



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ: ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ5000»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΛΩΣΠΑΝΤΕΛΗΣ

Επιβλέπουσακαθηγήτρια:  
Βασιλείου Παναγιώτα, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος, 2019

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι παλαιότερες και πρόσφατες μελέτες ομόφωνα υποδεικνύουν ότι το θαλάσσιο περιβάλλον συνιστά ένα επιθετικό πλαίσιο για πολλά υλικά. Ωστόσο, το αλουμίνιο σε βάθος χρόνου έχει θεωρηθεί και τείνει να επιβεβαιωθεί ως ένα από τα πιο ανθεκτικά μέταλλα και αρκετοί ερευνητές επισημαίνουν την αξιοχρησία του ως κατασκευαστικό υλικό στην ναυπηγική. Μια από τις βασικότερες ιδιότητες του αλουμινίου που υποστηρίζει αυτά τα συμπεράσματα είναι η αντοχή του στην διάβρωση εντός του υδάτινου στοιχείου και περισσότερο σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Με βάση τα παραπάνω, στις επόμενες σελίδες θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε τις ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του. Ειδική αναφορά θα γίνει στα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000, στις ποικίλες εφαρμογές τους και κυρίως στις εφαρμογές τους σε θαλάσσιες κατασκευές. Επιπλέον, θα αναλυθεί διεξοδικά το φαινόμενο της διάβρωσης, των τύπων της και της αιτιώδους συσχέτισής της με ποικίλους παράγοντες. Επιπλέον, θα επιχειρηθεί η πειραματική συσχέτιση του φαινομένου της διάβρωσης με ειδικά διαμορφωμένα δοκίμια αλουμινίου τύπου 5054, με σκοπό να καταγραφούν οι μεταβολές βάρους και πάχους και να σχεδιαστεί η σχετική καμπύλη οξειδωσης.



### ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	ΣΕΛΙΔΑ
ΕΞΩΦΥΛΛΟ	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ</b>	10
1.1 ΦΥΣΙΚΟ-ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	10-11
1.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	11
1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	11-12
1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	12
1.5 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ & ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ	12-13
1.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	13-15
1.7 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	15-16
1.8 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	16-17
1.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	17-19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ</b>	20
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
2.1 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΚΥΡΙΩΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ	20
2.1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	20
2.1.2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ	20-21
2.1.3 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	21
2.1.4 ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	21
2.1.5 ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ	21-22
2.1.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ	22
2.2 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	22
2.2.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΩΝ	22-23
2.2.2 ΝΗΜΑΤΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	23
2.2.3 ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	23

2.2.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΝΕΡΟΥ	24
2.2.5 ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ	24
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	24-25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5000</b>	26
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	26-27
3.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ	27-28
3.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ-ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ	28-29
3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5000	29-30
3.5 ΒΥΘΙΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ 5000 ΣΕ ΒΑΘΙΑ ΝΕΡΑ	30-31
3.6 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ 5000 ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	31-34
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ</b>	35
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	35
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΩΝ	35
4.2.2 ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΜΒΥΘΙΣΗΣ	35
4.2.3 ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	35-36
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ	36
4.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ	36-37
4.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	37
4.3.3 ΖΥΓΙΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	37-38
4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ	38
4.5 ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	38-39
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	39
5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ	39
5.1.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ 1 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	39
5.1.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ 2 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	39-40
5.1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ 3 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	40
5.1.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ 4 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	40
5.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΒΑΡΟΥΣ	41-42
5.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ	43
5.3.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ 1 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	43
5.3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ 2 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	43
5.3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ 3 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	43
5.3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ 4 <sup>ΟΥ</sup> ΠΑΚΕΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	44-45
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	45-46
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48-51

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΕΛΙΔΑ
1	Ταξινόμηση των σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με τον μηχανισμό ενίσχυσης τους	19
2	Χημική σύνθεση διαφόρων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 όπως παράγονται σε κ.β. ποσοστό αναλογίας	27-28
3	Επιλεγμένες εφαρμογές για σφυρήλατα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000	28-29
4	Βάθος διάβρωσης κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 μετά από 5 χρόνια σε θαλάσσιο περιβάλλον	33
5	Παράθεση αρχικού βάρους δοκιμών	38-39
6	Μετρήσεις βάρους 1 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	39
7	Μετρήσεις βάρους 2 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	39-40
8	Μετρήσεις βάρους 3 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	40
9	Μετρήσεις βάρους 4 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	40
10	Μετρήσεις πάχους 1 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	43
11	Μετρήσεις πάχους 2 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	43
12	Μετρήσεις πάχους 3 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	43
13	Μετρήσεις πάχους 4 <sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών	44



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΕΛΙΔΑ
1	Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση	25

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΕΛΙΔΑ
1	Σχέσεις μεταξύ των κοινώς χρησιμοποιούμενων κραμάτων στη σειρά 5xxx (Al-Mg)	26
2	Ρυθμός διάβρωσης στο θαλασσινό νερό	32
3	Καμπύλη διάβρωσης από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054	41
4	Καμπύλη διάβρωσης από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054	42
5-6	Καμπύλη πάχους οξειδίων από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης	44-45

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών που απασχολούν την βιομηχανία και τον κατασκευαστικό κλάδο ανέκαθεν ήταν πεδίο θερμού ερευνητικού ενδιαφέροντος. Αντίστοιχα, το φαινόμενο της διάβρωσης εξακολουθεί να απασχολεί τους επιστήμονες καθώς, οι διαφορετικοί τύποι της και οι διαρκώς μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα, χωρούν περαιτέρω διερεύνηση σε συνδυασμό με την μελέτη δοκιμασμένων αλλά και ανερχόμενων υλικών όπως τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000.

Σκοπός της παρακάτω εργασίας είναι η διερεύνηση των διαβρωτικών φαινομένων που υφίστανται στα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του εμπειρικού μέρους σε πληθώρα εγκεκριμένων μελετών και ανασκοπήσεων των πλέον έγκριτων συγγραμμάτων και δημοσιεύσεων, παρατίθενται και αναλύονται οι παράμετροι διάβρωσης των μετάλλων γενικά αλλά και σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, με εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος των κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000. Ακολουθεί πρωτογενής πειραματική ποσοτική μελέτη διερεύνησης της οξειδωσης των εν λόγω κραμάτων σε συνθήκες προσομοίωσης του θαλασσινού νερού.

Όπως συμπεραίνεται, η διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου-μαγνησίου τύπου 5054 υφίστανται διάβρωση σε θαλάσσια περιβάλλοντα, συναρτήσει του χρόνου σε σταθερή θερμοκρασία. Η καμπύλη οξειδωσης αρχικά παρουσιάζει εκθετική αύξηση, ενώ σε επόμενους χρόνους παραμένει σταθερή μέχρι την τελική αύξηση.

Λέξειςκλειδιά : corrosion, aluminium\_ alloys, 5000 series



## ABSTRACT

The study of materials' properties used in the construction industry has always been a field of tremendous scientific interest. Correspondingly, the erosion phenomenon is still a concern for scientists as its different types and the ever-changing environmental occurring conditions can be examined in conjunction with the study of much appreciated and emerging materials such as aluminium alloys of 5000 series.

The purpose of this study is to investigate the corrosive effects of aluminium 5000 series in marine environments.

Through the literature review of the empirical section in a number of scientifically approved studies and reviews of the most authoritative literature and publications, the corrosion parameters of metals in general and in various environmental conditions are listed and analysed, with a focus on the 5000 aluminium alloys series. Therefore, primitive experimental quantitative study will be conducted in order to investigate the oxidation of these alloys under simulated seawater conditions.

It is concluded that the corrosion of aluminium-magnesium type 5054 is slightly corroded to the marine environment correlated to time at stable temperature conditions. The oxidation curve initially shows an exponential increase while in the following days it remains stable.

Keywords: alloy, aluminum alloys, 5000 series

## ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

##### 1.1 ΦΥΣΙΚΟ-ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το Αλουμίνιο (Al) συνιστά ένα ελαφρύ, αργυρόλευκο, άοσμο (NIOSH, 2001) μέταλλο, μοριακού βάρους 26.981538 g/mol (PubChem, 2019). Ως χημικό στοιχείο της κύριας ομάδας 13 (IIIa) του περιοδικού πίνακα, το αλουμίνιο ορίζεται στην βιβλιογραφία τόσο ως βαρύ όσο και ως ελαφρύ μέταλλο (Lewis, 1997). Πρόκειται για ένα λευκό, εύπλαστο, όγκιμο μέταλλο, με ελαφρώς γαλαζωπή απόχρωση (O'Neil, 2001). Το σημείο βρασμού του είναι οι 2327 °C (4221 °F) σε πίεση 760 mm Hg (NIOSH, 2016) και το σημείο τήξης του οι 660 °C (1220 °F) (O'Neil, 2001). Το αλουμίνιο είναι αδιάλυτο στο νερό και σε οργανικούς διαλύτες, ενώ διαλύεται σε αραιό διάλυμα υδροχλωρικού οξέος (HCl), στο H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> και στα αλκάλια (Lewis, 1999).

Το καθαρό αλουμίνιο (99,996%) είναι αρκετά μαλακό και αδύναμο. Το εμπορικά διαθέσιμο αλουμίνιο (99 - 99,6% καθαρότητα) με μικρές ποσότητες πυριτίου και σιδήρου είναι σκληρό και ισχυρό. Το εξαιρετικά εύπλαστο και όγκιμο αλουμίνιο μπορεί να μετατραπεί σε σύρμα ή να κοπεί εργοστασιακά σε λεπτό φύλλο αλουμινίου βρίσκοντας εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη βιομηχανία κοσμημάτων (Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 1998).

Το αλουμίνιο δύναται να επικαλυφθεί με βερνίκι που διατηρείται στον ξηρό αέρα. Δεν εξατμίζεται ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, ωστόσο η λεπτή σκόνη αλουμινίου αναφλέγεται εύκολα και μπορεί να προκαλέσει εκρήξεις (O'Neil, 2001).

Το αλουμίνιο είναι ένας εξαιρετικός αγωγός θερμότητας και ηλεκτρισμού (Browning, 1969). Η θερμική του αγωγιμότητα είναι περίπου η μισή του χαλκού. Κρυσταλλώνεται στην εδροκεντρωμένη κυβική του δομή. Όλα τα φυσικά αλουμίνια αντιστοιχούν στο σταθερό ισότοπο αλουμινίου-27. Τόσο το μεταλλικό αλουμίνιο, όσο και το οξείδιο και το υδροξείδιό του είναι μη τοξικά.

Συνοψίζοντας, το αλουμίνιο ως ένα ευέλικτο μέταλλο, έχει μια ξεχωριστή θέση στην βιομηχανική ανάπτυξη. Εξαιτίας των μοναδικών του χαρακτηριστικών, έχει καταφέρει να

αντικαταστήσει πολλά διαδεδομένα και εύχρηστα υλικά όπως το ξύλο, τον χαλκό, τον σίδηρο και τον χάλυβα. Το πιο γνωστό χαρακτηριστικό του αλουμινίου είναι το μικρό μοριακό του βάρος και η χαμηλή του πυκνότητα που προσεγγίζει περίπου το ένα τρίτο της πυκνότητας του χάλυβα ή των κραμάτων του χαλκού. Το αλουμίνιο έχει καλή ελατότητα και δυνατότητα μετασχηματισμού, υψηλή αντοχή στη διάβρωση και υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα (Kumar & Milton, 2016).

## 1.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο συνιστά το πιο άφθονο μέταλλο των εξωτερικών 16 χλμ. του φλοιού της γης (υπερβαίνοντας σε ποσότητα μόνο το οξυγόνο και το πυρίτιο) και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μη σιδηρούχο μέταλλο (Staley & Haurin, 2000). Λόγω της χημικής του δραστηριότητας, το αλουμίνιο δεν εμφανίζεται ποτέ στη φύση στη μεταλλική μορφή του, αλλά πάντοτε σε ενωμένο με άλλα στοιχεία όπως το οξυγόνο, το πυρίτιο και το φθόριο. Σε κάθε περίπτωση, οι ενώσεις του απαντώνται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό σε σχεδόν όλα τα πετρώματα, τη βλάστηση και το ζωικό βασίλειο. Το αλουμίνιο ως μέταλλο λαμβάνεται από ανόργανα άλατα που περιέχουν αλουμίνιο (Krewski et al., 2011). Μικρές ποσότητες αλουμινίου μπορούν να βρεθούν στο νερό.

Το αλουμίνιο εξορύσσεται από πυριγενείς βράχους κυρίως ως αλουμινοπυριτικά άλατα σε άστριους, αστριοειδή και μαρμαρυγίες. Οι καιρικές συνθήκες τα μετατρέπουν σε βωξίτη και πλούσιο σε σίδηρο λατερίτη. Ο βωξίτης είναι το κύριο μετάλλευμα της αλουμίνης ( $Al_2O_3$ ), το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλουμινίου (Al). Ο βωξίτης συνιστά ένα μίγμα ενυδατωμένων οξειδίων του αλουμινίου, που αποτελούν το κύριο μέταλλο. Το κρυσταλλικό οξείδιο του αλουμινίου (σμύριδα, κορούνδιο), το οποίο εμφανίζεται σε μερικά πυριγενή πετρώματα, εξορύσσεται ως φυσικό αποξεστικό ή στις ποικιλίες του με την μεγαλύτερη σκληρότητα, όπως τα ρουμπίνια και τα ζαφείρια. Το αλουμίνιο εντοπίζεται και σε άλλους πολύτιμους λίθους, όπως το Τοπάζ και ο χρυσοβήρυλλος. Από τα πολλά άλλα ορυκτά αλουμινίου, ο αλουνίτης και ο κρούλιθος έχουν κάποια εμπορική σημασία (Donoghue, Frisch & Olney, 2014).

## 1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το ακατέργαστο αλουμίνιο απομονώθηκε (1825) από το Δανό φυσικό Hans Christian Ørsted με την κατεργασία του χλωριούχου αργιλίου με αμάλγαμα καλίου. Ο Βρετανός χημικός Sir Humphry Davy είχε κατασκευάσει (1809) ένα κράμα σιδήρου-αλουμινίου με ηλεκτρόλυση

αλουμίνας και είχε ήδη ονομάσει το στοιχείο αλουμίνιο. Τελικά, στην Αγγλία και σε ορισμένες άλλες ευρωπαϊκές χώρες, υπερίσχυσε η ονομασία αλουμίνιο. Ο γερμανός χημικός Friedrich Wöhler, χρησιμοποιώντας μέταλλο καλίου ως αναγωγικό παράγοντα, παρήγαγε σκόνη αργιλίου (1827) και μικρά σφαιρίδια του μετάλλου (1845), από τα οποία ήταν σε θέση να προσδιορίσει μερικές από τις ιδιότητές του (Sennott, 2004).

