} = \begin{cases} \frac{d_\infty}{\tau_t} e^{-\frac{(t-\tau_c)}{\tau_t}}, & t > \tau_c \\ 0, & t \leq \tau_c \end{cases}$$

$$d_n(t) = \begin{cases} d_\infty \left[1 - e^{-\frac{(t-\tau_c)}{\tau_t}} \right], & t > \tau_c \\ 0, & t \leq \tau_c \end{cases}$$

Όπου:

- τ_t ο χρόνος μετάβασης
- τ_c ο χρόνος ζωής του επιστρώματος
- d_∞ το μακροπρόθεσμο πάχος των απωλειών λόγω διάβρωσης.



Διάγραμμα 19: Χρονικά εξαρτώμενο μοντέλο διάβρωσης ^[30]

Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην ατμοσφαιρική διάβρωση είναι η διάρκεια της έκθεσης στη διαβροχή και σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και η θερμοκρασία.

Από ανάλυση συλλεχθέντων δεδομένων, οι μέσες τιμές των ατμοσφαιρικών αυτών συνθηκών είναι:

Πίνακας 10: Τυπικές μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες ^[30]

Παράγοντας	Τιμή	Μονάδες
Χλωριόντα	180,7	mg/m ² /ημέρα
Θερμοκρασία	16,2 (289,3)	°C (K)
Σχετική Υγρασία	81,9	%

3.2.1 Διάρκεια διαβροχής και σχετική υγρασία

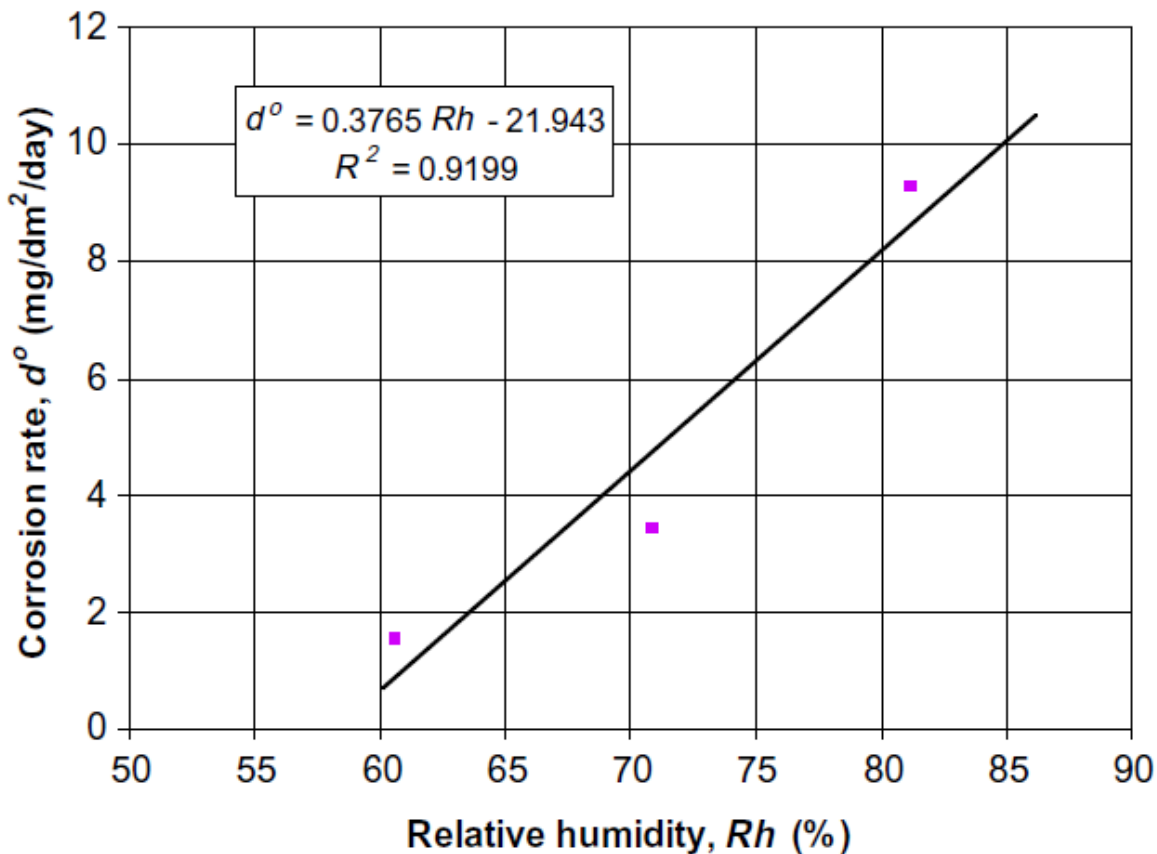
Η διάρκεια διαβροχής καθορίζει τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας ή το ποσοστό του χρόνου στο οποίο υπερβαίνουμε την κρίσιμη υγρασία. Η κρίσιμη σχετική υγρασία είναι η τιμή της υγρασίας κάτω από την οποία το νερό δεν σχηματίζεται σε καθαρή μεταλλική επιφάνεια και κατ'επέκτασιν ηλεκτροχημική ή υγρή διάβρωση δεν λαμβάνει χώρα. Η σχετική υγρασία (Rh) ορίζεται ως το ποσοστό της πίεσης των υδρατμών στην ατμόσφαιρα εν συγκρίσει με αυτή που θα προκαλούσε κορεσμό της ατμόσφαιρας στην ίδια θερμοκρασία. Οι μεταβολές στη σχετική υγρασία και στη θερμοκρασία οδηγούν σε εναλλασσόμενες ξηρές και υγρές περιόδους, τους επονομαζόμενους υγρούς-ξηρούς κύκλους. Οι τελευταίοι συνιστούν πολύ σημαντικό τμήμα της ατμοσφαιρικής διάβρωσης καθώς μεταβάλλουν δραστικά τους μηχανισμούς ανάπτυξης σκουριάς. Για χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης η ατμοσφαιρική διάβρωση κατά τη διάρκεια υγρού-ξηρού κύκλου χωρίζεται σε τρία (3) στάδια: Το στάδιο ύγρυνσης, το υγρό στάδιο και το στάδιο ξήρανσης.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των J.R. Davis, J.D. Destefani, H.F. Frissell, G.M. Crankovic, D.M. Jenkins, (Metals Handbook, vol. 13 – Corrosion, ninth ed., ASM International Handbook Committee, 1987) και προσαρμόζοντάς τα σε γραμμική συνάρτηση για να προκύψει η σχέση ανάμεσα στη σχετική υγρασία και το ρυθμό διάβρωσης, με συντελεστή ακρίβειας $R^2 = 0,9199$. Η σχέση αυτή ισχύει συγκεκριμένα για διάβρωση οφειλόμενη σε θαλάσσια ατμόσφαιρα με σχετική υγρασία μεταξύ 60% και 100%. Γενικά η ατμοσφαιρική διάβρωση ανθρακούχων ή περιβαλλοντικά εκτεθειμένων (weathered) χάλυβων ξεκινά σε περίπου 60% Rh σε πολύ αργό ρυθμό και αυξάνει απότομα ανάμεσα στο 80% και 100% Rh. Για το λόγο αυτό η ατμοσφαιρική θαλάσσια διάβρωση υπό του 60% Rh αμελείται στο μοντέλο, ως ακολούθως^[30]:

$$d^0 = 0.3765[Rh] - 21.943, \quad [60\% \leq Rh < 100\%]$$
$$d^0 = 0.0, \quad [Rh < 60\%]$$

Όπου d^0 ο ρυθμός ατμοσφαιρικής διάβρωσης σε mg/dm/ημέρα

Τα ανωτέρω παρίστανται στο κατωθι διαγράμμα:



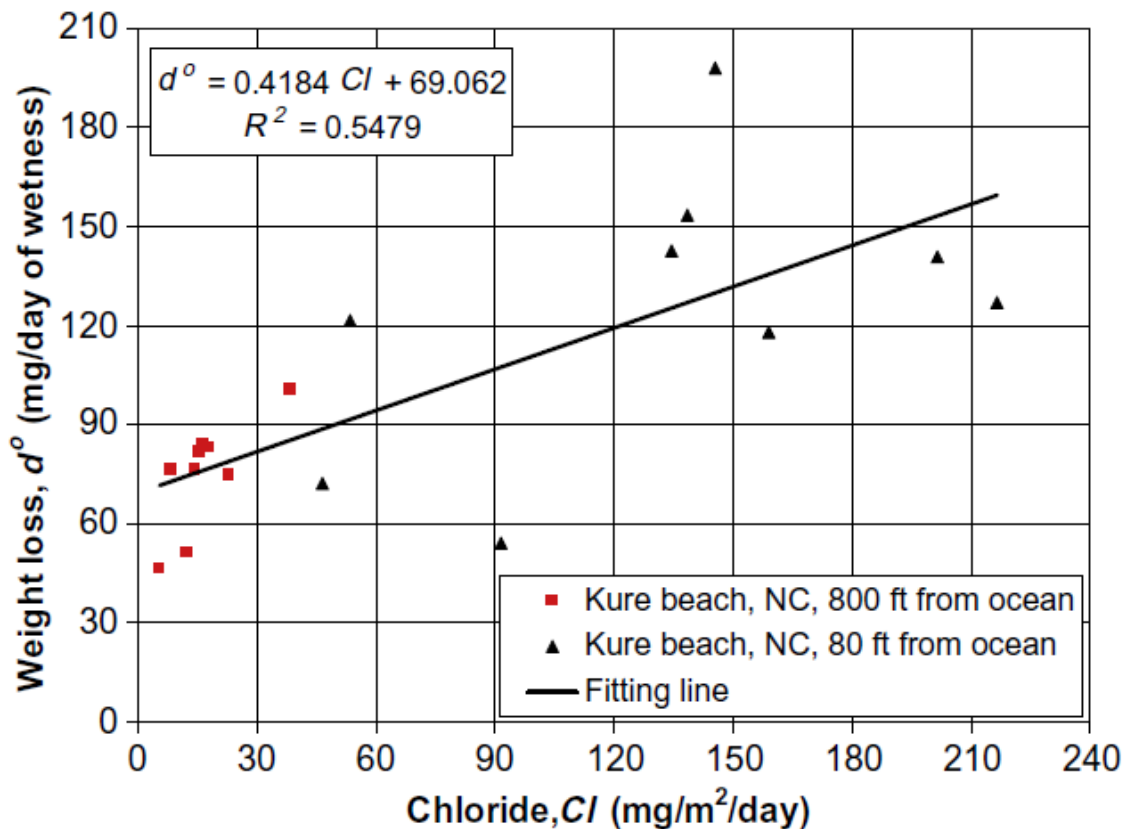
Διάγραμμα 20: Εξάρτηση του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα από τη σχετική υγρασία ^[30]

3.2.2 Χλωριόντα

Το χλωριούχο νάτριο είναι σημαντικός ρυπαντικός παράγοντας. Τα χλωριόντα στην αλατωνέφωση είναι οι κύριοι υπεύθυνοι της μεταλλικής διάβρωσης σε ωκεάνια περιβάλλοντα. Με βάση δοκιμές συσχέτισης της αλατότητας του αέρα και του ρυθμού διάβρωσης που έλαβαν χώρα στο σταθμό θαλάσσιας ατμοσφαιρικής διάβρωσης της εταιρίας “INCO” (International Nickel Company) στην παραλία Kure, της Βόρειας Καρολίνας, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει απότομη μείωση της διαβρωτικότητας της ατμόσφαιρας εξαιτίας χαμηλότερων συγκεντρώσεων αερομεταφερόμενων αλάτων 800 πόδια μακριά από τον ωκεανό από ότι 80 πόδια μακριά. Το μοντέλο που εδώ προτάθηκε από τους Guedes Soares και Garbaton συναρτήσει της συγκέντρωσης των χλωριόντων στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιεί τα δεδομένα στα 80 και στα 800 πόδια από τον ωκεανό, επί της ακτής Kure. Ήδη οι Gardiner και Melchers προσέγγισαν το ρυθμό της ατμοσφαιρικής διάβρωσης ως γραμμικά ανάλογο της απόθεσης αλάτων και απέδειξαν ότι αυτό είναι συναφές με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Η γραμμική συνάρτηση του τρέχοντος μοντέλου έχει συντελεστή ακρίβειας $R^2 = 0,55$ ^[30]:

$$d^0 = 0.4184[Cl] + 69.062$$

Όπου d^0 ο ρυθμός ατμοσφαιρικής διάβρωσης σε mg/ημέρα διαβροχής και Cl η περιεκτικότητα χλωριόντων σε mg/m²/ημέρα.



Διάγραμμα 21: Επίδραση χλωριόντων στην ατμοσφαιρική διάβρωση ^[30]

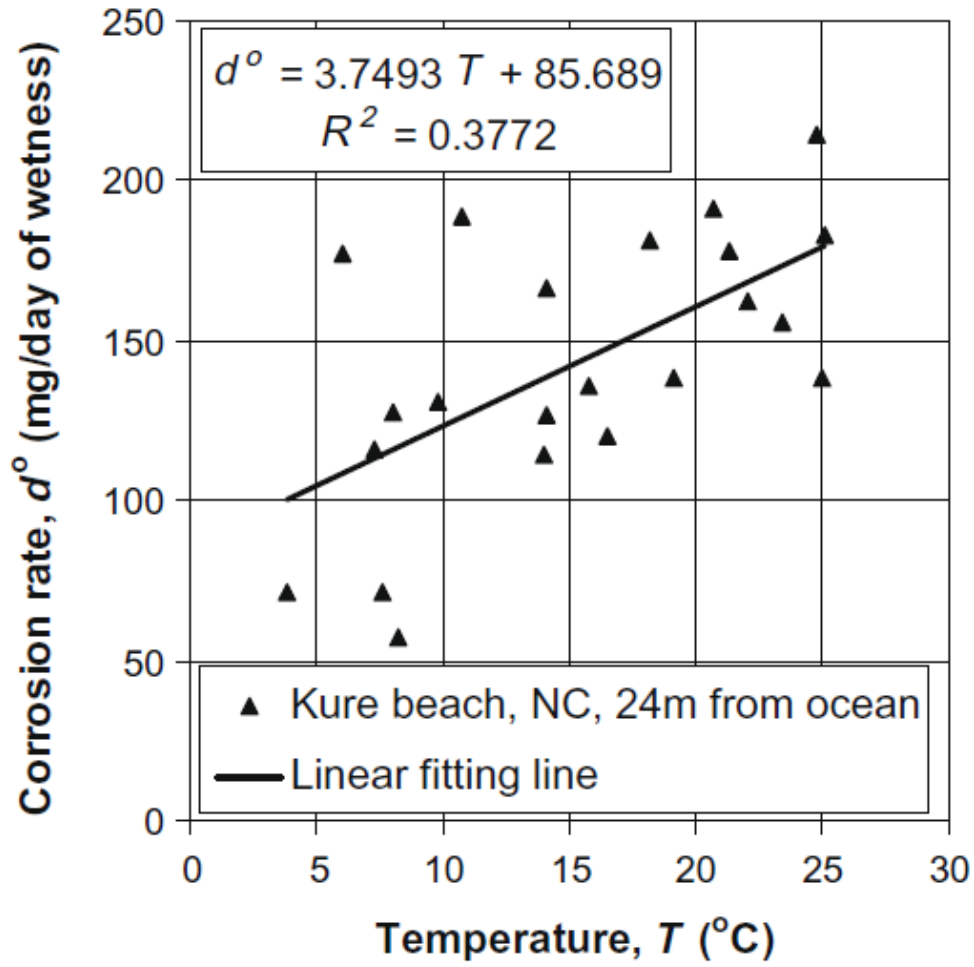
3.2.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία επηρεάζει τη σχετική υγρασία, το σημείο δρόσου, τη διάρκεια της διαβροχής και την κινητική της διαδικασίας της διάβρωσης. Για διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, η παρουσία υγρασίας, όπως αυτή καθορίζεται από τη διάρκεια της διαβροχής, συνιστά τον σημαντικότερο παράγοντα. Ψυχρές και υγρές συνθήκες θεωρούνται δυσμενέστερες από πιο ζεστές και ξηρές συνθήκες. Κρίσιμος παράγοντας είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας. Όσο αυτή αυξάνει, ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται απότομα έως του σημείου όπου λαμβάνει χώρα η εξάτμιση του ηλεκτρολύτου. Σε αυτή τη θερμοκρασία, ο ρυθμός διάβρωσης μειώνεται απότομα.

Οι Gardiner και Melchers, προσέγγισαν το ρυθμό ατμοσφαιρικής διάβρωσης ως γραμμικά ανάλογο της θερμοκρασίας. Η ακόλουθη σχέση και το αντίστοιχο διάγραμμα προέκυψε από επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων για την ακτή Kure και μάλιστα 24 μέτρα από τον ωκεανό, τα οποία προσαρμόστηκαν σε γραμμική συνάρτηση, η οποία συνδέει το ρυθμό διάβρωσης με τη θερμοκρασία, με συντελεστή ακρίβειας $R^2 = 0,38$ ^[30].

$$d^0 = 3.7493[T] + 85.689$$

Όπου d^o ο ρυθμός ατμοσφαιρικής διάβρωσης σε mg/ημέρα διαβροχής και T ($^{\circ}\text{C}$) η θερμοκρασία.



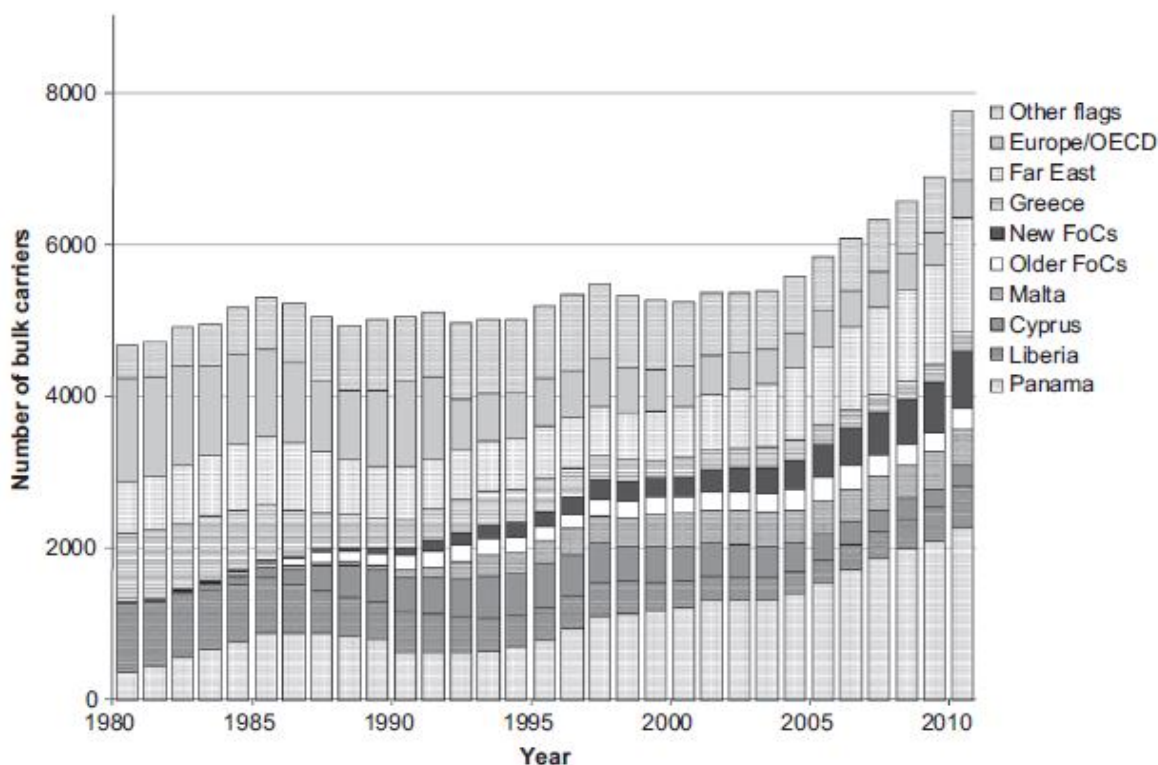
Διάγραμμα 22: Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό ατμοσφαιρικής διάβρωσης ^[30]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΟΡΤΗΓΑ ΠΛΟΙΑ ΧΥΔΗΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (BULK CARRIERS) ^{[32] – [36]}

4.1 Γενικά

Τα φορτηγά πλοία φορτίου χύδην χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά κάρβουνου, σιδήρου, σιτηρών και άλλων χύδην φορτίων. Συνιστούν τον πιο οικονομοτεχνικό τρόπο μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων φορτίου χαμηλής αξίας. Τα πρώτα bulk carriers με άνω πλευρικές δεξαμενές έρματος εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1950. Με την παρέλευση του χρόνου το μέγεθός τους έχει αυξηθεί για να μειωθεί το κόστος των θαλασσιών μεταφορών. Προσέτι, ο αριθμός των φορτηγών πλοίων έχει αυξηθεί σημαντικά, ιδίως τα τελευταία χρόνια, μετά το 2005. Το 1980 τα φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου χύδην ανέρχονταν στο 27% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, ήτοι 186 εκατομμύρια dwt και το 2010 είχε αυξηθεί στο 38%, ήτοι 532 εκατομμύρια dwt. Οι απαιτήσεις για αυξημένο τονάζ είναι άμεσα συνυφασμένες με την οικονομική άνοδο. Επιπλέον, το μέγεθος του παγκόσμιου στόλου επηρεάζεται και από το ρυθμό διάλυσης (scrapping) των παλαιών πλοίων. Όποτε ο ρυθμός διάλυσης υποχωρεί συγκριτικά με το ρυθμό παραγγελιών νέου τονάζ, ο παγκόσμιος στόλος αυξάνει.

Η σύσταση του παγκόσμιου στόλου των φορτηγών πλοίων από το 1980 έως το 2010 παρίσταται στο κάτωθι διάγραμμα:

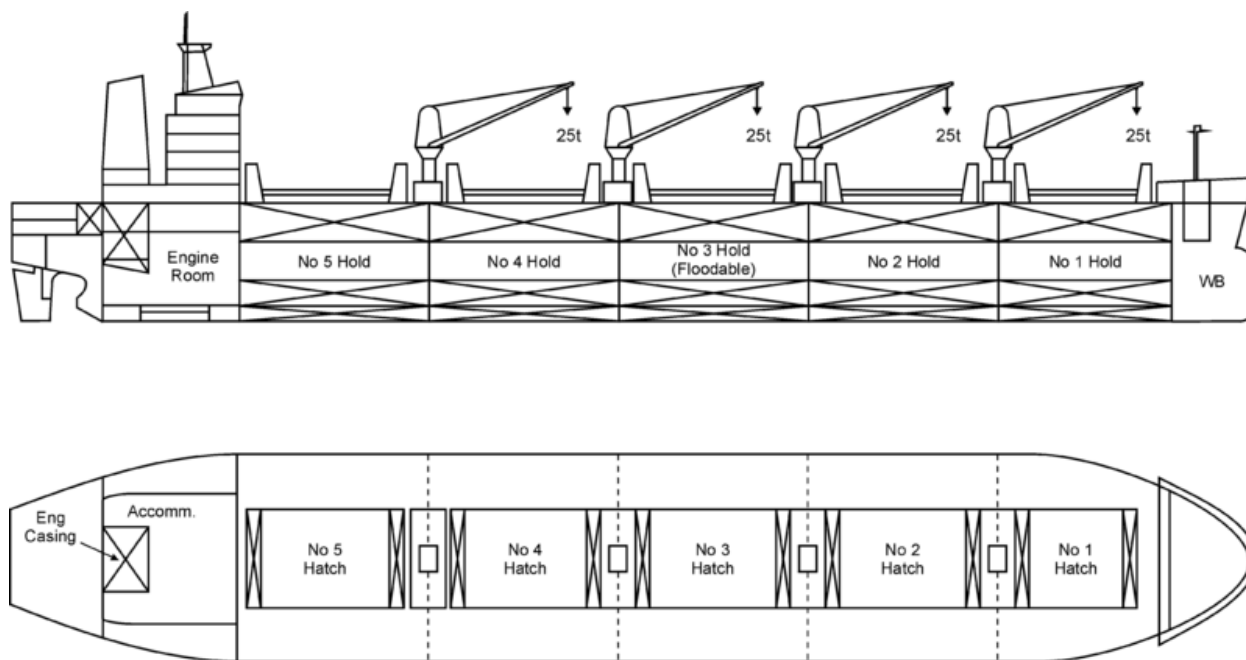


Διάγραμμα 23: Φορτηγά πλοία φορτίου χύδην ανά σημαία του παγκόσμιου στόλου 1980-2010 (Lloyd's Register of Shipping) ^[34]

4.2 Κατασκευαστική σχεδίαση φορτηγών πλοίων φορτίου χύδην ^{[35], [38] – [40]}

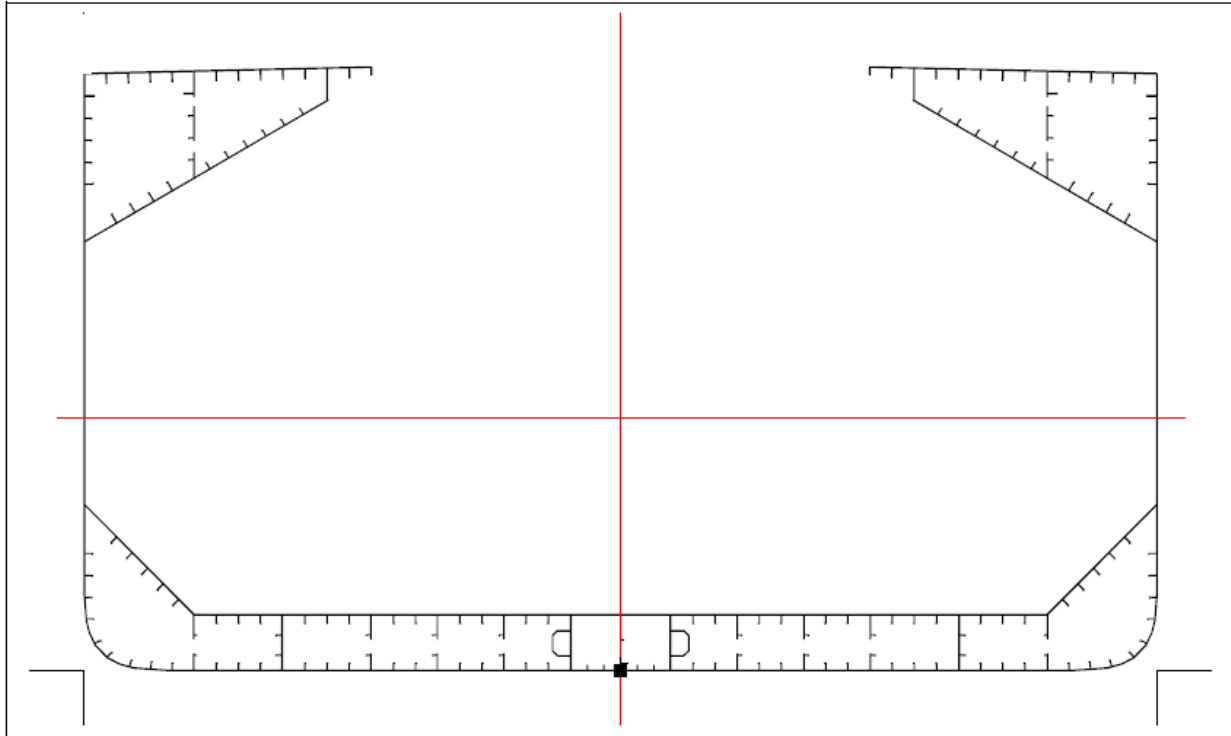
Οι συνήθεις κατασκευές φορηγών πλοίων χύδην φορτίου συνίστανται από διάταξη μονής γάστρας (προσφάτως και διπλής) και διπυθμένων, με άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές. Η κατασκευή φέρει εγκάρσιους νομείς και διαμήκη ενισχυτικά. Το κάθε κύτος φορτίου έχει πρόσβαση μέσω μεγάλου στομίου στο άνω τμήμα του, το οποίο κλείνει δια υδατοστεγούς καλύμματος.

Τα πλοία αυτά πλεονεκτούν έναντι των πλοίων γενικού φορτίου, τα οποία φέρουν συνήθως δύο καταστρώματα, με τη μορφή ενδιάμεσου καταστρώματος – tween deck, γιατί διευκολύνουν την απλούστερη στοιβασία του χύδην φορτίου, χωρίς να χρειάζονται πρόσθετα διαχωριστικά διαφράγματα, τροφοδοτικά στόμια κλπ. Τα μεταφερόμενα φορτία είναι συνήθως γαιάνθρακες, μεταλλεύματα, σιτηρά, ξυλεία, ζάχαρη και φωσφάτα. Ο συντελεστής στοιβασίας για τέτοια φορτία είναι από 0,4 έως 1,5 m³. Οι φυσιολογικές τιμές της υπηρεσιακής ταχύτητας των φορηγών πλοίων κυμαίνονται από 13 έως 17 κόμβους. Η γενική διάταξη ενός φορηγού πλοίου χύδην φορτίου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 16: Γενική διάταξη φορηγού πλοίου χύδην φορτίου handymax ^[40]

Η μέση τομή ενός φορηγού πλοίου χύδην φορτίου φαίνεται σε απλή μορφή παρακάτω:



Σχήμα 17: Μέση τομή φορτηγού πλοίου φορτίου χύδην^[38]

4.3 Άλλοι σχεδιαστικοί τύποι φορτηγών πλοίων

Εν συνεχεία αναφέρονται τέσσερις (4) κοινοί τύποι bulk carriers και τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών, ενώ παρατίθενται και ενδεικτικά σχέδια της μέσης τομής των.

Α) Φορτηγά πλοία μεταλλευμάτων (ore carriers)

Λόγω του υψηλού ειδικού βάρους του φορτίου, τα κύτη φορτίου είναι σχετικά μικρά και οι πλευρικές δεξαμενές μεγάλες. Τη δεκαετία του 1970 υπήρχαν πολλά πλοία μεταφοράς μικτού φορτίου (Ore-bulk-oil – OBO) αλλά σήμερα σπανίζουν.

Β) Φορτηγά πλοία ανοικτών στομιών (open hatch bulk carriers)

Τα πλοία αυτά έχουν στόμια κυτών μεγάλου πλάτους που τους προσδίδει αποτελεσματικότητα στη φορτοεκφόρτωση. Είναι δυνατή η φόρτωση φορτίων εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους και το φορτίο που μεταφέρουν δεν είναι μόνο χύδην αλλά μπορεί να περιλαμβάνει και πολύ ξυλείας, χάλυβα σε κουλούρες (coils) και κοντέινερ.

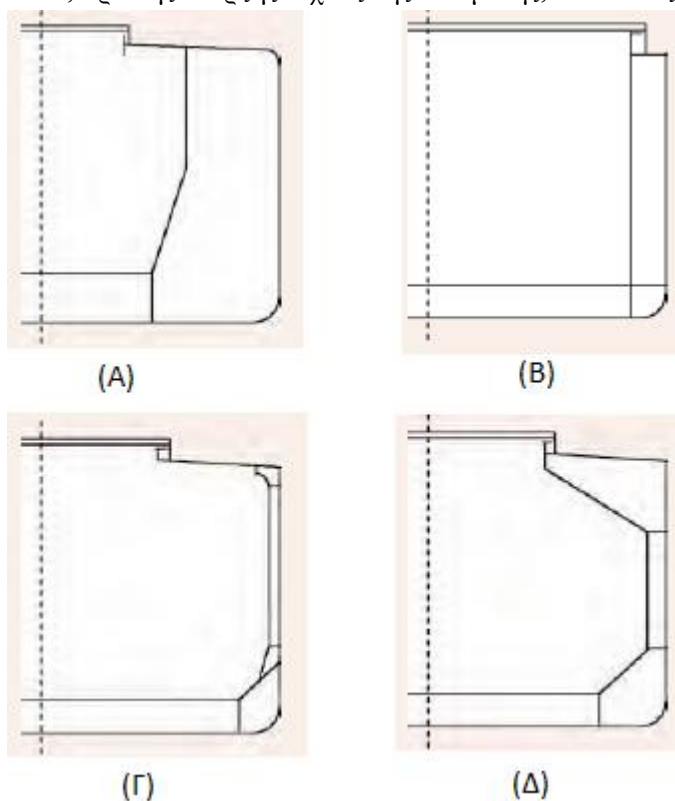
Γ) Φορτηγά πλοία μεταφοράς θρυμματισμένης ξυλείας (wooden chip carriers)

Λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους του φορτίου, τα κύτη εδώ είναι βαθιά και δεν υπάρχουν πλευρικές δεξαμενές ώστε να αυξηθεί ο όγκος των κυτών. Η κάτω πλευρά του κυρίως καταστρώματος είναι ενισχυμένη, μιας και το κατάστρωμα συνήθως φέρει γεραμούς και ιμάντες μεταφοράς. Οι δεξαμενές έρματος είναι επιρρεπείς στη διάβρωση εξαιτίας της υψηλότερης σχετικής θερμοκρασίας του φορτίου.

Αυτός ο τύπος πλοίων δεν εθεωρείτο ευπροσάρμοστος αλλά πλέον η χρήση του έχει επεκταθεί για τη μεταφορά και άλλων φορτίων, όπως σόγιας.

Δ) Φορτηγά πλοία διπλής γάστρας (double side shell bulk carriers)

Λόγω της ύπαρξης διπλού πλευρικού ελάσματος, οι νομείς δεν απαιτείται να είναι εντός του κύτους, κάτι που προστατεύει τα ενισχυτικά στοιχεία του πλοίου από τα διαβρωτικά περιβάλλοντα των κυτών, ενώ ευνοεί και την αποδοτικότητα των διαδικασιών φορτοεκφόρτωσης. Όπως και τα φορτηγά πλοία μονής γάστρας έτσι και αυτά πρέπει να συμμορφώνονται με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (common structural rules – CSR). Το 2002 υιοθετήθηκε από τον IMO η επιβολή της διπλής γάστρας, αλλά το 2004, προ της έναρξης ισχύος της απόφασης, ο κανόνας άλλαξε και η διπλή γάστρα είναι προαιρετική.



Σχήμα 18: Σκαριφήματα μέσης τομής των προαναφερθέντων τύπων φορτηγών πλοίων ^[35]

4.4 Ταξινόμηση φορτηγών πλοίων ανάλογα με το μέγεθος ^{[35], [41]}

- **Mini Bulk Carrier:** (100 – 130 m μήκος, βύθισμα μικρότερο από 10 m, 3.000 – 23.999 DWT) Απασχολούνται σε παράκτιο εμπόριο, μεταφέροντας περιορισμένες ποσότητες φορτίων χύδην σε μικρούς λιμένες χωρίς περιορισμούς του μεγέθους των πλοίων.
- **Handysize:** (130 -150 m μήκος, 10 m βύθισμα, 24.000 – 35.000 DWT). Είναι φορτηγά πλοία μεσαίου μεγέθους. Μεταφέρουν μεγάλη ποικιλία φορτίου και είναι κατάλληλα για είσοδο στους περισσότερους λιμένες.

- **Handymax:** (150 – 200 m μήκος, 11 – 12 m βύθισμα, 35,000 – 50,000 DWT). Κατάλληλα για μικρούς λιμένες με περιορισμούς μήκους και βυθίσματος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά ξηρού φορτίου όπως σιδηρομετάλλευμα, γαιάνθρακες, τσιμέντο, λιπάσματα και σιτηρά.
- **Supramax:** (50.000 – 63.000 DWT) Πρόκειται για πολύ σημαντική κατηγορία μεγέθους, τα οποία γνώρισαν ιδιαίτερη ζήτηση μετά το 2001. Συνήθως διαθέτουν πέντε (5) κύπη φορτίων και γεραμούς καταστρώματος με ανυψωτική ικανότητα μεταξύ 25 και 40 mt και με τα περισσότερα πλοία εφοδιασμένα με τις δικές τους άρπες. Σημαντικός αριθμός εξ αυτών κατασκευάζονται με διπλή γάστρα. Ακριβώς λόγω της μεγαλύτερης μεταφορικής τους ικανότητας σε συνδυασμό με την ευελιξία τους για αυτόνομη φορτοεκφόρτωση είναι πολύ δημοφιλή. Προσέτι, το μέγεθός τους είναι κατάλληλο για είσοδο σε μεγάλο εύρος λιμένων και τερματικών ανά τον κόσμο.
- **Panamax:** (200 – 230 m μήκος, 13 – 15 m βύθισμα). Πρόκειται για πλοία με αυστηρούς περιορισμούς διαστάσεων για πέρασμα από τη Διώρυγα του Παναμά. Το πλάτος δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 32,2 m και τα πλήρως φορτωμένα πλοία δε μπορούν να υπερβαίνουν τους 80.000 t DWT. Συνήθως μεταφέρουν σιτηρά, γαιάνθρακες και σιδηρομετάλλευμα από λιμένες των ΗΠΑ.
- **Capesize:** (230 – 270 m μήκος, 17 m βύθισμα, 80.000 – 199.000 t DWT). Είναι φορτηγά πλοία πολύ μεγάλα για τη Διώρυγα του Παναμά, τα οποία από τον Ατλαντικό Ωκεανό περιπλέουν το Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδας στη Νότιο Αφρική. Ελάχιστοι λιμένες στον κόσμο μπορούν να τα υποδεχτούν σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης.
- **Suezmax:** Είναι τα μεγαλύτερα πλοία που μπορούν να διέλθουν από τη Διώρυγα του Σουέζ. Το μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα είναι 18,90 m, αλλά οι αρχές σκοπεύουν να το αυξήσουν σε 21,95 m έως το τέλος του 2017.
- **Very Large Bulk Carrier (VLBC):** (>270 m μήκος, >20m βύθισμα, >180.000 DWT). Συνιστούν πολύ εξειδικευμένο τύπο, κυρίως φτιαγμένα κατά παραγγελία για πολύ ειδικά δρομολόγια.

Παράλληλα, υπάρχουν και ειδικότεροι τύποι, για μεμονωμένους λιμένες, με ενδεικτικούς τους κάτωθι:

- **Seawaymax:** (Επίσης lakesizes ή lakers) (226 m μήκος, 7.92 m βύθισμα 28.502 DWT) Το μεγαλύτερο πλοίο που μπορεί να περάσει μέσα από το κανάλι της θαλάσσιας οδού St Lawrence.
- **Malaccamax:** (330 m μήκος, 20 m βύθισμα, 300.000 DWT) Το μεγαλύτερο πλοίο που μπορεί να περάσει από τα στενά της Μάλακκα.
- **Setouchmax:** (299.9 m μήκος (μέγιστο) 16.1m βύθισμα, 205.000 DWT) Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος πλοίου για λιμάνια της θάλασσας Setouch στην Ιαπωνία
- **Dunkerquemax** (289 m μήκος, 175.000 DWT) Το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος για τα πλοία αυτά είναι 45 m για τον ανατολικό προβλήτα του λιμένα της Δουνκέρκης, στη Γαλλία.
- **Kamsarmax** (229 m μήκος, 82.000 DWT) Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος για τον λιμένα Kamsar στην Ισημερινή Γουινέα.
- **Newcastlemax** (185.000 DWT, μέγιστο πλάτος 47 m) για τον λιμένα του Newcastle στην Αυστραλία.

4.5 Λειτουργία - φόρτωση φορτηγών πλοίων χύδην φορτίου ^{[2], [38]}

Όταν ένα φορτηγό πλοίο είναι εν πλω, υπόκειται τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές φορτίσεις. Οι στατικές φορτίσεις ασκούνται από το βάρος του πλοίου και την αντίστοιχη δύναμη άντωσης. Οι δυναμικές φορτίσεις οφείλονται σε επιταχύνσεις λόγω της κίνησης του πλοίου σε κυματισμούς, στις προσκρούσεις υγρών στα τοιχώματα των δεξαμενών (sloshing) και στη σφυρόκρουση (slamming) της πλώρας. Οι νηογώνοντες ορίζουν κατασκευαστικές απαιτήσεις ως συνάρτηση της στατικής φόρτισης με περιθώριο για τη δυναμική φόρτιση, με τη μορφή της επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης και καμπτικής ροπής. Κατά το σχεδιασμό των λειτουργικών συνθηκών ενός πλοίου απαιτείται η στατική φόρτιση να επιτρέπει ικανό περιθώριο για δυναμική φόρτιση σε μια θαλάσσια διαδρομή. Πολλάκις έχουν απολεσθεί φορτηγά πλοία σε κακοκαιρία, υποδεικνύοντας ότι τα πλοία είχαν σχεδιαστεί επαρκώς για να ανταπεξέλθουν σε κανονικές λειτουργικές συνθήκες, δίχως όμως το επαρκές περιθώριο για μια δυσμενέστερη κατάσταση θάλασσας.

Αναφορικά με τη φόρτωση των φορτηγών πλοίων, η κατανομή της φόρτωσης υπάγεται σε τρεις (3) τύπους: Την **ομογενή φόρτωση**, την **εναλλασσόμενη φόρτωση** και την **εναλλασσόμενη φόρτωση «block loading»**. Τις διακρίνουμε στο κάτωθι σχήμα.

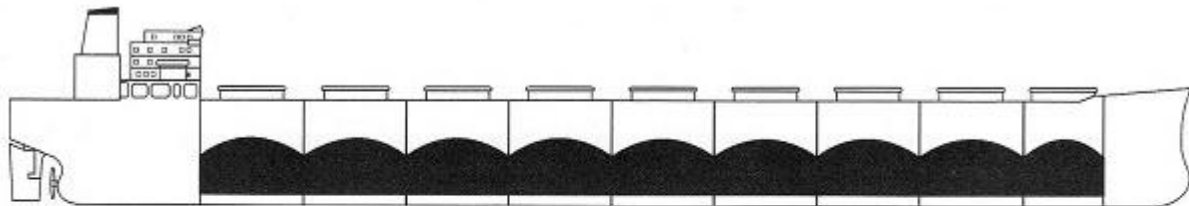
Κατά την ομογενή φόρτωση, η ίδια ποσότητα φορτίου φορτώνεται ομοιόμορφα σε κάθε κύτος. Αυτό συνήθως γίνεται με ελαφρά φορτία όπως τα σιτηρά και οι γαιάνθρακες. Χρειάζεται προσοχή στο σχεδιασμό της ομογενούς φόρτωσης για την αποφυγή μετακίνησης φορτίου (cargo shifting).

Η εναλλασσόμενη φόρτωση χρησιμοποιείται όταν μεταφέρεται φορτίο υψηλής πυκνότητας για να ανέβει το κέντρο βάρους. Εάν βαρύ φορτίο φορτωθεί ομογενώς, το χαμηλό κέντρο βάρους μπορεί να προκαλέσει αιφνίδιο διατοχισμό. Στοιβάζοντας το φορτίο στο διπλάσιο ύψος και στα μισά κύτη σε αριθμό, ο διατοχισμός αυτός μπορεί να περιοριστεί. Η εναλλασσόμενη φόρτωση πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν κατά τη φάση σχεδίασης. Η τοπική μεταλλική κατασκευή (εγκάρσιες φρακτές, εσωτερικός πυθμένας και κάτω πλευρικές εδράσεις) πρέπει να έχουν τις απαιτούμενες διαστάσεις για να αντέξουν στο αυξημένο βάρος. Για να γίνει οικονομία στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής και να μην υπάρξει υπερδιαστασιολόγηση, μόνο τα κύτη που θα φορτωθούν εναλλασσόμενα ενισχύονται. Παράλληλα με την τοπική κατασκευή, η φόρτωση αυτή μπορεί να προκαλέσει υψηλές διατμητικές δυνάμεις στις φρακτές όπου η φόρτιση αλλάζει από πρωτίστως λόγω άντωσης σε πρωτίστως λόγω βάρους.

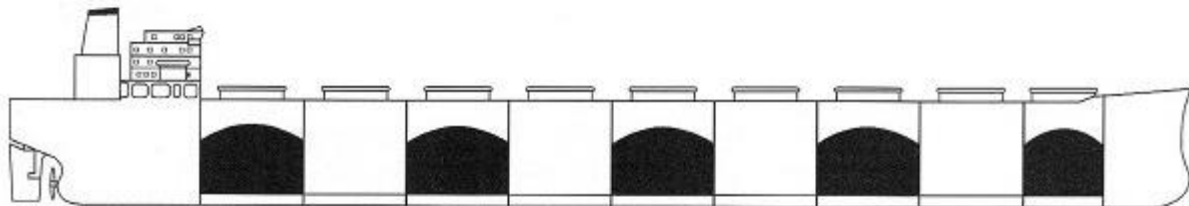
Η εναλλασσόμενη φόρτωση «block loading» ομοιάζει με την εναλλασσόμενη, με τη διαφορά ότι διαδοχικά κύτη μπορούν να φορτωθούν, μπορεί για παράδειγμα δύο ζεύγη γειτονικών κυτών να φορτωθούν με ένα κενό κύτος μεταξύ των. Η μέθοδος φόρτωσης αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ένα πλοίο είναι μερικώς φορτωμένο. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος είναι απαραίτητο να δοθεί έμφαση στην κατανομή βάρους και άντωσης στο μπλοκ του φορτίου. Τα εγχειρίδια φόρτωσης συνήθως περιλαμβάνουν διαγράμματα με τις επιτρεπόμενες ποσότητες φορτίου που μπορεί να παραλάβει ένα κύτος, για δεδομένο βύθισμα.

Παράλληλα με την τελική κατάσταση φόρτωσης του πλοίου, πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά και η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης, κατά την οποία η διάτμηση και η καμπτική ροπή πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

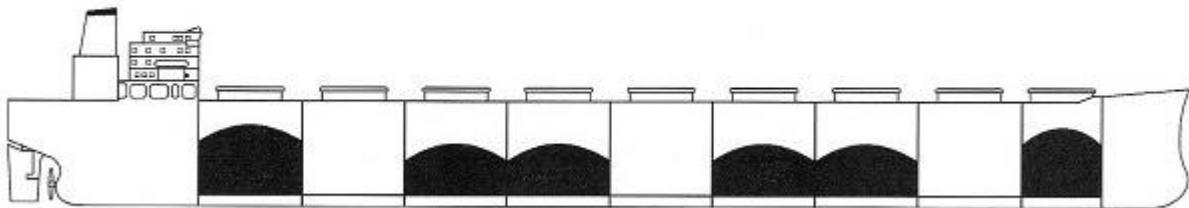
Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν, γίνεται παράθεση της καμπλής διατμητικών δυνάμεων και καμπτικής ροπής αντίστοιχα για τις τρεις καταστάσεις φόρτωσης, για το ίδιο συνολικά φορτίο.



α) Ομογενής φόρτωση

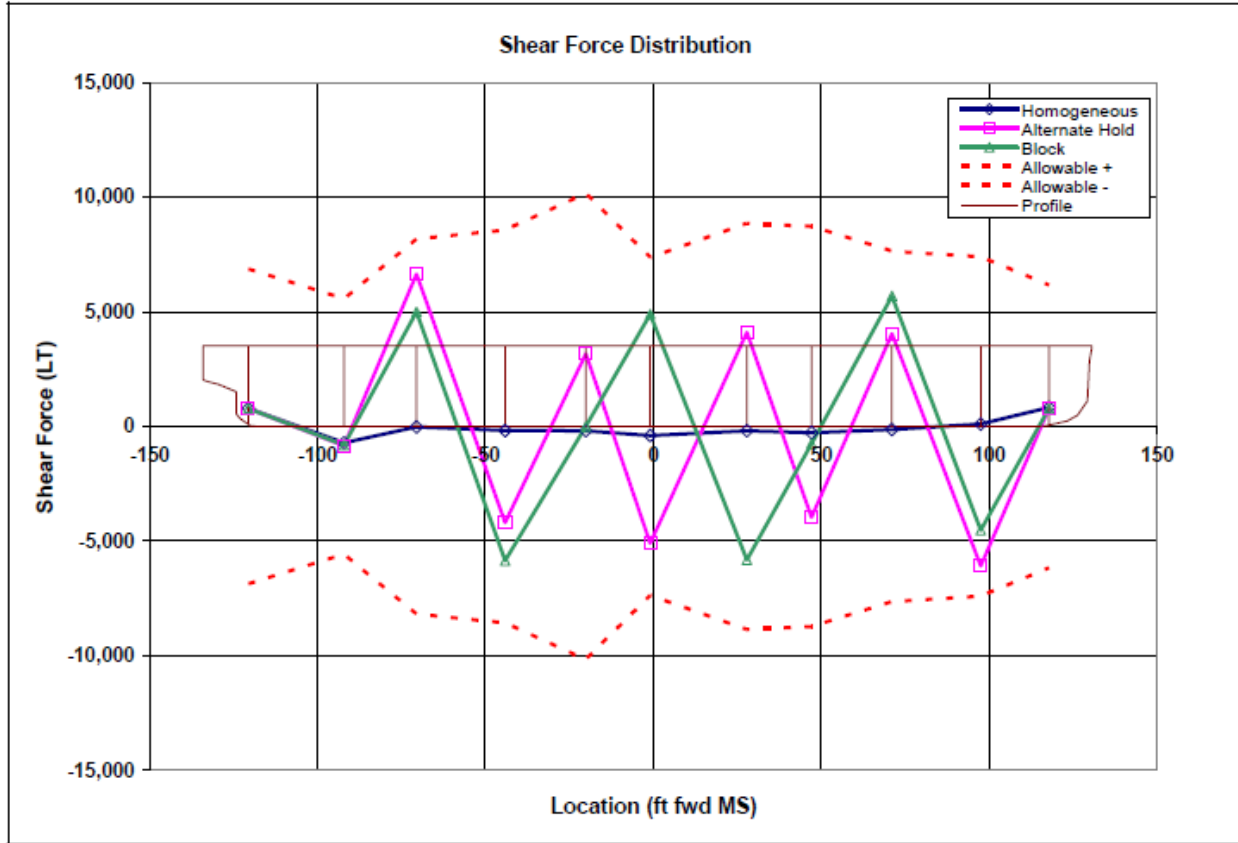


β) Εναλλασσόμενη φόρτωση

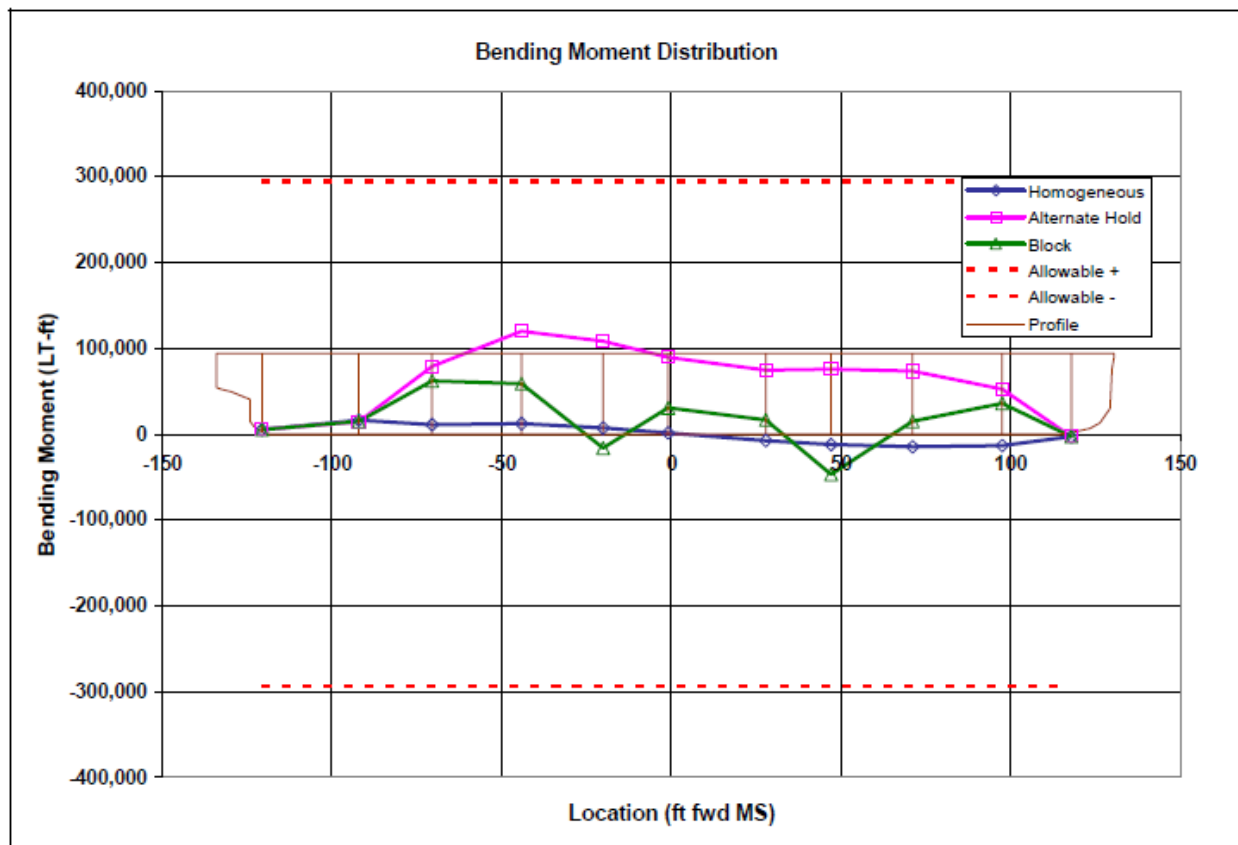


γ) Εναλλασσόμενη φόρτωση «block loading»

Σχήμα 19: Κατανομή φορτίου σε φορτηγά πλοία χύδην φορτίου ^[2]



Διάγραμμα 24: Κατανομή διατμητικής δύναμης για τις τρεις καταστάσεις φόρτωσης ^[38]



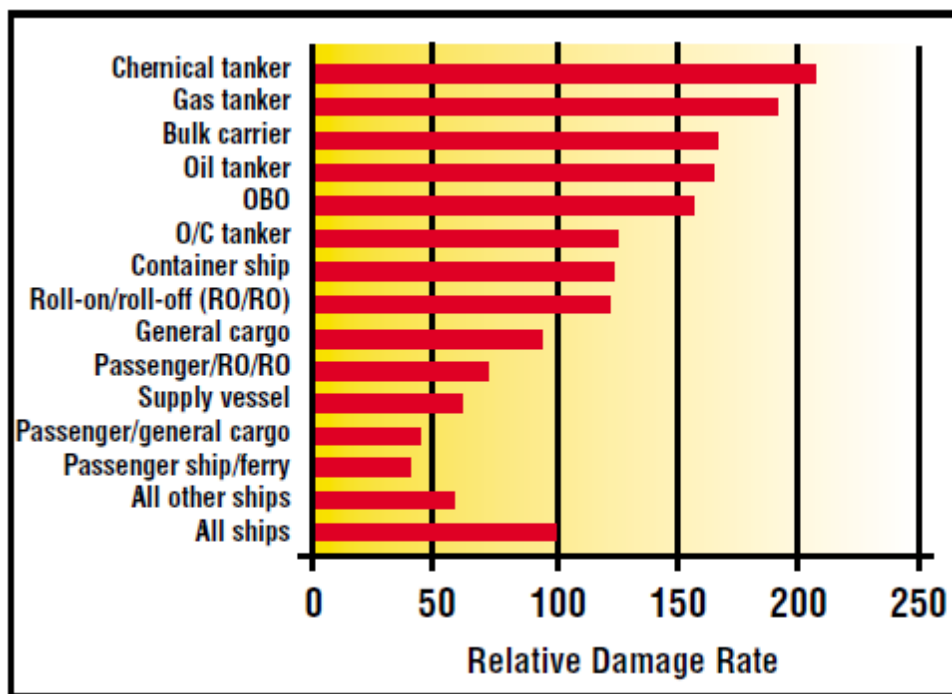
Διάγραμμα 25: Κατανομή καμπτικής ροπής για τις τρεις καταστάσεις φόρτωσης ^[38]

4.6 Στατιστικά στοιχεία ζημιών σε φορτηγά πλοία φορτίου χύδην ^{[33], [37]}

Οι περισσότερες απώλειες πλοίων προκαλούνται από αλληλουχίες γεγονότων που περιλαμβάνουν λειτουργικούς παράγοντες και ανθρώπινα λάθη. Οι συχνότεροι λόγοι πρόκλησης σοβαρών ζημιών στη γάστρα των πλοίων είναι προσαράξεις και συγκρούσεις. Οι ζημιές γάστρας συνιστούν τα αίτια για ποσοστό 15% με 17% των σοβαρών απωλειών σύμφωνα με στατιστικά του DNV για τα έτη 1978-1995, όπου περιλαμβάνονται αστοχίες προκληθείσες εκ της διάβρωσης. Ειδικά για τα bulk carriers, η διάβρωση της κατασκευής των κυτών φορτίου έχει προκαλέσει την απώλεια πλοίων και ανθρώπινων ζωών. Την περίοδο 1990 – 1997, 25 φορτηγά πλοία βυθίστηκαν, με μέση ηλικία 20,4 έτη. Οι κύριες αιτίες της πρόκλησης ζημιών σε γερασμένα φορτηγά πλοία είναι η διάβρωση και η κόπωση. Η δε μέση ηλικία του παγκοσμίου στόλου είχε σημειώσει ραγδαία αύξηση, από 8 έτη το 1980 στα 14 έτη το 1997, σύμφωνα με τον LR.

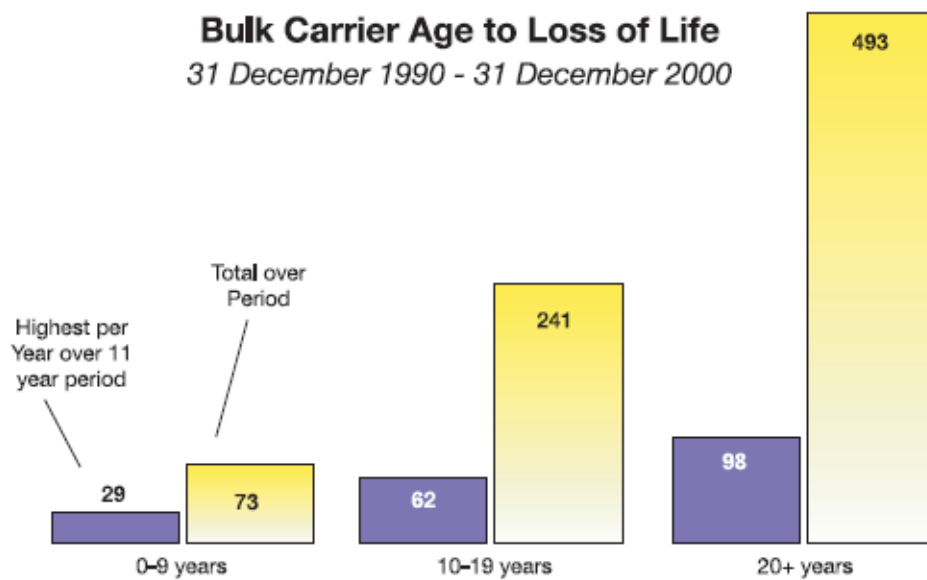
Η σχετική ποσότητα της ζημίας της γάστρας, περιλαμβανομένων της διάβρωσης, των ρωγματώσεων και των θραύσεων, σε πλοία διαφόρων τύπων υπό τον DNV παρίσταται στο κάτωτι γράφημα. Ο σχετικός ρυθμός ζημιών γάστρας ορίζεται ως ο ρυθμός ζημιών του εκάστου τύπου πλοίου προς το ρυθμό ζημιών για όλα τα είδη πλοίων πολλαπλασιασμένος επί 100. Διακρίνουμε ότι τα bulk carriers είναι αρκετά ψηλά στη λίστα, κάτω μόνον από τα χημικά τάνκερ και τα πλοία LNG/LPG και σε κάθε περίπτωση αρκετά πάνω από το μέσο όρο.

Με βάση στατιστικά στοιχεία από τον ABS, τα πλοία με περισσότερα από 20 χρόνια λειτουργίας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να υποστούν ολική απώλεια (total loss), καθώς και μεγαλύτερη πιθανότητα πρόκλησης απώλειας ανθρώπινων ζωών. Η πλειοψηφία των απωλειών λαμβάνει χώρα σε φορτηγά πλοία τύπου capesize (μεγαλύτερα από 80.000 dwt) και handysize (10.000 – 40.000 dwt). Αυτό συνιστά ανησυχητικό παράγοντα, μιας και το 51% του στόλου των handysize είναι τουλάχιστον 20 ετών.



Διάγραμμα 26: Σχετικός ρυθμός ζημιών γάστρας για πλοία κλάσης DNV την περίοδο 1985-1994 ^[37]

Bulk Carrier Age to Loss of Life 31 December 1990 - 31 December 2000



Source: Intercargo

Διάγραμμα 27: Απώλειες bulk carriers ανά ηλικία πλοίου (Bulk Carrier Casualty Report, 2001 and the Previous Ten Years – Intercargo)^[33]

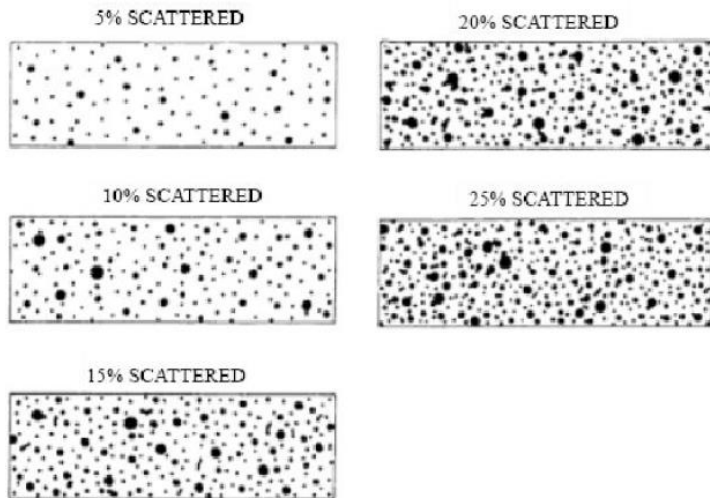
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ BULK CARRIERS

5.1 Γενικά ^[85]

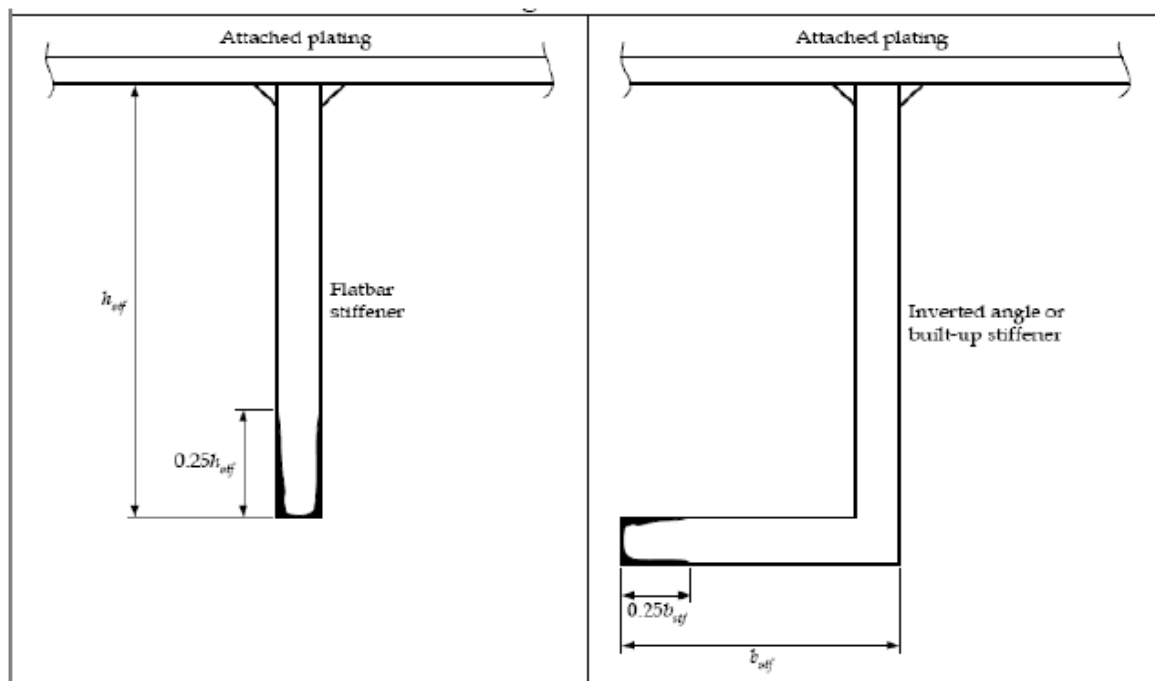
Τα περισσότερα μέταλλα είναι θερμοδυναμικά ασταθή και έχουν την τάση να επιστρέψουν στη φυσική τους μορφή μεταλλεύματος. Η αστάθειά τους αυτή είναι η κινητήριος δύναμη για την ηλεκτροχημική αντίδραση διάβρωσης που, όπως είδαμε στο 1^ο κεφάλαιο αποτελείται από δύο μερικές αντιδράσεις, την ανοδική όπου το μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων) και την καθοδική όπου τα ηλεκτρόνια ανάγονται από υποδοχέα ηλεκτρονίων (συνήθως το οξυγόνο). Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο για τις ηλεκτροχημικές αυτές δράσεις. Από αυτή τη βασική ανακεφαλαίωση της διαδικασίας της διάβρωσης, τρεις (3) παρατηρήσεις εξάγονται:

- 1: Η θερμοκρασία επηρεάζει το ρυθμό της διάβρωσης, μιας και η κινητική των χημικών αντιδράσεων εξαρτώνται από τη θερμοκρασία
- 2: Η παροχή του οξειδωτικού παράγοντα (οξυγόνο) είναι καθοριστική για να προχωρήσει η καθοδική αντίδραση.
- 3: Πρέπει να υπάρχει παρουσία υγρασίας για την ύπαρξη της αντίδρασης διάβρωσης.