Το νέο μέταλλο εισήχθη στο κοινό το 1855 στην Έκθεση του Παρισιού περίπου την εποχή που έγινε διαθέσιμο (σε μικρές ποσότητες με μεγάλο κόστος) μέσω της ηλεκτρόλυσης του χλωριούχου αργιλίου. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια έγινε σχετικά άφθονη και φθηνή, σχεδόν ταυτόχρονα ο Charles Martin Hall στις Ηνωμένες Πολιτείες και ο Paul-Louis-Toussaint Héroult στη Γαλλία ανακάλυψαν (1886) τη σύγχρονη μέθοδο εμπορικής παραγωγής αλουμινίου: ηλεκτρόλυση καθαρής αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ) διαλυμένης σε τετηγμένο κρυσταλλικό ( $Na_3AlF_6$ ). Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 το αλουμίνιο αναδείχθηκε στην πρώτη θέση, ξεπερνώντας τον έως τότε δημοφιλέστατο χαλκό, στην παγκόσμια παραγωγή μη σιδηρούχων μετάλλων (Sennott, 2004).

#### **1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ**

Από την εκβιομηχάνιση του αλουμινίου πριν από 120 χρόνια, το αλουμίνιο γρήγορα θεωρήθηκε ένα ελκυστικό υλικό για εφαρμογές ναυπηγικής. Έτσι, η επιστροφή του κελύφους των ιστιοπλοϊκών σκαφών με αλουμίνιο εισήχθη στα τέλη του 19ου αιώνα, με στόχο της ανάπτυξη μικρών και ευέλικτων ναυτικών σκαφών. Παρά τον αξιοσημείωτα βολικό λόγο αντοχής / ελαφρότητας, ακολούθησε μια μεγάλη περίοδος στασιμότητας οφειλόμενη σε σοβαρά φαινόμενα διάβρωσης, λόγω της χημικής σύνθεσης των κραμάτων και των μη ενδεδειγμένων μεθόδων κατασκευής τους που κατηγορήθηκε για την γαλβανική διάβρωση των σκαφών που μείωνε δραματικά την μακροζωία τους. Μια ακόμη αιτία αποτυχίας συνιστούσε το αυξημένο για την εποχή κόστος του αλουμινίου και το κόστος του χάλυβα σε σχέση με τα σημερινά δεδομένα (Ferraris & Volpone, 2005). Η εισαγωγή των κραμάτων αλουμινίου-μαγνησίου σήμανε μια νέα εποχή για την χρησιμοποίησή τους τόσο στον αστικό όσο και στον ναυτικό τομέα.

#### **1.5 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ & ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ**

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή δοχείων κονσέρβας, μαγειρικών σκευών, αεροπλάνων, ως υλικό περίφραξης και στεγανοποίησης και σε μορφή φύλλων. Οι μοναδικοί συνδυασμοί ιδιοτήτων του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθιστούν το

αλουμίνιο ένα από τα πιο εύχρηστα, οικονομικά και ελκυστικά μεταλλικά υλικά για ένα ευρύ φάσμα χρήσεων από την μαλακή και εξαιρετικά εύκαμπτη μορφή του ως φύλλο περιτυλίγματος μέχρι και τις πιο απαιτητικές εφαρμογές μηχανικής και ιατρικής του μέλλοντος (Verbeken et al., 2011).

Φαρμακευτικά, το αλουμίνιο και τα άλατά του χρησιμοποιούνται σε αντιόξινα και αντιδιαρροϊκά σκευάσματα και προστατευτικές δερματολογικές κρέμες. Βρίσκεται επίσης στα καλλυντικά και τα αποσμητικά (National Research Council, 1981). Το φύλλο αλουμινίου έχει χρησιμοποιηθεί ως επίδεσμος για εγκαύματα (Reynolds & Prasad, 1982). Η σκόνη αλουμινίου έχει χρησιμοποιηθεί για διαδερμική εφαρμογή γύρω από ειλεοστομιά ή κολοστομία με στόχο την πρόληψη ερεθισμού λόγω πρωτεολυτικών ή ερεθιστικών εκκρίσεων ή ως επίδεσμος σε εγκαύματα, τοπικά έλκη και ινώδη τραύματα. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάστα αλουμινίου γύρω από το συρίγγιο προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή με το δέρμα. (Reynolds & Prasad, 1982).

Δεδομένης της χαμηλής πυκνότητας του αλουμινίου ( $2,7 \text{ g / cm}^3$ ) σε σχέση με τον χάλυβα ( $7,83 \text{ g / cm}^3$ ) (O'Neil, 2001) που αποδίδει μειωμένο βάρος κατ' όγκο, σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή κάποιων κραμάτων αλουμινίου, συνιστά άριστο υλικό εκλογής για το σχεδιασμό και την κατασκευή ισχυρών, ελαφρών δομών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία των χερσαίων και εναέριων μεταφορών. Έτσι, όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω, τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή οχημάτων, τρένων, αεροσκαφών και υδάτινων οχημάτων (Davis, 2013). Τέλος, το αλουμίνιο συνιστά ένα από τα κυρίαρχα υλικά στον κατασκευαστικό κλάδο, αφού συνιστά κοινόχρηστο και διαδεδομένο οικοδομικό υλικό λόγω της ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση (Lewis, 1997), ενώ η σκόνη αλουμινίου χρησιμοποιείται στην κατασκευή πιγμέντων στα χρώματα (Venugopal & Luckey, 1978).

## **1.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Δεδομένου ότι για τον εξευγενισμό της πρώτης ύλης των μετάλλων (που ονομάζεται μέταλλευμα) με αποτέλεσμα την απαλλαγή από τις προσμίξεις άλλων στοιχείων, είναι απαραίτητη μια αλληλουχία πολύπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών, η διάβρωση είναι μια αναπόφευκτη διαδικασία. Το ενεργειακά αναβαθμισμένο σε σχέση με την πρώτη ύλη μέταλλο είναι αποτέλεσμα της αυθόρμητης αντίδρασης των στοιχείων της

ατμόσφαιρας με τα μέταλλα προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν το ενεργειακό περιεχόμενό τους (Πιστοφίδης και συν., 2006).

Το αλουμίνιο αντιστέκεται στο είδος της προοδευτικής οξείδωσης που προκαλεί την οξείδωση του χάλυβα. Η εκτεθειμένη επιφάνεια του αλουμινίου συνδυάζεται με το οξυγόνο του αέρα για το σχηματισμό ενός αδρανούς φιλμ οξειδίου του αλουμινίου μόνο λίγα δέκα εκατομμύρια της ίντσας πάχους, που εμποδίζει περαιτέρω οξείδωση, προστατεύοντας το μέταλλο από τη διάβρωση (O'Neil, 2001). Σε αντίθεση με την σκουριά που παράγεται μέσω της οξείδωσης του σιδήρου, το φιλμ των οξειδίων του αλουμινίου δεν αποφλοιώνεται εκθέτοντας ένα νέο υπόστρωμα σε περαιτέρω οξείδωση. Το λεπτό στρώμα οξειδίου δεν αποχρωματίζεται (καθώς είναι άχρωμο), προσκολλάται εγγενώς στο μέταλλο και δεν είναι αόρατο με γυμνό μάτι (Davis, 2013).

Επιπλέον, τα ειδικά επεξεργασμένα κράματα αλουμινίου τείνουν να αντιστέκονται στη διάβρωση εντός υδατικού διαλύματος χλωριούχου νατρίου (NaCl) και ενός ευρέος φάσματος περιβαλλοντικών, χημικών και φυσικών παραγόντων (Davis, 2013).

Σε γενικές γραμμές, η συμπεριφορά διάβρωσης του αλουμινίου στην επιφάνεια του νερού είναι καλή ωστόσο μπορεί να ποικίλει από εξαιρετική έως φτωχή ανάλογα με την σύσταση του νερού σε άλατα και τις συνθήκες κατά την διάρκεια της μέτρησης. Οι συνθήκες αυτές μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα και την θερμοκρασία του νερού ή την περιεκτικότητά του σε οξυγόνο. Υπό συνθήκες διάβρωσης του αλουμινίου από το νερό, η προσβολή έχει ως αποτέλεσμα την αποφλοίωση, σε αντίθεση με τον χάλυβα που το νερό του προκαλεί γενικευμένη διάβρωση. Ο αριθμός των κοιλοτήτων που σχηματίστηκαν και ο ρυθμός της διείδυσης εξαρτάται από τη σύνθεση του νερού και τις συνθήκες της μέτρησης (Godard, 1960).

Σε γενικές γραμμές, οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του αλουμινίου από το νερό συνοψίζονται στις παρακάτω συνιστώσες (Godard, 1960) :

- pH
- συνολική σκληρότητα
- χλωριούχο νάτριο
- οξυγόνο
- χαλκός

Σύμφωνα με τον Υφαντή (2001), η διάβρωση των μεταλλικών σκαφών στη θάλασσα συνιστά ένα πολύπλοκο φαινόμενο, με τους εξαρτώμενους παράγοντες να συνοψίζονται ως εξής

- Διακύμανση της αγωγιμότητας και της περιεκτικότητας σε άλατα του θαλασσινού νερού π.χ. στη Μεσόγειο, στη βόρεια θάλασσα, στις τροπικές θάλασσες κ.λ.π.
- Θερμική διακύμανση(εποχιακή και τοπική π.χ. στις τροπικές θάλασσες)
- Βιολογικοί παράγοντες (θαλάσσιοι οργανισμοί που προσκολλώνται σταύφαλα)
- Κίνηση (το σκάφος εν πλω) - ακινησία (το σκάφος ελλιμενισμένο ή υπόεπισκευή)
- Ποικιλία υλικών κατασκευής (διάφορα κράματα)

### **1.7 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Το αλουμίνιο αναμιγνύεται συχνά με μικρές ποσότητες άλλων μετάλλων για να σχηματίσουν κράματα αλουμινίου, τα οποία είναι ισχυρότερα και σκληρότερα. Οι ενώσεις αλουμινίου έχουν πολλές διαφορετικές χρήσεις, για παράδειγμα, ως στυπτηρία στην επεξεργασία του νερού και ως αλουμίνα σε λειαντικά και την επένδυση συσκευών όπως οι κλίβανοι. Βρίσκονται επίσης σε καταναλωτικά προϊόντα όπως τα αντιόξινα, τα στυπτικά, η ασπιρίνη, τα πρόσθετα τροφίμων και τα αντιδρωτικά (National Center for Biotechnology Information, 2019).

Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως για ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. Οι σημαντικοί τομείς περιλαμβάνουν τη μεταφορά, την αρχιτεκτονική, την αεροδιαστημική, τη ναυτιλία και τις δομές που χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές. Σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές, η συγκόλληση χρησιμοποιείται ως μέθοδος κατασκευής. Το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του είναι συγκολλούμενα, αλλά τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδοσυγκόλλησης έωςτη χημική σύσταση του μητρικού υλικού και του πρόσθετου του κράματος (Kumar & Milton, 2016).

Τα κράματα αλουμινίου είναι δευτερεύοντα μόνο σε χάλυβες που χρησιμοποιούνται ως δομικά μέταλλα (Davis, 2013).

Το αλουμίνιο προστίθεται σε μικρές ποσότητες σε ορισμένα μέταλλα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους για συγκεκριμένες χρήσεις, όπως ο χαλκός και τα περισσότερα κράματα με βάση το μαγνήσιο. Τα κράματα με βάση το αλουμίνιο έχουν προσθήκες άλλων μετάλλων και πυριτίου σε μικρές ποσότητες. Όπως αναφέρθηκε, το αλουμίνιο και τα κράματά του

χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την κατασκευή αεροσκαφών, οικοδομικών υλικών, καθημερινών καταναλωτικών αγαθών (ψυγεία, κλιματιστικά, μαγειρικά σκεύη), ηλεκτρικών αγωγών και εξοπλισμό χημικών και επεξεργασίας τροφίμων.

Τα κράματα αλουμινίου υπήρξαν το κύριο υλικό επιλογής για δομικά στοιχεία αεροσκαφών από το 1930 περίπου και εκτιμάται ότι θα εξακολουθήσουν να χρησιμοποιούνται για πολλές εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές για πολλά χρόνια ακόμη (Starke & Staley, 2011).

Μερικοί από τους λόγους προτίμησης των κραμάτων αλουμινίου συνοψίζονται στα γνωστά χαρακτηριστικά απόδοσης, το σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής, την ευκολία σχεδιασμού, την ύπαρξη καθιερωμένων μεθόδων και εγκαταστάσεων κατασκευής και τη ναυτιλοχρησία τους σε υβριδικές δομές. Έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στα κράματα αλουμινίου για την κατασκευή αεροσκαφών που συνεχίζουν να τα διατηρούν σε ανταγωνιστική θέση. Στα πρώτα χρόνια τα κράματα αλουμινίου αναπτύχθηκαν με δοκιμές και λάθη, αλλά τα τελευταία 40 χρόνια υπήρξαν σημαντικές εξελίξεις στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ σύνθεσης, επεξεργασίας, μικροδομικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων. Αυτή η βάση γνώσεων έχει οδηγήσει σε βελτιώσεις σε ιδιότητες που είναι σημαντικές για εφαρμογές αεροσκαφών (Starke & Staley, 2011).

### **1.8 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ**

Το αλουμίνιο είναι ένα θερμοδυναμικά δραστικό μέταλλο. Μεταξύ των δομικών μετάλλων, μόνο το βηρύλλιο και το μαγνήσιο είναι πιο δραστικά. Όπως προαναφέρθηκε, το αλουμίνιο οφείλει την εξαιρετική του αντοχή στη διάβρωση και τη χρήση του ως ένα από τα βασικότερα εμπορικά μέταλλα στο φιλμ οξειδίου που σχηματίζεται και καλύπτει την επιφάνεια του. Το φυσιολογικό φιλμ επιφάνειας που σχηματίζεται στον αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι περίπου μόλις μερικά 5 nm (50 Å) πάχους. Το στρώμα αυτό σταθεροποιεί το μέταλλο και συνεχίζει να προστατεύει το αλουμίνιο από τη διάβρωση. Όταν αφαιρεθεί ή υποστεί ζημιά υπό συνθήκες τέτοιες ώστε να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματη επιδιόρθωση, λαμβάνει χώρα η διάβρωση.

Η αντοχή στη διάβρωση ενός κράματος αλουμινίου εξαρτάται τόσο από μεταλλουργικές όσο και από περιβαλλοντικές μεταβλητές.

**Μεταλλουργικές μεταβλητές** που επηρεάζουν τη διάβρωση είναι η σύνθεση (όπως περιγράφεται παρακάτω), η θερμική επεξεργασία (κατάλληλη επιλογή θερμοκρασίας) και η



μηχανική κατεργασία. Αυτά καθορίζουν τη μικροδομή, από την οποία εξαρτάται ηπιθανότητα εντοπισμένης διάβρωσης και η μέθοδοςπροσβολής.

**Οι χημικές περιβαλλοντικές μεταβλητές**που επηρεάζουν τη διάβρωση σχετίζονται με τη σύνθεσή του περιβάλλοντος και την παρουσία ακαθαρσιών όπως ιόντα βαρέων μετάλλων.

**Οι φυσικές περιβαλλοντικές μεταβλητές**είναι η θερμοκρασία, ο βαθμός κίνησης (κατά την ανάδευση) και η πίεση. Μια άλλη φυσική μεταβλητή που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του αλουμινίου είναι η παρουσία ηλεκτρικών ρευμάτων (συνεχών ή εναλλασσόμενων). Επειδή πολλές μεταβλητές επηρεάζουν τη διάβρωση, η συνολική καταλληλότητα του αλουμινίου δεν μπορεί να ληφθεί υπόψιν μόνο βάση ενός συγκεκριμένου προϊόντος ή περιβάλλοντος. Η λεπτομερής γνώση των ιχνών προσμείξεων, των συνθηκώνλειτουργίας, του σχεδιασμούτου εξοπλισμού και της μικροδομής του κράματος είναι ουσιαστικής σημασίας.

## **1.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

Τα κράματα αλουμινίου, για λόγους ευκολίας διαιρούνται σε δύομεγάλες κατηγορίες: σφυρήλατες συνθέσεις και χυτές συνθέσεις. Μια ακόμηδιαφοροποίηση για κάθε μια εκ των δύο ανωτέρων κατηγοριών βασίζεται στον κύριο μηχανισμό της ανάπτυξητων ιδιοτήτων τους. Πολλά κράματα αποκρίνονται στη θερμική επεξεργασία βάσηδιαλυτοτήτων φάσης. Αυτές οι επεξεργασίες για τα επεξεργασμένα κράματα με χύτευση περιλαμβάνουν την θερμική επεξεργασία,την ψυχρηλασία, την κατακρήμνιση, τημηχανική πλαστική διαμόρφωση και τα θερμικά επεξεργασμένα υφίστανται τις λεγόμενες θερμικές κατεργασίες(βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κλπ). Ένας μεγάλος αριθμόςαπό άλλες σφυρηλατημένες συνθέσεις στηρίζονται στη σκλήρυνση με μηχανική αναγωγή, συνήθως σε συνδυασμό με διάφορα προϊόντα ανόπτησηςγια την ανάπτυξη ιδιοτήτων. Αυτά τα κράματα αναφέρονται ως επεξεργασμένα μεβαφή μετάλλου. Ορισμένα κράματα χύτευσης δεν είναι ουσιαστικά θερμικά κατεργάσιμα και χρησιμοποιούνται μόνο ως χυτά ή σε θερμικά τροποποιημένες συνθήκες που δεν σχετίζονται με το διάλυμα ή τις επιπτώσεις της κατακρήμνισης (Davis, 2001).

Το πιο διαδεδομένο σύστημα ταυτοποίησης κράματος χρησιμοποιεί διαφορετικές ονοματολογίεςγια σφυρήλατα και χυτά κράματα, αλλά χωρίζει τα κράματα σε οικογένειες βάση του μεγαλύτερου σε αναλογία ευρισκόμενου στοιχείου. Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου που προορίζονται για μηχανική επεξεργασία (έλαση, διέλαση, σφυρηλασία

κλπ) προσδιορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573 και χαρακτηρίζονται από τη χημική τους σύσταση βάσει διεθνώς αποδεκτού συστήματος που χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα του κράματος σύμφωνα με το σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο στοιχείο. Για τα σφυρήλατα κράματα χρησιμοποιείται ένα τετραψήφιο σύστημα για την παραγωγή μιας λίστας εξής (Davis, 2001) :

- 1xxx: Ελεγχόμενη μη κραματοποιημένη (καθαρή) σύνθεση, που χρησιμοποιείται κυρίως στην ηλεκτρικές και χημικές βιομηχανίες
- 2xxx: Κράματα στα οποία ο χαλκός είναι το κύριο στοιχείο κράματος, αν και μπορούν να εντοπιστούν και άλλα στοιχεία, ιδίως το μαγνήσιο. Τα κράματα σειράς 2xxx-χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροσκάφη κι επιλέγονται λόγω της υψηλής αντοχής τους (ισχύς απόδοσης έως 455 MPa ή 66 ksi).
- 3xxx: Κράματα στα οποία το μαγγάνιο είναι το κύριο στοιχείο κράματος και χρησιμοποιούνται ως κράματα γενικής χρήσης για αρχιτεκτονικές εφαρμογές και προϊόντα.
- 4xxx: Κράματα στα οποία το πυρίτιο είναι το κύριο στοιχείο κράματος, τα οποία χρησιμοποιούνται στις ράβδους και τα φύλλα συγκόλλησης.
- 5xxx: Κράματα στα οποία το μαγνήσιο είναι το κύριο στοιχείο κράματος και χρησιμοποιούνται σε σκάφη πλοίων, πυροβόλα όπλα και άλλα προϊόντα που εκτίθενται σε θαλάσσια περιβάλλοντα.
- 6xxx: Κράματα στα οποία το μαγνήσιο και το πυρίτιο είναι το κύριο μέταλλο και συνήθως χρησιμοποιούνται ως συστατικά κινητήρων αυτοκινήτου

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx και 6xxx παρουσιάζουν έναν καλό συνδυασμό μηχανικών, θερμικών, ιδιοτήτων σε συνδυασμό με την αντοχή στη διάβρωση. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες αντοχής στη διόγκωση ακτινοβολίας σε περιβάλλον πυρηνικών αντιδράσεων, γεγονός που καθιστά αυτά τα κράματα κατάλληλη επιλογή για δομές εντός του πυρήνα και δοχεία αντιδραστήρων συστατικών στοιχείων των ερευνητικών αντιδραστήρων (Kolluri, 2016).

- 7xxx: Κράματα στα οποία ο ψευδάργυρος (και άλλα στοιχεία, όπως ο χαλκός, το μαγνήσιο, το χρώμιο και το ζirkόνιο) είναι το κύριο στοιχείο κράματος και χρησιμοποιούνται σε δομικά στοιχεία αεροσκαφών και άλλες εφαρμογές που επιβάλλεται υψηλή αντοχή. Στην

σειρά 7xxx ανήκουν τα ισχυρότερα κράματα αλουμινίου, με δυνατότητες απόδοσης  $\geq 500$  MPa ( $\geq 73$  ksi).

- 8xxx: Κράματα που χαρακτηρίζουν διάφορες συνθέσεις. Τα κράματα της σειράς 8xxx μπορούν να περιέχουν σημαντικές ποσότητες κασσιτέρου, λιθίου ή / και σιδήρου.

Πίνακας 1 Ταξινόμηση των σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με τον μηχανισμό ενίσχυσης τους (προσαρμοσμένο από Davis, 2001)

Κράματα	Σειρά κραμάτων Αλουμινίου
<b>Εργοσκληρυνόμενα κράματα</b>	
Pure Al	1xxx
Al-Mn	3xxx
Al-Si	4xxx
Al-Mg	5xxx
Al-Fe	8xxx
Al-Fe-Ni	8xxx
<b>Precipitation-hardenable alloys</b>	
Al-Cu	2xxx



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

### **Εισαγωγή**

Η διάβρωση είναι η χημική αντίδραση ενός μετάλλου με συστατικά του περιβάλλοντος. Η οξείδωση των μετάλλων είναι δράσηθερμοδυναμικά αυθόρμητη αλλά και συνυφασμένη με αναγωγική δράση(Υφαντής, 2001). Η γνώση των τύπων διάβρωσης, των μεθόδων ελέγχου και των παραγόντων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα, επιτρέπει την σωστή στάθμιση των αποφάσεων σχετικά με την επιλογή του καταλληλότερου κράματος για συγκεκριμένες εφαρμογές και την μακροβιότητά του (Darvell, 2018).

Όπως είναι γνωστό, κατά την διαδικασία παραγωγής των μετάλλων από τα μεταλλεύματα, δαπανάται μεγάλη ποσότητα ενέργειας τοποθετώντας τα γενικά σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση. Τα μεταλλεύματα χαμηλής ενεργειακής κατάστασης είναι περισσότερο σταθερά από τα μέταλλα υψηλής ενεργειακής κατάστασης. Έτσι, τα μέταλλα τείνουν να απελευθερώνουν την ενέργεια και να επιστρέφουν στην αρχική τους ενεργειακή κατάσταση. Ως εκ τούτου, η μετάβαση αυτή μπορεί να προκληθεί εντός του κατάλληλου διαβρωτικού περιβάλλοντος. Το φαινόμενο αυτό, καλείται διάβρωση και συνιστά ένα χημικό φαινόμενο που παρατηρείται πολύ συχνά στην φύση, ως αντιπαραβολή της μεταλλουργίας και επεξεργασίας των ορυκτών(Safiuddin, 2006).

### **2.1 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΚΥΡΙΩΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ**

#### **2.1.1 Ατμοσφαιρική διάβρωση**

Η ατμοσφαιρική ή ομοιόμορφη (ή γενικευμένη) διάβρωση είναι η πιο κοινή μορφήδιάβρωσης που μπορεί να προκύψει σχεδόν παντού. Οι αιτίες της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι η (α) διαβρωτική αστική ατμόσφαιρα, η (β) ομοιόμορφη έκθεση στον αέρα και τους ρυπογόνους παράγοντες που περιλαμβάνει, η (γ) έκθεση στο ηλιακό φως, η (δ) ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας, το (ε) στρώμα υγρασίας πάνω σε μια μεταλλική επιφάνεια και η (στ) ομοιόμορφη προσρόφηση μορίων νερού (Safiuddin, 2006). Η ομοιόμορφη ή εκτεταμένη διάβρωση περιλαμβάνει ένα ομοιόμορφο ποσοστό διάβρωσης σε ολόκληρη τη μεταλλική επιφάνεια (Walsh, Ottewill & Barker, 1993).

#### **2.1.2 Διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion)**

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια πολύ τοπική μορφή προσβολής του μετάλλου και μπορεί να είναι πολύ κατευθυντική και βαθιά. Μπορεί να συμβεί όταν μια μικρή ρωγμή του προστατευτικού στρώματος, ενός ευγενούς μετάλλου (π.χ το στρώμα οξειδίων) καθιστά το υποκείμενο μέταλλο επιρρεπές σε μια διαβρωτική προσβολή. Τόσο οι εκτεταμένες όσο και οι πολύ τοπικές ρωγμές μπορεί να οδηγήσουν σε διάτρηση του μετάλλου. Το βάθος των κοιλοτήτων είναι γενικά μεγάλο σε σύγκριση με τη διάμετρό τους και υπάρχει μεγάλη ποικιλία βάθους, που κυμαίνεται από μικροσκοπικές διαστάσεις μέχρι >1 mm (Walsh, Ottewill & Barker, 1993).

### 2.1.3 Γαλβανική διάβρωση

Η γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση γενικά συμβαίνει μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που βρόσκονται σε διαβρωτικό περιβάλλον ή σε θαλασσινό νερό. Η ένταση της γαλβανικής διάβρωσης εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική δραστηριότητα των συζευγμένων μετάλλων. Οι αιτίες της γαλβανικής διάβρωσης είναι οι εξής (Safiuddin, 2006):

- Ηλεκτροχημική επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων σε διαβρωτικό περιβάλλον
- Εκτεταμένη έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον
- Διαφορές στο διαβρωτικό περιβάλλον
- Μεγαλύτερη ανοδική δραστηριότητα του ενός μετάλλου σε σύγκριση με το άλλο
- Ατέλειες επιφάνειας ή ζημιές επικάλυψης
- Μεγάλη αναλογία καθόδου προς ανόδου
- Χλωριούχα άλατα που διεγείρουν τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα σε ψυχρές περιοχές

### 2.1.4 Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion)

Η περικρυσταλλική διάβρωση σχηματίζεται κατά μήκος των ορίων των κρυσταλλικών κόκκων (π.χο σχηματισμός καρβιδίων του χρωμίου κατά την θέρμανση του ανοξειδωτού χάλυβα γύρω από τους κρυστάλλους του κράματος).

### 2.1.5 Εκλεκτική προσβολή (selective phase corrosion)

Η εκλεκτική διάβρωση είναι δυνατή σε μικρές θέσεις μίας από τις φάσεις του υλικού και προκύπτει ως απομάκρυνση ενός μόνο στοιχείου από ετερογενές στερεό κράμα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ορείχαλκου, μπορεί να εμφανιστεί σε ένα κράμα χαλκού - 40% ψευδαργύρου 60% και μάλιστα στην φάση του ψευδάργυρου παρά στην φάση του χαλκού, με αποτέλεσμα ένα πορώδες και το αποτέλεσμα συχνά αναφέρεται ως αποψευδαργύρωση (dezincification). Ένα άλλο παράδειγμα διάβρωσης επιλεκτικής φάσης είναι η διάβρωση του γκρι χυτοσίδηρου όπου οι προσθήκες του γραφίτη δρουν ως τοποθεσίες καθόδου, που οδηγούν σε ανοδική απώλεια μετάλλου στις περιβάλλουσες περιοχές. Γενικότερα, κατά τη διαβρωτική διαδικασία διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή αλλά με μεγάλη μείωση της μηχανικής του αντοχής.

#### 2.1.6 Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress corrosion)

Είναι η συνδυασμένη δράση τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων. Το αποτέλεσμα της είναι η δημιουργία λεπτών ρωγμών που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό (ευθύ ή διακλαδιζόμενο) δρόμο. Με άλλα λόγια, η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση συμβαίνει λόγω της συνδυασμένης δράσης ενός φορτίου που εφαρμόζεται στην επιφάνεια και ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος το οποίο οδηγεί σε ταχεία ανάπτυξη ρωγμών από την επιφάνεια στο σώμα του μετάλλου. Οι ρωγμές μπορεί να διαδοθούν από τον πυθμένα των κοιλοτήτων. Η κόπωση διάβρωσης δημιουργείται υπό περιστάσεις όπου οι μηχανικές καταπονήσεις συνδυάζονται με ένα διαβρωτικό περιβάλλον για να ανοίξουν οι ρωγμές και να αναπτυχθούν γρήγορα. Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση προκύπτει κάθε φορά που σε ένα μεταλλικό αντικείμενο εφαρμόζονται εφελκυστικές δυνάμεις υπό συνθήκες δυνητικά διαβρωτικές, καθώς η καταπόνηση αυξάνει την κινητήρια δύναμη για την αντίδραση. Αυτό ισχύει είτε η καταπόνηση είναι συνεχής είτε διαλείπουσα (Darvell, 2018).

## 2.2 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το συγκεκριμένο περιβάλλον στο οποίο ένα μέταλλο θα τοποθετηθεί και θα παραμείνει μπορεί να το καταστήσει ευάλωτο σε διαβρωτική προσβολή συγκεκριμένου είδους όπως τα παρακάτω

### 2.2.1 Διάβρωση κοιλοτήτων (crevice corrosion)

Ένα στενό διάκενο μεταξύ γειτονικών μεταλλικών επιφανειών επιτρέπει την έκθεση των περιβλημάτων σε υγρό αέρα ή επιτρέπει την διαρροή υγρού μεταξύ των δύο επιφανειών. Τα ίχνη υγρασίας που παραμένουν παγιδευμένα μεταξύ μιας μεταλλικής επιφάνειας και μιας μεμβράνης ή ως εναπόθεση δημιουργούν ένα περιβάλλον κατάλληλο για διαβρωτική προσβολή. Η διάβρωση κοιλοτήτων συνήθως εμφανίζεται σε κοιλοότητες, σχισμές, κενά ή ρωγμές που υπάρχουν σε μεταλλικές κατασκευές, συνιστώντας έναν πολύ διαδεδομένο τύπο διάβρωσης. Οι αιτίες της διάβρωσης είναι οι εξής (Safiuddin, 2006) :

- Παρουσία κοιλοτήτων ή ρωγμών
- Διαχωρισμένα μικρο και μακρο περιβάλλοντα
- Αποτυχία παθητικών στρωμάτων
- Στάσιμα διαβρωτικά διαλύματα
- Απουσία οξυγόνου μέσα στις κοιλοότητες
- Υγρασία παγιδευμένη σε σχισμές
- Περιστασιακή επαφή με χλωριούχα
- Απόθεση διαβρωτικών ρύπων από τον αέρα

### 2.2.2 Νηματοειδής διάβρωση

Η μορφή προσβολής στην οποία τα προϊόντα διάβρωσης σχηματίζουν ένα δίκτυο κάτω από ένα στρώμα οξειδίου πάνω στην μεταλλική επιφάνεια ονομάζεται νηματοειδής προσβολή.