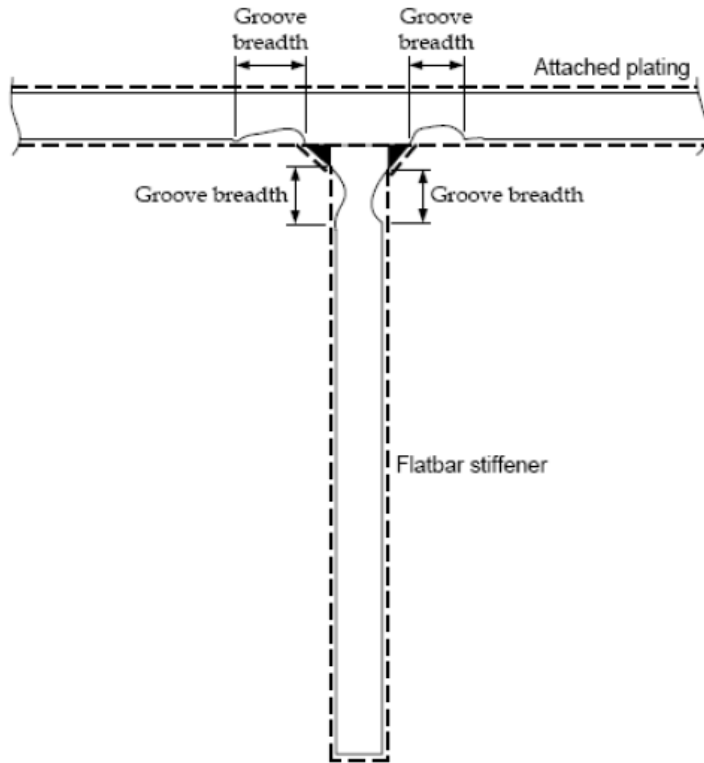
Η διαδικασία της διάβρωσης είναι χρονικά εξαρτώμενη και συνήθως ο ρυθμός μείωσης του πάχους εξαιτίας αυτής μετριέται σε μονάδες mm/έτος. Οι δύο (2) κυριότερες μορφές διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι η **γενική (ή ομοιόμορφη)** και η **τοπική** διάβρωση, με κύριους εκπροσώπους τη διάβρωση με βελονισμούς (**pitting corrosion**), τη διάβρωση με αυλακώσεις (**grooving corrosion**) και τη διάβρωση ακμής (**edge corrosion**). Σύμφωνα με τον κανονισμό των **IACS Z.10.2 (Hull Surveys of Bulk Carriers)**, η διάβρωση με βελονισμούς ορίζεται ως διάσπαρτες περιοχές/σημεία διάβρωσης με τοπική απώλεια υλικού μεγαλύτερη αυτής της γενικής διάβρωσης στην περιοχή που τις περικλείει. Η διάβρωση με αυλακώσεις είναι συνήθως τοπική απώλεια υλικού προσκείμενη σε συγκολλήσεις ενισχυτικών και ελασμάτων και θα εξετασθεί περισσότερο στο κεφ. 9, της διάβρωσης συγκολλήσεων. Τέλος η διάβρωση ακμής ορίζεται ως τοπική διάβρωση στις ελεύθερες ακμές ελασμάτων, ενισχυτικών, πρωτευόντων μελών στηρίξεως και γύρω από ανοίγματα. Οι ανωτέρω μορφές τοπικής διάβρωσης παρίστανται στα σχήματα που ακολουθούν



Σχήμα 20: Διαγράμματα εντάσεως διάβρωσης με βελονισμούς ^[85]



Σχήμα 21: Διάβρωση ακμής ^[85]



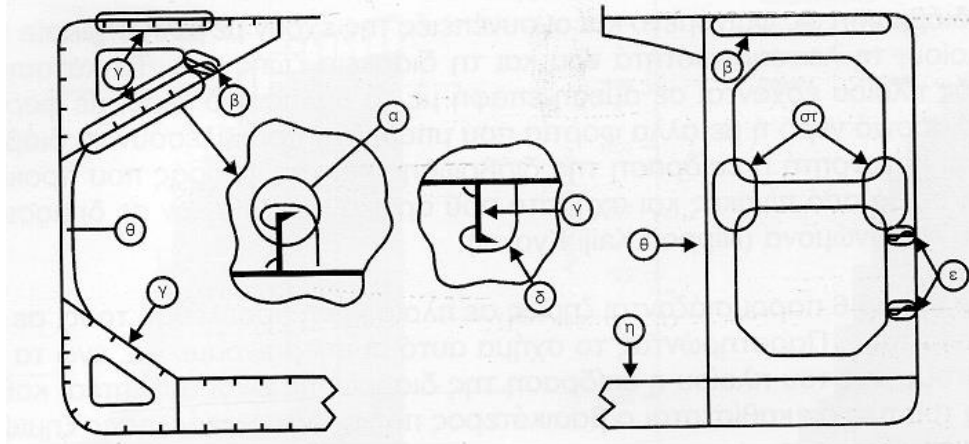
Σχήμα 22: Διάβρωση με αυλακώσεις ^[85]

Η γενική διάβρωση μειώνει ομοιόμορφα το πάχος των κατασκευαστικών μελών του πλοίου και κατ' επέκταση την αντοχή τους και είναι η πιο διαδεδομένη μορφή διάβρωσης που πλήττει τα φορτηγά πλοία ενώ η τοπική διάβρωση προκαλεί υποβάθμιση σε τοπικές περιοχές.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη διάβρωση των φορτηγών πλοίων, συμπεριλαμβανομένων του συστήματος προστασίας από τη διάβρωση και τις λειτουργικές παραμέτρους. Εν γένει, τα συστήματα προστασίας από τη διάβρωση είναι τα επιστρώματα και η καθοδική προστασία, τα οποία και αναπτύχθηκαν διεξοδικά στο 2^ο κεφάλαιο της τρέχουσας εκθέσεως. Οι παράμετροι λειτουργίας περιλαμβάνουν τη συντήρηση, τις επισκευές, το ποσοστό του χρόνου σε ερματισμό, τη συχνότητα καθαρισμού των δεξαμενών, τη θερμοκρασία, τις συνθήκες υγρασίας, τη συσσώρευση υδάτων, τη μικροβιακή ρύπανση και άλλα και θα αναπτυχθούν διεξοδικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

5.1.1 Περιοχές που υφίστανται διάβρωση ^{[2], [42]}

Τα σημεία της μεταλλικής κατασκευής ενός φορτηγού πλοίου χύδην φορτίου που εμφανίζουν διάβρωση σε μεγαλύτερο βαθμό είναι τα εξής ^[2]:

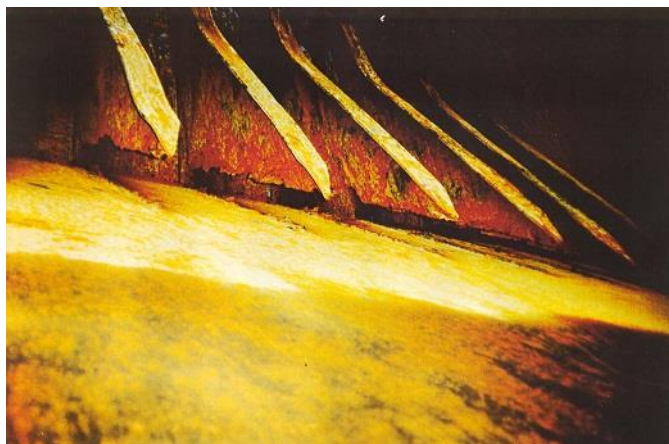


- α) Ενισχυτικά του κεκλιμένου ελάσματος των άνω πλευρικών δεξαμενών
- β) Κορμοί νομέων στις άνω πλευρικές δεξαμενές (συγκολλήσεις)
- γ) Διαμήκη ενισχυτικά του καταστρώματος
- δ) Οπές αποστραγγίσεως και εγκοπές στους νομείς
- ε) Συγκολλήσεις κατά συμβολή στους κορμούς νομέων
- στ) Ένωση σταυρωτών συνδέσμων 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 και θα μελετηθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στο τέλος του τρέχοντος κεφαλαίου θα γίνει αναφορά για τη διάβρωση άλλων περιοχών των bulk carriers (κύριο κατάστρωμα, γάστρα, δεξαμενές καυσίμου και έρματος).

5.2 Πρόβλεψη ρυθμού γενικής διάβρωσης ^{[42], [43], [44]}

Η γενική διάβρωση είναι ο συνηθέστερος τύπος διάβρωσης της κατασκευής του πλοίου και λαμβάνει χώρα όταν τα κατασκευαστικά στοιχεία δε φέρουν προστατευτικά επιστρώματα. Έχει τη μορφή σκουριάς και το στρώμα αυτό θραύεται συνεχώς, εκθέτοντας νέο μέταλλο στη διαβρωτική προσβολή. Το βάθος του στρώματος σκουριάς εμφανίζει σταθερό βάθος και παρόμοια συνάφεια επί μιας επιφάνειας. Η γενική διάβρωση εξαπλώνεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του χαλύβδινου ελάσματος και οδηγεί σε μείωση του πάχους του, ενώ ακολούθως ευνοεί ρωγμές λόγω κόπωσης, ψαθυρή θραύση και ασταθή αστοχία.



Εικόνα 10: Εκτεταμένη γενική διάβρωση κύριων νομέων και κάτω πλευρικής δεξαμενής (hopper tank) bulk carrier ^[42]



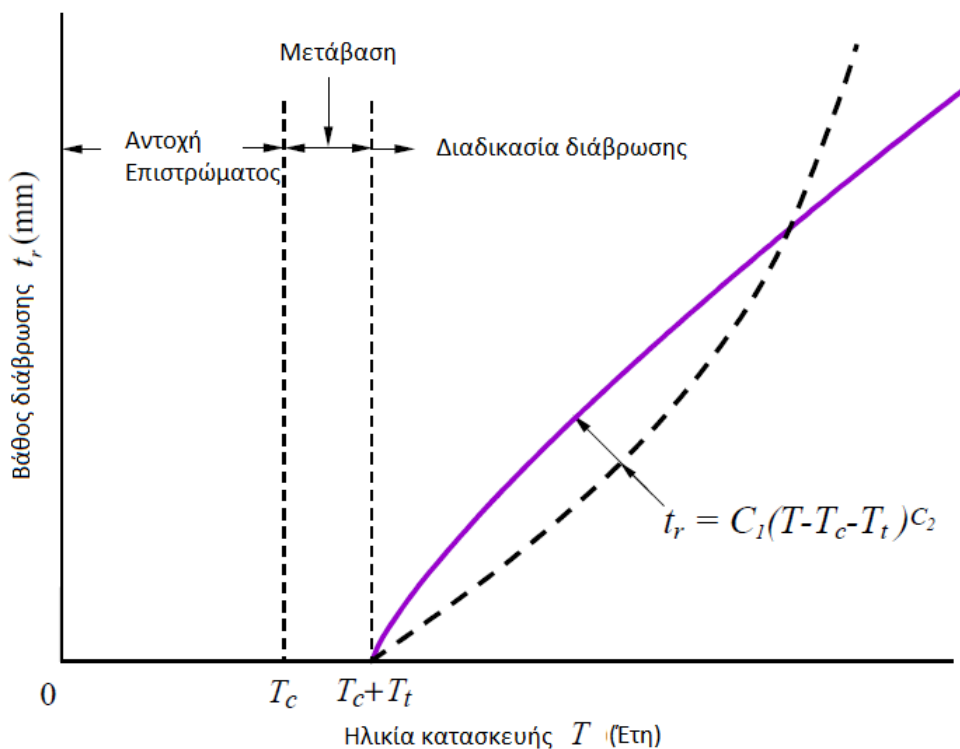
Εικόνα 11: Άποψη (α) Κάτω και (β) Άνω επιφάνειας ελάσματος που έχει υποστεί γενική διάβρωση ^[44]

Για την α priori πρόβλεψη της ζημίας λόγω διάβρωσης είναι αναγκαίο να προβλεφθούν οι ρυθμοί διάβρωσης για διάφορα κατασκευαστικά τμήματα ταξινομημένα με το είδος, τη θέση και άλλες παραμέτρους. Τέσσερα (4) είναι τα ερωτήματα που πρέπει να προσδιοριστούν:

- Πού είναι πιθανό να συμβεί η διάβρωση;
- Πότε ξεκινά;
- Ποια είναι η έκτασή της;
- Ποιοι είναι οι πιθανοί ρυθμοί διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου;

Συνήθως γίνεται χρήση ιστορικών δεδομένων, όπως αποτελέσματα προηγούμενων επιθεωρήσεων, εάν όμως αυτές δεν υπάρχουν οι απαιτούμενες πληροφορίες δύναται να γίνουν υποθέσεις βασισμένες στο σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται. Επειδή η διάβρωση επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες ως προαναφέρθησαν, και επειδή ο μηχανισμός της διάβρωσης εμφανίζει αρκετή αβεβαιότητα χρειάζεται μια πιθανοθεωρητική προσέγγιση. Όπου υπάρχουν επιστρώματα, ο ρυθμός της διάβρωσης συνδέεται με

την υποβάθμιση αυτών. Στο κάτωθι διάγραμμα βλέπουμε σχηματικά τη διαδικασία της διάβρωσης σε μια περιοχή της μεταλλικής κατασκευής που φέρει επιστρώμα, και διακρίνουμε τρεις (3) φάσεις, α) την ανθεκτικότητα του επιστρώματος, β) τη μετάβαση στη διάβρωση και γ) τη διαδικασία της διάβρωσης



Διάγραμμα 28: Η διαδικασία της διάβρωσης για θαλάσσιες κατασκευές ^[43]

Η καμπύλη που παρίσταται με τη συνεχή γραμμή παριστά το ρυθμό διάβρωσης και είναι κυρτή, υποδηλώνοντας ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται στην αρχή αλλά εν συνεχεία μειώνεται καθώς η διαδικασία της διάβρωσης προχωρά. Αυτή η μορφή προόδου της διάβρωσης είναι τυπική για περιβάλλοντα μη εμβάπτισης στο νερό, μιας και τα προϊόντα της διάβρωσης επί του χάλυβα δύνανται να επιβραδύνουν την περαιτέρω διάβρωση. Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, η καμπύλη έχει τη μορφή της κοίλης διακεκομμένης γραμμής η οποία υποδηλώνει επιτάχυνση του ρυθμού διαβρώσεως. Αυτό συναντάται σε συνθήκες θαλάσσιας εμβάπτισης και ιδίως σε δυναμικά φορτιζόμενες κατασκευές όπου οι συνεχείς κάμψεις εκθέτουν καινούρια επιφάνεια για διάβρωση. Συνήθως, πάντως, λαμβάνεται γραμμική προσέγγιση ανάμεσα στις καμπύλες.

5.2.1 Ανθεκτικότητα του επιστρώματος

Η ανθεκτικότητα ή ο χρόνος ζωής του επιστρώματος αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή κατά την οποία ξεκινά η διάβρωση έπειτα από την πρώτη εφαρμογή ή την επισκευή του από πρότερη ζημία. Η ζωή του επιστρώματος εξαρτάται από το είδος του χρησιμοποιηθέντος συστήματος επιστρωμάτων, τις συνθήκες της εφαρμογής του (προετοιμασία επιφάνειας, πάχος φιλμ, υγρασία, έλεγχος παρουσίας αλάτων κατά

την επιστροφή κ.ά) καθώς και τη συντήρησή του. Ο χρόνος ζωής του επιστρώματος γενικά ακολουθεί την κατανομή ^[43]:

$$f(T_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp \left[-\frac{(\ln T_c - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right]$$

Όπου T_c ο χρόνος ζωής του επιστρώματος σε έτη, $f(T_c)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του T_c , μ_c η μέση τιμή του $\ln T_c$ σε έτη, και σ_c η τυπική απόκλιση του $\ln T_c$.

Τα συστήματα επιστρωμάτων συχνά ταξινομούνται βάσει του προβλεπόμενου χρόνου ζωής τους. Για παράδειγμα, ο IMO χρησιμοποιεί τρία γκρουπ, τα I, II, III με προβλεπόμενη ζωή 5, 10 και 15 έτη αντίστοιχα. Η επιλογή του επιθυμητού χρόνου ζωής του επιστρώματος σε μια κατασκευή γίνεται με οικονομικά κριτήρια. Για κάθε δεδομένη μέση τιμή της ζωής του επιστρώματος η αβεβαιότητα μπορεί να είναι υψηλή. Για πρακτικούς σκοπούς ο συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation – COV) συχνά λαμβάνεται ως $\sigma_c/\mu_c = 0,4$ για το $\ln T_c$.

5.2.2 Μετάβαση ανάμεσα στην ανθεκτικότητα του επιστρώματος και την εκκίνηση της διάβρωσης

Όταν απολεσθεί η αποτελεσματικότητα του επιστρώματος, θεωρείται ότι μεσολαβεί κάποιος χρόνος μετάβασης προτού ξεκινήσει η διάβρωση επί επαρκώς μεγάλης και μετρήσιμης επιφάνειας. Ο χρόνος μετάβασης θεωρείται συχνά ότι είναι τυχαία μεταβλητή εκθετικά κατανομημένη. Για παράδειγμα, η μέση τιμή του χρόνου μετάβασης για τις εγκάρσιες φρακτές σε ένα φορτηγό πλοίο εκτιμήθηκε (Yamamoto N, Ikegami K. *A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on the probabilistic approach.* J Offshore Mech Arct Eng 1998;120:121–8.) ότι ανέρχεται σε 3 χρόνια για τις φρακτές σε ενδιάμεσες δεξαμενές έρματος (deep tanks), 2 χρόνια για υδατοστεγείς φρακτές και 1,5 χρόνο για τις εδράσεις των φρακτών. Όταν ο χρόνος μετάβασης θεωρείται μηδενικός ($T_t=0$), η διάβρωση ξεκινά αμέσως μόλις απολεσθεί η ανθεκτικότητα του επιστρώματος.

5.2.3 Εξέλιξη της διάβρωσης

Για πρακτικούς λόγους καθώς και λόγω της αβεβαιότητας των χαρακτηριστικών των μηχανισμών της διάβρωσης εξετάζουμε το σχετικά απλό μοντέλο των Paik και Thayambali, κατά το οποίο οι απώλειες του πάχους των ελασμάτων μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση του χρόνου (ετήσια) κατόπιν της ενάρξεως της διάβρωσης ^[43]:

$$\text{Βάθος διάβρωσης: } t_r = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2}$$

$$\text{Ετήσιος ρυθμός διάβρωσης: } r = C_1 C_2 (T - T_c - T_t)^{C_2-1}$$

Όπου: t_r το βάθος της διάβρωσης σε mm, T η ηλικία του πλοίου σε έτη, T_c η ζωή του επιστρώματος σε έτη και T_t ο χρόνος της μετάβασης σε έτη. Οι C_1 και C_2 είναι συντελεστές, με τον C_1 να αντικατοπτρίζει το ρυθμό της ετήσιας διάβρωσης και τον C_2 να καθορίζει την τάση της διαδικασίας διάβρωσης.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π) του C_1 θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή Weibull ως ακολούθως:

$$f_{C_1}(x) = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\lambda-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\lambda\right]$$

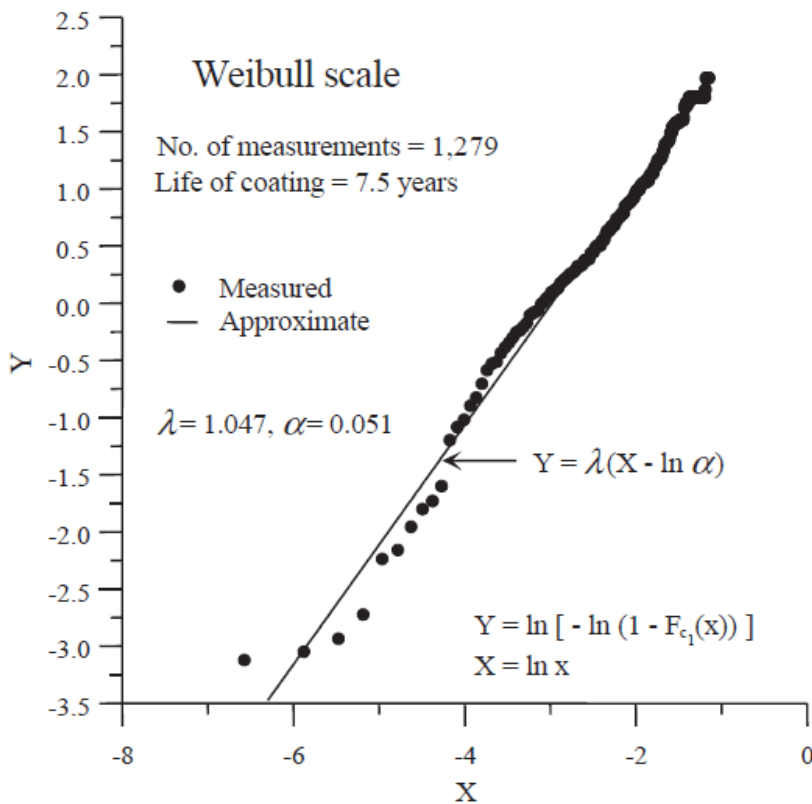
Όπου α και λ οι συντελεστές κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα.

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής του C_1 δίνεται από τη σχέση:

$$F_{C_1}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\lambda\right]$$

Εν συνεχεία υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του συντελεστή C_1 ξαναγράφοντας την άνωθεν σχέση ως $Y = \lambda X - \lambda \ln \alpha$, όπου $X = \ln x$, $Y = \ln[-\ln(1-F_{C_1}(x))]$

Οι άγνωστες παράμετροι α και λ εκτιμώνται για το κάθε κατασκευαστικό σημείο για το οποίο υπάρχουν δεδομένα από μετρήσεις, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στο κάτωθι διάγραμμα βλέπουμε το βέλτιστο ταιρίασμα της προηγούμενης σχέσης για τα δεδομένα της εξωτερικής πλευράς του πυθμένα της γάστρας για φορητά πλοία.



Διάγραμμα 29: Ταιρίασμα της $Y = \lambda X - \lambda \ln \alpha$ για τα ελάσματα πυθμένα φορητών πλοίων με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής επιστρώματος τα 7.5 έτη ^[43]

Αφότου εκτιμηθούν οι παράμετροι α και λ , η μέση τιμή και τυπική απόκλιση του C_1 υπολογίζονται από την ακόλουθη συνάρτηση Γάμμα ^[43]:

$$\mu_{c_1} = \int_0^{\infty} x f_{c_1}(x) dx = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)$$

Και

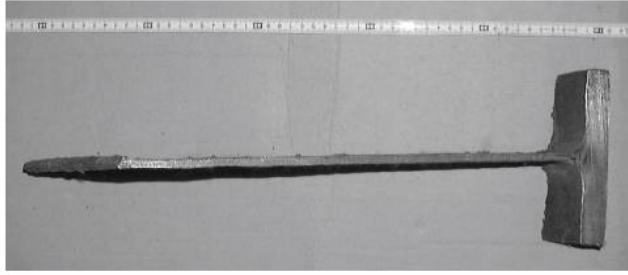
$$\sigma_{c_1}^2 = \int_0^{\infty} (x - \mu)^2 f_{c_1}(x) dx = \alpha^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \right\}^2 \right]$$

5.3 Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion) ^{[12], [45], [46]}

Ο μηχανισμός και τα γενικά στοιχεία της διάβρωσης με βελονισμούς αναπτύχθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Εδώ θα εξετάσουμε την έκφραση της διάβρωσης με βελονισμούς ειδικότερα για τα φορτηγά πλοία.

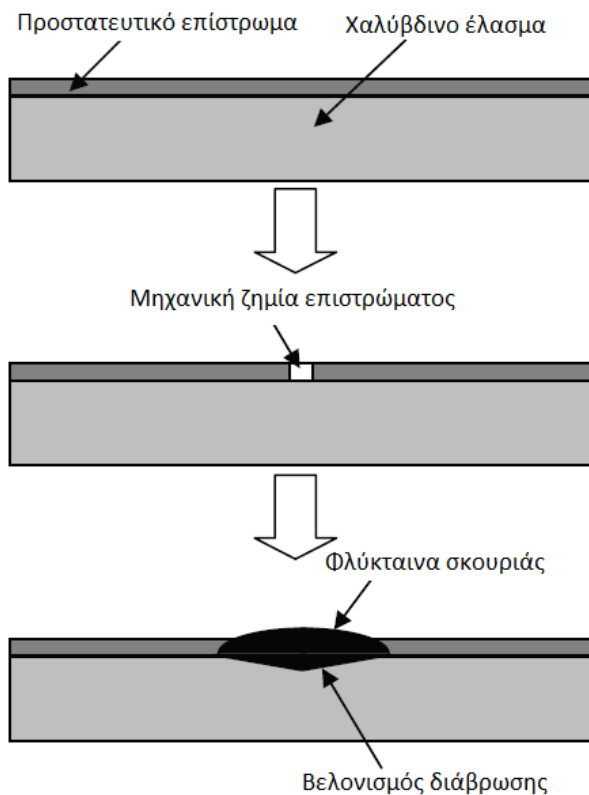
Γενικότερα στα τεχνικά μέταλλα και κράματα, οι βελονισμοί ξεκινούν σε κάποια χημική ή φυσική ετερογένεια της επιφάνειας, όπως εγκλείσματα, ατέλειες, μηχανικές ζημιές ή διαταραχές. Στους χάλυβες, όμως, η εκκίνηση λαμβάνει χώρα συνηθέστερα σε εγκλείσματα σουλφιδίων. Τα σουλφίδια κατά 90% είναι MnS και το υπόλοιπο 10% για κοινούς και χαμηλής κραμάτωσης χάλυβες είναι κυρίως FeS. Βελονισμοί μεγέθους μόνο μερικών μm σχηματίζονται πολύ γρήγορα κατόπιν εμβάπτισης σε νερό. Η διαβρωτική προσβολή ξεκινά από υπάρχοντα κενά ανάμεσα στα σουλφίδια και το πλέγμα. Οι περισσότεροι βελονισμοί φτάνουν σε βάθος τα 100-200 μm και σταματούν να διαδίδονται και καλούνται μικρο-βελονισμοί. Μπορούν να συνεχίσουν την ανάπτυξή τους μόνο κάτω από στρώμα ακαθαρσιών ή προϊόντων διάβρωσης. Η αρχική ανάπτυξη των μικρο-βελονισμών οφείλεται στη διάλυση των εγκλεισμάτων σουλφιδίων και εάν η αναλογία των ενεργών σουλφιδίων στο χάλυβα είναι επαρκώς υψηλή, η διάλυση του σιδήρου γύρω από το εγκλείσμα μπορεί να εκθέσει ένα καινούριο υποκείμενο στρώμα σουλφιδίων. Η προσβολή γύρω από το τελευταίο εκθέτει ακόμα ένα στρώμα ενεργών σουλφιδίων κ.ο.κ ούτως ώστε τελικά δημιουργείται μακροσκοπικός βελονισμός.

Όλα τα κράματα χάλυβα καλύπτονται από παθητικά στρώματα οξειδίων που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να ευνοήσουν την εκκίνηση τοπικής διάβρωσης στις περιοχές κατάρρευσης του επιστρώματος από δραστικό ανιόν (συνήθως Cl⁻). Περαιτέρω ανάπτυξη του μικρο-βελονισμού οδηγείται από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο καθοδικό επίστρωμα και το ανοδικό κράμα. Ο ρόλος των επιστρωμάτων στην πυρηνοποίηση των βελονισμών ερμηνεύεται κατά τον τρόπο αυτό. Είναι χαρακτηριστικό ότι μέχρι το 1992 όποτε και τροποποιήθηκαν οι κανονισμοί των νηογνώνων, η επίστρωση των νομέων στα κύτη δεν ήταν αναγκαία και παρατηρείτο μόνο γενική διάβρωση (βλ. εικόνα που ακολουθεί) των νομέων.



Εικόνα 12: Νομέας κύτους φορτίου bulk carrier ηλικίας 13 ετών που εμφανίζει γενική διάβρωση (δεν είχε επιστρωθεί κατά την κατασκευή του πλοίου) ^[45]

Σήμερα που εφαρμόζονται στους νομείς προστατευτικά επιστρώματα όπως πισσώδη εποξειδικά, παρατηρείται διάβρωση με βελονισμούς. Αυτό σημαίνει ότι το επίστρωμα που προστατεύει τη χαλύβδινη κατασκευή από τη γενική διάβρωση ευνοεί τη διάβρωση με βελονισμούς, η οποία ξεκινά σε εγγενείς ατέλειες του επιστρώματος ή σε ζημιές προκληθείσες κατά τη λειτουργία του πλοίου, όπως κτυπήματα και ειδορές από μηχανολογικό εξοπλισμό φορτοειφόρτωσης. Στο σχήμα που έπεται διακρίνουμε το μηχανισμό εξέλιξής της.

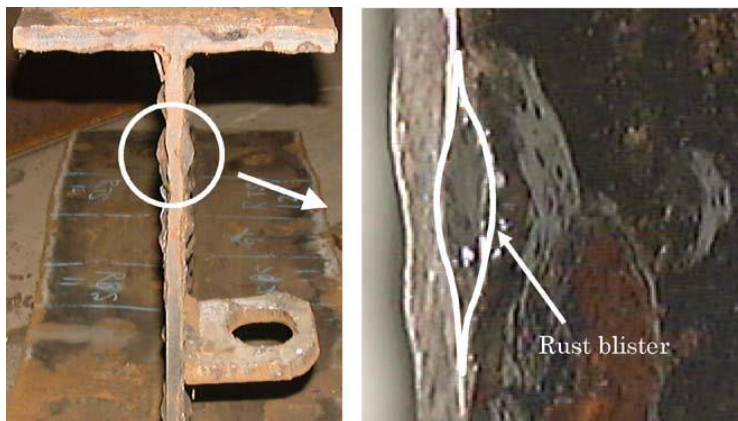


Σχήμα 23: Μηχανισμός εξέλιξης διάβρωσης με βελονισμούς ^[45]



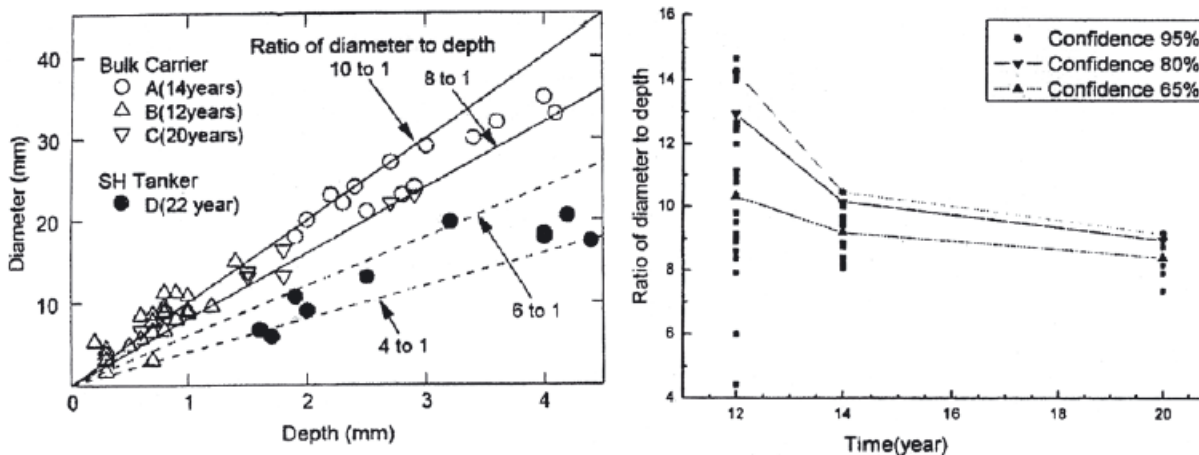
Εικόνα 13: Διάβρωση με βελονισμούς στους νομείς του κύτους φορτηγού πλοίου ηλικίας 14 ετών α) Άνω τμήμα β) Μεσαίο τμήμα γ) Κάτω τμήμα, κατόπιν αμμοβολής ^[46]

Η διάδοση των βελονισμών καταλήγει σε πλατιούς και ρηχούς βελονισμούς, π.χ πλάτους 50 mm και βάθους 2-3 mm, με σχετικά επίπεδο πυθμένα. Αρκετοί βελονισμοί αυξάνουν σε διάμετρο και συνενώνονται με παρακείμενους βελονισμούς. Πιθανή εξήγηση για την επιβράδυνση της αύξησής τους στην κατεύθυνση του βάθους είναι η εναπόθεση στερεών αλάτων στον πυθμένα τους. Σε αναερόβιες συνθήκες, ως είδαμε στο 3^ο κεφάλαιο, τα βακτηρία αναγωγής θείου (SRB) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για τη διάβρωση με βελονισμούς σε αναερόβιες συνθήκες οι οποίες επικρατούν μετά την εμφάνιση χάλυβα σε θαλάσσιο νερό για 1,5 – 2 χρόνια, συνθήκες οι οποίες συμβαίνουν πολύ νωρίτερα στον πυθμένα των δεξαμενών καυσίμου όπως θα δούμε παρακάτω.



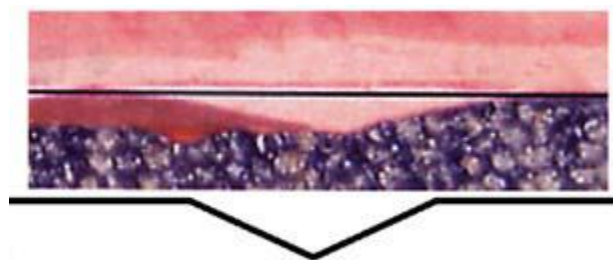
Εικόνα 14: Βελονισμός και φλύκταινα σκουριάς ^[46]

Αναφορικά με το σχήμα των βελονισμών αυτό είναι συνήθως σφαιρικής ή ημισφαιρικής μορφής, συχνά όμως σε κύπη φορτίου φορητών πλοίων που μεταφέρουν αποκλειστικά άνθρακα ή σιδηρομετάλλευμα, οι βελονισμοί εμφανίζουν κωνική μορφή και παρατηρούμε ενδεικτική άποψη τομής στην εικόνα που ακολουθεί. Θεωρείται ότι η μηχανική ζημιά στα επιστρώματα συμβαίνει σε πολύ μικρά σημεία λόγω εκδορών από το φορτίο που προκαλούν τοπική έναρξη διάβρωσης και το συνεπακόλουθο σχηματισμό των βελονισμών. Με την αύξηση του αριθμού των βελονισμών αυτοί συνενώνονται και επικαλύπτουν ο ένας τον άλλο. Επειδή εκκινούν ακριβώς πάνω στη μεταλλική επιφάνεια, παρουσιάζουν χαμηλότερους λόγους διαστάσεων (βάθος προς διάμετρο), περίπου 0,1 – 0,125 σε αντίθεση με τους σφαιρικούς βελονισμούς (κυρίως σε δεξαμενόπλοια) που κυμαίνονται μεταξύ 0,167 – 0,25.



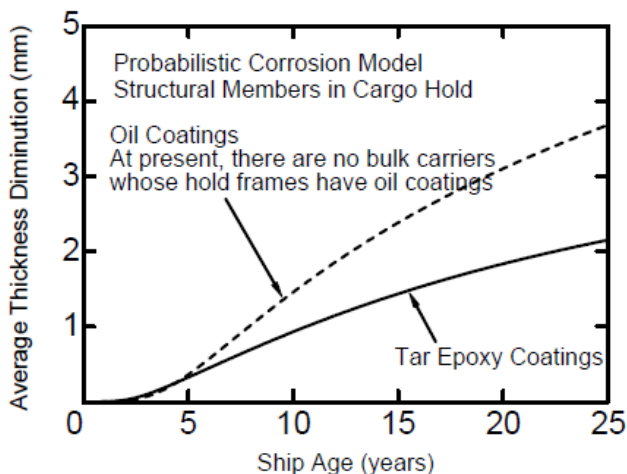
Διάγραμμα 30: Σχήμα βελονισμού και εξέλιξη του σε διάφορα είδη πλοίων (ο λόγος διαμέτρου-βάθους είναι ο αντίστροφος του λόγου διαστάσεων που αναφέρονται στο κείμενο) ^[46]

Σε αρχικά στάδια έκθεσης, ο λόγος διαστάσεων είναι συχνά χαμηλότερος του 0,1. Αυτό είναι εμφανές για βελονισμούς που σε φορητά πλοία 20 ετών είναι μικρότεροι αντίστοιχων σε φορητά πλοία 14 ετών, ως φαίνεται στο άνωθεν διάγραμμα. Αυτό αποδίδεται ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της γενικής διάβρωσης και της επικάλυψης μεμονωμένων βελονισμών.



Εικόνα 15: Άποψη τομής βελονισμού σε νομέα κύτους φορτίου bulk carrier ^[46]

Η χρήση εποξειδικών επιστρωμάτων είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος περιορισμού των επιπτώσεων της διάβρωσης για τα στοιχεία της κατασκευής φορητών πλοίων, όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 31: Ελάττωση πάχους στοιχείων κατασκευής με διαφορετικούς τύπους επιστρωμάτων για bulk carriers >50.000 DWT ^[45]

5.4 Διάβρωση Κόπωσης ^{[2], [12], [41], [47], [48]}

Η ρωγμάτωση λόγω διάβρωσης κόπωσης σε ένα πλοίο επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις, από αυξημένο κόστος επιθεωρήσεων και επισκευών, πρόκληση περιβαλλοντικής ρύπανσης μέχρι και καταστροφική αστοχία και ολική απώλεια. Στις θαλάσσιες κατασκευές οι δύο (2) τύποι κόπωσης που ενδιαφέρουν πρωτίστως είναι η κόπωση υψηλής συχνότητας – χαμηλών τάσεων (high-cycle, low-stress fatigue) και η κόπωση χαμηλής συχνότητας – υψηλών τάσεων (low-cycle, high-stress fatigue).

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. 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 πλευριικές δεξαμενές
2. Οι άνω και κάτω συνδέσεις των πτυχωτών εγκαρσίων φρακτών
3. Γωνίες των στομιών κυτών, εκεί όπου συνδέονται με το κυρίως κατάστρωμα.

Οι περισσότεροι νηογνώμονες έχουν δικές τους διαδικασίες για την εκτίμηση της αντοχής των πλοίων σε κόπωση, τα τελευταία όμως χρόνια ο IACS έχει κάνει απόπειρες να τις εναρμονίσει σε ένα κοινό πλαίσιο. Καίτοι έχει σημειωθεί πρόοδος, τα σημαντικά θέματα όπως ο καθορισμός των φορτίων

κόπωσης, η προσέγγιση τάσεων, η επιλογή καμπύλης $S - N$ και οι διορθωτικές παράμετροι ακόμα ποικίλλουν ανάλογα με το νηογνώμονα.

Θα εξεταστεί η απλοποιημένη διαδικασία της εκτίμησης κόπωσης για κατασκευαστικές λεπτομέρειες του πλοίου. Ο όρος «απλοποιημένη» αποδίδεται στην προσέγγιση της μακροπρόθεσμης κατανομής των εύρων τάσεων με τη διπαραμετρική κατανομή Weibull. Τα τέσσερα (4) κύρια βήματα της διαδικασίας είναι κοινά για όλους τους νηογνώμονες και είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός των φορτίων κόπωσης
- Υπολογισμός της μακροπρόθεσμης κατανομής του εύρους τάσεων
- Προσδιορισμός της αντοχής της κατασκευής σε κόπωση
- Εκτίμηση της ζημίας λόγω κόπωσης

5.4.1 Προσδιορισμός των φορτίων κόπωσης ^[47]

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).

Η ανάλυση της κόπωσης τελείται για αντιπροσωπευτικές συνθήκες φόρτωσης της προοριζόμενης λειτουργίας του πλοίου. Για ποντοπόρα πλοία δύο τουλάχιστον διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης εξετάζονται, η κατάσταση πλήρους φόρτωσης και η κατάσταση ερματισμού. Η μακροπρόθεσμη κατανομή των τάσεων πρέπει να αξιολογείται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνθήκες φόρτωσης αλλά και το χρόνο παρουσίας του πλοίου σε καθεμία από αυτές.

5.4.2 Υπολογισμός της μακροπρόθεσμης κατανομής του εύρους τάσεων ^[47]

Η διπαραμετρική κατανομή Weibull εκφράζεται από τη σχέση

$$F(S) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{S}{k} \right)^\xi \right]$$

Όπου k , ξ οι παράμετροι κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα.

Ορίζοντας ως S_R ως τη μέγιστη απόκριση εύρους τάσης προκληθείσης από κυματισμούς, για αριθμό κύκλων N_R (ήτοι η S_R έχει πιθανότητα υπέρβασης $1/N_R$), η παράμετρος κλίμακας ισούται με

$$k = \frac{S_R}{(\ln N_R)^{1/\xi}}$$

Η τιμή της παραμέτρου σχήματος 'ξ' κυμαίνεται ανάλογα με τη διαδικασία από 0,7 – 1,3 (IACS, 1997), συνήθως 0,7 – 1,0 για μεγάλα δεξαμενόπλοια και φορτηγά και 1,0 – 1,3 για ταχύτερα πλοία όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και σαν μια πρώτη προσέγγιση λαμβάνεται η

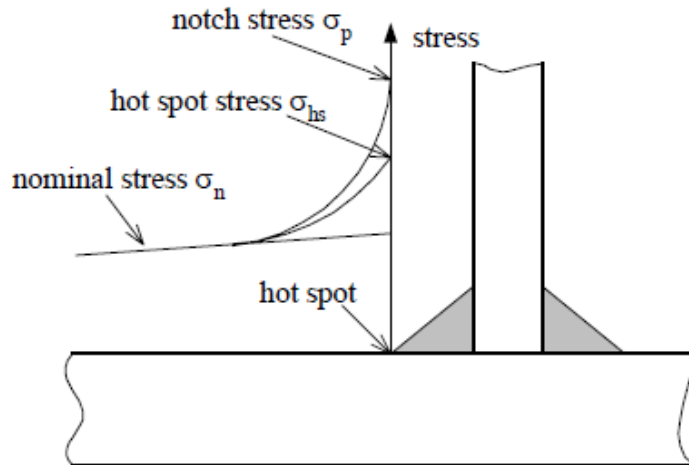
$$\xi = 1,1 - 0,35 \frac{L - 100}{300}$$

Όπου L το μήκος του πλοίου σε μέτρα.

Οι διαδικασίες εκτίμησης της κόπωσης για τα δομικά στοιχεία του πλοίου ταξινομούνται στις κάτωθι ομάδες:

- Προσέγγιση ονομαστικής τάσης (nominal stress approach)
- Προσέγγιση τάσης 'θερμού' σημείου (hot-spot stress approach)
- Προσέγγιση τάσης εγχοπής (notch stress approach)

Η ονομαστική τάση προκύπτει από τη θεωρία δοκού ή μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με βάση τις εφαρμοζόμενες φορτίσεις και τις διαστάσεις του στοιχείου, αύξηση δε των τάσεων λόγω γεωμετρικών ασυνεχειών ή παρουσίας συγκολλήσεων δεν λαμβάνεται υπ' όψιν. Η τάση θερμού σημείου ορίζεται ως η τοπική τάση στο κρίσιμο σημείο (hot spot) σε λεπτομέρεια της κατασκευής όπου μπορεί να ξεκινήσει ρωγμή κόπωσης και λαμβάνεται υπ' όψιν αύξηση των τάσεων λόγω γεωμετρικής μεταβολής όχι όμως και λόγω παρουσίας συγκολλήσεων. Η τάση εγχοπής ορίζεται ως η τοπικά αυξημένη τάση σε μια εγχοπή, πχ σε μια ραφή συγκόλλησης, και λαμβάνεται υπ' όψιν η παρουσία συγκολλήσεων. Σχηματικά παρίστανται κάτωθι:



Σχήμα 24: Είδη τάσεων ^[47]

Τα διαφορετικά είδη τάσεων συνδέονται μέσω των συντελεστών συγκέντρωσης τάσης,

$$\sigma_{hs} = K_g \cdot \sigma_n$$

$$\sigma_p = K_w \cdot K_g \cdot \sigma_n$$

Όπου K_g ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης λόγω γεωμετρίας της κατασκευής και K_w ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης λόγω επίδρασης της γεωμετρίας της συγκόλλησης.

5.4.3 Προσδιορισμός της αντοχής της κατασκευής σε κόπωση ^[47]

Η αντοχή σε κόπωση μιας συγκόλλησης που υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση σταθερού πλάτους εκφράζεται με όρους μιας καμπύλης S-N, η οποία δίνει τη σχέση ανάμεσα σε ονομαστικές τάσεις S σταθερού εύρους προς τον αριθμό των κύκλων N έως την αστοχία και μια απλουστευμένη μορφή είναι η:

$$S^m \cdot N = C$$

Όπου m και C σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό, τον τύπο της συγκόλλησης, τη γεωμετρική διάταξη και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο IACS προτείνει τη χρήση δύο ομάδων καμπυλών S-N, αυτές των HSE (Health and Safety Executive) και IIW (The International Institute of Welding), ενώ για χάλυβα ενίοτε χρησιμοποιείται και το βρετανικό πρότυπο BS5400. Ο HSE έχει οκτώ (8) καμπύλες που αλλάζουν κλίση στους 10^7 κύκλους και ο IIW έχει δεκατέσσερις (14) καμπύλες που εκπροσωπούν διάφορες συγκολλητές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, με την αλλαγή της κλίσης για κάθε καμπύλη στους 5×10^6 κύκλους. Η κατάλληλη καμπύλη S-N πρέπει να λαμβάνεται ανάλογα με την αντίστοιχη προσέγγιση τάσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η μετατροπή μιας βασικής καμπύλης S-N ανάλογα με την υπό μελέτη κατασκευή, οπότε και χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν, κατά τη διακριτική ευχέρεια του κάθε νηογνώμονα, παράγοντες όπως η διάβρωση, το πάχος των ελασμάτων, οι βελτιώσεις στις συγκολλήσεις, οι παραμένουσες τάσεις, οι μέσες τάσεις και η ποιότητα εργασίας.

5.4.4 Εκτίμηση της ζημίας λόγω κόπωσης ^[47]

Για τον υπολογισμό της ζημίας κόπωσης, όλοι οι νηογνώμονες έχουν υιοθετήσει τον κανόνα σωρευμένης βλάβης των Palmgren-Miner. Σύμφωνα με αυτόν, η αθροιστική βλάβη της κατασκευής μπορεί να εκφραστεί ως η σωρευμένη βλάβη από μεμονωμένους κύκλους φόρτισης σε διαφορετικές τιμές τάσης. Οι μεταβαλλόμενες τάσεις χωρίζονται σε k βήματα σταθερής τάσης και ίσου μήκους. Η σωρευμένη βλάβη D ισούται με:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

Όπου n_i ο αριθμός των κύκλων για εύρος τάσης ΔS_i και N_i ο αριθμός των κύκλων για αστοχία σε σταθερό εύρος τάσης ΔS_i . Σύμφωνα με τη σχέση των Palmgren-Miner και τη μακροπρόθεσμη κατανομή τάσεων Weibull ως είδαμε, η σωρευμένη βλάβη εκφράζεται ως:

$$D_i = \frac{a_i N_L}{C} \cdot \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)$$

Όπου:

α = παράγοντας που λαμβάνει υπ' όψιν τον απαιτούμενο χρόνο για φορτοεκφόρτωση, επισκευές κ.ά.

N_L = συνολικός αριθμός κύκλων στη διάρκεια ζωής της κατασκευής

$$\mu = \frac{1 - \gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu \right) - \nu^{-\Delta m/\xi} \gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)}$$

$$\nu = (S_q/S_R)^\xi \ln(N_R)$$

S_q το εύρος τάσης στη συμβολή δύο τμημάτων της καμπύλης S-N

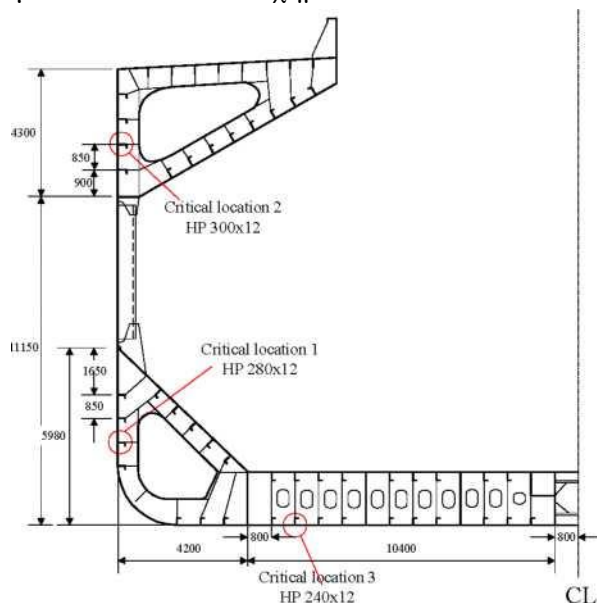
Δm η αλλαγή κλίσης από το άνω στο κάτω τμήμα της καμπύλης S-N
 $\gamma(a,x)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα, σε μορφή Legendre
 $\Gamma(a)$ η συνάρτηση Γάμμα.

Πίνακας 11: Σύνοψη διαδικασιών εκτίμησης κόπωσης των κυριότερων νηογνωμόνων ^[47]

Νηογνώμονας	Πιθανότητα υπέρβασης φορτίου	Προσέγγιση τάσης	Καμπύλες S-N
ABS	$2 \cdot 10^{-8}$	ονομαστική, θερμού σημείου	HSE
BV	10^{-5}	εγκοπής	HSE
CCS	-	θερμού σημείου	HSE
CRS	10^{-6}	ονομαστική, θερμού σημείου	ΠW
DNV	10^{-4}	εγκοπής	HSE (μετατροπή)
GL	10^{-6}	ονομαστική, θερμού σημείου	ΠW
LR	-	θερμού σημείου	HSE (μετατροπή)
NK	10^{-4}	ονομαστική, θερμού σημείου	BS
RINA	10^{-8}	ονομαστική, θερμού σημείου	ΠW
KR	10^{-4}	θερμού σημείου	HSE
RS	10^{-3}	ονομαστική, θερμού σημείου	-

5.4.5 Αριθμητικό παράδειγμα – Η επίδραση της διάβρωσης ^[47]

Οι Blagojević και Domazet επιτόνησαν τις διαδικασίες τριών νηογνωμόνων (BV, GL, LR) σε bulk carrier σε τρία κρίσιμα σημεία της κατασκευής, που αφορούν σε συνδέσεις διαμήκων με εγκάρσιων δομικών στοιχείων βάσει στατιστικών που δείχνουν ότι στα σημεία αυτά λαμβάνει χώρα το 40% των καταγεγραμμένων ρωγματώσεων από κόπωση. Τα σημεία είναι (1) στην κάτω πλευρική δεξαμενή, (2) στην άνω πλευρική δεξαμενή και (3) στο διπύθμενο. Η μέση τομή του πλοίου με τα κρίσιμα σημεία φαίνεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 25: Μέση τομή φορτηγού πλοίου ^[47]

Το φορτηγό πλοίο φέρει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά φορτηγού πλοίου ^[47]

Κύριες Διαστάσεις		Ιδιότητες Μέσης Τομής	
LOA	187,6 m	I _{zz}	383,364 m ⁴
LBP	179,37 m	I _{yy}	126,904 m ⁴
B	30,8 m	Ύψος ουδέτερου άξονα από πυθμένα	7,177 m
D	15,45 m		
T	10,10 m		
C _B	0,823		
V _S	14,5 kn		
Ισαπόσταση νομέων	0,8 m		

Το πλοίο θεωρείται ότι λειτουργεί σε δύο (2) καταστάσεις φόρτωσης, την πλήρους φορτίου και την ερματισμού:

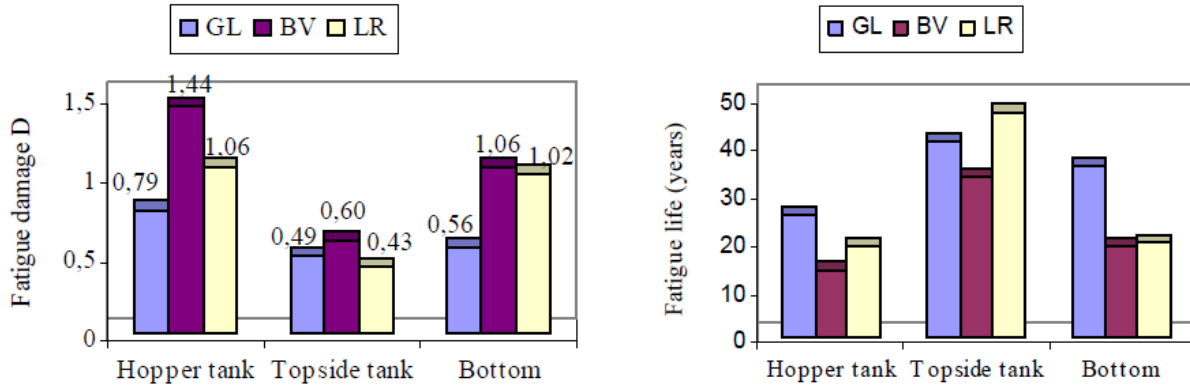
Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά καταστάσεων φόρτωσης ^[47]

	Κατάσταση πλήρους φόρτωσης	Κατάσταση ερματισμού
Μέγιστη καμπυλική ροπή σε ήρεμο νερό	61789 tm	94957 tm
GM	6,65 m	7,34 m
Εκτόπισμα	49772,6 t	26444,4 t
Πυκνότητα φορτίου	2,778 t/m ³	1,025 t/m ³
VCG	8,579 m	6,190 m
T _F	10,739 m	6,949 m
T _A	10,840 m	8,399 m
C _{WP}	0,899	0,870

Η παράμετρος α στη σχέση σωρευμένης βλάβης που είδαμε προηγουμένως παίρνει την τιμή $\alpha_1 = 0,6$ για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης και $\alpha_2 = 0,4$ για την κατάσταση ερματισμού σύμφωνα με τις προτεινόμενες τιμές του IACS για bulk carriers. Η παράμετρος σχήματος ξ της κατανομής Weibull ελήφθη ίση με 1,0. Ειδικά για τον BV, ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης εγκοπής υπολογίστηκε από την εξίσωση $K_w = 2 (\theta/30)^{0,5}$, όπου θ η μέση γωνία συμβολής συγκόλλησης με το μέταλλο βάσης, σε °. Η ζημία κόπωσης D υπολογίζεται από τη σχέση σωρευμένης βλάβης και σχετίζεται με την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής λόγω κόπωσης και τη διάρκεια ζωής σχεδίασης ως ακολούθως:

$$Zωή\ κόπωσης = \frac{Zωή\ σχεδίασης}{D}$$

Η ζημία λόγω κόπωσης και η διάρκεια ζωής της κατασκευής λόγω κόπωσης παρίσταται στα κάτωθι διαγράμματα:



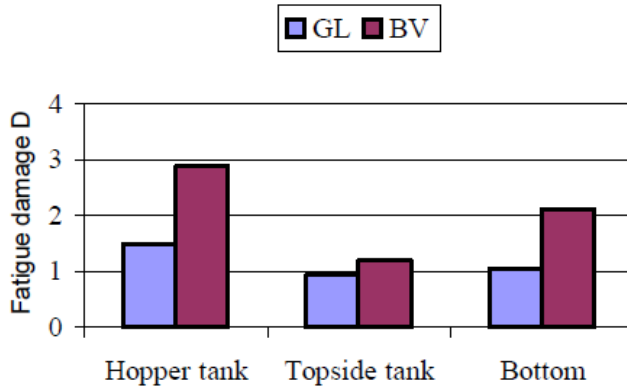
Διάγραμμα 32: Ζημία κόπωσης και υπολογισθείσα διάρκεια ζωής για τις τρεις τοποθεσίες της κατασκευής του πλοίου ^[47]

Παρατηρούμε ότι η σημαντικότερη ζημία λόγω κόπωσης παρατηρείται στην κάτω πλευρική δεξαμενή, λόγω της εξωτερικής πίεσης κυματισμών. Η αντίστοιχη περιοχή της άνω πλευρικής δεξαμενής υφίσταται μικρότερη ζημία λόγω της έλλειψης υδροδυναμικών πιέσεων κυματισμού και της αύξησης της ροπής αντίστασης του διαμήκου ενισχυτικού. Η ζημία είναι επίσης αρκετά υψηλή στον πυθμένα, για τις διαδικασίες των BV και LR, που αποδίδονται στη μείωση της ροπής αντίστασης και την αύξηση της καμπτικής ροπής λόγω κυματισμών. Οι διαφορές που παρατηρούνται στα άνωθεν διαγράμματα είναι σημαντικές και ιδίως στις περιοχές όπου ελήφθησαν υπ' όψιν τοπικές φορτίσεις, αλλά εάν παρατηρήσουμε μεμονωμένα τις διαδικασίες, διακρίνουμε συνέπεια στα αποτελέσματα (οι υψηλότερες ζημίες παρατηρούνται στην κάτω πλευρική δεξαμενή που εκτίθεται σε υψηλές τιμές πίεσης κυματισμών και οι χαμηλότερες στην άνω πλευρική δεξαμενή που στερείται πίεσης κυματισμών).

Αναφορικά με την επίδραση της **διάβρωσης**, που ενδιαφέρει ιδιαίτερος στα πλαίσια της τρέχουσας ειθέσεως, αυτή λαμβάνεται υπ' όψιν από τους BV και GL. Ο BV διαιρεί δια του 2 το συντελεστή C της καμπύλης S-N και θεωρείται ότι η κλίση $N = 0,5 \cdot 10^6$ δεν αλλάζει. Ο GL πολλαπλασιάζει τις τιμές αναφοράς της αντοχής σε κόπωση $\Delta\sigma_R$ με 0,8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο κάτωθι διάγραμμα, όπου παρατηρούμε ότι ναί μεν παραμένουν σημαντικές οι διαφορές της υπολογισθείσας ζημίας κόπωσης αλλά η επίδραση της διάβρωσης εμφανίζει ιδιαίτερος εναρμονισμένη συμπεριφορά καθώς χονδρικά διπλασιάζει τη ζημία κόπωσης στις διαφορετικές προσεγγίσεις των νηογνωμόνων.

Πίνακας 14: Ζημία λόγω κόπωσης σε διαβρωτικό περιβαλλον ^[47]

	GL	BV
Κάτω πλευρική δεξαμενή	1,492	2,874
Άνω πλευρική δεξαμενή	0,933	1,194
Διπύθμενα	1,060	2,120



Διάγραμμα 33: Η επίδραση της διάβρωσης ^[47]

Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην κόπωση ^[12]

Εάν παρίστανται βελονισμοί στην επιφάνεια του μετάλλου, σχεδόν πάντα είναι πιθανές περιοχές για την εκκίνηση ρωγμών κόπωσης. Η περίοδος του σχηματισμού των βελονισμών είναι μέρος της συνολικής ζωής σε διάβρωση κόπωσης μιας κατασκευής εκτεθειμένης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η συνολική διάρκεια ζωής υπολογίζεται ως το άθροισμα της διάρκειας των κάτωθι φάσεων ^[12]:

$$t_f = t_{pn} + t_{pg} + t_{sc} + t_{lc}$$

Όπου:

- t_{pn} ο χρόνος της πυρηνοποίησης του βελονισμού
- t_{pg} ο χρόνος της ανάπτυξης του βελονισμού
- t_{sc} ο χρόνος της ανάπτυξης βραχείας ρωγμής
- t_{lc} ο χρόνος της ανάπτυξης μακράς ρωγμής

5.5 Γάστρα και κύριο κατάστρωμα ^[30]

Το πλευρικό έλασμα της γάστρας ενός φορτηγού πλοίου υπόκειται σε τρία (3) διαφορετικά περιβάλλοντα.

Το **άνω τμήμα** υφίσταται τη δράση του επιθετικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος που έχει υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, οξυγόνου και άλλων διαβρωτικών στοιχείων, ενώ επιπροσθέτως δέχεται και την πρόσπτωση νέφωσης θαλασσίου ύδατος προκληθείσης 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, όπως είδαμε στο κεφ. 3.

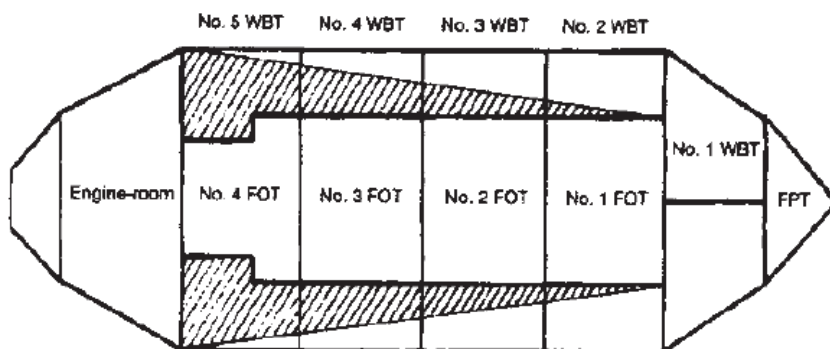
Το **κάτω τμήμα** του πλευρικού ελάσματος της γάστρας του πλοίου είναι πλήρως βυθισμένο στο θαλάσσιο ύδωρ. Οι ιδιότητες του νερού όπως η αλατότητα, η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, το pH και η χημική σύσταση ποικίλλουν ανάλογα με τη θέση και το βάθος του νερού (βλ. κεφ. 3). Η διάβρωση, επομένως, στο τμήμα αυτό του πλοίου επηρεάζεται από τις ιδιότητες αυτές, ενώ και η ροή του νερού οδηγεί σε επιτάχυνσή της.

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.

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.

5.6 Δεξαμενές καυσίμων ^{[49] – [52]}

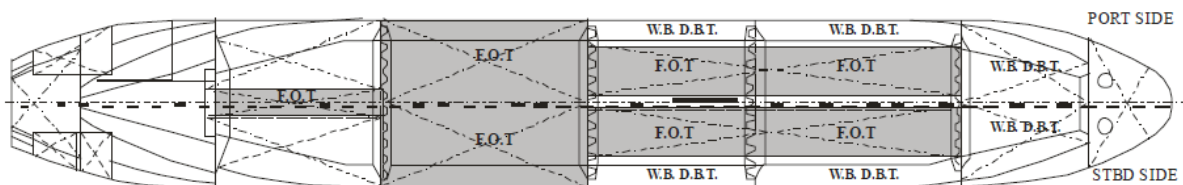
Από τα τέλη της δεκαετίας του '70, παρατηρήθηκαν προβλήματα που αφορούν σε έντονη διάβρωση στις δεξαμενές διπυθμένων που γειτνιάζουν με δεξαμενές καυσίμων.