### 2.2.3 Μικροβιακή διάβρωση

Η μικροβιακή διάβρωση είναι μια άλλη μορφή διάβρωσης που συμβαίνει συχνά στα μέταλλα που έρχονται σε επαφή με το έδαφος ή τη λάσπη. Οι αιτίες της μικροβιακής διάβρωσης είναι οι εξής (Safiuddin, 2006) :

- Άμεση επαφή με υγρό έδαφος
- Κυρίαρχο αναερόβιο περιβάλλον
- Αερόβια και αναερόβια μικρόβια εδάφους

#### 2.2.4 Διάβρωση στάθμης νερού (waterline corrosion)

Οι μεταλλικές επιφάνειες που ανθίστανται μερικώς στο νερό είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη διάβρωση. Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο κοντά στην επιφάνεια του νερού οδηγεί σε μια καθοδική ζώνη και προάγει πιο σοβαρή προσβολή από εκείνη που δημιουργείται στο σώμα του υγρού όπου η περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο παραμένει πολύ χαμηλότερη. Η ίδια διαφορά στη συγκέντρωση οξυγόνου συμβαίνει σε μια σταγόνα που βρίσκεται πάνω στην μεταλλική επιφάνεια. Το λεπτό στρώμα νερού γύρω από την περιφέρεια της σταγόνας έχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου σε σχέση με εκείνη στο κεντρικό παχύτερο τμήμα της σταγόνας. Η διαβρωτική προσβολή τείνει να είναι πιο έντονη ακριβώς μέσα στα άκρα της σταγόνας όπου η μεγαλύτερη διαφορά στη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου συμβαίνει κάτω από το εξωτερικό χείλος της σταγόνας.

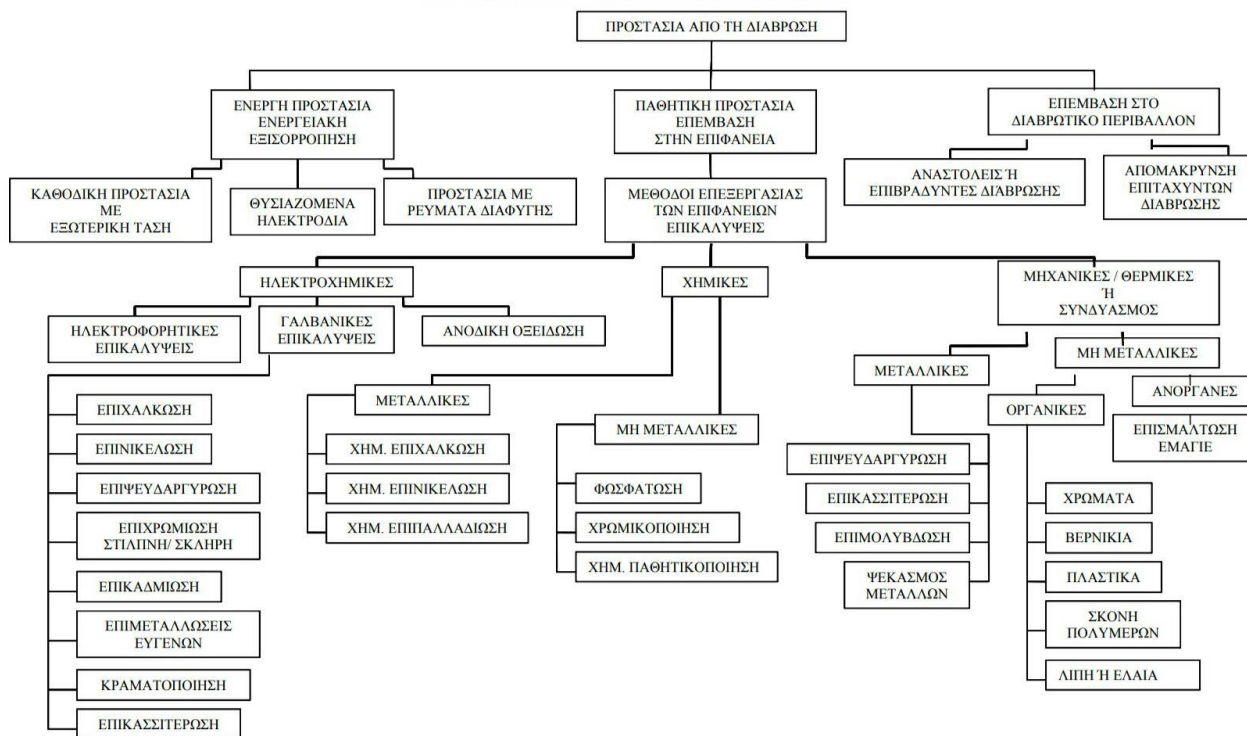
#### 2.2.5 Η τυρβώδης ροή

ενός ηλεκτρολύτη δίπλα σε μια μεταλλική επιφάνεια, μπορεί να προκαλέσει απώλεια μετάλλου μέσω διαταραχής της επιφάνειας που προκαλείται από πρόσκρουση του ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια. Σε υψηλές ταχύτητες ροής, η πτώση πίεσης στις φυσαλίδες αέρα μπορεί να γίνει αρκετά υψηλή για να προκαλέσει σπηλαιώση, όπου οι φυσαλίδες καταρρέουν και εκρήγνυνται. Τέλος, παρατηρείται διαβρωτική προσβολή όταν δύο μεταλλικές επιφάνειες υποβάλλονται σε πολύ μικρή αλλά συχνή σχετική κίνηση παρουσία ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος.

### **2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**



Υπάρχει ένας αριθμός μεθόδων προστασίας από τη διάβρωση που χρησιμοποιούνται συχνά, είτε παρέχοντας ένα φυσικό εμπόδιο είτε εσκεμμένο έλεγχο της αντίδρασης διάβρωσης. Ωστόσο, η διάβρωση, όταν ξεκινήσει, τείνει να εξελίσσεται (Darvell, 2018).



Εικόνα1.Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση (Υφαντής, 2001)

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι, σε μια πραγματική κατάσταση διάβρωσης, η ηλεκτροχημική αντίδραση διάβρωσης δεν είναι πάντοτε εύκολα αναγνωρίσιμη ή απομονωμένη. Οι προστατευτικές μέθοδοι υποδιαιρούνται ευρέως σε τέσσερις κατηγορίες:

- i) Υλικά και σχεδιασμός.
- (ii) Τροποποίηση του ηλεκτρολύτη
- (iii) Αλλαγή του δυναμικού των ηλεκτροδίων
- iv) Επιφανειακή επικάλυψη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η αναλυτική περιγραφή των παραπάνω μεθόδων δεν άπτονται του θεματικού πεδίου, επομένως παρατίθενται απλά σε επίπεδο απλής αναφοράς

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5000

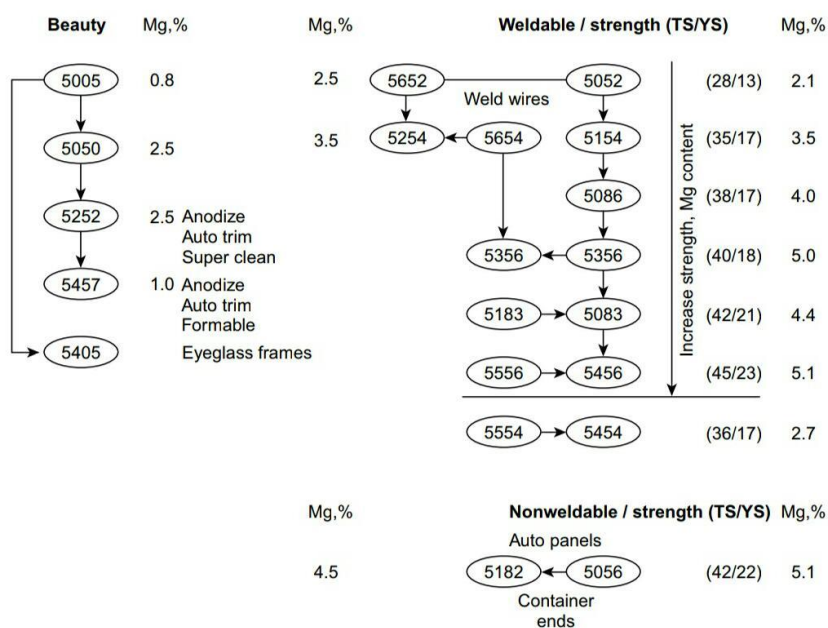
#### 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το κύριο στοιχείο στα κράματα της σειράς 5xxx είναι το μαγνήσιο. Όταν χρησιμοποιείται ως κύριο στοιχείο κράματος ή με μαγγάνιο (Manganese), το αποτέλεσμα είναι ένα σκληρό κράμα μέτριας έως υψηλής αντοχής.

Το μαγνήσιο είναι σημαντικά πιο αποτελεσματικό από το μαγγάνιο ως σκληρυντικό, περίπου το 0,8% Mg είναι ίσο με 1,25% Mn και μπορεί να προστεθεί σε πολύ αξιοσημείωτα μεγαλύτερες ποσότητες. Τα κράματα αυτής της σειράς διαθέτουν καλά χαρακτηριστικά συγκόλλησης και καλή αντοχή στη διάβρωση σε θαλάσσιες ατμόσφαιρες.

Εντούτοις, πρέπει να επιβληθούν ορισμένοι περιορισμοί αναφορικά με την ψυχρή εργασία και τις θερμοκρασίες ασφαλούς λειτουργίας που επιτρέπονται για την ποσότητα μαγνησίου σε κράματα (πάνω από 3,5% για θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 65 ° C, ή 150 ° F) για να αποφευχθεί η ευαισθησία δημιουργίας ρωγμών λόγω διάβρωσης (Davis, 2001).

Το σχεδιάγραμμα 2 δείχνει τις σχέσεις μεταξύ ορισμένων από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 5xxx.



Σχεδιάγραμμα 1. Σχέσεις μεταξύ των κοινώς χρησιμοποιούμενων κραμάτων στη σειρά 5xxx (Al-Mg). Η αντοχή εφελκυσμού (TS) και η τάση διαρροής (YS) είναι σε μονάδες ksi (Davis, 2001)

### 3.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ

Τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου στην ομάδα 5xxx είναι κατ'ουσίαν μονοφασικά δυαδικά κράματα με μέτριες έως υψηλές ιδιότητες αντοχής και ανθεκτικότητας. Η υψηλή αντοχή στη διάβρωση, ειδικά σε θαλάσσια περιβάλλοντα, είναι το κύριο πλεονέκτημα των χυτών από κράματα Al-Mg. Η καλύτερη αντοχή στη διάβρωση απαιτεί χαμηλό επίπεδο ανομοιογένειας και έτσι τα κράματα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υψηλής ποιότητας μέταλλα και να επεξεργάζονται με μεγάλη προσοχή στο χυτήριο. Αυτά τα κράματα είναι κατάλληλα για κατασκευές που προϋποθέτουν ισχυρή συγκόλληση και χρησιμοποιούνται συχνά σε αρχιτεκτονικές και άλλες διακοσμητικές ή οικοδομικές ανάγκες. Τέλος, τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου έχουν επίσης καλή κατεργασιμότητα (machinability) και ελκυστική εμφάνιση μετά την ανοδίωση (Davis, 2001).

Τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5xxx παρουσιάζουν καλή αντοχή στη διάβρωση στο θαλάσσιο νερό. Συγκεκριμένα, το 5083-H116 είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά κράματα αλουμινίου στη διάβρωση στο θαλάσσιο περιβάλλον, που χρησιμοποιείται ευρέως στη Βόρεια Αμερική λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων αντοχής του στη διάβρωση (Kumar & Milton, 2016). Οι μεταλλουργοί και οι ειδικοί διάβρωσης με στόχο την τελειοποίηση των κραμάτων που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση σε θαλάσσια περιβάλλοντα ανέπτυξαν τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου που ανήκουν στις σειρές 5000. Ωστόσο, περιπτώσεις διάβρωσης εξακολουθούν να συμβαίνουν, υποδεικνύοντας ότι πολύ συχνά η αιτία της διάβρωσης έγκειται στο σχεδιασμό της δομής και στις συνθήκες λειτουργίας στις οποίες το αλουμίνιο δεν ταιριάζει (Alcan, 1970).

Μερικά από τα συστατικά των κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (Kolluri, 2016).

Πίνακας 2 Χημική σύνθεση διαφόρων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 όπως παράγονται σε κ.β. ποσοστό αναλογίας.

ΚΡΑΜΑ	Al	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Ti	Zn	Ni
5154 (HFR vessel)	Ισορροπία 3.50	3.10–	≤0,25	≤0.05	0.15- 0.35	≤0.40	≤0.10	0.10– 0.20	≤0.20	-

5052	Ισορροπία 2.20	≤0.10	-	0.20	0.10	-	-	-	≤0.30
------	----------------	-------	---	------	------	---	---	---	-------

Το μαγνήσιο είναι το κύριο στοιχείο κράματος στη σειρά κραμάτων 5xxx. Η μέγιστη διαλυτότητα του στο αλουμίνιο είναι 17,4%, ωστόσο η μέγιστη περιεκτικότητα μαγνησίου σε κράματα αλουμινίου δεν υπερβαίνει το 5,5%. Το μαγνήσιο κατακρημνίζεται κυρίως στα όρια των κόκκων ως μια άκρως ανοδική φάση ( $Mg_5Al_3$  ή  $Mg_5Al_8$ ), η οποία παράγει ευαισθησία του κράματος στην περικρυσταλλική διάβρωση και στη διάβρωση με καταπόνηση. Τα κατάλληλα κατασκευασμένα κράματα που περιέχουν έως και 5% Mg, επιδεικνύουν σταθερότητα υπό συνθήκες κανονικής χρήσης. Η προσθήκη μαγνησίου αυξάνει σημαντικά την αντοχή του αλουμινίου χωρίς να μειώνει αδικαιολόγητα την ολκιμότητα. Η αντίσταση στη διάβρωση και η συγκολλησιμότητα είναι καλές. Στην κατάσταση ανόπτησης, τα κράματα μαγνησίου σχηματίζουν γραμμές Lüders κατά τη διάρκεια της μετατροπής.