Σχήμα 26: Περιοχές που υφίστανται έντονη διάβρωση λόγω της επίδρασης της θερμότητας ^[50]

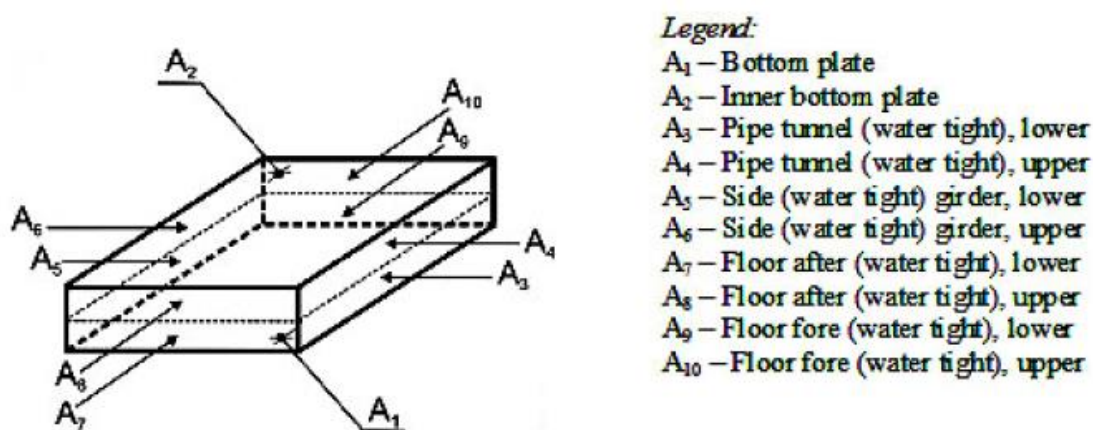
Για τη στατιστική ανάλυση της διάβρωσης σε δεξαμενές καυσίμων γίνεται χρήση δεδομένων παχυμετρήσεων από την εταιρία INVAR-Ivosevic, εκ Μαυροβουνίου. Το δείγμα είναι δέκα (10) bulk

carriers ηλικίας τουλάχιστον 25 ετών με χωρητικότητα έως 50.000 GT. Γενικά στα bulk carriers η θέση των δεξαμενών καυσίμων εντοπίζεται στο μηχανοστάσιο, στις δεξαμενές διπυθμένων και στις κάτω πλευρικές δεξαμενές, για την προκειμένη ανάλυση όμως ελήφθησαν υπ' όψιν μόνον οι δεξαμενές διπυθμένων, που διακρίνονται σκιασμένες στην κάτωθι κάτοψη:



Σχήμα 27: Τυπική διάταξη δεξαμενών καυσίμων στα διπύθμενα φορτηγών πλοίων ^[49]

Οι δεξαμενές καυσίμων αναλύθηκαν σε δέκα (10) διαφορετικές περιοχές, οι οποίες φαίνονται στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 28: Το βασικό δομικό σχήμα των επιφανειών (A₁-A₁₀) δεξαμενής καυσίμου φορτηγού πλοίου ^[49]

Τα αθροιστικά δεδομένα της γενικής διάβρωσης είναι εκφρασμένα σε ποσοστά (%) απωλειών του μέσου πάχους του χάλυβα, που συνήθως κυμαίνεται από 11 έως 16 mm και παρίστανται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 15: Απώλειες διάβρωσης ανά επιφάνεια A₁-A₁₀ ^[49]

Επιφάνεια	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	M.O.
%	1,96	16,68	1,14	0,99	5,25	11,81	10,79	16,98	12,26	16,21	9,40

Για να εκτιμηθεί η μακροπρόθεσμη διάβρωση των δεξαμενών καυσίμου κάνουμε πιθανοθεωρητική ανάλυση βασισμένη στην κατανομή Weibull, η οποία γενικώς ενδείκνυται για μικρό αριθμό δειγμάτων σε αντίθεση με άλλες στατιστικές κατανομές. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ποσοστού του ζημιωθέντος χάλυβα σε σχέση με το αρχικό πάχος θεωρείται ότι ακολουθεί τη γενική τρι-παραμετρική μορφή της κατανομής Weibull ^[49]:

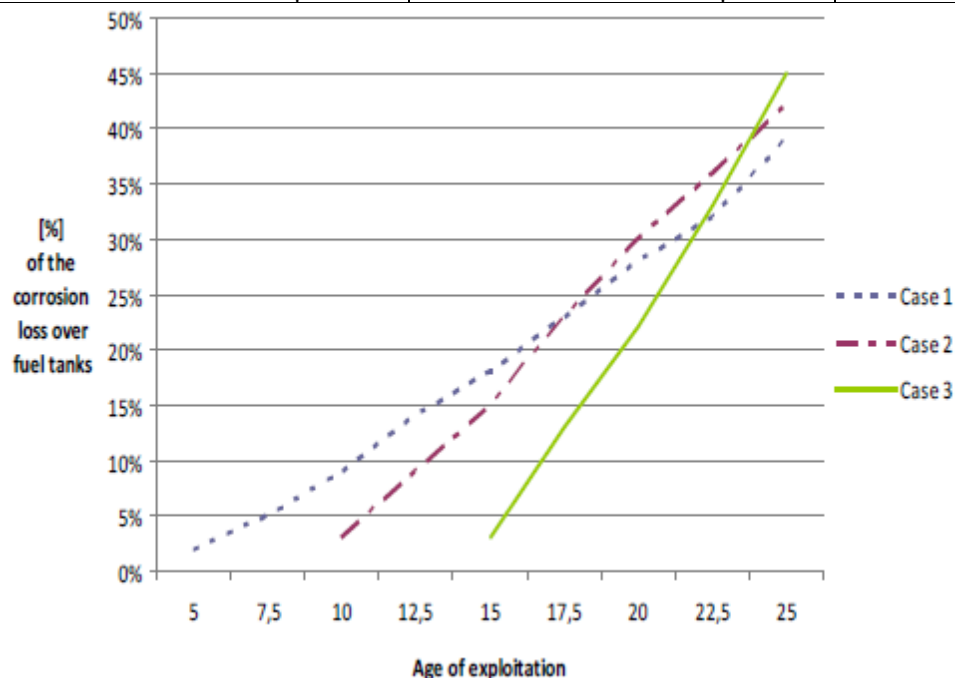
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

Όπου 'η' η παράμετρος κλίμακας, 'β' η παράμετρος σχήματος και 'γ' η παράμετρος θέσης.

Στο γράφημα της Weibull, ο οριζόντιος άξονας υποδηλώνει το χρόνο εκμετάλλευσης του συγκεκριμένου πλοίου και ο κάθετος άξονας το χρόνο ζωής του χάλυβα ή το ποσοστό του χάλυβα ου πρέπει να αντικατασταθεί σε δεδομένη χρονική στιγμή. Έγινε χρήση της μεθόδου της γραμμικής επιστροφής (linear regression), με την παραδοχή ότι η διαδικασία της διάβρωσης ξεκινά στο 5^ο (περίπτωση 1), το 10^ο (περίπτωση 2) και το 15^ο (περίπτωση 3) έτος της εκμετάλλευσης του πλοίου. Τα αποτελέσματα παρατίθεται αριθμητικά και γραφικά στον πίνακα και στο γράφημα που ακολουθούν, αντίστοιχα.

Πίνακας 16: Απώλειες λόγω διάβρωσης των δεξαμενών καυσίμου ως προς το χρόνο και παράμετροι κατανομής Weibull ^[49]

Περίπτωση 1 ^η		Περίπτωση 2 ^η		Περίπτωση 3 ^η	
Έτη	Απώλειες διάβρωσης	Έτη	Απώλειες διάβρωσης	Έτη	Απώλειες διάβρωσης
5	2%	10	3%	15	3%
7,5	5%	12,5	9%	17,5	13%
10	9%	15	15%	20	22%
12,5	14%	17,5	23%	22,5	33%
15	18%	20	30%	25	45%
17,5	23%	22,5	36%		
20	28%	25	42%		
22,5	32%				
25	39%				
$\beta=1,939$		$\beta=3,049$		$\beta=5,596$	
$\eta=35,177$		$\eta=28,640$		$\eta=26,463$	



Διάγραμμα 34: Απώλειες διάβρωσης των δεξαμενών καυσίμου των προκειμένων φορτηγών πλοίων ^[49]

Οι καμπύλες του άνωθεν διαγράμματος υποδηλώνουν μικρή αύξηση των απωλειών διάβρωσης όταν η διάβρωση ξεκινά (ή δηλώνεται) αργότερα, όπως στην 3^η περίπτωση. Ακόμη, η καμπύλη στην 3^η περίπτωση είναι πιο απότομη, που δείχνει πιο έντονη διαδικασία διάβρωσης.

Βακτηριακή διάβρωση

Σε στάσιμα ύδατα που περιέχουν οργανικό υλικό (όπως το πετρέλαιο) και ιδίως σε ζεστές θερμοκρασίες η παρουσία μικροβίων μπορεί να είναι έντονη. Αυτό το σενάριο συναντάται συχνά σε δεξαμενές καυσίμων με συσσώρευση υδάτων στον πυθμένα τους. Στην § 1.7.16 έγινε αναφορά στους μηχανισμούς της μικροβιολογικής διάβρωσης. Συνοψίζοντας τα κύρια σημεία τους:

- 1) Το διαλυμένο οξυγόνο στο νερό καταναλίσκεται από αερόβια βακτήρια, διαδικασία που παράγει ηπίως όξινες οργανικές χημικές ουσίες οι οποίες μπορεί να επιταχύνουν την ηλεκτρολυτική διάβρωση. Η περιοχή κοντά στην ανάπτυξη μικροβίων γίνεται ελλειμματική σε οξυγόνο και ανοδική.
- 2) Σε κάποιες περιπτώσεις οι συνθήκες ευνοούν τη διάδοση αναερόβιων βακτηρίων που τρέφονται με τα όξινα αυτά χημικά, με κύριο εκπρόσωπο τα βακτήρια αναγωγής θειικών ενώσεων (Sulphate Reducing Bacteria – SRB). Χαρακτηριστική ιδιότητα των τελευταίων είναι ότι ανάγουν το SO_4^{2-} σε σουλφίδια (S^{2-}) ενώ σαν άλλο προϊόν της δράσης των SRB είναι και το αέριο υδροθείο (H_2S). Το υδροθείο είναι υψηλά τοξικό και εύφλεκτο, έχει χαρακτηριστική οσμή σήψης και επιταχύνει την ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου.
- 3) Ισχυρά οξέα όπως το θειικό οξύ παράγονται από τα σουλφίδια λόγω βακτηρίων οξείδωσης του θείου όταν το οξυγόνο ξαναγίνεται διαθέσιμο και τα οξέα αυτά επιταχύνουν περαιτέρω τη διαρκή διαδικασία της διάβρωσης.

Η συνήθης εμφάνιση της βακτηριακής διάβρωσης είναι:

- Συστάδες βελονισμών διαμέτρου ορισμένων εκατοστών εμφανίζεται κάτω από οργανικές αποθέσεις, όπως σκουριά αναμεμιγμένη με κηλίδες πετρελαίου.
- Υψηλοί ρυθμοί διάβρωσης στις ανώτερες συστάδες
- Μελανό χρώμα του θειούχου σιδήρου εμφανίζεται κατά την απομάκρυνση των επικαλύψεων, το οποίο εξαφανίζεται ταχέως λόγω οξείδωσης.
- Ειδικά για δεξαμενές καυσίμου, παρατηρείται σχηματισμός «σκαλοπατιών» στις άκρες επίπεδων βελονισμών.

Στις δεξαμενές καυσίμου, η διάβρωση θα λάβει χώρα σε υδατική φάση ή κατάλοιπα γλίτσας στον πυθμένα των, ελλείψει προστατευτικών επιστρωμάτων. Η βακτηριακή διάβρωση θα επιτείνει την υφιστάμενη διάβρωση με βελονισμούς.



Εικόνα 16: Αποικίες βακτηρίων στον πυθμένα δεξαμενής καυσίμου [51]

5.7 Δεξαμενές έρματος (Ballast Tanks) [52]

Οι δεξαμενές έρματος 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 προωρία 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 m^2 . Η χωρητικότητα σε έρμα ποικίλλει αναλόγως του μεγέθους του πλοίου και μπορεί να φτάσει τιμές έως τα 200.000 m^3 . Η εισροή του έρματος γίνεται μέσω αναρροφήσεων (sea chests), αντλιών ή βαρυτικής παροχής.

5.7.1 Μορφολογία της διάβρωσης δεξαμενών έρματος – διάβρωση εμβαπτίσεως και κλειστή ατμοσφαιρική διάβρωση [1], [32], [53]

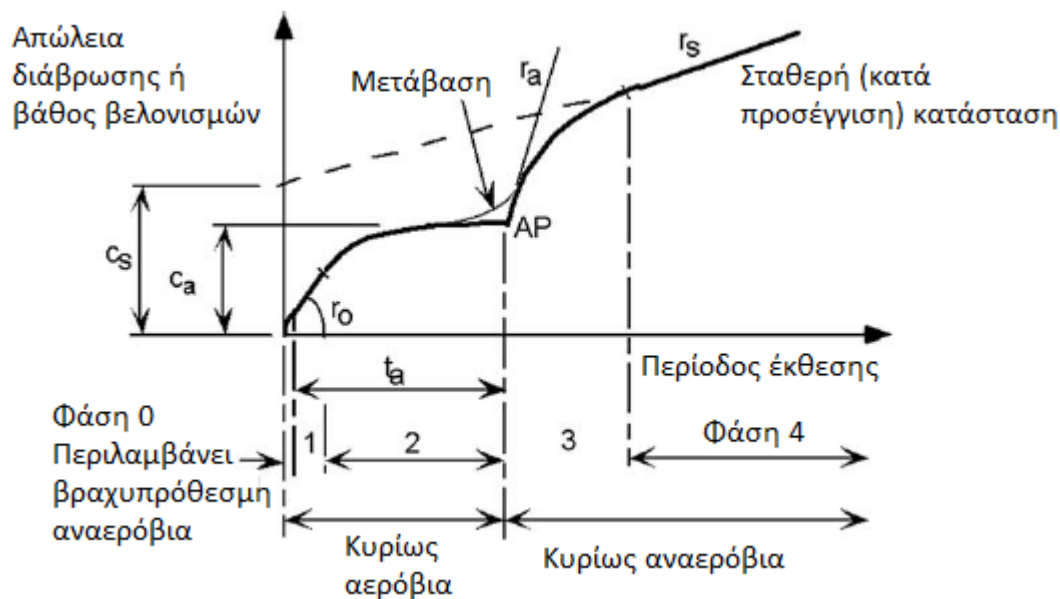
Στις δεξαμενές διπυθμένων παρατηρήθηκε τοπική ρήξη των επιστρωμάτων στην κάτω επιφάνεια του εσωτερικού πυθμένα. Οι οριζόντιες επιφάνειες του κάτω τμήματος συνήθως είναι καλυμμένες με λάσπη, ενώ οι υπόλοιπες επιφάνειες είναι υγρές εξαιτίας της υψηλής υγρασίας.

Στις άνω πλευρικές δεξαμενές η διάβρωση εντοπίζεται κυρίως στα πέλατα των διαμήκων ενισχυτικών του καταστρώματος, στα άνω διαμήκη ενισχυτικά του πλευρικού ελάσματος και στις άκρες των ενισχυτικών νομών. Σημαντική φθορά των επιστρωμάτων παρατηρείται στις πρυμναίες άνω πλευρικές δεξαμενές καθώς και πολλή σκουριά, εν συγκρίσει με τις δεξαμενές διπυθμένων.

1. Σε αντίθεση με τις δεξαμενές διπυθμένων, οι άνω πλευρικές δεξαμενές δεν υπόκεινται σε ρήξη επιστρωμάτων εξαιτίας μηχανικών ζημιών κατά τη φορτοεκφόρτωση.
2. Η μέση θερμοκρασία στις άνω πλευρικές δεξαμενές είναι σημαντικά υψηλότερη από ότι στις δεξαμενές διπυθμένων. Στις άνω πλευρικές δεξαμενές η θερμοκρασία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα έξω από το πλοίο καθώς και τη συναγωγή θερμότητας με το κατάστρωμα το οποίο θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ στις δεξαμενές διπυθμένων η θερμοκρασία εξαρτάται από αυτή του θαλασσίου ύδατος.

Οι κύριες περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση για ερματισμένη δεξαμενή είναι η θερμοκρασία, η αλατότητα και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Για κενή δεξαμενή έρματος, οι κύριοι παράγοντες επιρροής είναι η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του παραμένοντος άλατος. Μιας και τόσο η θερμοκρασία όσο και η σύσταση του θαλασσίου ύδατος είναι συναρτήσεις της διαδρομής ενός πλοίου, είναι εμφανές ότι η τελευταία συνιστά σημαντικό παράγοντα για τη διάβρωση των δεξαμενών έρματος ως θα δούμε και στη συνέχεια.

Η **διάβρωση εμβαπτίσεως** λαμβάνει χώρα όταν οι δεξαμενές είναι πλήρως ερματισμένες. Υποθέτοντας υψηλό βαθμό απώλειας της προστασίας επιστρωμάτων, η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να παρασταθεί από το φαινομενολογικό μοντέλο θαλάσσιας εμβάπτισης του Melchers που παρίσταται στο κάτωθι διάγραμμα.



Διάγραμμα 35: Μοντέλο διάβρωσης εμβαπτίσεως σε θαλάσσιο ύδωρ, για κοινούς χάλυβες ^[53]

Το μοντέλο αυτό αποτελείται από πέντε (5) φάσεις, που περιγράφουν το φαινόμενο της εξέλιξης της διάβρωσης. Η Φάση 0 συνίσταται από εξαιρετικά βραχυπρόθεσμες κινητικές και βακτηριακές επιδράσεις και πρακτικά αμελείται. Η Φάση 1 αντιπροσωπεύει την κατάσταση όπου ο ρυθμός της διάβρωσης ελέγχεται από την επίδραση οξυγόνου από το θαλάσσιο ύδωρ και μπορεί να μοντελοποιηθεί στενά ως ευθεία γραμμή (σταθερός ρυθμός διάβρωσης). Η Φάση 2 είναι μη γραμμική και εξαρτάται από το ρυθμό διάχυσης οξυγόνου μέσω των στρωμάτων σκουριάς (που αυξάνουν σε πάχος), με την

παραδοχή ότι έχουν ομοιόμορφες ιδιότητες διάχυσης. Η μετάβαση από τη Φάση 1 στη Φάση 2 είναι ομαλή και η Φάση 2 συνεχίζεται ως το σημείο AP, όποτε και ανανερόβιες συνθήκες αρχίζουν να επικρατούν κάτω από τα στρώματα σκουριάς και ξεινά η Φάση 3. Η φάση αυτή σχετίζεται με τη μεταβολική δραστηριότητα των SRB, η οποία είναι υψηλή στην αρχή λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας θρεπτικών συστατικών και εν συνεχεία υποχωρεί καθώς ο ρυθμός διάβρωσης επιβραδύνεται (Φάση 4) και μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμική συνάρτηση του χρόνου.

Το πιθανοθεωρητικό μοντέλο έχει προταθεί για μέση τιμή της συνάρτησης απώλειας διάβρωσης δοθείσα από $f(t, T)$ ως συνάρτηση του χρόνου (t) και της θερμοκρασίας (T). Περιγράφεται μαθηματικά ως ακολούθως ^[53]:

$$f(t, T) = \begin{cases} r_0 = 0.0539(2)^{0.1T} \text{ mm/έτος} & \text{Φάση 1} \\ [3(Et + F)]^{1/3} \text{ mm} & \text{Φάση 2} \\ r_a = 0.066 \exp(0.061T) \text{ mm/έτος} & \text{Φάση 3} \\ r_s = 0.045 \exp(0.061T) \text{ mm/έτος} & \text{Φάση 4} \end{cases}$$

Οι συντελεστές E και F είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας, ενώ το σημείο AP περιγράφεται από τις παραμέτρους c_a και t_a :

$$t_a = 6.61 \exp(-0.088T)$$

$$c_a = 0.32 \exp(-0.038T)$$

Η παράμετρος c_s ισούται με:

$$c_s = 0.075 + 5678 \cdot T^{-4}$$

Οι ανωτέρω σχέσεις προέκυψαν ταιριάζοντας δεδομένα μακροχρόνιας διάβρωσης στο μοντέλο.

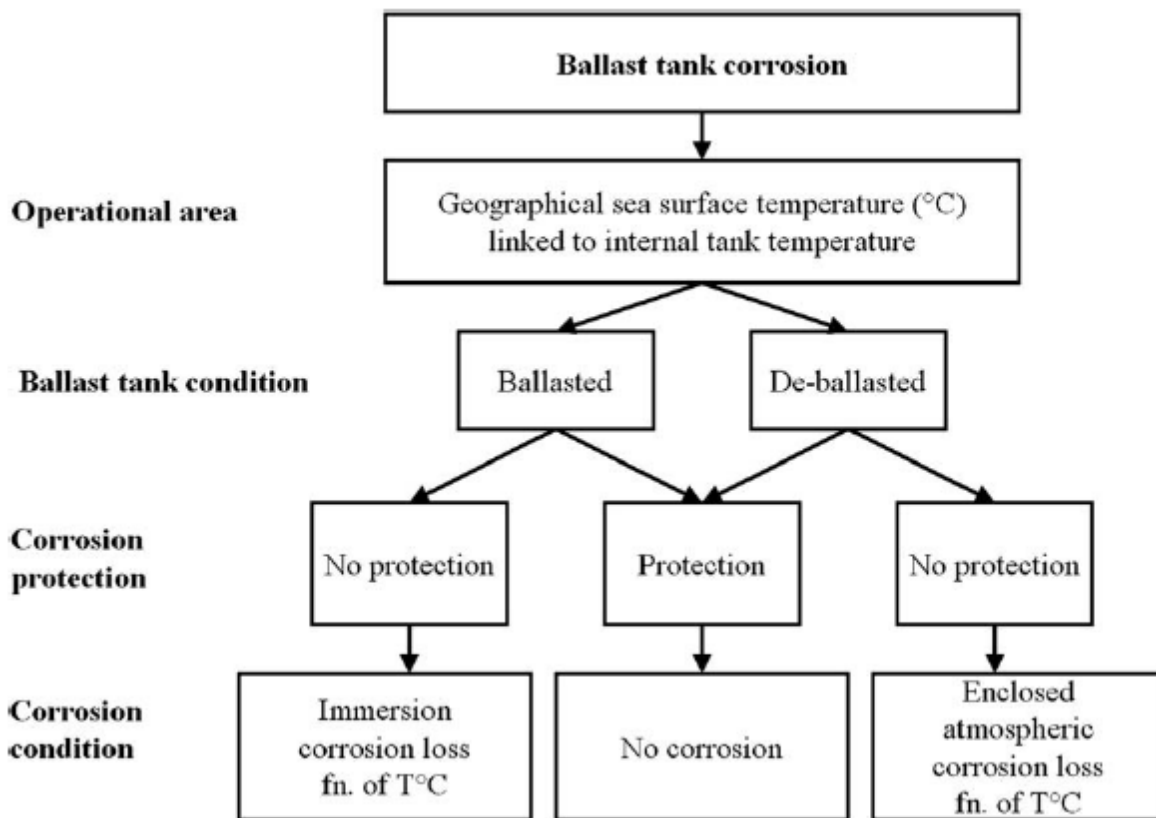
Για την **ατμοσφαιρική διάβρωση** εντός κενών δεξαμενών έρματος έχει υιοθετηθεί το μοντέλο των Gardiner και Melchers. Περιγράφει την απώλεια διάβρωσης του απροστάτευτου κοινού χάλυβα ως γραμμική συνάρτηση του χρόνου και δίδεται από τη σχέση:

$$\text{Απώλεια μάζας/ταξίδι} = WF \cdot VT \cdot (k_1 + k_2[\text{Αλάτι}] + k_3T)$$

Όπου η απώλεια μάζας σε mm, WF το κλάσμα του ποσοστού διαβροχής, VT ο χρόνος ταξιδιού (voyage time) σε έτη, [Αλάτι] η συγκέντρωση αλατιού σε ppm, T η θερμοκρασία σε °C και k_1, k_2, k_3 σταθερές.

Τα δύο ανωτέρω μοντέλα συνδυάζονται στο λειτουργικό μοντέλο διάβρωσης δεξαμενών έρματος. Οι λειτουργικές παράμετροι κλειδιά για το μοντέλο αυτό είναι (i) η γεωγραφική θαλάσσια περιοχή λειτουργίας του πλοίου και (ii) η κατάσταση ερματισμού. Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα ροής που τα συσχετίζει με την απώλεια διάβρωσης. Αρχικά ορίζεται η γεωγραφική περιοχή λειτουργίας του

πλοίου για να καθοριστεί η θερμοκρασία μέσω βάσης δεδομένων θερμοκρασιών επιφάνειας της θάλασσας (εν προκειμένω World Ocean Atlas 1998). Έπειτα, ανάλογα με την κατάσταση ερματισμού επιλέγεται είτε το μοντέλο της εμβαπτίσεως είτε αυτό της κλειστής ατμοσφαιρικής διάβρωσης για να υπολογισθεί η απώλεια διάβρωσης της δεξαμενής έρματος. Η γεωγραφική θαλάσσια περιοχή λειτουργίας του πλοίου σε συνδυασμό με το μήνα λειτουργίας του καθορίζει την πιθανή μέση θερμοκρασία που θα συναντήσει η δεξαμενή έρματος. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η εσωτερική θερμοκρασία της δεξαμενής είναι ίση με την εξωτερική θαλάσσια, καθώς οι δεξαμενές έρματος ευρίσκονται περί ή κάτω της ισάλου γραμμής, με μόνο ένα (υψηλά αγώγιμο θερμικά) χαλύβδινο έλασμα να τα διαχωρίζει. Η κατάσταση ερματισμού προέκυψε από την ανάλυση του ημερολογίου ερματισμού για τυπικά φορτηγά πλοία, για περίοδο 70 ημερών, από όπου προέκυψε ότι μια δεξαμενή είναι πλήρως ερματισμένη 25% του χρόνου λειτουργίας του πλοίου.



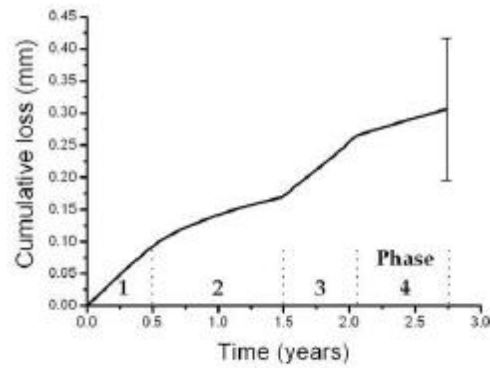
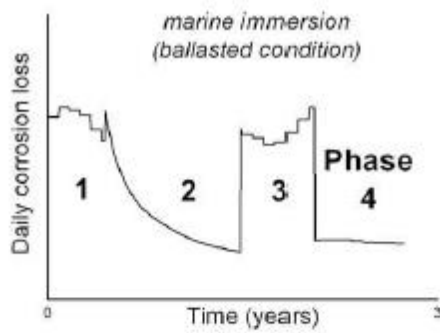
Διάγραμμα 36: Διάγραμμα ροής λειτουργικής εξομίωσης (βασισμένης στο μοντέλο των Gardiner και Melchers) ^[53]

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για αριθμητική εφαρμογή σε βάθος χρόνου τριών (3) ετών παρίστανται σχηματικά κάτωθι:

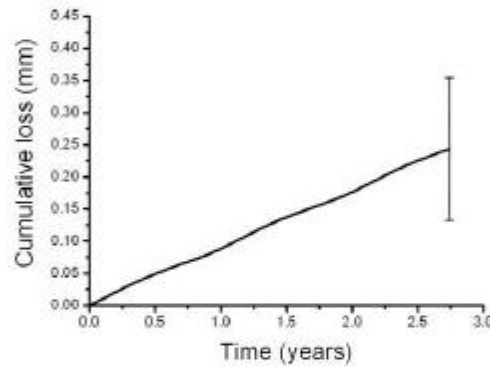
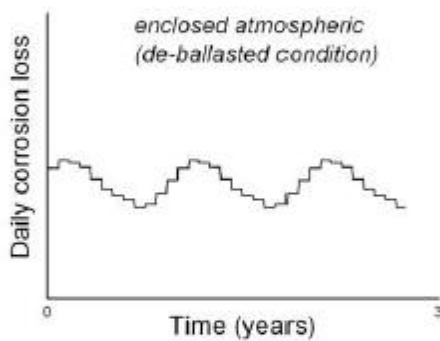
daily

cumulative

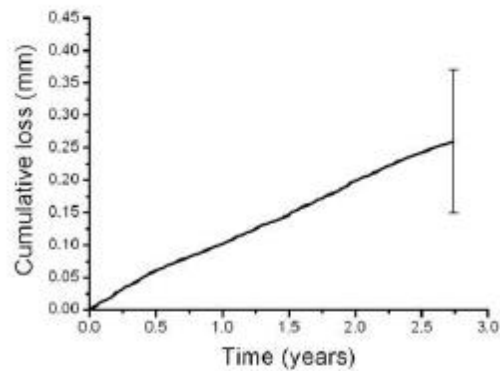
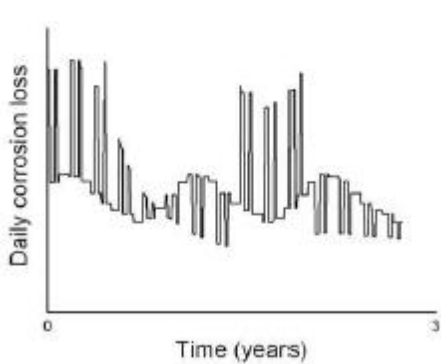
(i) 100% immersion corrosion (fully ballasted)



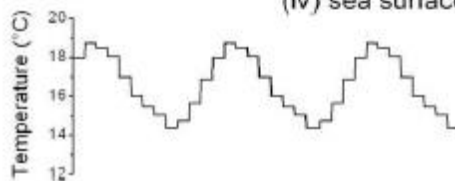
(ii) 100% enclosed atmospheric corrosion (de-ballasted)



(iii) mixture of immersion and atmospheric corrosion
(simulated ballast conditions)



(iv) sea surface temperature (SST) for period



Διάγραμμα 37: Τριετής πρόβλεψη ημερήσιας και σωρευμένης απώλειας διάβρωσης για α) 100% διάβρωση εμβάπτισης, β) 100% διάβρωση κλειστής ατμόσφαιρας και γ) συνδυασμού των ^[53]

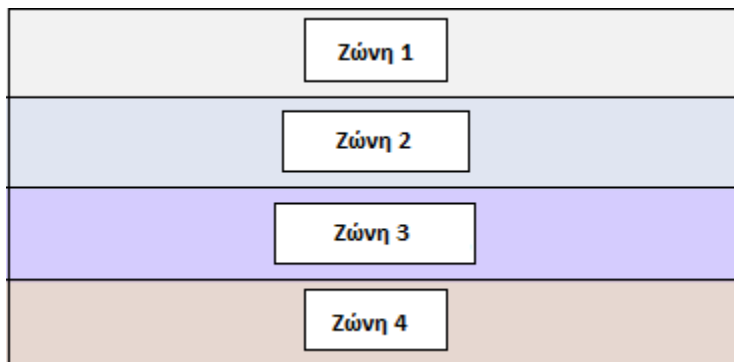
5.7.2 Μικροβιολογική διάβρωση (MIC) ^[54]

Ισχύουν και εδώ οι γενικές παρατηρήσεις της § 1.7.16 καθώς και οι μηχανισμοί της αμέσως προηγούμενης παραγράφου (δεξαμενές καυσίμου). Γενικά, στις δεξαμενές έρματος κυριαρχεί η κοινή, ηλεκτρολυτική διάβρωση. Όμως, περιορισμοί στο άδειασμα των ερμάτων καθώς και συσσώρευση ιζήματος μπορεί να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη βακτηρίων σε στάσιμα ύδατα με έλλειψη οξυγόνου. Η βακτηριακή διάβρωση που εμφανίζεται κάτω από λάσπη ή ακαθαρσίες στον πυθμένα και στην περίπτωση των δεξαμενών έρματος προστίθεται στην υφιστάμενη ηλεκτρολυτική διαδικασία, οδηγώντας σε αύξηση του συνολικού ρυθμού διάβρωσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακή διάβρωση είναι η *το είδος του νερού* (θαλασσινό ή υφάλμυρο), η *αλατότητά του* (0,3 – 3,5%), η *θερμοκρασία* (-2 – 28 °C), το *pH* (ουδέτερο, 7,5 – 8,3) και η *παρουσία θρεπτικών συστατικών* και σε μια δεξαμενή έρματος οι τιμές των παραγόντων αυτών ευνοούν τη βακτηριακή διάβρωση και τη δημιουργία βιοφίλμ.

Οι κλασσικοί μηχανισμοί της MIC είναι οι ακόλουθοι:

1. Μεταβολική παραγωγή επιθετικών ενώσεων.
2. Σχηματισμός κελιού συγκέντρωσης οξυγόνου
3. Επιτάχυνση των ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων λόγω του φαινομένου της αποπόλωσης
4. Ψαθυροποίηση λόγω υδρογόνου

Μια δεξαμενή έρματος χωρίζεται σε τέσσερις (4) ζώνες ενδιαφέροντος για τη διάβρωση. Αυτές είναι από πάνω προς τα κάτω: (1) Ζώνη αέρα, (2) Ζώνη ψειασμού, (3) Ζώνη βυθίσεως και (4) Ζώνη ιζήματος, και τις βλέπουμε στο κάτωθι σχήμα. Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο μειώνεται σταδιακά, από το 21% της ζώνης αέρα και σχεδόν μηδενίζεται στο ίζημα, κάτω από το βιοφίλμ. Ο δε ρυθμός διάβρωσης αυξάνει όσο κατεβαίνουμε, από 0,10 mm/y στη ζώνη αέρα στα 0,47 mm/y στη ζώνη ιζήματος. Η διαδικασία της διάβρωσης χαρακτηρίζεται από ταχύτατη απώλεια υλικού και τοπικό σχηματισμό βαθέων βελονισμών. Τα ευρήματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τις συνήθεις παρατηρήσεις της διάβρωσης σε θαλάσσιο ύδωρ όπου η ελάττωση της συγκέντρωσης οξυγόνου ελαττώνει το ρυθμό της διάβρωσης και καταδεικνύει τη σημασία της μικροβιολογικής διάβρωσης στις δεξαμενές έρματος. Βέβαια ο ακριβής ρυθμός πρόβλεψης της διάβρωσης σε μία δεξαμενή έρματος είναι δύσκολο να υπολογισθεί καθώς εξαρτάται και από παράγοντες όπως τα συστήματα προστασίας από τη διάβρωση (επιστρώματα, αναστολείς διάβρωσης και καθοδική προστασία) και οι λειτουργικοί παράγοντες (συντήρηση, επισκευή, λόγος έρματος = $\frac{\text{χρόνος με έρμα}}{\text{ηλικία πλοίου}}$, συχνότητα καθαρισμού δεξαμενών, ποιότητα νερού, θερμοκρασία νερού και συσσώρευση λάσπης).



Σχήμα 29: Ζώνες δεξαμενής έρματος (βάσει μοντέλου απαιτήσεων μικροβιολογικής διάβρωσης) ^[54]

Μέτρα αντιμετώπισης που προτείνονται είναι η χρήση επιστρωμάτων υψηλής ποιότητας, η εγκατάσταση θυσιαζόμενων ανόδων για περιορισμό της διάβρωσης με βελονισμούς καθώς και η διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερης καθαριότητας και αποφυγής συσσώρευσης γλίτσας και ακαθαρσιών.

5.7.3 Ο ρόλος των επιστρωμάτων και της καθοδικής προστασίας ^{[37], [94]}

Ένα καλό επίστρωμα εφαρμοσμένο επί σωστά προετοιμασμένης επιφάνειας κατά την κατασκευή του πλοίου είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αποφυγής της διάβρωσης. Η ζωή των επιστρωμάτων σε μια δεξαμενή έρματος ποικίλλει από λίγους μήνες έως και περισσότερα από 25 έτη, ανάλογα με την προετοιμασία της επιφάνειας και των ακμών καθώς και τις συνθήκες εφαρμογής. Συχνά χρησιμοποιούνται και θυσιαζόμενες άνοδοι σε συνδυασμό με το επίστρωμα. Εάν δεν είναι εγκατεστημένες θυσιαζόμενες άνοδοι, ο εκτεθειμένος χάλυβας, κατόπιν της ρήξης του επιστρώματος, θα διαβρωθεί τόσο όταν η δεξαμενή φέρει έρμα όσο και όταν είναι κενή. Οι θυσιαζόμενες άνοδοι βοηθούν στην υποστήριξη του επιστρώματος αλλά δεν το αντικαθιστούν, είναι δε αποτελεσματικές μόνο όταν η μεταλλική επιφάνεια είναι βυθισμένη στο νερό, οπότε δεν παρέχουν προστασία όταν η δεξαμενή έρματος είναι κενή, κατ' επέκτασιν είναι αποτελεσματικές μόνο στο 35% περίπου του χρόνου λειτουργίας ενός bulk carrier. Τα ανωτέρω παρίστανται σχηματικά και στο διάγραμμα ροής που επισυνάφθηκε προηγουμένως, όπου σαν προστασία από τη διάβρωση (corrosion protection) νοείται ο συνδυασμός επιστρωμάτων και καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες άνοδους.

Κάποιες περιοχές των δεξαμενών έρματος είναι πιο ευπαθείς σε διάβρωση από άλλες. Γενικά, οι περιοχές που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη δυσκολία επιστρώσεως (συγκολλήσεις, ακμές, κατασκευαστικές λεπτομέρειες με δύσκολη πρόσβαση) είναι και οι πρώτες που εκτίθενται στο διαβρωτικό θαλάσσιο έρμα εξαιτίας πρόωρης ρήξης του επιστρώματος. Σε αυτές τις ανοδικές περιοχές συμβαίνει επιταχυνόμενη διάβρωση λόγω γαλβανικής αλληλεπίδρασης με μεγάλες καθοδικές επιφάνειες με ανέπαφο το επίστρωμα. Τα τελευταία χρόνια δίδεται έμφαση σε υπολογιστικές διαδικασίες εκτίμησης του κόστους κύκλου ζωής (life cycle costs – LCC), οι οποίες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι (α) η εφαρμογή υψηλής ποιότητας επιστρώματος στις δεξαμενές έρματος κατά την ανέγερση του πλοίου είναι πιο οικονομοτεχνική λύση από την αντικατάσταση του χάλυβα σε αργότερο στάδιο, λόγω του κόστους του δεξαμενισμού και των διαφυγόντων ναύλων όσο το πλοίο είναι εκτός υπηρεσίας και (β) η εφαρμογή

αυξημένου περιθωρίου διάβρωσης είναι ασύμφορη εν συγκρίσει με τη βελτίωση της ποιότητας του επιστρώματος.

Σημαντικός παράγοντας για την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του επιστρώματος είναι η αύξηση της φαθυρότητας και η απώλεια της ευκαμψίας με την πάροδο του χρόνου, που συνεπάγεται πρόκληση ρωγματώσεων και απώλεια πρόσφυσης σε κρίσιμα σημεία της κατασκευής. Το επίστρωμα είναι επαρκώς εύκαμπτο όταν είναι προσφάτως εφαρμοσμένο και για μερικά χρόνια μετέπειτα. Εν συνεχεία, λόγω κυκλικών θερμοκρασιακών μεταβολών, τα πιο πτητικά και χαμηλού μοριακού βάρους συστατικά χάνονται από εξάτμιση ή εκπλένονται από το θαλάσσιο έρμα. Η σταδιακή απώλεια ευκαμψίας βοηθείται και από την οξειδωση και άλλες χημικές μεταβολές των συστατικών του επιστρώματος, καθώς και από το είδος και την ποιότητα των συστατικών του όπως το συνδετικό υλικό (συνήθως μια εποξειδική ρητίνη με σκληρυντικό παράγοντα), πληρωτές, πιγμέντα κ.ά.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες για επιστρώματα υψηλής αντοχής και ποιότητας, είναι οι ακόλουθοι:

- Κατάλληλη επιλογή συστήματος επιστρωμάτων.
- Σωστή προετοιμασία επιφάνειας και μέθοδος εφαρμογής επιστρώματος.
- Εύκολη πρόσβαση για επιθεώρηση και συντήρηση.
- Καλή απάντηση και αποφυγή θυλάκων και περιοχών όπου μπορεί να συμβεί συσσώρευση νερού και ακαθαρσιών.
- Αποφυγή αιχμηρών ακμών της κατασκευής.
- Αποτελεσματικό πρόγραμμα επιθεώρησης και συντήρησης.

Τα επιστρώματα που εφαρμόζονται από τα πληρώματα των πλοίων ή κατά τις επισκευές σε δεξαμενισμούς συνήθως έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από επιστρώματα στην αρχική κατασκευή του πλοίου. Αυτό αποδίδεται στο ότι συχνά δεν τηρούνται η σωστή προετοιμασία επιφάνειας και ο αυστηρός έλεγχος των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, που είναι απαραίτητες παράμετροι για την επίτευξη καλού αποτελέσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ ΚΥΤΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (CARGO HOLDS) ΤΩΝ BULK CARRIERS

6.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση στα φορηγά πλοία ^{[1],[32], [59]}

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση στα φορηγά πλοία φορτίου χύδην κατατάσσονται σε δύο (2) κατηγορίες, τις **παραμέτρους λειτουργίας** (operational parameters) και τις **σχεδιαστικές παραμέτρους** (internal parameters).

6.1.1 Παράμετροι λειτουργίας

Οι λειτουργικές παράμετροι είναι οι πέντε (5) ακόλουθες:

A) Λόγος φορτίου

Ο λόγος φορτίου καθορίζεται για κάθε φορτίο (αριθμού i) από τη σχέση:

$$\text{Λόγος Φορτίου} = \frac{\text{χρόνος με (τύπο φορτίου)}_i}{\text{ηλικία πλοίου}}$$

Το φορτίο γαιάνθρακα είναι διαβρωτικότερο από αυτό του σιδηρομεταλλεύματος, και επιπλέον έχει υψηλότερη περιεκτικότητα υγρασίας. Ακόμη, το ύψος της στάθμης φόρτωσης διαφέρει ανάλογα με το φορτίο και συνεπώς η αναλογία των ελασμάτων που διαβρώνονται από έκθεση είτε στην ατμόσφαιρα είτε στα πορώδη μέσα διαφέρει και αυτή με τη σειρά της. Επομένως, η συνολική εξέλιξη για δεδομένο πλοίο είναι συνάρτηση του σχετικού χρόνου που ένα πλοίο μεταφέρει φορτίο γαιάνθρακα και σιδηρομεταλλεύματος, κάτι που μπορεί να προσδιοριστεί από το λόγο φορτίου.

B) Λόγος έρματος

Ο λόγος έρματος ορίζεται ως:

$$\text{Λόγος έρματος} = \frac{\text{χρόνος με έρμα}}{\text{ηλικία πλοίου}}$$

Ο λόγος έρματος σχετίζεται και με το λόγο φορτίου με τη σχέση:

$$\text{Λόγος έρματος} = 1 - \sum_{i=1}^{i=n} (\text{λόγος φορτίου})_i$$

Όπου n ο αριθμός τύπων φορτίου

Σύμφωνα και με όσα είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διάβρωση των δεξαμενών έρματος αλλά και των κυτών φορτίου εξαρτάται από το χρόνο που το πλοίο τελεί στην κατάσταση ερματισμού. Ο λόγος έρματος ορίζει το συνολικό χρόνο που η κατώτερη περιοχή των κυτών φορτίου εκτίθενται σε συνθήκες κλειστής ατμόσφαιρας. Ορίζει, επίσης, μερικώς τις συνθήκες έκθεσης της άνω περιοχής των κυτών φορτίου, μιας και αυτές είναι εκτεθειμένες για φορτία σιδηρομεταλλεύματος. Ο συνολικός χρόνος έκθεσης των δεξαμενών έρματος σε θαλάσσιο ύδωρ καθορίζεται επίσης από το λόγο έρματος.

Γ) Είδος διαδρομής

Ο ρυθμός της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, ο δε ρυθμός της διάβρωσης των δεξαμενών έρματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της περιεκτικότητας του νερού σε διαλυμένο οξυγόνο. Οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλονται ανάλογα με τη διαδρομή του πλοίου.

Δ) Διαβρωτικότητα φορτίου

Η διαβρωτικότητα του φορτίου εξαρτάται από τις ιδιότητες και τα συστατικά αυτού. Τα σημαντικότερα συστατικά που ευνοούν τα διάβρωση είναι τα ιόντα χλωρίου (Cl^-) και τα θειικά ιόντα (SO_4^{2-}). Αναλυτικότερα η διαβρωτική ισχύς για τα διάφορα είδη φορτίου θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Ε) Συχνότητα αλλαγής φορτίου

Η αστοχία των επιστρωμάτων και η επακόλουθη διάβρωση της άνω επιφάνειας του εσωτερικού πυθμένα λαμβάνει συνήθως χώρα στα περιοχές όπου τα ελάσματα υφίστανται κτυπήματα, εκδορές και λυγισμό ως αποτέλεσμα της δράσης φορτοεκφορτωτικών μηχανημάτων. Η συχνότητα, λοιπόν, της αλλαγής του φορτίου επιτείνει την προκληθείσα μηχανική ζημία και κατ' επέκτασιν το ρυθμό της διάβρωσης.

6.1.2 Σχεδιαστικές παράμετροι

Πλοία που υπόκεινται στις ίδιες λειτουργικές παραμέτρους δύνανται να εμφανίσουν διαφορετικούς ρυθμούς διάβρωσης. Η διαφορά αυτή αποδίδεται σε σχεδιαστικές διαφορές μεταξύ των. Οι κυριότερες σχεδιαστικές παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

A) Σύστημα προστασίας από τη διάβρωση

Ο ρυθμός της διάβρωσης εξαρτάται από το σύστημα προστασίας (επιστρώματα και καθοδική προστασία), με ενδεικτικό το παράδειγμα των δεξαμενών έρματος ως αυτές μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στα bulk carriers επιστρώματα χρησιμοποιούνται στην εξωτερική πλευρά της γάστρας, στα καλύμματα στομίων κυτών, στις δεξαμενές έρματος και στην άνω περιοχή των κυτών φορτίου. Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους χρησιμοποιείται στην εξωτερική βρεχόμενη

επιφάνεια της γάστρας και συνήθως στις δεξαμενές έρματος, όπου όμως είναι αποτελεσματική μόνο κατά την κατάσταση ερματισμού. Άλλοι παράγοντες για την αποτελεσματικότητα των θυσιαζόμενων ανόδων είναι η τοποθεσία τους, ο αριθμός τους και η πυκνότητα του ρεύματος.

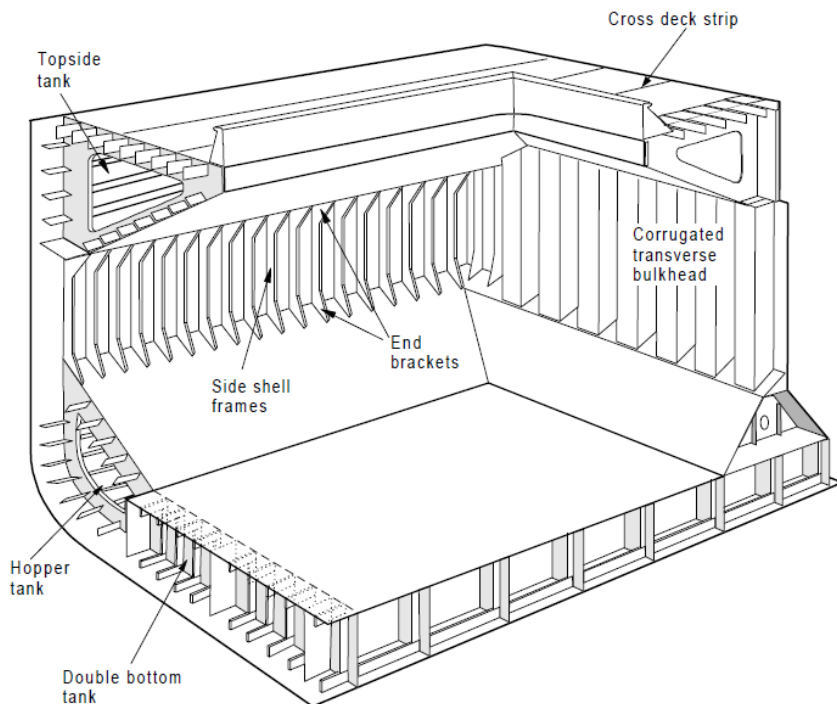
B) Θέση και προσανατολισμός βασικών στοιχείων της κατασκευής

Η θέση ενός δομικού στοιχείου της κατασκευής καθορίζει το βαθμό στον οποίο το στοιχείο αυτό εκτίθεται στα διάφορα είδη φορτίου ή στο έρμα, καθώς επίσης και στη μηχανική ζημία και τη φθορά που προκαλούνται κατά τη φορτοεκφόρτωση. Υψηλότερη διάβρωση παρατηρείται στα ελάσματα εσωτερικού πυθμένα και τα κεκλιμένα ελάσματα των άνω και κάτω πλευρικών δεξαμενών, στο πλευρικό έλασμα και τους νομείς αυτού, στα ελάσματα καταστρώματος και ζωστήρα καθώς και στα διαμήκη ενισχυτικά του καταστρώματος.

Ο προσανατολισμός του κατασκευαστικού στοιχείου πρέπει επίσης να ληφθεί υπ' όψιν, κυρίως λόγω της δυνατότητας σχηματισμού προστατευτικού στρώματος προϊόντων διάβρωσης. Ο προσανατολισμός ενός στοιχείου μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της προστασίας προϊόντων διάβρωσης εάν το υπόστρωμα εκτίθεται σε ανοικτή ατμόσφαιρα και, κατά συνέπεια, υφίσταται την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και των κατακρημνισμάτων. Για φορτηγά πλοία η διαφορά στα προϊόντα της διάβρωσης στον αγωγό της τρόπιδας και στις κάτω εδράσεις στα κύτη φορτίου είναι σημαντική.

Οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες είναι πολύ σημαντικές για να διαπιστωθεί εάν οι λειτουργικοί παράγοντες δύνανται να οδηγήσουν σε εκτεταμένη διάβρωση. Η γωνία ενός ενισχυτικού ή ενός ελάσματος επηρεάζει το χρόνο διαβροχής (πχ οριζόντια στοιχεία της κατασκευής συσσωρεύουν ύδατα και υφίστανται πιο εκτεταμένη διάβρωση έναντι κατακόρυφων στοιχείων), την έκπλυση διαβρωτικών αλάτων, την απόθεση κοκκώδους ύλης και την έκταση της φθοράς ή των κρουστικών δυνάμεων κατά τη φορτοεκφόρτωση φορτίου. Ακόμα, ο εξαερισμός ενός χώρου επηρεάζει την εξάτμιση της υγρασίας και κατ' επέκτασιν το χρόνο διαβροχής και την παροχή οξυγόνου σε μια επιφάνεια. Επίσης, η μονόπλευρη ή η αμφίπλευρη έκθεση ενός ελάσματος στο διαβρωτικό περιβάλλον συνιστά σημαντική παράμετρο.

6.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυτών φορτίου ^{[2], [55]}



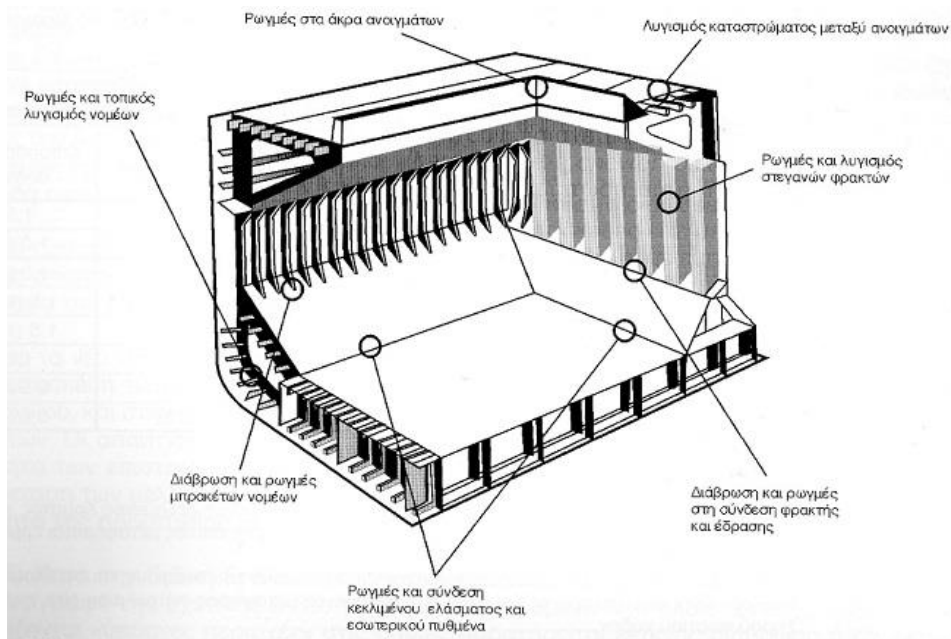
Σχήμα 30: Τυπική κατασκευαστική διάταξη Κύτους Φορτίου για Φορηγό Πλοίο μονού πλευρικού ελάσματος ^[55]

Στις τυπικές διατάξεις φορηγών πλοίων χύδην φορτίου, ως βλέπουμε στο άνωθεν σχήμα, οι άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές περικλείουν τον χώρο φορτίου και σε συνδυασμό με το διπύθμενο παρέχουν αντοχή και στιβαρότητα. Ανάμεσα στις άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές κείται το πλευρικό έλασμα, ενισχυμένο με εγκάρσιους νομείς. Σε πρόσφατες κατασκευές, οι νομείς και οι αγκώνες τους είναι λεπτότεροι του πλευρικού ελάσματος και δεν κατασκευάζονται με ενισχυμένους νομείς (web frames) και πλευρικούς λώρους (side stringers) όπως συμβαίνει με πλοία γενικού φορτίου. Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται ενδεικτικά πάχη ελασμάτων και νομέων εντός κυτών φορτίου.

	Εσωτερικός πυθμένας (mm)	Νομέας (mm)			Πλευρικό έλασμα (mm)
		Κορμός	Πέλμα	Αγκώνας	
Handy BC	15,0 (MS)	9,0 (MS)	12,0 (MS)	10,0 (MS)	12,5 (MS)
Panamax BC	17,0 (MS)	10,0 (36HT)	12,5 (36HT)	11,0 (36HT)	15,5 (32HT)
Capesize BC	18,5 (36HT)	10,0 (36HT)	17,0 (36HT)	12,0 (36HT)	17,5 (32HT)

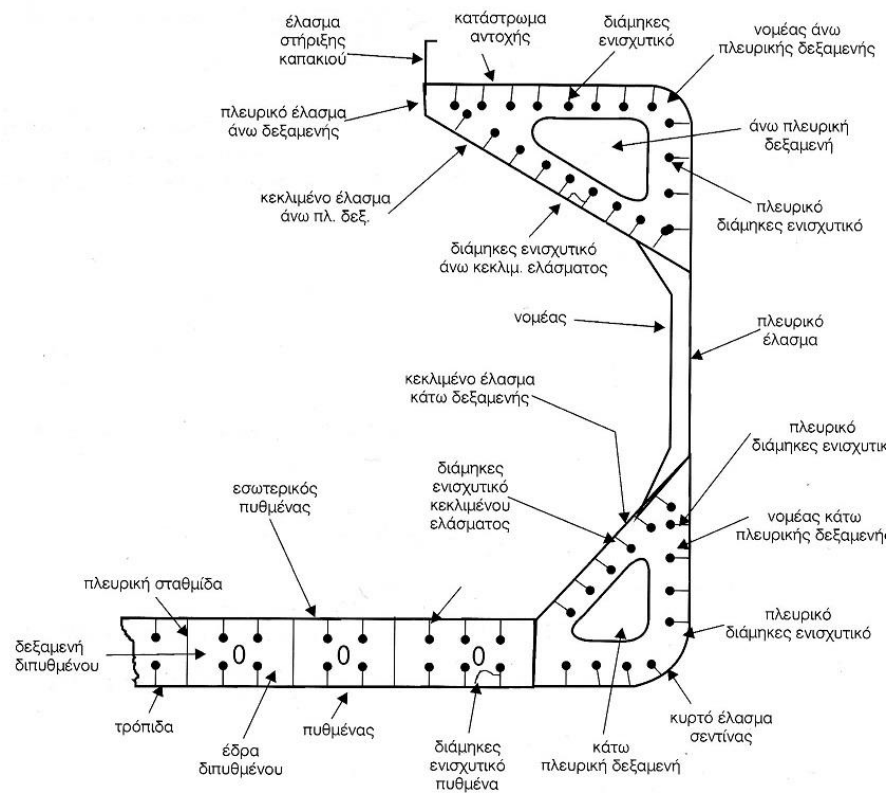
Όπου MS Κοινός χάλυβας (mild steel) και 32HT, 36HT χάλυβες υψηλής αντοχής (high-tensile steel) τάσης διαρροής 315 και 355 MPa αντίστοιχα.

Οι περιοχές των κυτών φορτίου που εμφανίζουν τα περισσότερα προβλήματα παρίστανται στο σχήμα που έπεται:

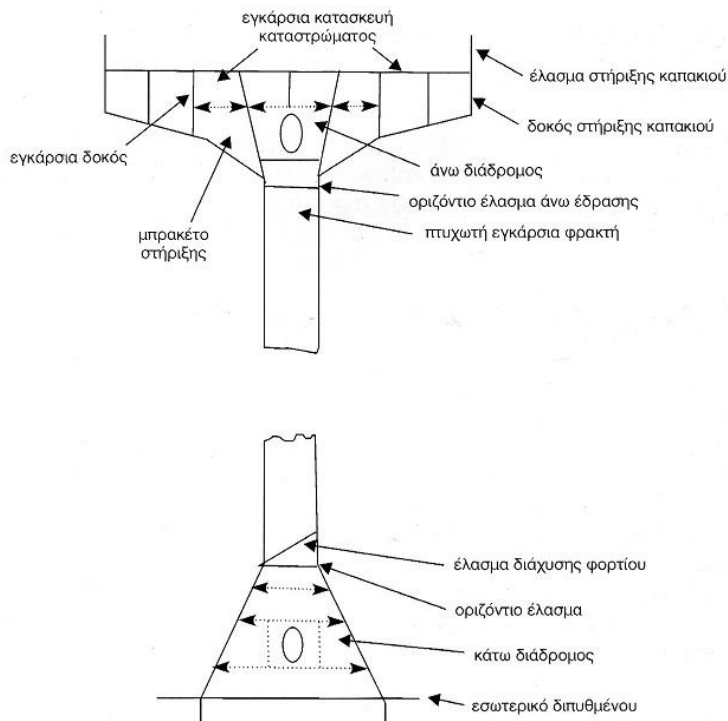


Σχήμα 31: Επιρρεπείς σε ζημιές περιοχές της μεταλλικής κατασκευής του χώρου κυτών φορτίου ενός bulk carrier [2]

Ακολουθούν οι ονοματολογίες της κατασκευής σε εγκάρσια τομή στο κύτος φορτίου καθώς και σε εγκάρσια φρακτή



Σχήμα 32: Ονοματολογία της κατασκευής σε εγκάρσια τομή σε περιοχή κύτους φορτίου [2]



Σχήμα 33: Ονοματολογία της κατασκευής σε εγκάρσια στεγανή φρακτή [2]

6.3 Το περιβάλλον των κυτών φορτίου [1], [32]

Το διαβρωτικό περιβάλλον που επικρατεί εντός των κυτών φορτίου εξαρτάται πρώτιστα από την κατάσταση φόρτωσης και το είδος του φορτίου. Ένα κενό κύτος φορτίου διαβρώνεται λόγω έκθεσης σε κλειστή ατμόσφαιρα. Κύτος φορτωμένο με γαιάνθρακα διαβρώνεται λόγω παρουσίας πορώδους μέσου. Επίσης, κύτος φορτωμένο με σιδηρομετάλλευμα, διαβρώνεται στον εσωτερικό πυθμένα, στην κάτω έδραση καθώς και στο κάτω τμήμα των νομέων του πλευρικού ελάσματος και των ελασμάτων των φρακτών λόγω της παρουσίας πορώδους μέσου ενώ οι άνω περιοχές του κύτους εκτίθενται σε κλειστό ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Συνήθως οι κάτω εδράσεις καθώς και ο εσωτερικός πυθμένας δεν φέρουν επιστρώματα, ενώ οι άνω περιοχές είναι πλήρως επιστρωμένες.

6.4 Έλασμα εσωτερικού πυθμένα (tank top plating) [32], [36], [56]

Πρόκειται για την περιοχή που εμφανίζει τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης από οιαδήποτε άλλη περιοχή στο κύτος φορτίου. Η άνω επιφάνεια του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα ορίζει τον πυθμένα του φορτίου κυτών και συνήθως είναι άνευ επιστρώματος. Η κάτω επιφάνεια σχηματίζει την οροφή του χώρου του αγωγού σωληνώσεων (duct keel) ή των δεξαμενών διπυθμένων και είναι επιστρωμένη. Στην άνω επιφάνεια παρατηρείται συνήθως ομοιόμορφη διάβρωση. Λόγω της εκτριβής από το φορτίο γαιάνθρακα ή σιδηρομεταλλεύματος καθώς και της πρόσκρουσης του μηχανολογικού εξοπλισμού φορτοεκφόρτωσης, χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό κοιλιοτήτων (dishing) των ελασμάτων ανάμεσα στα ενισχυτικά, την απουσία προστατευτικού επιστρώματος και την απουσία προϊόντων διάβρωσης. Η διάβρωση του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα εξελίσσεται χωρίς το

προστατευτικό αποτέλεσμα του στρώματος προϊόντων διάβρωσης και γενικά είναι σταθερή με το χρόνο, εφόσον βέβαια και η λειτουργία του πλοίου παραμένει εύλογα συνεπής με την πάροδο του χρόνου.

Οι τοπικές εκδορές του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα, σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες κοιλότητες, είναι συχνό φαινόμενο. Αυτό δεν επιδρά στο ρυθμό διάβρωσης στην άνω επιφάνεια (εντός του κύτους φορτίου) αλλά προκαλεί στη ρήξη των επιστρωμάτων στην κάτω επιφάνειά του.



Εικόνα 17: Αριστερά: Εσωτερικός πυθμένας με μόνιμα βαθουλώματα από φορτίο και μηχανήματα εκφόρτωσης Δεξιά: Σχηματισμός κοιλότητων με συσσώρευση υδάτων που προκαλεί επιταχυνόμενη διάβρωση ^[56]

Τα προϊόντα της διάβρωσης που σχηματίζονται στις περιοχές της ρήξης του επιστρώματος εντός του αγωγού της τρόπιδας παρατηρήθηκαν να φέρουν καθαρή και κονιώδη (ψαθυρή) σύσταση. Αυτό το είδος προϊόντων διάβρωσης έχει επίσης παρατηρηθεί σε επιφάνειες που αντικρίζουν προς τα κάτω σε ημικλειστές και ανοικτές περιοχές έκθεσης στη θαλάσσια ατμόσφαιρα. Το στρώμα σκουριάς προσφέρει στοιχειώδη μόνο προστασία και ο ρυθμός διάβρωσης παραμένει σταθερός με το χρόνο. Επιπρόσθετα, τέτοια βαθουλώματα που προκαλούν τη ρήξη του επιστρώματος προκαλούνται από εκτεταμένες προσκρούσεις των μηχανημάτων φορτοεκφόρτωσης και, συνεπώς, η ρήξη των επιστρωμάτων στην κάτω επιφάνεια του εσωτερικού πυθμένα σχετίζεται με τη συχνότητα των αλλαγών φορτίου.

Το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα αποτελεί κατεξοχήν παράδειγμα της σημασίας που έχουν τα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η άνω επιφάνειά του διαβρώνεται παρουσία φορτίου ενώ η κάτω επιφάνειά του διαβρώνεται σε κλειστή ατμόσφαιρα και σε περιοχές ρήξης επιστρωμάτων που αλλάζουν συνεχώς. Γενικά, τα ελάσματα στα φορτηγά πλοία υπόκεινται σε δύο διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όταν πρόκειται για την επιθεώρηση των κρίσιμων σημείων της κατασκευής.

Όταν το κύτος περιέχει φορτίο γαιάνθρακα, τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα υπόκεινται στη συσσώρευση υγρασίας λόγω διύλισης από το φορτίο. Κατά συνέπεια, η ζημία των ελασμάτων είναι κύρια διαβρωτική όταν το φορτίο είναι γαιάνθρακας και κύρια μηχανική (λόγω εκτριβής) όταν το φορτίο είναι σιδηρομετάλλευμα.

6.5 Κάτω εδράσεις (lower stools) ^{[32], [36]}

Οι ρυθμοί διάβρωσης για τις κάτω εδράσεις είναι συνήθως ελαφρώς χαμηλότεροι από αυτούς του εσωτερικού πυθμένα, αλλά υψηλότεροι από τις υπόλοιπες περιοχές στα κύτη φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο, μιας και οι κάτω εδράσεις των φρακτών καθώς και των πλευρικών δεξαμενών αφενός είναι σε επαφή με το φορτίο κάθε είδους και αφετέρου, συνήθως δεν φέρουν επιστρώματα μιας και η δράση εκτριβής φορτίου σιδήρου τα καθιστά μικρής χρησιμότητας. Όταν δε επιστρώματα χρησιμοποιούνται αυτά έχουν συνήθως σύντομο χρόνο ζωής. Με βάση δείγμα παχυμετρήσεων σε 27 φορτηγά πλοία η μέση ζωή επιστρώματος στις κάτω εδράσεις των φρακτών υπολογίστηκε στα 2,05 έτη (Yamamoto). Η διάβρωση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, διαφέρει όμως σημαντικά σε όψη από αυτή του εσωτερικού πυθμένα. Παχύ στρώμα προϊόντων διάβρωσης με λιγότερες κοιλότητες παρατηρήθηκε στις κάτω εδράσεις. Προσέτι, λιγότερη μηχανική εκτριβή και ζημία προκλήθηκε εκ του φορτίου και των μηχανημάτων φορτοεκφόρτωσης λαμβάνει χώρα στις κάτω εδράσεις εν συγκρίσει με το παρακείμενο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα.

Τα παρατηρημένα προϊόντα διάβρωσης στις κάτω εδράσεις, με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων-X, είναι υδροξειδία του σιδήρου (Fe_3O_4 και $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), οξυ-υδροξειδία ($\alpha\text{-FeOOH}$, $\beta\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$ και $\delta\text{-FeOOH}$) και θειούχος ένωση σιδήρου-υδρογόνου ($(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)\text{H}_2\text{SO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$). Η παρουσία του μαγνητίτη (Fe_3O_4) εντοπίζεται και με απλή οπτική παρατήρηση, στο εσωτερικό στρώμα των προϊόντων της διάβρωσης, εφαπτόμενα του χάλυβα. Ο μαγνητίτης σχηματίζεται συχνά στη ζώνη αναγωγής οξυγόνου του στρώματος προϊόντων διάβρωσης, που συνεπάγεται μείωση της παροχής οξυγόνου στην κάτω πλευρική έδραση και μείωση του ρυθμού διάβρωσης με το χρόνο, καθώς το στρώμα του μαγνητίτη γίνεται παχύτερο και λιγότερο πορώδες.

Ο εντοπισμός της ακατανεμήτης μορφής του οξυ-υδροξειδίου ($\beta\text{-FeOOH}$), πιστοποιεί την παρουσία χλωριόντων στο διαβρωτικό περιβάλλον. Περαιτέρω επιβεβαίωση προέκυψε από τη μέτρηση της συγκέντρωσης των διαλυτών χλωριόντων στην ίδια περιοχή με τη μέθοδο της ιοντικής χρωματογραφίας, που έδωσε τιμή συγκέντρωσης 121 ppm. Αυτό αποδίδεται στην παρουσία χλωρίου στα φορτία γαιάνθρακα καθώς και στο ότι οι μεταλλικές επιφάνειες συχνά πλένονται με θαλάσσιο νερό μεταξύ φορτίων. Κατά αντιστοιχία, οι ενώσεις θειικού σιδήρου πιστοποιούν την παρουσία ανιόντων θείου, προερχόμενα από τις ίδιες πηγές.

Η υποβάθμιση της μεταλλικής κατασκευής των κάτω εδράσεων λαμβάνει χώρα κυρίως όταν το κύτος είναι φορτωμένο με γαιάνθρακα, και οι αντιδράσεις διάβρωσης επιταχύνονται. Σε άφορτη κατάσταση, διάβρωση θα συμβεί όταν οι επιφάνειες είναι υγρές από πρότερο καθαρισμό ή όταν η σχετική υγρασία του αέρα εντός του κύτους υπερβαίνει το 70%.

Οι μέσοι ρυθμοί διάβρωσης για φορτηγά πλοία έως 15 ετών υπολογίστηκαν περίπου ίσοι και σε κάποιες περιπτώσεις και ελαφρώς υψηλότεροι αυτών σε πλοία έως 25 ετών (Paik και άλλοι). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι συχνά αντικαθίστανται τμήματα της μεταλλικής κατασκευής μετά τα 15 έτη. Επιπρόσθετα, για πλοία 15 ετών ο ρυθμός διάβρωσης του ελάσματος πυθμένα μετρήθηκε 0,14 mm / έτος και για τις κάτω εδράσεις 0,13 mm / έτος. Για πλοία 25 ετών ο ρυθμός διάβρωσης του ελάσματος πυθμένα ήταν 0,13 mm / έτος και για τις κάτω εδράσεις 0,08 mm / έτος. Η ελάττωση του μέσου

ρυθμού διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου για τις κάτω εδράσεις συνάδει με την παρουσία του μαγνητίτη στα προϊόντα της διάβρωσης, ενώ στρώμα προϊόντων διάβρωσης δεν σχηματίζεται στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα.

6.6 Άνω εδράσεις (upper stools) ^{[32], [36]}

Οι άνω εδράσεις προστατεύονται με εποξειδικά επιστρώματα. Συνήθως η περιοχή των άνω εδράσεων εμφανίζει χαμηλότερο ρυθμό διάβρωσης από άλλες περιοχές στο κύτος φορτίου. Η διάβρωση μπορεί να λάβει χώρα όταν το φορτίο είναι γαιάνθρακας. Μπορεί επίσης να συμβεί όταν η υγρασία εντός του κύτους είναι πάνω από μια συγκεκριμένη τιμή.

Κατάλοιπα κόνεως γαιάνθρακα μένουν στις επιφάνειες των άνω εδράσεων κατόπιν της εκφορτώσεως αυτού. Αυτό επηρεάζει τη διαδικασία της ατμοσφαιρικής διάβρωσης. Τα σωματίδια γαιάνθρακα ενθαρρύνουν την ατμοσφαιρική διάβρωση εξαιτίας της υγροσκοπικότητάς τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν κελιά διαφορικού αερισμού. Η υγροσκοπική φύση της κόνεως γαιάνθρακα ελαττώνει επίσης την οριακή τιμή της σχετικής υγρασίας για την οποία μπορεί να συμβεί διάβρωση. Κατάλοιπα κόνεως γαιάνθρακα παραμένουν επίσης επί της πτυχωτής φρακτής, τα οποία μάλιστα δεν αφαιρούνται κατά τον τυπικό καθαρισμό του κύτους.

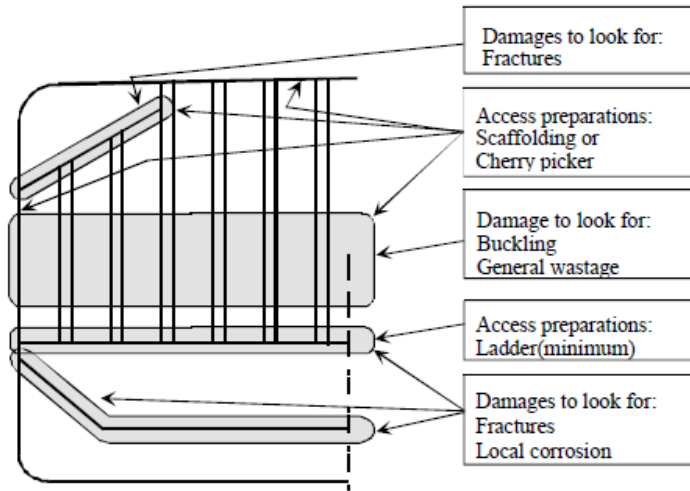
6.7 Εγκάρσια φρακτή με κατακόρυφες πτυχώσεις (corrugated bulkhead) ^{[32], [36], [50], [57], [88]}



Εικόνα 18: Πτυχωτή εγκάρσια φρακτή bulk carrier ^[57]

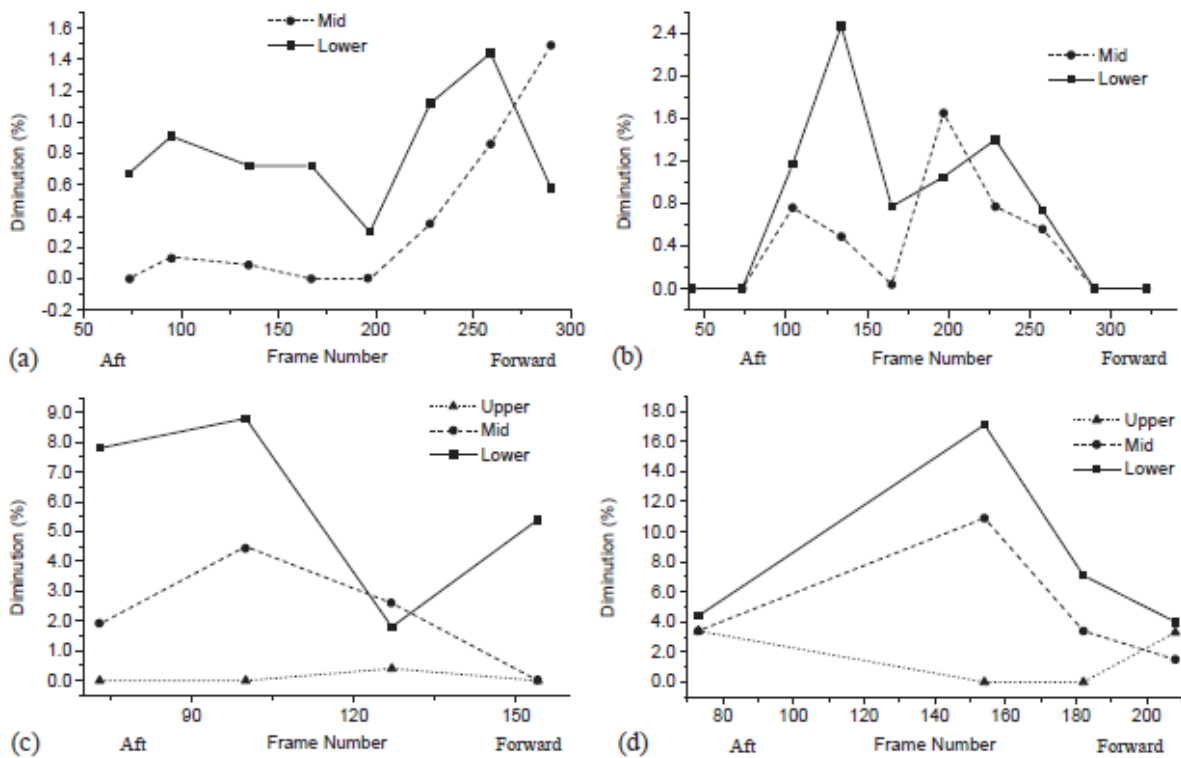
Οι εγκάρσιες φρακτές στα άκρα των κυτών ξηρού φορτίου είναι κυρίως στεγανές φρακτές που εξυπηρετούν δύο πρωταρχικούς σκοπούς:

- (α) Ως κύρια στοιχεία εγκάρσιας αντοχής στην κατασκευαστική σχεδίαση του πλοίου
- (β) Ως υποδιαίρεση για να αποφευχθεί προοδευτική κατάκλυση υδάτων σε έκτακτες συνθήκες.



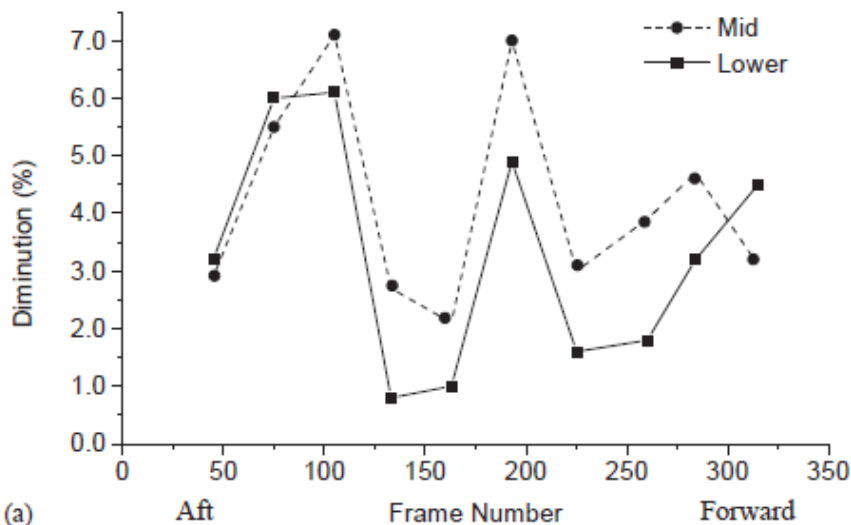
Σχήμα 34: Πιθανές προβληματικές περιοχές εγκαρσίων φρακτών [88]

Οι κανονισμοί των IACS απαιτούν την εφαρμογή προστατευτικών επιστρωμάτων επί των ελασμάτων της φρακτής με κατακόρυφες πτυχώσεις. Με βάσει μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί, η εγείραση κατανομή της διάβρωσης είναι αρκετά σταθερή. Όμως, εμφανίζεται σαφής μεταβολή του ρυθμού ανάλογα με την κατακόρυφη θέση σε μία φρακτή. Στα κάτωθι διαγράμματα παρατηρούμε τους μέσους ρυθμούς διάβρωσης για τη χαμηλή, τη μεσαία και την υψηλή περιοχή σε τέσσερα (4) φορτηγά πλοία μεγέθους cape-size.

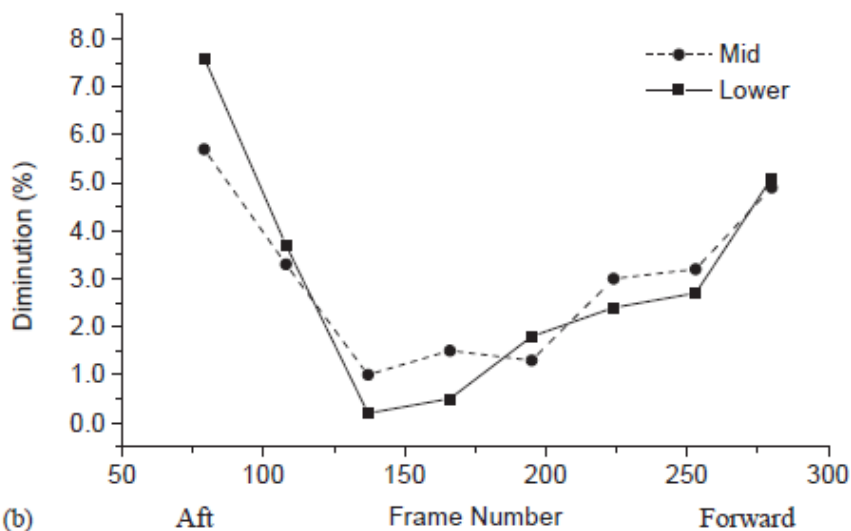


Διάγραμμα 38: Μέση διάβρωση ελασμάτων πτυχωτών φρακτών ανά χαμηλή-μεσαία-υψηλή περιοχή συναρτήσει του νομέα [32]

Τα χαμηλότερα ελάσματα της πτυχωτής φρακτής εμφανίζονται συστηματικά πιο διαβρωμένα από αυτά των μεσαίων και υψηλών περιοχών. Σε αντίθεση, δεδομένα από δύο (2) αδρομολόγητα πλοία (tramp ships), πλοία δηλαδή που δεν τηρούν καθορισμένο δρομολόγιο, η κατακόρυφη κατανομή της διάβρωσης, ως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα, είναι συνεπής.



(a)



(b)

Διάγραμμα 39: Μέση διάβρωση πτυχωτής φρακτής για δύο αδρομολόγητα φορτηγά πλοία (a) και (b) ^[32]

Τα αίτια για αυτή τη συμπεριφορά είναι τα εξής:

1. Το φορτίο σιδηρομεταλλεύματος φορτώνεται λίγο πάνω από την κορυφή των κάτω εδράσεων
2. Η πρόκληση μηχανικών ζημιών είναι πιθανότερο να συμβεί στη χαμηλότερη περιοχή ενός κύτους φορτίου.

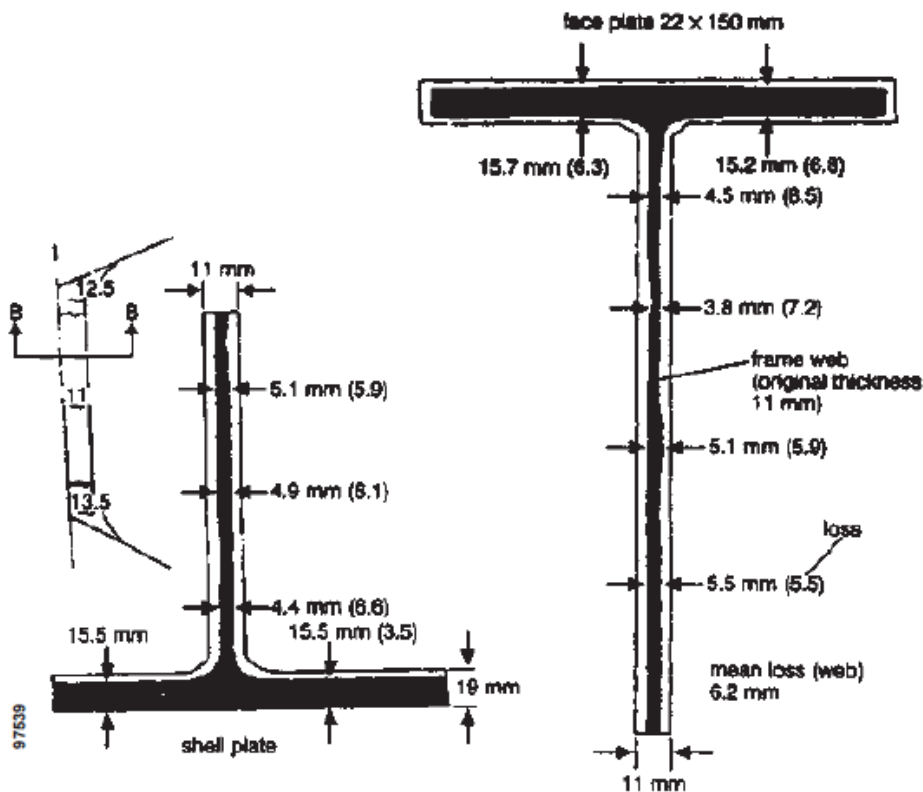
Η σημασία του ύψους του φορτίου σιδήρου σχετίζεται με αυξημένη φθορά και διάβρωση υπό και μέχρι το σημείο όπου φτάνει, που περιλαμβάνει και το χαμηλό τμήμα της πτυχωτής φρακτής. Πιθανό αίτιο

για το οποίο δεν παρατηρείται αυτό το αποτέλεσμα στα αδρομολόγητα πλοία είναι οι μεγαλύτεροι χρόνοι ταξιδιού. Μεγαλύτερα ταξίδια με φορτίο γαιάνθρακα, που είναι διαβρωτικότερος του σιδηρομεταλλεύματος, ελαττώνουν την ανομοιομορφία αυτή γιατί ο γαιάνθρακας φορτώνεται μέχρι το άνω τμήμα του κύτους φορτίου, εκθέτοντας έτσι όλες τις περιοχές στις ίδιες συνθήκες. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το προστατευτικό επίστρωμα επί της πτυχωτής φρακτής συνήθως δεν καθαρίζεται διεξοδικά κατόπιν της εκφόρτωσης του γαιάνθρακα. Ως αποτέλεσμα, σκόνη γαιάνθρακα, που είναι ιδιαίτερα διαβρωτική, μπορεί να παραμείνει στην επιφάνεια. Η αναλυτικότερη επίδραση του φορτίου στη διάβρωση των κυτών φορτίου θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Τα *κρίσιμα σημεία* μιας πτυχωτής φρακτής που πρέπει να εξετάζονται συχνά μιας και είναι τα πλέον επιρρεπή σε ζημία είναι ^[50]:

1. Θραύσεις στα όρια των πτυχώσεων και των εδράσεων, ιδίως στα ελάσματα διάχυσης φορτίου, στα οριζόντια ελάσματα των εδράσεων, κατάστρωμα, εσωτερικό πυθμένα.
2. Λυγισμός των ελασμάτων / πτυχώσεων που οδηγούν στην αστοχία και την κατάρρευση της φρακτής υπό πίεση νερού σε έκτακτες περιπτώσεις.
3. Εκτεταμένη διάβρωση κυρίως στο κάτω και το μεσαίο τμήμα της φρακτής, εξαιτίας της διαβρωτικής επίδρασης το φορτίου και ιδίως όταν η κατασκευή δεν φέρει επίστρωμα. Από αυτή την άποψη ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στα ακόλουθα σημεία:
 - 3.1 Ελάσματα φρακτής δίπλα στο πλευρικό έλασμα
 - 3.2 Ελάσματα φρακτής και συγκολλήσεις με τα οριζόντια ελάσματα των άνω και κάτω εδράσεων
 - 3.3 Συγκολλήσεις των εδράσεων με τα οριζόντια ελάσματά τους και τον εσωτερικό πυθμένα
 - 3.4 Συγκολλήσεις με τις άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές
 - 3.5 Οποιαδήποτε περιοχή έχει υποστεί ρήξη επιστρωμάτων
 - 3.6 Άλλες κατασκευές, όπως διαφράγματα εντός των εδράσεων, ιδίως στις άνω και κάτω συγκολλήσεις τους.

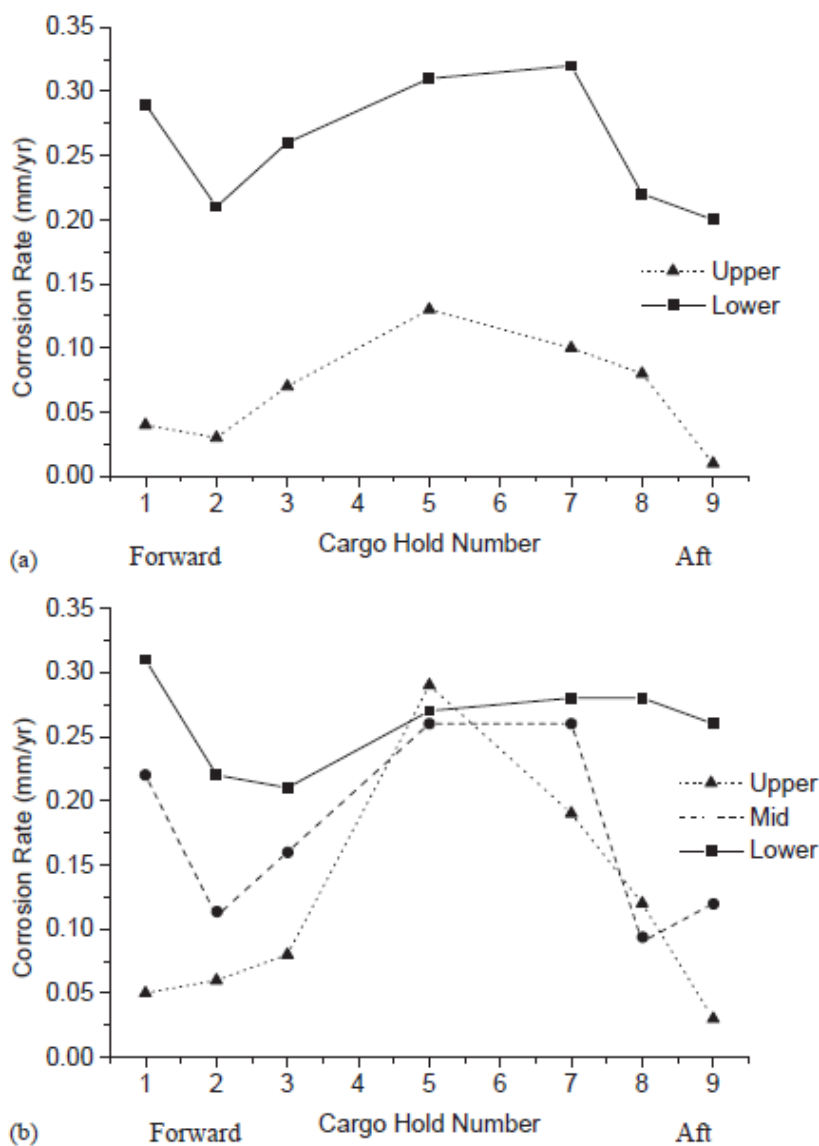
6.8 Νομείς πλευρικού ελάσματος (side shell frames) ^{[2], [32], [36], [50], [88]}



Σχήμα 35: Παράδειγμα ομοιόμορφα διαβρωθέντος νομέα ^[88]

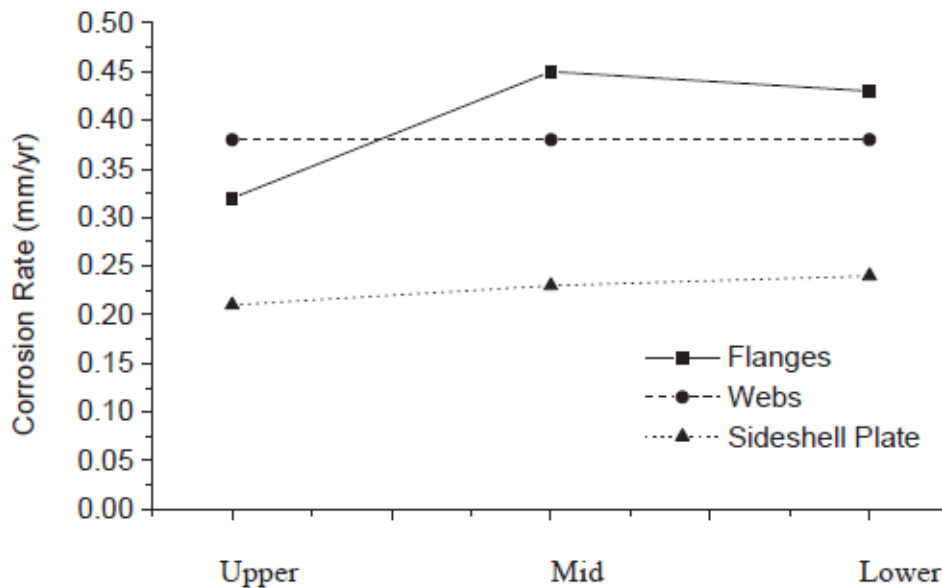
Οι νομείς υποστηρίζουν το πλευρικό έλασμα ανάμεσα στις άνω και κάτω πλευρικές δεξαμενές. Αποτελούνται από το κάτω μπρακέτο στήριξης, τη μεσαία περιοχή νομέα και το άνω μπρακέτο στήριξης. Όλα τα επιμέρους τμήματα του πλευρικού νομέα είναι πλήρως επιστρωμένα, συνήθως με εποξειδικά επιστρώματα. Σύμφωνα με παρατηρήσεις επί φορτηγών πλοίων, το προστατευτικό επιστρώμα στο κάτω μπρακέτο στήριξης φθείρεται πιο γρήγορα από ότι στα άλλα τμήματα. Αυτό αποδίδεται στην επαφή του με το φορτίο σιδηρομεταλλεύματος, το οποίο δεν ανέρχεται στα άλλα τμήματα του νομέα. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παλαιότερα η μορφή διάβρωσης στους νομείς ήταν γενική, καθότι δεν απαιτείτο να είναι επιστρωμένοι, ενώ από το 1992 οπότε και έγινε υποχρεωτική η επιστρωσή των με εποξειδικά επιστρώματα παρατηρείται διάβρωση με βελονισμούς. Ιδιαίτερα οι συγκολλήσεις των νομέων με το πλευρικό έλασμα, σε φορτηγά πλοία απλής γάστρας, συνιστούν τη συχνότερη περίπτωση ειδήλωσης διαβρώσεως με αυλακώσεις (grooving corrosion).

Παρόμοιες παρατηρήσεις εξάγονται από δεδομένα του Ιαπωνικού Νηογνώμονα (NKK). Αθροιστικά τα δεδομένα παρίστανται στο κάτωθι διάγραμμα, που δείχνει το ρυθμό διάβρωσης των νομέων του πλευρικού ελάσματος για φορτηγό πλοίο που μετέφερε γαιάνθρακα για περίπου 80% των ταξιδιών του και σιδηρομετάλλευμα για 20%. Οι ρυθμοί διάβρωσης είναι εμφανώς υψηλότεροι στην κάτω στήριξη των νομέων. Ακόμη, η αύξηση της απώλειας υλικού με το βάθος είναι μεγαλύτερη στα πέλματα από ότι στους κορμούς των νομέων. Τα πέλματα είναι περισσότερο εκτεθειμένα στο φορτίο άρα υπόκεινται σε φθορά των επιστρωμάτων και επακόλουθη απώλεια προστασίας εξαιτίας του φορτίου.



Διάγραμμα 40: Μέση διάβρωση νομέων πλευρικού ελάσματος (a) ελάσματα πέλματος (b) ελάσματα κορμού (NKK, 1992)^[32]

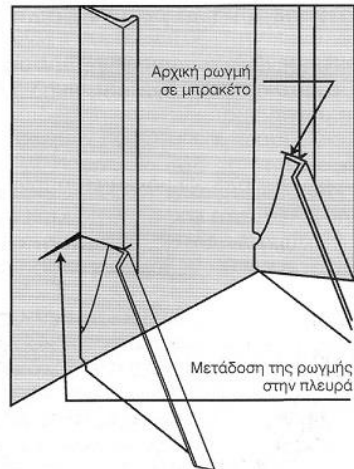
Στο κάτωθι διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο ρυθμός της διάβρωσης των νομέων του πλευρικού ελάσματος είναι κατά προσέγγιση διπλάσιος του ρυθμού διάβρωσης του πλευρικού ελάσματος αυτού καθεαυτού. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αμφότερες οι πλευρές των νομέων, τόσο των πελμάτων όσο και των κορμών, είναι εκτεθειμένες στο περιβάλλον του κύτους φορτίου. Απεναντίας, μία μόνον πλευρά του ελάσματος είναι εκτεθειμένη σε αυτό, η εσωτερική του. Η εξωτερική του πλευρά έχει πλήρες επίστρωμα προστασίας.



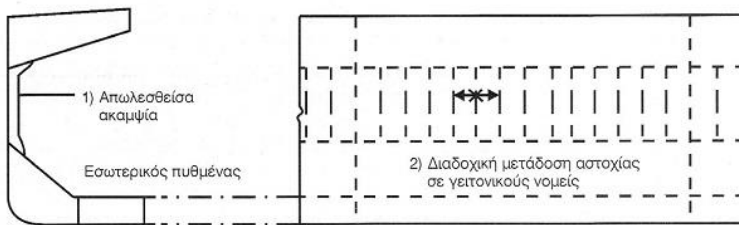
Διάγραμμα 41: Μέσος ρυθμός διάβρωσης πλευρικού ελάσματος και ελασμάτων πελμάτων και κορμών ^[32]

Το κύριο αίτιο της διάβρωσης των νομέων είναι η συμπύκνωση ή 'εφίδρωση' (sweating) του πλευρικού ελάσματος. Αυτή παρατηρείται όταν το φορτίο είναι γαιάνθρακας και προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο χύδην γαιάνθρακα και το πλευρικό έλασμα. Το πλευρικό έλασμα είναι πιο ψυχρό και προκαλεί τοπική οριζόντια θερμοκρασιακή κλίση στο γαιάνθρακα. Η ψύξη του γαιάνθρακα που εφάπτεται στο πλευρικό έλασμα προκαλεί πτώση στην τοπική πίεση κορεσμού του ατμού στον ενδιάμεσο αέρα. Έτσι λοιπόν παράγεται κλίση στην πίεση ατμού ανάμεσα στον θερμότερο χύδην γαιάνθρακα και στον ψυχρότερο γαιάνθρακα στο πλευρικό έλασμα. Αυτή είναι και η κινητήριος δύναμη για τη διάχυση του υδρατμού από τη θερμή, εσωτερική προς την ψυχρότερη, εξωτερική περιοχή. Ο γαιάνθρακας συνήθως έχει θερμοκρασία περί τους 30 °C, δύναται όμως να φτάσει τους 40 °C στο πρυμναίο κύτος φορτίου, που εφάπτεται στο μηχανοστάσιο. Η εσωτερική πλευρά του πλευρικού ελάσματος έχει θερμοκρασία ίση με αυτή της εξωτερικής, η οποία με τη σειρά της είναι περίπου ίση με αυτή του θαλασσίου ύδατος. Αυτό ισχύει για όλες τις εύλογες τιμές πάχους του πλευρικού ελάσματος. Κατά συνέπεια, το μέγεθος ενός φορτηγού πλοίου χύδην δεν επηρεάζει τη συχνότητα ή το βαθμό της συμπύκνωσης του πλευρικού ελάσματος. Η διαδικασία επηρεάζεται από το φορτίο γαιάνθρακα και την τοπική θερμοκρασία θαλασσίου ύδατος, αμφότερα συνάρτηση της διαδρομής.

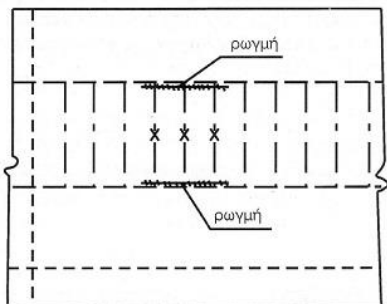
Πρόβλημα της κατασκευής των νομέων είναι ότι αποτελούν και τις λεπτότερες κατασκευαστικές δομές του κύτους φορτίου και ιδίως τα ελάσματα των κορμών τους. Αυτό συνεπάγεται επιταχυνόμενη διάβρωση στους νομείς. Εάν η διάβρωση γίνει υπερβολική στους κορμούς των νομέων ή και κατά μήκος των αυχενικών συγκολλήσεων των νομέων με το πλευρικό έλασμα (περίπτωση διάβρωσης με αυλακώσεις - grooving corrosion), η αστοχία του νομέα προκαλεί επιπλέον φορτίσεις στους γειτονικούς νομείς, το οποίο μπορεί εν τέλει να προκαλέσει κατάρρευση του πλευρικού ελάσματος, μέσα σε ελάχιστο χρόνο, ακολουθώντας το φαινόμενο «ντόμινο». Το φαινόμενο αυτό το βλέπουμε σχηματικά ^[2]:



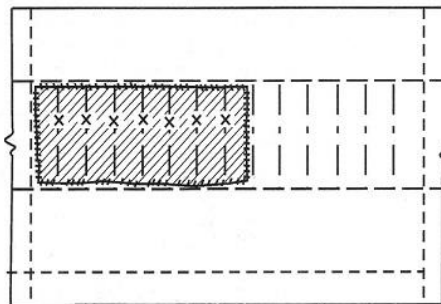
Σχήμα 12 - Στάδιο 1: Αρχικό στάδιο αποκόλλησης τμήματος πλευρικής κατασκευής



α) Απώλεια ακαμψίας νομέων



β) Μετάδοση ρωγμών σε ορθογώνια μορφή



γ) Απώλεια τμήματος πλευρικής κατασκευής



Εικόνα 19: Κατάρρευση νομέων πλευρικού ελάσματος [88]

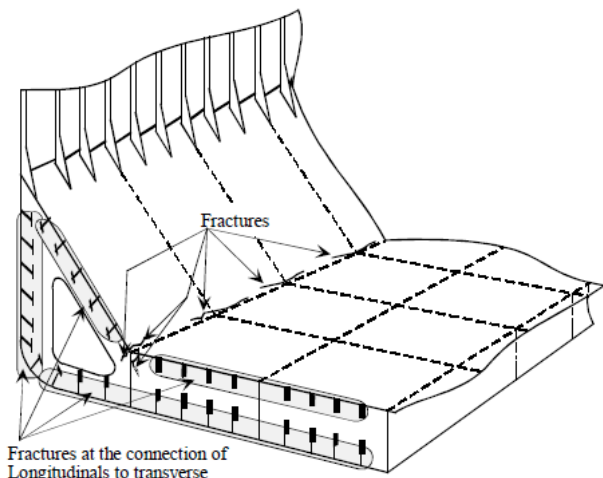
6.9 Δεξαμενές διπυθμένων – κάτω πλευρικές δεξαμενές (Double Bottom Ballast Tanks – Hopper Tanks) ^{[23], [32], [36], [88]}

Προστατευτικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται σε όλες τις επιφάνειες των δεξαμενών, ενώ αραιετά συχνά χρησιμοποιούνται και θυσιαζόμενες άνοδοι για να παράσχουν καθοδική προστασία. Οι επιφάνειες εντός των δεξαμενών διπυθμένων είναι συνεχώς υγρές λόγω της υψηλής υγρασίας όταν οι δεξαμενές δεν φέρουν έρμα. Μιας και η καθοδική προστασία είναι αναποτελεσματική για κενές δεξαμενές, τα επιστρώματα συνιστούν τη μοναδική μορφή προστασίας στην κατάσταση αυτή. Η διάβρωση συμβαίνει σε περιοχές ρήξης των επιστρωμάτων και αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας καθώς και της αλατότητας του προηγούμενου νερού έρματος.

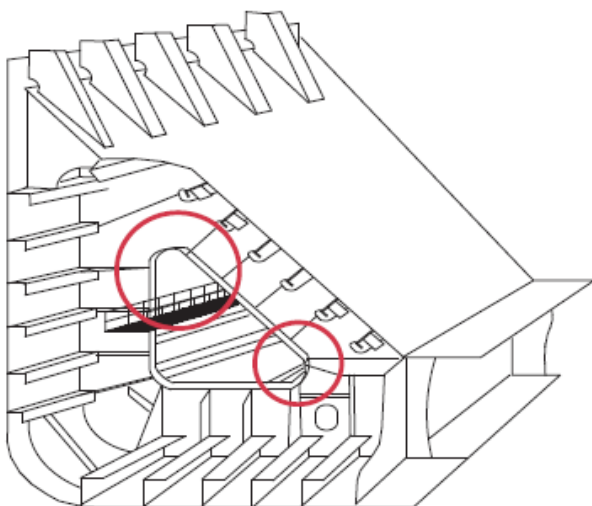
Ρήξη των επιστρωμάτων λαμβάνει χώρα κυρίως στην κάτω επιφάνεια του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα, σε ρωγμές του επιστρώματος προκληθείσες από την πρόσκρουση από τις άρπαγες φορτοεκφόρτωσης. Για να περιορισθεί αυτή η μορφή αστοχίας επιστρωμάτων, απαιτείται η εφαρμογή εύκαμπτων επιστρωμάτων. Άλλες περιοχές όπου τα επιστρώματα αστοχούν είναι οι συγκολλήσεις, οι ακμές των ενισχυτικών και γύρω από σημεία ασυνέχειας της κατασκευής.

Η περιοχή του εκτεθειμένου χάλυβα αυξάνει με το χρόνο εξαιτίας της αποφλοιώσης του επιστρώματος. Αυτό προκαλείται λόγω διαφορικού αερισμού γύρω από την περίμετρο της ρωγματωμένης επιφάνειας επιστρώματος, μιας και καινούριο οξυγόνο παρέχεται κάθε φορά που πληρώνεται η δεξαμενή. Κατ' επέκτασιν, η διάβρωση των δεξαμενών διπυθμένων εξαρτάται από τη συχνότητα των αλλαγών φορτίου (που αντικατοπτρίζει και τη συχνότητα ερματισμού) καθώς και από το είδος της διαδρομής. Φορτηγά πλοία που εκτελούν κοντινά δρομολόγια με συχνές παραδόσεις φορτίων υφίστανται εντονότερη διάβρωση στις δεξαμενές διπυθμένων από ότι φορτηγά πλοία που εκτελούν μακρινά δρομολόγια με λιγότερες διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης και ερματισμού.

Πέρα από τις περιοχές ρήξης των επιστρωμάτων, διάβρωση και απώλεια υλικού παρατηρείται και σε άλλες περιοχές, ανάλογα με το αίτιο πρόκλησης αυτών. Κυρίως πρόκειται για περιοχές που υπόκεινται στο *διαβρωτικό περιβάλλον* (πχ κάτω πλευρά εσωτερικού πυθμένα με τα ενισχυτικά αυτής, επιφάνειες προσκείμενες σε θερμές δεξαμενές καυσίμου), σε *υψηλές τάσεις* (πχ συνδέσεις οριζοντίων με εγκάρσια ενισχυτικά ή με τις εγκάρσιες φρακτές) και σε *κακή αποστράγγιση* (πχ κορμοί πλευρικών ενισχυτικών). Υπενθυμίζεται, δε, ότι οι συγκολλήσεις των κεκλιμένων ελασμάτων των κάτω πλευρικών δεξαμενών μετά του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα συνιστούν ένα εκ των κρίσιμότερων σημείων εμφάνισης ρωγματώσεων. Τα ανωτέρω τα διακρίνουμε στα σχήματα που έπονται.



Σχήμα 36: Θραύση επί των συγκολλήσεων του κεκλιμένου ελάσματος των κάτω πλευρικών δεξαμενών μετά του ελάσματος εσωτερικού πυθμένα και επί των συνδέσεων οριζόντιων ενισχυτικών με εγκάρσια ^[88]



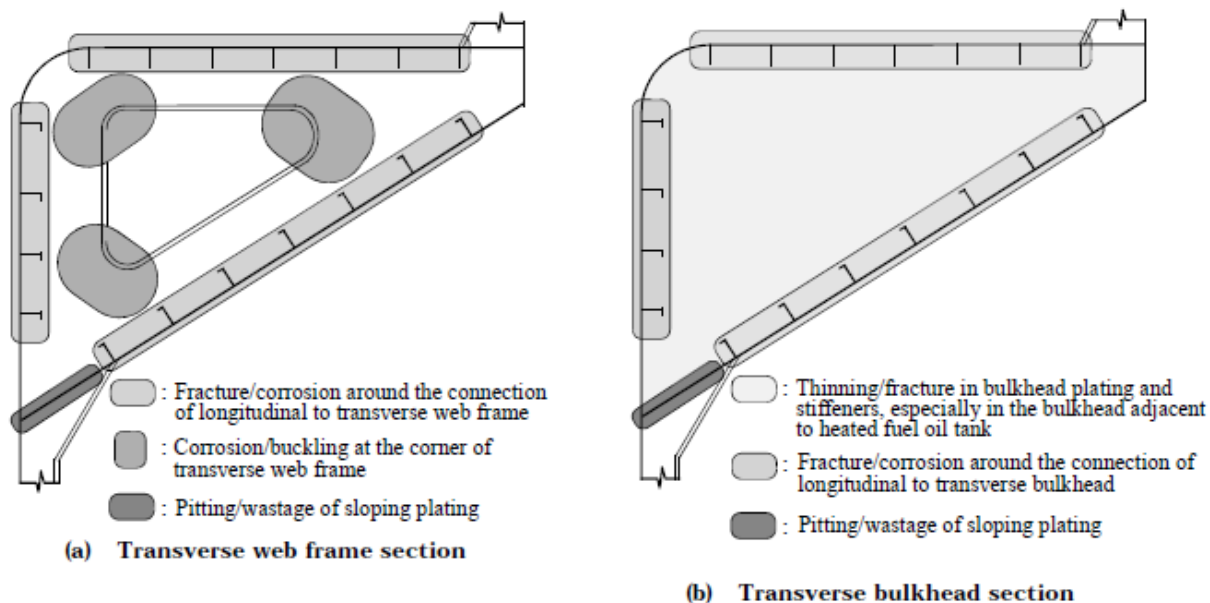
Σχήμα 37: Κρίσιμες περιοχές για διάβρωση σε κάτω πλευρικές δεξαμενές πλοίου bulk carrier ^[23]

6.10 Άνω πλευρικές δεξαμενές (Topside Tanks) ^{[1], [32], [36]}

Οι άνω πλευρικές δεξαμενές προστατεύονται από τη διάβρωση με τη χρήση επιστρωμάτων και, σε κάποιες περιπτώσεις, θυσιαζόμενες ανόδους, οι οποίες, όπως και στην περίπτωση των δεξαμενών διπυθμένων, είναι αποτελεσματικές μόνο όταν φέρουν έρμα.

Συνήθως, ο εξαερισμός είναι επαρκής για να στεγνώσουν οι επιφάνειες των άνω πλευρικών δεξαμενών μετά το άδειασμα του έρματος. Εφόσον χρησιμοποιείται καθοδική προστασία, η διάβρωση θα λάβει χώρα στις περιοχές τοπικής ρήξης των επιστρωμάτων όταν οι δεξαμενές είναι κενές έρματος. Εάν δεν χρησιμοποιείται καθοδική προστασία, η διάβρωση θα συμβεί στις ίδιες περιοχές, και στην περίπτωση όμως που η δεξαμενή φέρει έρμα.

Έχει παρατηρηθεί ότι η κύρια επιφάνεια της ρήξης επιστρωμάτων συμβαίνει στα πέλματα των διαμήκων ενισχυτικών υπό του κυρίου καταστρώματος. Η θέρμανση του καταστρώματος από το προσπίπτον ηλιακό φως επίσης προκαλεί προβλήματα. Τέλος, οι τάσεις στα ελάσματα του κυρίου καταστρώματος καθώς και στα ενισχυτικά υπό αυτού είναι σημαντικές.



Σχήμα 38: Πιθανές προβληματικές περιοχές άνω πλευρικών δεξαμενών ^[88]

6.11 Στόμια κυτών – Κάτω πλευρά κυρίου καταστρώματος ^[88]

Τα στόμια των κυτών φορτίου καθώς και το κάτω τμήμα του καταστρώματος, εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης. Η διάβρωση αυτή αποδίδεται στη συνδυαστική δράση του θαλασσίου περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας υψηλής υγρασίας εντός των κυτών φορτίου. Συγχρόνως, η δυσκολία πρόσβασης για συντήρηση των επιστρωμάτων στα ελάσματα των στομιών εντός των κυτών καθώς και στα πλευρικά ελάσματα των άνω δεξαμενών μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη διάβρωση, ως βλέπουμε στην εικόνα που ακολουθεί, δυνητικά ικανή να προκαλέσει θραύσεις της κατασκευής.



Εικόνα 20: Διάβρωση στομίων κυτών και ελασμάτων άνω πλευρικών δεξαμενών ^[88]

6.12 Κενοί χώροι (Void Spaces) ^{[32], [36]}

Οι κύριοι κενοί χώροι σε ένα φορτηγό πλοίο, οι οποίοι περιέχουν μεταλλική κατασκευή που συνεισφέρει στην αντοχή του πλοίου είναι ο αγωγός σωληνώσεων (duct keel) και οι χώροι εντός των πτυχωτών φρακτών, περιλαμβάνοντας και τις εδράσεις των φρακτών. Η διάβρωση εντός του αγωγού της τρόπιδας εντοπίζεται κυρίως στην κάτω επιφάνεια του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα, στα σημεία όπου έχει επέλθει αστοχία του επιστρώματος εξαιτίας ζημιών από πρόσκρουση που ξεκίνησε εντός των κυτών φορτίου. Περισσότερες πληροφορίες για τη μορφή της διάβρωσης είδαμε στην παράγραφο του εσωτερικού πυθμένα.

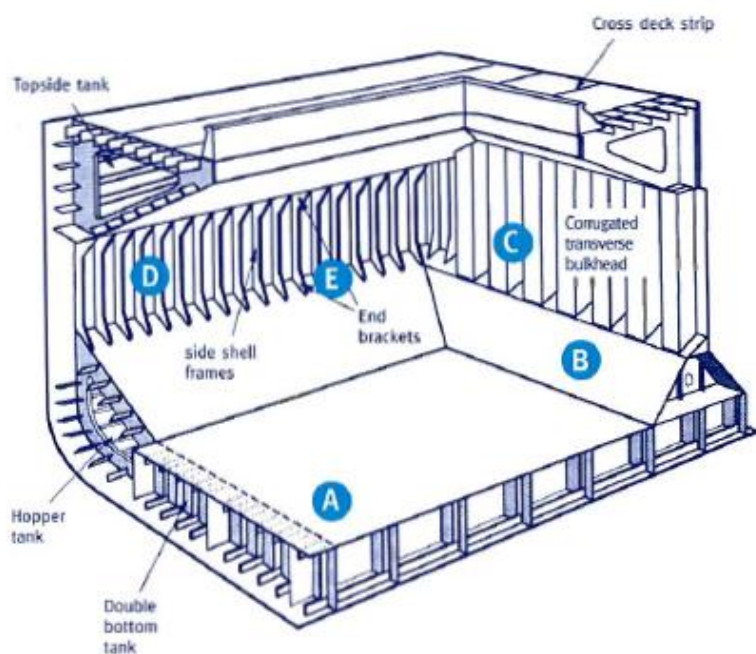
Οι διαβρωθείσες περιοχές επεκτείνονται λόγω διαφορικού αερισμού γύρω από την περίμετρο της επιφάνειας της ρήξης επιστρωμάτων. Η πτωχή σε οξυγόνο περιοχή κάτω από το επίστρωμα γίνεται ανοδική σε σχέση με το χαλυβα που έχει πρόσβαση σε οξυγόνο και η διάβρωση λαμβάνει χώρα κάτω από το επίστρωμα, προκαλώντας τη σταδιακή αποφλοιώση αυτού. Όχι μόνο ελαττώνονται τα πάχη των ελασμάτων με το χρόνο, αλλά και η επιφάνεια που υφίσταται απώλεια πάχους αυξάνει με το χρόνο.

Αντίστοιχη είναι η κατάσταση εντός των κάτω εδράσεων των φρακτών. Εκεί όμως δεν εντοπίζεται τόσο συχνά αστοχία του επιστρώματος, κάτι που συνάδει και με την παρατήρηση ότι σχηματίζεται στρώμα προϊόντων διάβρωσης στις επιφάνειες της κάτω εδράσεως των εγκαρσίων φρακτών, το οποίο καταδεικνύει ότι ζημιές λόγω προσκρούσεως δεν είναι τόσο συχνές στην περιοχή αυτή.

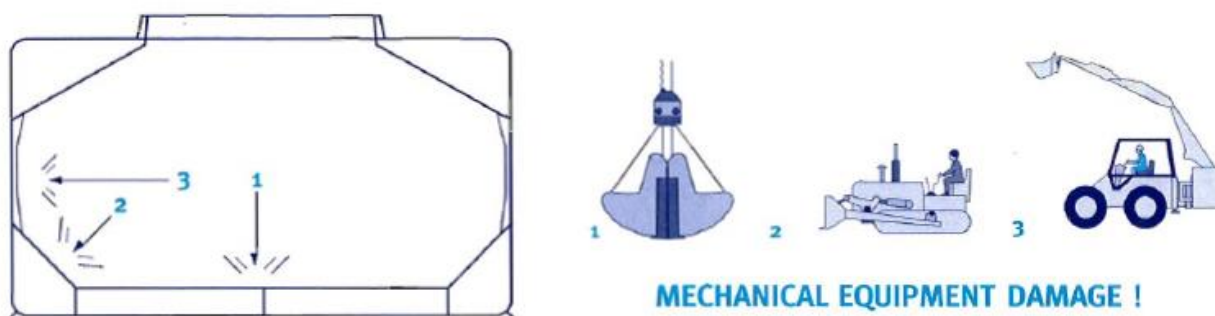
6.13 Μηχανικές ζημιές από εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης ^{[38], [58]}

Ως είδαμε στις επιμέρους περιοχές των κυτών φορτίου, οι ζημιές που προκαλούνται από το μηχανολογικό εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης συνιστούν ένα από τα κύρια αίτια για την πρόκληση ζημιών επί της μεταλλικής κατασκευής λόγω κρουστικού φορτίου αλλά και για την τοπική ρήξη των επιστρωμάτων και την επακόλουθη εκκίνηση της διάβρωσης αποδιδόμενη κυρίως στην επίδραση

διαβρωτικών φορτίων. Το φορτίο φορτώνεται μέσω μεταφορικού ιμάντα και μπορεί να πέσει από το ύψος του κυρίου καταστρώματος στον πυθμένα του κύτους. Κατά τη δε εκφόρτωση, άρπαγες (grabs) χρησιμοποιούνται όταν το πλοίο δεν διαθέτει δικά του εκφορτωτικά μέσα. Οι άρπαγες αυτές, ανοιγόμενου τύπου, ως φαίνεται στο μεθεπόμενο σχήμα με τη σήμανση (1), ζυγίζουν έως και 30 τόνους κενές χωρίς το φορτίο τους και συχνά πέφτουν πάνω στον εσωτερικό πυθμένα, ή σύρονται επί αυτού προκαλώντας εκτεταμένες εκδορές. Αλόμη, υδραυλικά σφυριά (hydraulic hammers) χρησιμοποιούνται για την εκτόπιση υπολειμμάτων φορτίου σε χαραγές, εγκοπές, πτυχώσεις και γωνίες της κατασκευής. Οι κύριες περιοχές όπου λαμβάνει χώρα η πρόκληση μηχανικής ζημίας συνοψίζονται στα κάτωθι σχήματα:



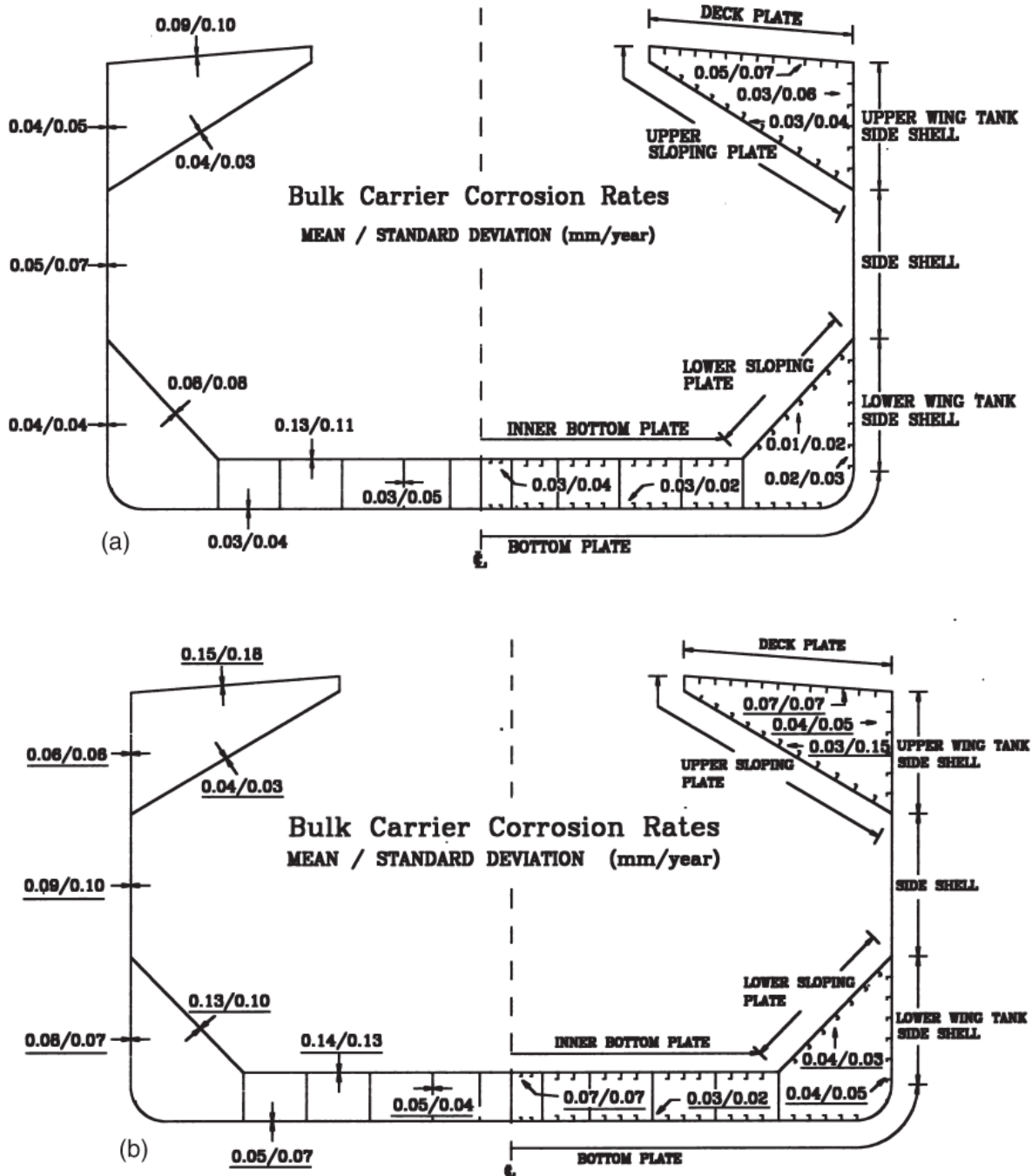
Σχήμα 39: Σημεία πρόκλησης μηχανικής ζημίας από εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης: (A) Εσωτερικός πυθμένας, (B) Κεκλιμένο έλασμα κάτω πλευρικών δεξαμενών, (C) Εγκάρσιες φρακτές, (D) Νομείς, (E) Αγκώνες (μπρακέτα) ^[58]



Σχήμα 40: Είδη εξοπλισμού φορτοεκφόρτωσης και η πρόκληση ζημίας στα αντίστοιχα τμήματα του κύτους φορτίου ^[58]

6.14 Συγκεντρωτικοί ρυθμοί διάβρωσης στα κύτη φορτίου και συμπεράσματα ^[59]

Από την έρευνα των Paik, Kim και Lee υπολογίστηκαν (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) οι ρυθμοί διάβρωσης για κάθε κύριο κατασκευαστικό μέλος σε ένα φορτηγό πλοίο χύδην φορτίου. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο κάτωθι σκαρίφημα, για πλοία ηλικίας μέχρι 25 και 15 ετών αντίστοιχα:



Σχήμα 41: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση ρυθμών διάβρωσης για κατασκευαστικά μέλη (a) για πλοία μέχρι 25 ετών (b) για πλοία μέχρι 15 ετών^[59]

Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν, λοιπόν να εξαχθούν:

1. Οι ρυθμοί διάβρωσης των συνοριακών ελασμάτων ανάμεσα σε περιοχές νερού έρματος και φορτίου, όπως στον εσωτερικό πυθμένα και τα κεκλιμένα ελάσματα των άνω και κάτω πλευρικών δεξαμενών, είναι υψηλότεροι από αυτών των ελασμάτων εξωτερικού πυθμένα και σεντίνας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πρώτα ελάσματα εκτίθενται σε αμφότερα έρμα και φορτία ενώ τα τελευταία μόνο στο θαλάσσιο έρμα μιας και οι εξωτερικές επιφάνειες είναι πλήρως επιστρωμένες.
2. Ο ρυθμός διάβρωσης των ελασμάτων του εσωτερικού πυθμένα είναι πολύ υψηλός. Αυτό καταδεικνύει ότι ο εσωτερικός πυθμένας διαβρώνεται ταχέως όχι μόνο εξαιτίας του ότι συνιστά σύνορο ανάμεσα στο έρμα και στα φορτία αλλά και επειδή υπόκειται σε υψηλή μηχανική καταπόνηση και επιταχυνόμενη τοπική διάβρωση ως οριζόντια επιφάνεια.
3. Ο ρυθμός διάβρωσης του πλευρικού ελάσματος ανάμεσα στην κάτω πλευρική δεξαμενή και την άνω πλευρική δεξαμενή είναι ελαφρώς υψηλότερος από ότι στο πλευρικό έλασμα εντός των δεξαμενών αυτών. Αυτό δείχνει ότι τα μεταφερόμενα φορτία ενδεχομένως ήταν πιο διαβρωτικά από το έρμα, πιθανώς λόγω της υγρασίας και της υψηλής τους θερμοκρασίας.
4. Το κύριο κατάστρωμα στις άνω πλευρικές δεξαμενές υποδηλώνει υψηλότερη διάβρωση εν συγκρίσει με άλλες εξωτερικές επιφάνειες. Αυτό οφείλεται στις συχνές αλλαγές υγρών και στεγνών κύβλων στους κενούς χώρους των άνω πλευρικών δεξαμενών καθώς και στη θέρμανση εκ του Ήλιου.
5. Τα περισσότερα διαμήκη ενισχυτικά στις δεξαμενές έρματος εμφανίζουν παρόμοιους ρυθμούς διάβρωσης, εκτός αυτών στο κατάστρωμα. Ο υψηλότερος ρυθμός διάβρωσης που διακρίνεται στα ενισχυτικά του καταστρώματος αποδίδεται στους ίδιους λόγους με τα ελάσματα του καταστρώματος που είδαμε στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο.
6. Ο ρυθμός διάβρωσης που βασίζεται στα δεδομένα μέχρι 15 χρόνια δίνει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από αυτές που εξήχθησαν από όλα τα δεδομένα, μέχρι 25 χρόνια, ιδίως στον εσωτερικό πυθμένα και τα διαμήκη ενισχυτικά του, στα ελάσματα των κάτω πλευρικών δεξαμενών, στα πλευρικά ελάσματα και στα ελάσματα καταστρώματος. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι οι ανανεώσεις του χάλυβα λόγω προκεχωρημένης διάβρωσης επιτελείται συνήθως μετά την ηλικία των 15 ετών σε ένα πλοίο.

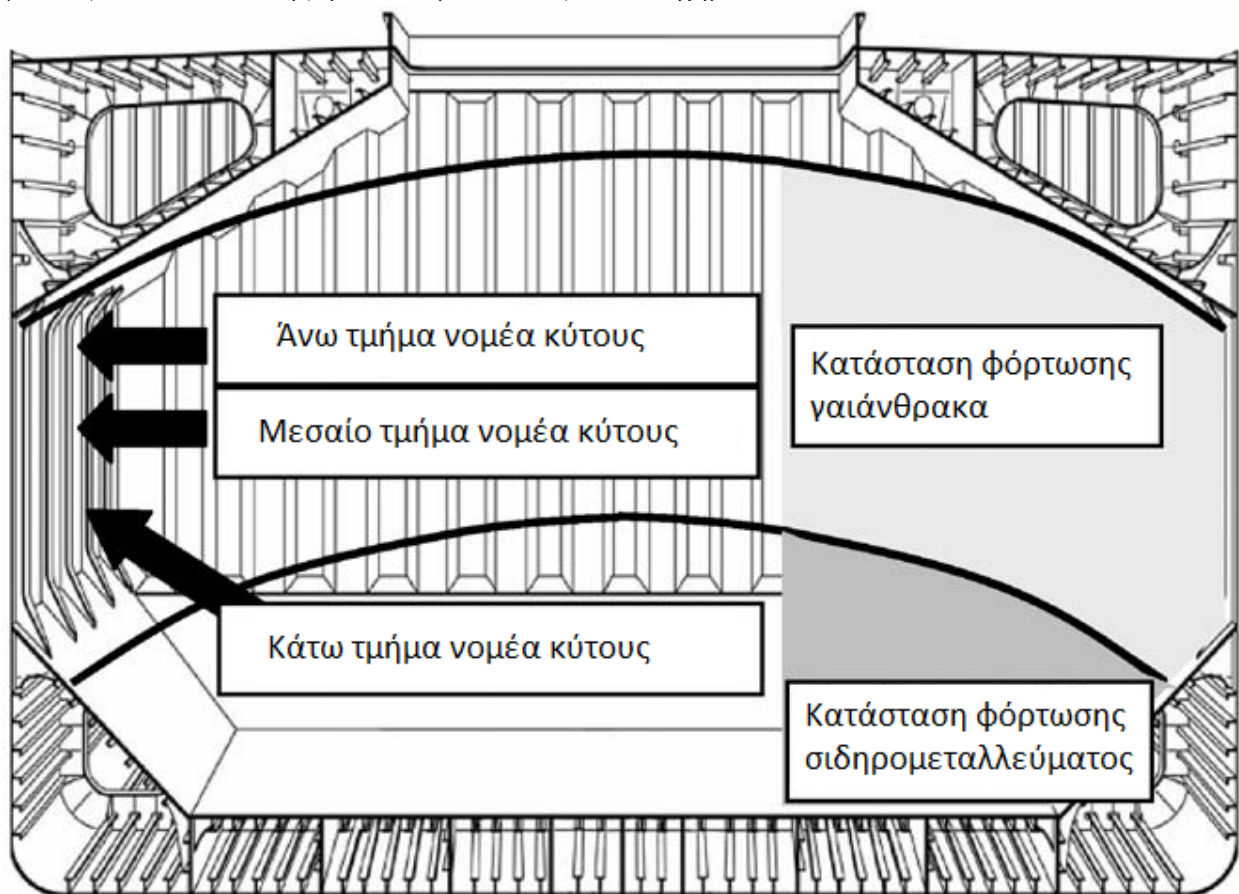
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Γενικά: [46], [59], [60]

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επιδρά στη διάβρωση των δεξαμενών φορτίου στα φορητά πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην είναι αναπόφευκτο το φορτίο. Οι μεταλλικές κατασκευές που έρχονται σε επαφή με ορισμένα είδη φορτίων δύνανται να υποστούν σημαντική διάβρωση. Ακόμα και τα προστατευτικά μέτρα που λαμβάνονται δεν είναι πάντοτε αποτελεσματικά, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την κάτω περιοχή των δεξαμενών φορτίου, το επίστρωμα των οποίων υποβαθμίζεται ταχέως λόγω επαφής με τον μηχανικό εξοπλισμό φορτοεκφόρτωσης.

Στα φορητά πλοία τα κυριότερα είδη φορτίων είναι ο γαιάνθρακας με σχετική συχνότητα 40%, το σιδηρομετάλλευμα με 35% και τα σιτηρά με 20% (Paik et al). Το εναπομείναν 5% περιλαμβάνει λιγότερο συχνά φορτία όπως ο βωξίτης, ο ασβεστόλιθος και ο χάλυβας προς ανακύκλωση (scrap steel).

Το ύψος που ανέρχεται το φορτίο εντός του κύτους, για τα δύο επικρατέστερα είδη φορτίων, του γαιάνθρακα και του σιδηρομεταλλεύματος, παρίσταται σχηματικά:



Σχήμα 42: Καταστάσεις φόρτωσης γαιάνθρακα και σιδηρομεταλλεύματος [46]

7.1 Γαιάνθρακας (Κάρβουνο)

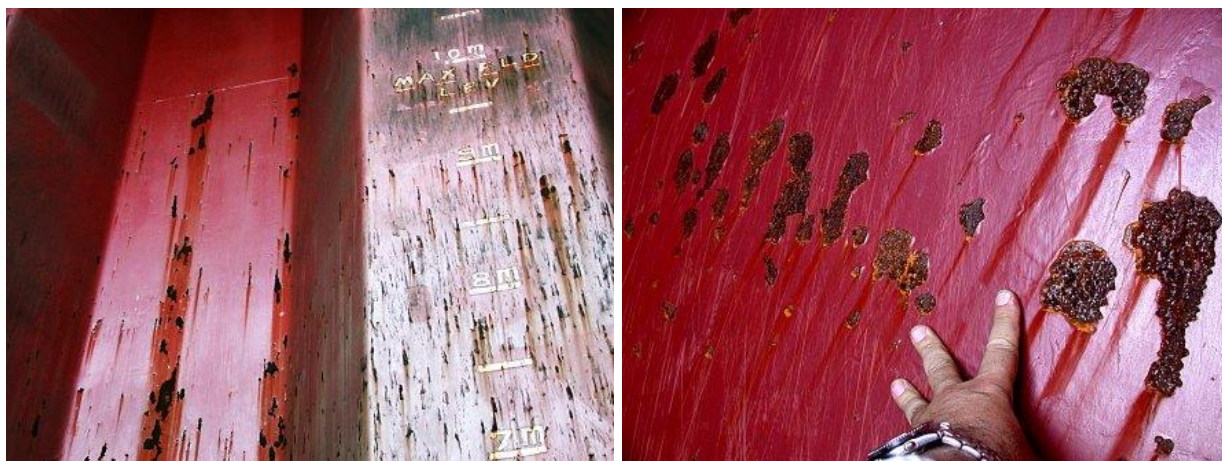
Ο γαιάνθρακας φορτώνεται μέχρι την κορυφή του κύτους φορτίου ως είδαμε στο προηγούμενο σχήμα και έρχεται σε επαφή με τις άνω εδράσεις (upper stools).