### 3.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ-ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ

Στα σφυρήλατα κράματα, το σύστημα αυτό έχει υψηλή αντοχή στην ψυχρήλατη κατάσταση, υψηλή αντοχή στη διάβρωση και καλές συγκολλητικές ιδιότητες. Οι αυξανόμενες ποσότητες είτε μαγνησίου είτε μαγγανίου εντείνουν τη δυσκολία κατασκευής και αυξάνουν την τάση προς την πυρόλυση κατά τη διάρκεια της θερμής έλασης, ιδιαίτερα εάν υπάρχουν ίχνη νατρίου. Τα δύο κύρια πλεονεκτήματα των προσθηκών μαγγανίου είναι ότι η καθίζηση της φάσης μαγνησίου είναι γενικότερη σε όλη τη δομή και ότι για μια δεδομένη αύξηση της αντοχής, το μαγγάνιο επιτρέπει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και εξασφαλίζει μεγαλύτερο βαθμό σταθερότητας στο κράμα.

Πίνακας 3 Επιλεγμένες εφαρμογές για σφυρήλατα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 (προσαρμοσμένο από Davis, 2001)

ΤΥΠΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
5005	Προβλέπεται για εφαρμογές που απαιτούν Ανοδίωση καθώς ως ανοδιωμένη επικάλυψη είναι καθαρότερο και ελαφρύτερο από το κράμα τύπου 3003. Οι χρήσεις του περιλαμβάνουν συσκευές, σκεύη, αρχιτεκτονικές κατασκευές, ηλεκτρικές συσκευές με απαιτήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας, εξαρτήματα αυτοκινήτων, δοχεία, μεταλλικά φύλλα και υλικά γενικής χρήσης, νοσοκομειακός και

	ιατρικός εξοπλισμός, εξοπλισμός κουζίνας, πινακίδες και θαλάσσιες εφαρμογές
5052	Ισχυρότερο από το κράμα τύπου 3003 και πιο ευκατέργαστο. Καλή συγκόλληση και αντοχή στη διάβρωση. Στις χρήσεις του συμπεριλαμβάνονται δοχεία υψηλής πίεσης, ανεμιστήρες, δεξαμενές, ηλεκτρονικά και φωτοβολταϊκά πάνελ, σασί, τα τμήματα λαμαρίνας που απαιτούν αντοχή, υδραυλικοί σωλήνες, συσκευές, πολιτιστικές εφαρμογές, αρχιτεκτονικές χρήσεις, εξαρτήματα αυτοκινήτων, οικοδομικά προϊόντα, χημικός εξοπλισμός, δοχεία, οικιακές συσκευές, συνδετήρες, πινακίδες αυτοκινητοδρόμου, νοσοκομειακός και ιατρικός εξοπλισμός, εξοπλισμός κουζίνας, θαλάσσιες εφαρμογές, αμαξοστοιχίες σιδηροδρόμων, οχήματα αναψυχής, φορτηγά και ρυμουλκά
5056	Επένδυση καλωδίων, μαγνήτες (επικάλυψη), καλώδιο οθόνης, φερμουάρ, σύρμα φράχτη,Συνδετήρες κ.α
5083	Για όλους τους τύπους συγκολλούμενων κατασκευών και υπερκατασκευών,θαλάσσια εξαρτήματα και δεξαμενές με απαιτήσεις υψηλής απόδοσης συγκόλλησηςκαι μέγιστη δύναμη αρμού. Χρησιμοποιείται σε δοχεία πίεσης μέχρι 65 ° C (150 ° F), γέφυρες, φορτηγά, θαλάσσια εξαρτήματα, κεραιές τηλεόρασης και πύργοι αναμετάδοσης, εγκαταστάσεις γεώτρησης,εξοπλισμόςεκτόξευσης πυραύλων,καθώς και τα σώματα φορτηγών. Καλή αντοχή στη διάβρωση
5086	Χρησιμοποιείται σε γενικά τους ίδιους τύπους εφαρμογών με το 5083, ιδιαίτεραόπου η αντίσταση είτε η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση ή η ατμοσφαιρική διάβρωσηείναι σημαντική και υπολογίσιμη
5456	Για όλους τους τύπους συγκολλούμενων κατασκευών και υπερκατασκευών,δεξαμενές αποθήκευσης, δοχεία πίεσης, και τα θαλάσσια σκάφη. Τέλεια εφαρμογήόπου απαιτείται καλύτερη απόδοση συγκόλλησης καιδύναμη άρθρωσης. Περιορίζεται στις θερμοκρασίες κάτω 65 ° C (150 ° F)
5657	Για ανοδιωμένες εγκαταστάσεις αυτοκινήτου και πινακίδες

### 3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 5000

Τα σφυρήλατα κράματα (Al-Mg-Mn, Al-Mg-Cr) και τα κράματα χύτευσης (Al-Mg-Mn-Cr) της σειράς 5xxx έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Αυτό αντιπροσωπεύει εν μέρει τη χρήση τους σε μεγάλη ποικιλία δομικών προϊόντων και εξοπλισμό χημικής επεξεργασίας και διακίνησης τροφίμων, καθώς και σε εφαρμογές που συνεπάγονται έκθεση σε θαλασσινό νερό. Κράματα στα οποία το μαγνήσιο είναι παρόν σε ποσότητες που παραμένουν στερεές

εντός διαλύματος σωματίδια  $Al_8Mg_5$  που διασκορπίζονται ομοιόμορφα σε όλη την μήτρα γενικά είναι ανθεκτικά στη διάβρωση όπως το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο. Αυτά τα κράματα είναι επίσης πιο ανθεκτικά στο θαλασσινό νερό και σε ορισμένα αλκαλικά διαλύματα, όπως αυτά του ανθρακικού ασβεστίου και κάποιες αμίνες. Τα σφυρήλατα κράματα που περιέχουν περίπου 3% ή περισσότερο μαγνήσιο κάτω από συνθήκες που οδηγούν σε ένα σχεδόν συνεχές περικρυσταλλικό  $Al_8Mg_5$  και πολύ μικρό ίζημα μέσα στους κόκκους, μπορεί να είναι επιρρεπείς σε απολέπιση ή διάβρωση με μηχανική καταπόνηση. Έχουν αναπτυχθεί κράματα μαγνησίου για την παραγωγή μικροδομών που έχουν εκτεταμένο ίζημα  $Al_8Mg_5$  μέσα στους κόκκους, εξαλείφοντας έτσι μια τέτοια ευαισθησία.

Στα κράματα της σειράς 5xxx που περιέχουν χρώμιο, το στοιχείο αυτό υπάρχει ως υπομικροσκοπικό ίζημα  $Al_{12}Mg_2Cr$ . Το μαγγάνιο στα κράματα αυτά είναι μορφή του  $Al_6$  (Mn, Fe) ως υπομικροσκοπικά ή και μεγαλύτερα σωματίδια. Τέτοια ιζήματα και σωματίδια δεν επηρεάζουν δυσμενώς την αντοχή στη διάβρωση αυτών των κραμάτων.

### **3.5 ΒΥΘΙΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ 5000ΣΕ ΒΑΘΙΑ ΝΕΡΑ**

Έχουν εκπονηθεί αρκετές μελέτες από το 1965 για να διερευνηθεί η αντοχή στη διάβρωση αλουμινίου σε βάθος 2000 μέτρων στον Ειρηνικό Ωκεανό. Αυτές οι δοκιμές έδειξαν ότι η αντοχή στη διάβρωση σε βαθιά νερά είναι συγκρίσιμη με αυτή που παρατηρείται στην επιφάνεια, καθώς οι μορφές διάβρωσης είναι οι ίδιες (Reinhart, 1969). Το βάθος κοιλότητων στα κράματα των σειρών 5000 έχει την ίδια τάξη μεγέθους ανεξάρτητα από το βάθος βύθισης. Σε άλλα κράματα (σειρές 3000 και 6000), μπορεί να είναι υψηλότερη. Ο ρόλος του οξυγόνου έχει προβληθεί ως εξήγηση για αυτές τις διαφορές (Ailor, 1967).

Παλαιότερες δοκιμές σε βάθος 5000 μ. Στον Ατλαντικό Ωκεανό (Ulanovskii, 1979) και 3.000 μ. στον Ινδικό Ωκεανό (Sawant & Wagh, 1990) έδειξαν ότι η αντοχή στη διάβρωση του αλουμινίου δεν εξαρτάται από το βάθος βύθισης.

Αποτελέσματα άλλων μελετών διάβρωσης έδειξαν ότι η αντίσταση των κραμάτων αλουμινίου στη διάβρωση είναι η ίδια στη θάλασσα και στον ωκεανό. Πιο συγκεκριμένα, συγκριτικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα ίδια κράματα που βυθίστηκαν στη Βόρεια Θάλασσα (16-17 g.l-1 ιόντων χλωρίου και ετήσια μεταβολή θερμοκρασίας 0 - 18 ° C) και στον Αραβικό Κόλπο (26 έως 34 g.l-1 ιόντων χλωρίου και ετήσια μεταβολή θερμοκρασίας 17 - 30 ° C) δείχνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο θέσεων παρά τη διαφορά τους στην αλατότητα (λόγος 1: 2) Sukanya, Wegrelius, Pettersson & Leygraf, 2015).

Η συμπεριφορά διάβρωσης του αλουμινίου μπορεί να αλλάξει όταν το νερό είναι μολυσμένο από αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα, με την προϋπόθεση ότι τα ρυπογόνα στοιχεία τροποποιούν τη διαβρωτικότητα του θαλάσσιου νερού έναντι του αλουμινίου.

Η εμπειρία δείχνει ότι η αντοχή στη διάβρωση στο φυσικό θαλασσινό νερό είναι μάλλον διαφορετική και καλύτερη από αυτή σε υφάλμυρο νερό με την ίδια ολική αλατότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θαλασσινό νερό είναι έναυδατικό μέσο το οποίο αντιπροσωπεύει μια ισορροπία

- διαλυμένων ανόργανων αλάτων, περίπου  $30-35 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$
- εναιωρούμενης ύλης
- διαλυμένων αερίων, συμπεριλαμβανομένων των 5-6 ppm οξυγόνου,
- ζωντανής οργανικής ύλης, και
- αποσυντιθέμενης οργανικής ύλης.

Έτσι, το φυσικό θαλασσινό νερό συνιστά ένα πολύ περίπλοκο μέσο, στο οποίο η επιρροή κάθε παράγοντα, είτε χημικού (όπως σύνθεση), φυσικού (όπως θερμοκρασία) ή βιολογικού, στην διάβρωση των μετάλλων δεν μπορεί να διαχωριστεί εύκολα, σε αντίθεση με τα διαλύματα άλατος (Boyd & Fink, 1978).

Διάφορες συσκευές εξερεύνησης έχουν κατασκευαστεί από αλουμίνιο, όπως το Aluminaut που κατασκευάζεται από κράμα της σειράς 7079 T6.

### **3.6 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ 5000 ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ**

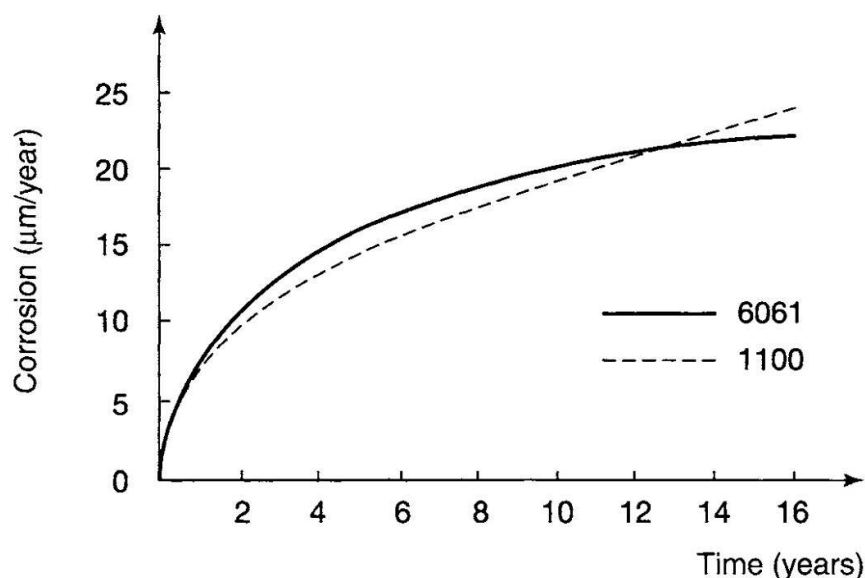
Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερος επιθετικός προς τα περισσότερα υλικά, όπως αποδεικνύεται από την ερειπωμένη κατάσταση παλαιών πλοίων και ναυαγίων που παραμένουν εγκαταλελειμμένα στον βυθό ή γύρω από τις ακτές. Έτσι, τα μέταλλα που είναι ικανά να αντέξουν αυτό το εχθρικό περιβάλλον χωρίς προστασία είναι λιγοστά συμπεριλαμβανομένου του χαλκού και του αλουμινίου. Οι μεγάλες και πολλές ερευνητικές μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά διάβρωσης του αλουμινίου σε θαλάσσια περιβάλλοντα, αποδεικνύουν ότι η διάρκεια ζωής του αλουμινίου σε θαλάσσια περιβάλλοντα είναι μακρά και μπορεί να μετρηθεί ακόμη και σε δεκαετίες. Το γεγονός αυτό, καθιστά τον ισχυρισμό ότι το αλουμίνιο είναι το μέταλλο της σύγχρονης εποχής για θαλάσσιες εφαρμογές καθόλα αποδεκτό (Alcan, 1970).

Σχεδόν όλες οι γνωστές μορφές διάβρωσης μπορεί να εμφανιστούν στο θαλασσινό νερό, εξαιτίας της υψηλήςπροσβλητικότητας αυτού του μέσου, και κυριότερα εξαιτίας τηςμεγάλης περιεκτικότητάς του σε ιόντα χλωρίου (Cl<sup>-</sup>) και τηςχαμηλής ηλεκτρικής αντίστασής του που διευκολύνει τις περισσότερες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Η ειδική αντίσταση του γλυκού νερού είναι μεταξύ 1000 και 3000 Ω×cm<sup>-1</sup>, ανάλογα με την αλατότητα. Η αντίσταση του θαλασσινού νερού είναι μόνο 10 Ω×cm<sup>-1</sup>. Έτσι, το θαλασσινό νερό διευκολύνει την ιοντική αγωγιμότητα. Ωστόσο, για τα κράματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στις θαλάσσιες εφαρμογές, οι δύοπιο κοινές μορφές διάβρωσης είναι η διάβρωση με βελονισμούς(pitting corrosion) και η γαλβανική διάβρωση (galvanic corrosion).

### 1. Διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion)

Η πιο συχνή μορφή διάβρωσης είναι η διάβρωση με βελονισμούς, δεδομένου ότι το pH του θαλασσινού νερού (8-8,5) βρίσκεται εντός του φάσματος στο οποίο το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι επιρρεπή σε αυτή τη μορφή διάβρωσης. Όπως και στα γλυκά νερά, ο ρυθμός διάβρωσης του αλουμινίου ακολουθεί τον νόμο kt<sup>1/3</sup> (Vargel, 2004). Επομένως, ο ρυθμός διάβρωσηςπροσεγγίζει ένα μέγιστο και τείνει να σταθεροποιείται με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα2

*Ρυθμός διάβρωσης στο θαλασσινό νερό (Southwell, Alexander & Humer 1965)*

Τα τελευταία 50 χρόνια έχουν δημοσιευθεί πολλά αποτελέσματα δοκιμών εμβάπτισης στο θαλασσινό νερό (Wagner & Bonewitz, 1978. Schumacher, 1979). Παρακάτω, συνοψίζονται



τα μέγιστα βάθη οξείδωσης μετά από 5 χρόνια εμβάπτισης διαφόρων κραμάτων αλουμινίου τηςσειράς 5000 (Vargel, 2004).

Πίνακας 4Βάθος διάβρωσης κραμάτων αλουμινίου της σειράς 5000 μετά από 5 χρόνια σε θαλάσσιο περιβάλλον

ΤΥΠΟΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (μm) (5 ΧΡΟΝΙΑ)
5052 H34	50-150
5056	250-400
5083	50-120
5086 H112	500-800
5154	375
5454 H34	330
5456 H321	200-550

Θα έπρεπε να σημειωθεί ότι

- το μέγιστο βάθος οξειδίων σπανίως υπερβαίνει τα 1,5 mm μετά από 10 χρόνια βύθισης στο θαλασσινό νερό,
- η απόδοση των κραμάτων των 5000 και 6000 είναι συγκρίσιμη (Vargel, 2004).

Γαλβανική διάβρωση

Η πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού ευνοεί την ανάπτυξη γαλβανικής διάβρωσης, γι 'αυτό και η γαλβανική σύζευξη σε ετερογενή κράματα μεταξύτου αλουμινίου και άλλων μετάλλων πρέπει να εξουδετερώνονται.Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, μπορούν να προβλεφθούν τρεις λύσεις:

- μόνωσητων δύο μετάλλων

- επικάλυψη των επιφανειών των δύο μετάλλων. Απαιτείται σωστή επαφή του χρώματος και οι επιφάνειες πρέπει να είναι επαλείφονται με προστατευτικό χρώμα τακτικά.
- εξουδετέρωση γαλβανικής σύζευξης μεταξύ αλουμινίου και άλλων μετάλλων μέσω αναλώσιμων ανοδίων. Αυτή η λύση υιοθετείται γενικά στα πλοία.

Άλλες μορφές διάβρωσης, όπως διάβρωση ρωγμών και διάβρωση λόγω τάσεων, μπορεί επίσης να συμβούν. Μπορούν να προληφθούν επιλέγοντας κράματα που είναι κατάλληλα για αυτόν τον τύπο περιβάλλοντος, απόειδικές προστασίες και με κατάλληλο σχεδιασμό αποφεύγοντας τις εσοχές και τις νεκρές περιοχές (Vargel, 2004).

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ

#### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στο ερευνητικό μέρος της παρούσας εργασίας, θα παρατεθούν οι πειραματικές παράμετροι της μελέτης διάβρωσης των κραμάτων Αλουμινίου-Μαγνησίου σε θαλασσινό νερό με σκοπό τον σχηματισμό της καμπύλης οξειδωσης του κράματος, μέσω της απώλειας βάρους σε σχέση με τον χρόνο.

#### 4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΩΝ

##### 4.2.1 ΔΟΚΙΜΙΑ

Για τις πειραματικές ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν 36 δοκίμια κράματος Αλουμινίου- Μαγνησίου τύπου 5054. Τα 36 δοκίμια είχαν διατομή ορθογώνιου παραλληλόγραμμου και διαστάσεις 5 × 3 cm και πάχος 1 mm. Η σύσταση των εν λόγω δοκιμίων ήταν η παρακάτω

Al: 94,9 %, Mg: 2,4 %, Zn: 0,25%, Cr: 0,05 %, Cu: 0,1%, Fe: 0,4%, Mn: 1,0%, SiO<sub>2</sub>: 0,25%, Ti: 0,2%

##### 4.2.2 ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ

Έγινε συντονισμένη προσπάθεια μέτρησης και καταγραφής του πάχους και του βάρους κάθε δοκιμίου πριν και μετά την εμβάπτιση και παραμονή του σε διαβρωτικό περιβάλλον για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ειδικότερα, τα δοκίμια παρέμειναν για διαφορετικούς χρόνους σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3,5% κβ, με σκοπό την καταγραφή της μεταβολής του πάχους τους λόγω του σχηματισμού στρώματος οξειδίων κατά την παραμονή του σε αλατούχο διάλυμα, που συνιστά μια κοινή εργαστηριακή προσέγγιση του θαλασσινού νερού. Η παρακολούθηση του σχηματισμού στρώματος επικάλυψης οξειδίων έγινε συναρτήσει του χρόνου και της θερμοκρασίας.

##### 4.2.3 ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μετά την εμβύθιση και παραμονή των δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα με σκοπό την αναπαράσταση των θαλάσσιων συνθηκών, τα δοκίμια καθαρίζονταν από τα οξείδια με διάλυμα καθαρισμού οξειδίων που δεν προσβάλλει το μέταλλο, το οποίο περιέχει 50 ml φωσφορικού οξέος (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) και 30 gr τριοξειδίου του χρωμίου (CrO<sub>3</sub>) σε 1 L νερού (H<sub>2</sub>O).

Στην συνέχεια το διάλυμα με τα δοκίμια θερμαίνεται στους 80 °C και κάθε 10 λεπτά αφαιρείτο ξεπλενόταν στεγνώνε και ζυγίζόταν. Το καθάρισμα συνεχιζόταν μέχρι να μην αλλάζει το βάρος του δοκιμίου. Αυτό γίνεται για να βεβαιωθούμε ότι δεν υπάρχει πλέον οξείδιο στο μέταλλο.

### **4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΥΡΗΜΑΤΩΝ**

#### **4.3.1 Περιγραφή καταγραφών**

Τα 36 δοκίμια τοποθετήθηκαν ταυτόχρονα στο προαναφερόμενο αλατούχο διάλυμα που προσομοιάζει τις πραγματικές διαβρωτικές συνθήκες που προκαλούνται στο θαλασσινό νερό. Ωστόσο, η διάρκεια παραμονής τους διέφερε καθώς εξάγονταν από το διάλυμα 8-10 δοκίμια σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθαρίζονταν με ειδικά διαμορφωμένο διάλυμα καθαρισμού (εμβύθιση στο καθαριστικό διάλυμα και παραμονή για 10 min), στεγνώνονταν σε συνθήκες δωματίου με φυσικά μέσα και γινόταν καταγραφή του τελικού τους πάχους, μετά την επιμελή απομάκρυνση του στρώματος οξειδίου. Για τις ανάγκες εγκυρότητας των μετρήσεων, αυτές καταγράφονταν ανά 10 min. Αν οι μετρήσεις μεταξύ τους είχαν <0,001 mm απόκλιση, λαμβανόταν υπόψιν και καταγραφόταν η τελική μέτρηση. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις είχαν μεταξύ τους απόκλιση >0,001 mm, καταγραφόταν η τυπική απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων. Μέσω της απώλειας πάχους των δοκιμίων σε σχέση με τον χρόνο, μπορεί να χαρακτηριστεί το μέγεθος του διαβρωτικού αποτελέσματος από το θαλασσινό νερό. Ο τελικός σχεδιασμός της καμπύλης διάβρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων στις πραγματικές συνθήκες επί των οποίων χρησιμοποιούνται τα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000.

Η εργαστηριακή προσομοίωση του διαβρωτικού περιβάλλοντος έγινε με την βοήθεια του προαναφερόμενου αλατούχου διαλύματος. Το διάλυμα τοποθετήθηκε σε μεγάλες πλαστικές λεκάνες, οι οποίες καλύπτονταν με διαφανή μεμβράνη για την αποφυγή εξάτμισης του διαλύματος με την πάροδο του χρόνου κατά την έκθεση. Σε κάθε περίπτωση, η διατήρηση της στάθμης του διαλύματος σε ένα σταθερό επίπεδο, εξασφαλίστηκε με τον έλεγχο και την προσθήκη απιονισμένου νερού, όποτε αυτό κρινόταν απαραίτητο.

Πριν την μέτρηση και καταγραφή του τελικού πάχους των δοκιμίων, αυτά καθαρίζονταν επιμελώς με χημικό διάλυμα από τον ερευνητή, ξεπλένονταν με άφθονο αποσταγμένο νερό και στεγνώνονταν σε φυσικές συνθήκες.

Οι μετρήσεις πάχους των δοκιμίων έγιναν με τυχαίο τρόπο σε περίοδο 4 εβδομάδων. Κάθε εβδομάδα επιλεγόταν ένα σετ δοκιμίων, των οποίων το πάχος μετρούταν και αυτομάτως αποκλείονταν από την μετέπειτα πειραματική διαδικασία των μετρήσεων.

Για τον χαρακτηρισμό και την μέτρηση των στρωμάτων οξειδίου των δοκιμίων αλουμινίου πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμασίες .

#### 4.3.2 Μέτρηση πάχους δοκιμίων

Το πάχος των στρωμάτων οξειδίου μετρήθηκε με την βοήθεια του πολύμετρου Elcometer 355Coating Thickness Gauge. Με την βοήθεια της συσκευής αποδόθηκετο μέσο πάχος των ... σημείων μέτρησης, ομοιόμορφα και αμφοτερόπλευρα. Το συγκεκριμένο όργανο παρέχει αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις σχετικές με το πάχος επίστρωσης με στόχο την εξαγωγή έγκυρων και επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων. Διαθέτει ενσωματωμένους μετρητές πάχους επίστρωσης χειρός που είναι εύχρηστοι και σταθεροί κατά τη διάρκεια της μέτρησης πάχους επίστρωσης επιτρέποντας συνεπή, επαναλαμβανόμενα και ακριβή αποτελέσματα πάχους του φιλμ του οξειδίου. Ολόκληρη η κατασκευή επιτρέπει στον χρήστη την λήψη μεμονωμένων μετρήσεων πάχους με ευελιξία χωρίς την φθοράτου δοκιμίου ή του στρώματος επικάλυψης. Ο μετρητής πάχους επίστρωσηςσυνιστά ένα κατάλληλα ελεγχόμενο, και βαθμονομημένο όργανο μέτρησης πάχους επίστρωσης βάση των συστημάτων ποιότητας, όπως περιγράφονται στο πρότυπο ISO 9001.

Προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια ενός συγκεκριμένου μετρητή, είναι σημαντικό να υπάρχουν πρότυπα σχετικά με το πάχος της επίστρωσης.

Το Elcometer προσφέρει μια ολοκληρωμένη γκάμα πιστοποιημένων φύλλων μαζί με μηδενικές πινακίδες δοκιμής για την εξασφάλιση της ακρίβειας του μετρητή πάχους επίστρωσης.

Η τελευταίαέκδοσητου μετρητή πάχους Elcometer 456 επιτρέπει την μεγιστοποίηση του ακριβούς αποτελέσματος +/- 1% του μετρητή μέσω της λεπτομερούς βαθμονόμησης τουοργάνου πάχους επίστρωσης για να ταιριάζει στην εκάστοτε εφαρμογή.

#### 4.3.3 Ζύγιση βάρους δοκιμίων

Η ζύγιση του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του ηλεκτρονικού ζυγού OHAUS GALAXY 110 LAB DIGITAL SCALE. Πρόκειται για μια ηλεκτρονική συσκευή ακριβούς ζύγισης.

#### 4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ

Με στόχο την εκτίμηση της συμπεριφοράς διάβρωσης των κραμάτων αλουμινίου από το θαλασσινό νερό, κατασκευάσθηκαν και ταξινομήθηκαν 36 δοκίμιασχήματος ορθογωνίουπαραλληλόγραμμου κράματος Αλουμινίου-Μαγνησίου (Al-Mg τύπου 5054). Τα δοκίμια αυτά, δοκιμάστηκαν σε φυσικό θαλασσινό νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 ° C). Το λουτρό εμβύθισης και παραμονής των δοκιμίων στο αλατούχο διάλυμα 3.5% NaCl. Το δείγμα θαλασσινού νερού αποθηκεύτηκε σε θερμοκρασία δωματίου σε ανοικτό δοχείο, αλλά προστατευμένο από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το περιβάλλον ήταν αποστειρωμένο και προστατευμένο από περεταίρω διάβρωση. Μετά την εμβύθιση και παραμονή των δοκιμίων στο αλατούχο διάλυμα με σκοπό την αναπαράσταση των παραθαλάσσιων συνθηκών, τα δοκίμια ξεπλένονταν με διάλυμα καθαρισμού, το οποίο συνίσταντο από 50 ml φωσφορικού οξέως ( $H_3PO_4$ ), 30 gr τριοξειδίου του χρωμίου ( $CrO_3$ ) σε 1 L νερού ( $H_2O$ ). Στην συνέχεια ακολουθούσε η θέρμανση των δοκιμίων στους 80-100° C και ο έλεγχος βάρους μέχρι σταθερού σημείου ανά 10 min.

Οι προκύπτουσες μετρήσεις υπό την μορφή απώλειας πάχους λόγω του σχηματισμού στρώματος οξειδίου θα βοηθήσουν στον σχηματισμό της καμπύλης οξείδωσης των δοκιμίων κράματος αλουμινίου (απώλεια/διαφορά πάχους σε συνάρτηση με τον χρόνο παραμονής του δοκιμίου στο αλατούχο διάλυμα).