Εικόνα 21: Εκφόρτωση χύδην γαιάνθρακα ^[41]

7.1.1 Δραστικά φορτία ^[61]

Ο γαιάνθρακας είναι ο κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας των «δραστικών» φορτίων (active cargoes), μαζί με το κωκ, τον βωξίτη, και το θειάφι. Ως ενεργό φορτίο χαρακτηρίζεται το φορτίο που επηρεάζει άμεσα το επιστρώμα του κύτους φορτίου, ενώ επιδρά άμεσα και στην αντίδραση διάβρωσης του υποκείμενου χάλυβα. Συχνά παρατηρείται η πρόκληση ρήξης του επιστρώματος στις πτυχωτές φρακτές, με τη συνεπακόλουθη πρόκληση ταχείας διάβρωσης ως βλέπουμε στις κάτωθι φωτογραφίες.



Εικόνα 22: Ρήξη επιστρώματος σε πτυχωτή φρακτή και επακόλουθη διάβρωση ^[61]

Αυτό που καθιστά τα συγκεκριμένα φορτία ως «δραστικά» είναι η ιοντική τους αγωγιμότητα σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια που καταλαμβάνουν, τα σημαντικά υψηλά ποσοστά υγρασίας τους και τη συμπεριφορά τους ως κάθοδοι. Η αντίδραση διάβρωσης που λαμβάνει χώρα στο χάλυβα είναι το ανοδικό ήμισυ της διαδικασίας και παράγει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια καταναλίσκονται από την αντίδραση αναγωγής οξυγόνου και ύδατος που επιτελείται στην καθοδική περιοχή. Κανονικά η καθοδική αντίδραση είναι πολύ αργή και ελέγχει το ρυθμό της ανοδικής διάλυσης του σιδήρου, όμως η

υπερβολικά μεγάλη επιφάνεια του φορτίου αίρει αυτόν τον περιορισμό. Η αντίδραση διάβρωσης μπορεί να συμβεί σε σημαντικά αυξημένους ρυθμούς όταν το μεταφερόμενο φορτίο είναι δραστικό. Τα προϊόντα διάβρωσης που σχηματίζονται μπορούν να εκτοπίσουν τα επιστρώματα από το χάλυβα, προκαλώντας τον περαιτέρω γυμνό χάλυβα να εκτεθεί στο επιθετικό περιβάλλον. Σε ακραίες περιπτώσεις, τα διαλύματα της διάβρωσης που σχηματίζονται μπορούν να προκαλέσουν το σχηματισμό βελονισμών.

Διάβρωση με βελονισμούς συμβαίνει όταν υπάρχει μικρή ανοδική επιφάνεια (στην προκειμένη περίπτωση ο γυμνός χάλυβας) και μεγάλη καθοδική επιφάνεια. Οι καθοδικές περιοχές εν γένει σχηματίζονται στο άθικτο επίστρωμα, αλλά ορισμένα είδη φορτίου είναι ικανά να υποστηρίξουν την καθοδική αντίδραση. Τα δραστικά φορτία επιταχύνουν τη διάβρωση με βελονισμούς, κάτι που παρατηρείται συχνότατα με γαιάνθρακα και κωκ, που λόγω και της μεγάλης τους επιφάνειας αποτελούν άριστες καθοδικές περιοχές.

Η διάβρωση από δραστικό φορτίο γίνεται σε μια διαδοχή γεγονότων που οδηγεί στη ζημία του επιστρώματος, συχνά με ένα χαρακτηριστικό δένδροειδές μοτίβο, σε συνδυασμό με τη διάβρωση του χάλυβα. Το πρώτο στάδιο της ζημίας συμβαίνει όταν το αιχμηρό, σκληρό και γωνιώδες φορτίο προκαλεί εκδορές στο επίστρωμα λόγω κατακάθισης κατά τη φορτοεκφόρτωση και τον πλου. Εν τέλει το φορτίο διαπερνά τα σημεία όπου το επίστρωμα είναι αδυνατισμένο και εκθέτει τον χάλυβα στο περιβάλλον του φορτίου. Το νερό που ευρίσκεται στο φορτίο με τη μορφή υγρασίας διαπερνά τη διεπιφάνεια ανάμεσα στο επίστρωμα και το χάλυβα, εκεί όπου το επίστρωμα έχει ζημιωθεί, προκαλώντας την απώλεια της πρόσφυσης του επιστρώματος. Η ζημιά με οπτική παρατήρηση φαίνεται να είναι μικρή, όταν όμως το χαλαρό πλέον επίστρωμα απομακρυνθεί, η έκταση της διάβρωσης και της σχετιζόμενης με αυτή αποκόλληση (delamination) του επιστρώματος είναι εμφανής, ως βλέπουμε στη φωτογραφία που ακολουθεί.



Εικόνα 23: Ζημιωθείσες περιοχές με διάβρωση που εκτείνεται για αρκετά εκατοστά από την ορατή ζημία προ της αφαίρεσης του επιστρώματος ^[61]

Καθώς το φορτίο κατακάθεται, μαλακό ή αδύναμο επίστρωμα μπορεί να μετακινηθεί με το φορτίο, δημιουργώντας φλύκταινες ή «βουλιάγματα», τα οποία με τη σειρά τους μετακινούνται εκ νέου από το

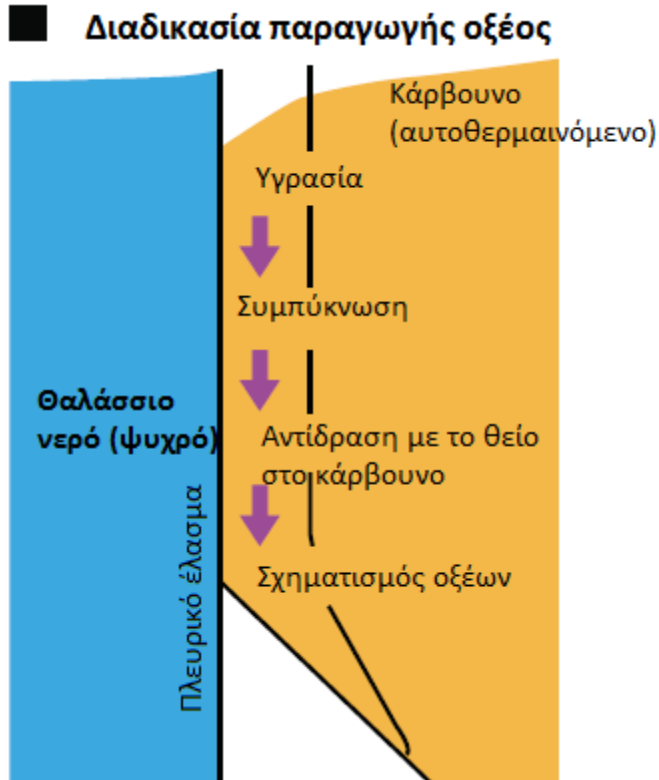
φορτίο. Δημιουργείται έτσι ένας κύβλος ο οποίος οδηγεί σε δενδροειδείς μορφές ρήξης των επιστρώματων ως βλέπουμε κάτωθι:



Εικόνα 24: Ρήξη επιστρώματος δενδροειδούς μορφής ^[61]

7.1.2 Η διαβρωτική δράση του γαιάνθρακα ^{[35], [36], [41]}

Ο γαιάνθρακας θεωρείται ως ένα από τα πλέον διαβρωτικά είδη φορτίου και οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης στα κύττα φορτίων, ιδίως στις περιοχές των συγκολλήσεων. Ως κύριο αίτιο της διαβρωτικής του δράσης είναι η διύλιση ανιόντων του θείου που περιέχεται στο γαιάνθρακα. Αυτό συμβαίνει όταν προκαλείται υγρασία εντός των κυτών φορτίου εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας του γαιάνθρακα στο κύτος (θερμός και αυτοθερμαινόμενος) με το θαλάσσιο νερό (ψυχρό). Πρόκειται για το φαινόμενο της συμπύκνωσης (sweating). Από τη διάλυση του θείου προκαλείται χημική αντίδραση που οδηγεί στην ανάπτυξη της διάβρωσης, διαδικασία που βλέπουμε σχηματικά:



Σχήμα 43: Διαδικασία συμπύκνωσης γαιάνθρακα και παραγωγή οξέος ^[35]

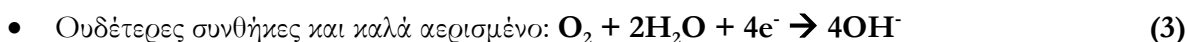
Ο γαιάνθρακας έχει επιταχυντική δράση στη διάβρωση των νομέων του πλευρικού ελάσματος καθώς και των ελασμάτων στην περιοχή του κύτους φορτίου. Αυτό οφείλεται στην άνωθεν περιγραφείσα διαδικασία. Ως επιώθησε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διάβρωση λαμβάνει χώρα παρουσία υγρασίας και ενός παράγοντα καθοδικής αναγωγής (αποδέκτη ηλεκτρονίων), συνήθως το οξυγόνο. Ο χύδην γαιάνθρακας διαθέτει και τα δύο, ως εκ τούτου ο κοινός χάλυβας διαβρώνεται, ανεξάρτητα από τη συμπύκνωση ή την περιεκτικότητα σε θείο. Η υγρασία των μελανών γαιανθράκων είναι συνήθως 5-9 % κ.β., επαρκής για την ύγρανση των επιφανειών του πλευρικού ελάσματος και για να επιτρέψουν τις αντιδράσεις διάβρωσης να προχωρήσουν.

Η διαδικασία της συμπύκνωσης του πλευρικού ελάσματος και η παρουσία ακαθαρσιών στο γαιάνθρακα (όπως το θείο και τα χλωριόντα) είναι δύο εκ των λόγων για τους οποίους οι ρυθμοί διάβρωσης στα κύτη φορτίων των bulk carriers είναι τόσο ευμετάβλητοι. Οι παρουσία τους καθορίζει πόσο συχνά και σε ποιο βαθμό η διάβρωση επιταχύνεται. Οι σημαντικότερες ακαθαρσίες στο γαιάνθρακα είναι το χλώριο και το πυριτικό θείο τα οποία αποτελούν πηγές για ιόντα Cl^- και SO_4^{2-} αντίστοιχα. Το πυριτικό θείο μπορεί επίσης να διευκολύνει το σχηματισμό οξέων. Το θείο παρίσταται στον γαιάνθρακα σε τρεις (3) μορφές. Τα σουλφίδια και οι μορφές οργανικού θείου δεσμεύονται εντός του γαιάνθρακα και δεν διυλίζονται έξω από αυτόν. Κατ' επέκτασιν μόνον το πυριτικό θείο και όχι η συνολική περιεκτικότητα σε θείο είναι σημαντικά όταν γίνεται σύγκριση της διαβρωτικότητας διαφορετικών ειδών γαιάνθρακα. Κατιόντα που διυλίζονται και επιδρούν στη διάβρωση περιλαμβάνουν τα Fe^{++} , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ και Na^+ .

Εν συνεχεία θα περιγραφεί ο μηχανισμός διάβρωσης του κοινού χάλυβα από το γαιάνθρακα. Η ανοδική διάλυση του χάλυβα διέπεται από την εξής σχέση:



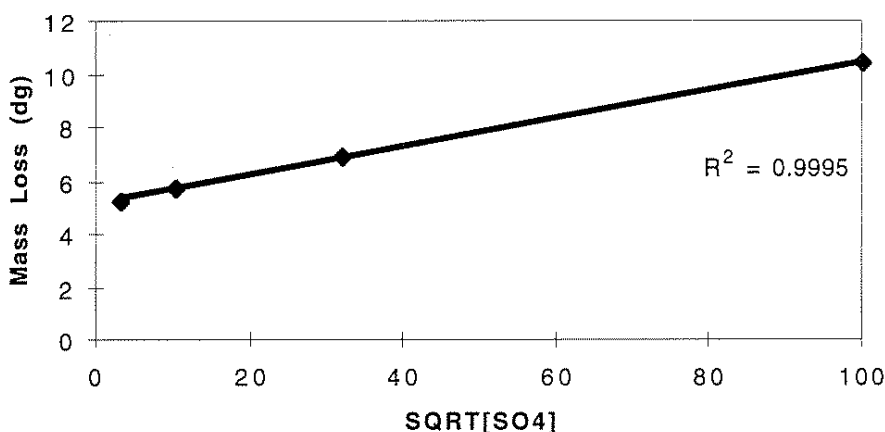
Η αντίστοιχη καθοδική αντίδραση περιγράφεται από μία εκ των δύο ακόλουθων σχέσεων, αναλόγως του τοπικού pH και της διαθεσιμότητας του οξυγόνου:



Λαμβάνοντας υπ' όψιν πώς τα κατιόντα και τα ανιόντα στα διυλισμένα προϊόντα του γαιάνθρακα μπορούν να πολώσουν τις άνωθεν αντιδράσεις, η αλλαγή στο ρυθμό διάβρωσης εξαιτίας της μεταβαλλόμενης συγκέντρωσης ιόντων μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά, με βάση την εξής προταθείσα σχέση:

$$ML = a \cdot [X^-]^n \quad (4)$$

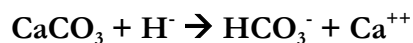
Όπου: ML η απώλεια μάζας, a,n σταθερές, $[X^-]$ η συγκέντρωση ανιόντων. Η σταθερά a εξαρτάται από τις μονάδες της απώλειας μάζας ενώ ποικίλλει και ανάλογα με το είδος της καθοδικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα. Η κινητική των εξισώσεων (2) και (3) διαφέρει στην παρουσία απιονισμένου ύδατος, ενώ η (2) εξαρτάται ισχυρώς και από το pH. Η τιμή του εκθέτη n συνήθως κυμαίνεται στην περιοχή 0,5 – 0,7. Παράδειγμα από πειραματικά δεδομένα παρίστανται στο κάτωθι διάγραμμα:



Διάγραμμα 42: Ρυθμός διάβρωσης ως προς τη συγκέντρωση σε ανιόντα θείου ^[36]

Η τελική τιμή του pH του εκπλύματος γαιάνθρακα εξαρτάται από τους σχετικούς ρυθμούς τόσο της αντίδρασης σχηματισμού οξέος όσο και της αντίδρασης σχηματισμού αλκαλίων, από τις αντίστοιχες κάτωθι σχέσεις:





Τελικά, η τιμή του pH του διαλύματος είναι συνάρτηση της σχετικής παροχής πυριτίου (FeS_2) και ανθρακικού άλατος (κυρίως του ανθρακικού ασβεστίου CaCO_3) στον γαιάνθρακα.

Τέλος, δεν πρέπει να αμεληθεί και η περίπτωση του σχηματισμού **σωματιδιακού γαλβανικού ζεύγους**. Ο γαιάνθρακας συνίσταται κατά 50 – 65% από άνθρακα. Το δυναμικό διάβρωσης του άνθρακα είναι 2,10 V σε αντίθεση με -0,44 V του κοινού χάλυβα, γεγονός που καθιστά εφικτή τη δημιουργία γαλβανικών κελιών. Η διαπίστωση αυτή ενισχύεται από μελέτη επί της διαβρωτικότητας των υλικών της διαδικασίας παραγωγής χάλυβα (Barr, 1997). Υπό όμοιες συνθήκες, κοινός χάλυβας καλυμμένος με κωκ διαβρώθηκε τουλάχιστον δύο (2) φορές γρηγορότερα από ότι καλυμμένος με άλλα υλικά όπως σιδηρομετάλλευμα, ιζήματα ή ασβεστόλιθο. Αυτό αποδόθηκε σε γαλβανικά φαινόμενα, καθότι ανάλυση του κάθε εκπλύματος (leachate) δεν έδειξε ότι το έκπλυμα του κωκ είχε σημαντική διαφορά στη συγκέντρωση χλωριδίων ή σουλφιδίων.

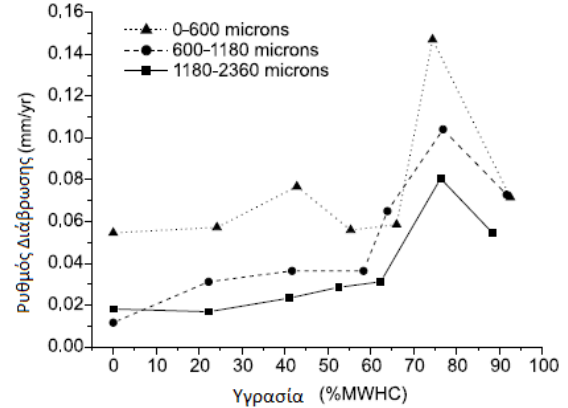
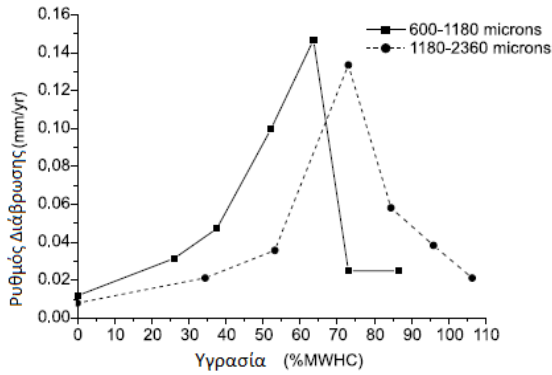
7.1.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διαβρωτικότητα του γαιάνθρακα ^{[32], [62], [63]}

Οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η **υγρασία** και το **μέγεθος του σωματιδίου** (κόκκου). Το 1997 οι Gardiner και Melchers επρόνευσαν πείραμα τόσο στο εργαστήριο όσο και επί φορτηγού πλοίου. Δύο (2) είδη κάρβουνου (τύπος A και B) κοσινίστηκαν σε τρεις (3) κατηγορίες μεγέθους κόκκου, 0-600, 600-1180 και 1180-2360 μm και στη συνέχεια χωρίστηκαν σε επτά (7) μερίδες, καθεμία εκ των οποίων δέχτηκε διαφορετική ποσότητα απιονισμένου νερού για να αποκτήσει την απαιτούμενη τιμή υγρασίας. Τα δοκίμια πάνω στα οποία αποτέθηκαν ήταν από κοινό χάλυβα (mild steel) και διάρκειά δοκιμής οι έξι (6) εβδομάδες στο εργαστήριο, σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 15°C.

Η διάβρωση είχε ομοιόμορφη όψη με λεπτό στρώμα προϊόντων αυτής επί των δοκιμίων. Η υγρασία εκφράζεται ως ποσοστό της μέγιστης ικανότητας κρατήσεως νερού (maximum water holding capacity – MWHC) από τη σχέση:

$$M(\%MWHC) = 100 \frac{M(\text{wt}\%)}{MWHC}$$

Τα δε αποτελέσματα παρίστανται στα κάτωθι διαγράμματα:



Διάγραμμα 43: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της υγρασίας για δύο είδη κάρβουνου [62]

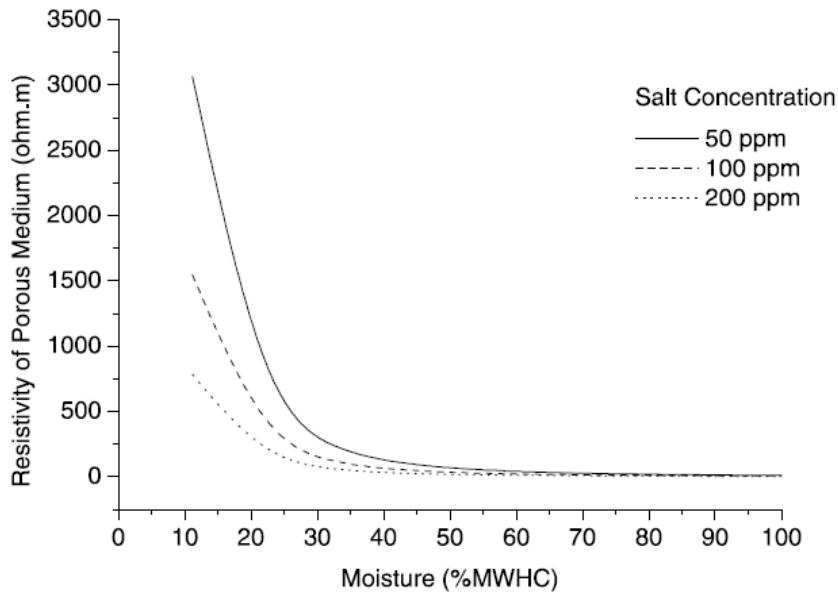
Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης εμφανίζεται για υγρασία 60-80% (MWHC). Ακόμη, είναι εμφανής η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στη διάβρωση, με λεπτότερους κόκκους να αυξάνουν τη διάβρωση.

Η υγρασία επηρεάζει δύο (2) παράγοντες της διαδικασίας της διάβρωσης: την **ηλεκτρική αγωγιμότητα** και τη **διάχυση του οξυγόνου**.

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα** υπολογίζεται από τις σχέσεις:

- $\frac{\sigma_b(\theta)}{\sigma_{b,sat}} = \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^b$ (Muallem, Friedman), όπου $\sigma_b(\theta)$ η ηλεκτρική αγωγιμότητα για υγρασία θ , $\sigma_{b,sat}$ η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο σημείο κορεσμού, $\frac{\theta}{\theta_{sat}}$ το κλάσμα υγρασίας κατ' όγκο και b ο συντελεστής μαιανδρότητας (tortuosity factor), που εδώ έχει την τιμή 2.5
- $\sigma = \Delta m^0 C - (A + B \Delta m^0) C^{1.5}$ (Debye, Huckel, Onsager), όπου σ η αγωγιμότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, Δm^0 η γραμμομοριακή αγωγιμότητα του άλατος για απεριόριστη διαλυτότητα (126.4 για το NaCl), A και B σταθερές (που για νερό έχουν τις τιμές $A=60.2$ και $B=0.229$ αντίστοιχα) και C η συγκέντρωση του άλατος.

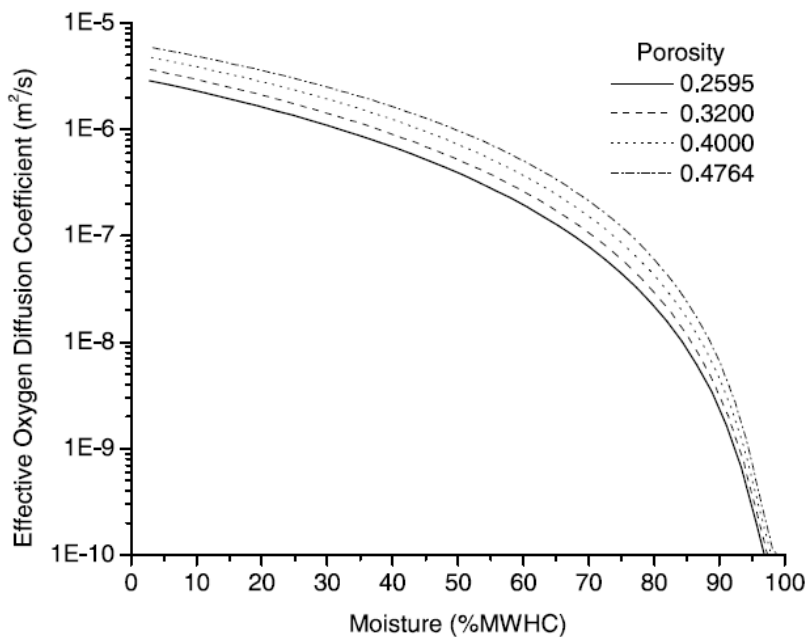
Αντιστρέφοντας την αγωγιμότητα προκύπτει η ηλεκτρική αντίσταση που παρατίθεται γραφικά (Gardiner, Melchers):



Διάγραμμα 44: Ηλεκτρική αντίσταση πορώδους μέσου συναρτήσει της υγρασίας ^[63]

Παρατηρούμε ότι η αντίσταση μειώνεται ραγδαία έως ότου η υγρασία αποκτήσει την κρίσιμη τιμή του 60% και στη συνέχεια δε μεταβάλλεται ουσιαστικά. Αυτό, διότι το ηλεκτρικό ρεύμα ακολουθεί πάντα τη διαδρομή της ελαχίστου αντιστάσεως και όταν η κρίσιμη τιμή της υγρασίας επιτευχθεί, το πορώδες μέσο έχει ήδη αποκτήσει μια συνεχή υδατική φάση περί των σωματιδίων του.

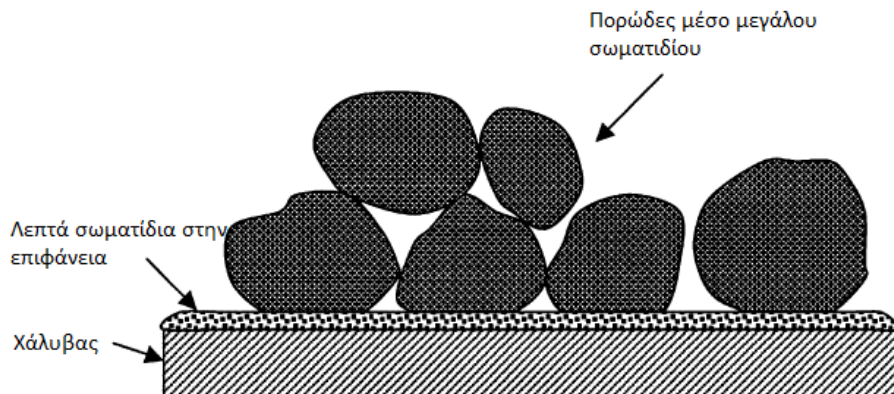
Αναφορικά δε με τη **διάχυση του οξυγόνου**, παρατηρούμε ότι αυτή μειώνεται κατά περίπου μία (1) τάξη μεγέθους ενώ η υγρασία αυξάνει από 0% σε 60% MWHC, και κατά περίπου τέσσερις (4) τάξεις μεγέθους όσο αυξάνει από 60% έως τον κορεσμό.



Διάγραμμα 45: Συντελεστής διάχυσης οξυγόνου συναρτήσει της υγρασίας ^[63]

Τελικά, ο συνολικός ρυθμός διάβρωσης καθορίζεται από το ρυθμό της μεταφοράς φορτίου των ανοδικών ή καθοδικών αντιδράσεων ή το ρυθμό της μεταφοράς μάζας του καθοδικού αντιδρώντος (οξυγόνου) προς την διαβρωθείσα επιφάνεια ή του καθοδικού προϊόντος από τη διαβρωθείσα επιφάνεια. Η συνέχεια της υγρής φάσης καθορίζει τα σχετική επίδραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της διάχυσης του οξυγόνου στη διαδικασία της διάβρωσης. Για χαμηλά ποσοστά υγρασίας, η ηλεκτρική αγωγιμότητα επικρατεί στο ρυθμό διάβρωσης ενώ για υψηλά ποσοστά υγρασίας επικρατεί η διάχυση του οξυγόνου.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ο γαιάνθρακας όταν είναι σε μορφή μεγάλου σωματιδίου, καλύπτεται από λεπτόκοκκο υλικό. Κατά συνέπεια, στρώμα λεπτόκοκκου γαιάνθρακα συνήθως επικάθεται στις επιφάνειες σε επαφή με το φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι το κύτος φορτίου έχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο και εν τέλει κυριαρχεί στο μηχανισμό διάβρωσης. Ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζεται και σε φορτία σιδηρομεταλλεύματος, που θα μελετηθούν στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 44: Επικάλυψη επιφάνειας χάλυβα από λεπτόκοκκες αποθέσεις του πορώδους μέσου [63]

Το πείραμα επί πλοίου έλαβε χώρα στην κάτω περιοχή ενός κύτους φορτίου επί bulk carrier μεγέθους capesize. Δοκίμια κοινού χάλυβα από το ίδιο ακριβώς έλασμα με τα εργαστηριακά τοποθετήθηκαν προ της φορτώσεως με κάρβουνο στην Αυστραλία, το οποίο εκφορτώθηκε στην Ιαπωνία, εν συνεχεία μετέβη με έρμα στη Δυτ. Αυστραλία από όπου απέπλευσε με φορτίο σιδήρου. Τα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί επί κλίμακας στην κάτω έδραση της προωραίας φρακτής του κύτους και είχαν απομονωθεί με παρεμβύσματα από PVC προς αποφυγήν γαλβανικών φαινομένων. Μετά το πέρας των διαδρομών τα δοκίμια εξήχθησαν και η μέση τιμή του ρυθμού διάβρωσης ήταν 0,10 mm/έτος και η τυπική απόκλιση 0,013 mm/έτος.

7.2 Σιδηρομετάλλευμα (Iron Ore) [2], [32], [36], [62] – [64]

Το φορτίο σιδηρομεταλλεύματος συνήθως φορτώνεται σε στάθμη περίπου όσο η κορυφή των κάτω εδράσεων και συχνά καλύπτεται και η κάτω σύνδεση των αγκώνων με τους πλευρικούς νομείς. Συνήθως φορτώνεται σε εναλλασσόμενα κύτη φορτίου λόγω του υψηλού ειδικού του βάρους. Αυτό γίνεται για να

εξομαλυνθεί η κίνηση του πλοίου σε διατοιχισμό, λόγω ανύψωσης του κέντρου βάρους του, και επίσης για την διευκόλυνση της διαδικασίας φορτοεκφόρτωσης.

7.2.1 Η διαβρωτική δράση του σιδήρου

Τα σιδηρομεταλλεύματα είναι συνήθως σχετικά ξηρά. Η περιεκτικότητά των σε υγρασία είναι πολύ χαμηλή, υπάρχει όμως άπλετο διαθέσιμο οξυγόνο. Υπό τις συνθήκες αυτές η διάβρωση θα είναι αμελητέα. Όμως, η διάβρωση θα λάβει χώρα εάν οι επιφάνειες είναι διαβρεγμένες από προηγούμενο καθαρισμό ή από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις κατά τη φόρτωση. Εξετάζοντας τη διαδικασία της διάβρωσης παρουσία σιδηρομεταλλεύματος και υγρασίας, παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι το μοναδικό στοιχείο στο σιδηρομετάλλευμα που θεωρείται επιθετικό είναι το θείο. Συνήθως όμως η συγκέντρωση του θείου ανέρχεται μόνο σε ίχνη, λιγότερο από 0,1%. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το μέταλλευμα σιδήρου είναι χημικά αδρανές. Υπάρχει σαν αιματίτης (Fe_2O_3) ή μαγνητίτης (Fe_3O_4) που είναι και κύριο συστατικό της σκουριάς του κοινού χάλυβα. Κατ' επέκτασιν το σιδηρομετάλλευμα δεν θα επιταχύνει τη διάβρωση λόγω της χημικής του σύστασης.

Η διαβρωτική δράση του σιδηρομεταλλεύματος έγκειται κυρίως στην παρουσία κελιών **διαφορικού αερισμού** στα σημεία επαφής των σωματιδίων του μεταλλεύματος με το χάλυβα. Ο διαφορικός αερισμός στα σημεία επαφής προκαλεί διάβρωση εξαιτίας του ότι η περιοχή που έχει περιορισμένο οξυγόνο γίνεται ανοδική ως προς την περιοχή που εκτίθεται στο οξυγόνο. Αυτό αποδίδεται στη μείωση της κινητικής της καθοδικής αντίδρασης (αναγωγή οξυγόνου) στην περιοχή περιορισμένου οξυγόνου.

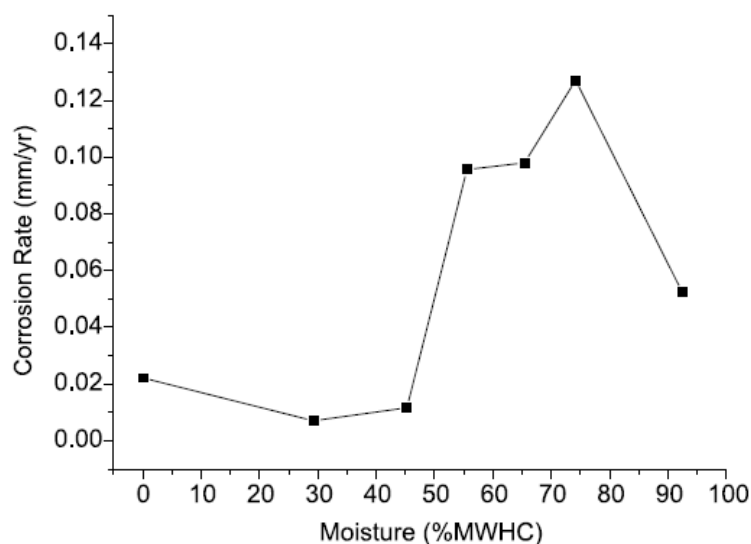
Το μέταλλευμα σιδήρου είναι εξαιρετικά εκτριβώδες (abrasive) λόγω της υψηλής του πυκνότητας και της σκληρότητας αυτού. Η εκτριβώδης φύση του εμποδίζει τη χρήση προστατευτικών επιστρωμάτων στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και στις κάτω πλευρικές εδράσεις. Πρόωρη φθορά επιστρωμάτων παρατηρείται στις κάτω συνδέσεις των αγκώνων με τους νομείς του πλευρικού ελάσματος. Η εκτριβώδης δράση του σιδηρομεταλλεύματος θεωρείται σταθερή για μεταλλεύματα διαφορετικής προελεύσεως, όχι όμως και για διαφορετική μορφή «κόκκου» (π.χ μέταλλευμα μορφής πέλλετ και λεπτόκοκκο μέταλλευμα έχουν διαφορετική δράση).

Η εκφόρτωση του σιδηρομεταλλεύματος επίσης απαιτεί τη χρήση μεγάλων αρπάγων που ζυγίζουν έως τριάντα (30) τόνους. Η χρήση τους καθώς και άλλου είδους μηχανολογικού εξοπλισμού (όπως υδραυλικά σφυριά, μπουλντόζες κλπ) προκαλεί μηχανικές ζημιές στην μεταλλική κατασκευή του κύτους φορτίου, ως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αλλά λόγω του υψηλού βάρους αυτού καθεαυτού του σιδήρου, τα στοιχεία της κατασκευής των κυτών φορτίου υφίστανται και μηχανική ζημία.

7.2.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη διαβρωτικότητα του σιδήρου

Στην προηγούμενη παράγραφο ανεφέρθη το πείραμα των Gardiner και Melchers. Στο πείραμα αυτό ο σίδηρος κοσινίστηκε σε μέγεθος 600-1180 μm . Στο διάγραμμα που ακολουθεί βλέπουμε τα

αποτελέσματα για το σίδηρο, όπου και εδώ εντοπίζεται ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης για περιεκτικότητα υγρασίας 70–80% MWHC. Συμπερασματικά, καταλήγουμε ότι για να ελαχιστοποιηθεί η διάβρωση είναι επιθυμητό η υγρασία του φορτίου να διατηρείται μικρότερη από 50% και μεγαλύτερη από 80% MWHC, τόσο στην περίπτωση του σιδηρομεταλλεύματος όσο και του γαιάνθρακα



Διάγραμμα 46: Ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της υγρασίας για σιδηρομετάλλευμα [62]

7.3 Σιτηρά (Grain) [1], [41], [65]

Σύμφωνα με τον SOLAS (Chapter VI – Carriage of Cargoes – Part C – Carriage of Grains – Regulation 8), ο όρος **σιτηρά** περιλαμβάνει το σιτάρι, τον αραβόσιτο, τη βρώμη, τη σίκαλη, το κριθάρι, το ρύζι και διάφορους σπόρους και επεξεργασμένες μορφές αυτών των οποίων η συμπεριφορά ομοιάζει αυτής των σιτηρών στη φυσική τους κατάσταση.

Τα σιτηρά ανήκουν στην κατηγορία του αδρανούς φορτίου, όσον αφορά τη διαβρωτική τους ικανότητα. Γενικά, δεν αποτελούν διαβρωτικό παράγοντα για τα κύττα φορτίου. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση της φόρτωσης νωπών φορτίων σιτηρών, σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία. Ειδικά στην περίπτωση όπου το πλοίο είναι διπλής γάστρας, η θερμοκρασία θα διατηρηθεί ανεβασμένη για το μεγαλύτερο τμήμα του ταξιδιού. Έτσι, ο συνδυαστικός παράγοντας της θερμοκρασίας με την υγρασία θα προκαλέσει αίτιο διάβρωσης του κύτους, ιδίως σε περιοχές ρήξης του επιστρώματος. Ακόμη, τα φορτία σιτηρών λόγω των κόκκων τους διεισδύουν σε περιοχές όπως οι σεντίνες και η συσσώρευση τους προκαλεί προβλήματα καθώς σαπίζουν και οδηγούν στην πρόκληση μικροβιολογικής διάβρωσης, για το λόγο αυτό πρέπει πιθανά σημεία εισόδου σιτηρών να μονώνονται κατά τρόπο ώστε να είναι «στεγανά» από σιτηρά (**grain tightness**) αλλά να υπάρχει διαπερατότητα από το νερό για αποστραγγίσεις κλπ. Αυτό επιτυγχάνεται με υλικά όπως πολυαιθυλένιο, λινάτσες, χαρτί ειδικού τύπου κ.ά., τα οποία χονδρικά λειτουργούν ως φίλτρα ή σίτες.

Πρόκειται για ιδιαίτερα ευπαθές φορτίο και μπορεί να σαπίσει κατά τον πλου, προκαλώντας αξιώσεις (claims) εκ μέρους των ναυλωτών. Για το λόγο αυτό συνήθως ψεκάζεται για την αποφυγή αναπτύξεως μικροοργανισμών. Οι ψεκασμοί γίνονται υπό σαφείς οδηγίες και κανονισμούς, γιατί δύνανται να αποτελέσουν θανατηφόρο κίνδυνο για τα μέλη του πληρώματος. Προσέτι, είναι πολύ πιθανό το φορτίο σιτηρών να προσβληθεί από ίχνη σκουριάς στα τοιχώματα του κύτους φορτίου αλλά και από υπολείμματα προηγούμενου φορτίου. Για το λόγο αυτό απαιτείται διεξοδικός καθαρισμός σύμφωνα με την προδιαγραφή “grain clean”. Γενικά οιοδήποτε φορτηγό πλοίο μεταφέρει σιτηρά υποχρεούται να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του Διεθνούς Κανονισμού Σιτηρών (**International Grain Code**).



Εικόνα 25: Φόρτωση σιτηρών επί bulk carrier ^[41]

Σημαντικό πρόβλημα των φορτίων σιτηρών είναι η τάση τους να μετατίθενται εντός του κύτους, προκαλώντας ανεπιθύμητη και δυνητικά πολύ επικίνδυνη εγκάρσια κλίση στο πλοίο. Για το λόγο αυτό, ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στην ευστάθεια του πλοίου για φορτία σιτηρών, τόσο κατά τη σχεδίαση του πλοίου όσο και στους εκάστοτε λιμένες φόρτωσης ώστε να φορτωθεί κατά τρόπο ασφαλή, σύμφωνα με το εγχειρίδιο φορτώσεώς του.

7.4 Θειάφι ^{[41], [65] – [68]}

7.4.1 Γενικά

Το θειάφι υπάρχει σε άπλετες ποσότητες στο φλοιό της Γης και αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη για τη χημική βιομηχανία. Κύρια πηγή του είναι ως υπο-προϊόν επεξεργασίας υδρογονανθράκων (πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Κύρια χρήση του είναι η παραγωγή θειικού οξέως το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται για την παρασκευή λιπασμάτων. Δεκάδες εκατομμύρια τόνοι θειαφιού μεταφέρονται ετησίως από φορτηγά πλοία.



Εικόνα 26: Εκφόρτωση θειαφιού από κύτος φορτίου με εμφανείς εσοχές του εσωτερικού πυθμένα ^[65]

7.4.2 Διάβρωση

Το θειάφι φορτώνεται σε λεπτόκοικη συνήθως μορφή, αλλά αρκετές φορές και σε μορφή σβώλων ή χονδροκόικη. Ανεξάρτητα από τη μορφή του, όταν το θειάφι διαβρέχεται μπορεί δυναμικά να προκαλέσει εκτεταμένη διάβρωση του χάλυβα. Ο ΙΜΟ απαιτεί το θειάφι να φορτώνεται μόνο κατόπιν λήψης επαρκών μέτρων προστασίας από τη διάβρωση. Στις δεκαετίες του 1970 και 1980 συνέβησαν αρκετά περιστατικά ζημίας σε αμπάρια φορτηγών πλοίων που μετέφεραν θειάφι. Διεξαχθείσες έρευνες πιστοποίησαν ότι όταν το θειάφι είναι εντελώς στεγνό δεν αντιδρά με το χάλυβα, ο συνδυασμός του όμως με υγρασία και με κοινό χάλυβα ισοδυναμεί με διάβρωση. Χαρακτηριστική μορφή της διάβρωσης προκληθείσας από φορτία θειαφιού είναι αυτή της διάβρωσης με βελονισμούς, η μορφή των οποίων μάλιστα είναι

Δύο είναι οι κύριες διαδικασίες διάβρωσης, η **όξινη** και η **ηλεκτροχημική**.

Κατά την όξινη διάβρωση συμβαίνει η αντίδραση ανάμεσα σε ένα οξύ και στοιχειακό σίδηρο (χάλυβα). Το οξύ στην προκειμένη περίπτωση είναι το θειικό οξύ (H_2SO_4). Η διάβρωση δεν είναι σημαντική, εκτός από την περίπτωση που οι συνθήκες είναι αρκετά όξινες (τιμές του pH μικρότερες ή ίσες του 2), κάτι που δε συναπαντάται συχνά στην περίπτωση φορτίων θειαφιού.

Η ηλεκτροχημική διαδικασία περιλαμβάνει μια αντίδραση οξειδοαναγωγής ανάμεσα στο σίδηρο και στο θειάφι. Οι απαιτήσεις για να λάβει χώρα αυτή η αντίδραση είναι αφενός το θειάφι να είναι σε άμεση επαφή με το σίδηρο και αφετέρου το θειάφι να είναι βρεγμένο. Κυριότερα χαρακτηριστικά της ηλεκτροχημικής αντίδρασης είναι τα κάτωθι:

- Η αντίδραση ευνοείται σε αναερόβιες συνθήκες και επιδεικνύει αυτοκαταλυτική συμπεριφορά, ήτοι τα προϊόντα της διάβρωσης προκαλούν περαιτέρω διάβρωση.
- Η διάβρωση έχει μέγιστο ρυθμό σε ουδέτερες τιμές του pH.
- Η θερμοκρασία ευνοεί την αντίδραση και ο ρυθμός διάβρωσης χονδρικά διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά $10^\circ C$.

- Η παρουσία χλωριόντων ευνοεί τη διάβρωση.
- Το αρχικό υπο-προϊόν της διάβρωσης είναι σουλφίδιο του σιδήρου (FeS), μία μελανή/καφέ ουσία αυθορμητώς αναφλέξιμη κατά την επαφή της με οξυγόνο.



Εικόνα 27: Διάβρωση με βελονισμούς προκληθείσα σε έλασμα εσωτερικού πυθμένα κατόπιν 85 ημερών επαφής με φορτίο θείου^[67]

Τα περισσότερα φορτία θειαφιού φορτώνονται βρεγμένα και κατ' επέκτασιν συνιστούν διαβρωτικό κίνδυνο. Αυτό συμβαίνει επειδή το προϊόν συνήθως αποθηκεύεται σε μεγάλους υπαίθριους σωρούς και επιπρόσθετα σε πολλούς λιμένες είναι συνήθης πρακτική ο ψεκασμός του με γλυκό νερό κατά τη φόρτωση για να αποφευχθεί η δημιουργία κόνεως. Επί του πλοίου, συνδυασμός νερού με λεπτή σκόνη θειαφιού σταδιακά φιλτράρονται προς τον εσωτερικό πυθμένα και δημιουργούν ένα ισχυρά διαβρωτικό ως προς το χάλυβα σύστημα που καθιστά επιτακτική τη λήψη μέτρων προστασίας. Η θεμελιώδης αρχή της προστασίας ως προς τη διάβρωση επαφίεται στην παρουσία ενός εντελώς αδιάρρηκτου φυσικού φράγματος ανάμεσα στο χάλυβα και στο θειάφι, το οποίο εμποδίζει την άμεσο επαφή με το χάλυβα και συνεπώς τη διάβρωση.



Εικόνα 28: Ζημία στο κάτω τμήμα πτυχωτής φρακτής, διακρίνεται εκτεταμένη διάβρωση στα σημεία όπου το επίστρωμα είχε απολεσθεί ^[66]

7.4.3 Προετοιμασία κυτών φορτίου προ της φορτώσεως

Τα αμπάρια πρέπει να καθαρίζονται σύμφωνα με το πρότυπο καθαριότητας σιτηρών (grain clean). Τυχόν παρουσία υπολειμμάτων προηγούμενου φορτίου επηρεάζουν το προστατευτικό επίστρωμα καθώς και τις προδιαγραφές καθαρότητας του θειαφιού που πρέπει να πληροί ο αποστολέας. Τα βήματα καθαρισμού είναι τα εξής:

- Διεξοδική πλύση με θαλάσσιο ύδωρ
- Διεξοδικό ξέπλυμα με γλυκό ύδωρ για να απομακρυνθούν άλατα χλωριόντων.
- Τα επιστρώματα συνιστούν σημαντικό συστατικό της προστασίας έναντι της διάβρωσης και ζημιωθείσες περιοχές αυτών πρέπει να επισκευάζονται. Προσέτι, χαλαρή σκουριά ή φολίδες σκουριάς πρέπει να απομακρύνονται καθώς το θειάφι μπορεί εύκολα να αποκτήσει πρόσβαση στο χάλυβα σε τέτοιες περιοχές.
- Οι υδροσυλλέκτες (σεντίνες) πρέπει να καλύπτονται με λινάτσες (burlap).

7.4.4 Ασβέστωμα κυτών φορτίου







Το ασβέστωμα (lime washing) είναι η πλέον συνήθης μέθοδος προστασίας έναντι διάβρωσης και οι εναλλακτικές μέθοδοι προστασίας αναπτύσσονται. Συνεισφέρει στη μετρίαση του διαβρωτικού αποτελέσματος καθώς και στη μείωση του ρυθμού της διάβρωσης, χωρίς ωστόσο να εξαλείφει πλήρως την πιθανότητα εμφάνισέως της. Οι κύριες δράσεις της είναι δύο (2):

- Παρέχει φυσικό φράγμα ανάμεσα στο θειάφι και τη μεταλλική κατασκευή του κύτους φορτίου
- Η αλκαλική φύση του ασβέστη εξουδετερώνει τα οξέα που ευρίσκονται στο θειάφι.

Συνήθης προετοιμασία είναι η μίξη του ασβέστη με νερό σε αναλογία 60 – 90 κιλά ασβέστη προς 200 λίτρα νερού. Όταν το διάλυμα ψεκάζεται πάνω στα τοιχώματα του κύτους, το λευκό αυτό αιώρημα πρέπει να καλύψει πλήρως όλες τις επιφάνειες που ενδέχεται να εκτεθούν στο θειάφι και τη σκόνη αυτού, συμπεριλαμβανομένων των επιστρωμάτων. Καθώς το αιώρημα στεγνώνει, ο ασβέστης (υδροξείδιο του ασβεστίου) αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα του αέρα και σχηματίζει στρώμα αδιαφανούς λευκού ανθρακικού ασβεστίου. Αυτό το στρώμα είναι σημαντικά σκληρότερο του ασβέστη και συνιστά το πραγματικό προστατευτικό επίστρωμα. Κατά συνέπεια, το αιώρημα ασβέστη πρέπει πάντα να διαθέτει επαρκή χρόνο στέγνωσης, σημειούται δε ότι ο βρεγμένος ασβέστης δεν παρέχει προστασία από τη διάβρωση.

Κατά την εξουδετέρωση των οξέων, το στρώμα ανθρακικού ασβεστίου σταδιακά καταναλίσκεται και η προστατευτική του δράση φθίνει. Ένα απλό προστατευτικό στρώμα αναμένεται να διαρκέσει τουλάχιστον τριάντα (30) ημέρες, ενίοτε όμως υπερβαίνει το χρόνο αυτό, ιδίως σε ψυχρά κλίματα. Κρίνεται, λοιπόν, επιτακτικό να λαμβάνεται υπ' όψιν η προβλεπόμενη διάρκεια του πλου και να αποφεύγονται τυχόν καθυστερήσεις.

Κατά τη διάρκεια των πλώνων, οι υδροσυλλέκτες πρέπει να απαντλούνται τακτικά ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση (όξινου) ύδατος επί του εσωτερικού πυθμένα. Κατόπιν της εκφορτώσεως του θειαφιού, είναι σημαντικό όλα τα κατάλοιπα του υλικού αυτού να απομακρυνθούν εντελώς από τα κύτη φορτίου καθώς και από τους υδροσυλλέκτες.

UNPROTECTED MILD STEEL	LIMEWASH PROTECTED
 <p>2 Weeks Weight Loss = 2.93 g (15.593%)</p>	 <p>2 Weeks Weight Loss = 0.939 g (5.038%)</p>
 <p>4 Weeks Weight Loss = 4.279 g (22.597%)</p>	 <p>4 Weeks Weight Loss = 2.723 g (14.582%)</p>
 <p>6 Weeks Weight Loss = 9.51 g (50.604%)</p>	 <p>6 Weeks Weight Loss = 5.542 g (29.471%)</p>

Εικόνα 29: Σύγκριση διάβρωσης κοινού χάλυβα εκτεθειμένου σε θειάφι, χωρίς και με επίστρωση ανθρακικού ασβεστίου ^[68]

7.5 Αλάτι ^[41]

Το αλάτι είναι πολύ επιθετικό προϊόν για τη χαλύβδινη κατασκευή και τα επιστρώματα. Περιέχει περίπου 3% υγρασία και είναι ιδιαίτερος υγροσκοπικό. Το κοινό αλάτι ή χλωριούχο νάτριο εξάγεται από τη θάλασσα, που περιέχει περίπου 3,5% από αυτό, μέσω μεθόδου εξατμίσεως. Σε μακρινά ταξίδια, περίπου το 5% του βάρους του φορτίου αλατιού χάνεται λόγω εξατμίσεως. Το αλάτι είναι υψηλά διαλυτό. Σε περίπτωση εισροής υδάτων στα κύττα φορτίου, υπάρχει κίνδυνος απώλειας της ευστάθειας του πλοίου λόγω διάλυσης του αλατιού στο νερό με επακόλουθη μετακίνηση φορτίου.

Προ της φορτώσεως αλατιού σε ένα κύτος συνηθίζεται το ασβέστωμα αυτού. Έρευνες έχουν δείξει ότι 100% προστασία του επιστρώματος είναι καλός αποτρεπτικός παράγοντας για τη διαβρωτική επίδραση του φορτίου αλατιού. Κατόπιν εκφορτώσεως, απαιτείται προσεκτικός καθαρισμός του κύτους από τα

υπολείμματα του αλατιού, με ειδική προσοχή στα δυσπρόσιτα σημεία των ενισχυτικών και στα φρεάτια σεντίνας (bilge wells). Οι δε αντλίες σεντίνας απαγορεύεται να χρησιμοποιηθούν για την έκπλυση του κύτους γιατί υπολείμματα αυτού το φορτίου δύνανται να τις αχρηστεύσουν πλήρως.

7.6 Λοιπά διαβρωτικά φορτία ^{[40], [69], [84]}

- **Θειικό Αμμώνιο** (Ammonium Sulfate) $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$. Είναι ανόργανο άλας με κύρια εμπορική χρήση αυτή σε λιπάσματα. Περιέχει 21% Άζωτο και 24% Θείο. Καίτοι το φορτίο αυτό λογίζεται ως μη επικίνδυνο, μπορεί να προκαλέσει ισχυρή διάβρωση των νομέων, του πλευρικού ελάσματος και των φρακτών του κύτους, στην περίπτωση συμπύκνωσης. Απαιτείται να διατηρείται στεγνό και να γίνεται διεξοδικός καθαρισμός του κύτους κατόπιν της εκφορτώσεώς του.
- **Μονο-αμμωνιακό Φωσφάτο** (Monoammonium Phosphate - M.A.P.). Πρόκειται για άοσμο φορτίο με τη μορφή καφέ-φαιών κόκκων. Είναι ιδιαίτερα υγροσκοπικό. Το pH του είναι 4.5 και παρουσία υγρασίας μπορεί να είναι ιδιαίτερος διαβρωτικό. Προκαλεί αποσύνθεση των λιναστών ή του καμβά προστασίας των αποστραγγίσεως σεντίνας και για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η συνεχής μεταφορά του φορτίου για μεγάλο χρονικό διάστημα. Και εδώ απαιτείται το φορτίο να παραμένει στεγνό, και να καθαρίζονται πλήρως τα κατάλοιπα αυτού καθώς και της κόνεώς του.
- **Ποτάσσα** (Potash) $[\text{K}_2\text{CO}_3]$. Είναι χρώματος καφέ, ροζ ή λευκού και παράγεται σε κοκκώδεις κρυστάλλους. Είναι άοσμη και υγροσκοπική. Κύρια χρήση της η παρασκευή λιπασμάτων. Θεωρείται φορτίο ήπιας διαβρωτικότητας και πρέπει το κύτος να καθαρίζεται διεξοδικά κατόπιν της εκφορτώσεως, εκτός εάν εν συνεχεία φορτωθεί συναφές φορτίο.
- **Χλωριούχο Κάλιο** (Potassium Chloride) $[\text{KCl}]$. Και εδώ κύρια χρήση του είναι στη βιομηχανία λιπασμάτων. Εάν βραχεί μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη διάβρωση. Είναι ιδιαίτερα υγροσκοπικό και πρέπει μετά την εκφόρτωση το κύτος να καθαρίζεται πλήρως από τα υπολείμματα του καθώς και να πλένεται προσεκτικά.
- **Πυρίτης** (Calcined Pyrites). Συνιστά το κατάλοιπο προϊόν της χημικής βιομηχανίας όπου τα σουλφίδια μετάλλου χρησιμοποιούνται είτε για την παραγωγή θειικού οξέως είτε για την ανάκτηση στοιχειακών μετάλλων (χαλκός, μόλυβδος, ψευδάργυρος κλπ). Η οξύτητα του καταλοίπου αυτού είναι σημαντική στην παρουσία νερού ή υγρού αέρα, με τιμές pH να κυμαίνονται ανάμεσα στο 1.3 και το 2.1. Είναι ισχυρώς διαβρωτικό προς το χάλυβα όταν είναι βρεγμένο.
- **Υπερ-φωσφάτα** (Superphosphates). Είναι χρώματος φαιό-λευκού και υγροσκοπικό, με περιεκτικότητα υγρασίας 0-7 %. Πρέπει να διατηρείται στεγνό κατά το μέτρο του εφικτού. Υγρασία από τυχόν συμπύκνωση, θέρμανση φορτίου ή διαρροών εκ των στομιών των κυτών μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία φωσφορικού οξέως που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση της χαλύβδινης κατασκευής. Τα κεκλιμένα ελάσματα των πλευρικών δεξαμενών καθώς και ο πυθμένας των κυτών όπου θα φορτωθεί το εν λόγω φορτίο πρέπει να αβεστωθεί ή να επιστρωθεί για την αποφυγή διαβρώσεως. Σημειούται ότι και αυτό το φορτίο, όπως και το μονοαμμωνιακό φωσφάτο, προκαλεί την αποσύνθεση των λιναστών ή του καμβά προστασίας των αποστραγγίσεως σεντίνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

8.1 Επίδραση μηχανικών δράσεων ^{[12], [23], [70]}

Δύο είναι οι κατηγορίες δράσης που ευθύνονται για την πρόκληση ζημιών στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου:

- Χημικές ή ηλεκτροχημικές δράσεις που συνιστούν τη διάβρωση (Corrosion – **C**)
- Μηχανικές δράσεις, ήτοι τάσεις ή παραμορφώσεις (Stresses/Strains – **S**)

Οι ανωτέρω δράσεις αλληλεπιδρούν στην πρόκληση της ζημίας. Όλες σχεδόν οι διαβρωμένες κατασκευές υποβάλλονται σε τάσεις και όλες σχεδόν οι κατασκευές υπό τάση λειτουργούν σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Μπορούμε, λοιπόν, να θεωρήσουμε κάθε ζημία (Damage – **D**) ως:

$$\mathbf{D} = (\mathbf{C}+\mathbf{S})_{\mathbf{D}}.$$

Αμιγώς μηχανική ή αμιγώς διαβρωτική ζημία είναι ασυνήθιστη. Στην περίπτωση κενού ή αδρανούς περιβάλλοντος η ζημία είναι αμιγώς μηχανική, **C** = 0, ενώ για πολύ χαμηλά επίπεδα τάσης η ζημία είναι αμιγώς διαβρωτική, **S** = 0.

8.1.1 Επίδραση των τάσεων στο ρυθμό διάβρωσης:

Στη ναυπηγική βιομηχανία έχει παρατηρηθεί η αύξηση των ρυθμών διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου, αποδιδόμενη σε σημαντικό λυγισμό των ελασμάτων ενός πλοίου που προκαλούν την απώλεια των προστατευτικών στρώσεων σκουριάς. Αυτό έχει εξέχουσα σημασία για τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα του πλοίου που υπόκεινται σε φορτοεκφόρτωση και διάβρωση και ιδίως όταν προστατευτικά επιστρώματα είτε δεν έχουν εφαρμοστεί είτε είναι αναποτελεσματικά λόγω πτωχής συντήρησης.

Τα επιστρώματα αυτά καθαυτά δύνανται να υποστούν αστοχία εξαιτίας των τάσεων. Οι αστοχίες αυτές προκύπτουν σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση τάσεων και συνιστούν σημεία εκκίνησης διάβρωσης. Οι αστοχίες επιστρωμάτων που αποδίδονται στην επιβολή τάσεων αναγνωρίζονται από την τοποθεσία τους ή την παρουσία επανάληψης της ίδιας αστοχίας στο ίδιο σημείο κατά μήκος μιας κατασκευής, ως βλέπουμε στην εικόνα που ακολουθεί.

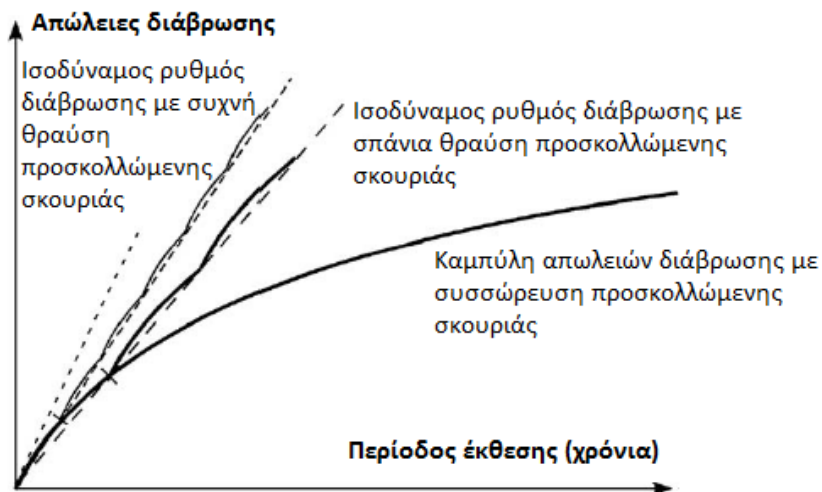


Εικόνα 30: Αστοχία επιστρωμάτων προκληθείσα από τάσεις ^[23]

Τα δεδομένα μετρήσεων διάβρωσης σε διάφορα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής δείχνουν ότι οι ρυθμοί διάβρωσης για κάποια ελάσματα φθίνουν με το χρόνο ενώ για άλλα επιταχύνονται. Στην τελευταία περίπτωση, θεωρείται ότι σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι δράσεις (π.χ. εξωτερικά φορτία) ή τα αποτελέσματα αυτών (π.χ. παραμόρφωση) που εφαρμόζονται στα δομικά στοιχεία, σε συνδυασμό με την επίδραση του κυματισμού καθώς και τη φορτοεκφόρτωση φορτίου. Οι δράσεις αυτές, δηλαδή, επιταχύνουν το ρυθμό διάβρωσης γιατί προκαλούν ζημιές στο στρώμα σκουριάς στις επιφάνειες ελασμάτων, επιτρέποντας τη συνεχιζόμενη προσβολή από το διαβρωτικό περιβάλλον.

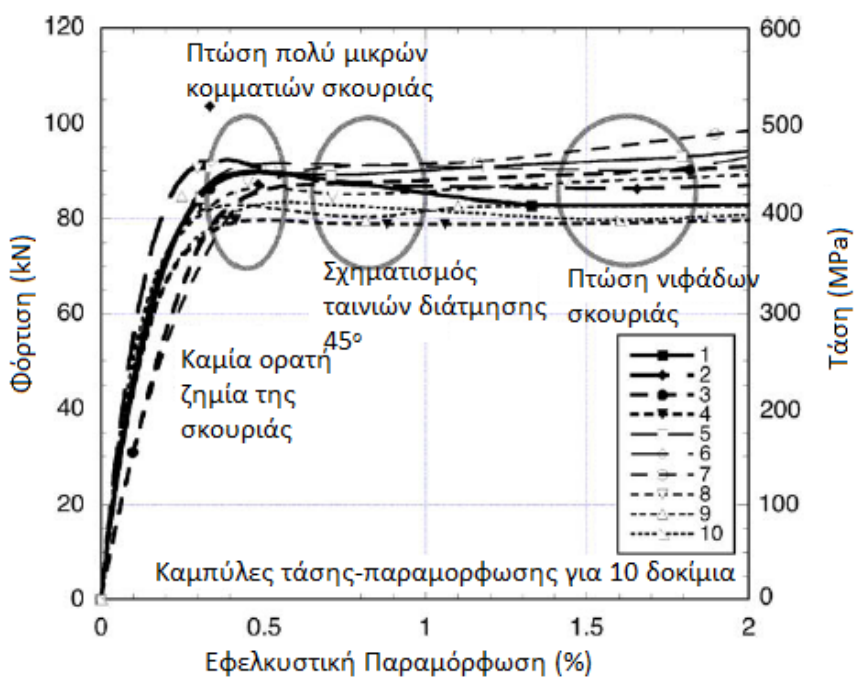
Σύμφωνα με το συμβατικό μοντέλο της θαλάσσιας διάβρωσης του χάλυβα, προσκολλώμενα στρώματα σκουριάς αναστέλλουν τη διάχυση του οξυγόνου στη διαβρωθείσα επιφάνεια και η διάχυση αυτή γίνεται συνεχώς και πιο δύσκολη με τη συσσώρευση προϊόντων διάβρωσης. Το προσκολλώμενο στρώμα σκουριάς σχετίζεται με το μαγνητίτη (Fe_3O_4) και είναι συνήθως ψαθυρό, δηλαδή εύθραυστο από ικανά επίπεδα επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και ιδίως κατά μήκος της διεπιφάνειας σκουριάς – χαλύβδινου υποστρώματος μιας και τα μέτρα ελαστικότητας του χάλυβα και της σκουριάς είναι διαφορετικά. Επιπλέον, μιας και το στρώμα σκουριάς έχει ανομοιομορφο πάχος, η ρωγμάτωση αυτού είναι συνήθως τοπική και τυχαία. Αυτό, με τη σειρά του είναι πιθανό να προκαλέσει τοπική ελάττωση στην αντίσταση της διάχυσης του οξυγόνου και κατ' επέκτασιν την παρουσία διαφορικού αερισμού ο οποίος οδηγεί σε επιθετική τοπική διάβρωση.

Ειδικότερα για λεπτότερα στρώματα σκουριάς, οι εφαρμοζόμενες παραμορφώσεις προκαλούν ένα λεπτότερο αλλά και πάλι τυχαίο πλέγμα ρωγματώσεων ή θραύσεων της επιφάνειας, επιτρέποντας περισσότερο διάσπαρτη αλλά εκ νέου ανομοιομορφη πρόσβαση του οξυγόνου. Αναπτύσσονται έτσι πολλαπλά τοπικά κελιά διαφορικού αερισμού, μικρότερης όμως εντάσεως. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η σκουριά θραύεται ικανά ώστε να εκθέσει όλη την υποκείμενη επιφάνεια του χάλυβα στο περιβάλλον και, κατά συνέπεια, αυτή να διαβρωθεί με ρυθμό παρόμοιο με αυτό του γυμνού χάλυβα, δίχως τα στρώματα σκουριάς να προσφέρουν προστασία στη ρωγματωμένη κατάσταση όπου ευρίσκονται. Ο φθίνων ρυθμός διάβρωσης τελικά γίνεται περίπου γραμμικός



Διάγραμμα 47: Επίδραση της περιοδικής απώλειας της προστατευτικής σκουριάς στο ρυθμό διάβρωσης ως συνάρτηση του χρόνου εκθέσεως [70]

Με πειραματική διαδικασία διενεργηθείσα από τους Melchers και Paik κατέστη εφικτή η μελέτη της επίδρασης της εφελκυστικής παραμόρφωσης στην πρόσφυση της σκουριάς. Ικανός αριθμός δοκιμών (10) με σκουριά φορτίστηκαν αξονικά με αργό ρυθμό φόρτισης. Κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα δεν παρατηρήθηκαν ζημιές επί της σκουριάς. Περί το όριο διαρροής και ελαφρώς άνω αυτού, μικρά κομμάτια σκουριάς άρχισαν να πέττουν. Για παραμόρφωση περίπου 0,7% παρατηρήθηκε ο σχηματισμός ταινιών διάτμησης (Luders) γωνίας 45°. Μόνο σε πολύ υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις άρχισαν να πέττουν ολόκληρες νιφάδες σκουριάς από τη διαβρωθείσα επιφάνεια.