#### 4.5 ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται τα αρχικά βάρη των δοκιμίων όπως καταγράφηκαν μέσω του ειδικού ζυγού πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας

Πίνακας 5 Παράθεση αρχικού βάρους δοκιμίων

A/A ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	A/A ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ
1	4,8963	19	4,8217
2	4,8574	20	4,8693
3	4,8638	21	4,8301
4	4,8862	22	4,8728
5	4,8474	23	4,8673
6	4,8737	24	4,8419
7	4,8611	25	4,8422
8	4,8371	26	4,8421
9	4,8507	27	4,8595
10	4,8899	28	4,8327

11	4,8186	29	4,8810
12	4,8242	30	4,8890
13	4,8642	31	4,8368
14	4,8483	32	4,8398
15	4,8407	33	4,8096
16	4,8622	34	4,8549
17	4,8698	35	4,8533
18	4,8302	36	4,8363

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΡΟΥΣ

#### 5.1.1 Μετρήσεις 1<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 6 Μετρήσεις 1ου πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 14 ημέρες)

Α/Α	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ
27	4,8595	4,8087	0,0508
25	4,8422	4,7989	0,0433
19	4,8217	4,7776	0,0441
26	4,8421	4,8009	0,0412
33	4,8096	4,7633	0,0463
18	4,8302	4,7902	0,04
32	4,8398	4,7983	0,0415
24	4,8419	4,8002	0,0417
12	4,8242	4,7779	0,0463

*Average διαφορά βάρους: 0,0444*

#### 5.1.2 Μετρήσεις 2<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 7 Μετρήσεις 2ου πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 26 ημέρες)

Α/Α	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ
5	4,8474	4,7825	0,0649
6	4,8737	4,8176	0,0561

7	4,8611	4,7971	0,064
8	4,8371	4,7838	0,0533
9	4,8507	4,7956	0,0551
14	4,8483	4,7903	0,058
15	4,8407	4,7825	0,0582
34	4,8549	4,8034	0,0515
36	4,8363	4,7777	0,0586

**Average διαφορά βάρους : 0,0577**

### 5.1.3 Μετρήσεις 3<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 8 Μετρήσεις 3ου πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 50 ημέρες)

A/A	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ
25	4,8422	4,8021	0,0401
16	4,8622	4,7955	0,0667
28	4,8327	4,7708	0,0619
29	4,881	4,8154	0,0656
3	4,8638	4,8047	0,0591
4	4,8862	4,8264	0,0598
17	4,8698	4,8098	0,06
20	4,8693	4,8084	0,0609
22	4,8728	4,8151	0,0577
21	4,8301	4,7728	0,0573

**Average διαφορά βάρους : 0,0589**

### 5.1.4 Μετρήσεις 4<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 8 Μετρήσεις 4ου πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 57 ημέρες)

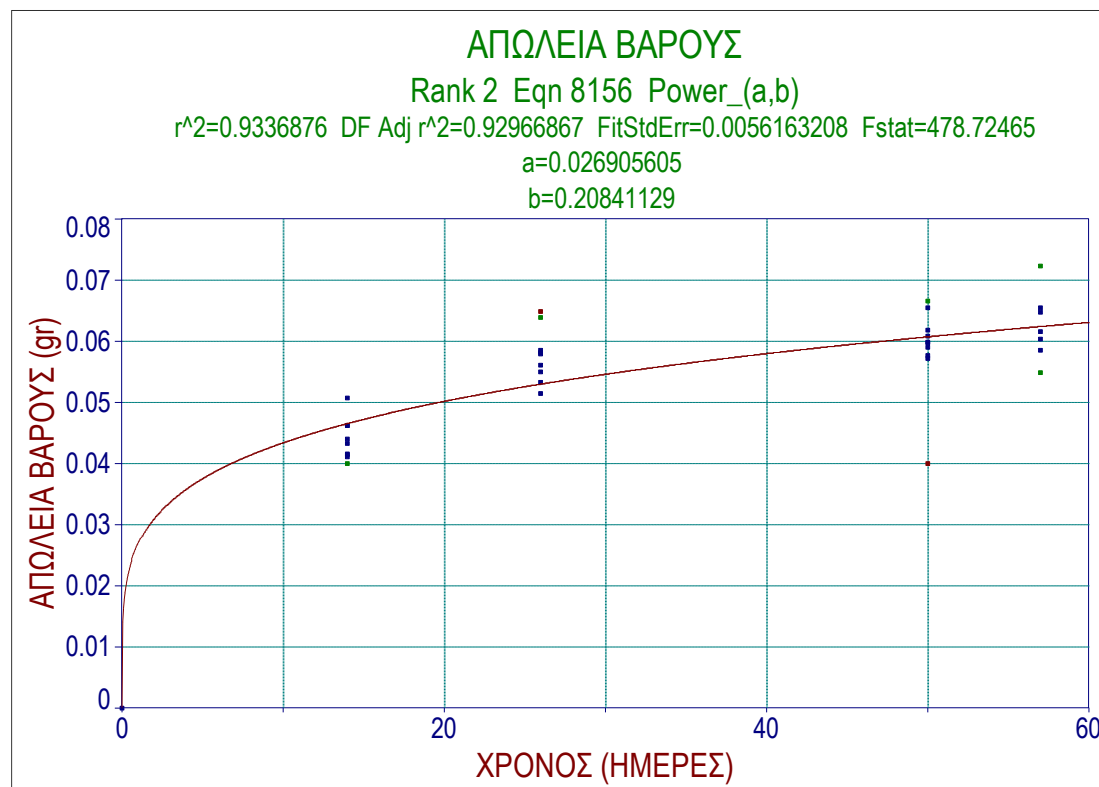
A/A	ΑΡΧΙΚΟ ΠΑΧΟΣ	ΤΕΛΙΚΟ ΠΑΧΟΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ
2	4,8574	4,7926	0,0648
10	4,8899	4,8244	0,0655
11	4,8186	4,7582	0,0604
35	4,8533	4,7947	0,0586
1	4,8963	4,8239	0,0724
31	4,8368	4,7819	0,0549
30	4,889	4,8273	0,0617

**Average διαφορά βάρους : 0,0626**



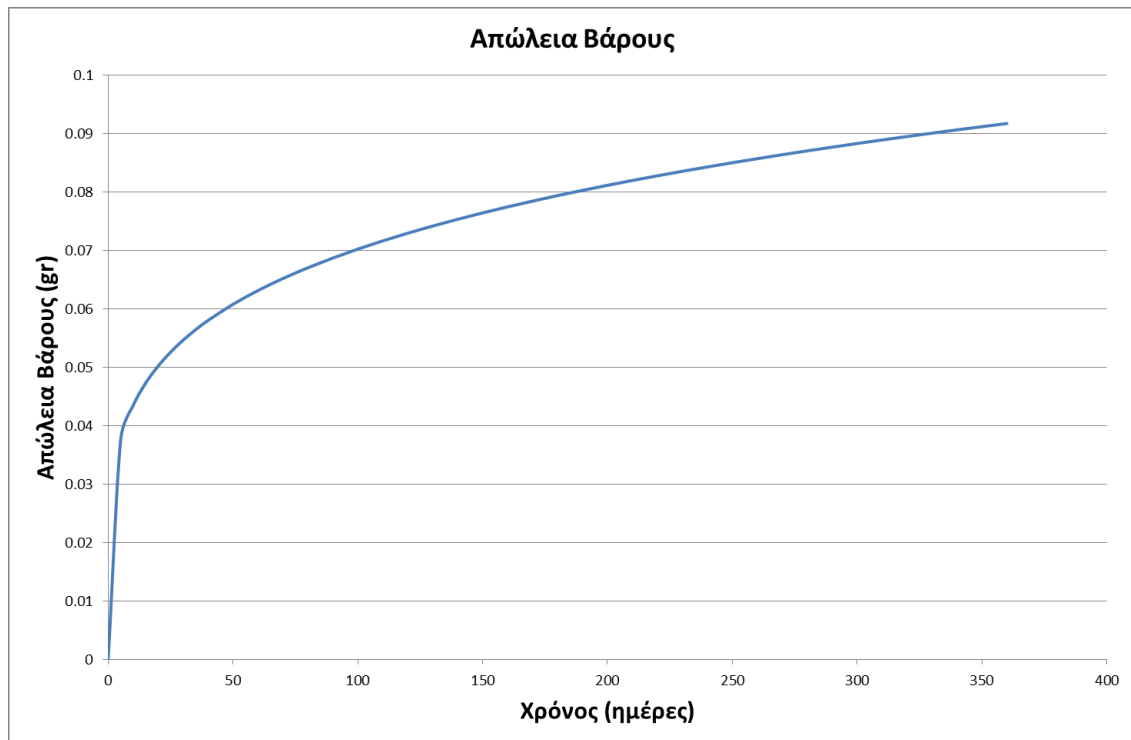
## 5.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ

Η καμπύλη οξείδωσης που προκύπτει από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της μείωσης βάρους στο χρόνο από την αφαίρεση των δημιουργημένων οξειδίων φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 3:



Διάγραμμα 3. Καμπύλη διάβρωσης από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054 σε 3.5% NaCl, μετά από 57 μέρες έκθεση. Η εξίσωση είναι :  $y=0,0269t^{0,2084}$ . Φαίνεται και η διασπορά των μετρήσεων.

Η καμπύλη ακολουθεί εκθετική εξίσωση της μορφής  $y=at^b$  όπου  $y$  είναι η απώλεια βάρους,  $a$  και  $b$  σταθερές,  $t$  ο χρόνος έκθεσης. Η εξίσωση είναι :  $y=0,0269t^{0,2084}$ . Η ίδια εξίσωση για διάστημα ενός έτους θα έχει την μορφή της καμπύλης που είναι στο διάγραμμα 4



Διάγραμμα 4. Καμπύλη διάβρωσης από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054 σε 3.5% NaCl, μετά από 365 μέρες έκθεση με χρήση της εξίσωσης  $y=0,0269t^{0,2084}$ .

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω καμπύλη, η επιφάνεια του αλουμινίου αρχίζει να δημιουργεί οξείδιο του αλουμινίου που σύντομα παθητικοποιεί την επιφάνεια και αρχίζει να μειώνει τον ρυθμό διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε χρόνο έκθεσης 26 ημέρων (μέχρι την 2<sup>η</sup> μέτρηση) η απώλεια βάρους των δοκιμίων που προκαλείται από την διάβρωση αυξάνεται σχεδόν εκθετικά. Μεταξύ της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> μέτρησης (χρόνος έκθεσης 26-50 ημέρες) η απώλεια βάρους συνεχίζει να αυξάνεται με μειωμένο ρυθμό. Ενδεχομένως, η παραπάνω παρατήρηση να οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την δημιουργία του στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του δοκιμίου του κράματος του αλουμινίου, το μέταλλο παρουσιάζει την καλή αντίστασή του στη διάβρωση, καθώς το στρώμα οξειδίου προστατεύει την επιφάνεια από την προσβολή του περιβάλλοντος του χλωριούχου νατρίου.

### 5.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ

#### 5.3.1 Μετρήσεις 1<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 9 Μετρήσεις 1ου πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 14 ημέρες)

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
8	11	9	16	13	+/- 2
32	12	7	17	13	+/- 3
24	12	9	16	12	+/- 2
25	12	11	15	13	+/- 1
19	12	11	20	14	+/- 3
18	12	11	15	13	+/- 1
27	12	10	22	15	+/- 5
13	12	10	19	15	+/- 4
26	12	10	16	16	+/- 2
12	12	11	17	14	+/- 2

#### 5.3.2 Μετρήσεις 2<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 10 Μετρήσεις 2<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 22 ημέρες)

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
10	14	12	26	17	+/- 4
36	14	12	26	17	+/- 4
6	14	12	21	17	+/- 4
7	14	12	28	18	+/- 6
5	14	11	24	16	+/- 5
34	14	12	18	17	+/- 4
15	14	12	22	17	+/- 4
14	13	13	23	16	+/- 3
9	14	12	21	16	+/- 3

#### 5.3.3 Μετρήσεις 3<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

Πίνακας 11 Μετρήσεις 3<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 50 ημέρες)

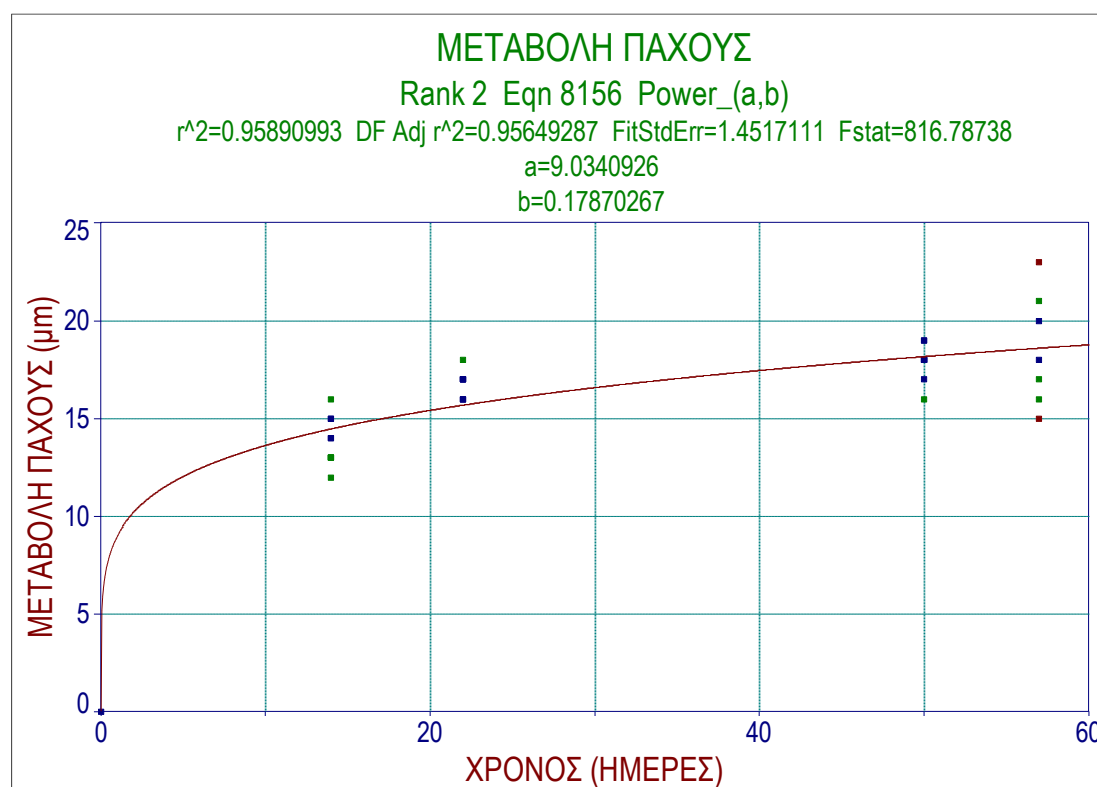
A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
22	14	12	21	17	+/- 3
21	14	12	21	16	+/- 3
20	14	12	40	19	+/- 7
4	14	14	29	19	+/- 4
3	14	12	23	18	+/- 3
17	14	13	24	18	+/- 3
16	14	13	23	18	+/- 3
28	14	14	25	18	+/- 3
29	14	12	24	18	+/- 5
23	14	12	28	18	+/- 5

### 5.3.4 Μετρήσεις 4<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών

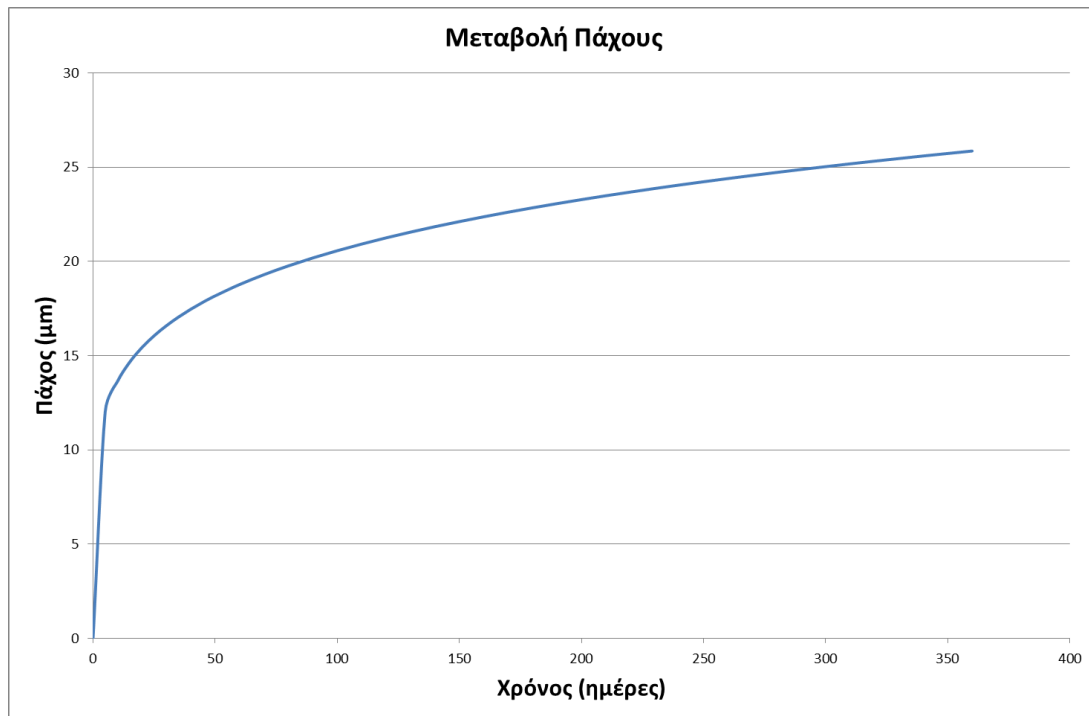
Πίνακας 12 Μετρήσεις 4<sup>ου</sup> πακέτου δοκιμών (χρόνος έκθεσης : 57 ημέρες)

A/A	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
35	12	11	20	15	+/- 3
11	13	11	28	16	+/- 5
19	14	11	25	17	+/- 5
30	14	9	55	21	+/- 11
31	14	14	26	18	+/- 3
2	14	13	26	20	+/- 4
1	15	15	46	23	+/- 7

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τις μετρήσεις των παχών του οξειδίου στον χρόνο έκθεσης. Στο διάγραμμα 5 φαίνεται η εξέλιξη των παχών στον χρόνο έκθεσης με την εξίσωση που προκύπτει από τα δεδομένα και στο διάγραμμα 6 η εξέλιξη στον ένα χρόνο με αφαρμογή της εξίσωσης. Να σημειωθεί ότι η τυπική απόκλιση είναι πολύ καλή για διάβρωση. Η εξίσωση είναι  $y = 9,034 t^{0,1787}$ .



Διάγραμμα 5. Καμπύλη πάχους οξειδίων από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054 σε 3.5% NaCl, μετά από 57 μέρες έκθεση. Η εξίσωση είναι:  $y = 9,034 t^{0,1787}$ . Φαίνεται και η διασπορά των μετρήσεων.



Διάγραμμα 6. Καμπύλη διάβρωσης από τα πειραματικά δεδομένα οξείδωσης του 5054 σε 3.5% NaCl, μετά από 365 μέρες έκθεση με χρήση της εξίσωσης  $y = 9,034 t^{0,1787}$ .

Το πάχος του οξειδίου ακολουθεί την εξίσωση που δείχνει παθητικοποίηση της επιφάνειας του κράματος.

### ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως παρατηρήθηκε μέσω της πειραματικής διαδικασίας, μετά την παραμονή των δοκιμών κράματος αλουμινίου σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου που προσομοιάζει τις συνθήκες του θαλασσινού νερού, η διάβρωση προωθείται και μεταβάλλεται με ρυθμό μειούμενο με την πάροδο του χρόνου, λόγω της δημιουργίας του παθητικού οξειδίου.

Ειδικότερα, σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας η αντίδραση οξείδωσης των κραμάτων του αλουμινίου-μαγνησίου τύπου 5054 προωθείται προς τα δεξιά με την επίδραση του χρόνου. Γίνεται φανερό ότι η διάβρωση υπό την μορφή δημιουργίας επιφανειακού στρώματος οξειδίου, μειώνεται συναρτήσει του χρόνου (σε σταθερή θερμοκρασία). Ειδικότερα οι καμπύλες διάβρωσης έχουν την μορφή  $y = a \cdot k \cdot t^b$  και για την απώλεια βάρους είναι  $y = 0,0269 k t^{0,2084}$  για την αύξηση του πάχους είναι  $y = 9,034 k t^{0,1787}$ .

- Ο μέσος όρος απωλεσθέντος βάρους των δοκιμών μετά από 14 ημέρες παραμονής στο αλατούχο διάλυμα ήταν 0,0444 με ελάχιστη παρατήρηση 0,04 και μέγιστη παρατήρηση 0,0508.
- Ο μέσος όρος απωλεσθέντος βάρους των δοκιμών μετά από 26 ημέρες παραμονής στο αλατούχο διάλυμα ήταν 0,0577 με ελάχιστη παρατήρηση 0,0515 και μέγιστη παρατήρηση 0,0649.
- Ο μέσος όρος απολεσθέντος βάρους των δοκιμών μετά από 50 ημέρες παραμονής στο αλατούχο διάλυμα ήταν 0,0589 με ελάχιστη παρατήρηση 0,0401 και μέγιστη παρατήρηση 0,0667.
- Ο μέσος όρος απωλεσθέντος βάρους των δοκιμών μετά από 57 ημέρες παραμονής στο αλατούχο διάλυμα ήταν 0,0626 gr με ελάχιστη παρατήρηση 0,0549 και μέγιστη παρατήρηση 0,0724.
- 

Τα ευρήματα αυτά, έρχονται σε συμφωνία με τα ευρήματα των περισσότερων προηγούμενων μελετών που τοποθετούν τα συγκεκριμένο τύπο κράματος στην πρώτη γραμμή επιλογής για θαλάσσιες εφαρμογές καθώς η διάβρωση που παρουσίασε είναι πολύ μικρής τάξης σε σχέση με άλλου τύπου μέταλλα γενικότερα και κράματα αλουμινίου ειδικότερα. Μάλιστα, το στρώμα οξειδίων του αργιλίου που σπεύδουν να δημιουργηθούν στην επιφάνεια του μετάλλου μετά την εμβύθιση στο θαλασσινό νερό, λειτουργεί προστατευτικά καθώς παρεμποδίζει τις περαιτέρω αλλοιώσεις στην επιφάνεια του μετάλλου. Διαπιστώνεται ότι το ίδιο το αλουμίνιο, αλλά και τα περισσότερα κράματα του παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα σε πολλές μορφές διάβρωσης. Ενδεχομένως, λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου, εντός του θαλασσινού νερού να παραμένει μονίμως καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αλουμινίου, ως ένα εμπόδιο εξάπλωσης της διάβρωσης. Η ιδιότητα αυτή, το καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλές στη δόμηση, στον κατασκευαστικό κλάδο, στη διαστημική τεχνολογία, αλλά και βάση των ερευνητικών ερωτημάτων της παρούσας μελέτης στη ναυπηγική.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν πειραματικά 36 δοκίμια κράματος αλουμινίου-μαγνησίου 5054. Στόχος του πειράματος ήταν η ποσοτικοποίηση της διαβρωτικής δραστηριότητας που υφίσταται το συγκεκριμένο κράμα στις εχθρικές συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, τα δοκίμια παρέμειναν για κυμαινόμενο χρονικό διάστημα 14-57 ημερών μέσα σε αλατούχο διάλυμα, μέχρι την τυχαιοποιημένη αφαίρεσή τους από τον ερευνητή και καταγραφή του τελικού τους πάχους και βάρους μετά την ολοκλήρωση της δοκιμασίας. Τα ποσοτικά δεδομένα που προέκυψαν από τις 14 διαδοχικές μετρήσεις με την βοήθεια των εργαστηριακών συσκευών, κρίθηκαν αξιόπιστα μετά τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης. Όπως παρατηρήθηκε, μετά την τελική ποσοτικοποίηση της απώλειας βάρους σε συνάρτηση με τον χρόνο, τα δοκίμια με την πάροδο των εβδομάδων υφίσταντο διάβρωση εντός του προσομοιωτικού περιβάλλοντος και μάλιστα, η παρατηρηθείσα διάβρωση δεν απείχε σχεδόν καθόλου από τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αφού ήταν σχεδόν εκθετική για τις ημέρες 1-23, σταθερά αυξανόμενη για τις ημέρες 23-30, σταθερή για τις ημέρες 30-57.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. National Center for Biotechnology Information. PubChem Database. Aluminum, CID=5359268, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Aluminum> (accessed on Dec. 9, 2019)
2. Venugopal, B. & Luckey, T.D. (1978), *Metal Toxicity in Mammals*, New York: Plenum Press, p. 105.
3. O'Neil, M.J. (2001) (ed.) *The Merck Index - An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*. 13th Edition, Whitehouse Station, NJ: Merck and Co., Inc., p. 60.
4. NIOSH. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards & Other Databases. U.S. Department of Health & Human Services, Public Health Service, Center for Disease Control & Prevention. DHHS (NIOSH) Publication No. 2001-145 (CD-ROM) August 2001.
5. National Research Council. *Drinking Water & Health*, Volume 4. Washington, DC: National Academy Press, 1981., p. 156
6. Reynolds, J.E.F. & Prasad, A.B. (1982). (eds.) *Martindale-The Extra Pharmacopoeia*. 28η έκδ. London: The Pharmaceutical Press, p. 926
7. *Encyclopaedia of Occupational Health and Safety*. International Labour Office. 4th edition, Volumes 1-4 1998. Geneva, Switzerland: International Labour Office, 1998., p. 62.3
8. National Institute of Occupational Safety and Health. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (full website version). <https://www.cdc.gov/niosh/npg> (accessed August 2016).
9. Lewis, R.J. *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*. 10th ed. Volumes 1-3 New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 1999., p. V2: 127
10. Starke, E.A. & Staley, Jr.J.T. (2011). Ch. 24 Application of modern aluminium alloys to aircraft in *Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, Processing and Applications*, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, P 747-783.
11. Lewis, R.J., Sr (Ed.). *Hawley's Condensed Chemical Dictionary*. 13th ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 1997., p. 40



12. Πιστοφίδης, Ν. Βούρλιας, Γ. Στεργιούδης, Γ. & Τσίπας, Δ. (2006). Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ ΩΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ, Τενικά Χρονικά, [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr\\_2006\\_3\\_pistofidis.pdf&ved=2ahUKewiRnsC2l6nmAhVxQRUIH RV8AbQQFjAAegQIAxAB&usg=AOvVaw1eai9kTBUSii6\\_Su3TdlzN](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr_2006_3_pistofidis.pdf&ved=2ahUKewiRnsC2l6nmAhVxQRUIH RV8AbQQFjAAegQIAxAB&usg=AOvVaw1eai9kTBUSii6_Su3TdlzN)
13. Browning, E. Toxicity of Industrial Metals. 2nd ed. New York: Appleton-Century-Crofts, 1969., p. 3.
14. Verbeken, G., Schoeters, D., Verween, G., De Vos, D., Pascual, B., De Corte, P., ... Pirnay, J. P. (2011). Potential release of aluminum and other metals by food-grade aluminum foil used for skin allograft cryo preservation. Cell and tissue banking, 12(3), 241–246. doi:10.1007/s10561-010-9171-y
15. Staley, J.T. and Haupin, W. (2000). Aluminum and Aluminum Alloys. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, (Ed.). doi:10.1002/0471238961.0112211319200112.a01
16. Daniel Krewski, Robert A Yokel, Evert Nieboer, David Borchelt, Joshua Cohen, Jean Harry, Sam Kacew, Joan Lindsay, Amal M Mahfouz & Virginie Rondeau (2011). Aluminium, Aluminium Oxide, and Aluminium Hydroxide. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 2 (5), P 1-269.
17. Godard, H. P. (1960). The Corrosion Behavior of Aluminum in Natural Waters. The Canadian Journal of Chemical Engineering., p 167-172.
18. Ferraris, S. & Volpone, L.M (2005). ALUMINIUM ALLOYS IN THIRDMILLENNIUM SHIPBUILDING: MATERIALS, TECHNOLOGIES, PERSPECTIVES. The Fifth International Forum on Aluminum Ships Tokyo, Japan 11-13, October, 2005
19. Donoghue, A. M., Frisch, N., & Olney, D. (2014). Bauxite mining and alumina refining: process description and occupational health risks. Journal of occupational and environmental medicine, 56(5 Suppl), S12–S17. doi:10.1097/JOM.0000000000000001
20. Sennott, S. (2004), Encyclop.of 20th Century Architecture. Taylor & Francis, p 38-40.
21. Reinhart, F.M., Corrosion of materials in hydrospace V. Aluminium alloys, US Naval Civil Engineering Laboratory, report AD-683334, January 1969.

22. Ailor W.H., Evaluation of aluminium panels exposed in the Pacific Ocean at 2 340 feet for six months, *Metallurgia*, vol. 75, 1967, p. 99-108.
23. Boyd, W.K., Fink, F.W., Corrosion of metals in marine environments, Battelle, report MCIC-78-37, March 1978.
24. Kolluri, M. (2016). Neutron Irradiation Effects in 5xxx and 6xxx Series Aluminum Alloys: A Literature Review. In book: *Radiation Effects in Materials*, Chapter: Chapter 15, Publisher: Intech, Editors: Waldemar A. Monteiro, pp.393-411 10.5772/63294.
25. Kumar, B., & Milton, M.S. (2016). Welding of 5 xxx Aluminium Alloys : A Literature Review. *IJSRSET Themed Section: Engineering and Technology*, 2(3), 165-167.
26. Alcan, A., (1970). *Handbook of Aluminum 3RD Edition* PublisherALCAN ALUMINUM CORP.
27. Southwell C.R., Alexander A.L., Humer C.W., Corrosion of metals in tropical environments. *Aluminium and Magnesium, Materials Protection*, vol. 4, 1965, p. 30.
28. Wagner R.H., Bonewitz R.A., Catalog information on the performance of aluminium in sea water, Alcoa, report NXS-3, April 1978.
29. Schumacher M., *Seawater corrosion Handbook*, Noyes Data Corporation, New Jersey, 1979
30. Vargel, C. (2004). Seawater Chapter D.3 in «*Corrosion of Aluminium*» PublishedElsevier B.V. Science, pages 335-349.DOI<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044495-6.X5000-9>.
31. Hägg - Mameng, S., Wegrelius, L., Pettersson, R. &Leygraf, C. (2015). Atmospheric Corrosion Resistance of Stainless Steel: Results of a Field Exposure Program in the Middle-East. *ACOM*, 3(3), 3-16.
32. Darvell, B.W. (2018) Corrosion Chapter 13 in book: *Materials Science for Dentistry*, A volume in Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 10th Edition Woodhead Publishing, pp. 231-262.
33. Safiuddin, Md. (2006). Occurrences of corrosion: causes and prevention. *BRAC University Journal*. 71-74.

34. Walsh, F. & Ottewill, G. & Barker, D.. (1993). Corrosion and Protection of Metals: II. Types of Corrosion and Protection Methods. Transactions of the IMF. 71. 117-120. 10.1080/00202967.1993.11871002
35. Υφαντής, Δ.Κ (2001). “ Η ορολογία της διάβρωσης –γενικοί όροι “ στο “Ομιλίες περίχρωμάτων “ ;σελ. 57-67 έκδοση ΕΕΧ Αθήνα (οι σημαντικότεροι γενικοί όροι της διάβρωσης υπο μορφή λημμάτων-γλωσσάριο στα ελληνικά-αγγλικά-γερμανικά