Διάγραμμα 48: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για 10 χαλύβδινα δοκίμια που καταδεικνύουν τις περιοχές παραμόρφωσης στις οποίες συμπεράσματα εξήχθησαν για τη συμπεριφορά της σκουριάς [70]

8.2 Επίδραση του χάλυβα υψηλής αντοχής ^{[23], [36], [38], [71], [86]}

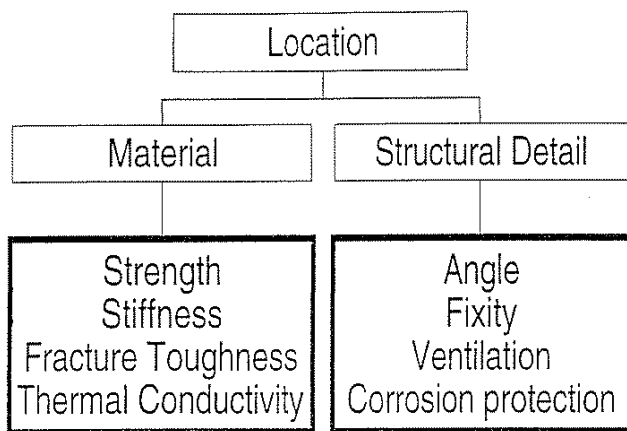
Τα φορτηγά πλοία κατασκευάζονται από κοινό συνήθως χάλυβα (mild steel), τελευταία όμως γίνεται χρήση και χάλυβα υψηλής αντοχής HTS (High Tensile Steel – Υψηλής Αντοχής σε Εφελκυσμό) ή και HSLA (High Strength Low Alloy – Υψηλής Αντοχής Χαμηλής Κραμάτωσης).

Η πλειοψηφία των πλοίων σε λειτουργία σήμερα είναι φτιαγμένα από κοινό χάλυβα. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 η χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής έχει αρχίσει να αυξάνεται και ιδίως σε bulk carriers. Αιτία της χρήσης του είναι το γεγονός ότι μπορούν να κατασκευάζονται λεπτότερα ελάσματα δίχως απώλεια αντοχής, για παράδειγμα έλασμα πάχους 24 – 29 mm μπορεί να μειωθεί στα 20 mm με τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής. Το όφελος της εξοικονόμησης βάρους, που μπορεί να ανέρχεται σε χιλιάδες τόνους, περιορίζει τα κόστη της ανέγερσης και επιπλέον καθιστά το πλοίο ικανό να μεταφέρει περισσότερο φορτίο.

Το πρόβλημα όμως είναι ότι ο χάλυβας υψηλής αντοχής διαβρώνεται με τον ίδιο ρυθμό με τον κοινό χάλυβα. Και από τη στιγμή που τα ελάσματα του χάλυβα υψηλής αντοχής είναι πιο λεπτά από αυτά του κοινού χάλυβα, η διάβρωση θα φτάσει το σημείο του κινδύνου πιο γρήγορα. Προσέτι, οι καλύτερες ιδιότητες του χάλυβα υψηλής αντοχής δεν συνάδουν με αυξημένες ιδιότητες για κυκλική φόρτιση, που σε συνδυασμό με το μικρότερο πάχος των στοιχείων οδηγεί σε αυξημένες τάσεις και συνεπώς μεγαλύτερο εύρος τάσεων που, προφανώς, συνεισφέρουν περισσότερο στη σωρευμένη βλάβη λόγω κοπώσεως. Άλλο πρόβλημα είναι ότι πλοία φτιαγμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής είναι πιο επιρρεπή σε κατασκευαστικά προβλήματα που προκαλούνται από τη μετάδοση των φορτίσεων μέσω των δομικών στοιχείων της κατασκευής και την αλληλεξάρτηση της κατασκευαστικής απόκρισης. Μια αναφορά που υπεβλήθη στον IMO από τον IACS το 1992 ανέφερε ότι η συχνότερη περιοχή αστοχίας σε bulk carriers από χάλυβα υψηλής αντοχής ήταν στις πλευρικές διαμήκεις συνδέσεις με τους ενισχυμένους νομείς. Ένα ακόμη πρόβλημα των πλοίων χάλυβα υψηλής αντοχής είναι το φαινόμενο του «ελατηρίου» (springing). Επειδή τα πλοία είναι εύκαμπτα, τείνουν να ταλαντώνονται με κοντά θαλάσσια κύματα. Τέλος, οι αυξημένες τάσεις που παραλαμβάνουν τα κατασκευαστικά στοιχεία από χάλυβα υψηλής αντοχής συνεπάγονται αυξημένες τάσεις και για τα επιστρώματά των, γεγονός που προσδίδει στα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των τελευταίων ιδιαίτερη έμφαση.

Τα πλοία από χάλυβα υψηλής αντοχής χρειάζονται τουλάχιστον την ίδια προσοχή και συντήρηση με αυτά από κοινό χάλυβα, ιδίως εφόσον συχνά υπόκεινται σε μεγαλύτερες φορτίσεις κατά τη φορτοεκφόρτωση από ότι αρχικά προορίζονταν. Ενώ τα φορτηγά πλοία από κοινό χάλυβα συνήθως αρχίζουν να παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα μετά τα 20 έτη, αυτά από χάλυβα υψηλής αντοχής τα παρουσιάζουν νωρίτερα.

Γενικά, το υλικό μπορεί να καταλογιστεί σαν υπο-κατηγορία των σχεδιαστικών παραμέτρων ενός φορτηγού πλοίου που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι ιδιότητες του υλικού που πρωτίστως ενδιαφέρουν είναι η αντοχή, η ακαμψία, η δυσθραυστότητα και η θερμική αγωγιμότητα, ως βλέπουμε στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 45: Εσωτερικές (ή σχεδιαστικές) παράμετροι της διάβρωσης των bulk carriers ^[36]

8.3 Επίδραση της διπλής γάστρας ^{[61], [72], [73]}

Τα κύρια πλεονεκτήματα της διπλής γάστρας σε ένα φορτηγό πλοίο είναι τα εξής:

- Η παρουσία του εφεδρικού εσωτερικού ελάσματος στην περίπτωση διάτρησης του εξωτερικού πλευρικού ελάσματος από πρόσκρουση χαμηλής προς μέσης εντάσεως και η επακόλουθη μείωση του κινδύνου της κατάκλισης υδάτων.
- Το γεγονός ότι τα κύρια στοιχεία της κατασκευής δεν έρχονται σε άμεσο επαφή με το φορτίο, αποφεύγοντας έτσι τη διαβρωτική του επίδραση, καθώς επίσης προστατεύονται και από τη μηχανική ζημιά που προκαλεί ο μηχανολογικός εξοπλισμός φορτοεκφόρτωσης.
- Η απλούστευση της διαδικασίας φορτοεκφόρτωσης και η μείωση του απαιτούμενου χρόνου για τη διεκπεραίωσή της, ακριβώς λόγω έλλειψης των πλευρικών νομέων και ενισχυτικών εντός των κυτών.
- Λόγω του ισχυρότερου ελάσματος εσωτερικού πυθμένα που διαθέτουν, εξουδετερώνονται οι αυξημένες τάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν κατά τη φόρτωση.
- Η κατασκευή διπλής γάστρας προσδίδει στο πλοίο ακαμψία.
- Σε περίπτωση ζημίας του πυθμένα, οι δεξαμενές καυσίμου κατά πάσα πιθανότητα δεν θα διατρηθούν μιας και δεν βρίσκονται στα διπύθμενα όπως στα πλοία μονής γάστρας, επομένως μειώνεται ο περιβαλλοντικός κίνδυνος.
- Οι ομαλές πλευρές των κυτών φορτίου μειώνουν την ανάγκη επιθεώρησης και διευκολύνουν τη συντήρηση. Ακόμα, λόγω την έλλειψη των ενισχυτικών ο καθαρισμός των εσωτερικών περιοχών είναι πιο εύκολος ενώ και η συντήρηση και επισκευή των επιστρωμάτων είναι πιο αποδοτική και λιγότερο δαπανηρή.
- Το φορτίο προστατεύεται από παραλλαγές της εξωτερικής θερμοκρασίας, αυτό όμως συνιστά και μειονέκτημα υπό προϋποθέσεις, ως θα δούμε παρακάτω.

Μια τυπική διάταξη φορτηγού πλοίου Panamax διπλής γάστρας περιλαμβάνει έξι (6) κύτη φορτίου, σε αντίθεση με την καθιερωμένη διάταξη Panamax απλής γάστρας που έχει περιλαμβάνει επτά (7) κύτη. Η αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής στην περιοχή των δεξαμενών φορτίου σε ένα φορτηγό πλοίο υπολογίζεται περί το 4% εν συγκρίσει με φορτηγό πλοίο απλής γάστρας για τον ίδιο όγκο των δεξαμενών φορτίου και 3,5% για το ίδιο deadweight.

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η επίδραση της διπλής γάστρας στη διάβρωση των φορτηγών πλοίων:

8.3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας - Φαινόμενο «Θερμός»:

Ήδη από τις πρώτες κατασκευές σε δεξαμενόπλοια διπλής γάστρας είχε παρατηρηθεί ότι όταν ζεστά φορτία (με θερμοκρασία κατά τη φόρτωση περί τους 45° C) η θερμοκρασία του φορτίου εμφάνιζε πολύ μικρή πτώση κατόπιν δρομολογίου σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη, κάτι που ερχόταν σε πλήρη αντίθεση με τα δεξαμενόπλοια απλής γάστρας, στα οποία η θερμοκρασία του φορτίου εξισωνόταν με αυτή της θάλασσας περίπου στο μέσον, χρονικά, του ταξιδιού. Ο λόγος για τη διαφορά αυτή είναι ότι για τις κατασκευές διπλής γάστρας ο κενός χώρος ερμάτων περιέχει το φορτίο με μονωτικό θύλακα αέρα, εμποδίζοντας την άμεση μεταφορά θερμότητας μέσω του πλευρικού ελάσματος της γάστρας ανάμεσα στο φορτίο και τη θάλασσα. Αυτή είναι η αρχή που χρησιμοποιείται για τα γνωστά δοχεία θερμός, εξ' ου και η ονομασία φαινόμενο «θερμός»

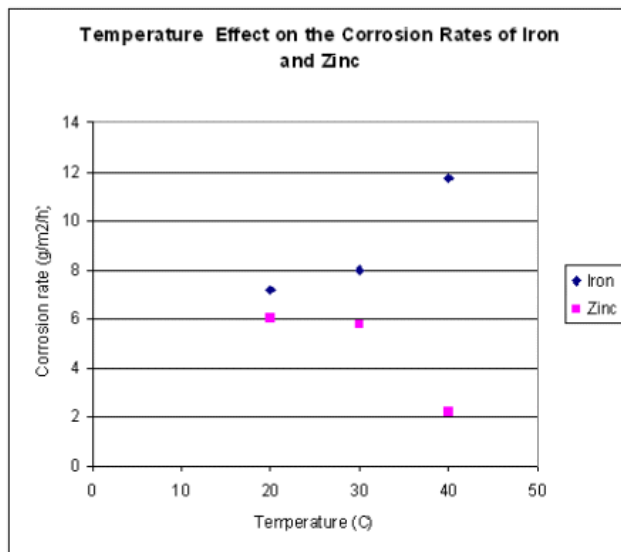
Το φαινόμενο «θερμός» ήδη έχει αρχίσει να παρατηρείται και σε φορτηγά πλοία διπλής γάστρας, καιίτοι τα τελευταία δεν είναι ακόμα ιδιαίτερος διαδεδομένα. Εκεί όπου φορτώνονται νωπά φορτία, με υγρασία, όπως σιτηρά και μεταλλεύματα, οι ρυθμοί διάβρωσης είναι σημαντικά υψηλότεροι από ότι συνήθως. Στην περίπτωση νωπών και δραστικών φορτίων, όπως οι γαιάνθρακες, οι ρυθμοί διάβρωσης είναι εξαιρετικά υψηλοί σε περιοχές όπου τα επιστρώματα έχουν υποστεί ζημιές ή απόξεση.

Στην περίπτωση των δεξαμενόπλοιων, το φαινόμενο «θερμός» τείνει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στη δεξαμενή φορτίου. Στα φορτηγά πλοία όμως αυτό δε συμβαίνει, εξαιτίας φαινομένων συμπίεσης του φορτίου και της ύπαρξης κενών χώρων πάνω από το φορτίο. Αυτό οδηγεί σε άνιση θερμοκρασιακή κατανομή. Τα όποια «θερμά σημεία» της μεταλλικής κατασκευής των κυτών γίνονται ισχυρές ανοδικές περιοχές και υφίστανται τόσο αυξημένη διάβρωση όσο και ρήξη επιστρωμάτων.

Η επίδραση της θερμοκρασίας για τη διάβρωση έχει ήδη μελετηθεί στο 3^ο κεφάλαιο για το θαλάσσιο νερό και τη θαλάσσια ατμόσφαιρα. Θα παραθέσουμε εν συντομία τους κύριους τρόπους της επίδρασης της στη διάβρωση, για να καταδείξουμε τη σημασία της αύξησής της λόγω της διπλής γάστρας.

- **Αύξηση ρυθμού διάβρωσης:** Αυτός αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία (βάσει της εξίσωσης του Arrhenius: $k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$ και χονδρικά εκτιμάται ότι για κάθε 10° C αύξηση της θερμοκρασίας ο ρυθμός της διάβρωσης διπλασιάζεται, ενώ σημειώνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος η οποία με τη σειρά της αυξάνει περαιτέρω τα διαβρωτικά φαινόμενα.

- **Αύξηση του ρυθμού διάχυσης:** Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο θαλάσσιο νερό ως είδαμε αυξάνει με τη θερμοκρασία, ενώ αυξάνεται και η διάχυση ιόντων σιδήρου, τα οποία οδηγούν σε αύξηση του ρυθμού διάβρωσης.
- **Φαινόμενα επιφάνειας:** Οι αντιδράσεις εξαρτώνται σημαντικά από την επιφάνεια. Το εμβαδόν της επιφάνειας της καθόδου είναι εξεχούσης σημασίας. Όταν η κάθοδος καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια, όπως σε φορτίο πετρελαϊκού κωκ, τότε ο ρυθμός της ανοδικής αντίδρασης διάβρωσης είναι εξαιρετικά υψηλός. Το φαινόμενο αυτό επιτείνεται από την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Τοπική διάβρωση:** Μορφές τοπικής διάβρωσης, όπως η διάβρωση με βελονισμούς και η διάβρωση κόπωσης επηρεάζονται σημαντικά από την αυξημένη διάχυση του οξυγόνου με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **Μικροβιολογική διάβρωση:** Η τοπική μικροβιολογική διάβρωση φτάνει στη μέγιστη τιμή της περί τους 37° C, όπου τα μικρόβια είναι πιο δραστήρια.
- **Δράση θυσιαζόμενων ανόδων:** Θυσιαζόμενες άνοδοι δεν έχουν βέβαια χρήση εντός των κυτών φορτίου, η χρήση τους όμως στις παρακείμενες δεξαμενές έρματος καθιστά την συμπεριφορά τους με τη θερμοκρασία άξια αναφοράς. Οι ρυθμοί διάβρωσης του ψευδαργύρου, που είναι το συνηθέστερο υλικό κατασκευής των, και του σιδήρου με τη θερμοκρασία παρίστανται στο κάτωθι διάγραμμα:



Διάγραμμα 49: Επίδραση της θερμοκρασίας στους ρυθμούς διάβρωσης του σιδήρου και του ψευδαργύρου ^[61]

Ως παρατηρούμε στο διάγραμμα αυτό, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης του σιδήρου αυξάνει ταχέως με τη θερμοκρασία, ο ρυθμός διάβρωσης του ψευδαργύρου υφίσταται αντίστοιχη μείωση. Για μια θερμοκρασία της τάξεως των 40° C θα χρειαστεί έως και τέσσερεις (4) φορές περισσότερη επιφάνεια ανόδου ψευδαργύρου από ότι σε θερμοκρασία 20° C.

8.3.2 Το «φαινόμενο Ντόμινο» και προβλήματα επιστρωμάτων σε φορτηγά πλοία διπλής γάστρας

Τα επιστρώματα τείνουν να έχουν μειωμένο προσδόκιμο υπηρεσιακής ζωής σε αυξημένες θερμοκρασίες. Ο κύριος λόγος είναι ότι χάνουν την ελαστικότητά τους πιο γρήγορα σε τέτοιες συνθήκες, καθώς οι εναπομεινάντες διαλύτες χάνονται πιο γρήγορα και προκαλείται η γήρανσή τους. Την περίοδο αμέσως μετά την εφαρμογή τους, τα εποξειδικά επιστρώματα επιδεικνύουν επιμήκυνση της τάξης του 2% λόγω ατελούς πολυμερισμού και κατακράτησης διαλυτών. Σε μια περίοδο περίπου τεσσάρων (4) ετών αυτό μειώνεται περίπου στο 0,5%. Το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από συρρίνωση των επιστρωμάτων, κάτι που οδηγεί σε ευκολότερη αποκόλλησή των λόγω εσωτερικών τάσεων. Σε θερμοκρασίες άνω των 30° C, που επικρατούν περισσότερο σε πλοία διπλής γάστρας, ο χρόνος μέχρι την ψαθυροποίηση του επιστρώματος θα είναι περίπου ο μισός.

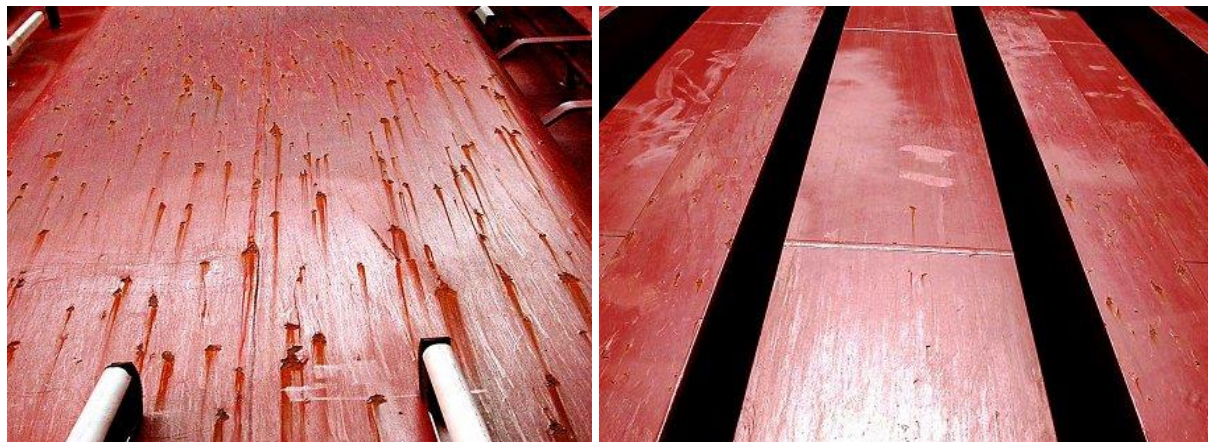
Οι παράγοντες αυτοί τείνουν να εντείνουν το «φαινόμενο Ντόμινο» (Domino Effect). Κατά το «φαινόμενο Ντόμινο», τα επιστρώματα υφίστανται κατάρρευση ταχύτερα σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, επειδή οι περιοχές αυτές γίνονται επιλεκτικά οι ανοδικές περιοχές της αντίδρασης διάβρωσης. Η ταχύτερη αυτή διάβρωση όχι μόνο εκτοπίζει το επίστρωμα από τη μεταλλική επιφάνεια, αλλά επίσης λεπταίνει τοπικά την κατασκευή, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει τα επίπεδα των τάσεων. Ο σχηματισμός τοπικών ανοδικών περιοχών, οι αυξημένοι ρυθμοί διάβρωσης και η ρήξη του επιστρώματος επιδεινώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, το «φαινόμενο Ντόμινο» συνιστά πολύ σοβαρότερο πρόβλημα σε πλοία διπλής γάστρας έναντι των συμβατικών.

8.3.3 Αυξημένη διάβρωση σε κύπη φορτίου φορτηγών πλοίων διπλής γάστρας

Ο συνδυασμός του «φαινομένου Θερμός» με δραστικά φορτία σε φορτηγά πλοία διπλής γάστρας προκαλεί εξαιρετικά αυξημένους ρυθμούς διάβρωσης, γεγονός που θέτει σοβαρούς περιορισμούς στη λειτουργία τέτοιων πλοίων καθώς και στη δυνατότητά τους να μεταφέρουν φορτία όλων των ειδών. Για παράδειγμα, η μεταφορά φορτίων όπως το θειάφι ενδέχεται να αποβεί σχεδόν αδύνατη, εκτός εάν το φορτίο είναι εντελώς στεγνό. Κάποια δραστικά φορτία υφίστανται εξώθερμη αντίδραση με το νερό, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας των κατά τη διάρκεια ενός πλου. Στα πλοία απλής γάστρας, τα κατακόρυφα ενισχυτικά που διεισδύουν στο φορτίο απάγουν τη θερμότητα και τη μεταφέρουν στο περιρρέον θαλάσσιο ύδωρ. Στις κατασκευές διπλής γάστρας όμως αυτό δε συμβαίνει και ελλοχεύει ο κίνδυνος εξαιρετικά υψηλής διάβρωσης εξαιτίας των αυξημένων θερμοκρασιών ή ακόμα και ο κίνδυνος πυρκαγιάς.

Συγκεκριμένα για τα κύπη φορτίου σε φορτηγά πλοία απλής γάστρας, παρατηρούμε ότι όταν μεταφέρονται θερμά φορτία, οι πτυχωτές φρακτές μεταξύ των κυτών έχουν την ίδια θερμοκρασία σε αμφότερες τις πλευρές των, περί τους 40° C. Το πλευρικό έλασμα εξωτερικά έχει τη θερμοκρασία του θαλασσιού ύδατος, συνήθως περί τους 5 – 10° C. Τα ελάσματα των κατακόρυφων ενισχυτικών του πλευρικού ελάσματος ευρίσκονται σε ενδιάμεση θερμοκρασία γιατί αφενός διεισδύουν στο θερμό φορτίο αλλά αφετέρου απάγουν μέρος της θερμότητας αυτής στη θάλασσα μέσω του πλευρικού ελάσματος. Στις κατασκευές διπλής γάστρας, το πλευρικό έλασμα και τα ενισχυτικά παραμένουν σε υψηλή θερμοκρασία, αντίστοιχη με αυτή της πτυχωτής φρακτής που είδαμε, ευνοώντας αυξημένους ρυθμούς διάβρωσης.

Στις κάτωθι φωτογραφίες διακρίνουμε τμήμα πτυχωτής φρακτής και τμήμα πλευρικού ελάσματος στο ίδιο ύψος, από το ίδιο κύτος φορτίου. Στην πτυχωτή φρακτή διακρίνονται πάνω από 200 ατέλειες ανά m^2 που σχετίζονται με ταχεία διάβρωση. Στο πλευρικό έλασμα παρατηρούνται σαφώς λιγότερες ατέλειες και μικρότερος ρυθμός διάβρωσης.



Εικόνα 31: Τμήμα πτυχωτής φρακτής και πλευρικού ελάσματος του ίδιου κύτους φορτίου με σημαντική διαφορά στην επίδραση της διάβρωσης ^[61]

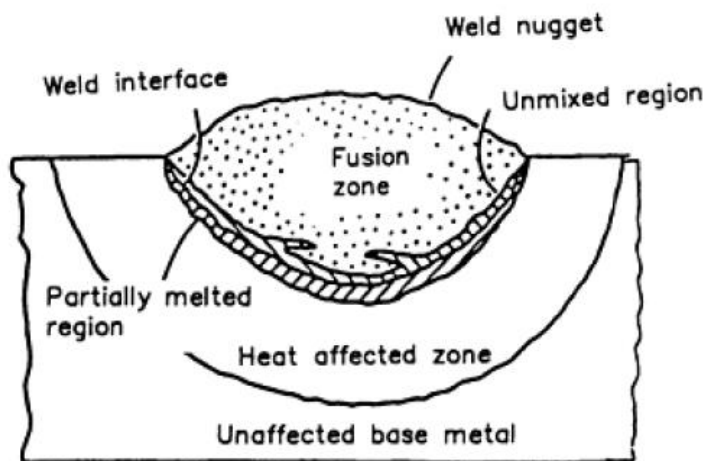
Ένα άλλο πρόβλημα των φορητών πλοίων διπλής γάστρας είναι και η απόσταση ανάμεσα στο εξωτερικό και το εσωτερικό πλευρικό έλασμα, που είναι της τάξης των 1000 – 1400 mm. Τα εσωτερικά ενισχυτικά καταλαμβάνουν περί τα 400 mm, αφήνοντας περίπου 600 mm χώρου προσβάσεως. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει ιδιαίτερα την επιθεώρηση και ορθή επισκευή των επιστρωμάτων στις περιοχές αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

9.1 Γενικά περι διάβρωσης συγκολλήσεων ^{[3], [12], [42], [74] – [78]}

9.1.1 Μικροδομές συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μικροδομής που επηρεάζουν τους μηχανισμούς και το ρυθμό της διάβρωσής τους. Διαθέτουν εγγενείς ετερογένειες σύστασης και μικροδομής που ταξινομούνται με βάση τη διάστασή τους. Στη μεγαλύτερη κλίμακα, μια συγκόλληση αποτελείται από τη μετάβαση από το μέταλλο βάσης μέσω μίας Θερμικά Επηρεαζόμενης Ζώνης (ΘΕΖ) σε στερεοποιημένο μέταλλο συγκόλλησης και περιλαμβάνει πέντε (5) διακριτές με βάση τη μικροδομή τους περιοχές. Δεν είναι απαραίτητο και οι πέντε αυτές περιοχές να παρίστανται σε κάθε συγκόλληση, για παράδειγμα αυτογενείς συγκολλήσεις (ήτοι άνευ πληρωτικού μετάλλου) δε διαθέτουν ζώνη μη ανάμιξης. Οι περιοχές αυτές διακρίνονται σχηματικά στο σχήμα που ακολουθεί:



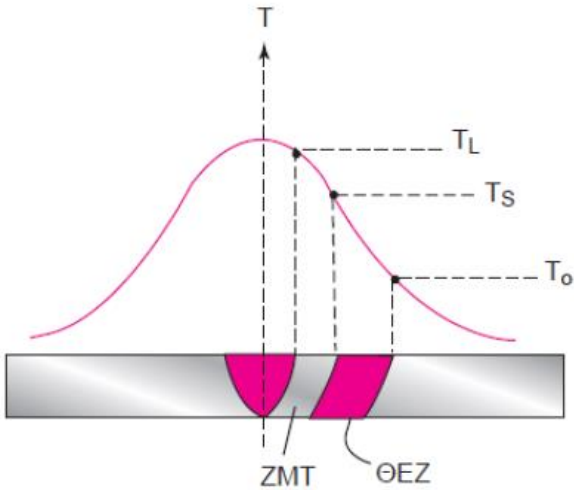
Σχήμα 46: Περιοχές μιας ετερογενούς συγκόλλησης ^[75]

1. Ζώνη τήξης (fusion zone)

Αποτελεί το αποτέλεσμα της σύντηξης του μετάλλου βάσης και του πληρωτικού μετάλλου και η σύστασή της είναι συνήθως διαφορετική από αυτή του μετάλλου βάσης. Αυτή η διαφορά στη παράγει γαλβανικό ζεύγος το οποίο δύναται να επηρεάσει τη διαδικασία της διάβρωσης πλησίον της συγκόλλησης. Αυτό το ζεύγος ανόμοιων μετάλλων μπορεί να προκαλέσει μακροσκοπική γαλβανική διάβρωση. Η ζώνη τήξης αυτή καθεαυτή προκαλεί μικροσκοπικό γαλβανικό αποτέλεσμα λόγω διαχωρισμού μικροδομών που πηγάζει από τη στερεοποίηση.

2. Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ) – Heat Affected Zone (HAZ)

Η ΘΕΖ είναι το τμήμα της συγκόλλησης που ανέπτυξε μέγιστες θερμοκρασίες ικανές για να επέλθουν μεταβολές της μικροδομής στερεάς κατάστασης, αλλά όχι τόσο υψηλές ώστε να υποστεί τήξη. Κάθε θέση εντός της ΘΕΖ εμφανίζει διαφορετική μέγιστη θερμοκρασία και ρυθμό ψύξης. Έτσι, κάθε θέση παρουσιάζει τα δικά της χαρακτηριστικά μικροδομής και τη δική της ευαισθησία στη διάβρωση.



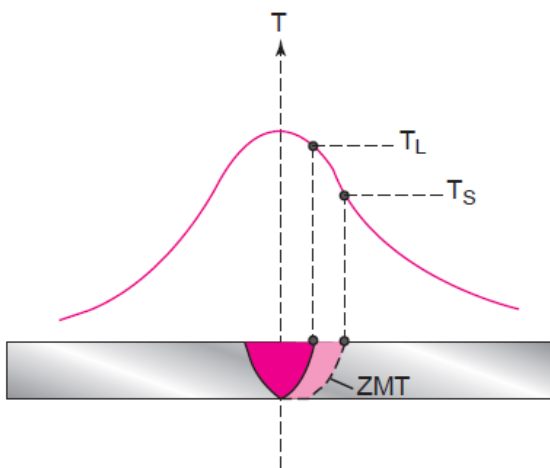
Σχήμα 47: Η ΘΕΖ ορίζεται από τις θερμοκρασίες solidus T_S και την T_0 [78]

3. Μέταλλο βάσης (base metal)

Το μέταλλο βάσης είναι ανεπηρέαστο από τη διαδικασία της συγκόλλησης και δεν έχει υποστεί καμία μεταλλουργική μεταβολή. Καίτοι δεν εμφανίζει μεταλλουργικές μεταβολές, το μέταλλο βάσης όπως και ολόκληρη η συγκόλληση είναι πιθανό να ευρισκείται σε κατάσταση υψηλών εγνάρσιων και διαμήγων παραμενουσών τάσεων.

4. Ζώνη μερικής τήξης (partially melted region)

Η ζώνη μερικής τήξης συνιστά τμήμα της ΘΕΖ. Συνήθως ευρίσκεται ένα με δύο κόκκους εντός της ΘΕΖ, ως προς τη γραμμή τήξης. Χαρακτηρίζεται από υγραποίηση στα όρια των κόκκων, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμάτωση λόγω υγραποίησης. Οι ρωγμές αυτές, που εντοπίζονται στα όρια των κόκκων, ένα με δύο κόκκους υπό της γραμμής τήξης, έχουν αναγνωριστεί ως πιθανές περιοχές εκκίνησης για ρωγμές λόγω της επίδρασης του υδρογόνου σε χάλυβα υψηλής αντοχής.



Σχήμα 48: Η ζώνη μερικής τήξης ορίζεται από τις θερμοκρασίες liquidus T_L και solidus T_S [78]

5. Ζώνη μη ανάμιξης (unmixed region)

Η ζώνη μη ανάμιξης συνιστά τμήμα της ζώνης τήξης. Πρόκειται για λεπτή ζώνη, επαπτόμενη της γραμμής τήξης, όπου το μέταλλο τήκεται και εν συνεχεία στερεοποιείται ταχέως ώστε τελικώς να αποκτήσει σύσταση παρόμοια με αυτή του μετάλλου βάσης.

9.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των συγκολλήσεων

Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι:

- Σχεδίαση της συγκόλλησης
- Τεχνική της συγκόλλησης
- Ικανότητα συγκολλητή – ανθρώπινος παράγοντας
- Παρουσία υγρασίας
- Οργανικά ή ανόργανα χημικά είδη
- Στρώμα οξειδίων
- Σκουριά συγκόλλησης και εκτοξεύσεις μετάλλου
- Ατελής διείσδυση ή τήξη
- Παρουσία πόρων
- Ρωγμές ή χαραγές
- Υψηλές παραμένουσες τάσεις
- Εσφαλμένη επιλογή πληρωτικού μετάλλου
- «Φινίρισμα» τελικής επιφάνειας

Συγχρόνως, η διάβρωση επηρεάζεται και από **μεταλλουργικούς παράγοντες**. Ο κύκλος της θέρμανσης και ψύξης που λαμβάνει χώρα κατά τη διαδικασία συγκόλλησης επηρεάζει τη μικροδομή και την επιφανειακή σύσταση της συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης. Κατά συνέπεια, η αντίσταση σε διάβρωση των αυτογενών συγκολλήσεων και συγκολλήσεων με συμβατά μέταλλα πλήρωσης ενδέχεται να είναι χαμηλότερη από ότι αυτή ενός σωστά ανοπτημένου μετάλλου βάσης, κάτι που αποδίδεται σε:

- Μικροδιαχωρισμό (microsegregation)
- Κατακρήμνιση δευτερευόντων φάσεων
- Σχηματισμό ζωνών μη αναμιξιμότητας
- Ανακρυστάλλωση κρυσταλλικών στοιχείων από το τήγμα της συγκόλλησης
- Παρουσία ακαθαρσιών στο τήγμα της συγκόλλησης κατά τη στερεοποίησή του.

Οι **παραμένουσες τάσεις**, ως αναφέρθηκαν σαν παράγοντας που επηρεάζει τη διάβρωση συγκολλήσεων, έχουν εξέχουσα σημασία. Κατά τη συγκόλληση, το μέταλλο βάσης, η ΘΕΖ καθώς και τα υποκείμενα προηγούμενα περάσματα συγκόλλησης υφίστανται τάσεις εξαιτίας θερμικής διαστολής και συστολής. Κατά τη στερεοποίηση, υψηλά επίπεδα παραμενουσών τάσεων, συχνά κιντά στο όριο διαρροής του υλικού, παρίστανται ως αποτέλεσμα συρρίκνωσης της συγκόλλησης. Πολύ σημαντικά είναι και τα

φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων, αποτέλεσμα γεωμετρικών ασυνεχειών όπως υπεριάλυση και ατελής διεύθυνση (που είναι ιδιαίτερος επικίνδυνος για πρόκληση διάβρωσης χαραγής ή ρωγμάτωσης κόπωσης), γιατί αυτά δύνανται να οδηγήσουν σε SCC σε μερικά περιβάλλοντα.

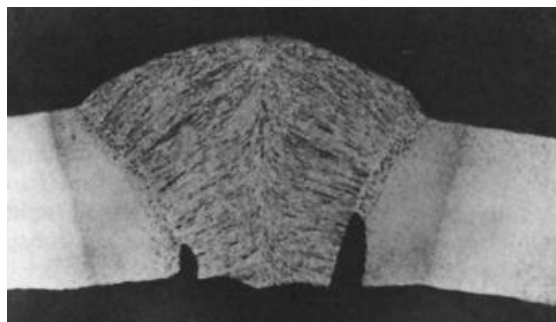
Αντίσταση στη διάβρωση μπορεί να επιτευχθεί στη κατάσταση συγκόλλησης εξισορροπώντας τις συστάσεις των κραμάτων ώστε να αναστέλλουν συγκεκριμένες αντιδράσεις κατακρήμνισης, προστατεύοντας τις τηγμένες και τις θερμές μεταλλικές επιφάνειες από αντιδρώντα αέρια στο περιβάλλον της συγκόλλησης και επιλέγοντας τις κατάλληλες παραμέτρους συγκόλλησης.

9.1.3 Είδη διάβρωσης συγκολλήσεων

1. Εκλεκτική διάβρωση ΘΕΖ

Ευρεία γκάμα μικροδομών στη ΘΕΖ μπορούν να προκύψουν επειδή, κοντά στο όριο τήξης ο μετασχηματισμός της ΘΕΖ σε ωστενίτη με τη θέρμανση ακολουθείται από μετασχηματισμό που προσδίδει φερριτοκαρβιδική ή μαρτενσιτική μικροδομή με την ψύξη, ανάλογα με τη σύσταση του υλικού, τη μέγιστη θερμοκρασία και το ρυθμό ψύξης. Μακριά από τη συγκόλληση, το υλικό εκτίθεται σε χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία, οπότε γίνεται μερική, μόνο, επαν-ωστενιτοποίηση και οι περιοχές που θερμαίνονται κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού φερρίτη σε ωστενίτη δεν επηρεάζονται σημαντικά. Γενικά η εκλεκτική διάβρωση στη ΘΕΖ είναι σχετικά σπάνια. Πιο πολύ συναντάται σε ανθρακούχους και ανθρακούχους – μαγγανιούχους χάλυβες από ότι σε χάλυβες υψηλότερης κραμάτωσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε παράδειγμα εκλεκτικής διάβρωσης στη ΘΕΖ συγκόλλησης ανθρακούχου χάλυβα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε υδατικά περιβάλλοντα, με κύριο χαρακτηριστικό τους την υψηλή αγωγιμότητα, ενώ η προσβολή συνήθως λαμβάνει χώρα για τιμές pH κάτω από 7-8.



Εικόνα 32: Εκλεκτική διάβρωση στη ΘΕΖ συγκόλλησης ανθρακούχου χάλυβα κατόπιν λειτουργίας σε υδατικό περιβάλλον [3]

2. Εκλεκτική διάβρωση μετάλλου συγκόλλησης

Το μέταλλο συγκόλλησης σε ανθρακούχο-μαγγανιούχο χάλυβα ενδέχεται να υποστεί εκλεκτική διάβρωση, η οποία μπορεί να αποφευχθεί εάν εφαρμόζεται σύστημα προστασίας όπως επιστρώματα ή

καθοδική προστασία. Σε περιπτώσεις όμως αστοχίας του επιστρώματος ή αναποτελεσματικής αναστολής, μπορεί να προκληθεί τοπική διάβρωση. Και σε αυτή την περίπτωση η μικροδομή επηρεάζει τη διάβρωση, με την πρόσθετη επιπλοκή της παρουσίας αποξειδωτικών προϊόντων, ο αριθμός και το είδος των οποίων εξαρτάται από την επένδυση συγκόλλησης που χρησιμοποιείται.

Το είδος των αναλωσίμων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο ρυθμό διάβρωσης του μετάλλου συγκόλλησης, και οι μεγαλύτεροι ρυθμοί διάβρωσης συνήθως σχετίζονται με συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια (SMAW). Στο θαλάσσιο νερό, ο ρυθμός διάβρωσης για συγκόλληση με χρήση βασικής επένδυσης μπορεί να είναι έως και τρεις (3) φορές υψηλότερος από ότι για μέταλλο συγκόλλησης από επένδυση ρουτιλίου. Για συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW) ο ρυθμός διάβρωσης είναι κάπου ανάμεσα στους δύο προηγούμενους και γενικά υψηλότερος από αυτόν του μετάλλου βάσης. Σε πολλές περιπτώσεις, το αίτιο του προβλήματος είναι η ηλεκτροχημική διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο μέταλλο συγκόλλησης και το γειτονικό μέταλλο βάσης. Γενικά, η εκλεκτική διάβρωση συγκολλήσεων ανθρακούχων χαλύβων παρατηρείται συχνά σε κατασκευαστικά ελάσματα πλοίων και θαλασίων κατασκευών.

3. Γαλβανική διάβρωση

Η γαλβανική διάβρωση στις συγκολλήσεις οφείλεται σε ηλεκτροχημική διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο μέταλλο συγκόλλησης και το μέταλλο βάσης, με το μέταλλο συγκόλλησης να είναι ανοδικό στο γαλβανικό ζεύγος. Για ανθρακούχους χάλυβες χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ηλεκτρόδιο συγκόλλησης E6013, το οποίο είναι υψηλά ανοδικό ως προς μέταλλο βάσης A285 σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η σωστή επιλογή πληρωτικού μετάλλου είναι πολύ σημαντική προκειμένου για λειτουργία σε σκληρά περιβάλλοντα.

Έχει παρατηρηθεί (από μελέτες στα τέλη της δεκαετίας του 1980 για αρκτικά νερά στον Καναδά – R.J.Brigham et al) ότι για χάλυβες ορίου διαρροής μεταξύ 235 και 515 MPa και υψηλή περιεκτικότητα μαγγανίου (1,4%) στο μέταλλο βάσης, προεκήληθη εκτεταμένη εκλεκτική προσβολή της ΘΕΖ, το οποίο μπορούσε να μειωθεί με αυξημένη θερμοότητα κατά τη συγκόλληση. Γενικά ο ρυθμός της προσβολής του μετάλλου συγκόλλησης εξαρτιόταν από την περιεκτικότητα του αναλώσιμου της συγκόλλησης σε χαλκό και νικέλιο και λιγότερο από τη σύσταση του μετάλλου βάσης, αν και χάλυβες με προσθήκες χαλκού, νικελίου και χρωμίου ήταν πιο ευγενείς, επιταχύνοντας έτσι την προσβολή του μετάλλου συγκόλλησης. Παρατηρήθηκε ακόμα ότι μέταλλο βάσης με χαμηλή περιεκτικότητα πυριτίου προκαλεί αυξημένη διάβρωση μετάλλου συγκόλλησης, υποστηρίζοντας προηγούμενα ευρήματα ότι περιεκτικότητα πυριτίου <0,2% είναι επιβλαβής, το αντίθετο όμως διαπιστώθηκε για πυρίτιο στο μέταλλο συγκόλλησης.

4. Διάβρωση με βελονισμούς

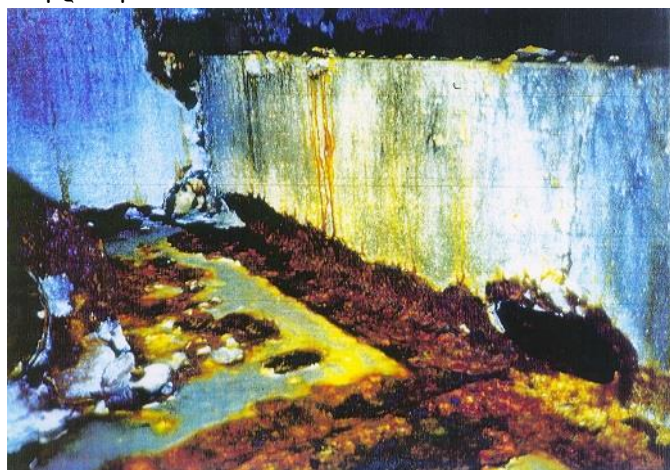
Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μορφή τοπικής προσβολής προκληθείσης από κατάρρευση του λεπτού παθητικού στρώματος οξειδίων που προστατεύει τα μέταλλα από τη διαδικασία της διάβρωσης. Ο μηχανισμός έχει αναπτυχθεί στο πρώτο κεφάλαιο, εδώ θα συνοψιστεί και θα περιγραφεί η εφαρμογή

του σε περιπτώσεις συγκολλήσεων. Άπαξ και σχηματιστεί ο βελονισμός, δρα ως άνοδος που υποστηρίζεται από σχετικά μεγάλες καθοδικές περιοχές. Η εξάπλωση των βελονισμών έχει ένα χρόνο καθυστέρησης προ της πυρηνοποίησης και ανάπτυξης, και η πυρηνοποίηση είναι πολύ ελκετική ως προς την τοποθεσία και εξαρτώμενη από τη μικροδομή. Οι βελονισμοί συχνά ξεκινούν σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μικροδομής στην απόθεση της συγκόλλησης. Οι βελονισμοί αναπτύσσονται ευκολότερα σε μεταλλουργικά ετερογενή υλικά, με χαρακτηριστική περίπτωση τους ανοξείδωτους χάλυβες.

5. Διάβρωση με αυλακώσεις (grooving corrosion)

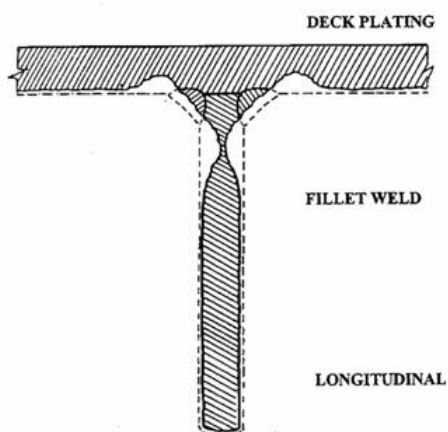
Η διάβρωση με αυλακώσεις (**grooving corrosion**) είναι μορφή διάβρωσης βελονισμών με ενωμένους βελονισμούς. Συνήθως αυτή η μορφή της διάβρωσης παρατηρείται κατά μήκος συγκολλήσεων και οι περισσότερες προσβληθείσες περιοχές είναι οι θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες (ΘΕΖ). Εμφανίζεται συχνά στα πλοία, κυρίως σε συνδέσεις της κατασκευής όπου συνήθως υπάρχει ροή ή και συσσώρευση υδάτων. Η πιο χαρακτηριστική και συχνότερη περιοχή εμφάνισης διάβρωσης με αυλακώσεις είναι στις συγκολλήσεις των νομέων με το πλευρικό έλασμα για bulk carriers απλής γάστρας. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης με αυλακώσεις εμφανίζονται στην επιφάνεια και έχουν γραμμική μορφή, όπως επίσης σε κατακόρυφα στοιχεία και σε ισόπεδες επιφάνειες φρακτών κατά τη διεύθυνση της κάμψης.

Το κύριο αίτιο για αυτή τη μορφή διάβρωσης είναι το ηλεκτροχημικό δυναμικό της ΘΕΖ, που είναι λιγότερο ευγενές από το μέταλλο βάσης και το μέταλλο συγκόλλησης και συνεπώς η παραγωγή γαλβανικού ρεύματος. Ενδεικτική σχετική διαφορά δυναμικού ανάμεσα στη ΘΕΖ και το κεντρικό τμήμα της συγκόλλησης είναι της τάξης των 100 mV. Επιπρόσθετο αίτιο είναι ενδεχόμενη συσσώρευση σκόνης και βρωμιάς στην περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης. Πρακτικά, η διάβρωση με αυλακώσεις προκαλείται από ζημιωθέν επίστρωμα, γι' αυτό και η σωστή εφαρμογή ενός επιστρώματος μπορεί να αποτρέψει την εμφάνισή της. Όμως, κατά την εκτέλεση εργασιών επισκευής, η ποιότητα των χρωματισμών συνήθως είναι πτωχή, το οποίο προκαλεί και το εν θέματι πρόβλημα. Η διάβρωση με αυλακώσεις μπορεί να προκαλέσει συγκέντρωση τάσεων που επιταχύνουν περαιτέρω τη διαδικασία της διάβρωσης.



Εικόνα 33: Διάβρωση με αυλακώσεις σε σύνδεση ενισχυτικού ^[42]

GROOVING CORROSION OF DECK PLATING AND -LONGITUDINALS



Σχήμα 49: Διάβρωση με αυλακώσεις των ελασμάτων καταστρώματος και των διαμήκων ενισχυτικών ^[42]

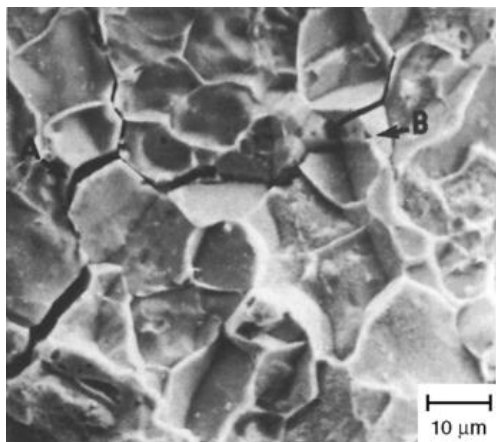
6. Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (SCC)

Οι συγκολλήσεις μπορεί να είναι ευαίσθητες στην SCC υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ρωγμάτωση αυτή απαιτεί τον κατάλληλο συνδυασμό διαβρωτικού μέσου, ευαίσθητης μικροδομής και εφελκυστικής τάσης. Οι συγκολλήσεις συχνά φορτίζονται εφελκυστικά, λόγω παραμενουσών τάσεων, σε επίπεδα που πλησιάζουν αυτά του ορίου διαρροής του μετάλλου βάσης. Επομένως, μια συγκόλληση με τα ετερογενή χαρακτηριστικά μικροδομής, γίνεται άριστος υποψήφιος για SCC.

Οι ρωγμές αυτές έχουν ανοδικό άκρο και συχνά αφήνουν εμφανή προϊόντα διάβρωσης κατά μήκος της θραύσης. Η ρωγμάτωση συχνά χαρακτηρίζεται από διακλαδώσεις και συνήθως έχει χρόνο υστέρησης προ της έναρξης της ρωγμής, η οποία και λαμβάνει χώρα σε βελονισμούς διάβρωσης.

Οι παράμετροι της συγκόλλησης επηρεάζουν το ποσό και την κατανομή της παραμένουσας τάσης, επειδή η έκταση της εντατικής περιοχής και η ποσότητα της παραμόρφωσης σχετίζονται άμεσα με το μέγεθος της απόθεσης συγκόλλησης, η οποία με τη σειρά της σχετίζεται άμεσα με την εισδοχή θερμότητας. Η επίδραση της θερμότητας στη συγκόλληση είναι πολύ τοπική και οδηγεί σε παραμορφώσεις που προκαλούν παραμένουσες τάσεις. Οι παραμένουσες αυτές τάσεις είναι σημαντικές για την εκκίνηση και τη διάδοση περιβαλλοντικά υποβοηθούμενης ρωγμάτωσης. Η χρήση μικρών αποθέσεων συγκόλλησης μειώνει τις τάσεις άρα και την ευαισθησία σε SCC.

Θερμικές κατεργασίες μετά τη συγκόλληση μπορούν να μειώσουν την SCC ανακατανέμοντας τις τοπικές φορτίσεις και μειώνοντας την έκταση των διαθέσιμων παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων που επιφέρουν ρωγμάτωση διάβρωσης.



Εικόνα 34: Άποψη SEM με εμφανή (Α) Διακρυσταλλική SCC και (B) έναρξη βελονισμού σε εσωτερική επιφάνεια σωληνώσεως^[3]

7. Ψυχρή ρωγμάτωση από Υδρογόνο

Ο όρος «ψυχρές ρωγμές» περιγράφει ρωγμές που προκύπτουν κατόπιν της στερεοποίησης και της ψύξης μιας ρωγμής και λαμβάνει χώρα εντός της ΘΕΖ ή του μετάλλου συγκόλλησης. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να εμφανιστούν ώρες, ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες κατόπιν της ψύξης της συγκόλλησης και για το λόγο αυτό καλούνται και «καθυστερημένες ρωγμές». Αναφορικά με την τοποθεσία τους, μπορεί να χαρακτηριστούν ως ρωγμές βάσης (toe cracks), ρωγμές ρίζας (root cracks) ή ρωγμές κάτω από την απόθεση (underbead cracks).

Για να συμβούν ψυχρές ρωγμές στους χάλυβες, απαιτείται η παρουσία τριών (3) κύριων παραγόντων: Ατομικό υδρογόνο, ευαισθησία της ΘΕΖ ή τμήματος του μετάλλου συγκόλλησης στην ψαθυροποίηση από υδρογόνο και υψηλή εφελκυστική τάση. Ο έλεγχος ενός ή περισσότερων εκ των παραγόντων αυτών μπορεί να μειώσει τη δημιουργία τέτοιων ρωγμών.

Στους χάλυβες, η ρωγμάτωση του μετάλλου βάσης συχνά αποδίδεται σε υψηλή περιεκτικότητα άνθρακα, κραματικού στοιχείου ή θείου. Ο έλεγχος της ρωγμάτωσης απαιτεί τη χρήση ηλεκτροδίων χαμηλού υδρογόνου, υψηλή προθέρμανση, επαρκή θερμοκρασία ανάμεσα στα περάσματα (interpass temperature) και μεγαλύτερη διείσδυση μέσω υψηλότερων ρευμάτων και μεγαλύτερων ηλεκτροδίων. Η ευαισθησία της μικροδομής στην ψυχρή ρωγμάτωση σχετίζεται με τη διαλυτότητα του υδρογόνου και την πιθανότητα υπεριορεσμού. Ο ωστενίτης, στον οποίο το υδρογόνο είναι υψηλά διαλυτό, είναι ελάχιστα ευαίσθητος στην ψυχρή ρωγμάτωση ενώ ο μαρτενσίτης, στον οποίο η διαλυτότητα του υδρογόνου είναι χαμηλότερη, είναι πιο ευαίσθητος. Αυτό αποδίδεται στο ότι η ταχεία ψύξη, που είναι απαραίτητη για το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, εγκλωβίζει το υδρογόνο σε κατάσταση υπεριορεσμού, εντός του μαρτενσίτη. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγονται οι ταχείς ρυθμοί ψύξης.

8. Μικροβιολογική διάβρωση (MIC)

Συνοψίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της MIC, όπως αναπτύχθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, αυτή αποτελεί φαινόμενο κατά το οποίο μικροοργανισμοί εκκινούν ή επιταχύνουν τη διαδικασία της διάβρωσης. Παράγουν βιο-φιλμ όταν εκτίθενται σε μεταλλική επιφάνεια και η επακόλουθη ανομοιομορφη κάλυψη οδηγεί σε κελιά συγκέντρωσης όπου και ξεκινά η διάβρωση. Επιπρόσθετα, η μεταβολική διαδικασία των

μικροοργανισμών δημιουργεί τοπικό όξινο περιβάλλον το οποίο αλλάζει τη συμπεριφορά του εκτεθειμένου μετάλλου στη διάβρωση, μεταβάλλοντας τις ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις, καταστρέφοντας προστατευτικά στρώματα ή δημιουργώντας διαβρωτικές αποθέσεις.

Τα αποτελέσματα της MIC συνήθως παρατηρούνται ως βελονισμοί, που συχνά περιέχουν χλωριόντα, πάνω η περί των συγκολλήσεων και συχνότερα στη ζώνη τήξης εντός της ΘΕΖ και στο μέταλλο βάσης κοντά στη συγκόλληση.

9.1.4 Μέθοδοι για ελαχιστοποίηση της διάβρωσης συγκολλήσεων

- **Επιλογή υλικού και αναλώσιμων συγκόλλησης.** Η προσεκτική επιλογή τους μπορεί να ελαττώσει τις διαφορές της μακρο- και μικρο-δομής εντός της συγκόλλησης και να ελαττώσει έτσι τα γαλβανικά φαινόμενα.
- **Προετοιμασία επιφάνειας.** Μια προσεκτικά επιλεγμένη διαδικασία καθαρισμού μειώνει ελαττώματα που συνιστούν περιοχές διαβρωτικής προσβολής σε επιθετικά περιβάλλοντα. Πάντως, η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να προκαλέσει και προβλήματα, για παράδειγμα ο μηχανικός καθαρισμός επιφανειών μπορεί να αφήσει ακαθαρσίες στην επιφάνεια. Το είδος της συρματόβουρτσας που χρησιμοποιείται πρέπει να ληφθεί επίσης υπ' όψιν και εν γένει προτιμώνται βούρτσες από ανοξείδωτο χάλυβα επειδή δε σχηματίζουν προϊόντα διάβρωσης ικανά για κατακράτηση υγρασίας.
- **Η σχεδίαση της συγκόλλησης** πρέπει να ευνοεί επίπεδες αποθέσεις χαμηλού προφίλ και με ελάχιστη παγίδευση σκουριάς (slag). Μια πτωχή σχεδίαση μπορεί να προκαλέσει χαραγές που εγκλωβίζουν στάσιμα διαλύματα, προκαλώντας διάβρωση με βελονισμούς και χαραγής. Ακανόνιστα σχήματα απόθεσης της συγκόλλησης μπορεί να προκαλέσει τυρβώδεις ροές, προκαλώντας διάβρωση εκτριβής.
- **Πρακτική της συγκόλλησης.** Πλήρης διείσδυση προτιμάται για την αποφυγή κενών υπό της απόθεσης. Η σκουριά πρέπει να απομακρύνεται με μηχανικά μέσα μετά από το κάθε πέρασμα. Εάν η μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιεί επένδυση, η γεωμετρία της σύνδεσης πρέπει να επιτρέπει διεξοδική απομάκρυνσή της, γιατί πολλά κατάλοιπα επενδύσεων είναι υδρόφιλα και διαβρωτικά.
- **Φινιρίσμα επιφάνειας συγκόλλησης.** Η απόθεση της συγκόλλησης πρέπει να επιθεωρείται οπτικά αμέσως μετά το πέρας αυτής. Για μέγιστη αντίσταση σε διάβρωση απαιτείται μια ομαλή, ομοιόμορφα οξειδωμένη επιφάνεια, ελεύθερη ξένων σωματιδίων και ατελειών. Οι αποθέσεις ποικίλλουν σε τραχύτητα και βαθμό εκτοξεύσεων μετάλλου, το οποίο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τρόχισμα.
- **Επίστρωση επιφάνειας.** Χρήση επιστρωμάτων προτείνεται για την αποφυγή τοπικής προσβολής λόγω ανομοιογένειας του μετάλλου συγκόλλησης. Τα επιστρώματα πρέπει να καλύπτουν τόσο τη συγκόλληση όσο και το μέταλλο βάσης και συχνά απαιτούν ειδική προετοιμασία επιφάνειας.
- **Θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση.** Μπορεί να είναι αποτελεσματικός τρόπος για την αύξηση της αντίστασης σε διάβρωση, μέσω μείωσης στις παραμένουσες τάσεις που επηρεάζουν την ανάπτυξη ρωγμών SCC. Μπορεί ακόμα να βοηθήσει στη μεταφορά υδρογόνου από τη συγκόλληση και να μειώσει την ευαισθησία σε ρωγμάτωση λόγω υδρογόνου. Τέλος, η κατεργασία μπορεί να ελαττώσει αποκλίσεις στη σύσταση και αντίστοιχα μικρο-γαλβανικά κελιά

- **Προθέρμανση και θερμοκρασία ανάμεσα στα περάσματα.** Η επιλογή και χρήση σωστής κατεργασίας προθέρμανσης και θερμοκρασίας μεταξύ περασμάτων μπορεί να αποτρέψει τη ρωγμάτωση λόγω υδρογόνου σε ανθρακούχους χάλυβες και χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης.
- **Κατεργασία παθητικοποίησης.** Τέτοια κατεργασία μπορεί να αυξήσει την αντίσταση διάβρωσης, σε συγκολλήσεις ανοξείδωτου χάλυβα.
- **Αποφυγή σχηματισμού χαραγών.** Η σκουριά που παραμένει στην απόθεση της συγκόλλησης καθώς και ελαττώματα όπως ατελής διείσδυση και μικρές σχισμές μπορούν να οδηγήσουν σε χαραγές οι οποίες ενθαρρύνουν τοπικά κελιά συγκέντρωσης, οδηγώντας σε διάβρωση χαραγής. Κατάλληλη επιλογή αναλωσίμων συγκόλλησης, σωστή πρακτική συγκόλλησης και διεξοδική απομάκρυνση της σκουριάς μπορούν να περιορίσουν τέτοια φαινόμενα.
- **Απομάκρυνση πηγών Υδρογόνου.** Μέσω κατάλληλης επιλογής αναλωσίμων συγκόλλησης (ήτοι ηλεκτρόδια SMAW χαμηλού υδρογόνου), κατάλληλο στέγνωμα της επένδυσης και καθαρισμός των επιφανειών της συγκόλλησης, η προσρόφηση του υδρογόνου μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

9.2 Ρήξη επιστρωμάτων στις περιοχές συγκολλήσεων επί πλοίου ^[23]

Οι συγκολλήσεις είναι επιρρεπείς σε τοπικές ρήξεις επιστρωμάτων. Δύο είδη αστοχίας επιστρωμάτων σε συγκολλήσεις συμβαίνουν. Κατά το πρώτο είδος αστοχίας λόγω διάβρωσης συγκόλλησης η διάβρωση ξεκινά σε μία πλευρά της ραφής συγκόλλησης, στην περιοχή που σχετίζεται με τη ΘΕΖ και τη συσσώρευση οξειδίων από τη διαδικασία της διάβρωσης. Η ρήξη του επιστρώματος σχετίζεται με πτωχή προετοιμασία επιφάνειας μετά τη συγκόλληση. Η αστοχία αυτή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί



Εικόνα 35: Διάβρωση γύρω από συγκόλληση ^[23]

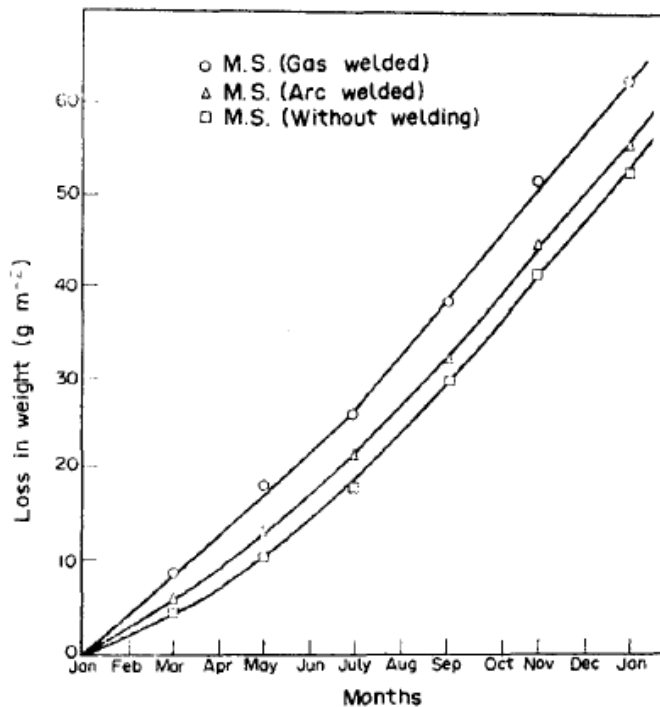
Το δεύτερο είδος αστοχίας επιστρώματος συγκόλλησης λαμβάνει χώρα πολύ πιο κοντά στη συγκόλληση και σχετίζεται εκ νέου με πτωχή επιφανειακή καθαριότητα προ της επιστρώσεως. Υπερβολικό πάχος στις άκρες τις ραφής συγκόλλησης είναι παράγοντας που επίσης συνεισφέρει στη διάβρωση συγκολλήσεων. Οι εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter), που έχουν τη μορφή μικρών ρανίδων μετάλλου πλησίον της συγκόλλησης, μπορούν να προκαλέσουν την παρουσία μικρών φυλκταιών εάν επιστρωθούν.



Εικόνα 36: Διάβρωση επί συγκολλήσεων [23]

9.3. Διάβρωση συγκολλήσεων σε θαλάσσια ατμόσφαιρα [79]

Οι Das και Jena μελέτησαν τη συμπεριφορά σε διάβρωση συγκολλημένων δοκιμίων κοινού και ανοξείδωτου χάλυβα κατόπιν ετήσιας έκθεση σε θαλάσσια ατμόσφαιρα (στην πόλη Puri της Ινδίας, επί του Κόλπου της Βεγγάλης). Στα πλαίσια της τρέχουσας εκθέσεως μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά των δοκιμίων κοινού χάλυβα. Η σύστασή τους περιείχε (σε % κ.β.) **C** 0,25, **P** 0,04, **S** 0,05 και **Mn** 0,25. Μετρήσεις για τους ρυθμούς απώλειας έγιναν σε δοκίμια άνευ συγκόλλησης και σε δοκίμια συγκολλημένα με συγκόλληση αερίου (Αργό) και συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου. Τα αποτελέσματα παρίστανται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 50: Απώλεια μάζας δοκιμίων κοινού χάλυβα συναρτήσεως του χρόνου σε περίοδο ενός έτους [79]

Διεπιστώθη ότι η διάβρωση ξεκίνησε πρώτα στην περιοχή της συγκόλλησης ενώ και το βάθος της διάβρωσης ήταν μεγαλύτερο εκεί. Αυτό αποδίδεται πιθανώς στην παρουσία ξένων εγκλεισμάτων κατά τη συγκόλληση καθώς και σε παρουσία παραμόρφωσης στις επιφάνειες της συγκόλλησης, που έδρασαν ως αδύναμα σημεία τα οποία υπέστησαν εκλεκτική προσβολή και συνεπακόλουθη τοπική διάβρωση. Αυτό δεν παρατηρήθηκε στα μη συγκολλημένα δοκίμια, τα οποία εμφάνιζαν ομοιογενή επιφάνεια οπότε και δεν έλαβε χώρα εκλεκτική διαβρωτική προσβολή.

Τα δοκίμια με συγκόλληση αερίου διαβρώθηκαν ταχύτερα από αυτά με συγκόλληση τόξου. Αυτό αποδίδεται στο ότι η συγκόλληση τόξου παρείχε καλύτερη ομοιογένεια της μεταλλικής επιφάνειας, με λιγότερες ακαθαρσίες και εγκλεισματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ρυθμοί διάβρωσης παρουσίασαν μια ελαφρά ύφεση κατά τη βροχερή περίοδο (Ιούλιος-Οκτώβριος), το οποίο αποδίδεται στην ελάττωση των αλάτων στην ατμόσφαιρα την περίοδο εκείνη καθώς και στην τακτική πλύση λόγω της βροχής των επιφανειών των δοκιμίων.

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι τα δεδομένα της διάβρωσης ακολουθούν τη σχέση:

$$V = Kt^n, \text{ ή, ισοδύναμα, } \log V = \log K + n \log t$$

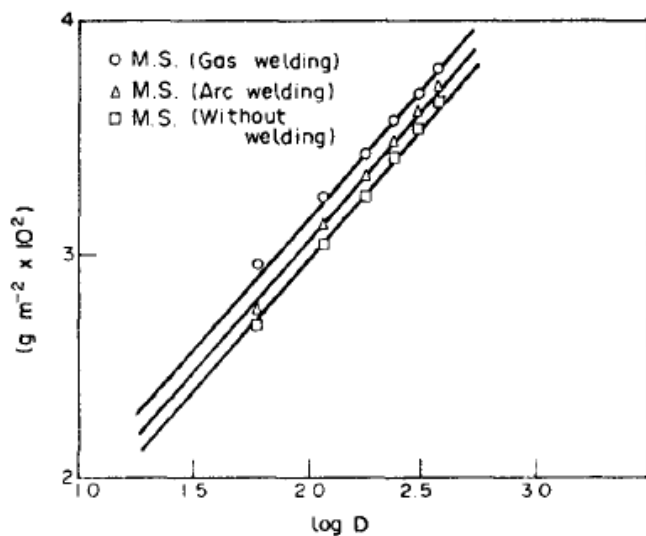
Όπου V η απώλεια μάζας σε $g\ m^{-2}$

K σταθερά για το συγκεκριμένο δοκίμιο

t ο χρόνος έκθεσης (σε ημέρες, d)

n αριθμός που εξαρτάται από το είδος του χάλυβα που υφίσταται διάβρωση

Αυτό παρατηρείται καλύτερα στο διάγραμμα που ακολουθεί, όπου ο $\log g\ m^{-2}$ χαράσσεται ως προς τον $\log d$ και προκύπτουν ευθείες γραφικές παραστάσεις.



Διάγραμμα 51: Απώλεια μάζας ως προς το χρόνο σε ημέρες για τον κοινό χάλυβα [79]

Πίνακας 17: Απώλεια μάζας και τιμές του n για δοκίμια κοινού χάλυβα σε θαλάσσια ατμόσφαιρα

Είδος συγκόλλησης	Απώλεια μάζας V (g m ⁻² x 10 ⁻²)	n
Λεπίου	63,00	1,2
Τόξου	56,00	1,2
Χωρίς συγκόλληση	52,50	1,2

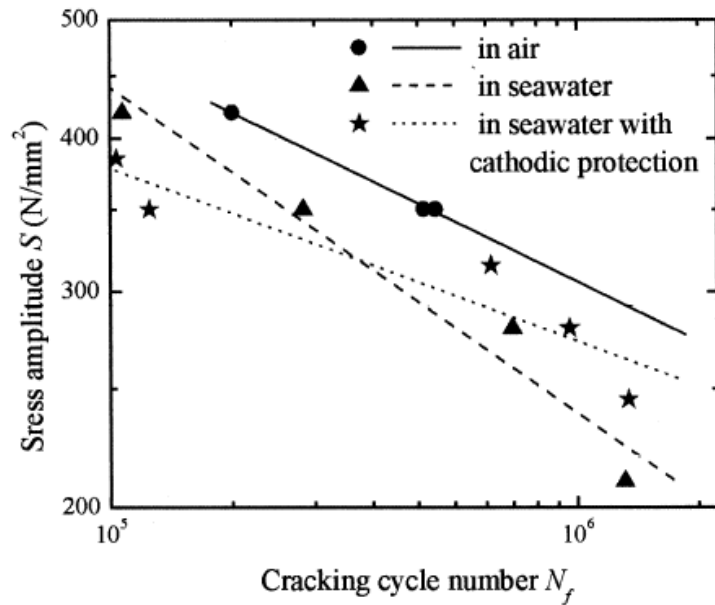
Για αιχμηρές ακμές των δοκιμίων παρατηρήθηκε εκλεκτική προσβολή και διάβρωση χαραγής η οποία διείσδυσε στο εσωτερικό τους, προκαλώντας ρωγμάτωση και εν τέλει λεπτό στρώμα προϊόντων διάβρωσης, ευκόλως αποσχίσσιμο. Αυτό οφείλεται σε περισσότερη επιφανειακή ενέργεια σε αιχμηρές επιφάνειες, που επιταχύνει τη διαδικασία της διάβρωσης. Παρατηρήθηκε ακόμα, ότι για εξομαλυμένες ακμές, η διάβρωση ήταν λιγότερη και εξαπλωνόταν σταδιακά και ομοιόμορφα στην επιφάνεια.

Σημαντική προστατευτική δράση επέδειξε η χρήση επιστρώματος μαγνητίτη. Σε δοκίμιο άνευ επιστρώματος το αρχικό βάρος ήταν 10,982 γραμμάρια και μετά από ένα έτος 3,744 γρ. και ολοσχερώς κατεστραμμένο από τη διάβρωση. Σε δείγμα όμως επιστρωμένο με μαγνητίτη η αλλαγή του βάρους ήταν από 12,379 στα 12,216 γραμμάρια, που πιστοποιεί ότι το επίστρωμα μαγνητίτη ανέστειλε σχεδόν πλήρως τη διάβρωση. Αυτό αποδίδεται στη διάχυση του μαγνητίτη στην επιφάνεια κατόπιν της θερμοκίνησης που είχε υποστεί το δοκίμιο.

9.4. Διάβρωση λόγω κόπωσης σε συγκολλήσεις ναυπηγικών κατασκευών ^[80]

Ο συνδυασμός κυκλικής φόρτισης, στην οποία υπόκεινται οι θαλάσσιες κατασκευές, με το επιθετικό θαλάσσιο περιβάλλον στο οποίο ευρίσκονται οδηγεί στη διάβρωση λόγω κόπωσης. Υπενθυμίζεται ότι η κόπωση μελετήθηκε και στην § 5.4 της παρούσας εκθέσεως. Ειδικά για συγκολλήσεις, το φαινόμενο μελετήθηκε από το ινστιτούτο ωκεανολογίας της Κινέζικης Ακαδημίας Επιστημών. Τα δοκίμια είχαν πάχος 18 mm και ήταν συγκολλημένα κατά συμβολή, υπεβλήθησαν δε σε δοκιμή με σύστημα καμπτικής κυκλικής φόρτισης τεσσάρων (4) σημείων.

Για την προσομοίωση της χαμηλής συχνότητας κυκλικής φόρτισης των κυματισμών, η συχνότητα φόρτισης ήταν 0,5 Hz και ο λόγος τάσεων (R) ήταν -1. Το πείραμα έλαβε χώρα σε αέρα, θαλάσσιο νερό και θαλάσσιο νερό με καθοδική προστασία. Τα δοκίμια υπέστησαν ζημία λόγω κόπωσης με επακόλουθη θραύση, λόγω ρωγμάτωσης εκκινηθείσας στη βάση της συγκόλλησης, εκτός δύο (2) δοκιμίων στον αέρα που δεν αστόχησαν ούτε για 2x10⁶ κύκλους. Συγκεντρωτικά για τα προαναφερθέντα περιβάλλοντα η συσχέτιση ανάμεσα στο εύρος επιβαλλόμενων τάσεων και στον αριθμό κύκλων για αστοχία παρίσταται στο διάγραμμα που έπεται:



Διάγραμμα 52: Ιδιότητες κόπωσης συγκολλητών δοκιμίων για τρεις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος ^[80]

Χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά σε κόπωση των συγκολλήσεων ναυπηγικών μπορούν να εξαχθούν. Κατ' αρχάς, παρατηρούμε ότι η διάρκεια ζωής τους σε διάβρωση κόπωσης στο θαλάσσιο νερό ανέρχεται περίπου στο 1/2 με 1/3 αυτής σε αέρα με τη διαφορά να αυξάνεται για μείωση της επιβαλλόμενης τάσης. Για την καθοδική προστασία δε, παρατηρούμε ότι αυτή είναι ιδιαίτερος αποτελεσματική ειδικά σε χαμηλές τάσεις, όσο δε αυτές χαμηλώνουν, η διάρκεια ζωής σε κόπωση προσεγγίζει αυτή σε αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Στον ορισμό της διάβρωσης που παρατέθηκε στο 1^ο κεφάλαιο έγινε λόγος για ‘υποβάθμιση των ιδιοτήτων ενός υλικού λόγω αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον του’. Η υποβάθμιση συνεπάγεται τη μείωση των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού και μπορεί να είναι η εξασθένηση αυτού λόγω απώλειας διατομής, η θραύση ενός μετάλλου λόγω ψαθυροποίησης από υδρογόνο, ακόμα και η ρωγμάτωση ενός μετάλλου λόγω έκθεσης στον ήλιο. Είδαμε ότι η διάβρωση σε ναυπηγικές κατασκευές είναι έντονη, λόγω του εξαιρετικά διαβρωτικού θαλασσιού περιβάλλοντος. Οι δύο κύριες μορφές διάβρωσης, η γενική και η τοπική προκαλούν ελάττωση της αντοχής της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

10.1 Επίδραση της γενικής διάβρωσης ^{[43], [82]}

Η μείωση του πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής εξ’ αιτίας της γενικής διάβρωσης προκαλεί τη μείωση της αντοχής του πλοίου. Για παράδειγμα, στα ελάσματα του πλοίου που έχουν υποστεί ομοιόμορφη (γενική) διάβρωση, λόγω της πρόκλησης ομοιόμορφης ελάττωσης του πάχους τους, η αντοχή των ελασμάτων υπολογίζεται εξαιρώντας την απώλεια του πάχους λόγω της διάβρωσης.

Οι Guedes Soares και Teixeira εκπόνησαν μελέτη για την επίδραση της γενικής διάβρωσης στη μέγιστη καμπτική ροπή για δύο σχεδιάσεις bulk carriers, απλής και διπλής γάστρας αντίστοιχα. Οι γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των δύο αυτών σχεδιάσεων καθώς και η μέγιστη καμπτική ροπή, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την επίδραση της διάβρωσης, παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 18: Γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των bulk carriers ^[82]

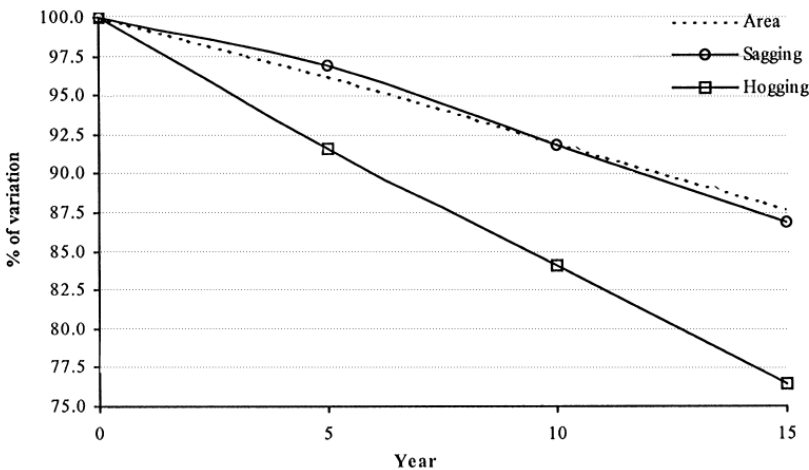
	Single Hull	Double Hull
Επιφάνεια μέσης τομής (m ²)	5.73	6.10
Ροπή αδράνειας (m ⁴)	566	629
Μέγιστη καμπτική ροπή sagging (Mn m)	13126	14589
Μέγιστη καμπτική ροπή hogging (Mn m)	13011	13609

Πίνακας 19: Μεταβολή της μέγιστης καμπτικής ροπής ^[82]

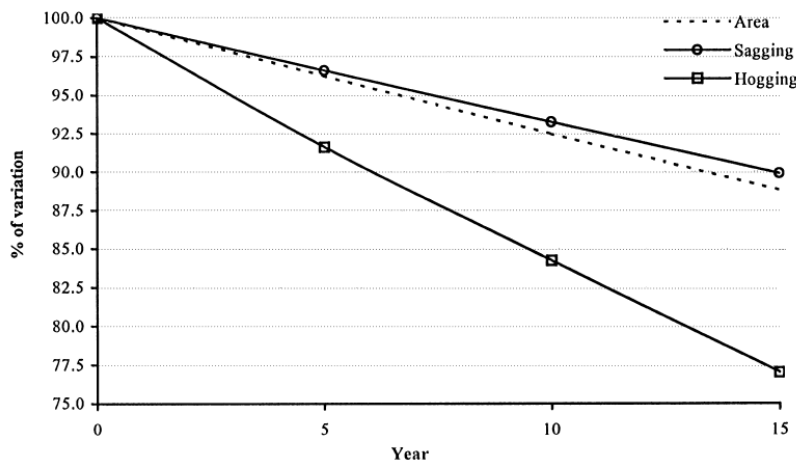
Single-Hull Bulk Carrier							Double-Hull Bulk Carrier					
Χρόνια	Επιφ. (m ²)	%	Sag	%	Hog	%	Επιφ. (m ²)	%	Sag	%	Hog	%
0	5.73	100	13126	100	13011	100	6.10	100	14589	100	13609	100
5	5.52	96.3	12720	96.9	11915	91.6	5.87	96.2	14091	96.6	12468	91.6
10	5.27	91.9	12058	91.9	10945	84.1	5.64	92.4	13602	93.2	11463	84.2
15	5.03	87.7	11393	86.8	9947	76.5	5.42	88.8	13110	89.9	10481	77.0

Τα δεδομένα χαράσσονται στα αντίστοιχα διαγράμματα που έπονται. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη **καμπτική ροπή** στην περίπτωση του sagging υφίσταται υποβάθμιση αντίστοιχη της μείωσης της ολικής

επιφάνειας της μέσης τομής, αντιθέτως στην περίπτωση του hogging η μέγιστη καμπτική ροπή ελαττώνεται κατά περίπου το τριπλάσιο της τιμής αυτής. Ειδικά για την κατασκευή διπλής γάστρας, η μεγαλύτερη αυτή ελάττωση στην καμπτική ροπή για hogging είναι ικανή να προκαλέσει μεταβολή της πρωταρχικής (πιθανότερης) περίπτωσης αστοχίας από sagging σε hogging, κατά την εξέλιξη της διαδικασίας της διάβρωσης.



Διάγραμμα 53: Επίδραση της διάβρωσης στη μέγιστη καμπτική ροπή για bulk carrier απλής γάστρας [82]



Διάγραμμα 54: Επίδραση της διάβρωσης στη μέγιστη καμπτική ροπή για bulk carrier διπλής γάστρας [82]

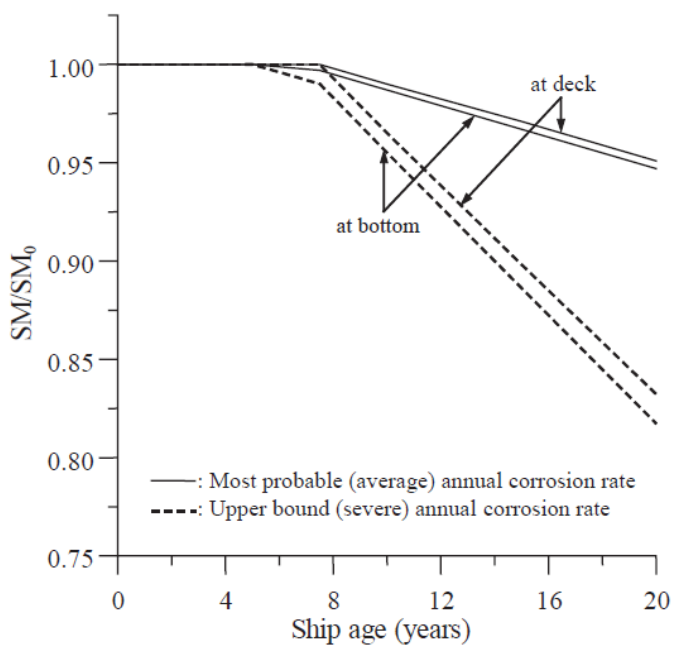
Παράλληλα, από τις σχέσεις που είδαμε στο κεφ. 5 (J.K. Paik και άλλοι):

$$\text{Βάθος διάβρωσης: } t_r = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2}$$

$$\text{Ετήσιος ρυθμός διάβρωσης: } r = C_1 C_2 (T - T_c - T_t)^{C_2 - 1}$$

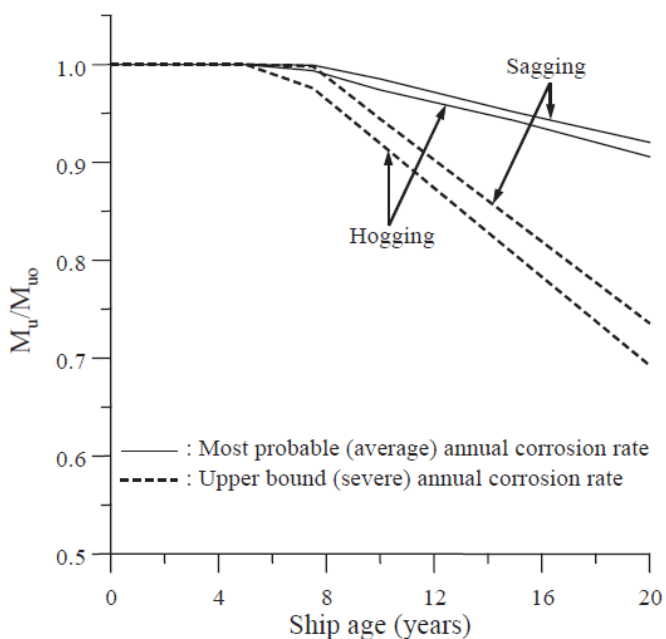
Οι συντάσσοντες την προκειμένη μελέτη (*time-variant ultimate longitudinal strength of Corroded Bulk Carriers*) και με βάση τους ετήσιους ρυθμούς διάβρωσης οδηγήθηκαν στην εκτίμηση για τη μείωση της **ροπής αντίστασης** συναρτήσει αυτών, με τα αποτελέσματα να παρατίθενται γραφικά στη συνέχεια. Όπου SM/SM_0 ο λόγος της ροπής αντίστασης προς τη ροπή αντίστασης του πλοίου άνευ της επίδρασης της διάβρωσης. Υπενθυμίζουμε ότι $SM = \text{Section Modulus}$ και προκύπτει από τη σχέση $SM = I/y$,

(όπου I η ροπή αδράνειας και y η απόσταση της πιο απομακρυσμένης από τον άξονα ίνας της διατομής), συνδέεται δε με την τάση σε μια οποιαδήποτε διατομή του πλοίου από τη σχέση $\sigma = \mathbf{M}/\mathbf{SM}$, όπου M η καμπτική ροπή στη διατομή.



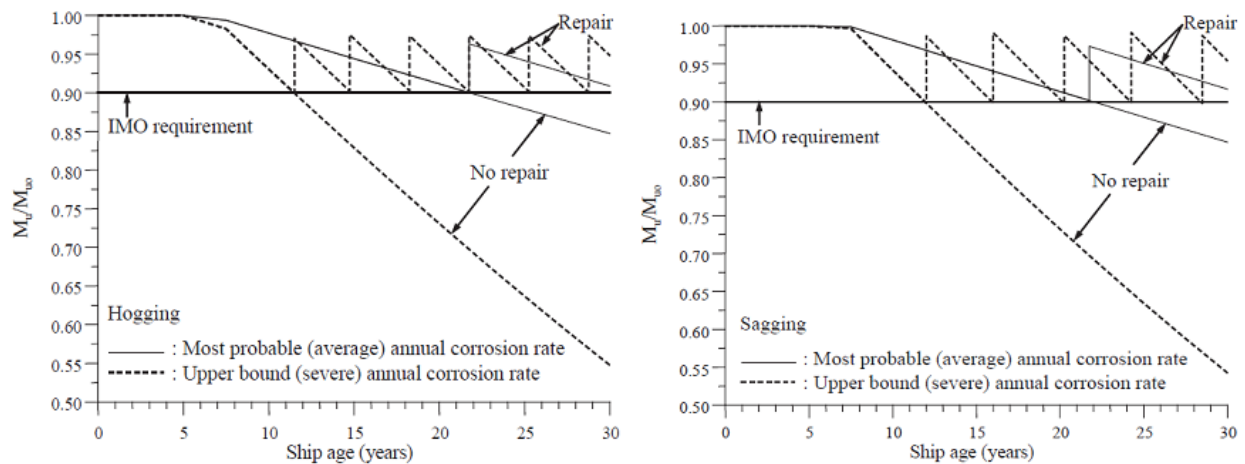
Διάγραμμα 55: Μεταβολή της ροπής αντίστασης συναρτήσει της ηλικίας του πλοίου ^[43]

Στα πλαίσια της ίδιας μελέτης, εκτιμήθηκε και η **αντοχή** του διαβρωθέντος πλοίου, συναρτήσει της ηλικίας του. [M_u , M_{u0} ultimate hull girder strength για διαβρωμένο και ανέπαφο (newbuilding) πλοίο αντίστοιχα].



Διάγραμμα 56: Μεταβολή της διαμήκουσ αντοχής πλοίου συναρτήσει της ηλικίας του ^[43]

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO η διαμήκης αντοχή ενός πλοίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της αρχικής του αντοχής. Επομένως, παρατίθενται παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα για hogging και sagging συνυπολογίζοντας και τις απαιτούμενες επισκευές

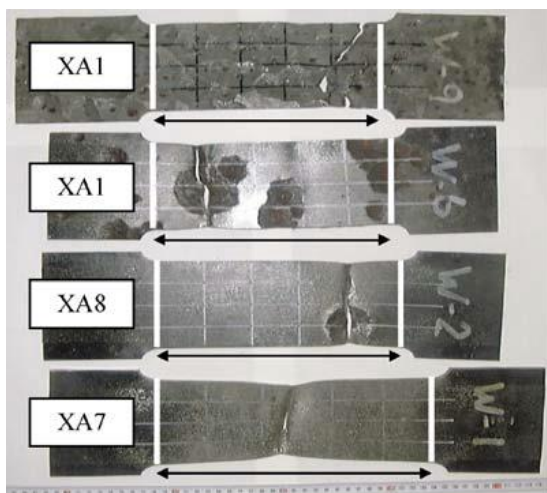


Διάγραμμα 57: Μεταβολή μέγιστων καμπτικών ροπών για hogging και sagging αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψιν τις επισκευές (renewals) ^[43]

10.2 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς ^{[43], [46], [81]}

10.2.1 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε εφελκυσμό

Κατόπιν πειραματικών δοκιμών του Ερευνητικού Ινστιτούτου του NKK (T.Nakai, H.Matsushita, N.Yamamoto, H.Arai), κόπηκαν δοκίμια από τους νομείς φορτηγού πλοίου 14 ετών, αρχικού πάχους 10 mm. 16 μικρά δοκίμια ελήφθησαν και 1 μεγάλο πλάτους. Τα δοκίμια είχαν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς διαφορετικής εκτάσεως, κάποια εξ' αυτών μεμονωμένους ή και καθόλου βελονισμούς, κάποια αρκετούς (>40% της επιφάνειας) και κάποια πολλούς (>80% της επιφάνειας). Το μέσο πάχος των δοκιμίων υπολογίστηκε από το βάρος τους και ποικίλλει από 6,3 έως 10 mm. Τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού φαίνονται στην κάτωθι εικόνα, όπου διακρίνουμε τη μορφολογία της θραύσης. Εκεί όπου τα δοκίμια έχουν μόνο ένα (1) βελονισμό (XA8) η θραύση έλαβε χώρα στην εγκάρσια τομή που έχει το βελονισμό. Εκεί όπου υπάρχουν πολλοί βελονισμοί, ρωγμές ξεκίνησαν στους πυθμένες των βελονισμών και εν συνεχεία συμπύχθηκαν μεταξύ τους έως την τελική όλκιμη θραύση.



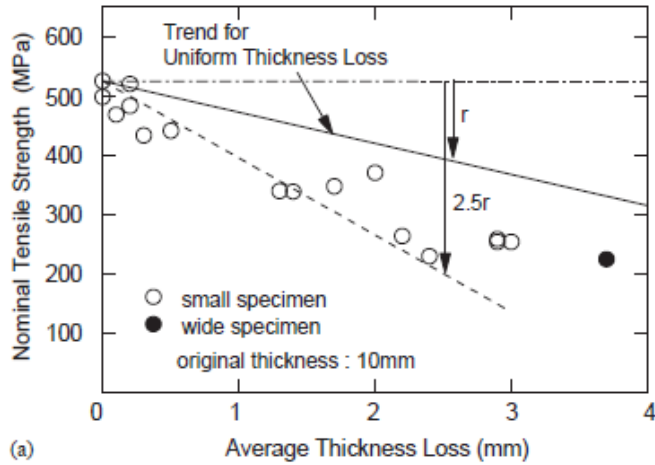
Εικόνα 37: Δοκίμια μετά τη δοκιμή εφελκυσμού [46]

Η ονομαστική αντοχή εφελκυσμού και μέγιστη καθαρή τάση ελήφθησαν από τις κάτωθι σχέσεις

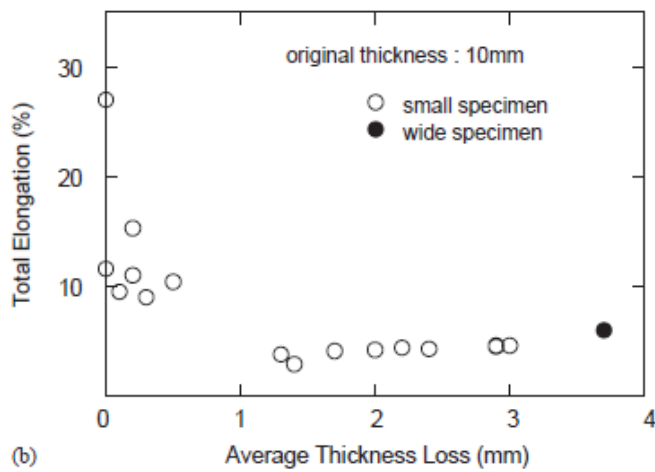
$$\sigma_{\text{ονομαστικό}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_0}, \quad \sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_{f0}}$$

Όπου P_{max} το μέγιστο φορτίο, A_0 η αρχική επιφάνεια τομής (αρχικό πάχος πολλαπλασιασμένο επί το πλάτος του δοκιμίου) και A_{f0} η προβολή της επιφάνειας του θραυσθέντος τμήματος προ της εφαρμογής φορτίου, στο κάθετο επίπεδο ως προς τον άξονα της φόρτισης.

Στο κάτωθι διάγραμμα (a) παρατηρούμε τη σχέση μεταξύ της ονομαστικής αντοχής σε εφελκυσμό και τη μέση απώλεια πάχους. Είναι εμφανές ότι η ονομαστική αντοχή σε εφελκυσμό ελαττώνεται με την αύξηση του λόγου αναλογίας της επιφάνειας του βελονισμού. Η μείωση της ονομαστικής αντοχής σε εφελκυσμό είναι έως και 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτή των ελασμάτων με ομοιόμορφη διάβρωση και απώλεια πάχους. Στο διάγραμμα (b) διακρίνουμε τη συσχέτιση ανάμεσα στην ολική επιμήκυνση και τη μέση απώλεια πάχους. Η ολική επιμήκυνση ελαττώνεται δραματικά στην περίπτωση όπου τα δοκίμια έχουν διάβρωση με βελονισμούς.



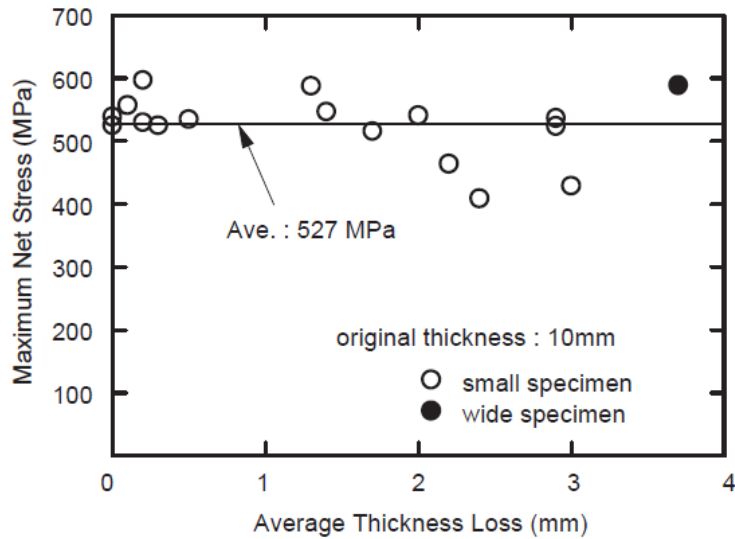
(a)



(b)

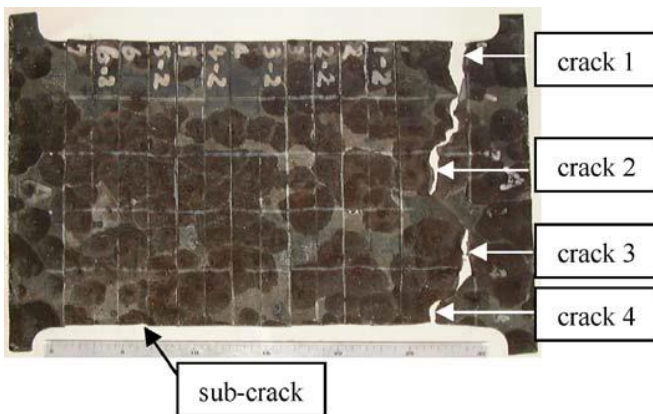
Διάγραμμα 58: Επίδραση του βελονισμού (a) στην ονομαστική αντοχή σε εφελκυσμό και (b) στην ολική επιμήκυνση ^[46]

Η σχέση ανάμεσα στη μέγιστη καθαρή τάση (ήτοι η αντοχή εφελκυσμού στην επιφάνεια της θραύσης) και τη μέση απώλεια πάχους παρίσταται στο κάτωθι διάγραμμα:



Διάγραμμα 59: Συσχέτιση ανάμεσα στη μέγιστη καθαρή τάση και τη μέση απώλεια πάχους ^[46]

Το δοκίμιο μεγάλου πλάτους διακρίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, μετά από τη δοκιμή με εφελκυσμό. Παρατηρούμε ότι τέσσερις (4) ρωγμές εκκίνησαν στον πυθμένα των βελονισμών και συμπύχθηκαν ώστε να σχηματίσουν μία κύρια ρωγμή, η οποία τελικώς οδήγησε στη θραύση. Μία υπο-ρωγμή διακρίνεται επίσης μακριά από την κύρια ρωγμή.



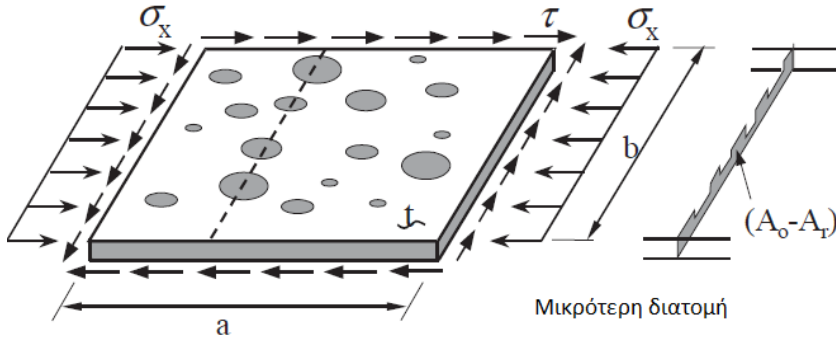
Εικόνα 38: Δοκίμιο μεγάλου πλάτους κατόπιν δοκιμής εφελκυσμού ^[46]

10.2.2 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στην αντοχή σε θλίψη

Λόγω της πολυπλοκότητας της επίδρασης της διάβρωσης με βελονισμούς έναντι της γενικής διάβρωσης, προτάθηκε (Paik et al) η προσέγγιση του συντελεστή ελάττωσης αντοχής, για ελάσματα διαβρωθέντα με βελονισμούς που υφίστανται αξονική θλιπτική καταπόνηση, βάση της σχέσης:

$$R_{xu} = \frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{xu0}} = \left(\frac{A_o - A_r}{A_o} \right)^{0.73}$$

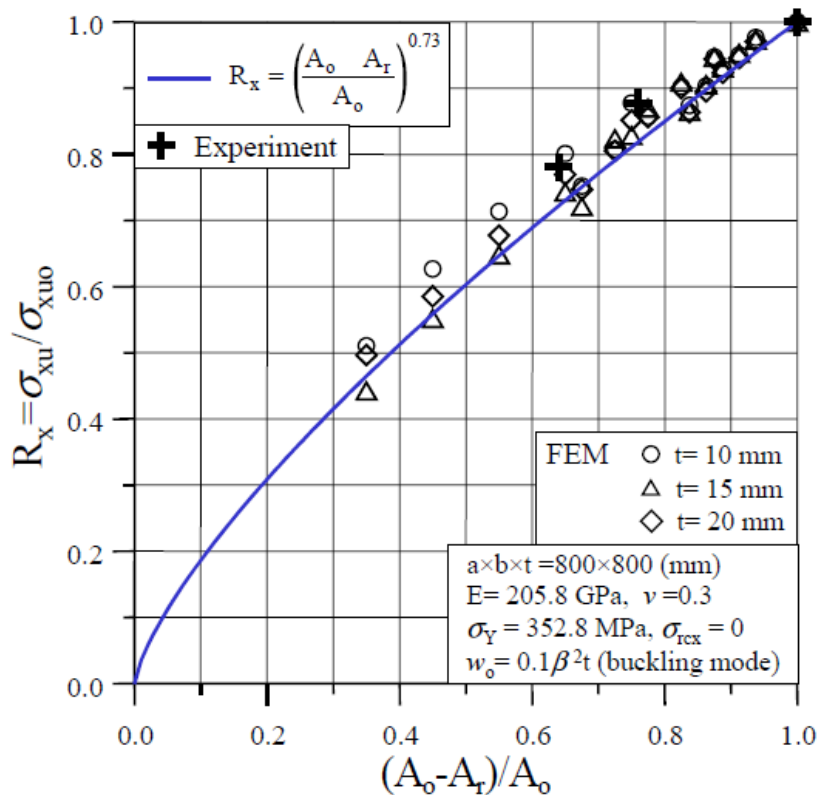
Όπου R_{xu} ο παράγοντας ελάττωσης αντοχής για αξονικά θλιπτικά φορτία, σ_{xu} η μέγιστη αντοχή σε θλίψη για στοιχείο με διάβρωση με βελονισμούς, σ_{xu0} η μέγιστη αντοχή σε θλίψη για ανέπαφο (δίχως διάβρωση) στοιχείο, A_0 η αρχική επιφάνεια διατομής του ανέπαφου στοιχείου και A_f η ελαττωθείσα επιφάνεια διατομής από διάβρωση με βελονισμούς στη μικρότερη διατομή. Τα ανωτέρω τα βλέπουμε στο σχήμα που ακολουθεί:



A_0 : Αρχική διατομή ελάσματος

Σχήμα 50: Τοπική διάβρωση με βελονισμούς και μικρότερη επιφάνεια διατομής [43]

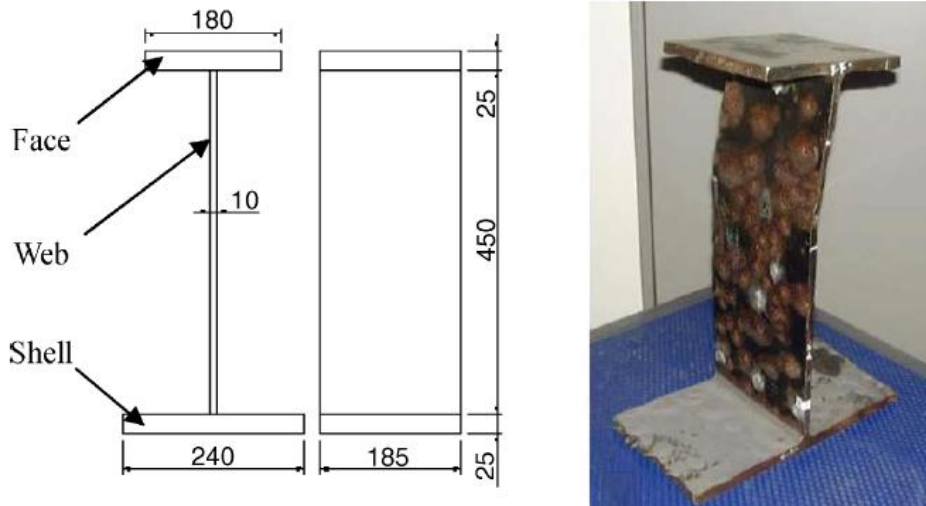
Η εγκυρότητα της ανωτέρω εξίσωσης πιστοποιείται από το διάγραμμα που έπεται, σε σύγκριση με πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα



Διάγραμμα 60: Μεταβολή του συντελεστή ελάττωσης της αντοχής σε θλίψη συναρτήσει της μικρότερης επιφάνειας διατομής για έλασμα με διάβρωση με βελονισμούς [43]

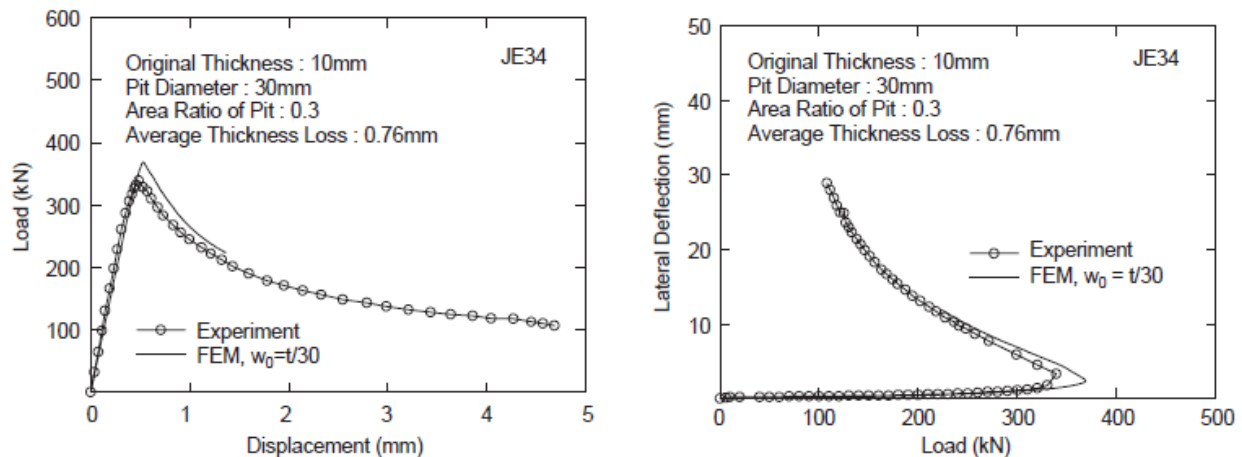
10.2.3 Επίδραση της διάβρωσης με βελονισμούς στο λυγισμό ^[46]

Η ερευνητική ομάδα του Ερευνητικού Ινστιτούτου του NKK (Γ.Nakai, Η.Matsushita, Ν.Υamamoto, Η.Αrai) διενήργησε πειραματικές δοκιμές θλιπτικού λυγισμού σε δοκίμια κατόπιν συγκόλλησης πλευρικών ελασμάτων, ελασμάτων κορμού και πέλματος. Δοκίμια με πραγματική διάβρωση (ως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα) και με τεχνητώνως σχηματισμένους βελονισμούς χρησιμοποιήθηκαν.



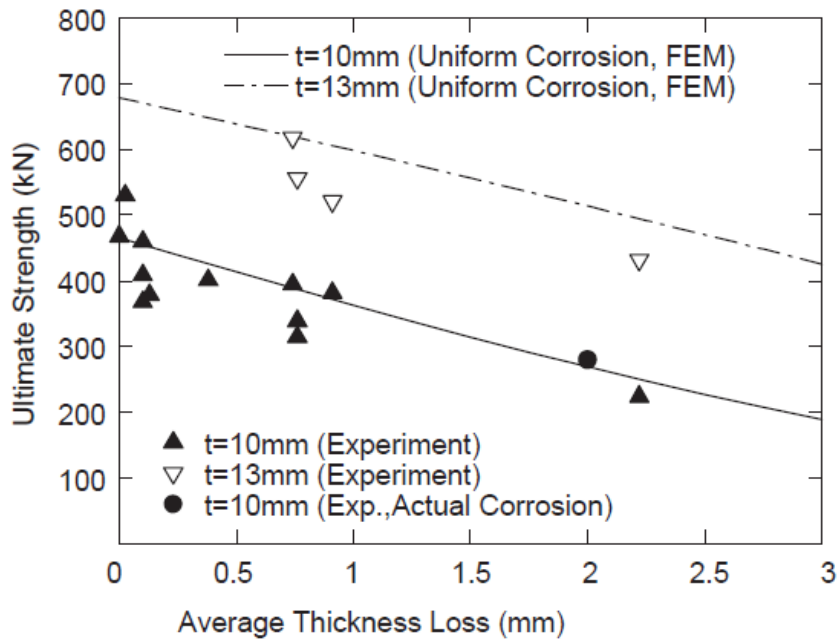
Εικόνα 39: Δοκίμιο με πραγματική διάβρωση και εικόνα αυτού μετά τη δοκιμή λυγισμού ^[46]

Η καμπύλη μείωσης φορτίου και η σχέση βέλους κάμψης – φορτίου παρατίθενται στα διαγράμματα που ακολουθούν, για ένα εκ των δοκιμίων με τεχνητούς βελονισμούς. Είναι προφανές ότι όταν υπερβούμε το μέγιστο φορτίο, το φορτίο μειώνεται σημαντικά και το βέλος κάμψης αυξάνεται σημαντικά.



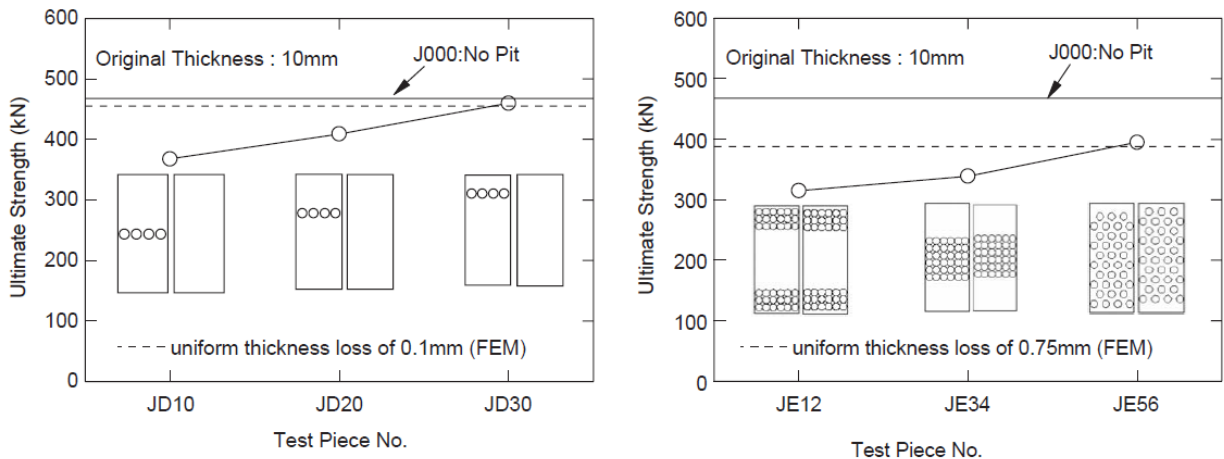
Διάγραμμα 61: Καμπύλη μείωσης φορτίου και σχέση βέλους κάμψης – φορτίου ^[46]

Στο διάγραμμα που έπεται παρατηρούμε τα αποτελέσματα των δοκιμών για τη συσχέτιση ανάμεσα στη μέγιστη αντοχή και τη μέση απώλεια πάχους, καθώς και τα αποτελέσματα ελαστοπλαστικής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση της γενικής διάβρωσης. Συνάγεται ότι στην περίπτωση που τα ελάσματα κορμού εμφανίζουν διάβρωση με βελονισμούς, η μέγιστη αντοχή τους είναι μικρότερη ή ίση από όταν εμφανίζουν γενική διάβρωση.



Διάγραμμα 62: Σχέση μέγιστης αντοχής με μέση απώλεια πάχους ^[46]

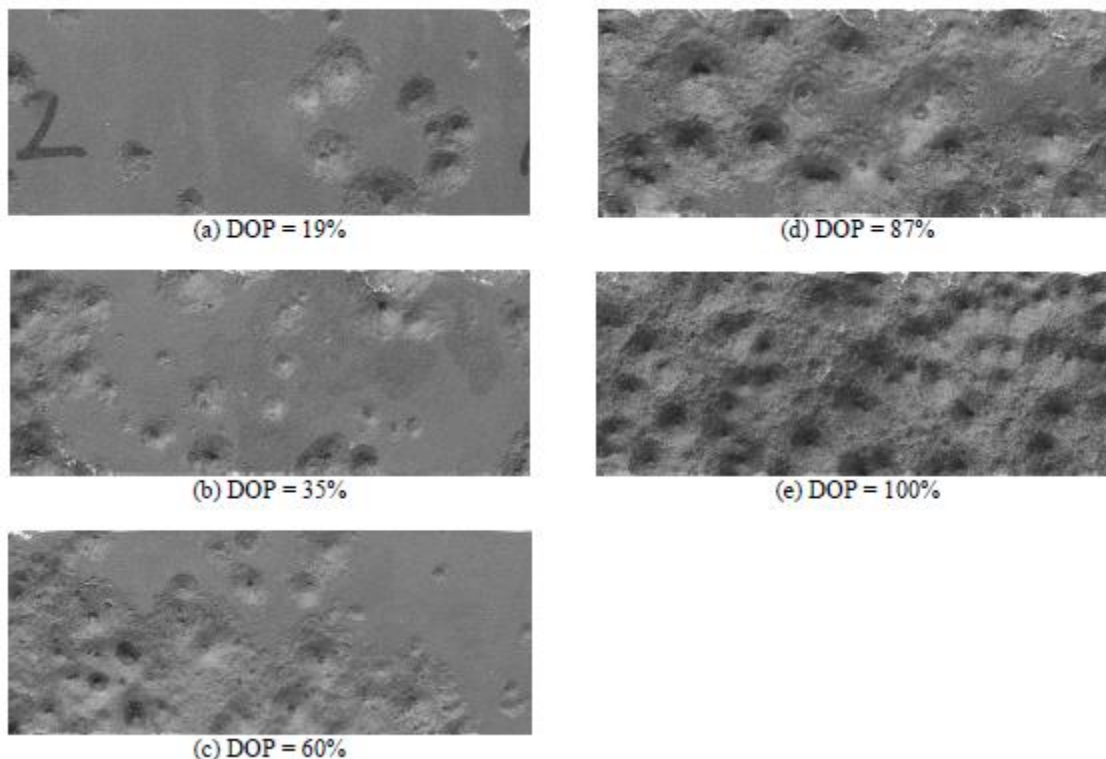
Μελετήθηκαν ακόμα η επίδραση της θέσης και της κατανομής των βελονισμών, ως βλέπουμε κάτωθι. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη αντοχή γίνεται μικρότερη όσο η θέση των βελονισμών πλησιάζει προς το κέντρο του ελάσματος κορμού. Από το διάγραμμα της κατανομής των βελονισμών συνάγεται ότι η μέγιστη αντοχή μειώνεται όταν οι βελονισμοί είναι συγκεντρωμένοι στο μεσαίο ή στο άνω και κάτω τμήμα του ελάσματος κορμού. Το μέσο πάχος για τα τρία δοκίμια είναι σχεδόν ίσο, οπότε παρατηρούμε ότι η μέση απώλεια πάχους δεν είναι πάντοτε κύριος παράγοντας για τη μέγιστη αντοχή και ότι επηρεάζεται από την κατανομή των βελονισμών.



Διάγραμμα 63: Επίδραση της θέσης και της κατανομής των βελονισμών στη μέγιστη αντοχή ^[46]

10.2.4 Συμπεράσματα

Η διάβρωση με βελονισμούς ελαττώνει τη μέγιστη αντοχή ενός ελάσματος. Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν είναι οι διαστάσεις των βελονισμών (μήκος, πλάτος, βάθος), ο βαθμός βελονισμών (Degree of Pitting – DOP, βλ. εικόνα κάτωθι) και η τοποθεσία τους. Η επίδραση της τοποθεσίας συνίσταται στο ότι όταν οι άκρες ενός ελάσματος εμφανίζουν διάβρωση με βελονισμούς υποβαθμίζουν την ικανότητά του για να παραλαμβάνει φορτία. Αντίστοιχα, η αντοχή σε λυγισμό εξαρτάται από τις διαστάσεις των βελονισμών και της προσβληθείσης περιοχής. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρουσία επιθεμάτων (doublet plates) επί των ελασμάτων. Για μεγάλα πάχη επιθέματος, η αντοχή σε λυγισμό τείνει να αυξάνει. Αντιθέτως, όταν το πάχος του επιθέματος είναι μικρότερο από το πάχος της διάβρωσης στο έλασμα, η αντοχή σε λυγισμό μειώνεται.

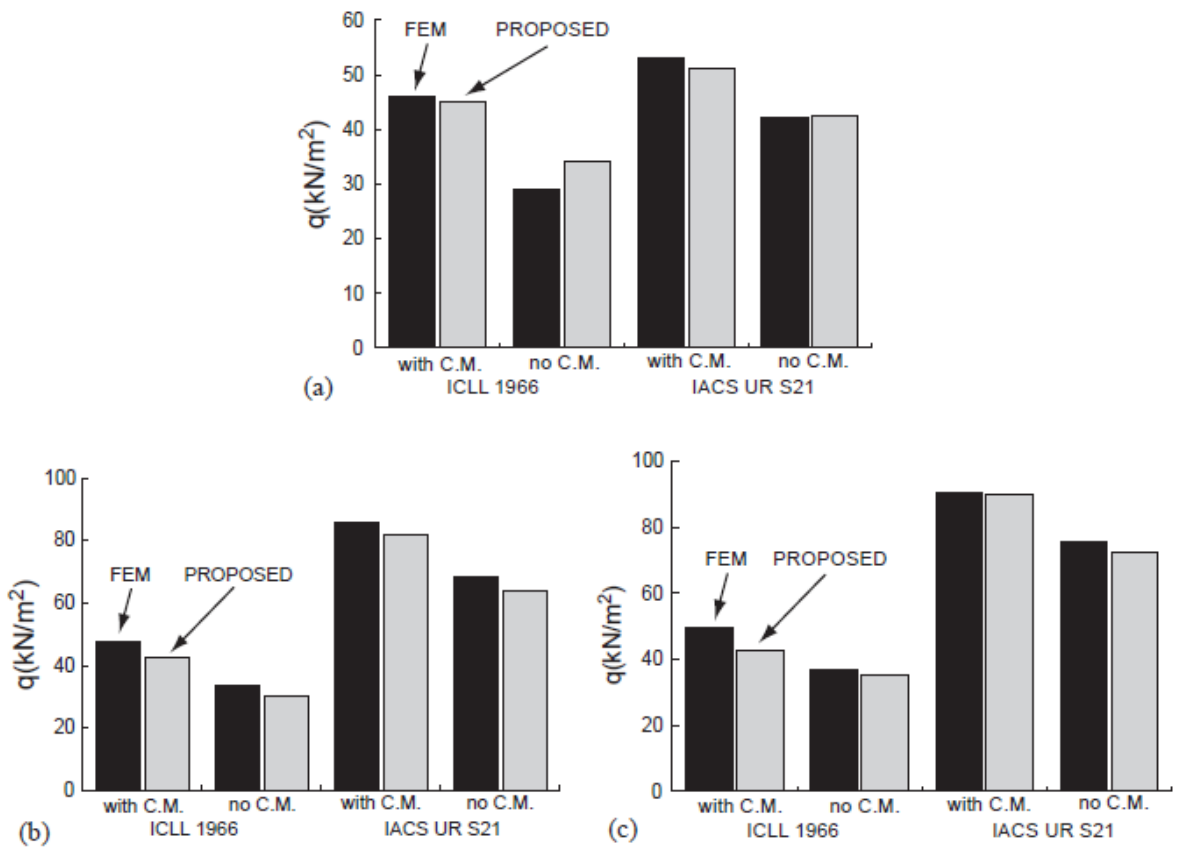


Εικόνα 40: Βαθμός βελονισμών (DOP) ^[45]

10.3 Επίδραση της διάβρωσης στην κατάρρευση των καλυμμάτων των στομιών κυτών ^[83]

Κατόπιν ελαστοπλαστικής ανάλυσης μεγάλου βέλους κάμψης (υπό τους T.Yao, S.Sato, A. Magaino, και T. Koïwa – οι δύο πρώτοι εκ του Παν/μίου της Οσάκα, Ιαπωνία, οι δύο τελευταίοι του NKK), με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε εξομοίωση του πλαστικού φορτίου κατάρρευσης για τα καλύμματα των στομιών κυτών υπό φόρτιση από «πράσινη θάλασσα» (green sea – ήτοι η επικάλυψη από θαλάσσιο νερό σε καταστάσεις έντονων κυματισμών). Εδώ, βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι το φορτίο από το νερό της «πράσινης θάλασσας» είναι στην πραγματικότητα δυναμικό, εν τούτοις μπορεί να θεωρηθεί ως στατικό κατά την ανάλυση απόκρισης της κατασκευής. Η ανάλυση περιλαμβάνει και την επίδραση του τοπικού λυγισμού.

Δύο τύποι καλυμμάτων στομιών κυτών μελετήθηκαν, τα πτυσσόμενα (folding) και τα συρόμενα (side-sliding). Ο πρώτος τύπος μελετήθηκε για φορητά πλοία μεγέθους Handymax και ο δεύτερος για Panamax και Cape-Size. Εφαρμόστηκαν οι κανόνες σχεδίασης τόσο της ILLC '66, όσο και των IACS. Τέλος, για κάθε κάλυμμα στομιού ελήφθησαν οι περιπτώσεις της παρουσίας ή της απουσίας περιθωρίου διάβρωσης. Τα περιθώρια διάβρωσης που ελήφθησαν υπ' όψιν είναι για το πτυσσόμενο κάλυμμα 2 mm στα άνω και κάτω ελάσματα και 1,5mm για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής, ενώ για το συρόμενο 2mm για όλα τα στοιχεία της κατασκευής. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μεθόδου σε σύγκριση με τους κανονισμούς φαίνονται στο κάτωθι διάγραμμα φορτίου κατάρρευσης:



Διάγραμμα 64: Σύγκριση υπολογισθέντων και προτεινόμενων από κανονισμούς φορτίων κατάρρευσης για φορητά πλοία τύπου: (a) Handy size, (b) Panamax, (c) Cape size [83]

Η διαφορά άνευ και με τα περιθώρια διάβρωσης είναι εμφανής, συνεπώς τα μειούμενα πάχη ελασμάτων λόγω διάβρωσης οδηγούν σε κατάρρευση για μικρότερες τιμές φόρτισης.

10.4 Επίδραση της διάβρωσης στην αντοχή πλοίου που έχει υποστεί ζημιά συγκρούσεως [48], [72]

Η απομένουσα αντοχή σε ζημιωθέν πλοίο κατόπιν συγκρούσεως (collision) μπορεί να εκτιμηθεί από τις συνολικές διαμήκεις καμπτικές ροπές, M_{total} , που είναι:

$$M_{total} = K_{us}M_{sw} + K_{uw}M_{wv}$$

Οι παράγοντες συνδυασμού για τις καμπτικές ροπές, K_{us} , K_{uw} αφορούν στην κατάσταση ζημίας και παρίστανται κάτωθι (από ABS).

Πίνακας 20: Παράγοντες συνδυασμού για καμπτικές ροπές

Συντελεστής	Κατάσταση		
	Άθικτη	Προσάραξη	Πρόσκρουση
Hogging			
K_{us}	1.0	1.1	1.0
K_{uw}	1.0	0.5	0.7
Sagging			
K_{us}	1.0	0.9	1.0
K_{uw}	1.0	0.5	0.7

Για την **καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό**, μας ενδιαφέρει η μέγιστη τιμή αυτής για τις καταστάσεις hogging και sagging. Ως γνωστόν, αναλυτικά η κατανομή της καμπτικής ροπής κατά μήκος του πλοίου υπολογίζεται ολοκληρώνοντας δύο φορές τη διαφορά των κατανομών βάρους και άντωσης [$p(x) = w(x) - b(x)$, και $p(x) = M''(x)$]. Ελλείπει όμως δεδομένων, η M_{sw} λαμβάνεται από εμπειρικό τύπο του JBP (Joint Bulkers Project – IACS).

$$M_{SW} = \begin{cases} 175CL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv,h} \text{ για hogging} \\ 175CL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv,s} \text{ για sagging} \end{cases}$$

Όπου

$$C = \begin{cases} (118 - 0.36L) \frac{L}{1000} \text{ για } 65m \leq L < 90m \\ 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5} \text{ για } 90m \leq L < 300m \\ 10.75 \text{ για } 300m \leq L \leq 350m \\ 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5} \text{ για } L \geq 350m \end{cases}$$

Όπου L το μήκος του πλοίου (m), B το πλάτος του πλοίου (m), C η παράμετρος κύματος και C_B ο συντελεστής γάστρας στη θερινή ίσαλο γραμμή.

Αναφορικά με την **καμπτική ροπή σε κυματισμό**, η ελάχιστη καμπτική ροπή σχεδίασης M_{wn} λαμβάνεται ως η μέση τιμή της ακραίας καμπτικής ροπής λόγω κυματισμού που το πλοίο ενδέχεται να συναντήσει κατά το χρόνο λειτουργίας του, που για απεριόριστη παγκόσμια λειτουργία δίδεται από το JBP ως εξής:

$$M_{wv} \begin{cases} +190F_M f_p CL^2 B C_B 10^{-3} \text{ για hogging} \\ -110F_M f_p CL^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} \text{ για sagging} \end{cases}$$

Όπου F_M ο παράγοντας κατανομής αναλόγως με τη διαμήκη θέση του εγκάρσιου τομέα, με τις τιμές του κάτωθι πίνακα και f ο συντελεστής που αντιστοιχεί στην πιθανότητα εμφάνισης κύματος και λαμβάνεται ίσος με $f_p = 1$ για πιθανότητα 10^{-8} και $f_p = 0.5$ για πιθανότητα 10^{-4} . Η σύμβαση προβλέπει θετικές τιμές για ροπές hogging και αρνητικές για sagging.

Θέση εγκάρσιου τομέα	Παράγοντας κατανομής F_M
$0 \leq x \leq 0.4L$	$2.5 (x/L)$
$0.4L \leq x \leq 0.65L$	1
$0.65L < x \leq L$	$2.86(1-x/L)$

Με βάση τους κανόνες του JBP, εφαρμόζονται περιθώρια διάβρωσης από 0,5 mm έως 4,4 mm, ανάλογα με τη θέση του κάθε στοιχείου της κατασκευής, τη φύση της δεξαμενής όπου βρίσκεται καθώς και τις γειτονικές του δεξαμενές. Στους δύο επόμενους πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα της σχετικής μελέτης (Ozguç et al) ^[72], από όπου προέκυψαν οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης και οριζόντιας καμπτικής ροπής για φορτηγά πλοία απλής (SSS) και διπλής (DSS) γάστρας, σε άθικτη κατάσταση, σε 16 διαφορετικές συνθήκες βλάβης καθώς και οι πλήρως πλαστικές καμπτικές ροπές. Ο πρώτος πίνακας δεν λαμβάνει υπ' όψιν το φαινόμενο της διάβρωσης, ενώ ο δεύτερος το λαμβάνει. Οι διαφορές των τιμών ανάμεσα στους δύο πίνακες είναι σαφείς και ανέρχονται κατά μέσο όρο περίπου στο 20% (19,82%), γεγονός που καταδεικνύει τη σημασία της διάβρωσης.

Residual strength of SSS and DSS bulk carriers both in intact and damage states without corrosion effect

		Single side skin bulk carrier (SSS)		Double side skin bulk carrier (DSS)	
		Hogging	Sagging	Hogging	Sagging
M_{Design} (Collision)	M_{sw}	0.406	0.375	0.406	0.375
	M_{wp}	0.605	0.635	0.605	0.605
	M_{total}	0.830	0.820	0.830	0.820
M_{Plastic} (intact)		1.779	1.779	1.823	1.823
$M_{\text{Only vertical ultimate}}$ (intact)		1.606	1.289	1.570	1.312
$M_{\text{Combined ultimate}}$ (intact)		1.499	1.304	1.493	1.314
$M_{\text{Combine ultimate}}$ (collision)	Case 1	1.392	1.221	1.345	1.241
	Case 2	1.384	1.239	1.386	1.244
	Case 3	1.313	1.094	1.341	1.113
	Case 4	1.407	1.191	1.394	1.197
	Case 5	1.374	1.225	1.356	1.249
	Case 6	1.354	1.154	1.386	1.241
	Case 7	1.367	1.151	1.420	1.244
	Case 8	1.324	1.126	1.393	1.201
	Case 9	1.364	1.203	1.420	1.288
	Case 10	1.371	1.191	1.363	1.196
	Case 11	1.347	1.221	1.402	1.216
	Case 12	1.438	1.226	1.403	1.206
	Case 13	1.421	1.245	1.406	1.278
	Case 14	1.427	1.235	1.329	1.180
	Case 15	1.326	1.111	1.368	1.194
	Case 16	1.411	1.196	1.397	1.197

$M_{\text{total}} = M_{sw} + 0.7 \times M_{wv}$ [36]. $M_{\text{Combine ultimate}}$ is calculated as combine vertical and horizontal bending moment. Moment ($\times 10^7$ KNm).

Residual strength of SSS and DSS bulk carriers both in intact and damage states with corrosion effect

		Single side skin bulk carrier (SSS)		Double side skin bulk carrier (DSS)	
		Hogging	Sagging	Hogging	Sagging
M_{Design} (Collision)	M_{sw}	0.406	0.375	0.406	0.375
	M_{wv}	0.605	0.635	0.605	0.605
	M_{total}	0.830	0.820	0.830	0.820
M_{Plastic} (Intact)		1.539	1.539	1.571	1.571
$M_{\text{Only vertical ultimate}}$ (Intact)		1.356	1.114	1.309	1.116
$M_{\text{Combine ultimate}}$ (Intact)		1.259	1.104	1.248	1.111
$M_{\text{Combine ultimate}}$ (Collision)	Case 1	1.157	1.028	1.118	1.023
	Case 2	1.153	1.038	1.155	1.031
	Case 3	1.101	0.919	1.117	0.926
	Case 4	1.166	1.011	1.159	1.002
	Case 5	1.154	1.031	1.126	1.032
	Case 6	1.139	0.971	1.157	1.029
	Case 7	1.149	0.970	1.192	1.039
	Case 8	1.117	0.955	1.161	1.001
	Case 9	1.141	1.008	1.182	1.073
	Case 10	1.151	0.998	1.132	0.991
	Case 11	1.128	0.938	1.167	1.025
	Case 12	1.211	1.033	1.169	1.012
	Case 13	1.168	1.046	1.168	1.063
	Case 14	1.201	1.039	1.114	0.978
	Case 15	1.101	0.930	1.135	0.998
	Case 16	1.178	1.015	1.163	1.001

$M_{\text{total}} = M_{sw} + 0.7 \times M_{wv}$ [36]. $M_{\text{Combine ultimate}}$ is calculated as combine vertical and horizontal bending moment. Moment ($\times 10^7$ KN m).

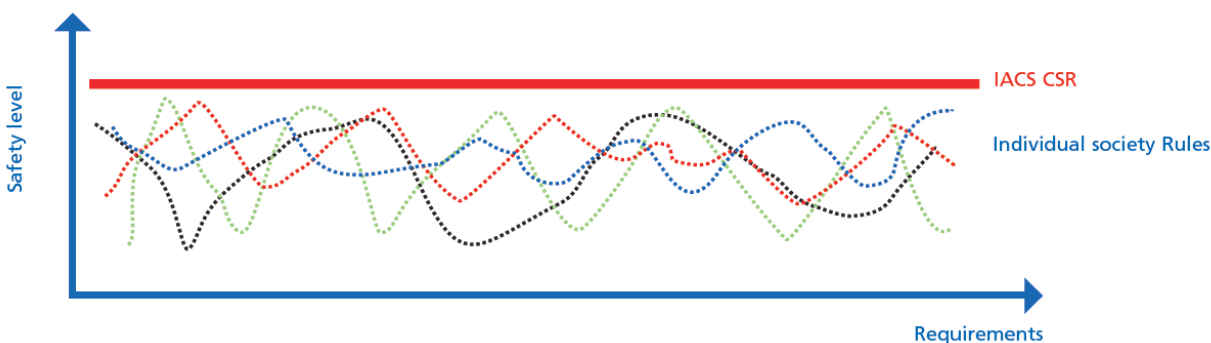
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΘΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΩΝ BULK CARRIERS ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΥΤΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΥΤΩΝ

11.1 IACS – Κοινοί Κατασκευαστικοί Κανόνες – Common Structural Rules (CSR) ^{[87], [89], [90], [92], [93]}

Με έναρξη ισχύος την 1^η Απριλίου 2006, οι CSR των IACS ετέθησαν σε ισχύ. Κύρια αφορμή για τη θέσπισή τους στάθηκε ο συνεχής ανταγωνισμός των Νηογνωμόνων στον τομέα της βελτιστοποίησης του πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής, άρα και του βάρους αυτής, που οδηγούσε σε λιγότερο εύρωστα (robust) πλοία. Είναι ενδεικτικό ότι μετά την έναρξη ισχύος τους, η συνηθισμένη αύξηση βάρους της μεταλλικής κατασκευής ανέρχεται σε 3-4%.

Συνοφίζοντας τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους:

- Οι κανονισμοί καλύπτουν τις κατασκευαστικές απαιτήσεις για bulk carriers και tankers.
- Κάνουν χρήση τελευταίων υπολογιστικών μεθόδων για πιο ενδεδειγμένους υπολογισμούς αντοχής, όπως με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.
- Πλοία που κατασκευάζονται βάσει των CSR έχουν κατασκευαστική ασφάλεια ισοδύναμη ή ανώτερη από αυτή που επιτυγχάνεται ακολουθώντας τους κανονισμούς μεμονωμένων Νηογνωμόνων προ της εφαρμογής των, ως διακρίνουμε σχηματικά ^[90]:



Οι άξονες γύρω από τους οποίους κινούνται είναι:

- Καινούριο μοντέλο για τον υπολογισμό της αντοχής, μέσω υπολογιστικής ανάλυσης και πειραματική διαπίστωση.
- Προσδιορισμός του πάχους ελάσματος, που λαμβάνει υπ' όψιν τόσο τα πάχη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής κατά το στάδιο της σχεδίασης όσο και τα ελάχιστα αποδεκτά πάχη κατά τη λειτουργική ζωή του πλοίου (βλ. Σχήμα 13, Κεφ. 2.7). Οι υπολογισμοί της αντοχής βασίζονται στα καθαρά πάχη (net scantlings), ενώ τα ολικά πάχη (gross scantlings) σε ένα newbuilding πλοίο υπολογίζονται με την προσθήκη μιας προσαύξεσης για την προβλεπόμενη απώλεια κατά τη ζωή σχεδίασης του πλοίου. Τα περιθώρια διάβρωσης (corrosion margins) για διαφορετικά κατασκευαστικά στοιχεία λαμβάνουν υπ' όψιν τους διαφορετικούς ρυθμούς διάβρωσης σε διάφορα μέρη του πλοίου.
- Η υιοθέτηση του προτύπου απόδοσης επιστρωμάτων (coating performance standard).

- Η αύξηση των προδιαγραφών σχεδίασης έναντι της κόπωσης από τα 20 στα 25 έτη, σε συνδυασμό με συγκεκριμένες απαιτήσεις για κρίσιμα σημεία της κατασκευής.
- Η υιοθέτηση μεθόδων άμεσου υπολογισμού της τελικής αντοχής του πλοίου.

Οι κανονισμοί CSR ειδικά για bulk carriers αφορούν πλοία απλής ή διπλής γάστρας, με απεριόριστη παγκόσμια ναυσιπλοΐα και περιέχουν τις απαιτήσεις των IACS για πάχη ελασμάτων, διάταξη, συγκολλήσεις, κατασκευαστικές λεπτομέρειες, υλικά και εξοπλισμό για τα bulk carrier που εμπίπτουν στα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- $90 < L < 350 \text{ m}$
- $L / B > 5$
- $B / D < 2.5$
- $C_B \geq 0.6$

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε – συνοπτικά – τις σημαντικότερες αναφορές των CSR στη διάβρωση των bulk carriers.

11.1.1 Ζωή σχεδίασεως (Κεφάλαιο 1 – Τομέας 3, 1.2)

«Το πλοίο πρέπει να παραμένει ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον, εφόσον λειτουργεί και συντηρείται ορθά, για την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του που θεωρείται ίση με 25 έτη, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Η πραγματική διάρκεια ζωής του πλοίου μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη ανάλογα με τις πραγματικές συνθήκες και τη συντήρηση του πλοίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν φαινόμενα γήρανσης, συγκεκριμένα την κόπωση, την υποβάθμιση των επιστρωμάτων, τη διάβρωση και τη φθορά.

11.1.2 Υπολογισμός πάχους ελάσματος (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 2, 3.1.1 έως 3.1.3)

- **Απαιτούμενο πάχος:** Το ολικό απαιτούμενο πάχος, $t_{\text{gross_required}}$, είναι τουλάχιστον όσο το ολικό πάχος, που υπολογίζεται προσθέτοντας την προσαύξηση διάβρωσης, t_C , ως εξής: $t_{\text{gross_required}} = t_{\text{net_required}} + t_C$
- **Προσφερόμενο πάχος:** Το ολικό προσφερόμενο πάχος, $t_{\text{gross_offered}}$, είναι το ολικό πάχος κατά το στάδιο της κατασκευής, που υπολογίζεται αφαιρώντας το πάχος της οικειοθελούς προσαύξησης (voluntary addition) από το πάχος κατασκευής, ως εξής: $t_{\text{gross_offered}} = t_{\text{as_built}} - t_{\text{voluntary_addition}}$
- **Καθαρό πάχος ελάσματος:** Το καθαρό προσφερόμενο πάχος, $t_{\text{net_offered}}$, προκύπτει αφαιρώντας το t_C από το ολικό προσφερόμενο πάχος ως εξής: $t_{\text{net_offered}} = t_{\text{gross_offered}} - t_C = t_{\text{as_built}} - t_{\text{voluntary_addition}} - t_C$.

11.1.3 Προσαυξήσεις διάβρωσης (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 3, 1 έως 1.2.2)

Για ανθρακούχο χάλυβα ισχύουν τα εξής:

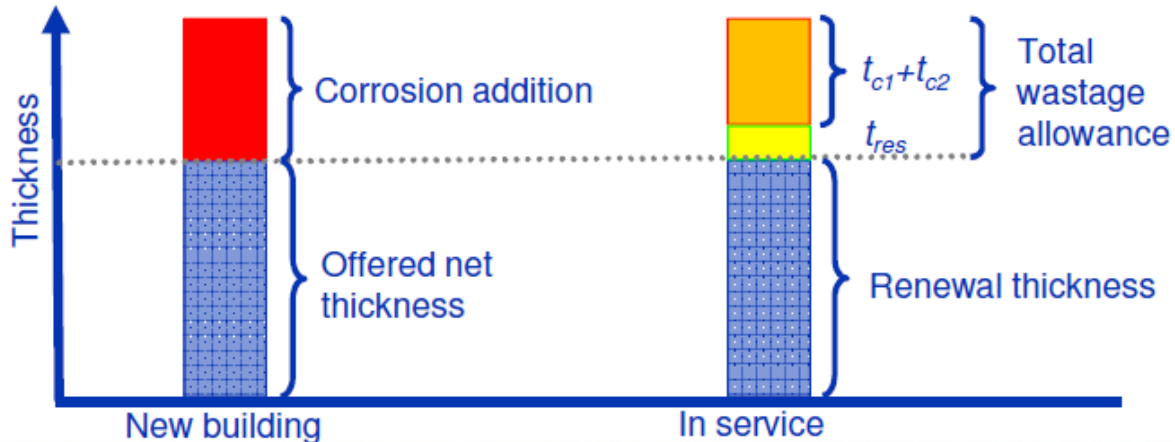
Η προσαύξηση διάβρωσης για καθένα από τις δύο πλευρές ενός κατασκευαστικού μέλους, t_{c1} ή t_{c2} ορίζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Η συνολική προσαύξηση διάβρωσης, t_c , σε mm, για αμφότερες τις πλευρές υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{\text{reserve}}$$

Για εσωτερικό στοιχείο σε δεδομένο χώρο του πλοίου, η συνολική προσαύξηση διάβρωσης t_c υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(2t_{c1}) + t_{\text{reserve}}$$



Σχήμα 51: Προσαυξήσεις διάβρωσης κατά IACS ^[93]

Όταν κατασκευαστικό στοιχείο εντάσσεται σε περισσότερες από μία τιμές της προσαύξησης διάβρωσης (π.χ. έλασμα σε κύτος ξηρού φορτίου που εκτείνεται πάνω από την κατώτερη ζώνη), λαμβάνεται υπ' όψιν η πιο ακραία τιμή της προσαύξησης διάβρωσης.

Για διάμηκες ενισχυτικό, η προσαύξηση διάβρωσης καθορίζεται σύμφωνα με τη συντεταγμένη της σύνδεσης του ενισχυτικού στο προσκείμενο έλασμα. Επιπλέον, η συνολική προσαύξηση διάβρωσης t_c δεν πρέπει να ληφθεί μικρότερη από 2 mm, εκτός από τον κορμό και το πέλμα για συνήθη ενισχυτικά.

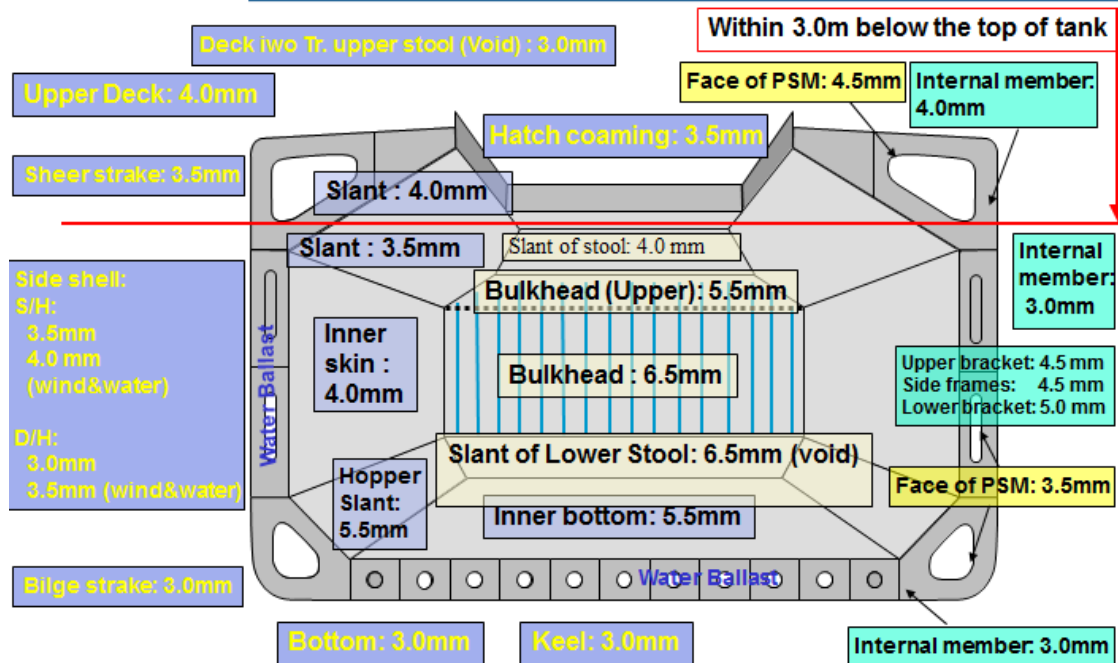
Πίνακας 21: Προσαύξηση διάβρωσης επί μίας πλευράς των κατασκευαστικών στοιχείων ^[92]

Διαμέρισμα	Κατασκευαστικό στοιχείο		Προσαύξηση διάβρωσης, t_{C2} ή t_{C2} σε mm	
			BC-A ή BC-B πλοία με $L \geq 150$ m	Άλλα
Δεξαμενή έρματος*	Έλασμα πρωτευόντων κατασκ. στοιχείων	Μέχρι 3 m κάτω από την κορυφή της δεξαμενής	2.0	
		Άλλού	1.5	
	Άλλα στοιχεία	Μέχρι 3 m κάτω από την κορυφή της δεξαμενής	1.7	
		Άλλού	1.2	
Κύτος ξηρού φορτίου	Εγκάρσια φρακτική	Άνω τμήμα	2.4	1.0
		Ελάσματα κάτω έδρασης	5.2	2.6
		Άλλα σημεία	3.0	1.5
	Άλλα στοιχεία	Άνω τμήμα	1.8	1.0
		Πέλματα και κορμοί των άνω αγκώνων των πλευρικών νομέων για bulk carriers απλής γάστρας		
		Πέλματα και κορμοί των κάτω αγκώνων των πλευρικών νομέων για bulk carriers απλής γάστρας	2.2	1.2
		Άλλα σημεία	2.0	1.2
	Κεκλιμένο έλασμα κάτω πλευρικής δεξαμενής	Συνεχής ξύλινη οροφή	2.0	1.2
Ασυνεχής ξύλινη οροφή		3.7	2.4	
Εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα	Οριζόντιο στοιχείο και κύριο κατάστρωμα		1.7	
	Μη οριζόντιο στοιχείο		1.0	
Εκτεθειμένο στο θαλάσσιο νερό			1.0	
Δεξαμενές καυσίμου και ελαίου λιπάνσεως			0.7	
Δεξαμενές γλυκού ύδατος			0.7	
Κενοί χώροι	Χώροι που δεν έχουν άμεση πρόσβαση, π.χ. μέσω σφραγισμένων ανθρωποθυρίδων		0.7	
Ξηροί χώροι	Μηχανοστάσιο, αντλιοστάσιο κλπ		0.5	
Άλλα διαμερίσματα			0.5	

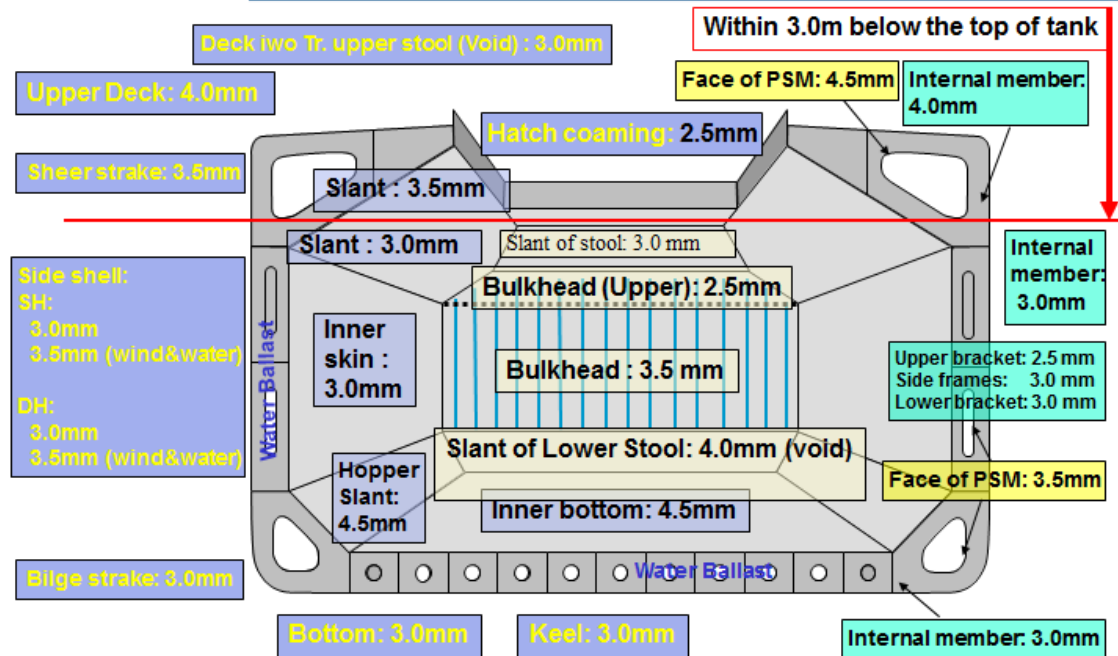
* Σημειώνεται ότι η προσαύξηση διάβρωσης για ελάσματα ανάμεσα στις δεξαμενές έρματος και θερμών δεξαμενών καυσίμου πρέπει να αυξηθεί κατά 0,7 mm

Κάτωθι θα παρατεθούν ενδεικτικές τιμές περιθωρίων διάβρωσης για bulk carriers μεγαλύτερα και μικρότερα από 150 μέτρα.

Feature – Sample Wastage Allowance Values for BC-A and BC-B Bulk Carriers with $L > 150$ m



Feature – Sample Wastage Allowance Values for BC-C or Bulk Carriers with $L < 150$ m



Σχήμα 52: Ενδεικτικές τιμές περιθωρίων διάβρωσης για bulk carriers >150m και <150m αντίστοιχα ^[87]

11.1.4 Προστασία από τη διάβρωση (Κεφάλαιο 3 – Τομέας 5, 1 έως 3.3)

11.1.4.1 Περιοχές προς προστασία

(CSR κεφ.3, τομέας 5, 1.1)

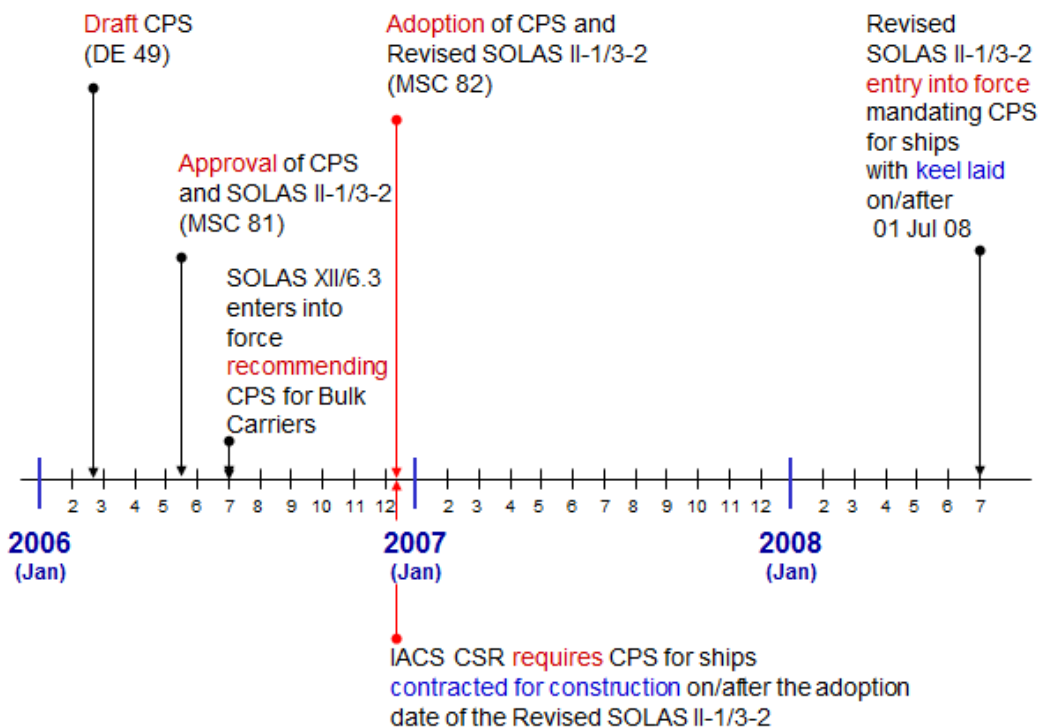
- 1.1.1 Όλες οι δεξαμενές έρματος, τα κύττη φορτίου και τα κύττη έρματος πρέπει να φέρουν σύστημα προστασίας από τη διάβρωση, σύμφωνα με τις παρ. 1.2, 1.3 και 1.4
- 1.1.2 Οι κενοί χώροι του διπλού πλευρικού ελάσματος κατά μήκος της περιοχής φορτίου για πλοία μήκους ≥ 150 m πρέπει να επιστρώνονται σύμφωνα με την 1.2
- 1.1.3 Προστατευτικά επιστρώματα δεν απαιτούνται για εσωτερικές επιφάνειες χώρων που προορίζονται για τη μεταφορά καυσίμου.
- 1.1.4 Οι στενοί χώροι πρέπει γενικά να επιστρώνονται από αποτελεσματικό προστατευτικό προϊόν, ιδίως στα άκρα του πλοίου όπου η επιθεώρηση και η συντήρηση δεν είναι εύκολες λόγω έλλειψης προσβασιμότητας.

11.1.4.2 Προστασία δεξαμενών έρματος ^[87] ^[91]

(CSR κεφ.3, τομέας 5, 1.2) Για δεξαμενόπλοια και φορτηγά πλοία χύδην φορτίου κατασκευασμένα την ή έπειτα της 1^{ης} Ιουλίου 1998, σύμφωνα με τον κανονισμό **3-2** του **SOLAS** (Chapt. II-1 – Part A-1), όλες οι δεξαμενές αποκλειστικής μεταφοράς θαλασσίτου έρματος πρέπει να έχουν αποτελεσματικό σύστημα προστασίας από τη διάβρωση όπως σκληρά προστατευτικά επιστρώματα ή ισοδύναμο. Τα επιστρώματα πρέπει, κατά προτίμηση, να είναι ανοικτού χρώματος. Η επιλογή, εφαρμογή και συντήρηση του συστήματος πρέπει να συνάδει με τις οδηγίες του **IMO**, οι οποίες περιλαμβάνουν τα πρότυπα των επιστρωμάτων (Coating Performance Standards – **CPS**), την επιθεώρηση της επιφανειακής προετοιμασίας, της εφαρμογής τους, της κατάστασης αυτών και της συντήρησής τους. Έχουν υιοθετηθεί οι προδιαγραφές απόδοσης επιστρωμάτων τόσο από τον SOLAS (2008) όσο και από τον IACS (2006), ως φαίνεται στο σχήμα στο τέλος της παραγράφου.

Επιπρόσθετα, ο κανονισμός ορίζει ότι πρέπει να γίνεται χρήση και θυσιαζόμενων ανόδων, όπου αυτή ενδείκνυται και είναι εφικτή.

Ο κανονισμός **MSC.215(82) - ANNEX 1** της **MARITIME SAFETY COMMITTEE** επεκτείνει τον άνωθεν κανονισμό για τα επιστρώματα και για τους χώρους ανάμεσα στο διπλό πλευρικό έλασμα για Φορτηγά Πλοία μήκους > 150 m.



Σχήμα 53: Η υιοθέτηση του CPS από τους CSR των IACS ^[87]

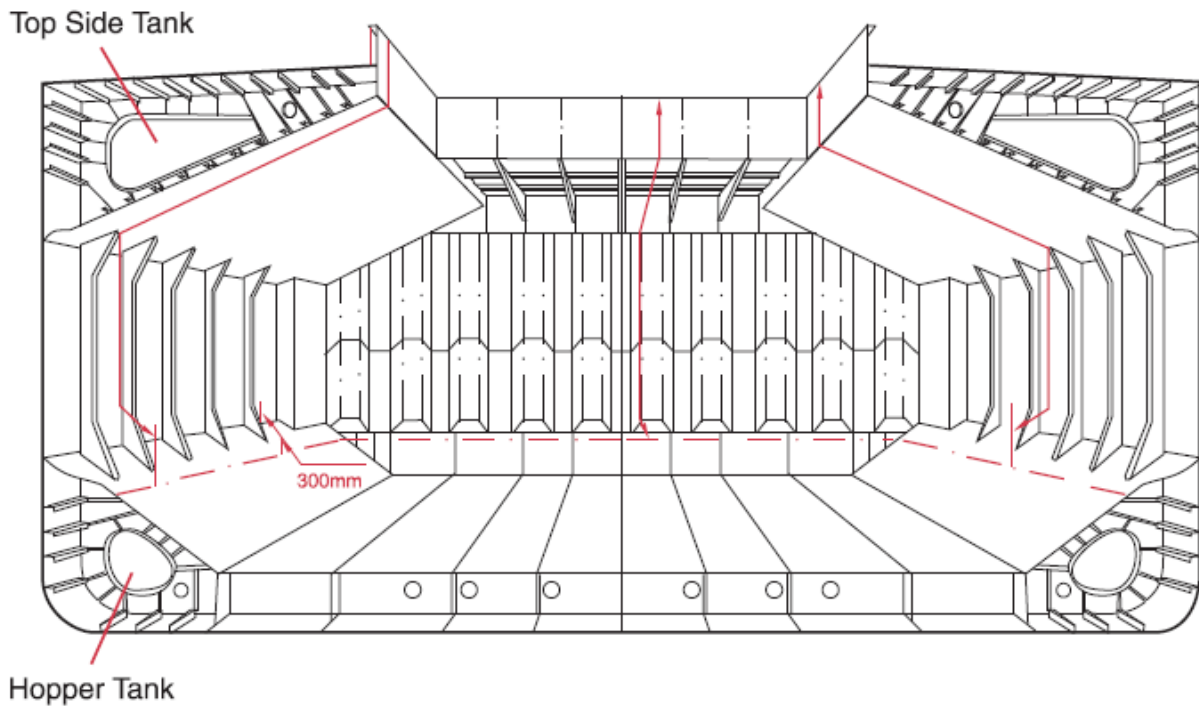
11.1.4.3 Προστασία από τη διάβρωση στα κύτη φορτίου: ^{[23], [85]}

Η οδηγία **IACS Z9** “Corrosion Protection Coatings for Cargo Hold Spaces on Bulk Carriers” (που εμπεριέχεται στους CSR στο κεφ.3, τομέας 5, 1.3) ορίζει τα εξής:

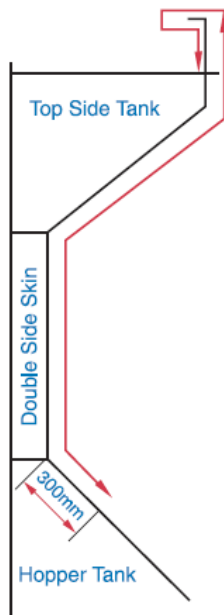
Κατά την κατασκευή καινούργιου πλοίου, όλες οι εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες των στομιών κυτών και των καλυμμάτων αυτών καθώς και όλες οι εσωτερικές επιφάνειες των κυτών φορτίου, εξαιρώντας την περιοχή του εσωτερικού πυθμένα και τα κεκλιμένα ελάσματα των κάτω πλευρικών δεξαμενών περίπου 300 mm κάτω από τους πλευρικούς νομείς και των αγκώνων αυτών, πρέπει να φέρουν αποτελεσματικό προστατευτικό επίστρωμα (εποξειδικό ή ισοδύναμο), εφαρμοσμένο σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστού. Κατά την επιλογή του επιστρώματος πρέπει να ληφθούν υπ’ όψιν από τους Πλοιοκτήτες οι αναμενόμενες συνθήκες φορτίου κατά τη λειτουργία του πλοίου.

Για υπάρχοντα φορτηγά πλοία, όπου οι Πλοιοκτήτες επιλέξουν να επιστρώσουν ή να επανεπιστρώσουν κύτη φορτίου ως σημειώνεται άνωθεν, πρέπει να ληφθούν υπ’ όψιν οι επισταμένες επιθεωρήσεις (Close-up Surveys) και οι επιθεωρήσεις παχυμέτρησης. Προ της επιστρώσεως των κυτών φορτίου για υπάρχοντα πλοία, η διαστασιολόγηση πρέπει να πιστοποιηθεί παρουσία Επιθεωρητού.

Σχηματικά, η εφαρμογή του άνωθεν κανονισμού παρίσταται κάτωθι:



Σχήμα 54: Έκταση των εσωτερικών επιφανειών κύτους φορτίου που πρέπει να επιστρωθούν βάσει του IACS Z9 σε bulk carrier απλής γάστρας ^[23]



Σχήμα 55: Έκταση των εσωτερικών επιφανειών κύτους φορτίου που πρέπει να επιστρωθούν βάσει του IACS Z9 σε bulk carrier διπλής γάστρας ^[23]

11.1.4.4 Προστασία κυτών έρματος

(CSR κεφ.3, τομέας 5, 1.4) Όλες οι εσωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες των στομιών κυτών και των καλυμμάτων τους, καθώς και όλες οι εσωτερικές επιφάνειες των κυτών έρματος πρέπει να φέρουν αποτελεσματικό προστατευτικό επίστρωμα, εποξειδικού ή ισοδύναμου τύπου, εφαρμοσμένου σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστού.

11.1.4.5 Θυσιαζόμενες άνοδοι

(CSR κεφ.3, τομέας 5, 2 - 2.3) Οι άνοδοι πρέπει να έχουν χαλύβδινους πυρήνες και να εγκαθίσταται ικανώς στιβαρά επί της στηρίξεως αυτών ούτως ώστε να διατηρούν την άνοδο ακόμα και όταν αυτή είναι φθαρμένη σε σημείο μη λειτουργικότητας. Τα χαλύβδινα ενθέματα πρέπει να αναρτώνται στην κατασκευή μέσω συνεχούς συγκόλλησης ή μέσω κοχλίωσης, με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο (2) μπουλόνια με περικόχλια ασφαλίσεως. Πάντως μπορεί να γίνουν αποδεκτοί και άλλοι τρόποι εγκαταστάσεώς τους.

Οι στηρίξεις σε κάθε άκρο μιας ανόδου δεν πρέπει να αναρτώνται σε ξεχωριστά αντικείμενα που μπορεί να κινηθούν ανεξάρτητα.

Όπου ενθέματα ή στηρίξεις ανόδων συγκολλούνται επί της κατασκευής, οι συγκολλήσεις πρέπει να είναι ομαλές.

11.1.5 Παχυμετρήσεις και Κριτήρια Αποδοχής (Thickness Measurements, Acceptance Criteria)

[92]

(CSR κεφ.13, τομέας 2, 1 - 1.4)

Κριτήρια τοπικής αντοχής:

1. Εφαρμογή:

Τα στοιχεία της κατασκευής που λαμβάνονται υπ' όψιν για τα κριτήρια της τοπικής αντοχής ορίζονται στις οδηγίες UR Z10.2 και UR Z10.5 για bulk carriers απλής και διπλής γάστρας αντίστοιχα

2. Πάχη αντικατάστασης για διάβρωση εκτός της τοπικής διάβρωσης:

Για κάθε στοιχείο της κατασκευής, αντικατάσταση χάλυβα απαιτείται όταν το μετρούμενο πάχος (t_{gauged}) είναι λιγότερο από το πάχος αντικατάστασης ($t_{\text{gauged}} < t_{\text{renewal}}$). Στην περίπτωση όπου για το μετρούμενο πάχος ισχύει: $t_{\text{renewal}} < t_{\text{gauged}} < t_{\text{renewal}} + t_{\text{reserve}}$, δύναται να χρησιμοποιηθεί επίστρωμα που εφαρμόζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστού αυτού ως εναλλακτική για την αντικατάσταση χάλυβα. Το επίστρωμα πρέπει να συντηρείται σε καλή κατάσταση.

3. Πάχη αντικατάστασης για τοπική διάβρωση:

Εάν η ένταση των βελονισμών σε περιοχή όπου απαιτείται επιστροφή είναι μεγαλύτερη του 15%, πρέπει να διενεργηθούν παχυμετρήσεις για τη διαπίστωση της εκτάσεως της διάβρωσης με βελονισμούς. Το 15% αφορά σε βελονισμούς ή αυλακώσεις σε μία μόνον πλευρά του ελάσματος.

Σε περιπτώσεις όπου οι βελονισμοί υπερβαίνουν το 15%, επιφάνεια 300 mm ή μεγαλύτερη, στο σημείο του ελάσματος με την περισσότερη διάβρωση βελονισμών, πρέπει να καθαριστεί έως το γυμνό μέταλλο και το πάχος πρέπει να μετρηθεί στους πέντε (5) βαθύτερους βελονισμούς εντός της καθαρής περιοχής. Το μικρότερο από αυτά τα πάχη λαμβάνεται ως το πάχος καταγραφής.

Το ελάχιστο απομένον πάχος σε βελονισμούς, αυλακώσεις ή άλλες τοπικές περιοχές πρέπει να είναι μεγαλύτερο από:

- 75% του αρχικού (as-built) πάχους στους κορμούς και τα πέλματα των αγκώνων των νομέων
- 70% του αρχικού (as-built) πάχους στο πλευρικό έλασμα και στο έλασμα των άνω και κάτω πλευρικών δεξαμενών που συνδέεται με κάθε νομέα, για πλάτος έως 30 mm από κάθε πλευρά, χωρίς να είναι μεγαλύτερο από το $t_{renewal}$

4. Κριτήρια γενικής αντοχής:

Η παράγραφος αυτή αφορά σε κατασκευαστικά στοιχεία για τρεις (3) ζώνες, τη **ζώνη καταστρώματος**, τη **ζώνη πυθμένα** και τη **ζώνη ουδέτερου άξονα**. Οι ζώνες ορίζονται στο κεφ. 13, τομέας 1, 1.2 και συνοπτικά είναι:

- **Ζώνη καταστρώματος:** Όλα τα στοιχεία που συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου πάνω από την οριζόντια σειρά ελασμάτων των άνω πλευρικών δεξαμενών ή πάνω από το επίπεδο που αντιστοιχεί στο $0,9 \times D$ (κοίλο) εάν δεν υπάρχουν άνω πλευρικές δεξαμενές (ελάσματα καταστρώματος αντοχής, λώροι καταστρώματος, ελάσματα ζωστήρα, πλευρικό έλασμα, κεκλιμένο έλασμα άνω πλευρικών δεξαμενών και διαμήκη ενισχυτικά που συνδέονται στα προαναφερθέντα ελάσματα).
- **Ζώνη πυθμένα:** Περιλαμβάνει τα στοιχεία που συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου έως το ανώτατο σημείο του κεκλιμένου ελάσματος των κάτω πλευρικών δεξαμενών ή έως το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα εάν δεν υπάρχουν κάτω πλευρικές δεξαμενές (ελάσματα τρόπιδας, πυθμένα, υδροσυλλεκτών, εσωτερικού πυθμένα, σταθμίδες (girders) πυθμένα, κεκλιμένο έλασμα κάτω πλευρικών δεξαμενών, πλευρικό έλασμα και διαμήκη ενισχυτικά που συνδέονται στα προαναφερθέντα ελάσματα).
- **Ζώνη ουδέτερου άξονα:** Περιλαμβάνει τα ελάσματα μόνο των στοιχείων μεταξύ της ζώνης καταστρώματος και της ζώνης πυθμένα (πλευρικό έλασμα, εσωτερικό πλευρικό έλασμα για πλοία διπλής γάστρας).

Για τη ζώνη καταστρώματος και πυθμένα η τρέχουσα ροπή αντίστασης διατομής ως προκύπτει με την παχυμέτρηση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της ροπής αντίστασης του ολικού αρχικού

πάχους (ήτοι η τρέχουσα επιφάνεια διατομής δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 90% της επιφάνειας διατομής ως προκύπτει από το ολικό αρχικό πάχος).

Για τη ζώνη ουδέτερου άξονα, η τρέχουσα επιφάνεια διατομής, που είναι το άθροισμα της επιφάνειας των μετρηθέντων ελασμάτων της ζώνης αυτής, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 85% της ολικής αρχικής επιφάνειας διατομής.

Εάν οι απώλειες όλων των στοιχείων για συγκεκριμένη εγκάρσια τομή είναι μικρότερες από 10% για τη ζώνη καταστρώματος και πυθμένα και 15% για τη ζώνη ουδέτερου άξονα, τα κριτήρια γενικής αντοχής της τομής αυτής αυτομάτως ικανοποιούνται και δεν απαιτείται επιπλέον έλεγχος.

11.2 Οδηγίες UR Z.10.2 και UR Z.10.5 (IACS) ^[85]

Οι οδηγίες αυτές αφορούν σε επιθεωρήσεις της γάστρας για bulk carriers απλής (Z.10.2) και διπλής (Z.10.5) γάστρας. Λόγω της μεγάλης εκτάσεώς τους δεν είναι δυνατόν να παρατεθούν στα πλαίσια της τρέχουσας εκθέσεως, ωστόσο θα αναφερθούν τα κύρια σημεία που διέπουν:

- Γενικά (εφαρμογή, ορισμοί, πεδίο ελέγχου των επιθεωρήσεων)
- Ενισχυμένη επιθεώρηση (special survey)
- Ετήσια επιθεώρηση (annual survey)
- Ενδιάμεση επιθεώρηση (intermediate survey)
- Προετοιμασία επιθεώρησης
- Απαιτούμενα έγγραφα του πλοίου
- Διαδικασία εκτέλεσης παχυμετρήσεων
- Κριτήρια αποδοχής
- Αναφορά και εκτίμηση της επιθεώρησης

Το σημείο που θα σταθούμε αφορά στα κριτήρια αποδοχής, τα οποία εξειδικεύουν περισσότερο τις περιπτώσεις των CSR που είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

11.2.1 Διάβρωση με βελονισμούς

Πλευρικά τμήματα της κατασκευής: Ισχύουν ακριβώς τα ίδια που αναφέρθηκαν στα πάχη αντικατάστασης για τοπική διάβρωση στην (11.1.5)

Λοιπά τμήματα της κατασκευής: Για ελάσματα με ένταση βελονισμών μικρότερη από 20%, το μετρούμενο πάχος, t_m , πρέπει να ικανοποιεί το ελάχιστο από τα δύο (2) κριτήρια:

- $t_m \geq 0.7(t_{as_built} - t_{vol_add}) \text{ mm}$
- $t_m \geq t_{renewal} - 1 \text{ mm}$

Το μέσο πάχος σε κάθε τομή των ελασμάτων δεν πρέπει να είναι μικρότερο από τα κριτήρια αντικατάστασης για γενική διάβρωση (κεφ. 13 CSR)

11.2.2 Διάβρωση ακμής

Με την προϋπόθεση ότι το ολικό ύψος διάβρωσης της διάβρωσης ακμής του πέλματος, ή του κορμού για την περίπτωση επίπεδων ενισχυτικών, είναι μικρότερο από 25% (βλ. σχήμα 21, κεφάλαιο 5 της τρέχουσας εκθέσεως) του πλάτους του πέλματος του ενισχυτικού ή του ύψους του κορμού αντίστοιχα, το μετρούμενο πάχος, t_m , πρέπει να ικανοποιεί το ελάχιστο από τα δύο (2) κριτήρια:

- $t_m \geq 0.7(t_{as_built} - t_{vol_add}) \text{ mm}$
- $t_m \geq t_{renewal} - 1 \text{ mm}$

Το μέσο μετρούμενο πάχος κατά πλάτος ή μήκος του ενισχυτικού δε μπορεί να είναι μικρότερο από ότι ορίζεται στο κεφ. 13 CSR

Οι ακμές ελασμάτων στα ανοίγματα για ανθρωποθυρίδες, ανοίγματα φωτισμού κλπ δύνανται να είναι κάτω από τα όρια του ελάχιστου πάχους όπως αυτό ορίζεται στο κεφ. 13 CSR, με τις προϋποθέσεις ότι:

(α) Η μέγιστη απώλεια πάχους του ελάσματος, κάτω από το ελάχιστο που ορίζεται στο κεφ. 13 CSR, από την ακμή του ανοίγματος δεν είναι περισσότερη από 20% της μικρότερης διάστασης του ανοίγματος και δεν υπερβαίνει τα 100 mm.

(β) Τραχιές ή ανομοιόμορφες ακμές μπορούν να κοπούν, με την προϋπόθεση ότι η μεγαλύτερη διάσταση του ανοίγματος δεν αυξάνει κατά περισσότερο από 10% και το απομένον πάχος της νέας ακμής δεν είναι μικρότερο από $t_{renewal} - 1 \text{ mm}$.

11.2.3 Διάβρωση με αυλακώσεις

Όπου το πλάτος των αυλακώσεων είναι μέχρι 15% του ύψους του κορμού αλλά όχι μεγαλύτερο από 30 mm (βλ. σχήμα 22, κεφάλαιο 5 της τρέχουσας εκθέσεως), το μετρούμενο πάχος, t_m , στην περιοχή με αυλακώσεις πρέπει να ικανοποιεί το ελάχιστο από τα δύο (2) κριτήρια:

- $t_m \geq 0.75(t_{as_built} - t_{vol_add}) \text{ mm}$
- $t_m \geq t_{renewal} - 0.5 \text{ mm}$

Και ταυτόχρονα πρέπει να είναι όχι μικρότερο από 6 mm.

Στοιχεία της κατασκευής με μεγαλύτερες επιφάνειες αυλακώσεων πρέπει να εκτιμηθούν με βάση τα κριτήρια γενικής διάβρωσης (κεφ. 13 CSR) χρησιμοποιώντας το μέσο μετρούμενο πάχος του ελάσματος/ενισχυτικού.

11.3 Κανονισμός για τη μεταφορά στερεών φορτίων χύδην ^[84]

Πρόκειται για τον **IMSBC (INTERNATIONAL MARITIME SOLID BULK CARGOES CODE), RESOLUTION MSC.268(85)**, που ετέθη σε ισχύ στις 4 Δεκεμβρίου 2008. Ο κανονισμός αυτός διέπει τη μεταφορά φορτίων χύδην και όλες τις προδιαγραφές που πρέπει να τηρούνται, από την φορτοεκφόρτωση αυτών έως την ασφάλεια του πληρώματος κ.ά.

Ειδικά για διαβρωτικά φορτία, τα τοποθετεί στην **Κλάση 8 (Class 8)** στην παράγραφο 9.2.2.7, ως διαβρωτικές ουσίες (corrosive substances). Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι «Τα υλικά στην κλάση αυτή είναι υλικά που, μέσω χημικών δράσεων, θα προκαλέσουν σημαντική ζημία εάν έρθουν σε επαφή με ζωντανό ιστό ή θα προκαλέσουν υλικές ζημιές, ή ακόμη και θα καταστρέψουν, άλλα φορτία ή το μέσο της μεταφοράς των (Ητοι την μεταλλική κατασκευή του κύτους φορτίου).

Στη συνέχεια του κανονισμού, στην παράγραφο **9.3** (Απαιτήσεις στοιβασίας και διαχωρισμού) → **9.3.1.10** αναφέρεται ότι: «Υλικά που συνιστούν διαβρωτικό κίνδυνο τέτοιας εντάσεως ώστε να επηρεάσουν είτε ανθρώπινο ιστό είτε τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου θα φορτώνονται όταν και μόνον όταν έχουν ληφθεί τα απαιτούμενα προστατευτικά μέτρα».

Στην παράγραφο **9.3.2** (Ειδικές απαιτήσεις) → **9.3.2.4** (Υλικά κλάσης 8), ορίζονται τα εξής:

- **(9.3.2.4.1)** Τα φορτία αυτά θα παραμένουν στεγνά όσο είναι πρακτικά εφικτό
- **(9.3.2.4.2)** Πρω της φορτώσεως των φορτίων αυτών, προσοχή θα αποδίδεται στον καθαρισμό των χώρων των κυτών φορτίου όπου θα φορτωθούν, κυρίως για να διασφαλιστεί ότι οι χώροι αυτοί είναι στεγνοί.
- **(9.3.2.4.3)** Διείσδυση των υλικών αυτών σε άλλους χώρους φορτίου, σεντίνες, φρεάτια και οροφή θα αποφεύγεται.
- **(9.3.2.4.4)** Ιδιαίτερη προσοχή θα αποδίδεται στον καθαρισμό των χώρων φορτίου κατόπιν της εκφορτώσεως, καθώς κατάλοιπα αυτών των φορτίων μπορεί να είναι πολύ διαβρωτικά προς τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Η πλύση των χώρων φορτίου με μάνικα, ακολουθούμενη από προσεκτικό στέγνωμα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν.

Το **Appendix 1** (Παράρτημα 1) του Κανονισμού αυτού, αναφέρεται σε μεμονωμένα στερεά φορτία χύδην κατά πολύ διεξοδικό τρόπο, αναφέροντας όλες τις ιδιότητές τους καθώς και διαδικασίες φορτοεκφορτώσεως, καθαρισμού, διαχωρισμού καθώς και μέτρα πρόληψης τυχόν κινδύνων και συνιστά το μεγαλύτερο τμήμα του κανονισμού.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η διάβρωση ενός μετάλλου είναι μια διαδικασία που γενικά αποδίδεται στην εγγενή τάση του μετάλλου να επιστρέψει από την ενεργειακά αναβαθμισμένη του κατάσταση στη φυσική του μορφή.
- Το θαλάσσιο περιβάλλον, τόσο το θαλάσσιο νερό όσο και η θαλάσσια ατμόσφαιρα, συνιστά περιβάλλον ιδιαίτερα διαβρωτικό προς τα πλοία και τις ναυπηγικές κατασκευές. Η διάβρωση στο θαλάσσιο νερό εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και αλάτι, το pH, την ταχύτητα ροής του νερού γύρω από την κατασκευή και τη ρύπανση αυτής καθώς και τη θέση (βάθος) του υπό διάβρωση μετάλλου στο νερό. Η διάβρωση στη θαλάσσια ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη σχετική υγρασία και τη διάρκεια αυτής, την παρουσία χλωριόντων και τη θερμοκρασία.
- Οι κυριότερες μορφές διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση και η τοπική διάβρωση. Οι συχνότερες περιπτώσεις τοπικής διάβρωσης είναι η διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion), η διάβρωση με αυλακώσεις (grooving corrosion) και η διάβρωση ακμής (edge corrosion).
- Τα σημεία της κατασκευής στα bulk carriers πιο επιρρεπή στη διάβρωση είναι:
 - 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 εγχοπές 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 σήνηθες ύψος όπου ανέρχεται το φορτίο.
- Τα σημεία της κατασκευής πιο επιρρεπή στην κόπωση 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 στομιών κυτών, εκεί όπου συνδέονται με το κυρίως κατάστρωμα.
- Η επίδραση της διάβρωσης προσεγγιστικά διπλασιάζει τη ζημία λόγω κόπωσης
- Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση στα bulk carriers είναι λειτουργικές (λόγος φορτίου, λόγος έρματος, είδος διαδρομής, διαβρωτικότητα φορτίου και συχνότητα εναλλαγής φορτίου) και σχεδιαστικές (σύστημα προστασίας από τη διάβρωση, θέση και προσανατολισμός των στοιχείων της κατασκευής).
- Το διαβρωτικό περιβάλλον εντός των κυτών φορτίου εξαρτάται από το είδος του φορτίου και την κατάσταση φόρτωσης.
- Οι μηχανικές ζημίες κατά τη φορτοεκφόρτωση προκαλούν ρήξη των επιστρωμάτων και στα σημεία όπου συμβαίνει αυτό παρατηρείται εκκίνηση της διάβρωσης.

- Τα ελάσματα του πυθμένα των κυτών φορτίου δε φέρουν επιστρώμα στην άνω πλευρά τους και εκεί υπάρχει διάβρωση παρουσία φορτίου, ενώ οι μηχανικές ζημιές που υφίσταται κατά τις φορτοεκφορτώσεις προκαλούν τοπικό λυγισμό και ρήξη των επιστρωμάτων στην κάτω πλευρά τους και η διάβρωση εκεί γίνεται σε κλειστή ατμόσφαιρα και τα προϊόντα της έχουν ψαθυρή σύσταση.
- Οι κάτω εδράσεις δεν φέρουν επιστρώματα και εμφανίζουν ρυθμό διάβρωσης υψηλότερο από άλλες περιοχές των κυτών, εκτός από τον εσωτερικό πυθμένα.
- Οι άνω εδράσεις φέρουν εποξειδικά επιστρώματα και οι ρυθμοί διάβρωσης τους είναι χαμηλότεροι από άλλες περιοχές των κυτών. Συνήθως διαβρώνονται στην περίπτωση μεταφοράς γαιάνθρακα.
- Οι εγκάρσιες φρακτές είναι επιστρωμένες στο μεσαίο και άνω τμήμα τους και εμφανίζουν συνήθως εντονότερη διάβρωση στο κάτω τμήμα τους.
- Οι νομείς του πλευρικού ελάσματος εμφάνιζαν γενική διάβρωση προ της θέσπισης κανονισμών που υποχρέωσαν την εφαρμογή επιστρωμάτων, οπότε και άρχισαν να εμφανίζουν διάβρωση με βελονισμούς. Το κάτω τμήμα τους εμφανίζει μεγαλύτερους ρυθμούς διάβρωσης. Κύριο αίτιο της διάβρωσής τους είναι η συμπύκνωση του πλευρικού ελάσματος. Αστοχία ενός νομέα λόγω διάβρωσης προκαλεί αύξηση της φόρτισης των γειτονικών νομέων με πιθανότητα κατάρρευσης του πλευρικού ελάσματος (φαινόμενο domino).
- Οι άνω πλευρικές δεξαμενές υφίστανται διάβρωση στις περιοχές ρήξης του επιστρώματος, που συχνότερα παρατηρείται στα πέλματα των διαμήκων ενισχυτικών κάτω από το κύριο κατάρωμα λόγω μηχανικών τάσεων και αυξημένης θερμοκρασίας από τον Ήλιο.
- Τα στόμια των κυτών φορτίου εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης λόγω της συνδυασμένης δράσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας υψηλής υγρασίας εντός των κυτών.
- Τα δραστικά φορτία όπως ο γαιάνθρακας εμφανίζουν υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, καταλαμβάνουν μεγάλη επιφάνεια, εμφανίζουν υψηλή υγρασία και καθοδική συμπεριφορά.
- Η διαβρωτική δράση του γαιάνθρακα οφείλεται στη συμπύκνωση του πλευρικού ελάσματος λόγω διαφοράς θερμοκρασίας του (ψυχρότερου) ελάσματος από το (θερμότερο) γαιάνθρακα και των προσμίξεων (όπως θείο και χλωριόντα).
- Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαβρωτική δράση του γαιάνθρακα είναι η υγρασία (η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη διάχυση οξυγόνου), με μέγιστη διάβρωση να σημειώνεται για υγρασία 60-80%, και το μέγεθος του κόκκου, με μεγαλύτερη διάβρωση για λεπτόκοκκο γαιάνθρακα.
- Τα φορτία σιδηρομεταλλεύματος έχουν κυρίως δράση εκτριβής, ευθύνονται όμως και για διάβρωση λόγω κελιών διαφορικού αερισμού.
- Οι μηχανικές δράσεις οδηγούν σε τοπικούς λυγισμούς οι οποίες προκαλούν ρήξη επιστρωμάτων ή προστατευτικών στρωμάτων σκουριάς, συνεισφέροντας έτσι στην εκκίνηση της διάβρωσης.
- Η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής εμφανίζει ίδιο ρυθμό διάβρωσης σε σχέση με τον κοινό χάλυβα και επειδή τα κατασκευαστικά στοιχεία με HTS είναι λεπτότερα, η διάβρωση φτάνει πιο γρήγορα σε κρίσιμο στάδιο.
- Η διπλή γάστρα οδηγεί σε μεγαλύτερη διάβρωση, λόγω διατήρησης αυξημένης θερμοκρασίας (φαινόμενο «Θερμόφ»).

- Οι συγκολλήσεις υφίστανται αυξημένη διάβρωση κυρίως λόγω γαλβανικών φαινομένων ανάμεσα στη ζώνη τήξης ή τη ΘΕΖ και το μέταλλο βάσης ή το μέταλλο συγκόλλησης. Συχνότερη μορφή είναι αυτή με αυλακώσεις (grooving corrosion). Επιπρόσθετα, λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών και εγκλεισμάτων αλλά και της τοπικής συσσώρευσης τάσεων η διάβρωση επιτείνεται.
- Κυριότεροι τρόποι αποφυγής της διάβρωσης συγκολλήσεων είναι η κατάλληλη επιλογή υλικού και αναλωσίμων, η προετοιμασία επιφάνειας και η ορθή σχεδίαση και πρακτική της συγκόλλησης.
- Η γενική διάβρωση μειώνει την αντοχή του πλοίου λόγω ελάττωσης του πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων του άρα και της ροπής αντίστασης.
- Η διάβρωση με βελονισμούς μειώνει την αντοχή του πλοίου, όχι πάντα εξαρτώμενη από τη μέση απώλεια πάχους αλλά σε συνδυασμό με παράγοντες όπως ο βαθμός των βελονισμών (DOP), οι διαστάσεις και η τοποθεσία τους.
- Οι κανονισμοί των νηογνώνων για τη διάβρωση περιλαμβάνουν κυρίως τις κατασκευαστικές απαιτήσεις, τις προσαυξήσεις διάβρωσης, το πρόγραμμα επιθεωρήσεων και συντήρησης, τις προδιαγραφές των επιστρωμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ.Ι. Παντελής, Δ. Τσιούρβα: 'Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών και Μηχανολογικών Κατασκευών', (Σημειώσεις) Αθήνα, 2012
- [2] Π.Α. Καρύδης: 'Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου', Πανεπ. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2002
- [3] ASM Handbook – Vol. 13A: 'Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection', ASM International
- [4] Θ. Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου: 'Διάβρωση και Προστασία Υλικών', Β' Έκδοση, Εκδόσεις 'Συμεών' Αθήνα, 2000
- [5] Z. Ahmad: 'Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control', Elsevier 2006
- [6] Μ. Γεωργουλάκης: 'Προστασία Χάλυβα από Συμβατικά Αντιδιαβρωτικά σε Τεχνητό Θαλάσσιο Περιβάλλον', Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [7] Λ. Λαζαρίδης: 'Μελέτη της Συμπεριφοράς Μετάλλου Χάλυβα, με Επικάλυψη από Οργανικό Επικαλυπτικό με Πιγμέντο από Ανοξειδωτο Χάλυβα, σε Έκθεση σε Επιταχυνόμενη Γήρανση σε Τεχνητό Θαλάσσιο Περιβάλλον', Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2013
- [8] G.H. Koch, M.P.H. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer: 'Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States', NACE International
- [9] P.R. Roberge: 'Corrosion Engineering – Principles and Practice', McGraw-Hill, 2008
- [10] M. Pourbaix: 'Atlas of the Electrochemical Equilibria', NACE, 1974
- [11] J. Riskin: 'Electrocorrosion and Protection of Metals – General Approach with Particular Consideration to Electrochemical Plants', Elsevier, 2008
- [12] M. Jakubowski: 'Influence of Pitting Corrosion on Fatigue and Corrosion Fatigue of Ship Structures', Polish Maritime Research No 1/2014, σελ. 62-69
- [13] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής: 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996
- [14] B.J. Cheater: 'Fatigue Life of Bulk Carrier Side Shell Frame Lower Toes as a Function of Ship Length and Loading Condition' (Thesis), Memorial Univ. of Newfoundland, Canada, 2000

- [15] <http://www.fea-optimization.com>
- [16] P. Paris, F. Erdogan: 'A critical analysis of crack propagation laws', Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, December 1963, σελ. 528-534.
- [17] W.D. Callister: 'Materials Science and Engineering – An Introduction', 7th Edition, Wiley, 2007
- [18] C. Anderson: 'Protection of Ships' (Lecture Notes), International Paint
- [19] P.A. Schweitzer: 'Corrosion of Linings and Coatings – Cathodic and Inhibitor Protection and Corrosion Monitoring', Corrosion Engineering Handbook 2nd Ed., CRC Press, 2007
- [20] 'Journal of the Electrochemical Society', jes.ecsdl.org
- [21] P. Marcus: 'Corrosion Mechanisms in Theory and Practice' Marcel Dekker inc., 2002
- [22] D. Dražić, S. Stojan, Z. Kulenović: 'Corrosion Protection in Shipbuilding'
- [23] 'Guidance Notes on the Inspection, Maintenance and Application of Marine Coating Systems', 3d ed., ABS, 2007
- [24] E. Almeida, T.C. Diamantino, O. de Sousa: 'Marine Paints: The Particular Case of Antifouling Paints', Progress in Organic Coatings 59 (2007) σελ. 2-20.
- [25] www.corrosion-doctors.org
- [26] F.M. Reinhart, J.F. Jenkins: 'Corrosion of Materials in Surface Seawater after 12 and 18 Months of Exposure', Technical Note N-1213, Naval Civil Engineering Laboratory, California, 1972
- [27] F. L. LaQue: 'Marine corrosion, causes and prevention', Wiley-Inter science, New York, 1975
- [28] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed: 'Effect of Environmental Factors on Steel Plate Corrosion under Marine Immersion Conditions', Corrosion Engineering, Science and Technology, vol 46, no 4, 2011, σελ. 524-541
- [29] R. Jeffrey, R.E. Melchers: 'The Changing Topography of Corroding Mild Steel Surfaces in Seawater', Corrosion Science 49, 2007, σελ. 2270-2288
- [30] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang: 'Influence of Environmental Factors on Corrosion of Ship Structures in Marine Atmosphere', Corrosion Science 51, 2009, σελ. 2014-2026

- [31] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico, M. Morcillo: ‘Long-term Atmospheric Corrosion of Mild Steel’, *Corrosion Science* 53, 2011, σελ. 604-617
- [32] C.P. Gardiner, R.E. Melchers: ‘Corrosion Analysis of Bulk Carriers, Part I: Operational Parameters Influencing Corrosion Rates’, *Marine Structures* 16, 2003, σελ. 547-566
- [33] ‘Bulk Carrier Solutions: Safer and Stronger Vessels’, ABS
- [34] S.E. Roberts, S.J. Pettit, P.B. Marlow: ‘Casualties and Loss of Life in Bulk Carriers from 1980 to 2010’, *Marine Policy* 42, 2013, σελ. 223-235
- [35] ‘Bulk Carrier’ (Pamphlet), Class NK
- [36] C.P. Gardiner, R.E. Melchers: ‘Aspects of Bulk Carrier Hold Corrosion’ (Presented at the Royal Institution of Naval Architects, London 1998)
- [37] E. Askheim, O. Nakken, B.K. Haugland: ‘How and why Corrosion Protection of Ballast Tanks has become the Business of Classification Societies’, DNV, 1999
- [38] ‘Bulk Carriers: Design, Operation, and Maintenance Concerns for Structural Safety of Bulk Carriers’, Ship Structure Committee (SSC) Case Study
- [39] E.N. Ζωγραφάκης: ‘Στοιχεία Ναυπηγίας’, Ίδρυμα Ευγενιδου, Αθήνα 1972
- [40] www.wikipedia.org
- [41] www.bulkcarrierguide.com
- [42] ‘Corrosion/Corrosion Protection – What Impact will this have on Modern Ship Design?’, DNV, 2000
- [43] J.K. Paik, J.M. Lee, Y. II Park, J.S. Hwang, C.W. Kim: ‘Time-variant Ultimate Longitudinal Strength of Corroded Bulk Carriers’, *Marine Structures* 16, 2003, σελ. 567-600
- [44] M.R. Khedmati, M.M. Roshanali, Z.H.M.E. Nouri: ‘Strength of Steel Plates with both Sides Randomly Distributed with Corrosion Wastage under Uniaxial Compression’, *Thin-Walled Structures* 49, 2011, σελ. 325-342
- [45] T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto: ‘Pitting Corrosion on Epoxy-Coated Surface of Ship Structures’, Class NK, 2007

- [46] T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto, H. Arai: 'Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (1st Report)', Marine Structures 17, 2004, σελ. 403-432
- [47] B. Blagojević, Ž. Domazet: 'Simplified Procedures for Fatigue Assessment of Ship Structures', Univ. of Split
- [48] Μ.Σ. Σαμουηλίδης: 'Αντοχή Πλοίου – Σημειώσεις του Μαθήματος', ΕΜΠ, 2010
- [49] Š.N. Ivošević, S.I. Bauk: 'A Statistical Analysis of the Fuel Tanks' Corrosion Loss over some Aged Bulk Carriers', Journal of Mechanics, Engineering and Automation 3, 2013, σελ. 387-392
- [50] 'MGN 107 (M), The Merchant Shipping (Carriage of Cargoes) Regulations', 1999
- [51] <http://labspace.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=482931>
- [52] 'Bacterial Corrosion in Ships' Tanks', DNV
- [53] M.T. Gudze, R.E. Melchers: 'Operational based Corrosion Analysis in Naval Ships', Corrosion Science 50, 2008, σελ. 3296-3307
- [54] A. Heyer, F. D'Souza, C.F. Leon Morales, G. Ferrari, J.M.C. Mol, J.H.W. de Wit: 'Ship Ballast Tanks, a Review from Microbial Corrosion and Electrochemical point of view', Ocean Engineering 70, 2013 σελ. 188-200
- [55] 'Bulk Carriers – Guidance and Information on Bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over-stressing the Hull Structure', IACS 1997
- [56] 'SPS Tank Tops for Bulk Carriers' (Brochure), SPS Marine Technologies Limited
- [57] www.captainfoerster.de
- [58] 'Bulk Carriers – Handle with Care', IACS
- [59] J.K. Paik, S.K. Kim, S.K. Lee: 'Probabilistic Corrosion Rate Estimation Model for Longitudinal Strength Members of Bulk Carriers', Ocean Engineering, Vol. 25, No. 10, 1998, σελ. 837-860
- [60] C.P Gardiner, R.E. Melchers: 'Bulk Carrier Corrosion Modelling', Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001
- [61] www.amteccorrosion.co.uk

- [62] C.P Gardiner, R.E. Melchers: ‘Corrosion of Mild Steel by Coal and Iron Ore’, Corrosion Science 44, 2002, σελ. 2665-2673
- [63] C.P Gardiner, R.E. Melchers: ‘Corrosion of Mild Steel in Porous Media’, Corrosion Science 44, 2002, σελ. 2459-2478
- [64] ‘Guidance to Ships’ Crews and Terminal Personnel for Bulk Carrier Inspections’, IMO Resolution A.866 (20), 1997
- [65] ‘Bulk Cargoes – Hold Preparation and Cleaning’, Standard Cargo, 2011
- [66] ‘Carriage of Sulphur’, Brookes Bell
- [67] ‘Carefully to Carry – Sulphur Cargoes’, UK P&I Club
- [68] www.holdsolutions.com
- [69] www.chem.uoa.gr
- [70] R.E. Melchers, J.K. Paik: ‘Effect of Tensile Strain on the Rate of Marine Corrosion of Steel Plates’, Corrosion Science 51, 2009, σελ. 2298-2303
- [71] ‘IMO and the Safety of Bulk Carriers’, IMO 1999
- [72] O. Ozguc, P.K. Das, N. Barltrop: ‘A Comparative Study on the Structural Integrity of Single and Double Side Skin Bulk Carriers under Collision Damage’, Marine Structures 18, 2005, σελ. 511-547
- [73] Κ. Σπύρου, Α. Παπανικολάου, Μ. Σαμουηλίδης, Δ. Σέρβης, Σ. Παπαδογιάννη: ‘Risk Assessment of Double-Skin Bulk Carriers’, ΕΜΠ
- [74] ‘Basic Understanding of Weld Corrosion’, ASM International, 2006
- [75] ASM Handbook – vol. 6: ‘Welding, Brazing and Soldering’, ASM International
- [76] Β.Ι. Παπαζογλου: ‘Ναυπηγική Τεχνολογία – Σημειώσεις’, ΕΜΠ 1995
- [77] R.J. Brigham et al.: ‘Evaluation of Weld- Zone Corrosion of Shipbuilding Steel Plates for Use in the Arctic Environment’, Can. Metall. Q., Vol 27 (No. 4), 1988, σελ. 311–321

- [78] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος: 'Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις', Εκδ. Τζιόλα, 2010.
- [79] C.R. Das, P.K. Jena: 'A Study of Corrosion of Welded Steel Specimens in a Marine Atmosphere, with and without Protective Coatings', Corrosion Science, Vol. 23, No. 11, 1983, σελ. 1135-1140
- [80] Y. Li, B. Hou: 'Corrosion Fatigue of Welded Joints of Steel for Marine Platform', Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 13, 2006, σελ. 467-470
- [81] A. Adhithya Plato Sidharth: 'Effect of Pitting Corrosion on Ultimate Strength and Buckling Strength of Plates – a Review', Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, Vol.4, No. 4, 2009, σελ. 783-788
- [82] C. Guedes Soares, A.P. Teixeira: 'Structural Reliability of two Bulk Carrier Designs', Marine Structures 13, 2000, σελ. 107-128
- [83] T. Yao, A. Magaino, T. Koiwa, S. Sato: 'Collapse Strength of Hatch Cover of Bulk Carrier Subjected to Lateral Pressure Load', Marine Structures 16, 2003, σελ. 687-709
- [84] 'Adoption of the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code', Annex 3, Resolution MSC.268 (85), 2008
- [85] 'Requirements Concerning Survey and Classification', IACS
- [86] M. Biot, M. Maestro, M. Marino: 'The Transverse Frames of Bulk Carriers and the Fatigue Phenomenon', Proceedings of MARIND 1998, Varna (Bulgaria).
- [87] 'Summary of Common Structural Rules for Tankers and Bulk Carriers, Harmonization and Maintenance', IACS external presentation
- [88] 'No. 76, IACS Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structure – Bulk Carriers', IACS, 2007
- [89] M. Biot, A. Caputi, E. Brina: 'IACS New Common Rules for Tankers: Impact on Structural Design and Fatigue Strength Evaluation'
- [90] 'Owner's Guide to Common Structural Rules for Bulk Carriers', DNV
- [91] 'SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea'
- [92] 'Common Structural Rules for Bulk Carriers (Consolidated)', IACS, 2012.

[93] 'Introduction to the Harmonized CSR' (Webinar), IACS, 2012

[94] E. Andreassen, S. Valsgård, S-K. Kim: 'Life Cycle Analysis of Bulk Carriers Subject to General Corrosion', DNV, Paper Series No. 99-P001